

序 言

当前，新一轮科技革命和产业变革突飞猛进，世界经济数字化转型已是大势所趋。党的二十大报告中指出，要推进新型工业化，加快建设制造强国、网络强国、数字中国，促进数字经济与实体经济深度融合。工业互联网作为新一代信息通信技术与工业经济深度融合的新型基础设施、应用模式和工业生态，为工业乃至产业数字化、网络化、智能化发展提供了实现途径，是第四次工业革命的重要基石。

工业互联网学术大会作为中国通信学会工业互联网委员会的学术年会，是工业互联网领域科技工作者的学术盛会，前沿学术成果的重要发布平台。2021年中国通信学会工业互联网委员会就遴选发布了《2021工业互联网学术大会论文集》，得到广泛关注，促进了技术创新研究。为进一步激发工业互联网科技工作者的创造、创新精神，2022年中国通信学会工业互联网委员会联合中国信息通信研究院、工业互联网产业联盟依托2022工业互联网学术大会，围绕工业互联网领域继续开展论文征集活动。本次论文征集活动共收到有效投稿44篇，经专家评审，其中23篇论文被录用。入选论文包括工业互联网网络、标识、平台、安全等领域的前沿技术研究，也包含工业互联网、5G等技术在钢铁、汽车、医疗、生物医药等领域的应用成果，体现了工业互联网科技工作者较高的理论水平和科技创新能力。经作者同意，现将入选论文编入《2022工业互联网学术大会论文集》予以公开发布。

本次论文征集活动得到了学术界、产业界相关单位和人士的鼎力支持，在此表示衷心的感谢！

目录

CONTENTS

政策视阈下区域工业互联网政策协同研究	
吴俊, 张树兰	1
工业互联网研究热点及演化趋势	
白云朴, 李果	11
浅析 IT-OT 融合技术的现状与发展趋势	
付韬, 张恒升	26
工业网络新技术的研究与运营思考	
梁晓辉, 黄骅, 施晓东	33
5G URLLC 技术在汽车制造行业中的探索与实践	
范济安, 李建和, 赵兴龙, 谷蓉婷, 姜孟超, 袁占江, 张向业, 包盛花, 马欣, 谭乐 ...	43
5G URLLC 技术在智能电网中的应用研究	
李建元, 张家铭, 田经师, 魏庆伟, 王本利, 马学菊	56
基于 5G+SRV6 赋能国家级经开区智慧升级	
罗东宏, 林少泽, 龙柯	62
基于 5G 工业互联网的 AGV/移动机器人智能运维系统设计与应用	
夏鹏程, 崔继轩, 马川, 李骏	69
基于工业级 5G 的柔性机器人协同智造研究及应用	
马霄, 寇增杰, 袁留记	80
5G 行业虚拟专网在钢铁行业远程控制的应用研究	
邢燕, 徐文杰, 易祖洋	89
我国 5G+工业互联网发展面临五大挑战	
胡世良	96
浅谈工业互联网标识解析体系的发展趋势	
陈香明, 赵芳梅, 沈越	102

新型标识解析技术研究	
倪东, 霍如, 张钰雯, 黄韬	107
工业互联网标识解析体系在智慧高速公路光纤网建设运营中的应用	
江亮, 王惠, 高凯, 李士策	117
工业互联网平台的现状、趋势及发展策略研究	
吴晓晨, 施红明, 郭佳	123
模型驱动的可视化工业 APP 集成开发平台研究	
朱君, 侯庆坤, 赵甲	131
工业互联网中数字孪生系统的机理+数据融合建模方法	
李硕, 刘天源, 黄锋, 解鑫, 张金义	141
基于工业互联网安全运营中心系统的关系型数据库检索优化策略	
陶耀东, 姚晓飞, 纪胜龙, 黄东华	154
基于 5G SA+MEC 企业园区组网的安全方案	
胡兆烜, 张建敏, 冯晓丽	164
基于 5G+边缘计算的智能安防系统在工业安全生产中的应用实践	
刘鹏英, 杜召娟, 陈振宇, 赵士超, 任涛林, 胡明臣, 于海东, 林宏	176
基于数据变化率检测的控制领域信息安全行为识别方法	
马霄, 寇增杰, 袁留记	185
助力钢铁行业实现碳中和的工业互联网技术研究及应用	
杨冬靓	195
数字化技术赋能生物医药行业实现新发展	
马战凯	202

政策视阈下区域工业互联网政策协同研究

基金项目：国家重点研发计划项目（No. 2018YFB1403602）

吴俊¹，张树兰¹

（1.北京邮电大学经济管理学院，北京 100876）

摘要：我国工业互联网发展具有典型的“政策指引，建用互促”特征。本文基于政策文本计算思路，构建政策协同度算法，定量评价 29 省（市）工业互联网政策导向的网络、平台、数据、安全四大体系协同水平。研究发现东部和西部地区的四大体系协同度最高，中部地区相对偏低。各地推进四大体系协同建设的短板各异，反映地方政府认知并发展工业互联网的焦点存在差异。

关键词：工业互联网；工业互联网体系；协同研究；政策文本计算

中图分类号：F623

文献标识码：A

伴随全球范围新一轮科技革命和产业变革的蓬勃兴起，发展工业互联网已成为赋能制造业转型升级，培育数字经济新增长点的国家战略。工业互联网既是实现产业数字化、网络化、智能化发展的重要基础设施，也是促进数字经济和实体经济深度融合的关键依托和重要途径^[1]。

我国工业互联网的发展具有鲜明的自上而下“政策指引推动建用互促”的特征，经过多年的持续建设，已初步形成以网络为基础、平台为中枢、数据为要素、安全为保障的四大功能体系。四大功能体系是深入实施工业互联网创新发展战略的基础，其协同对于拓展融合创新应用、完善产业生态布局至关重要。

现有研究多围绕工业互联网架构、标准和平台体系展开，较少分析地方政府对四大功能体系建设的政策导向。本文一方面应用协同度算法评价地方政策体系协同水平，识别体系协同短板，另一方面总结东、中、西和东北地区地方政策建设工业互联网的侧重点差异。

1 分析框架

在借鉴张涛等（2020）研究^[2]的基础上，本文构建包含对象层、思路层和算法层的评价框架（如图 1 示意），定量评价 2016 年以来各省（市）工业互联网的网络、平台、数据和安全体系的协同水平。

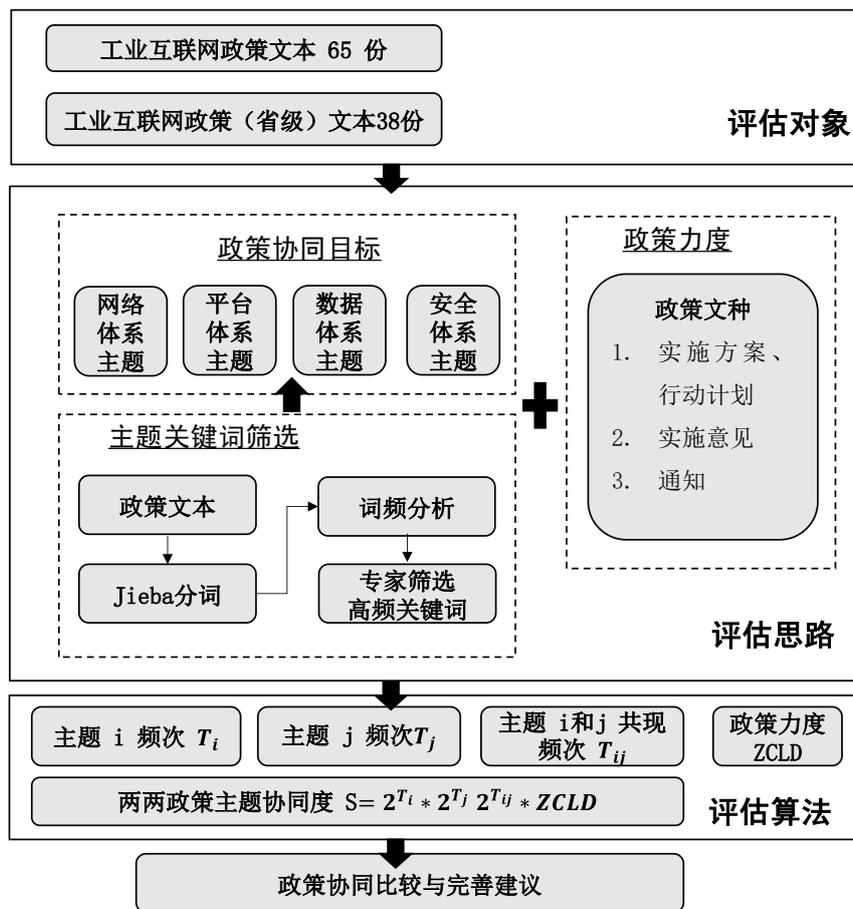


图 1 工业互联网政策评价框架

首先，以采集的包含中央和地方政府的 65 份政策文本为基础，经两位研究人合议，筛选出省（直辖市）一级的 38 份工业互联网政策作为评估对象；其次，从政策协同目标和政策力度两方面设定评估思路。政策协同目标方面，根据设置的网络、平台、数据和安全四大体系主题，综合词频分析和专家遴选，构建每类体系的代表性主题关键词；政策力度方面，考虑到评估对象都是省（直辖市）一级的政策文本，将政策文种划分为实施方案或行动计划、实施意见、通知三类以区分不同政策文件的力度。之后，基于主题关键词频次、两两主题关键词共现频次、政策力度分值计算两两政策主题的协同度。最后，根据量化分析结果给出政策完善建议。

2 研究方法

本文采用政策文本计算方法定量评价各省(市)工业互联网的四大体系两两协同水平。首先，基于图 1 评价框架的思路，通过政策文本的词频分析并结合专家意见，筛选确定网络体系、平台体系、数据体系和安全体系关键词共 40 个（表 1 所示）。

表 1 网络、平台、数据和安全四大体系主题关键词

政策协同目标	主题关键词
网络体系	网络、标识解析、5g、ipv6、二级节点、窄带物联网、pon、互联互通、互联网协议、互联网标识
平台体系	工业 app、微服务、共享、边缘计算、平台、互联网平台、软件、创新、解决方案、工业软件
数据体系	大数据、数据应用、工业数据、数据资源、供应链、产业链、上下游、数据采集、数字化、数据集成
安全体系	安全、网络安全、数据安全、安全防护、信息安全、态势感知、应急处置、平台安全、安全保障、安全保障体系

2.1 主题关键词的词频计算

通过表 1 中确定的主题关键词来分别对各地区政策文本的四个体系主题进行词频计算，从而得到每种体系主题分布情况。设置网络、平台、数据、安全体系主题关键词个数分别为 n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 ，设置 k 为政策语料的数量。计算各体系主题分布的步骤如下：

第一步，依据选定的主题关键词构建网络、平台、数据、安全四个体系主题矩阵 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 ，具体如下：

$$X_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_i\} (i=1, 2, \dots, n_1)$$

$$X_2 = \{x_1, x_2, \dots, x_j\} (j=1, 2, \dots, n_2)$$

$$X_3 = \{x_1, x_2, \dots, x_k\} (k=1, 2, \dots, n_3)$$

$$X_4 = \{x_1, x_2, \dots, x_p\} (p=1, 2, \dots, n_4)$$

第二步，设置文本语料的总容量为：

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$$

第三步，分别计算四个体系主题 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 在 k 篇政策语料中出现的频次 $P_{x_{1i}}$ 、 $P_{x_{2j}}$ 、 $P_{x_{3k}}$ 、 $P_{x_{4p}}$ ，并与文本总容量 d 进行比值计算，得到各体系主题分布情况，计算公式如下：

$$T_1 = \frac{P_{x_{1i}}}{d_\lambda} (i=1, 2, \dots, n_1; \lambda=1, 2, \dots, k)$$

$$T_2 = \frac{P_{x_{2j}}}{d_\lambda} (j=1, 2, \dots, n_2; \lambda=1, 2, \dots, k)$$

$$T_3 = \frac{P_{x_{3k}}}{d_\lambda} (k=1, 2, \dots, n_3; \lambda=1, 2, \dots, k)$$

$$T_4 = \frac{P_{x_{4p}}}{d_\lambda} (p = 1, 2, L, n_4; \lambda = 1, 2, L, k)$$

第四步，重复上述步骤，分别计算得出东、中、西和东北地区的主题分布情况。

2.2 主题关键词的共现词频计算

第一步，对 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 进行交叉计算，得出四个体系主题两两之间的共现矩阵。

第二步，构建 k 篇政策语料的词语共现矩阵。

第三步，计算主题共现强度。计算公式如下：

$$T_{ij} = \frac{P_{ij}^2}{P_i P_j}$$

其中， T_{ij} 表示主题共现强度， P_{ij} 表示两个词语在政策语料中共现的数量， P_i 和 P_j 分别表示参与计算的两个体系的主题词语在政策语料中出现的数量。

2.3 政策力度的计算

政策力度一般受到政策层级和政策类型的影响，由于本文分析的政策均为省（直辖市）级发布，因此可以只考虑政策类型的影响。借鉴彭纪生^[3]、彭川宇^[4]等研究对政策类型分设权重的思想，本文将工业互联网政策文件设置三级权重以反映不同政策文种的力度，如表 2 所示：

表 2 政策类型权重

政策类型	权重
实施方案、行动计划	1
实施意见	0.8
通知	0.6

将政策力度按照政策类型权重来测度，定义为 $ZCLD$ 。

2.4 主题协同度的计算

定义主题协同度为 s ，主题 i 的频次为 T_i ，主题 j 的频次为 T_j ，主题 i 和主题 j 的共现频次为 T_{ij} ，政策力度为 $ZCLD$ ，则主题协同度计算公式如下：

$$s = 2^{T_i} * 2^{T_j} * 2^{T_{ij}} * ZCLD \quad (1)$$

3 政策来源及分析

3.1 政策文本收集

为全面获取并梳理地方政府发布的工业互联网政策文本，研究检索了多个数据源：首先，在地方政府门户网站中以“工业互联网”或“企业上云”或“企业上云上平台”为关键词进行检索，其次，对国内知名政策文献数据库“北大法宝”（<http://www.pkulaw.cn/>）中含有“工业互联网”关键词的政

策文件进行检索；最后，将百度搜索引擎输出的“工业互联网政策”检索结果作为核对、复查参照。经过上述步骤，共收集截止到 2021 年 12 月底，中央发布的 13 份，29 个省（直辖市）出台的 38 份工业互联网政策文件。以 38 份地方出台的政策文件为对象，涉及语句 1153 条，66303 字。

3.2 政策元数据分析

中央政府和地方政府（东、中、西和东北地区）2016 年以来出台的工业互联网政策如图 2 示意。

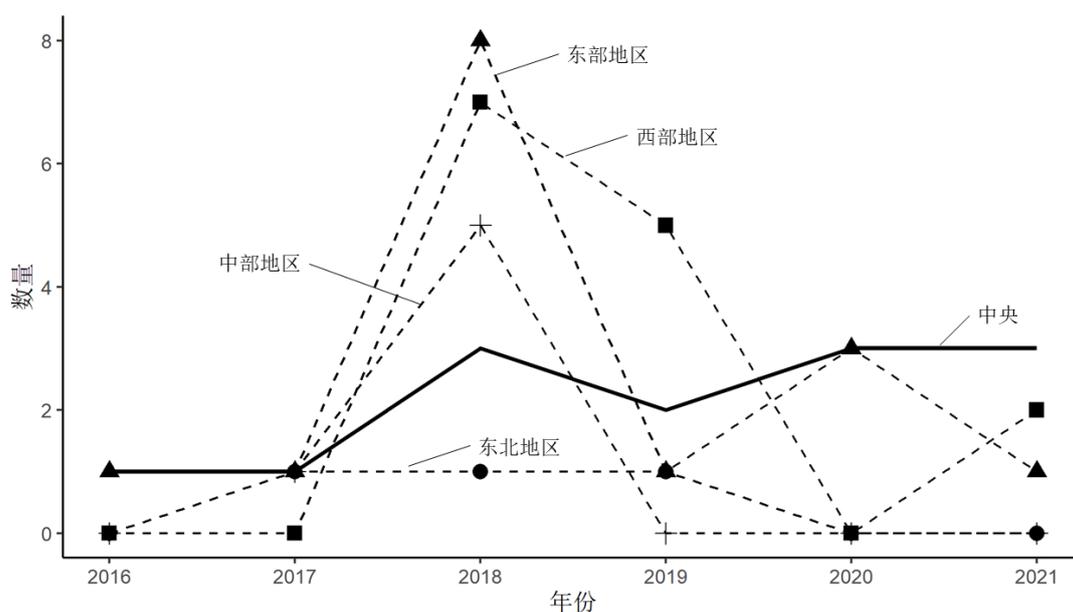


图 2 2016-2021 年中央和地方出台的工业互联网政策一览

不难发现，2016 年以来中央和地方政府出台扶持工业互联网发展的政策呈现波段式上升特征，尤其是 2018 年，发布的政策数量达到阶段高点。比较而言，东部地方政府对国家发展工业互联网的政策响应最迅速，中央部委相关政策甫一出台，当年即快速跟进。中部和东北地区紧随其后，西部地区尽管发布节奏最慢，但在 2019 年以后，政策数量和力度明显加大。

从政策文件类型看，地方发布的工业互联网政策以实施意见（17 份）、行动计划（10 份）为主。反映各省市政府在理解把握中央文件的基础上，针对本地实情发布的政策具有较强的操作性和针对性。

3.3 政策主题协同度分析

3.3.1 省市网络、平台、数据和安全体系协同度

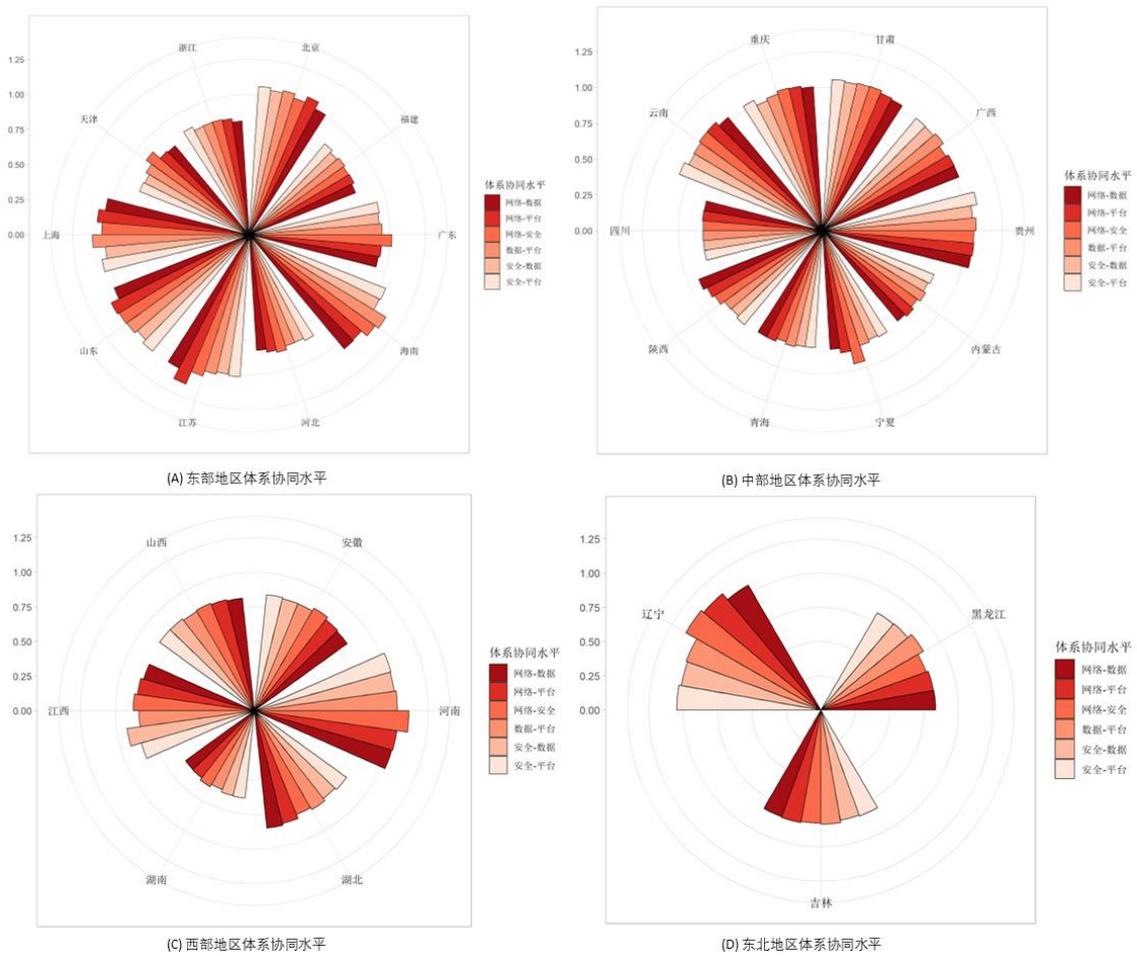


图3 各省（市）网络、平台、数据、安全体系协同水平

各省（市）网络、平台、数据、安全体系协同度如图3所示，图中顺序分别为东、中、西、东北地区。

东部地区有10个省（市）发布工业互联网政策，可以发现四大体系协同水平可分为两个梯队：北京、上海、山东、江苏与海南三省两市属于第一梯队，整体协同度较高，在（1，1.16）区间波动。北京、山东和江苏都高度重视网络和平台体系的协同；广东、浙江、天津、福建、河北五省属于第二梯队，和第一梯队协同度相比，主要在政策力度上有所差异，体现在政策类型更多为实施意见。

西部地区有10个省（市）发布工业互联网政策，其中，贵州、广西、甘肃、云南四省的四大体系协同度较高，在（1，1.09）区间波动，且贵州、云南两省明显更为关注平台与安全的协同。这些省份发布的政策类型均为实施方案或行动计划，反映地方政府高度重视，有整体谋划也有具体举措。四川、陕西、青海、宁夏、内蒙古五省（自治区）的网络、平台、数据和安全体系协同水平相对较低，这主要与这些省份发布的政策类型为实施意见有关，政策力度影响体系协同

水平。

中部地区有 6 个省（市）发布工业互联网政策，其中，河南省的四大体系整体协同度最高，在（1.01，1.12）区间波动，且更为重视网络与安全体系的协同。相对而言，湖南省的四大体系协同度在中部各省中处于偏低水平。湖北、江西、山西、安徽四省发布的工业互联网政策类型均为实施意见，湖南省发布的政策类型为通知，这些政策文件的政策力度梯次降低，也影响协同度计算结果。

东北三省均发布了工业互联网政策，其中，辽宁省的四大体系整体协同水平高于吉林与黑龙江省，在（1.03，1.14）区间波动。由于辽宁出台的政策类型为行动计划，黑龙江和吉林发布的政策类型为实施意见，行动计划相对实施意见，内容更为翔实，措施更为具体，对应的政策力度更强，形成的协同水平更高。比较而言，辽宁省发布的政策更为关注网络与平台以及网络与安全的协同，黑龙江省的政策更为关注平台与数据的协同。

考虑到各级政府对工业互联网的认知经历了从早期的网络、平台和安全三大体系，到之后确立的网络、平台、安全和数据四大体系，为确保上述研究发现的稳健性，论文也对省级政策文件的网络、平台和安全三大体系协同水平进行计算，结果与四大体系的政策协同度一致（图略）。

3.3.2 区域网络、平台、数据和安全体系协同度

为考察不同区域四大体系协同水平，分别从地理区划（东部、中部、西部和东北地区）和经济区划（长三角、京津冀、粤港澳和成渝地区）两维度展开分析，绘制网络、平台、数据和安全体系协同水平的区域横向比较如图 4 示意。

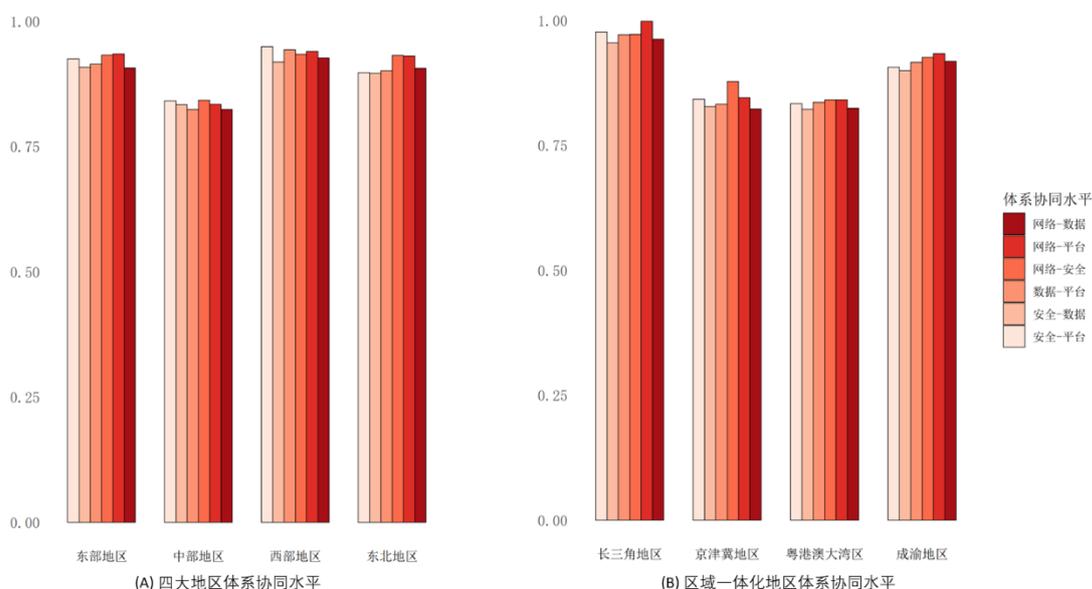


图 4 区域间网络、平台、数据、安全体系协同度比较

从图 4 的分区域横向比较看，中部地区发布的工业互联网政策中，网络、平台、数据和安全

体系的协同度明显低于东部、西部和东北地区。究其原因，一是中部地区的政策力度低于其他地区，出台的政策中仅有一个政策类型是行动计划，其他政策均为实施意见或通知，力度影响较低；二是出台的政策时间较早，多集中在 2017、2018 年，早期发布的政策对网络、平台、数据和安全体系建设协同的重视程度没有 2019 年后陆续出台的政策认知全面。

从区域一体化视角看，长三角地区地方政府发布的工业互联网政策四大体系整体协同度明显高于京津冀地区、粤港澳大湾区和成渝地区，主要原因在于长三角地区的政策多为行动计划或实施方案，内容翔实且政策力度大。

为进一步揭示地方政府建设工业互联网的侧重点，将政策文本按东、中、西和东北地区分类，绘制词语熵迁图（word shift graph），如图 5 示意：

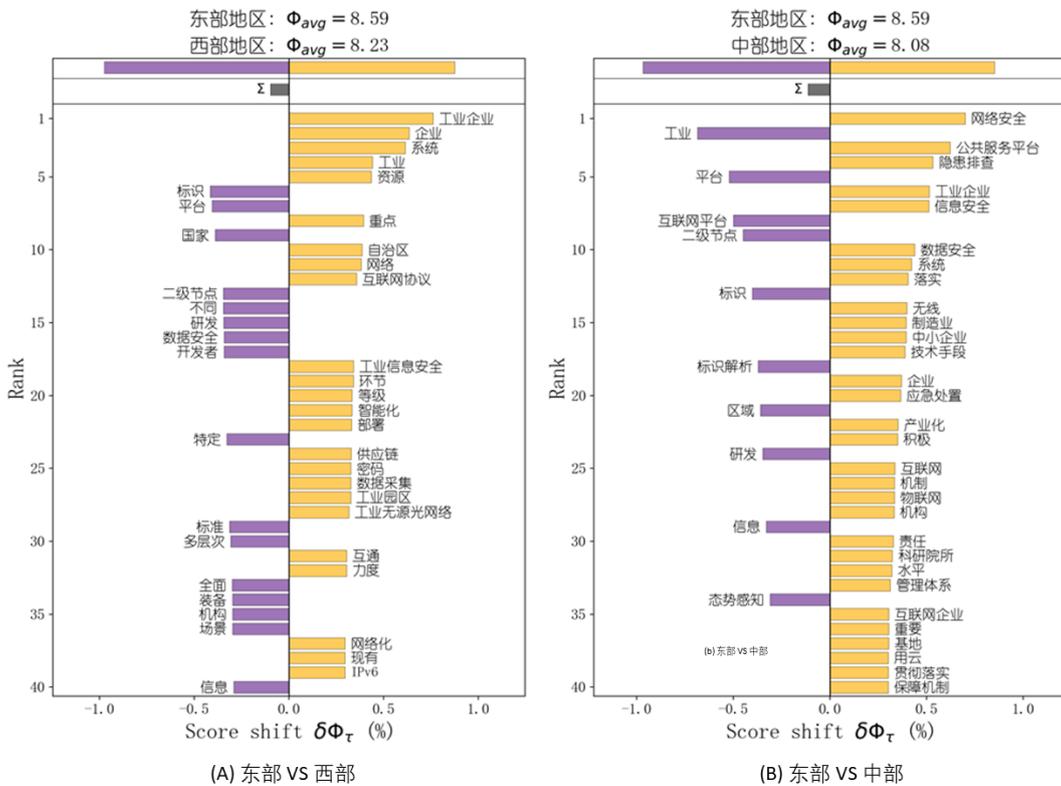


图 5 东部 VS.西部 东部 V.S. 中部政策文本词熵移比较

图 5 显示，与东部地区相比，西部地区较多提到“网络、工业信息安全、工业无源光网络”等词语，反映西部地区高度重视网络和安全体系的协同；中部地区较多提到“网络安全、隐患排查”等词语，表明中部地区十分关注安全体系建设问题。而东部地区则较多提到“标识、平台、二级节点”等词语，表明能够东部地区更为关注工业互联网标识和平台建设。

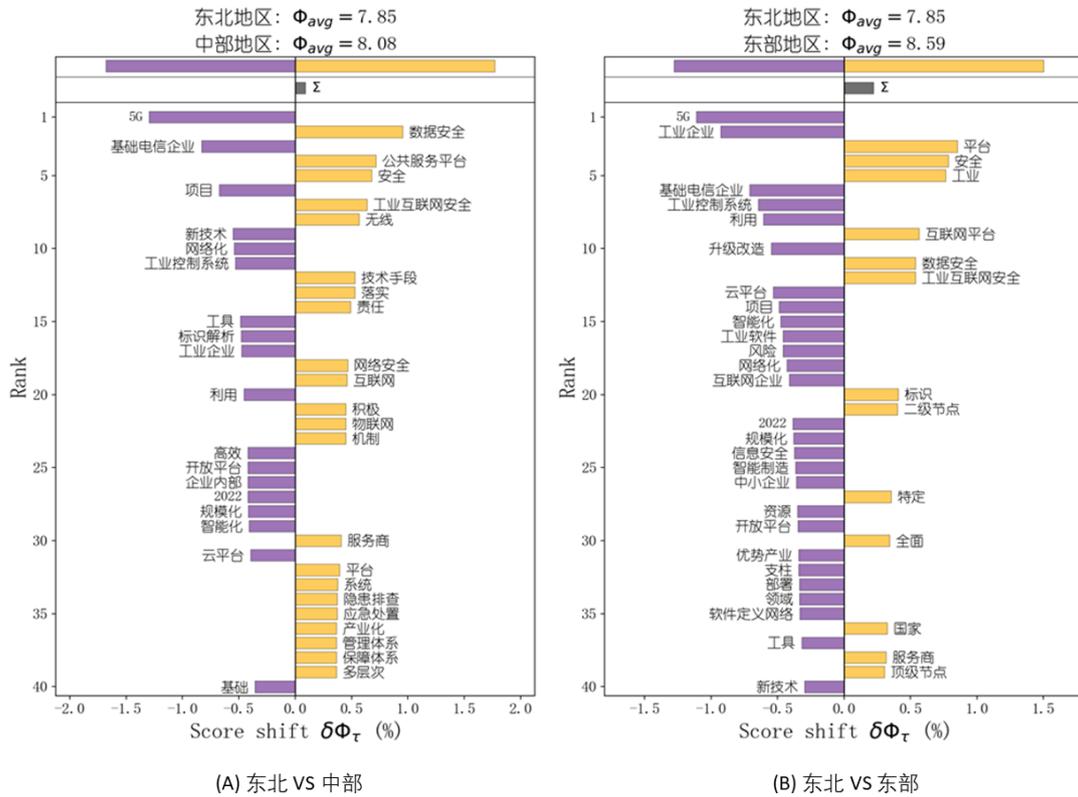


图 6 东北 VS.中部 东北 V.S. 东部网络体系关键词熵移比较

图 6 表明，与中部地区相比，东北地区更多提到“5G、基础电信企业、网络化”等词语，反映东北地区重视网络体系建设，尤其是 5G 技术带动工业互联网创新应用。而中部地区更多提及“数据安全、公共服务平台”等词语，表明中部地区非常关注安全和平台体系协同发展。

4 结语

本文应用政策协同度算法对 29 省（市）工业互联网政策量化评价发现：（1）中部地区的网络、平台、数据和安全体系的协同度明显低于东部、西部和东北地区。（2）地方政府建设工业互联网的侧重点存在差异，东部地区高度重视工业互联网的标识解析和平台建设，西部地区较为关注网络体系和安全体系的协同，中部地方政府强调安全体系与平台体系的协同发展，东北地区更为看重 5G 新技术带动工业互联网的应用创新。

针对上述分析，提出政策建议：一是加强工业互联网政策在不同区域落地实施的成效评估，针对论文指出的政策协同短板，提升各级政府对工业互联网四大体系协同重要性和必要性的认知水平；二是强化“以用促建，建用并举”的指导方针，通过工业互联网应用的规模化发展，暴露网络、平台、数据和安全体系协同发展的的问题，明晰改进方向；三是应用多种政策工具组合，激励并吸引更多市场主体“共建共营共享”网络、平台、数据和安全体系，形成政府与市场协同共促的

合力。

参考文献

- [1] 任保平.工业互联网发展的本质与态势分析[J].人民论坛,2021(18):88-91.
- [2] 张涛,马海群.基于政策文本计算的开放数据与数据安全政策协同研究[J].情报理论与实践,2020,43(06):149-155+141.
- [3] 彭纪生,孙文祥,仲为国.中国技术创新政策演变与绩效实证研究(1978-2006)[J].科研管理,2008(04):134-150.
- [4] 彭川宇,刘月.政府数据开放政策三维分析框架构建及实证研究[J].图书情报工作,2021,65(06):12-22.
- [5] 李江,刘源浩,黄萃等.用文献计量研究重塑政策文本数据分析——政策文献计量的起源、迁移与方法创新[J].公共管理学报,2015,12(2):138-144+159.
- [6] E.M.Trauth.An integrative approach to information policy research[J].Telecommunications Policy,1986,10(1):41-50.
- [7] 裴雷,孙建军,周兆韬.政策文本计算:一种新的政策文本解读方式[J].图书与情报,2016(06):47-55.
- [8] 黄萃,任弢,张剑.政策文献量化研究:公共政策研究的新方向[J].公共管理学报,2015(2):129-137.
- [9] 张涛,蔡庆平,马海群.一种基于政策文本计算的政策内容分析方法实证研究——以互联网租赁自行车为例[J].信息资源管理学报,2019,9(01):66-76
- [10] 盛东方,尹航.基于政策文本计算的突发公共事件下中小企业扶持政策供需匹配研究——以新冠肺炎疫情为例[J].现代情报,2020,40(08):10-19.
- [11] 马永开,李仕明,潘景铭.工业互联网之价值共创模式[J].管理世界,2020,36(08):211-222..

作者简介

吴俊: 北京邮电大学经济管理学院副教授, 博士生导师, 长期从事新一代信息技术驱动的服务创新研究。

张树兰: 北京邮电大学经济管理学院硕士研究生, 从事文本挖掘与政策文本量化分析研究。
通信地址: 北京市海淀区北太平庄街道北京邮电大学。邮编: 100876。联系电话: 18822027385。
电子信箱: 18822027385@163.com。

工业互联网研究热点及演化趋势

基金项目：国家社科基金青年项目（20CGL061）；教育部人文社科青年基金（19YJC790002）

白云朴，李果

（南京邮电大学管理学院，南京 210093）

摘 要：本文以 Web of Science 核心合集数据库为数据来源，运用科学知识图谱法，借助 CiteSpace 软件对工业互联网领域的文献产出情况、研究成果分布、研究热点及其演化趋势进行分析，以探究工业互联网研究现状。研究发现：一是工业互联网研究领域的文献数量呈不断上升趋势，按照年发文量可将工业互联网研究划分为起步探索期和快速发展期。二是中国和美国是开展工业互联网领域研究的主力国家，其中我国在工业互联网研究领域拥有较多的权威研究机构和高产作者。三是工业互联网的研究出现学科交叉融合发展趋势。四是工业互联网领域的研究热点可归为工业互联网的概念和架构体系研究、工业互联网核心技术和工业互联网落地应用研究三大类。五是工业互联网研究由最初与工业互联网紧密相关的基础技术研究以及技术研究中所面临的挑战向工业互联网应用研究、安全问题、资源分配和资源管理研究扩展。

关键词：工业互联网；文献计量；科学知识图谱法；研究热点；演化路径

中图分类号：G301

文献标识码：A

Research hotspot and evolution trend of industrial Internet

BAI Yunpu, LI Guo

(School of management, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210093)

ABSTRACT: This paper takes the web of science core collection database as the data source, uses the scientific knowledge map method, and uses CiteSpace software to analyze the literature output, research results distribution, research hotspots and their evolution trends in the field of industrial Internet, so as to explore the research status of industrial Internet. The research findings are as follows: first, the number of documents in the field of industrial Internet research is on the rise. According to the annual number of documents, the industrial Internet research can be divided into the initial exploration period and the rapid development period. Second, China and the United States are the main countries to carry out research in the field of industrial Internet. Among them, China has many authoritative research institutions and high-yield authors in the field of industrial Internet research. Third, there is a trend of interdisciplinary integration in the research of industrial Internet. Fourth, research hotspots in the field of industrial Internet can be divided into three categories:

Research on the concept and architecture system of industrial Internet, research on the core technology of industrial Internet and Research on the implementation and application of industrial Internet. Fifthly, the research on industrial Internet has expanded from the basic technology research closely related to industrial Internet and the challenges faced in technology research to the research on industrial Internet application, security issues, resource allocation and resource management.

KEY WORDS: industrial internet; bibliometrics; atlas of scientific knowledge; research hotspot; evolution path

2021 年 12 月 28 日, 我国工信部出台《“十四五”智能制造发展规划》, 强调加快工业互联网、物联网、5G 等新型网络基础设施规模化部署, 以新一代信息技术与先进制造技术深度融合为主线, 深入推进制造业数字化转型、智能化升级。工业互联网作为新一代信息通信技术与工业经济深度融合的全新工业生态、关键基础设施和新型应用模式, 已成为推动现代制造业数字化、网络化、智能化转型升级的重要突破口。

“工业互联网”概念是由美国通用电气公司 (GE) 于 2012 年 11 月首次提出的, GE 主张基于互联网技术实现人机协同和智能交互, 提高工业生产效率, 从而推动工业转型升级^[1]。随后, 通用电气公司联合另外四家 IT 巨头组建了工业互联网联盟 (IIC), 将这一概念大力推广开来。目前, 国内外学者已经围绕“工业互联网”展开了较为丰富和深入的研究, 但有关工业互联网研究进展分析尚为鲜见。因此, 为厘清工业互联网领域的研究现状, 有必要对工业互联网领域的现有研究进展进行全面系统的梳理。鉴于此, 本文采用文献计量研究对工业互联网领域的研究文献进行分析, 以探究工业互联网研究领域的文献产出情况、研究成果分布、研究热点及其演化趋势, 从而深刻把握工业互联网研究现状。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

由于“工业互联网”概念是由美国通用电气公司于 2012 年 11 月首次提出的, 因此本文将文献检索时间段设定为 2012 年 11 月 1 日至 2022 年 4 月 1 日。本研究文献数据来源于 Web of Science 核心合集数据库。以“Industrial Internet of Things”为主题词, 文献类型为“Article”和“Review”, 进行高级检索, 初步检索得到 5529 篇英文文献。为保证文献质量, 通过阅读相关文献的摘要和关键词, 剔除与工业互联网不相关的文献, 最终保留了 1105 篇英文文献。

1.2 研究方法

本研究运用科学知识图谱法, 科学知识图谱法是将某研究领域的科学知识进行可视化从而展示某研究领域的知识基础、研究热点、演化路径的一种分析方法。通过使用 Citespace 软件对国内外工业互联网相关文献进行合作网络、关键词共现和共被引分析, 以探索国内外工业互联网研究领域的文献产出情况、研究成果分布、主要研究作者和研究机构、研究热点及演化趋势。

2 工业互联网领域的文献发文量及研究成果分布

2.1 工业互联网领域的文献发文量

文献数量变化反映了学术界对工业互联网领域的关注变化情况。为了解工业互联网研究领域的发文量变化趋势，以时间为横轴，以每年发表论文的篇数为纵轴，绘制出近 10 年的发文量变化趋势图（图 1）。从年度论文发表数量来看，2012 年 11 月 1 日至 2022 年 4 月 1 日期间，工业互联网领域发文量总体上呈上升趋势。按照每年发文量情况可以把近 10 年工业互联网研究分为两个时期，即“起步探索期（2012-2017 年）”和“快速发展期（2018-2022 年）”。自 2012 年 11 月美国通用电气公司在白皮书《工业互联网：打破智慧与机器的边界》中首次提出“工业互联网”概念，工业互联网研究就进入了“起步探索期”，此阶段工业互联网领域的发文量较少，但呈逐年上升趋势。2018 年是一个重要的转折点，随着工业互联网政策的推动和工业互联网潜在价值的挖掘，工业互联网已经开始在多领域落地应用，学术界对工业互联网领域的关注度持续攀升，发文量首次突破一百，工业互联网领域研究从“起步探索期”过渡到“快速发展期”，并且“快速发展期”内发文量呈现爆发式增长趋势，说明工业互联网领域有较大的研究突破。

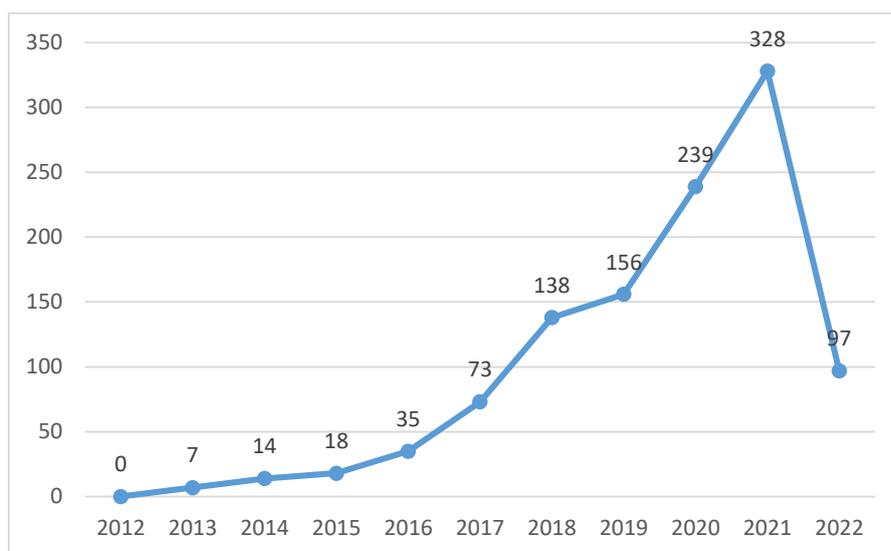


图 1 年文献发表数量图

2.2 工业互联网领域的研究成果分布

(1) 国家合作分析

运用 CiteSpace 软件得到工业互联网研究文献的国家共现知识图谱（见图 2），可以发现中国是工业互联网领域发文量最多的国家，共计 475 篇，占有所有发文量的 42.99%，是工业互联网研究领域的先锋。美国以 179 篇位居第二，说明美国在工业互联网研究领域也处于相对领先的地位。此外，英国、印度、韩国、加拿大、德国、西班牙、沙特阿拉伯、澳大利亚和意大利等国家发文量相对较多。可以看出，工业互联网研究领域形成了以中国为中心，其他国家为周边的研究

网络。在网络中，各国之间联系特别密切，尤其是中国和美国于其他国家之间的联系。

CiteSpace v. 5.8.R4 (64-bit)
 April 27, 2022 3:29:21 PM CST
 WoS: D:\论文\工业互联网\英文数据\data
 Timespan: 2015-2022 (Slice Length=1)
 Selection Criteria: g-index (k=25), LRF=3.0, LBY=8, e=2.0
 Network: W=81, E=450 (Density=0.1989)
 Largest CC: 75 (52%)
 Nodes Labeled: 1.0%
 Pruning: None

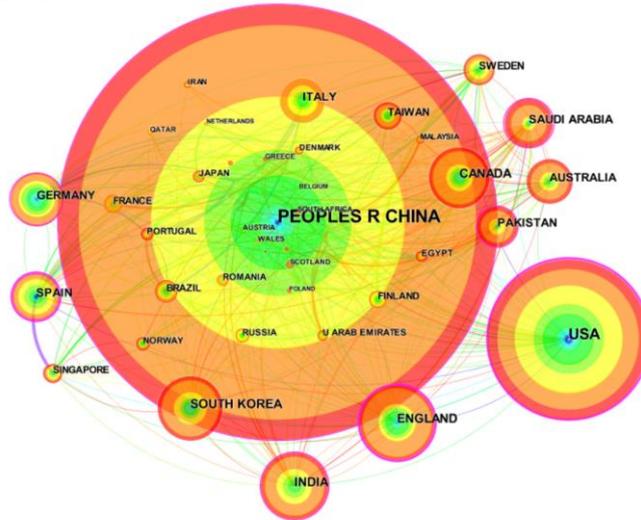


图2 国家合作知识图谱

(2) 主要作者分析

通过对工业互联网领域论文发表的高产作者分析（见图3），发现发文量最多的是印度学者 NEERAJ KUMAR 和中国学者 FEI TAO，均发表工业互联网相关论文 11 篇。其次，发文量在 3 篇及以上的作者共 51 位，发表论文共 224 篇，占样本的 20.27%。此外，工业互联网领域主要以合作团体研究为主，但各团体之间合作较少。

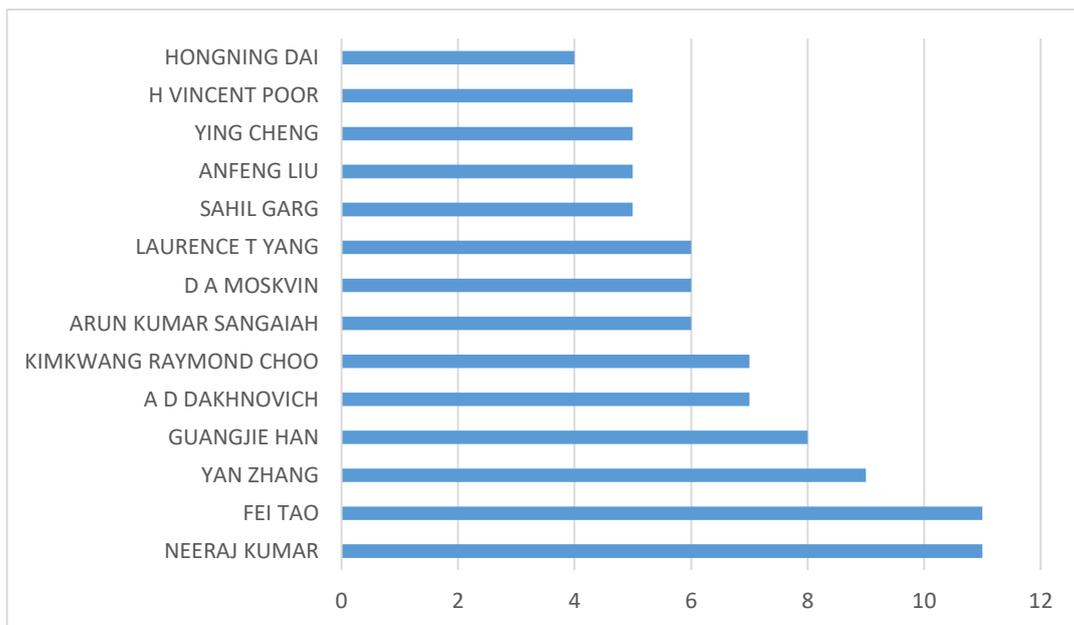


图3 工业互联网研究领域高产作者 TOP15

（3）核心科研机构分析

进一步对工业互联网研究领域发文量前十的科研机构进行统计，如图 4 所示。可以发现中国研究机构在工业互联网研究领域中具有较高的学术影响力。其中，北京邮电大学以 27 篇发文量位列第一，西安电子科技大学和中国科学技术大学以 25 篇并列第二位。在排名前十的研究机构中，中国有 8 所，韩国 1 所，沙特阿拉伯 1 所，这表明我国在国际工业互联网研究领域参与度较高，拥有较多高产的权威研究机构，并且高度重视工业互联网领域研究。此外，中国各研究机构之间的联系非常紧密，相互协作，已形成了国内工业互联网研究网络。

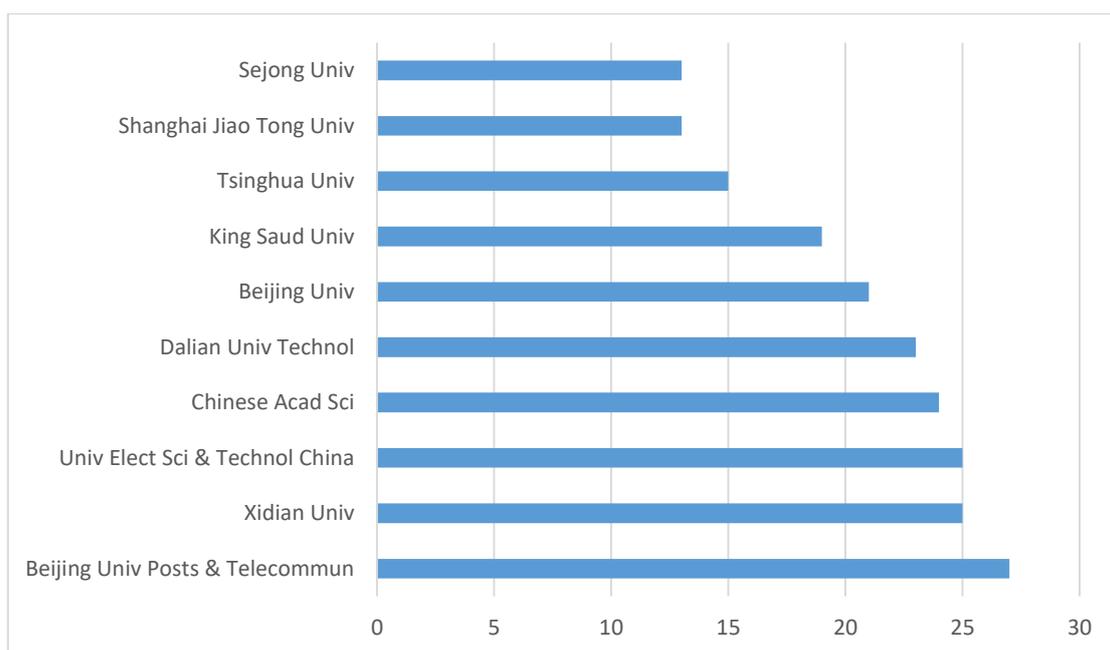


图 4 工业互联网领域排名前十的高产机构

（4）主要期刊统计分析

进一步分析工业互联网领域期刊共被引频次排名前十的期刊（见图 5），发现《IEEE Transactions on Industrial Informatics》以被引频次 664 次位居第一，同时还是工业互联网领域发文量最多的期刊，共计发表论文 162 篇，该期刊的影响因子为 10.25，是工程领域和计算机科学领域的顶级期刊，因此该期刊为工业互联网领域提供了坚实的知识基础。其次，《IEEE Access》、《IEEE Internet of Things Journal》和《IEEE COMMUNICATIONS MAGAZINE》的共被引频次分别为 517、500、355，影响因子分别为 3.367、9.471、9.619，均是计算机科学领域、工程领域和通信领域的顶级期刊，这也表明工业互联网是一个集计算机科学、工学和通信学的综合性交叉学科。

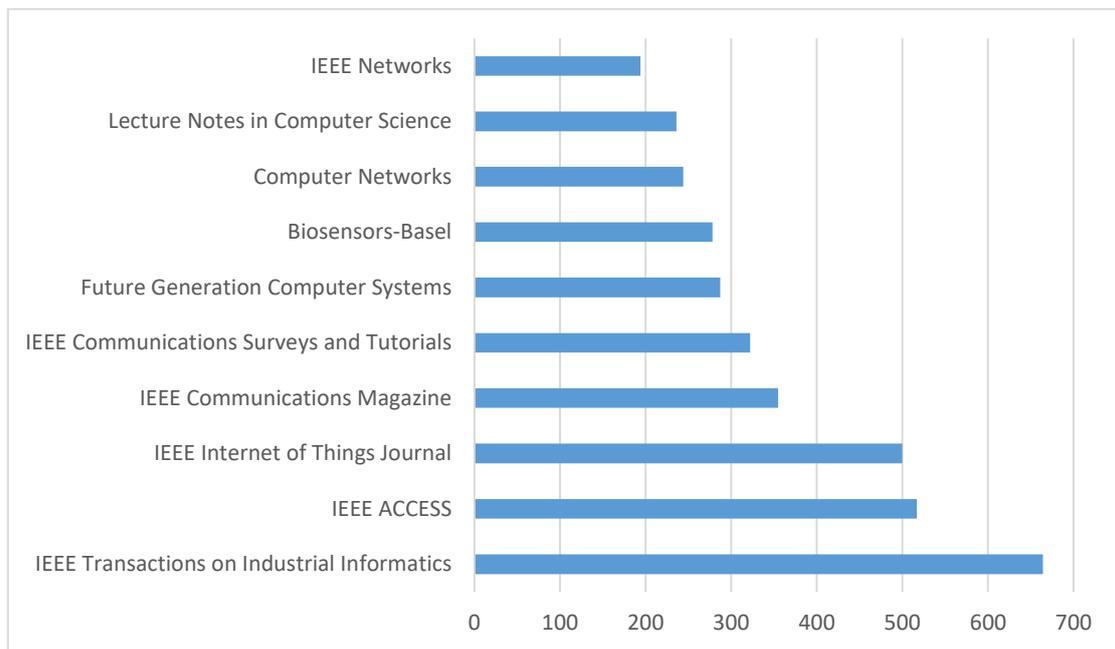


图 5 工业互联网领域被引频次排名前十的期刊

3 工业互联网领域的研究热点

本文对工业互联网研究热点进一步分析，得到关键词共现知识图谱（见图 6）。文献中的关键词通常高度凝练和概括了文献研究主题，因此，高频关键词集中反映了该领域的研究热点。为了确定工业互联网国际研究领域出现的高频关键词，本文借鉴 Donohue 提出的高频低频词模型，如式（1）所示，其中 n 是研究领域高频关键词的临界值， I 是指研究领域中出现过 1 次的关键词数量。通过对关键词进行梳理，最后确定工业互联网研究领域一共有 494 个关键词，其中只出现过一次的关键词有 99 个，算出临界值为 13.57，因此最终确定工业互联网研究领域的高频关键词一共有 78 个，本文列出排名前 15 的高频关键词，如表 1 所示。

$$n = \frac{1}{2}(-1 + \sqrt{1 + 8I}) \quad (1)$$

表 1 工业互联网研究领域所发表文献出现的高频关键词（top15）

序号	关键词	词频	中介中心性
1	Industrial internet of thing	517	0.04
2	Internet of thing	370	0.06
3	System	145	0.05
4	Security	141	0.03
5	Blockchain	100	0.02
6	Network	87	0.03
7	Industrial 4.0	72	0.03
8	Cloud computing	71	0.02
9	Wireless sensor network	69	0.06
10	Optimization	68	0.03

序号	关键词	词频	中介中心性
11	Big data	64	0.05
12	Architecture	64	0.01
13	Design	60	0.05
14	Protocol	58	0.08
15	Framework	57	0.05

通过进一步提取高频关键词有 Industrial internet of thing (工业互联网)、Internet of thing (物联网)、system (系统)、Security (安全性)、Blockchain (区块链)、Network (网络)、Industrial 4.0(工业 4.0)、Cloud computing(云计算)、Wireless sensor network(无线传感器网络)、Optimization (优化)、big data (大数据)、Architecture (结构)、Design (设计)、Protocol (协议)、Framework (框架)、edg computing (边缘计算)、privacy (隐私问题)等(见表 1), 这些关键词不是孤立存在和发展的, 而是相互联系, 相互影响, 共同反映了工业互联网领域的三大研究热点, 即工业互联网的概念和架构体系研究、工业互联网核心技术和工业互联网应用研究。

CiteSpace, v. 5.6.R4 (64-bit)
 April 28, 2022 4:07:31 PM CST
 WoS: D:\论文\工业互联网\英文数据\data
 Timespan: 2013-2022 (Slice Length=1)
 Selection Criteria: g-index (k=25), LRF=3.0, LBY=5, e=1.0
 Network: N=516, E=1441 (Density=0.0108)
 Largest CC: 487 (94%)
 Nodes Labeled: 1.0%
 Pruning: Pathfinder

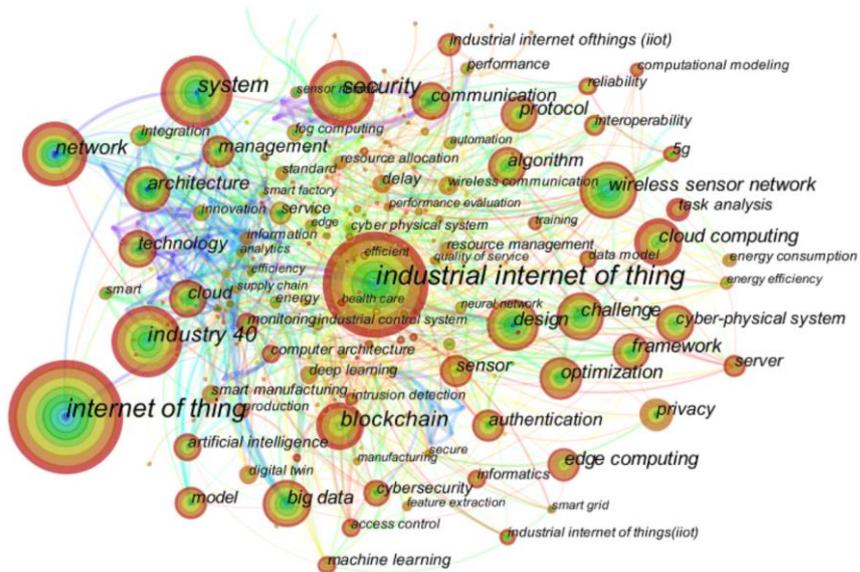


图 6 工业互联网领域相关文献关键词共现知识图谱

(1) 工业互联网的概念和架构体系研究

“Industrial internet of thing”、“Industrial 4.0”、“Smart Manufacturing”、“Architecture”、“Framework”和“system”等高频关键词集中体现了工业互联网概念和架构体系研究。工业物联网是指将物联网技术融入工业生产, 实现工业价值创造的数字化连接, 在德国, 这一概念也被称为工业 4.0。尽管这两种提法有所不同, 但目的都在于利用 5G、物联网、云计算、边缘计算、机器

学习等先进技术优化工业生产过程,提升制造业的竞争力。在工业互联网架构体系研究领域,目前缺乏统一的标准,尚未达成共识。工业物联网架构的设计需要突出使用不同技术的异构设备之间的可扩展性、可扩展性、模块化和互操作性,工业互联网联盟提出了工业互联网的通用框架,即工业物联网设备和工业数据源在第一层生成连续的数据流,而边缘服务器和云计算系统分别在第二层和第三层为工业物联网应用提供了能力^[2]。Khan 等人(2017)提出了一种基于物联网的体系结构,该体系结构由智能对象、网关和控制中心三个模块组成,每个模块执行特定的功能,由应用层、网络层和传感层三层组成^[3]。Campobello 等人(2017)提出了一种工业物联网解决方案,称为“无线自动化演进”(WEVA),它基于开源软件和通信协议,架构包括传感器、执行器板、尘埃和操作系统、协议、接入网关、服务和应用程序^[4]。Tao 等人(2017)基于工业物联网的 hub 提出了 IIHub,它由 ca 模块、a-Hub 模块和智能终端三个模块组成^[5]。

(2) 工业互联网的核心技术研究

“Internet of thing”、“Blockchain”、“Cloud computing”、“Wireless sensor network”、“Big data”、“edg computing”、“cyber-physical system”、“machine learning”、“deep learning”、“artificial intelligence”等高频关键词集中反映了与工业互联网密切相关的核心技术领域研究。通过梳理相关文献,发现工业互联网核心技术主要包括三个主要部分,一是信息提取和数据收集技术。物联网设备有助于实时数据收集和驱动,通过与智能基础设施构建了一个 CPS 系统,将互联网和用户结合在一起,实时监控从原材料到最终产品的整个过程,以实现劳动力成本和人工系统管理的显著降低^[6]。二是进行数据处理、分析、储存和管理的数据管理技术。工业物联网数据的大量增长需要高度分布式的高性能计算系统来管理、处理、分析和存储数据,雾计算、边缘计算和云计算等数据管理和处理技术可以处理传感器附近、边缘服务器和云数据中心的大数据,大数据等数据分析技术为工业物联网系统中不同层次的数据挖掘、机器学习、深度学习和统计数据分析提供了不同的工具^[7]。三是确保数据接入安全和控制访问安全的核心技术。由于现有的工业互联网系统容易受到单点故障和恶意攻击的影响,无法提供稳定的服务。区块链技术具有更好的互操作性、隐私性、安全性、可靠性和可扩展性,被广泛认为是一种解决大规模工业互联网数据安全和效率问题的技术,能够以安全高效的方式实现工业互联网系统中数据存储、处理和共享^[8]。许多学者基于区块链技术提出了一系列确保数据接入安全和控制访问安全的核心技术^[9]。

(3) 工业互联网应用研究

高频关键词“energy consumption”、“energy efficiency”、“smart factory”、“platform”、“resource management”和“resource allocation”等反映了工业互联网的落地应用研究。其应用行业涉及金融行业、医疗行业、能源行业、交通行业、智能工厂、智慧城市、食品加工和农业系统等领域^{[10]-[12]}等,以探究各行业中工业互联网的应用现状和应用水平。此外,还发现资源分配和资源管理是工业互联网应用中要解决的最大的挑战之一^[11]。关键词“platform”是指工业互联网平台,工业互联

网平台可以在产品生命周期的所有阶段提供数据和信息的实时管理，目前，相关研究主要集中在平台的构建^[13]和工业互联网平台的开放性研究^[14]两方面。

4 工业互联网研究的演化路径

为厘清工业互联网研究热点的演化路径，对文献进行关键词时区图谱分析（见图 7）。由图 7 可知，工业互联网相关文献关键词之间的连接密度较高，说明工业互联网领域研究具有较高的相关性和继承性。为便于后续更加精准地对工业互联网研究的演化路径进行分析，结合文献发表的年度变化趋势以及上述分析结果，本文将根据工业互联网研究的两个阶段将工业互联网研究划分为两个相应的知识群，然后分析每个知识群基础知识网络架构中关键节点文献及高频关键词，能够了解一定时期内工业互联网研究基础和研究热点，进一步揭示该研究领域在近 10 年来的研究演化趋势和阶段特征。

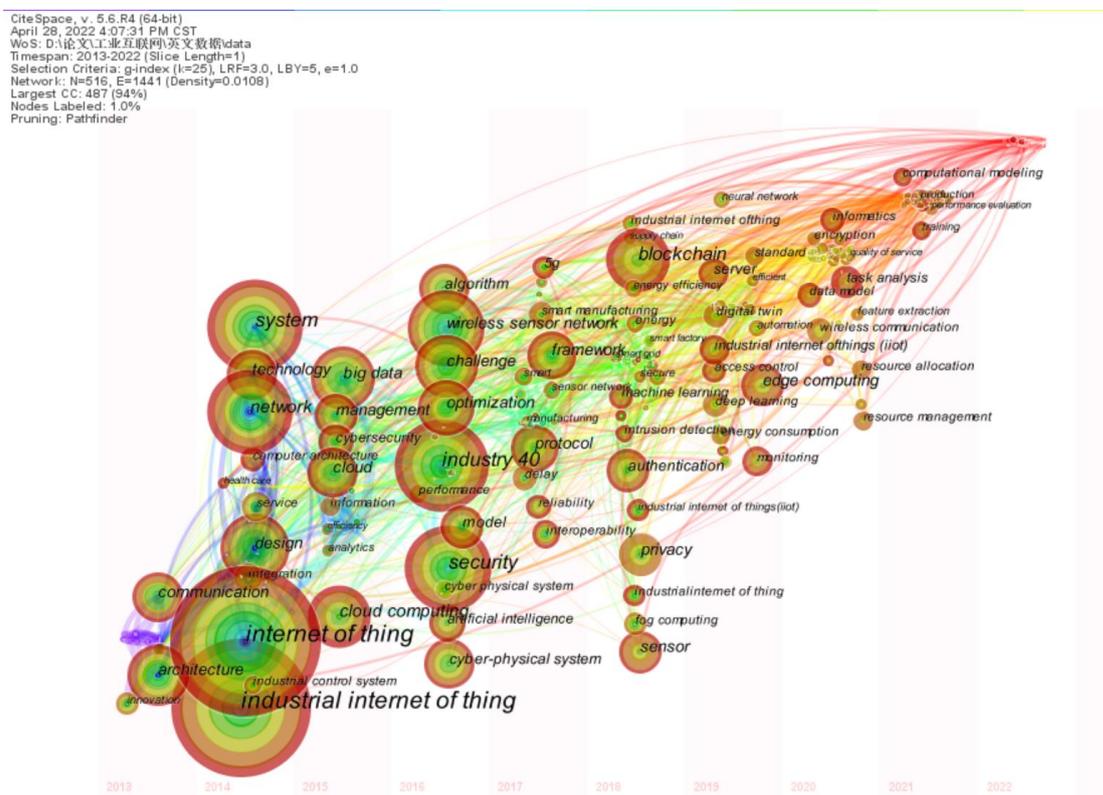


图 7 工业互联网领域相关文献关键词时区图谱

4.1 起步探索期（2012-2017 年）

对工业互联网研究文献进行文献共被引分析，以探究工业互联网研究的“前因”。本阶段共发表相关文献 147 篇，其中关键文献有 5 篇，如表 2 所示。《Internet of Things in Industries: A Survey》回顾了物联网的研究现状、关键实现技术、体系架构、物联网在工业中的主要应用，并指出了物

联网的研究趋势和面临的技术挑战^[15]。《Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions》提出了在全球范围内实现物联网的以云为中心的愿景，讨论了推动物联网研究的关键使能技术和应用领域^[16]。《A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems》提出了信息物理系统（CPS）实现的 5C 体系架构，即智能连接层、数据-信息转换层、网络层、认知层和配置层^[17]。《Internet of things: Vision, applications and research challenges》研究了物联网的技术、应用以及带来的安全挑战^[18]。《Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook》研究了智能工厂的垂直集成，以实现灵活、可重构的智能工厂，提出将工业无线网络、云、固定或移动终端与智能工件(如机器、产品和传送带)结合起来，使即智能工件形成一个自组织的系统，并在云上实现基于大数据分析的反馈和协调块^[19]。

通过对这 5 篇文献进行分析，发现起步探索期工业互联网研究主要承接了物联网和信息物理系统领域相关研究。物联网(IoT)是一个计算概念，其背后的关键思想是通过部署数十亿甚至数万亿智能对象实现无处不在的互联网连接，这些对象能够感知周围环境，传输和处理获取的数据，然后反馈给环境^[20]。一般来说，物联网通信可以归类为机器对用户，并以客户机-服务器交互的形式进行。而工业物联网是一个由网络化智能对象、网络物理资产、相关通用信息技术和可选的云或边缘计算平台组成的系统，使过程、产品和/或服务信息的实时、智能和自主访问、收集、分析、通信和交换成为可能^[21]。它是物联网的一个子集，专门用于工业应用，工业互联网中的通信是面向机器的。物联网和工业物联网的最普遍的通信需求是相似的，比如，使用低成本、资源受限的设备和网络可伸缩性支持互联网生态系统。但服务质量(QoS)(在确定性、延迟、吞吐量等)、可用性和可靠性、以及安全性和私密性等方面通信需求有所不同。与物联网相比，工业物联网更应该被视为一种进化，而不是一场革命。包括传感器、数据处理单元和执行器在内的信息物理系统(Cyber-Physical Systems)是工业物联网的技术核心，实现了实时数据传输和真实世界与虚拟世界的融合，有利于生产设备的状态监测、预测维护、远程诊断和控制^[22]。

表 2 2012-2017 年工业互联网研究领域的关键基础文献（中介中心性大于 0.01）

序号	文献名称	被引频次	发表年份	中介中心性
1	Internet of Things in Industries: A Survey	22	2014	0.02
2	Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions	8	2013	0.03
3	A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems	8	2015	0.12
4	Internet of things: Vision, applications and research challenges	7	2012	0.01
5	Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook	5	2016	0.04

进一步对本阶段的高频关键词进行挖掘（见图 7），发现尽管工业互联网一词在 2012 年就已经提出，但直到 2016 年，才进入“工业互联网”研究热潮。这一阶段工业互联网领域文献较少

且增长缓慢，关键词相对聚焦，出现频次最多的关键词包括物联网、网络、工业物联网、系统、无线传感网络、工业 4.0、大数据、结构框架、挑战等。通过分析高频关键词背后的研究文献，发现此阶段工业互联网相关研究主要集中在以下三方面：一是工业互联网基础技术研究，涉及物联网技术、云计算、大数据技术、无线传感网络技术、Wi-Fi 后向散射技术、LP-WAN 技术等；二是工业互联网架构研究，涉及基于软件定义的工业互联网体系架构、分布式面向服务的体系架构；三是技术集成方面面临的挑战，主要涉及实现企业内部与企业间连接的现代信息技术基础设施挑战。

4.2 快速发展期（2018-2022 年）

快速发展期工业互联网相关发文量急剧增加，共发表相关文献 958 篇，其中关键文献有 17 篇，如表 4 所示，本部分主要对前十篇文献展开具体分析。《Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions》阐明了物联网、工业物联网和工业 4.0 的概念，研究了工业互联网带来的机遇以及与能源效率、实时性能、共存、互操作性、安全和隐私需求相关的挑战^[23]。《The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0》研究了工业 4.0 背景下物联网和 cps 对工业自动化的影响，并阐明第五代(5G)电信网络在自动化中的作用^[24]。《The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework》给出了工业物联网(IIoT)的定义，并分析了相关的物联网分类，为工业物联网开发了一个分析框架，可用于在研究系统架构和分析安全威胁和漏洞时枚举和描述工业物联网设备^[25]。《Deploying Fog Computing in Industrial Internet of Things and Industry 4.0》研究了雾计算在工业物联网中提供本地计算支持，以及工业物联网的核心元素和构建模块^[26]。《Software-Defined Industrial Internet of Things in the Context of Industry 4.0》分析了工业物联网的体系结构，包括物理层、IWNs、工业云和智能终端，描述了不同设备之间的信息交互，提出了一个软件定义的工业物联网架构来管理物理设备，讨论了软件定义工业物联网的突出问题和可能的解决方案^[27]。《Industrial Internet: A Survey on the Enabling Technologies, Applications, and Challenges》介绍了工业互联网系统的 5C 架构，重点从工业网络、工业智能传感、云计算、大数据、智能控制和安全管理等各个层面研究了使能技术，探讨了由工业互联网技术逐步改变的应用领域，包括能源、医疗保健、制造、公共部门和交通运输，提出了目前在开发工业互联网系统方面的技术挑战。《A Survey on Industrial Internet of Things: A Cyber-Physical Systems Perspective》介绍了工业物联网架构、工业物联网应用(即工厂自动化和过程自动化)及其特点，并从控制、网络和计算这三个关键系统方面综述了现有的研究成果^[28]。《Green industrial Internet of Things architecture: An energy-efficient perspective》提出了一种高效节能的工业物联网(IIoT)架构，该架构由感知实体域、RESTful 服务托管网络、云服务器和用户应用程序组成，包括三层:感知层、网关层和控制层^[29]。

通过对关键节点文献进行分析，发现快速发展期的工业互联网研究的知识基础主要承接了起

步探索期的物联网、CPS 以及工业互联网相关研究和此阶段新出现的雾计算、区块链、智能工厂等相关研究。此外，还可看出此阶段工业互联网技术的安全问题是研究的重中之重。

表 2 2018-2022 年工业互联网研究领域的关键基础文献（中介中心性大于 0.01）

序号	文献名称	被引次数	发表年份	中介中心性
1	Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions	117	2018	0.05
2	The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0	60	2017	0.15
3	The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework	58	2018	0.14
4	Internet of Things in Industries: A Survey	54	2014	0.04
5	Deploying Fog Computing in Industrial Internet of Things and Industry 4.0	52	2018	0.11
6	Software-Defined Industrial Internet of Things in the Context of Industry 4.0	50	2016	0.04
7	Industrial Internet: A Survey on the Enabling Technologies, Applications, and Challenges	41	2017	0.08
8	A Survey on Industrial Internet of Things: A Cyber-Physical Systems Perspective	32	2018	0.04
9	Green industrial Internet of Things architecture: An energy-efficient perspective	32	2016	0.14
10	Consortium Blockchain for Secure Energy Trading in Industrial Internet of Things	31	2018	0.06
11	Towards Secure Industrial IoT: Blockchain System with Credit-Based Consensus Mechanism	24	2019	0.04
12	Industrial Internet of Things and Cyber Manufacturing Systems	24	2017	0.19
13	Cloud-assisted Industrial Internet of Things (IIoT)- enabled framework for health monitoring	24	2016	0.14
14	Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications	24	2015	0.12
15	A comprehensive survey on attacks, security issues and blockchain solutions for IoT and IIoT	21	2020	0.08
16	Manufacturing Analytics and Industrial Internet of Things	17	2017	0.12
17	Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges	13	2018	0.13

进一步对本阶段的高频关键词进行挖掘（见图 7）。研究的广度和深度逐渐扩大，成果呈现多元化发展趋势，涌现出大量新的关键词，如：机器学习、深度学习、雾计算、传感器技术、数字孪生技术、边缘计算、区块链技术、供应链、智能工厂、隐私问题、资源分配、资源管理等。这表明工业互联网核心技术体系研究有所深化，从原来的物联网、大数据等基础技术扩展到机器学习、深度学习、雾计算、边缘计算、数字孪生技术、区块链技术、人工智能技术等。此外，得益于工业互联网相关核心技术的快速发展，工业互联网与具体场景结合（如：智能工厂、智慧城市）的应用实践和安全问题也是此阶段的研究热点，其中应用实践中涉及到了工业互联网中的资源分配和资源管理研究。

5 研究结论

本文运用科学知识图谱方法对 web of science 核心数据库所收录 2012-2022 年间工业互联网领域 1105 篇文献进行了全面梳理和总结, 主要得出以下结论: 一是自“工业互联网”概念提出以来, 工业互联网研究领域的文献数量呈不断上升趋势, 按照年发文量情况可以把近 10 年工业互联网研究分为两个时期, 即起步探索期(2012-2017 年)和快速发展期(2018-2022 年)。二是中国和美国是开展工业互联网领域研究的主力国家, 近十年, 中国在工业互联网领域发表的论文数量几乎占世界各国所有发文量的一半; 此外, 我国在工业互联网研究领域拥有较多的权威研究机构和高产作者, 这体现了我国对于工业互联网领域研究的重视和取得的成就。三是从学科和期刊分布上看, 工业互联网领域被引频次较高的期刊均是计算机科学领域、工程领域和通信领域的顶级期刊, 这也表明工业互联网的研究出现学科交叉融合发展的趋势。四是工业互联网领域的研究热点可归为工业互联网的概念和架构体系研究、工业互联网核心技术研究 and 工业互联网落地应用研究三大类。五是根据工业互联网研究的两个阶段对研究热点演化情况做进一步分析, 发现: 起步探索期的工业互联网研究主要承接物联网和 CPS 相关研究, 研究热点主要集中在与工业互联网紧密相关的基础技术研究以及技术研究中面临的挑战; 快速发展期知识基础已经扩展到了工业互联网计数研究。此外, 研究的广度和深度逐渐扩大, 成果呈现多元化发展趋势, 研究热点由原来的基础技术研究扩展到工业互联网与具体场景结合的应用实践和隐私问题、工业互联网中的资源分配和资源管理研究。

参考文献

- [1] 谢琳灿, 吴沁沁. 美德工业互联网发展经验及借鉴[J]. 宏观经济管理, 2022(03): 83-90.
- [2] Serpanos D, Wolf M. Industrial internet of things[M]//Internet-of-Things (IoT) Systems. Springer, Cham, 2018: 37-54.
- [3] Khan W Z, Aalsalem M Y, Khan M K, et al. A reliable Internet of Things based architecture for oil and gas industry[C]// 2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE, 2017.
- [4] Campobello G, Castano M, Fucile A, et al. WEVA: A complete solution for industrial Internet of Things[C]//International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless. Springer, Cham, 2017: 231-238.
- [5] Tao F, Cheng J, Qi Q. IIHub: An industrial Internet-of-Things hub toward smart manufacturing based on cyber-physical system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 14(5): 2271-2280.
- [6] Zhang K, Zhu Y, Maharjan S, et al. Edge intelligence and blockchain empowered 5G beyond for the industrial Internet of Things[J]. IEEE network, 2019, 33(5): 12-19.
- [7] Khan W Z, Rehman M H, Zangoti H M, et al. Industrial internet of things: Recent advances,

enabling technologies and open challenges[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2020, 81: 106522.

[8] Dai H N, Zheng Z, Zhang Y. Blockchain for Internet of Things: A survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(5): 8076-8094.

[9] Li Z, Kang J, Yu R, et al. Consortium blockchain for secure energy trading in industrial internet of things[J]. *IEEE transactions on industrial informatics*, 2017, 14(8): 3690-3700.

[10] Bibri S E, Krogstie J. Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review[J]. *Sustainable cities and society*, 2017, 31: 183-212.

[11] Basir R, Qaisar S, Ali M, et al. Fog computing enabling industrial internet of things: State-of-the-art and research challenges[J]. *Sensors*, 2019, 19(21): 4807.

[12] Younan M, Houssein E H, Elhoseny M, et al. Challenges and recommended technologies for the industrial internet of things: A comprehensive review[J]. *Measurement*, 2020, 151: 107198.

[13] Menon K, Kärkkäinen H, Wuest T, et al. Industrial internet platforms: A conceptual evaluation from a product lifecycle management perspective[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2019, 233(5): 1390-1401.

[14] Menon K, Kärkkäinen H, Wuest T. Industrial internet platform provider and end-user perceptions of platform openness impacts[J]. *Industry and Innovation*, 2020, 27(4): 363-389.

[15] Da Xu L, He W, Li S. Internet of things in industries: A survey[J]. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 2014, 10(4): 2233-2243.

[16] Gubbi J, Buyya R, Marusic S, et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions[J]. *Future generation computer systems*, 2013, 29(7): 1645-1660.

[17] Lee J, Bagheri B, Kao H A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems[J]. *Manufacturing letters*, 2015, 3: 18-23.

[18] Miorandi D, Sicari S, De Pellegrini F, et al. Internet of things: Vision, applications and research challenges[J]. *Ad hoc networks*, 2012, 10(7): 1497-1516.

[19] Wang S, Wan J, Li D, et al. Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook[J]. *International journal of distributed sensor networks*, 2016, 12(1): 3159805.

[20] Sisinni E, Saifullah A, Han S, et al. Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions[J]. *IEEE transactions on industrial informatics*, 2018, 14(11): 4724-4734.

[21] Boyes H, Hallaq B, Cunningham J, et al. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework[J]. *Computers in industry*, 2018, 101: 1-12.

[22] Kiel D, Müller J M, Arnold C, et al. Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of industry 4.0[M]//*Digital Disruptive Innovation*. 2020: 231-270.

[23] Sisinni E, Saifullah A, Han S, et al. Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions[J]. *IEEE transactions on industrial informatics*, 2018, 14(11): 4724-4734.

[24] Wollschlaeger M, Sauter T, Jasperneite J. The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0[J]. *IEEE industrial electronics magazine*,

2017, 11(1): 17-27.

[25] Boyes H, Hallaq B, Cunningham J, et al. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework[J]. Computers in industry, 2018, 101: 1-12.

[26] Aazam M, Zeadally S, Harras K A. Deploying fog computing in industrial internet of things and industry 4.0[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(10): 4674-4682.

[27] Wan J, Tang S, Shu Z, et al. Software-defined industrial internet of things in the context of industry 4.0[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(20): 7373-7380.

[28] Li J Q, Yu F R, Deng G, et al. Industrial internet: A survey on the enabling technologies, applications, and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1504-1526.

[29] Wang K, Wang Y, Sun Y, et al. Green industrial Internet of Things architecture: An energy-efficient perspective[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(12): 48-54.

作者简介

白云朴, 男, 南京邮电大学副教授, 硕士研究生导师, 研究方向: 数字经济、分享经济及信息产业战略研究, 通讯地址: 江苏省南京市鼓楼区新模范马路南京邮电大学三牌楼校区 300 信箱, 邮箱: baiyunpu@njupt.edu.cn, 联系电话: 18851178707。李果, 女, 南京邮电大学硕士研究生, 研究方向: 科技资源共享与创新。

浅析 IT-OT 融合技术的现状与发展趋势

基金项目：移动边缘计算与软件定义网络联合服务质量评估方法研究（1908085QF289）

付韬，张恒升

（中国信息通信研究院，北京，100191）

摘要：工业互联网实现全价值链、全产业链和全要素的全面连接，需要实现企业内多源异构网络的深度融合互通。目前 IT-OT 网络融合的趋势愈发明确，以确定性网络、边缘计算、信息模型等为代表的新兴技术对实现 IT-OT 网络融合起到了关键作用，本文归纳 IT-OT 网络融合的重要特征，进而分析关键技术在此趋势中的作用，最终给出 IT-OT 网络融合在企业内网中的发展方向。

关键词：工业互联网；异构融合；IT-OT 网络融合；确定性网络；企业内网

中图分类号：TN915.4

文献标识码：A

Elementary Analysis on Status and Development trends of IT-OT Convergence Technology

Fu Tao, Zhang Hengsheng

（China Academy of Information and Communications Technology, Beijing, 100191）

ABSTRACT: Industrial Internet achieve full connections among the all essential productive factors,entire industrial chain and entire value chain.Therefore, it's critical to improve the convergence of networks in enterprise campus.The trend of IT-OT network convergence is most evident on Industrial Internet. With the development of new technology,such as deterministic network,edge computing etc.,play an important role in the course.This paper concludes the core features of IT-OT network convergence, then analyze effects of key technologies in this trend.Finally, this paper proposes some development trends of the integrated enterprise campus network.

KEY WORDS: Industrial internet; Heterogeneous integration ; IT-OT network convergence; Deter-ministic Networking;Enterprise campus network

IT-OT 网络融合是工业数字化转型与升级的必然趋势，涉及技术革新、系统改造、管理模式转变、团队培养等各个方面，产业界对其内涵特点的理解各不相同。工业互联网^[1]新技术促进企业内网络层次的跨层协同与优化，促进企业形成基于全面连接的数字化经营模式，不仅实现各要素之间的通信，也将企业内网中 IT 网络和 OT 网络的深度融合^[2]，实现双向互用^[3]。IT 网络是采用 TCP/IP 协议族连接信息系统的网络，OT 网络是采用工业网络协议的生产网络。IT 网络与 OT

网络在管理模式、技术方案等方面存在差异，两者处于业务分隔、松散连接的割裂状态。本文从 IT 网络和 OT 网络的发展历程出发，厘清 IT-OT 网络融合的概念，分析关键技术对 IT-OT 网络融合的支撑作用，总结 IT-OT 网络融合发展趋势。

1 IT-OT 网络发展过程

上世纪 80 年代，面向过程自动化的工业总线得到广泛应用，2000 年后工业以太网已实现生产线的基本互联。随着厂商私有协议和总线标准不断增多，工业网络体系演变出“七国八制”的复杂 OT 网络。OT 网络需要精准的生产设备控制、数据采集和状态监控，对实时性和可靠性的要求十分苛刻。在因特网、以太网等技术大规模推广后，IT 网络开始被用于企业数字化和信息化办公。IT 网络和 OT 网络形成各具特色的产业生态，在企业内普遍独立组建网络，企业内网形成“两层三级”的典型架构^[4]。IT 网络中各类信息管理系统利用相对廉价的计算、存储、网络资源，实现车间级及工厂级管理功能。

传统工厂中生产控制和管理决策的联系较弱，生产数据无法实时反馈并应用于办公决策。鉴于 IT 网络和 OT 网络之间存在业务、资源和数据等方面的互补关系，产业界一直希望打破两者之间的技术壁垒。在 IT 技术引领通信行业发展后，OT 网络借鉴 IT 网络的理念和技术，工控设备网络化程度不断加深。但 IT 网络与 OT 网络缺乏业务、数据、资源等角度的全维度与深层次的融合。

近年来工业企业在远程控制、无人化生产、精益生产、柔性制造等方面提出更高要求，企业内网正在进入 IT-OT 网络融合阶段。以跨域能力协同为核心，IT-OT 网络融合关键技术正逐步攻克传统企业内网存在的业务无法互操作、资源相互独立、私有数据不公开等问题。能力协同从业务协同、资源协同、数据协同三个角度逐步落地，业务协同打通各层软件和应用，资源协同实现 IT 资源高效借用和资源利用率提升，数据协同打通厂商和行业的信息壁垒。

2 IT-OT 网络融合特征

IT 与 OT 网络服务目标不同、发展路径不同、运行生态不同，面对数字化转型新形势，传统工厂网络存在“缺乏全局管理、缺乏资源有效利用、缺乏数据共享”的结构性不足。IT-OT 网络融合是“IT 网络向 OT 网络渗透并延伸、OT 网络向 IT 网络开放并重组”的双向过程，实现设备互联、弹性资源、应用互通。面向“生产流程复杂、生产管理业务流程复杂、现场管理信息量大”的行业，实现现场网络全覆盖、缩短信息反馈链、实时决策信息。

1) 业务协同是跨链、跨层的自动化流程，既实现工业数据采集、决策与控制的小闭环，又实现 IT 信息系统和 OT 生产系统之间的大闭环。在国内企业采集工业实时数据后，小闭环解决无法将决策结果下发现场设备的难题。大闭环可以运行基于复杂算法的智能服务，实现业务系统

与现场级系统间的互操作，加强“端网边”设备间协同，满足柔性制造、智能生产等场景下的弹性敏捷服务。

2) 资源协同是将 IT 资源动态借用给 OT 系统，实现跨层跨域的弹性计算与存储，将网络覆盖到整个企业园区。资源借用主要受限于厂商、平台、网络类型、厂区规划等因素。网络资源协同可实现复合业务流的共网传输。计算资源协同利用实时数据进行分析决策，将算力下沉后可以就近提供计算与存储服务。针对机械臂等现场设备仅采用有线网络导致的动作范围受限问题，有线/无线网络协同提供全域覆盖和灵活接入能力，提升生产活动的灵活性。

3) 数据协同打破信息孤岛，克服厂商和技术体制带来的数据差异。全连接企业内网需要各类数据高效、快速、可靠、安全的汇聚集成。IT 系统通过信息模型构建全局的数据模型和数据集成，通过开放的接口将决策反馈到 OT 系统。

目前 IT-OT 网络融合主要是指高层业务应用和底层控制逻辑的多层次协同和融合，表现为业务上趋向一致，资源上支持动态向底层分配，数据上实现异构数据互操作。进而形成全面覆盖企业的网络，最终转变为针对多业务承载和运维的网络模式。

3 促进 IT-OT 网络融合的关键技术

本文在厘清 IT-OT 网络融合特征后，图 2 归纳 IT-OT 网络融合特征与技术的映射关系。1) 网络智能化的计算赋能技术。该类技术促进 IT 网络资源与 OT 生产流程结合，正逐步具备智能服务、算力下沉、端网边协同等特征，以边缘智能技术、控制云化技术为核心，使得 OT 网络对应用场景的适应能力和灵活程度都得到提高。2) 保障多业务调度的网络赋能技术。通过保障多业务调度的确定性网络技术进行精确可靠传输，促进原本独立的多个现场级/车间级网络与 IT 网络合并，实现低成本、易维护、高可靠的企业内网。3) 保障互通的异构融合技术。为满足有线/无线组网、接入灵活等需求，促进各种异构网络互通互联，支持应用业务之间的互连互通互操作。以 5G+TSN 技术、确定性 WIFI 等技术为核心，通过无线网络赋予 AGV 小车、机械臂等设备更加灵活的活动范围和行动模式。4) 开放工业数据的语义描述技术。通过信息模型统一企业内网的数据表达格式，将 OT 的高质量生产数据，在跨层次跨应用的条件下实时集成。

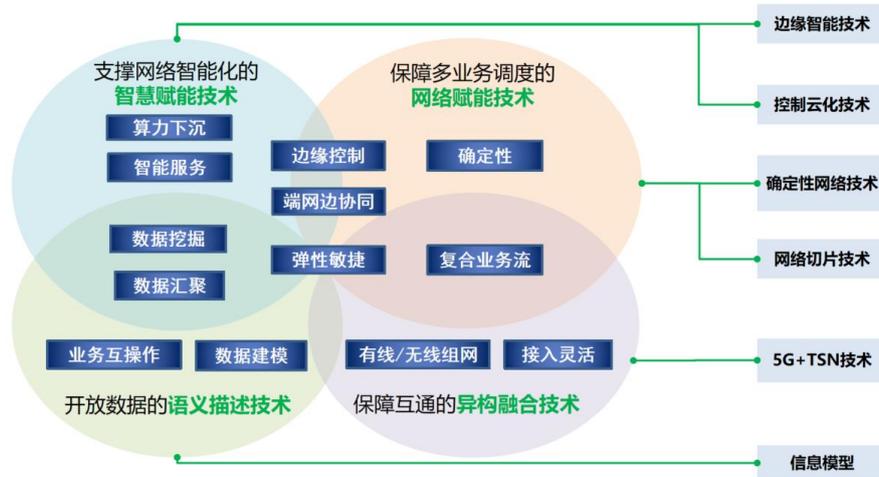


图 2 IT-OT 网络融合关键技术

3.1 智慧赋能技术

1) 边缘智能技术

边缘智能技术连接底层 OT 设备和顶层 IT 平台的服务，实现协同推理、智能决策和资源赋能^[5]。一是支持数据挖掘，使生产线具备敏捷响应、智能决策的能力。二是运行工业模型与算法，在边缘侧进行数据价值转化。三是对海量工业数据充分高效集成。企业内网的管理框架也在不断探索新模式，原生技术概念不断孕育成熟，边缘计算生态初步构建，产业各方积极探索边缘计算商业模式。边缘计算技术在汽车制造行业中控制数据汇聚和共享，通过边缘计算系统接收管理系统的生产计划，智能产线终端系统作为边缘网关，分别处理各产线的生产数据、异常停线、班组绩效等信息，并将数据汇总传输至 MES，最终实现物流扫码确认入库。

2) 控制云化技术

控制云化技术在私有云中划分虚拟资源，实现云化并替代 OT 网络中的对应设备，能够弹性变更云化设备的数量和业务。目前很多行业依然是高危行业，例如矿山、钢铁、化工等企业的一线员工从事着危险的生产活动，传统网络中的端设备需要现场控制，安全生产问题一直是各企业面临的难题。由于云设备天然设置在用户侧，可以实现各功能的远程控制。国内主要将确定性网络与云平台相结合，提供超低时延的实时控制应用，云化 PLC 有效提升运维效率，将产线柔性调整的时间降低 20% 以上。广域网络内，云化 PLC 实现近 600 公里的远距离工业控制，实现 20us 以内的时延抖动控制，网络时延可有效保障在 4ms 以内^[6]。采用云化设备重构企业内网控制链是未来的重要趋势，从国产化的角度可以解决卡脖子的问题，从安全的角度可以减少现场人员的伤亡概率，从成本的角度可以减少昂贵的国外设备。

3.2 网络赋能技术

1) 确定性网络技术

确定性网络技术向共存的 IT 网络业务和 OT 网络业务提供“准时、准确”的服务，确保 IT-OT 网络融合后业务互不干涉、生产任务精确执行。该类技术确保有边界的低时延、抖动、带宽和丢包率，提供满足 OT 系统和设备实时性要求的可靠网络。确定性技术促进多张子网转变为“一网多域”，企业内网实现兼顾多种业务流量的高质量共网传输，从而提升整个网络效率。目前确定性网络技术包括 TSN、DetNet、SRv6 等^[7]，为企业内网提供开放、确定性的协议和机制，支撑网络向扁平化的架构演进。TSN 技术的互操作架构将会增强二层网络的配置、动态配置与管理的能力，为整个工业网络的灵活性配置提供支撑。

2) 网络切片技术

企业内网可采用网络切片技术将需要互相隔离的业务灵活分治^[8]。细粒度地将网络切片编排成跨 IT 网络和 OT 网络的逻辑链路。首先是 IT 网络和 OT 网络之间，隔离各种信息系统存在不同的业务等级。为防止各业务间干扰服务质量，从网络安全的角度也要隔离各业务的数据流。其次是 IT 网络和 OT 网络内部隔离，网络内部要设置多个控制域，网络切片技术将网络基础设施从物理通道、时间、信号等维度划分成相互隔离的逻辑网络，每个逻辑网络具备独立的业务类型、行业用户、SLA 配置、安全等级等属性，进而满足 IT-OT 网络融合场景下复杂的差异化需求。企业内网中的网络切片主要包含无线网络切片和有线网络切片。无线网络切片以 5G 为代表，有线网络切片以 SPN、FlexE 等为代表。未来企业内网设备可以自动获得有线无线相结合的混合切片服务，实现全局的精细调度和端到端编排。

3.3 异构网络融合技术

目前企业内网中存在多个异构网络，以 5G+TSN 技术^[9]为代表的异构网络融合技术有利于实现“多网归一”，5G+TSN 为实现 OT 与 IT 网络的融合提供广域和灵活接入能力。5G 具有带宽、时延、覆盖范围等方面的优点，TSN 则适用于稳定性强的本地互联，目前存在系统拼接、TSN 承载和 TSN 网桥三种技术方向。传统生产线联网大多依赖有线传输，旧有无线网络存在信号干扰、容量有限、稳定性较差等问题，导致部分生产辅助设备如 AGV 等时常出现掉线、卡顿等问题。运动控制对网络时延、抖动和可靠性有严格要求，稍有差池就可能导致大量原材料的损毁或者严重的生产安全事故，随着企业内网部署的园区越来越大，5G+TSN 能兼顾园区范围内的灵活性与确定性。为确保两者的资源能够及时调度，目前主要从应用和业务层面进行性能优化。

3.4 语义描述技术

以信息模型为代表的语义描述技术支撑工业异构数据互通互操作^[10]，通过对工业信息语义的跨产业链标准描述打破信息孤岛，保证互联后各功能单元的信息能够识别、分析、挖掘、操作。进而建立多层级网络信息模型体系，提升异构工业信息系统的互联互通能力。IT 网络和 OT 网络中的各层缺乏统一的语法和语义，面向不同行业时又存在不同的标准。标准的语义描述将管理知识、工艺机理等各种隐性的经验显性化，通过信息模型来规范全要素、全价值链和全产业链的数

据。从性能角度来看,信息模型提升相关数据的处理、交换和挖掘的效率。从应用角度来看,信息模型在 IT-OT 融合网络内实现知识、工艺、技术等复用、移植、推理,是业务协同的数据结构基础和语义逻辑基础。语义描述技术通过打破各信息系统间的壁垒实现信息跨域无障碍交流,支撑全域互联和生产管理闭环。

4 IT-OT 网络融合发展方向

IT-OT 网络融合趋势体现为 IT 网络向 OT 网络生产现场渗透,OT 设备管控和数据上移至 IT 网络,具体如图 3 所示。边缘计算技术承载 IT 业务,深入部署到 OT 网络内部。OT 开放自动化运维以 IT 技术模式集中控制 OT 设备。异构组网支撑 IT 业务与 OT 生产活动互联。在完成上述各层次的互联和交互后,需要解决数据格式和含义的理解,信息模型支撑 IT-OT 数据的标准化表示与互操作。经过调研和总结国内外案例,IT-OT 网络融合正在向确定灵活、技术开放、智能敏捷、技术原生的方向发展。

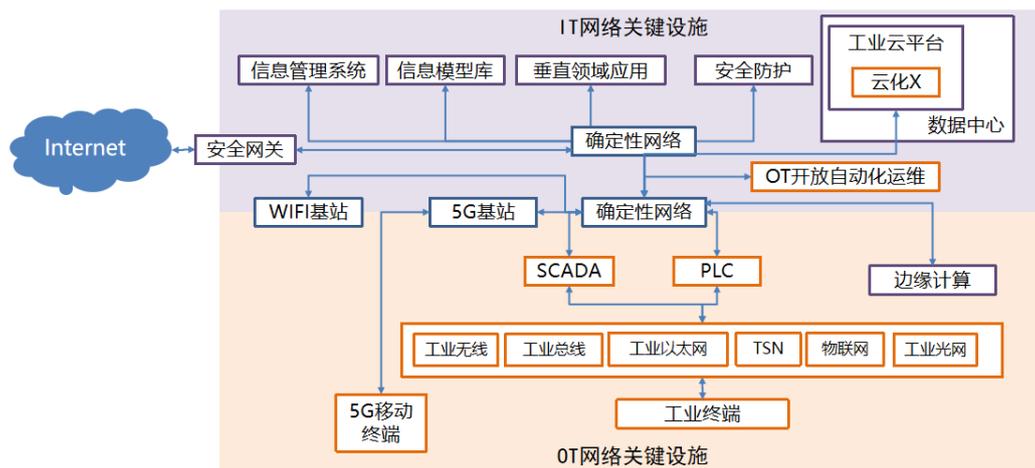


图 3 IT 网络和 OT 网络融合示意图

1) 确定灵活的网络服务。未来企业根据行业业务定制确定性配置,确定性保障能力将从数据链路层、网络层向应用层发展,为实现“网边端”深度融合提供通信条件。再通过有线与无线协同实现生产全流程、全区域的可靠网络覆盖。2) 技术开放的管理平台。确定性网络打破网络制式、协议间的技术壁垒,边缘计算开放计算资源和存储资源,信息模型促使工业控制闭环数据向上层开放。开放自动化平台借鉴 IT 技术模式,提供 OT 设备的集中式管理与可编程动态控制,为各行业提供集成度较高的运维控制台。3) 智能敏捷的闭环控制。TSN 应用将提升网络系统的智能管控与自动化,对业务的传输服务更为精细敏捷。通过控制器定义细粒度、边缘化、差异化、定制化的服务质量。边缘计算设备则强化边缘数据处理智能,实现生产闭环控制,促进生产线进一步自动化、无人化。4) 技术原生的跨领域融合。各界积极探索 IT-OT 网络融合技术的原生机

制、算法或模式，突出工业场景定制特性。

5 结论

IT-OT 网络融合可以提升企业柔性化能力，优化生产组织方式和管理模式，提升产业链协作效率，是办公系统、生产过程整合的必然结果。IT-OT 网络融合也存在一些问题，新技术产业需要简单易用、功能全面、性能可靠的重点产品。部分关键技术缺乏大规模部署的实验验证，需要面向应用场景集成与优化。国内相关企业需要进一步加强供需对接，加快形成市场反哺的良性循环。缺乏原生技术的问题十分突出，关键技术需要面向垂直行业融合与优化。IT-OT 网络融合还是一个不断演进的领域，未来将不断深化和丰富技术框架，分析技术与相关产业发展的关系和影响。

参考文献

- [1]工业互联网产业联盟.工业互联网体系架构（版本 2.0）白皮书[R].2020.4.
- [2]工业互联网产业联盟.工业互联网网络连接白皮书（版本 2.0）白皮书[R].2021.9.
- [3]洪学海,蔡迪.面向“互联网+”的 OT 与 IT 融合发展研究[J].中国工程科学,2020,22(04):18-23.
- [4]黄韬,汪硕,黄玉栋,郑尧,刘江,刘韵洁.确定性网络研究综述[J].通信学报,2019,40(06):160-176.
- [5]王睿,齐建鹏,陈亮,杨龙.面向边缘智能的边缘协同推理综述[J/OL].计算机研究与发展:1-17[2022-06-10].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1777.tp.20220426.1612.006.html>
- [6]全球首个广域云化 PLC 试验成果发布，加速下一代工业控制边缘计算架构升级[J].自动化博览,2021,38(07):3.
- [7]第五届未来网络发展大会组委会.确定性网络技术体系白皮书[R].2021.6.
- [8]董昱呈,伊学博,焦毅.解析工业互联网中 5G 切片技术[J].数字通信世界,2021(09):108-109.
- [9]工业互联网产业联盟.5G+TSN 融合部署场景与技术发展白皮书[R].2021.12.
- [10]工业互联网产业联盟.工业互联网信息模型园区应用白皮书[R].2021.11.

作者简介

付韬: 中国信息通信研究院技术与标准研究所产业互联网研究部高级工程师，主要从事工业互联网网络的研究工作。

张恒升: 中国信息通信研究院技术与标准研究所产业互联网研究部副主任，长期从事工业互联网网络、确定性网络的研究工作。

工业网络新技术的研究与运营思考

梁晓辉¹, 黄骅², 施晓东¹

(1 中国电信股份有限公司四川分公司, 四川成都 610000;

2 国网四川综合能源服务有限公司, 四川成都 610000)

摘要: 工业网络是支撑数字经济发展和实体经济转型的新型基础设施, 在制造业数字化转型背景下, 急需构建企业生产环境下人、机、物全面互联的网络, 以实现工业设计、研发、生产、管理等产业要素的泛在互联互通。本文通过对工业互联网网络现状的分析, 以时间敏感网络技术为代表, 从架构、关键技术、与其他先进技术融合等方面阐述了下一代工业网络新技术的特点, 最后, 从业界探索入手, 对运营商网络方面的未来工作提出了几点思考。

关键词: 工业互联网; 下一代工业网络; 时间敏感网络; 运营商网络

中图分类号: F626; TN929.5

文献标识码: A

Research and Thinking on New Technology of Industrial Network

LIANG Xiaohui¹, Huang Hua², SHI Xiaodong¹

(1 China Telecom Sichuan Branch, Chengdu Sichuan 610000, China;

2 State Grid Sichuan Integrated Energy Service Co., Ltd, Chengdu Sichuan 610000, China)

Abstract: Industrial network is a new type of infrastructure supporting the development of digital economy and the transformation of real economy. Under the background of digital transformation of manufacturing industry, it is urgent to build a comprehensive interconnection network of people, machines and things in the enterprise production environment, so as to realize the ubiquitous interconnection of industrial elements such as industrial design, R & D, production and management. Through the analysis of the current situation of industrial Internet network, represented by time sensitive network technology, this paper expounds the characteristics of the new technology of next-generation industrial network from the aspects of architecture, key technology and integration with other advanced technologies. Finally, starting with the exploration of the industry, this paper puts forward some thoughts on the future work of Telecom operator network.

Key words: Industrial Internet; Next generation industrial network; Time sensitive network; Telecom operator network

近年来, 我国智能制造发展迅速, 工业经济由数字化向网络化、智能化深度拓展, 互联网创新发展与新工业革命形成历史性交汇, 催生了工业互联网。

作为新一代信息通信技术与工业经济深度融合的新型基础设施,工业互联网是第四次工业革命的重要基石,更得到了政府和业界的高度重视。工信部从 2018 年开始,连续 5 年印发《工业互联网专项工作组年度工作计划》,从网络、标识、平台、数据、安全等多方面,从标准建设、关键技术攻关、产业协同、人才保障等多视角细化重点工作,指引年度工业互联网创新发展工作。

1 工业互联网网络

网络体系为工业互联网的基础。工业互联网网络体系将连接对象延伸到工业全系统、全产业链、全价值链,可实现人、物品、机器、车间、企业等全要素,以及设计、研发、生产、管理、服务等各环节的泛在深度互联。网络与联接是网络体系中的关键基础底座。

在工厂环境下,尤其是车间内的网络,有线连接仍为主要方式。工厂内常见的主要有现场总线、工业以太网、工业 PON 等网络。

1.1 现场总线

现场总线技术通过标准化的通信接口解决了工业控制系统内部执行器、传感器以及变送器等设备的互联问题,实现了各类工业数据信号的共总线传输。但现场总线存在布线成本高、布线复杂、布线周期长的问题,且低速率,兼容性差、互联互通互操作性差,无法支撑工业应用对于承载网络更高传输效率、更大带宽、更好兼容性的需求。

1.2 工业以太网

工业以太网技术遵从 TCP/IP 框架,基于以太网架构构建工业应用层协议,有接口简单、协议开放、传输速率快、可靠性高、互通便捷等突出优势,也能为工业领域提供安全、稳定的网络基础。以电力控制系统为例,其工业以太网架构图如图 1 所示。

世界工业自动化巨头,如西门子、施耐德、ABB 通过主导网络协议研发一些附加技术机制,从实现网络设备与协议绑定,到基于协议进行持续优化升级,再到形成解决方案,构建了研究-产业-应用相对封闭的生态圈,也增加了网络复杂性。近年新一代信息技术和先进制造技术的融合应用,工业以太网封闭生态导致的互通性、标准化问题逐步凸显。

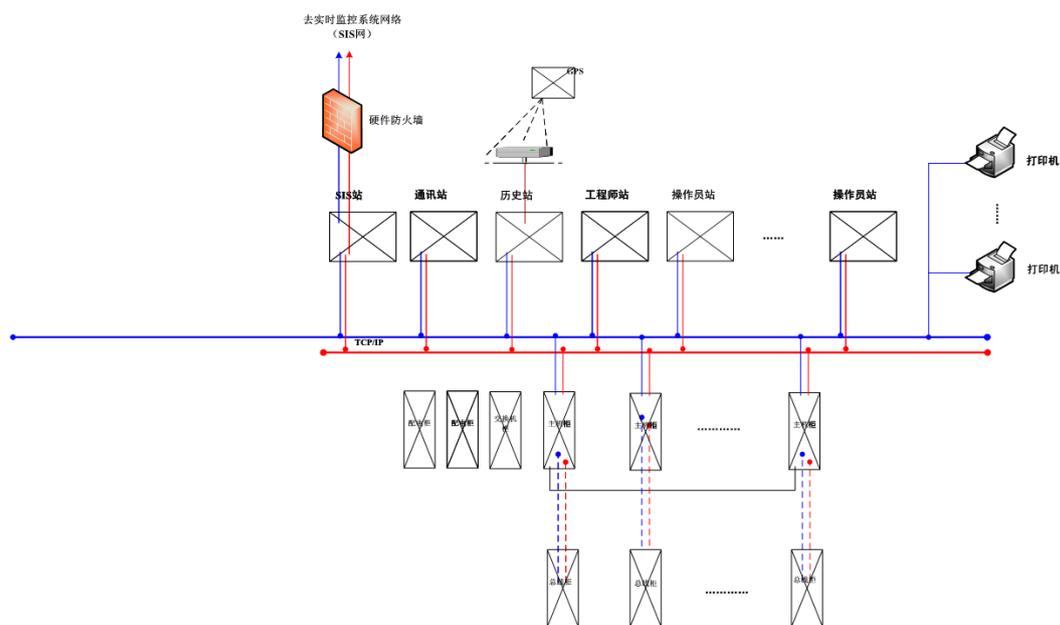


图1 电力场景的工业以太网架构图

1.3 工业 PON

工业 PON 接入网关(ONU)实现多种工业设备、传感器的接入,实现光网络到设备层的连接,实现工业数据的可靠有效传输。

工业 PON1.0[1]主要基于公众接入网的 PON 系统,针对工业场景,优化了环境参数和保护方式,由 PON 系统提供底层网络承载。组网方式如图 1 所示。

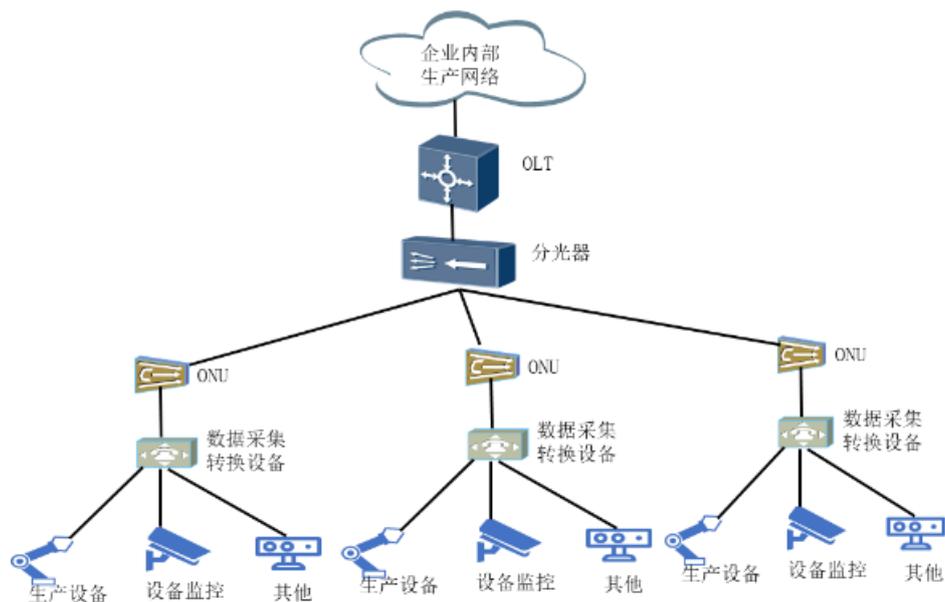


图2 工业 PON1.0 组网示意图

工业 PON2.0 体系（见图 3）在终端 ONU、局端设备 OLT 和云平台层做了升级。对接入网关（ONU）而言，一方面提升环境指标、保护倒换、工业协议灵活转换等工业场景下特有的性能；另一方面将 ONU 作为开放平台，配置多种嵌入式数据采集功能。同时，ONU 还支持集成开源或者客户定制的工业应用，进行个性化工业数据采集和转换处理，并与工业云平台进行交互。局端设备 OLT，增加提供了完备的保护倒换功能，可以在一路 ODN 网络或者 PON 设备端口发生故障导致网络中断时，快速进行主备链路切换和业务恢复。在云平台侧，将工业 PON 数采终端与工业云平台有效整合，实现工业数据的解析计算和协议转换等功能。图 4 是工业 PON1.0 到工业 PON2.0 的演进路径。

工业 PON2.0 和工业 PON1.0，在目前甚至未来很长一段时间内，都是共存和按需部署的关系。

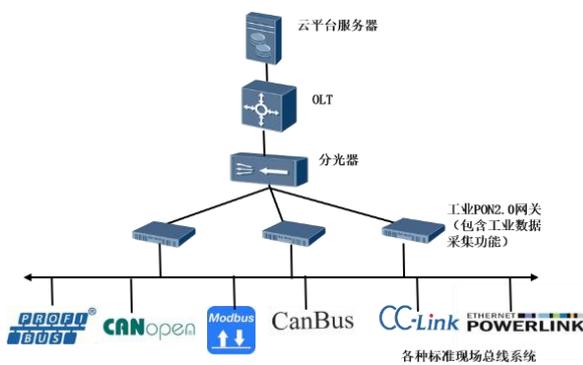


图 3 工业 PON2.0 架构图

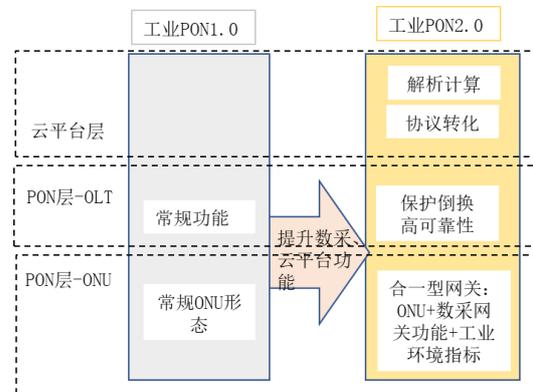


图 4 工业 PON1.0 到工业 PON2.0 的演进

在国家推进智能制造背景下，工业企业数字化、信息化改造面临进一步升级优化。工业网络要承载的不仅仅是数据的传输，更是基于语义的信息交互。具备支持多业务、多协议、多厂商设备和数据的互联互通、共网承载以及高质量传输能力，是下一代工业互联网网络技术必然的演进方向。

2 时间敏感网络技术

时间敏感网络（Time Sensitive Network）技术改善传统以太网尽力而为的转发特性，是具有时间同步、延时保证等确保实时性的新一代以太网技术，是下一代工业网络承载技术的重要演进方向之一^[2]。

2.1 关键技术

工业生产需要网络提供确定性服务，即确定的网络时延和抖动，而以太网是传统的“尽力而为”网络，在车间多种业务流（如视频、数据采集、高速生产设备实时控制等）共享这张物理网络的场景下，难以满足生产中高优先级业务需要的时延确定、稳定可控。

时间敏感网络主要在体系架构、时间同步、流量控制以及容错四个方面对以太网技术协议进行了优化升级以解决如上问题。

2.1.1 体系架构

时间敏感网络 (TSN) 架构基于 SDN (Software Defined Network)^[3], SDN 架构的控制面和数据面分离的机制, 逻辑集中控制和管理流的特性, 实现设备及网络的灵活配置、监控、管理及按需调优, 提升工厂网络的智能化灵活组网的能力, 提升网络资源利用率, 保障网络安全, 实现网络智慧运维。

2.1.2 时间同步

时间同步特性是时间敏感网络的基础特性, 其目标是提供全局统一时钟信息以及节点的参考时钟信息, 进而实现本地时钟的调整和整个网络的时间同步。工业网络中的所有设备都需要共同的时间参考, 通过同步时钟来确保端到端 (End-to-End) 的传输延迟时间界限。此外, 由于时间同步的误差可能带来流量调度效果劣化甚至失效, 该特性同时也是保证 TSN 流量调度性能的基础。TSN 网络中的时间通常从一个中央时间源直接通过网络分配, 冗余主时钟与网络节点间的冗余同步路径能在网络链路甚至网桥丢失时依然提供同步时基, 实时保证网络的正常运行。

2.1.3 流量控制

流量控制机制是 TSN 实现确定低时延传输的关键技术, 主要包括流分类、整形、调度和抢占。

在工业场景下, 需要对各类工业应用涉及的业务流特性进行定义建模, 作为制定调度机制与优先级的依据。这样, TSN 网络在做数据转发时, 可针对不同优先级的流量进行承载质量差异化保证。目前, 工业网络中的业务流类型众多, 还没有统一的分类方法。

流量整形算法的时延、抖动和网络配置开销, 影响着不同算法在多个流实时传送业务场景下的应用^[4]。如时间感知整形器 (Time Awareness Shaper, TAS) 具有最佳的低时延和低抖动性能, 配置复杂性也最高; 信用整形器 (credit-based shaper, CBS) 的时延性能最差, 但却保证了流的 QoS; 异步数据流整形器 (Asynchronous Traffic Shaper, ATS) 时延性能介于两者之间, 配置复杂性最低。

流量调度为不同等级的业务流提供差异化承载, 使能各类工业业务数据的传输和流转。调度方案一般分为两大类: 一是基于时隙化的调度方案, 需要全网进行时间同步; 二是基于 QoS 的调度方案, 所有参与实时通信的设备在处理和转发通信包时需遵循相同的规则, 为时间敏感的业务流传输提供时延上界。

抢占可以进一步将不同技术的多个网络融合在一个以太网和 IP 的基础架构里, 实现自动化操作以及订单控制生产。通过大幅压降优先级低的信息流对重要信息流的影响, 两种信息流可以混合在同一链路上。

2.1.4 容错

时间敏感网络中，TSN 的调度、抢占和冗余功能提供更确定的延迟，更高效的数据包传输，以及跨网络冗余路径的无缝时钟同步。所有参与实时通信的设备在选择通信路径、预留带宽和时隙方面遵循相同的规则，可以利用多条路径来排除故障，防止硬件或网络故障影响数据传送。

2.2 与其他技术的融合

制造业企业是数字化转型的主力军。5G、边缘计算、大数据、人工智能等新技术都在寻找与工业最契合的应用场景，从而改变工业制造的流程、模式，提升产品品质、制造效率、改善服务，提高企业数字化水平。

时间敏感网络（TSN）技术特点决定了其与 OPC UA（OLE for Process Control）、边缘计算以及 5G 等先进技术相互融合，将形成更为强大的网络方案体系，助力支撑工业网络。

TSN 与 OPC UA 的结合解决异构系统互联互通问题，也是 OT 与 IT 的深度融合，同时实现网络的互联和数据层面的互通，进一步提升制造流程的自动化水平，使个性化定制成为可能。

边缘计算提供边缘智能服务，TSN 技术构建确定性网络。TSN 和边缘计算结合，可以满足企业数字化在敏捷联接、实时业务、应用智能、安全与隐私保护等方面的关键需求，同时满足边缘计算架构部署的灵活性。

5G+TSN 将时间敏感网络技术与 5G 网络进行融合，有效地保证工业生产网络的端到端高可靠低时延传输要求，是实现工业互联网无线化和柔性制造的重要基础。

2.2.1 TSN + OPC UA

工业通信分为互联(硬件接口的连接)、互通(软件层面的数据格式与规范)、语义互操作(语义的定义与规范)几个层面。各种总线解决的是连接问题，互通解决了应用层的匹配，OPC UA 是针对嵌入式应用的 OPC 通信标准的重大发展，解决不同系统之间的语义的互操作，还带有内置的安全模型。

TSN+OPC UA 组合通过 TSN 解决底层数据获取的问题，OPC UA 解决应用层语义解析的问题，组合构建的通用数据解析机制，提供实时、高确定性、独立于设备厂商的通信网络，解决了工厂内系统互操作的复杂。TSN+OPC UA 不与某特定厂商绑定，不仅将彻底统一数据链路的服务标准，配置效率更高，程序与应用模块化更强，有可能打破传统工业的结构，实现扁平化。图 5 为 TSN+OPC UA 与 ISO/OSI 参考模型各层关系。

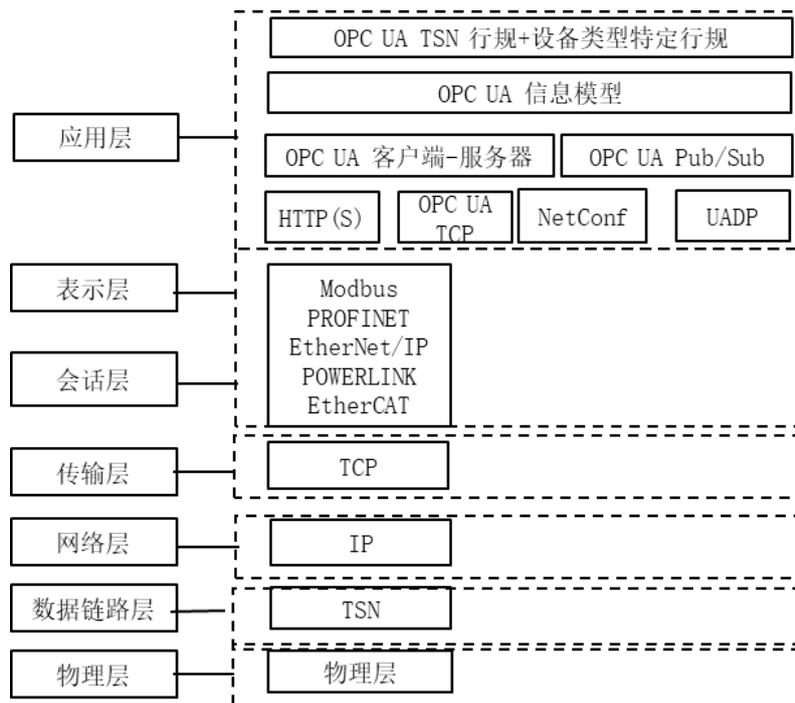


图 5 TSN+OPC UA 与 ISO/OSI 参考模型的各层关系

2.2.2 TSN+边缘计算

工业企业的边缘计算通常部署在设备或数据源头的网络边缘，以满足工业现场在敏捷联接、实时业务、数据优化、应用智能、安全与隐私保护等方面数字化的关键需求，达到降本增效、提升产品品质的目的。

边缘计算所处的网络需要解决实时性数据传输和多业务共网传输的问题。通过在网络中部署具备 TSN 能力的边缘计算网关设备（或具备边缘计算能力的 TSN 设备），TSN 技术可以为工业设备、传感器到边缘计算节点、云端的连接构建确定性、大带宽的标准化算力网络。TSN 和边缘计算结合，可以提升边缘计算业务性能，还能增加边缘计算架构部署的灵活性。

另一方面，时间敏感网络自身的智能运维也需借助边缘计算能力。TSN 网络相关实时资源数据计算分析、网络及流量模型建立和策略生成等能力的需求，又会促使边缘计算的部署。

2.2.3 5G+TSN

5G 网络的大带宽，高可靠性低时延特性，以及千亿级别设备的接入能力，是支撑工业数字化转型的关键基础设施。时间敏感网络（TSN）技术与 5G 网络融合部署将构建灵活、高效、柔性、可靠及安全的工业网络基础。

目前 TSN 与 5G 融合关键的问题是 5G 网络与 TSN 的互通。融合部署大致有两大方向：一是 5G 网络与 TSN 技术无缝拼接；二是 5G 网络与 TSN 深度集成。前者是用 5G 将工业设备以无线方式接入到有线网络，为 TSN 网络提供不受电缆限制的、可靠的设备接入。后者是将 TSN

相关技术深度集成进 5G，增强无线接入网络和核心网络的可靠性，保证数据在 5G 网络端到端的确定的上限时延传输，实现更为灵活的上行链路流量调度和更为快速的高精度时间同步。

TSN 与 5G 融合还存在一些技术挑战。（1）挑战一是时间同步机制，有线 TSN 采用 gPTP 协议实现时间同步，融合需要在 5G 网络中实现无线 gPTP 机制并与有线 TSN 实现联合部署与协调同步；（2）挑战二是协同流量调度机制，需要在 5G 无线网络中实现类似于有线 TSN 的 802.1 Qbv 的流调度能力，并实现与有线 TSN 流调度的协同机制；（3）挑战三是使 5G 实现类似于 TSN 交换机的高可靠桥接功能。

在 5G 网络的 R16 标准在网络可靠性、上行链路调度的灵活性、精确的时间同步等方面进一步增强，在 3GPP R16 23.501 中，将 TSN 技术纳入 5G 标准，与 uRLLC 形成确定性传输的技术接力。3GPP R17^[5]提出 TSN 增强架构，即实现 5G 核心网控制面支持 TSN；实现 5G 核心网确定性传输调度机制；通过 UPF 增强实现终端间的确定性传输；实现可靠性保障增强；实现工业以太网协议对接；支持多时钟源技术。对于时间敏感的工业应用场景，R17 标准设计达到 1 ms 的延迟、1 微秒的抖动和 99.9999%的可靠性指标。

3 探索与思考

3.1 业界探索

从国际上，西门子宣布将 TSN 列为未来重要的通信技术，其“工业网络专家计划”更是将 5G+TSN 列为打造数字化工业生态的重要手段^[6]。三菱的具有无线应用能力的工业网络“CC-Link IE TSN”率先将千兆以太网带宽与 TSN 相结合^[7]。博世和高通联合在博世位于德国萨尔茨吉特的工厂展示了通过 5G 和时间敏感网络（TSN）技术加速工业 4.0 的合作成果，展示了由 TSN、低时延、基于协作多点（CoMP）的超高可靠性和 5G 精准定位支持的 AGV 和 AMR 实现的工业自动化和柔性制造^[8]。英特尔联合博世建立了 TSN 与 5G 融合技术早期概念验证项目。该项目通过工厂的有线基础设施将两套 TSN 可编程逻辑控制器通过 5G 网络通信，不仅验证了包括支持 5G 通信的用户设备、5G 接入网及 5G 核心网三者可直接与博世的 TSN 可编程逻辑控制器配合，而且实现了对工业设备移动角度的控制和高速转轮速度同步，满足智能工厂的远程控制、生产、实时监控需求^[9]。中兴通讯携手北科大工业互联网研究院团队，完成国内首个 5G TSN 钢铁精确控制场景的技术验证，通过 5G TSN+精准无线 uRLLC 增强，保障确定性低时延（10ms）及可控抖动（us 级），确保操作同步灵敏^[10]。

在国内，中国信息通信研究院发布的《工业互联网专项工作组 2022 年工作计划》^[11]，通过研究制定《重点行业互联互通计划推进指南》，促进设备系统互联互通互操作，运用新型网络技术和先进适用技术改造建设企业内网。阿里云推出原生 0Lindorm TSDB 驱动的工业数据云系统架构，提供海量数据存储、开放生态兼容、多引擎异构数据融合等能力，驱动工业网络承载的多

个系统数字化超融合^[12]。

3.2 思考

单一的网络技术，难以解决工业领域复杂、多样的网络问题，基础电信运营商不仅需要做深做精做强网络，还需支撑工业企业运用新型网络技术和先进适用技术改造企业园区、内外网。对运营商未来工作思考如下：

一是提升网络覆盖水平。加快 5G 独立组网建设，扩大 5G 网络城乡覆盖，推动“双千兆”网络协同发展。强化室内场景、地下空间、重点厂区、重点交通枢纽及干线沿线网络覆盖，提升典型场景网络服务质量。

二是打造差异化的网络建设模式能力。在企业内网通过“以太化、无线化”，实现有线/无线智能融合；企业外网提供 5G 虚拟专网，并能根据工业企业业务要求个性化定制；工业园区间、工业园区内通过工业光网作为传输媒介。逐步实现 5G 网络在工业场景中由辅助向生产核心延伸，支撑工业企业建设 5G+全连接工厂。

三是基于工业互联网网络新技术和协议的应用，一方面促进 5G+TSN 确定性网络在工业场景更大范围落地，另一方面参与创建工业企业新的数据采集体系架构。通过融合新技术的网络实现工厂内网组网的灵活性、IP 化和无线化；同时促进生产设备之间横向互联，使工厂控制系统扁平化。

4 结论

随着国家对数字经济多项政策推动，工业企业的信息化、智能化进程不断加快。面向未来的下一代工业互联网网络，将以 5G 与千兆光网为基础，融合 TSN、WiFi 6、IPv6+等新技术，满足日益复杂工业新业务流量的高质量传输。工业互联网网络作为工业信息数据流动的“大动脉”，在构建我国工业企业数字转型的基础上，将推动产业链升级，实现智造强国战略。

参考文献

- [1] 工业 PON 2.0 白皮书（2020）, <http://www.aii-alliance.org/index/c190/n1671.html>
- [2] 时间敏感网络（TSN）产业白皮书, http://www.aii-alliance.org/upload/202009/0901_165010_961.pdf
- [3] 刘金娣, 李栋, 曾鹏, 基于 SDN&TSN 的未来工业网络架构探究, 自动化博览, 2018, 10, 56-59
- [4] Concer N, Thangamuthu S, Cuipers P J L, et al. Analysis of Ethernet-switch traffic shapers for in-vehicle networking applications//Proceedings of the IEEE Design, Automation Test in Europe(DATE).Grenoble,France,2015:55-60

[5] 3GPP R17, <http://www.3gpp.org>

[6] 西门子工业网络专家计划打造最强行业生态, <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1639214056925062269&wfr=spider&for=pc>

[7] <https://www.cc-link.org>

[8] 高通和 Gridspertise 合作推动电网变革 开启智能表计行业新时代, <https://news.mydrivers.com/1/817/817511.htm>

[9] 英特尔: 以 TSN 与 5G 融合技术塑造工业物联网的未来, <http://www.eepw.com.cn/article/202007/416144.htm>

[10] 中兴通讯携手北科大完成面向钢铁场景的 5G TSN 专网验证, <https://m.c114.com.cn/w127-1194264.html>

[11] 《工业互联网专项工作组 2022 年工作计划》, http://www.miitxxzx.org.cn/art/2022/4/13/art_203_1991.html

[12] 阿里云推出原生 Lindorm TSDB 数据库, 驱动工业 IT 与 OT 超融合数字化系统升级. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/475235628>

作者简介:

梁晓辉, 女, 博士, 中国电信股份有限公司四川分公司高级工程师, 技术专家, 四川省通信学会工业互联网专委会副主任委员, 主要研究方向: 5G 产业研究、工业互联网技术研究, 人工智能, 计算机应用技术

黄骅, 男, 国网四川综合能源服务有限公司高级工程师, 主要研究方向: 工业控制与自动化

施晓东, 男, 中国电信股份有限公司四川分公司信息化解决方案中心副总经理, 主要研究方向: 电信基础网络, 信息化基础设施建设

联系人: 梁晓辉

通信地址: 四川省成都市青羊区文庙前街 72 号

邮编: 610072

联系电话: 15308007261

电子信箱: 15308007261@189.cn

5G URLLC 技术在汽车制造行业中的探索与实践

范济安¹, 李建和², 赵兴龙¹, 谷蓉婷³, 姜孟超⁴,

袁占江², 张向业², 包盛花⁵, 马欣⁶, 谭乐⁷

(1. 中国联合网络通信有限公司政企客户事业群, 北京 100031; 2. 精诚工科汽车系统有限公司保定自动化技术分公司, 保定 071000; 3. 华为+无线产品管理部, 上海 200120; 4. 华为技术有限公司中国联通系统部 Marketing, 北京 100073; 5. 华为+无线场景实验室, 上海 200120; 6. 北京华为数字技术有限公司无线网络研究部, 北京 100095; 7. 上海勃傲自动化系统有限公司研发部, 上海 201800)

摘要: 基于目前 5G R16 版本, 中国联通与各汽车行业合作伙伴共同开发了 60 多种 5G 应用场景, 其中以通信时延需求大于 20ms 的非实时类业务为主。从 R16 开始, 5G 超可靠低延迟通信 (URLLC) 特性不断成熟, 5G 网络初步具备了确定性时延的能力。随着 3GPP 标准持续演进到 5G-A, 5G URLLC 的能力将不断增强, 确定性时延能力将进一步提升, 可满足大多数的工业自动化的实时控制场景, 并可初步进入工业自动化的运动控制场景。

关键词: 5G 网络; URLLC; 汽车制造; OT/IT 网络

Exploration and practice of 5G URLLC technology in automobile manufacturing industry

Fan Ji'an¹, Li Jianhe², Zhao Xinglong¹, Gu Rongting³, Jiang Mengchao⁴, Yuan Zhanjiang², Zhang Xiangye², Bao Shenghua⁵, Ma Xin⁶, Tan Le⁷

(1. Government and Enterprise Customer Business Group of China United Network Communications Co., Ltd., Beijing 100031; 2. Baoding Automation Technology Company of Exquisite Automotive Systems Co., Ltd., Baoding 071000; 3. Huawei wireless product line MKT, Shanghai 200120; 4. China Unicom Account Marketing Department of HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD., Beijing 100073; 5. Huawei + X Labs, Shanghai 200120; 6. Beijing Huawei Digital Technologies Co., Ltd., Beijing 100095; 7. Shanghai B&A Automation System Co., Ltd. R&D, Shanghai 201800)

ABSTRACT: Based on the current 5G R16 version, China Unicom and various automotive industry partners have jointly developed more than 60 5G application scenarios, mainly non real-time services with communication delay

requirements greater than 20ms. Since R16 version, 5G URLLC has been maturing, and 5G network has initially possessed the ability of deterministic delay. With the continuous evolution of 3GPP standard to 5G-A, the capability of 5G URLLC will be continuously enhanced and the deterministic delay capability will be further improved, which can meet the needs of most real-time control scenarios of industrial automation, and preliminarily meet the needs of industrial automation motion control scenarios.

KEY WORDS: 5G Network; URLLC; Automobile Manufacturing; OT / IT Network

1 绪论

现如今，汽车行业正孕育着巨大的变革机遇，5G、工业互联网、人工智能、云计算、大数据等技术推动汽车行业全链条变革，为汽车产业带来新的发展机遇。国家层面也大力推动汽车产业智能化变革，2021年12月《“十四五”智能制造发展规划》和2021年1月《工业互联网创新发展行动计划(2021-2023年)》指出数字孪生、人工智能、5G、大数据、区块链、虚拟现实（VR）/增强现实（AR）/混合现实（MR）等新技术在制造环节的深度应用^[1]，大力推进智慧工厂、数字化车间的建设，鼓励打造5G全连接示范工厂^[2]；加快汽车工业数字化转型，提升汽车行业全产业链智能化水平。

针对于传统汽车制造企业，OT领域以现场控制为主，主要采用OT网络来支持物理创造和制造过程所必需的设备、传感器和软件的通信；IT领域以流程为主，主要采用IT网络来连接信息处理所需的相关技术。但OT领域的自动化及IT领域的信息化所产生的数据没有融合和流通，系统及数据离散、精度低，网络只起到局部连接的作用。另外，OT网络接口协议众多，工厂中存在大量信息孤岛、数据收集困难；以及对于移动应用场景支撑效果不好，柔性较差，不适宜快速部署及柔性化生产等问题。随着汽车制造数字化进程不断加速，设备接入量和产生的数据与日俱增，传统OT网络和IT网络相割裂的通讯方式，目前已难以满足数字化转型的需求。另外，车企为提升自身竞争力开始尝试小批量定制^[3]。

5G具有的eMBB(增强移动宽带)、URLLC(低时延高可靠)以及mMTC(海量大连接)三大特点，是解决行业痛点的最佳路径，有望替代传统通讯方式以满足设备接入需求的增长^[4]，推动未来的工业网络由层级结构变为扁平化结构，从而实现IT/OT一张网。自从国内5G牌照发放三年多以来，在工业领域基于5G的eMBB特点实现了众多应用场景，如设备的数据采集、AR/VR的无线连接、AGV智能化引导及AI机器视觉质检等。但应该承认大部分应用是围绕辅助生产的环节，能够真正进入到基本生产环节的十分有限，即使进入了也只是一些点状应用，没有形成体系，形成规模。我们也在一直寻找5G在汽车制造基本生产领域能够起到关键作用的切入点，使得5G能够成为汽车制造企业数字化转型的真正动力。

工业企业的核心技术在OT领域的工业控制，5G如果要想跳出目前点状创新的局限性，就要能把工业自动化的概念更新，扩展到柔性化、智能化和高度集成化，向软件定义生产的方向发

展，向软件自主可控的方向发展，向 OT、IT、CT 融合的方向发展。5G 三大场景中，基于 eMBB 和移动性场景包括：机器视觉检测、AGV、云化机器人等；基于 mMTC 的场景包括：海量连接和室内定位等；基于 uRLLC 的场景包括：工业机械远程控制、柔性机械臂等。从 5G 能够更加深入进入工业领域来看，特别是 5G 在基本生产领域的应用，需要从 eMBB 向 uRLLC 逐步延伸。

2 汽车制造行业网络现状及需求

汽车制造过程分为冲压、焊接、涂装、总装四大工艺，其中焊接车间设备和网络结构最为复杂，焊装车间的网络系统结构采用“集中管理、分散控制”的模式^[9]。依据这一原则，将整个焊装车间内生产设备的控制系统分为两层网络（工业以太网、工业总线）。其中，工业以太网实现了控制平台到 PLC 的数据采集与监控，工业总线实现了 PLC 到现场 IO 的控制，在每个层次中使用不同的网络结构和硬件配置，以实现各自不同的功能。受限于现有网络能力，主 PLC 与控制平台之间，主 PLC 与现场设备之前，不同主 PLC 之间采用不同类型的网络进行交互。主 PLC 通过工业以太网将设备信息上传至 MES 进行非实时数据交互。主 PLC 和现场设备层设备之间通过工业总线，采用星型+总线型网络拓扑结构进行连接，但需要保证相邻设备间距离不能超过 90 米。

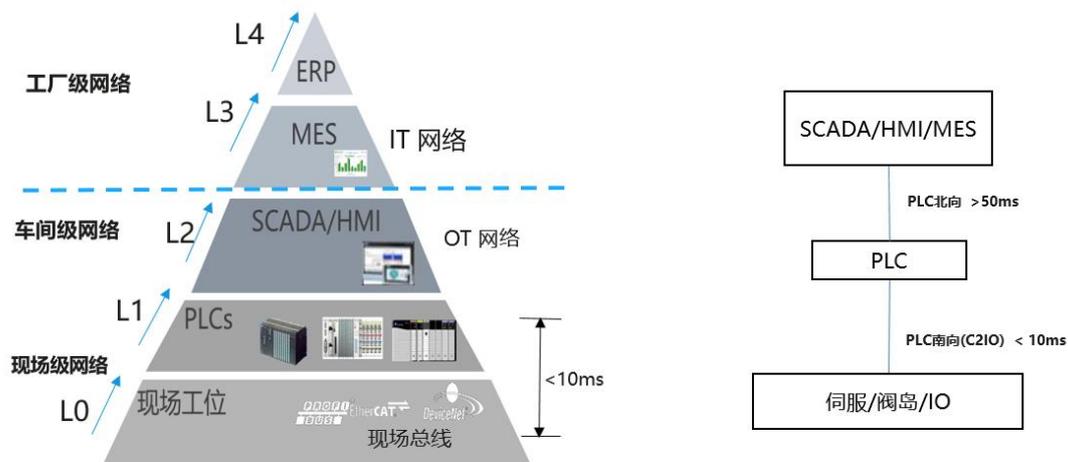


图 2-1 以 ISA95 标准构架的制造系统

在 OT 网络层面，通信协议通常为 PROFINET、ModbusTCP/IP 或 EtherNet/IP，采用铜介质网络电缆连接，线体内需要布置交换机进行数据交互。如车间级网络，承载的通常是非实时业务，时延一般要求大于 50ms；如现场级网络，涉及工业控制 C2IO 的控制层和执行层，通常承载实时业务，约 80%节点通信周期为 4ms，单节点要至少保证 4ms 和 99.999%的可靠性。另外，OT 层网络及设备目前主要存在布线硬件投入成本高、施工周期长；新车型导入涉及的网络重建及改造

工程复杂；生产过程中由于设备长时间运行、磨损导致的网络硬线故障时有发生，且故障排查时间长，处理困难等方面的困难和痛点。

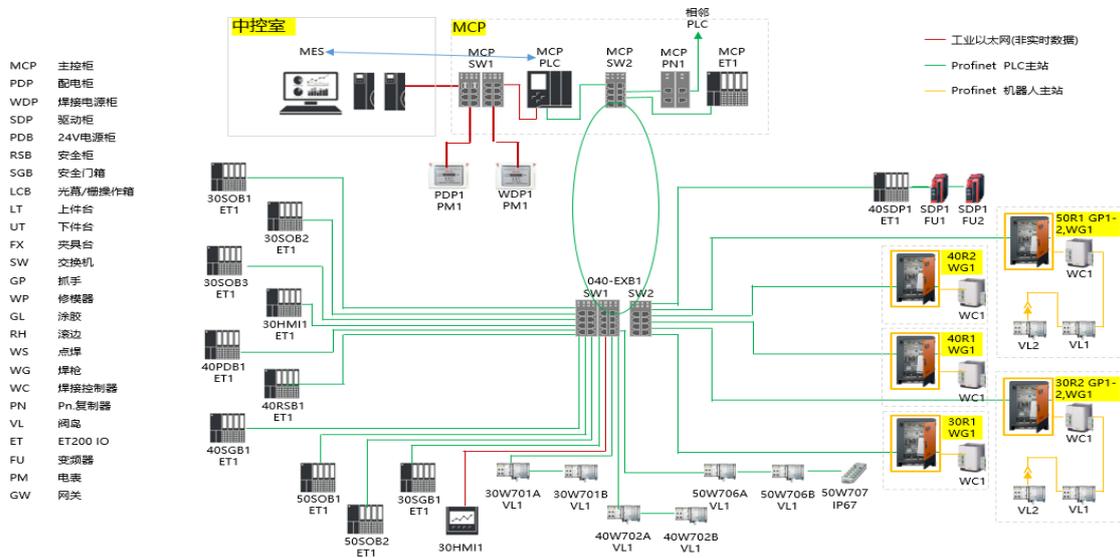


图 2-2 汽车制造车间 OT 网络布局图

在 IT 网络层面，通信协议通常为 TCP/IP，采用铜介质网络电缆连接，网络结构为金字塔结构，各层之间需要配置交换机，另需独立布线。工厂级网络主要为 IT 网络，承载非实时业务，一般时延要求大于 50ms。IT 网络目前主要存在带宽窄（端口速率小于 100Mbps）、实时性差（时延 2 至 3 秒）、距离短（传输距离小于 100 米）以及布置周期长施工成本高等问题。

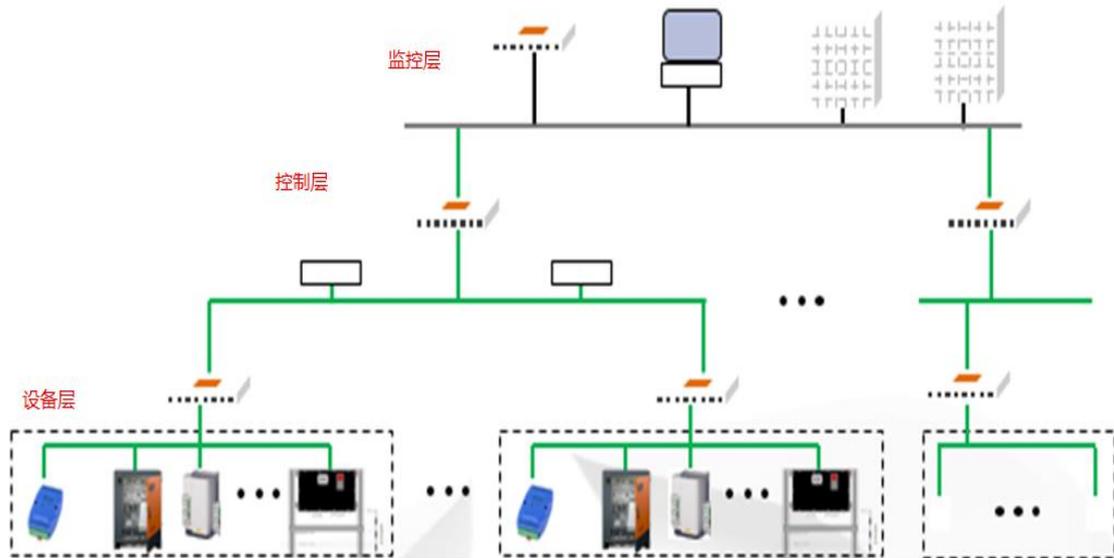


图 2-3 汽车制造车间 IT 网络布局图

3 5G 技术在汽车行业中的应用实践

当前中国车企开始由传统规模制造走向个性化定制,由集中式控制向分散增强型的基本模式的转变,并且建立起高度灵活的个性化、数字化和高度一体化的产品与服务生产体系^[6]。为了助力汽车制造业的数字化升级转型,在 5G 当前 R15、R16 版本基础上,中国联通开展了积极的探索与实践,与各汽车行业合作伙伴共同开发出了 60 多种 5G 应用场景,仅 2021 年就开展了 100 多个项目,使得 5G 在汽车制造领域有了较为普遍的应用实践。其中大多应用场景承载通信时延需求可大于 20ms 的非实时类业务,包括增强现实和虚拟现实、机器视觉、远程操控、无人驾驶、设备管理等对于网络普遍要求上下行大带宽、稳定低时延、高可用及移动性的应用场景。

在无人驾驶场景下,通过 5G 网络连接车间内大量使用的 AGV、叉车、牵引车等物流车辆,车间运营系统可对物流车辆进行实时管控。大部分情况下物流车辆与运营系统的通信采用三层网络通信,而不是直接采用二层通信;少部分情况 AGV 部署了从 PLC,而从 PLC 需要跟主控 PLC 通过二层 5G LAN 功能实现通信,这种情况一般 50ms 可满足主从 PLC 之间的通信时延要求。

在机器视觉场景下,利用 5G 网络具有部署方便、移动方便以及大带宽等特点,汽车制造领域通过 5G 机器视觉与人工智能相结合已大量使用了 AI 检测,主要用于工厂安全、生产智能监控系统监测。通过 5G 摄像头可实时把监控视频回传到 AI 检测平台,可替代人工检测进行装配故障、表面瑕疵检测,如发动机装配质检、车尾标装配、车轮装配合规、底盘和电机钢印号监测等;可准确识别工作人员是否按照给定操作工序进行作业,如天窗清擦和底涂操作工序合规、转向器装配操作工序合规监测等。

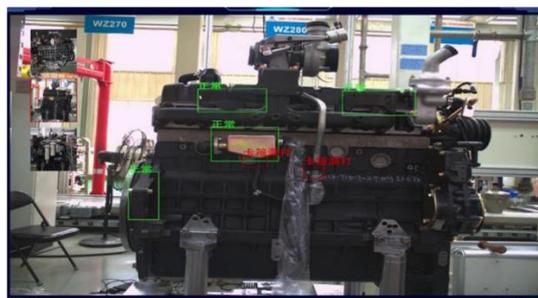


图 3-1 发动机装配 5G+AI 视觉检测现场图



图 3-2 天窗清擦和底涂操作工序合规 5G+AI 视觉检测现场图

同时，我们也积极在探索与实践用 5G 网络替代有线工业以太网。在车间内大量使用的 PLC 需要向 MES、SCADA、集中控制平台等北向系统传输数据或接受控制命令，通常这种 PLC 北向数据传递属于非实时业务，对时延和稳定性要求只要达到 50ms 和 99.99% 即可。经过现场测试，目前 5G R16 的功能完全可以满足相应网络需求，5G 网络可用于多种生产系统的 PLC 北向数据传递，包括 AVI 生产过程控制、ANDON 报警、KITING 线边物流等。另外，5G R16 版本提供了 5G LAN 功能，可在网络二层直接将以太网设备接入。但是，目前自动化生产系统中的工业总线继续保留，在商用项目中没有采用 5G 网络替代。主要原因为 PLC 南向网络连接承载的是操控设备的实时性业务，时延和稳定性要求一般需达到 4ms 以下，可靠性 99.999%，这种要求 URLLC 功能是目前 5G 版本尚不能达到的。

4 5G URLLC 技术在汽车行业中的应用研究

传统工业网络存在不柔性，不智能等问题，5G URLLC 应用于新一代汽车柔性智能化产线，将为汽车制造会带来三大类价值场景：

(1) 5G URLLC 使能柔性化应用：去除有线束缚，如机器人工具切换等，减少有线故障停机，预估全年提升产能约 60 小时。

(2) 5G URLLC 使能智能化应用：实时与非实时业务一张网，如智能焊接等智能工艺，在实时自动化控制的同时监测焊接质量，提升良品率。

(3) 5G URLLC 使能新产品快速上线：免除有线网络拆除再安装的重复建设投资，如新车型上线一年一小改三年一大改，可缩短上线周期和成本，实现快速上新。

针对上述行业传统网络痛点，以及 5G URLLC 应用所带来的价值。业务场景对 5G 的能力提出了要求，如下图所示是某生产汽车后车门的焊装产线，我们结合其对于 5G URLLC 的能力的要求，开展 5G URLLC 在汽车柔性产线创新应用的相关工作。该产线由四台机器人通过切换工具，配合完成抓件、焊接、涂胶、滚边多种工艺；并结合立体库随行夹具，支持多种车型的后车门的混线生产。

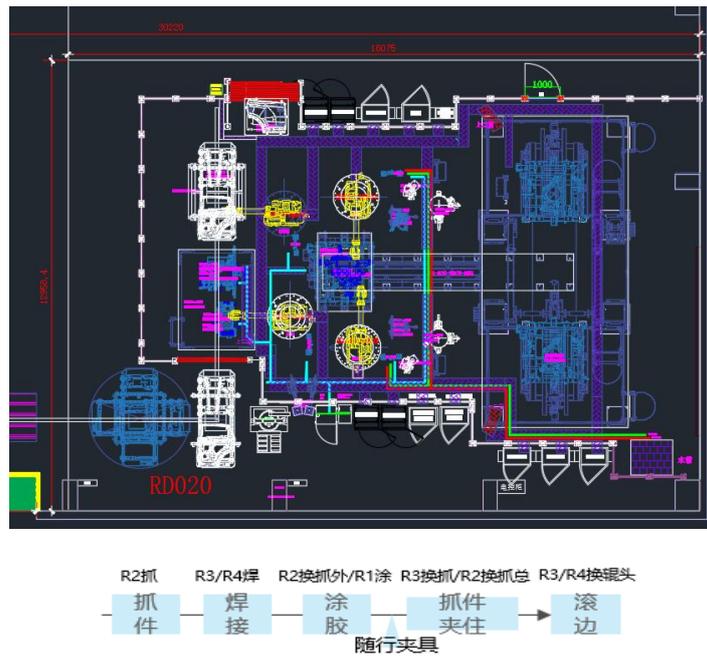


图 4-1 汽车后车门焊装柔性产线及工艺说明

在该产线上，我们通过 5G 网络替代传统的 OT 网络，采用 5G 化之后的组网方案如下图所示：

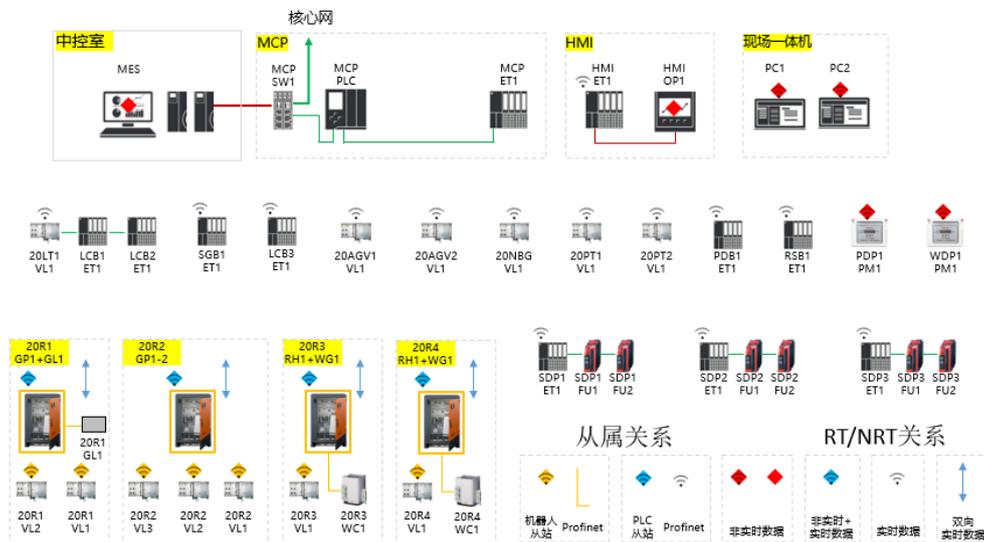


图 4-2 汽车柔性产线 5G URLLC 组网图

5G URLLC 承载 PLC 到 IO 之间的实时工控业务，同时提供数据采集业务融合一张网能力：

- (1) 主 PLC 从 5G UPF 接入, 5G UPF 下沉车间, 且支持实时处理；
- (2) 从 PLC 和现场 IO 通过 5G UE 接入, 需提供 5G URLLC 工业模组；

(3) 柜内或大型装备上多个工控设备级联接入，需提供 5G URLLC 工业网关。

表 4-1 汽车柔性产线工控业务需求描述

业务模式	设备简写	设备介绍	包大小	数量	更新周期 ms	看门狗时间 ms
1 对 1 星型 IO	VL	单体阀岛 IO	64byte	12	4	12
1 对 1 星型 IO	ET	单体 ET200 IO	64byte	5	4	12
1 对多链形 IO	ET+FU+FU	1 个 ET200 IO, 2 个变频器 IO 串接	192byte	3	4	12
1 对多链形 IO	VL+ET+ET	1 个阀岛 IO, 2 个 ET200 IO 串接	192byte	1	4	12
双向 IO	Rob	机器人 (和 PLC 数据量)	78byte	4	4	12

按照相对应的需求，目前采用 5G-Advanced 技术样机，进行该柔性产线的创新应用验证。具体组网如下图所示，其中主 PLC 从 5G UPF 接入，现场设备从 5G UE 接入。受限于现有 URLLC 芯片能力不足，5G-A URLLC 终端采用测试终端 TUE，但是受限于 TUE 数量有限，现场设备多数采用级联方式接入 5G 网络。

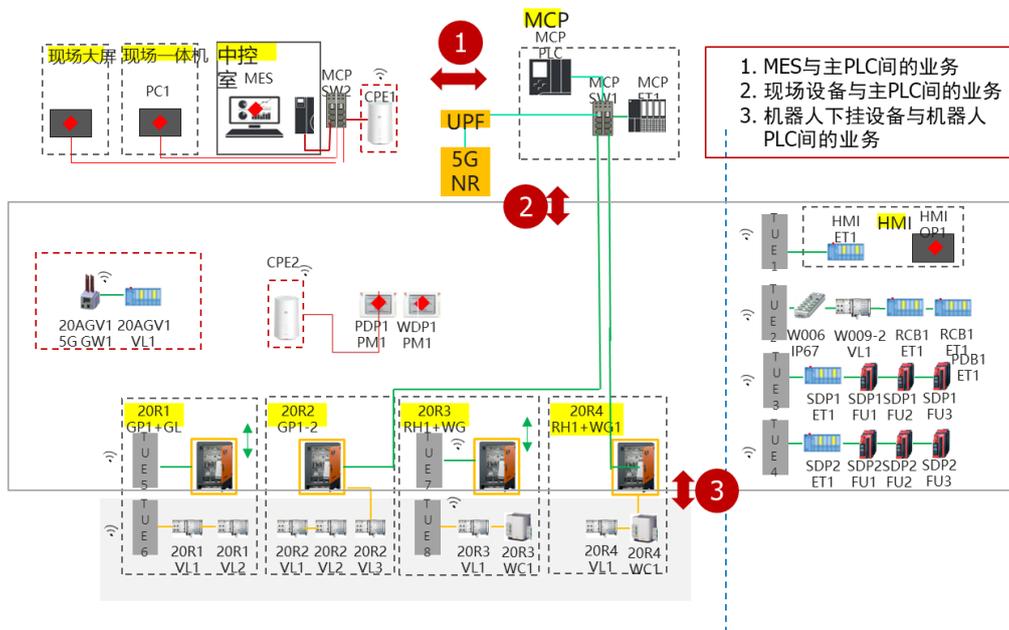


图 4-3 汽车柔性产线 5G-A URLLC(样机)组网图

其中，5G-A URLLC 网络的现场部署如下图所示，采用 lamsite 小基站，pRRU 之间间距为 10m*12m。为满足 4ms@5 个 9 的业务诉求，采用以下关键技术：

(1) 采用两个 TDD 载波，配置成互补配比（例如 7:3+3:7；2:3+3:2 等），构建类似 FDD 帧结构避免空口业务包传输等待，降低时延，同时具备 TDD 上下行信道互易性等优势，获取可靠性和容量增益。本次验证场景采用 3300~3400MHz 3:2+ 3400~3500MHz 2:3 互补 TDD 方案；

(2) 5G UPF 下沉车间，且实时处理能力<0.5ms；

(3) 基站与 5G UPF 之间有线直连，等效于 N3 确定性<100us；

(4) 其他相关 5G 特性：DMIMO/预调度/5G LAN/Non-slot。

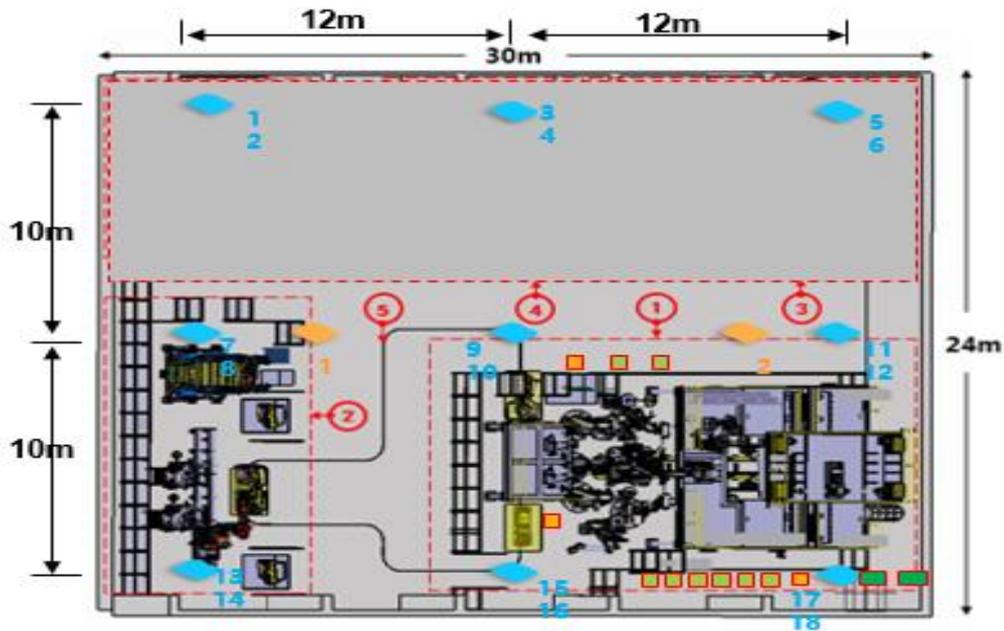


图 4-4 5G-A URLLC 样机网络的现场部署图

对于 C2IO 逻辑控制，一般都是周期性的确定性通信，即要求最大时延有边界。为了保持产线工业控制业务的实时性，一般要求最大时延 $<CT$ 的概率足够高，以保障业务的稳定性。那么对于确定性通信，最大时延 $<CT$ 的单包可靠性，即业务包的最大时延要在 CT 内正确送达的概率成为关键指标。基于业内工业控制通用的看门狗滑窗机制，单包可靠性 R 与产线级 CSA 之间的关系建模如下：

$$R = 1 - \sqrt[m]{1 - \frac{M - (m-1) \sqrt[n]{n} \sqrt{CSA}}{\sqrt[n]{n} \sqrt{CSA}}}$$

$$= 1 - \sqrt[m]{1 - \frac{CSR + Y/CT - (m-1) \sqrt[n]{n} \sqrt{CSA}}{\sqrt[n]{n} \sqrt{CSA}}}$$

其中 R 是单包可靠性， CRS 是产线宕机的时长， CSA 是产线在 CRS 内宕机的概率， CT 是发包间隔(ms)， m 是看门狗最大次数； M 是宕机时长 CSR 对应的发包数， $M = CSR * Y/CT$ ，而 Y 是 1 年内的总时长 $Y = 365 * 24 * 60 * 60 * 1000ms$ ； n 是宕机相关性，通常取 PLC 到 IO 的最大组态节点数。

按照上述的单包可靠性建模， $CT = 4ms$ ， $ST = 8ms$ ，宕机相关性 $n = 8$ ， $CRS = 1$ 年，则 1 年宕机的单包可靠性 $R = 0.999945789$ ，向上取整约 99.999%。

在整体自动化产线和 5G-A URLLC 网络的基础上，为进一步测试 5G-A URLLC 网络能力，采用测试分析仪与 5G-A URLLC 样机相结合的方式。测试分析仪模拟 PLC 与 8 台 DEV 模拟工控业务交互，且收发时间同步，可以测试交互时延。

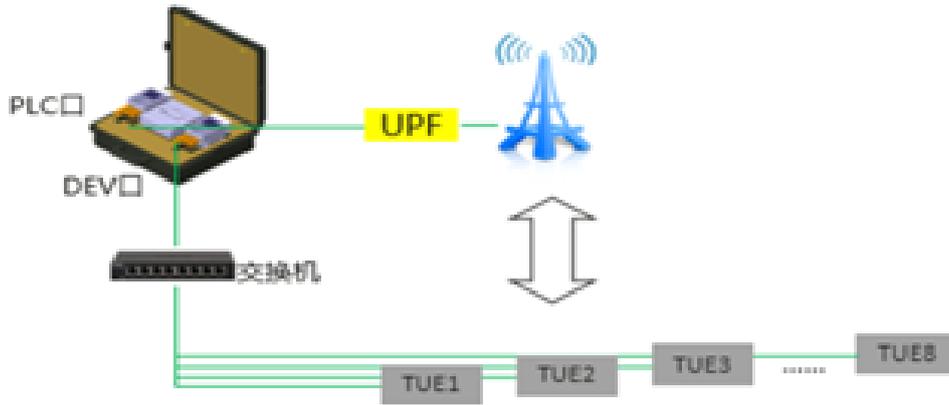


图 4-5 5G-A URLLC 样机组网拓扑

如下是本次测试的结果，PLC 到 DEVICE 总发包数 2000000 个，多数都是在 4ms 内正确送达，即看门狗为 1 的包数 1996353，少数情况超时或丢包，但没有宕机。看门狗为 2 的包数 2642，总计包可靠性= (1996353+3642) /2000000=99.99975%;同理，DEVICE 到 PLC 的包可靠性= (1998304+1690) /2000000=99.9997%。

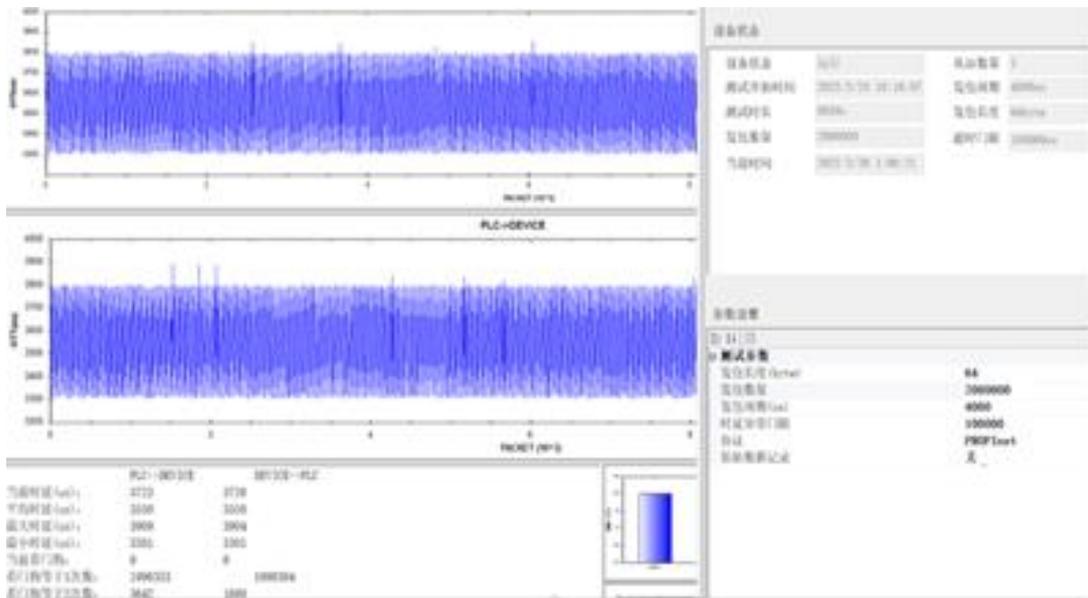


图 4-6 5G-A URLLC 样机测试结果

为进一步测试 5G-A URLLC 网络能力，采用测试模拟仪对 5G-A URLLC 样机进行稳定性测试。测试模拟仪对 PLC 与 IO 之间的工控业务交互进行模拟，组成 PLC 对 IO 的 1 对 8 控制组网拓扑。

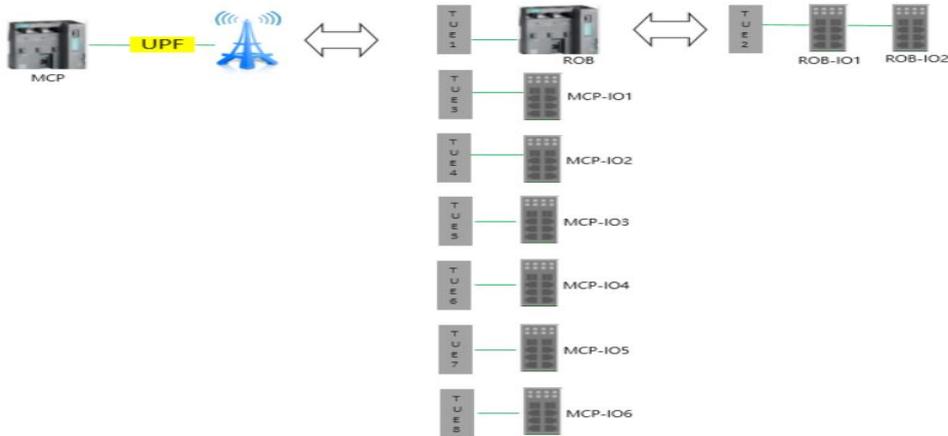


图 4-7 5G-A URLLC 样机测试组网拓扑

如下是本测试场景的测试结果，1 个 PLC 到 8 个 IO 的一对 8 组网测试场景下，业务周期 CT 4ms，看门狗 WDT=12ms，连续运行 12 个小时以上，可稳定运行不宕机，即 PLC 或 IO 的看门狗机制没有异常导致系统宕机。由此可见，在给定的场景里，5G-A URLLC 技术样机初步满足低时延高可靠的业务诉求。

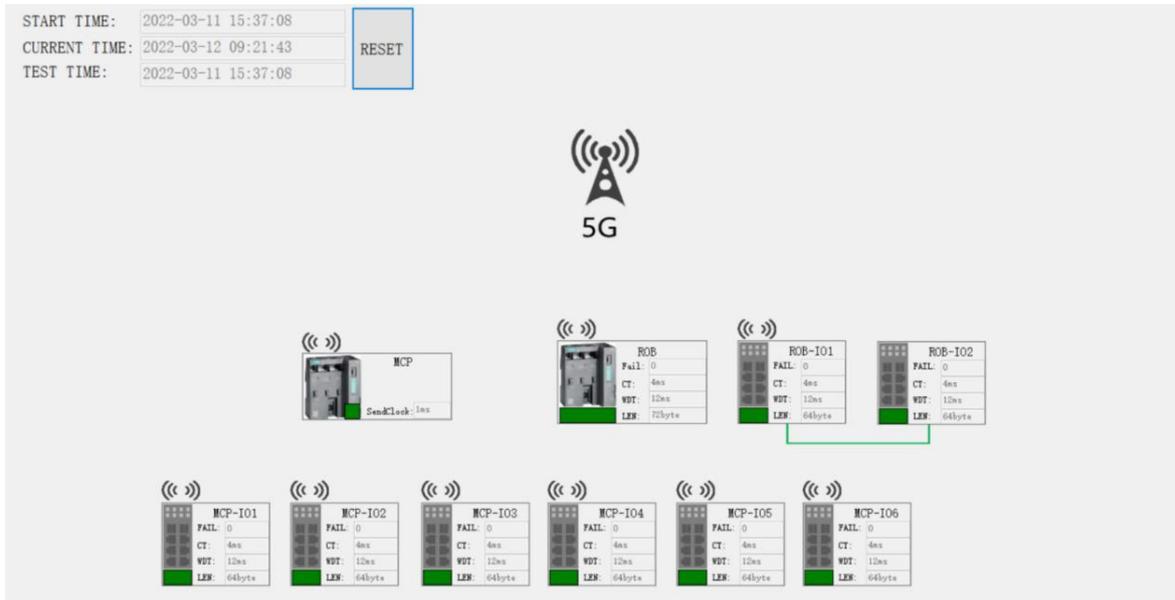


图 4-8 5G-A URLLC 样机测试结果

表 4-2 5G-A URLLC 样机测试结果

START TIME	2022-03-11 15:37:08	CURRENT TIME	2022-03-12 09:21:43
TEST TIME	2022-03-11 15:37:08	MCP SendClock	1ms
CT	4ms	WDT	12ms
	FAIL	LEN	
ROB	0	72byte	

ROB-IO1	0	64byte	
ROB-IO2	0	64byte	
MCP-IO1	0	64byte	
MCP-IO2	0	64byte	
MCP-IO3	0	64byte	
MCP-IO4	0	64byte	
MCP-IO5	0	64byte	
MCP-IO6	0	64byte	

5 结束语

从 R16 开始，5G 超可靠低延迟通信（URLLC）特性不断成熟，5G 网络初步具备了 10ms 的确定性时延的能力；从而 5G URLLC 的应用从单链路的远程操控，逐步开始进入工业自动化实时控制。随着 3GPP 标准的持续演进到 5G-A，5G URLLC 的能力将不断增强，确定性时延能力将进一步降低到 4ms-1ms，满足大多数的工业自动化的实时控制场景，并进一步探索工业自动化的运动控制场景。

随着 5G URLLC 能力的不断增强，未来汽车制造企业可以建设真正 5G 全连接车间，现场设备除运动控制外，无论是与 MES/SCADA 的数据传输业务，与基于机器视觉/视频监控等边缘计算 AI 应用，还是 PLC 到 IO 的柔性化/智能化应用，都可以采用 5G 连接，真正打通 PLC 的北向和南向业务，实现实时/非实时一张网，使能汽车行业工厂自动化的柔性化、智能化升级。

本次案例的测试结果仅是 5G URLLC 在汽车行业工业现场控制应用的开始，上述的建模以及测试方法，尚属首次探索，不可避免存在局限性。后续将继续完善 5G URLLC 的能力和系统测试方法，如 URLLC 工业模组，及 URLLC 与工业协议跨层协同提升 URLLC 容量等，以满足行业未来 5G URLLC 规模化部署的需求。随之也将促进基于 5G URLLC 的各类柔性化和智能化应用，如并行排产的随行夹具，5G 化的工具切换，AGV/ESM 等运输系统远程 IO 化，动态智能工艺等。

参考文献

- [1] 工业和信息化部. “十四五”智能制造发展规划. 工信部联规〔2021〕207 号, 2021: 7.
- [2] 工业和信息化部. 工业互联网创新发展行动计划（2021-2023 年）. 工信部信管〔2020〕197 号, 2021: 2
- [3] 艾瑞咨询. 中国车企数字化转型趋势系列报告—生产数字化篇, 2021: 5.
- [4] 艾瑞咨询. 中国车企数字化转型趋势系列报告—生产数字化篇, 2021: 46
- [5] 丁亚超, 段二强. 汽车焊装车间自动化控制技术. 电力设备, 2018, 16 期.
- [6] 亿欧智库. 2020 中国车企数字化升级研究报告, 2020: 23

作者简介

范济安: 中国联通集团大数据首席科学家、产业互联网专家委员会主任、工业互联网事业部执行总监, 同时兼任中国地下空间 5G 技术创新应用联合实验室副主任、中国联通科学技术委员会主任委员、5G 应用创新联盟专家委员会委员、联通创投公司咨询委员会委员、中国卫生信息学会健康医疗大数据专业委员会委员等职。主要从事 5G、工业互联网等方面的研究工作。

李建和: 长城汽车精工自动化总经理, 高级工程师, 负责精工自动化全面管理工作。

赵兴龙: 中国联通集团政企客户事业群工业互联网 BU 行业主管, 高级工程师, 主要从事 5G、工业互联网等方面的研究工作。

谷蓉婷: 上海华为技术有限公司, 无线网络产品线产品管理, 高级营销经理, 主要从事 5G/5G-A toB 市场洞察和产业推进, 特别是 URLLC 及其在工业领域应用场景孵化及产业构建和商业落地能力规划。

姜孟超: 华为技术有限公司中国联通系统部 Marketing, 5G+工业互联网解决方案专家, 主要从事 5G、工业互联网等方面的研究工作。

袁占江: 长城汽车精工自动化工业智能事业部副总经理, 主要从事 5G、自动化、MES 等方面的研究工作。

张向业: 长城汽车精工自动化工业智能事业部产品开发经理, 主要从事 5G、自动化、MES 等方面的研究工作。

包盛花: 上海华为技术有限公司, 无线场景实验室, 主任工程师, 主要从事 5G 2B uRLLC 领域场景需求分析与创新解决方案设计。

马欣: 北京华为数字技术有限公司无线网络研究部, 主任工程师, 主要从事 5G/5G-A 在 toB 行业应用的技术研究, 尤其在 URLLC 等方面的探索和推动。

谭乐: 上海勃傲自动化系统有限公司研发总监, 主要从事工业以太网总线协议开发, 系统实时性研究, 工业以太网总线在 5G 上的应用等工作。

联系人及联系方式

姓名: 赵兴龙

单位: 中国联合网络通信有限公司政企客户事业群

联系方式: 15611027718, zhaoxl111@chinaunicom.cn;

通信地址: 北京市西城区金融大街 21 号中国联通大厦, 100031。

5G URLLC 技术在智能电网中的应用研究

李建元¹, 张家铭², 田经师¹, 魏庆伟¹, 王本利³, 马学菊¹

(1.中国移动通信集团山东有限公司, 济南 250002; 2.中国移动通信集团设计院有限公司山东分公司, 济南 250002; 3.山东中移通信技术有限公司, 济南 250002)

摘要: 第五代移动通信技术网络是工业 4.0 通信的主要选择之一, 新空口 (NR) 技术提供了对超高可靠低延迟 (URLLC) 服务的支持, 使 5G 网络具有毫秒级的端到端时延并能降低故障概率。智能电网对网络低延迟和高可靠性提出了更高要求, 5G 技术高可靠、低时延、广连接的技术特性, 与“新能源为主体的新型电力系统”性能需求高度匹配, 可以很好地满足智能电网多样性的需求, 该技术可促进安全、可靠、高效、环保的智能电网建设。

关键词: 智能电网; 5G URLLC; 低时延; 高可靠

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

Research on the application of 5G URLLC technology in smart grid

LI JIANYUAN¹, ZHANG JIAMING², TIAN JINGSHI¹, WEI QINGWEI¹, WANG BENLI³, MA XUEJU¹

(1. China Mobile Communications Group Shandong Co., Ltd., Jinan 250002;

2. Shandong Branch of China Mobile Communication Group Design Institute Co., Ltd., Jinan 250002; 3. Shandong Zhongyi Communication Technology Co., Ltd., Jinan 250002)

ABSTRACT: The fifth-generation mobile communication technology network is one of the main choices for industrial 4.0 communication. The new air port (NR) technology provides support for ultra-high reliability and low latency (URLLC) services, enabling 5G networks with millisecond end-to-end latency and reducing the probability of failure. Smart grid to network low latency and high reliability put forward higher requirements, 5G technology high reliability, low delay, wide connection technology characteristics, and "new energy as the main body of new power system" performance demand highly match, can well meet the needs of smart grid diversity, the technology can promote safe, reliable, efficient and environmental protection of smart grid construction.

KEY WORDS: Smart grid; 5G URLLC; Low Latency; High Reliability.

工业互联网是第四次工业革命的重要基石, 5G 的高速率、低时延和大连接三大新特性与工

业互联网无线网络需求十分契合,是工业互联网的关键技术^[1]。5G 作为新一代信息通信技术,与电网融合创新有利于 5G 技术与电网需求的融合发展。

面对各类能源业务的快速增长和终端通信需求的爆发式增长,5G 技术高可靠、低时延、广连接的技术特性,与“新能源为主体的新型电力系统”性能需求高度匹配。基于 5G 的新型电力系统将充分支持分布式新能源、分布式储能、电动汽车、大功率电动智能机器等,为“碳达峰、碳中和”目标下的能源电力供应服务提供连接的桥梁。从“源随荷动”转向“源网荷储”,新型电力系统与 5G 高速率、低时延、高可靠、大连接的技术特性深度拥抱,铺平了电网通信的“最后一公里”。

本文聚焦双碳背景下能源转型变革需求,在山东电网建设 5G 虚拟专网,研究 5G URLLC 技术在智能电网中的应用,以 5G 技术赋能新型电力系统,进行 5G 规模化标杆应用探索,解决 5G 规模化应用的技术标准问题,助力新型电力系统发展。

1 5G 网络简介

5G 包括三大典型场景:增强型移动宽带(eMBB)、低延迟高可靠性(URLLC)、大规模机器通信(mMTC)。三个典型的场景能够助力工业制造、车联网、智能电网、无人机、AR/VR 等大量的应用技术需求。

为了满足对不同应用场景和应用需求,5G 网络设计是基于弹性敏捷、灵活复用的设计理念,引入 SDN/NFV 技术^[2],将软硬件平台进行虚拟化和解耦,底层使用统一的 NFVI 基础设施,利用 SDN 控制器实现资源灵活调度。传统网元被划分为更细粒度的功能模块,网络功能之间采用轻量 API 接口通信,实现系统的高效化、灵活化、开放化。

2 5G URLLC 特性

URLLC 在 3GPP 标准化进程中包括低时延技术、高可靠技术以及 URLLC 与 eMBB 复用三个方面的研究。

2.1 低时延技术要求

3GPP 在 R15 阶段提出了实现低时延的解决方案,支持灵活的帧结构^[3]、支持更小的调度周期、灵活的 PDCCH 配置^[4]、URLLC 高优先级传输、采用边缘计算技术等。5G 网络可以将 UPF 用户面功能下沉到用户侧,边缘计算服务器与 UPF 共站部署,UPF 识别到业务流的目的地址是本地,分流到本地的边缘计算服务器进行业务处理,减少了业务的传输路径,降低时延。

在 R16 阶段,进一步提出低时延增强要求。(1)免授权配置:基站预先配置周期性资源,UE 不需向基站申请。(2) HARQ 反馈增强:在 R15 阶段,UE 在一个时隙中在 PUCCH 上只能传输一次 HARQ-ACK。在 R16 阶段,允许在一个时隙内部的多个 PUCCH 信道上反馈 HARQ-

ACK。(3)支持时间敏感网络 TSN 和 5G 网络融合,实现时间敏感传输,保证时钟同步。

2.2 高可靠技术要求

3GPP 在 R15 阶段为了实现高可靠性,提出再物理层面上优化了 MCS\CQI 表格, NR 在 CQI 表格中增加了两个更低的码率,相对应的基站增加了两个 MCS 低频选项, UE 和基站之间可以选择更低的码率保障可靠性。在数据包重复传输方面提出在 PDCP 层复制数据,在不同的 PDCP 信道上传输同样的数据提升可靠性。高聚合等级的 PDCCH,保障传输可靠性。

在 R16 阶段,3GPP 进一步提出高可靠性增强解决方案,首先是冗余传输方案,UE 之间建立冗余的 PDU 会话和 N3 接口的冗余传输基于 N3 接口的冗余传输。NG-RAN 复制上行数据包,通过两条冗余的链路(N3 接口)通道发送给 UPF,其中每条 N3 通道与一个 PDU 会话关联,建立两条独立的 N3 通道传输数据,基站、SMF 和 UPF 将会为两条链路提供不同的路由。进一步支持了迷你时隙级别的重传,重传次数最大可达到 16 次。

2.3 在 R17 阶段,3GPP 进一步增强对超可靠低时延通信的支持

R17 持续为工业物联网等严苛应用带来更好的支持,为 URLLC(超可靠低时延通信)引入全新增强特性,比如增强物理层反馈、提升免许可频谱兼容性、终端内复用和优先级排序等功能。

3 5G URLLC 在智能电网中配网差动保护的应用

由于 URLLC 业务将更多应用于垂直行业,而各行各业的应用场景和需求不尽相同。这要求服务提供商能根据行业特点进行精细化定制和设定灵活的策略及接口^[5],针对智能电网场景的应用研究还比较少,尤其是配电网中的配网差动保护场景,对传输时延及可靠性要求极高,因此能否采用 5G 技术满足要求非常值得研究。电力行业专用切片专网架构(如图 1 所示)。

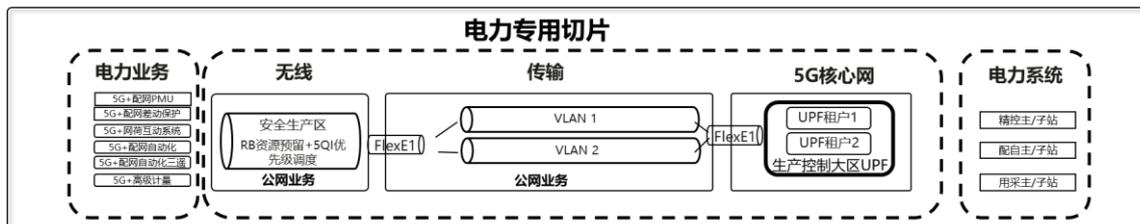


图 1 电力行业专用切片专网架构

3.1 网络解决方案

5G 配网差动保护为广域业务,需要通过切片专网方式,完成端到端的广域通信;同时,5G 配网差动保护业务属于电网生产控制大区,按照安全要求,需构建电力专用切片实现业务的物理隔离。因此,方案采用 5G SA 网络架构,依靠 5G 低时延、大带宽、高精度授时及切片能力搭建电力行业专用切片,实现 5G 配网差动保护终端之间的点对点的实时通信。

从以下三个方面介绍网络解决方案:

● 无线接入方面，室外利用公网基站，以宏基站为主，室内可利用公网基站或专用基站，以微基站为主。无线空口通过 RB 资源预留（专用资源+优先调度+共享资源），关闭 DRX 和 BWP 节电，开启预调度，保证终端接收电平 $RSRP \geq -93\text{dBm}$ ，目标 BLER 设置，CCE 聚合等级设置，以便满足业务端到端时延的要求。

● 核心网方面，部署新型工业智能网关工厂级设备，提供入驻式 UPF+MEC 或 UPF+AMF+SMF+MEC 部署，降低网络延时，同时业务数据不出场，进行本地化处理。

● 空口采用 RB 资源预留的方式隔离出生产大区，内部采用专用 DNN 实现不同业务的隔离，并按需配置 5QI，回传网络中采用 FlexE 硬隔离出生产大区，并用 VPN 或 FlexE 切片进行业务的隔离。

3.2 关键指标

5G 配网差动保护对网络指标要求（如表 1 所示）。

表 1 5G 配网差动保护对网络指标

业务类别	业务名称	通信需求					
		时延	带宽	可靠性（网络指标）	授时	安全隔离	连接数
控制类业务	配网差动保护	$\leq 15\text{ms}$	$\geq 2\text{Mbps}$	99.999%	10us	生产控制大区	$X \times 10$ 个/ km^2

3.3 测试结果

5G 配网差动保护业务网络测试包含业务指标测试、切片隔离测试两个层面。

（1）业务指标测试

5G 配网差动保护业务指标测试在现网基础上，以 100M 带宽为例，各项测试需求和测试内容（如表 2 所示）。

表 2 基础网络测试内容和测试结果

序号	测试需求	测试内容	测试结果
1	综合覆盖率	$RSRP > -93$ & $SINR > -3$ 采样点比例	$\geq 99\%$
2	5G 时长	5G 时长驻留比	$\geq 99\%$
3	连接建立成功率	连接建立成功率=成功完成连接建立次数/终端发起分组数据连接建立请求总次数	$> 99\%$
4	掉线率	掉线率=掉线次数/成功完成连接建立次数	$\leq 4\%$
5	切换成功率	切换成功率=切换成功次数/切换尝试次数	$\geq 99\%$
6	上行吞吐量	MAC 层平均吞吐量	平均上行速率 $\geq 5\text{Mbps}$ ，最小速率 $\geq 3\text{Mbps}$
7	下行吞吐量	MAC 层平均吞吐量	平均下行速率 $\geq 10\text{Mbps}$ 最小速率 $\geq 5\text{Mbps}$

序号	测试需求	测试内容	测试结果
8	网络时延	采用路测方法,通过生产控制 通道 ping 服务器;通过视频通道 ping 服务器;测试网络空载情况下的时延。	平均时延 $\leq 15\text{ms}$, 最大时延 $\leq 25\text{ms}$
9	小区并发容量	1.在测试区域内任意选择一个小区覆盖下的 3 个不同地点; 2.3 个终端通过视频通道用 TCP 协议同时进行上行速率测试;	1.总的上行平均速率 $\geq 5\text{Mbps}$ 2.最小上行平均速率 $\geq 3\text{Mbps}$

(2) 切片隔离测试

为了验证切片业务之间的隔离性,满足电力安全隔离的要求,对切片进行隔离测试。切片隔离测试的内容包括网络隔离测试和业务隔离测试,测试内容参考(表 3)。

表 3 切片隔离测试内容和测试结果

序号	测试需求	具体内容	测试结果
1	网络隔离测试	网络配置完成生产控制区切片 A 和管理区切片 B,验证不同终端分别通过生产控制切片和管理切片接入网络	网络可以有效隔离不同切片
2	业务隔离测试	不同终端分别通过切片 A 和切片 B 接入 5G 网络,分别建立和生产控制区主站和管理区主站的业务连接,验证生产控制区业务和管理区业务是否能够有效隔离。	生产控制区业务和管理区业务能够有效隔离

3.4 总结

通过对典型智能电网低时延应用场景的网络关键指标、测试标准等进行分析,得到配网差动保护对 5G 网络的要求(如表 4 所示)。

表 4 配网差动保护应用场景对网络的需求

应用场景	时延要求	带宽要求	可靠性要求	安全隔离要求
配网差动保护	高	低	高	高

配网差动保护,每一个保护终端都通过通信通道将本端的电气测量数据发送给对端,同时接收对端发送的数据并加以比较,判断故障位置是否在保护范围内,并决定是否启动将故障切除。差动保护终端对时延要求苛刻,需高精度网络授时。

差动保护业务通信要求高,现阶段通过专用光纤进行信号传输,建设成本高,不易部署;5G 低时延、高可靠特性可满足差动保护通信需求。

5 结语

本文介绍了智能电网中典型的低时延应用场景,并基于 5G 商用网络进行了多项测试。测试结果验证了电力场景下 5G 低时延方案的可用性,对电力领域 5G 低时延应用的规划和评价具有指导意义。关于 5G 网络低时延应用可靠性,需要进一步深入研究和分析,结合具体终端及应用系统的实际情况,给出更加精确的说明。

参考文献

- [1] 黄颖,于青民,李宗祥,等. 5G 在工业互联网领域的应用进展[J]. 移动通信, 2022,46(1): 41-45.
- [2] 聂衡, 赵慧玲, 毛聪杰. 5G 核心网关键技术研究[J]. 移动通信, 2019, 43(1):7.
- [3] 张轶,夏亮,徐晓东,等. 3GPP 中 URLLC 标准研究进展[J]. 移动通信, 2020,44(2): 2-7.
- [4] 闫志宇, 郝煜. 新空口超可靠,低时延演进系统研究[J]. 信息通信技术与政策, 2019(11):9.
- [5] 李静,董秋丽,廖敏. URLLC 应用场景及未来发展研究[J]. 移动通信, 2020,44(2): 20-24.

作者简介

李建元: 中国移动通信集团山东有限公司行业总监, 主要从事数字与信息技术等方面的研究工作。

张家铭: 中国移动通信集团设计院有限公司山东分公司解决方案经理, 主要从事 IP 通信、大数据研发等方面的研究工作。

田经师: 中国移动通信集团山东有限公司政企部 DICT 中心副总经理, 主要从事信息系统集成等方面的研究工作。

魏庆伟: 中国移动通信集团山东有限公司解决方案室经理, 主要从事信息系统集成等方面的研究工作。

王本利: 山东中移通信技术有限公司工程师, 主要从事 5G 通信技术在新型电力系统中应用研究工作。

马学菊: 通讯作者 电话: 18866158101, 邮箱: 18866158101@139.com, 地址: 山东省济南市市中区七里山路 4 号, 邮编: 250002

基于 5G+SRV6 赋能国家级经开区 智慧升级

罗东宏¹, 林少泽², 龙柯³

(1. 中国联通广东省分公司, 广东广州 510627; 2. 中国联通广东省分公司, 广东广州 510627; 3. 中国联通广东省分公司, 广东广州 510627)

摘要: 中国国家级开发区数量目前已达到 387 个, 产值达到 21.3 万亿, 工信部《5G 应用“扬帆”行动计划(2021-2023 年)》明确提出, 传统产业实现数字化、网络化、智能化转型是重要的发展趋势, 推动 5G 应用是促进转型的重要引擎。通过分析传统园区管理存在的问题, 深入研究智慧园区与 5G 技术融合下的应用场景, 提出了基于 5G 边缘云技术+SRV6 的智慧园区组网方案, 并借助 5G 边缘云技术+人工智能赋能园区高清视频监控等主要应用场景, 提升园区整体管理效率及智能化水平, 同时为后续园区整体数字化转型打下良好基础。

关键词: 5G 边缘云; 智慧园区; 大带宽; 低时延; 高清视频监控

分类号: TN929.5

Based on 5G+SRV6 to empower the smart upgrade of national economic development zones

LUO Dong-hong¹, LIN Shao-ze², LONG Ke³

(1. China United Communications Co., Ltd. Guangdong Branch, Guangdong Guangzhou, 510627; 2. China United Communications Co., Ltd. Guangdong Branch, Guangdong Guangzhou, 510627; 3. China United Communications Co., Ltd. Guangdong Branch, Guangdong Guangzhou, 510627)

Abstract: At present, the number of State-level Economic and Technology Development Zone has reached 387, and the output value was 21.3 trillion yuan in China. The MIIT proposed that The digital, networked and intelligent transformation of traditional industries is an important development trend, and the promotion of 5G applications is an important engine for the transformation (5G Application "Set Sail" Action Plan (2021-2023)). By analyzing the problems existing in traditional park management mode, the application scenarios under the integration of smart park and 5G technology are deeply studied, and proposed smart park networking scheme based on 5G Edge-Cloud + SRV6. The HD video surveillance of the park uses 5G Edge-Cloud + AI to improve the management efficiency and level of intelligence, while laying a good foundation for subsequent digital transformation.

Keywords: 5G Edge-Cloud; smart park; high bandwidth; low latency; HD video surveillance

1 引言

国务院在《“十四五”数字经济发展规划》提出：大力推进产业数字化转型。加快企业数字化转型升级，全面深化重点行业、产业园区和集群数字化转型，培育转型支撑服务生态。园区数字化管理是提升一个地方和产业园区数字经济发展水平的重要手段，而智慧管理是园区数字化的重要体现，如何围绕园区管理需求，结合 5G 等新技术，构建智慧园区体系，是非常迫切需要的。

目前，随着国家的发展以及对智慧园区领域的大力支持，园区数字化转型取得了较大的发展，但仍存在较大问题。一方面，我国部分园区信息系统独立运行，缺乏统一管控，“烟囱式”信息部署方式单一，导致“孤岛效应”，运维效率低下；另一方面，园区管理经验不足，缺乏有效的信息沟通平台，管理手段落后，智慧化配套设施及服务不够完善。

2 5G+SRV6 助力智慧园区发展

2.1 政策驱动

随着城市化加速发展，许多国家将智慧城市建设作为刺激经济发展的重要战略。2015 年全国两会，“新型智慧城市”首次写入政府工作报告，强调以人为本、协调融合等理念。中共十九大上，“智慧社会”正式写入报告，是智慧城市等各种系统的总和，是信息社会发展新阶段。园区是城市的重要组成部分，是中国经济建设的重要经济支柱。智慧园区建设，可以看作是智慧城市的一个缩影，是智慧城市的重要组成部分。根本原因正是在于它虽然体量小，但却体系健全，是智慧城市的缩小版本。

2019 年国务院印发了《国务院关于推进国家级经济技术开发区创新提升打造改革开放新高地的意见》，继续强调科技创新在推动智慧园区现代化过程中的地位和作用。

2.2 园区及企业需求

园区传统管理中，运营效率低、成本高，安全管理难度大，管理对象多，环境、资产管理困难，园区诉求实现数字化运营，大安全，安全级别和效率双提升，管理模式优化，资产管理数字化，智能化服务、打造智慧化新配套服务。

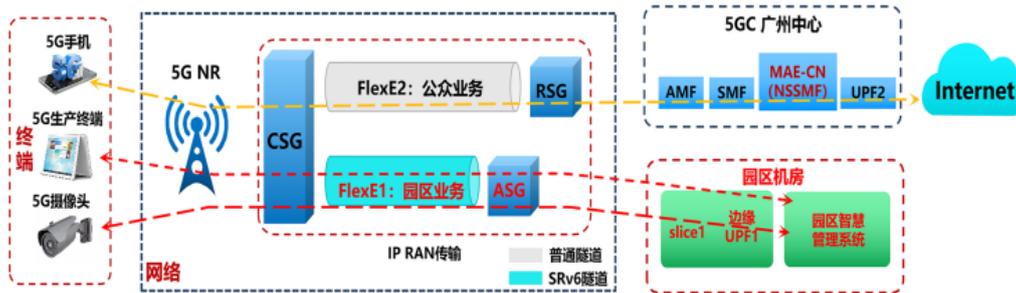
对于园区企业而言，需要快速了解园区信息、动态资讯，便捷高效获取园区内外部服务，使企业聚焦核心业务发展，增加企业曝光率，提升企业品牌影响力，同时园区提供智能化技术基础，实现企业管理、生产应用智慧升级。

3 基于 5G 边缘云技术+SRV6 赋能智慧园区创新管理

3.1 网络诉求

- 1、超高带宽完美的实现多个高清摄像头实时回传需求，以及未来工业视觉检测的需求。
- 2、更低时延，更高速率。保证了视频监控中稳定回传，在叠加人工智能时，远端服务器可以实时分析并对异常情况预警。
- 3、利用 5G 边缘云、SRV6 等关键技术，可以实现网络资源保障，满足园区在高清视频监控、机器视觉等应用的高质量服务。

3.2 整体方案



图表 1 基于 5G 边缘云+SRV6 的智慧园区组网方案

Fig.1. The smart park networking scheme based on 5G Edge-Cloud + SRV6

1、总体架构

在本地园区部署 5G 网络及 MEC 边缘云平台，园区的物联网设备、产业教学终端（如 VR\AR 眼镜、远程互动教学设备等）、视频监控设备及其他设备都通过 5G 网络接入对应园区的边缘云平台，分别通过分流网关直接到达本地，再通过本地边缘云连接工业平台，实现云边协同。

2、网络拓扑



图表 2 基于 5G MEC 边缘云技术的网络拓扑图

Fig.2. The network topology based on 5G MEC Edge-Cloud technology.

终端设备通过 5G 基站连接，数据经过边缘云分流模块，如果是园区终端访问或企业应用使用者访问，则由边缘云分流模块，分流至边缘云平台，若涉及到有中心云与边缘云的交互，则由

边缘云直接出互联网到达中心云服务器；如果是普通上网用户，则直接通过 5G 核心网访问 Internet。

3、方案特点

通过已经实现的 SRv6 专线方案优点：

- (1) 业务隔离：园区业务与公众业务使用不同切片实现隔离；
- (2) 数据保护：应用本地闭环，确保数据安全；
- (3) 带宽保障：公众业务与园区业务产生带宽抢占时，园区业务带宽被保障，公网用户无法抢占；
- (4) 降低时延：园区业务时延降低至 2ms，公众业务时延在 10ms；

3.3 创新应用

通过在边缘云平台上部署渲染、视频加速模块、AI 加速模块、通用计算模块及存储模块，所有数据都在本地进行计算，存储，中心云平台按用户需求进行调用，减少中心云存储压力及传输带宽压力。

1、在虚拟/增强现实教育方面，将产业相关 AR/VR 教学内容上边缘云，利用边缘云的计算能力实现 AR/VR 应用的运行、渲染、展现和控制，并将 AR/VR 画面和声音高效的编码为音视频流，通过 5G 网络实时传输至终端。将对时延要求高的渲染功能部署在靠近用户侧，业务数据不用传输到核心网，而是直接在边缘渲染平台进行处理后传输到用户侧，降低网络时延。

2、在 AI 智能分析方面，高清摄像头等终端通过 5G 网络可实时将园区高清视频或图片推流到 MEC 边缘云平台，由边缘云平台上部署的 AI 加速模块进行计算，实现数据分析，对异常情况进行智能分析并预警。

3、智慧园区管理平台方面，园区的智能设备如监控摄像、水电能源监控、停车检测、门禁系统、考勤系统、医疗系统、资产管理系统通过边缘云通用计算模块及存储模块存储在本地，实现整个园区的智慧管理。

3.4 应用价值



图表 3 VR/AR 沉浸式教育

Fig.3. VR/AR Immersive Education

基于 5G 边缘云部署的 VR、AR 应用通过与产业结合，能够给一线员工带来全新的教学体验，强化学习成果记忆，加快知识吸收速度，提升培训效率。如提供的沉浸式教学场景使教育更加丰富生动，在虚拟情况下提供的亲临现场感“实操”体验，通过 100%三维立体形象还原，提供更直观的操作体验等。对于高成本、高风险及现实难以实践的操作培训，提供“实操”体验如通过 VR/AR 实现产线模拟、机械操作培训，降低执行风险和成本。模拟地震、火灾场景，提供实战演练培训体验。



图表 4 高清视频监控&AI 识别

Fig.4. HD video surveillance & AI recognition

基于 5G 边缘云技术部署的高清视频监控，通过以人工智能替代传统人力监控分析，能够有效提升管理效率，降低人为判断失误，提升异常、突发情况预警成功率。



图表 5 机器视觉检测

Fig.5. Machine vision inspection

基于 5G 边缘云部署的机器视觉检测，能降低产线硬件部署成本，同时借助 5G 技术特效，

实现柔性化调整及高清检测要求。



图表 6 机械臂控制

Fig.6. Robotic arm control

通过 5G+机械臂，实现产线的精准控制及精细作业计划，利用 5G 网络高速实时回传，因地制宜，有针对性地提供个性化的生产工艺智能化改造，提高整体生产效能。

4 结束语

VR/AR 沉浸式教育、高清视频监控、机器视觉等智慧园区管理、生产创新应用对大带宽、低时延网络的诉求，目前的 3/4G 网络无法满足。本地化的图像实施渲染导致终端价格昂贵且笨重，无法规模化普及；同时传统的管理模式大量依赖人力，以上均制约了智慧园区/工业互联网的进一步发展。

通过将 5G+边缘云及 SRV6 技术应用于园区/工业领域，与园区管理/生产应用相结合，借助于 5G 边缘云的大带宽、低时延，打造“瘦终端+宽网络+强应用”的智慧园区解决方案，赋能智慧园区管理/生产实现智能化、感知化、泛在化。

参考文献：

- [1] 基于 5G 边缘云的新媒体解决方案[J].成静静,潘桂新.数据通信.2020.(02):1-4.
- [2] 电信运营商 5G 技术发展及应用研究[J].成静静.数据通信.2019.(02):1-4.
- [3] 边缘云平台架构与应用案例分析[J].吕华章,陈丹,王友祥.邮电设计技术.2019(3):35-39.

作者简介：

1、罗东宏，男，汉族，中国联通广东省分公司，通信专业高级工程师，硕士，主要从事 5G、移动通信网络相关技术、应用的研究以及网络规划建设维护优化等工作。

2、林少泽，男，汉族，中国联通广东省分公司，本科，主要从事 5G、移动通信相关技术、

应用的研究与设计。

3、龙柯，男，汉族，中国联通广东省分公司，中级工程师，硕士，主要从事 IP 网络相关技术、应用的研究与设计。

2、洪继宇，男，汉族，中国联通揭阳市分公司，硕士，主要从事 5G、移动通信相关技术、应用的研究与设计。

投稿作者：林少泽

联系地址：广州市黄埔大道西 666 号联通新时空广场

电话：18620010323

邮箱：linsz10@chinaunicom.cn

基于 5G 工业互联网的 AGV/移动机器人 智能运维系统设计与应用

基金项目：2020 年工业互联网创新发展工程-面向典型行业的工业互联网“5G+边缘计算”服务平台

(No.TC200A00Y)

夏鹏程, 崔继轩, 马川, 李骏

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210014)

摘要：自动引导运输车（AGV）和移动机器人已逐步成为仓储物流和工业生产中的重要设备，因此企业对此类设备的监控和维护需求日益提升。针对企业在设备运维中存在的问题，提出了基于 5G 工业互联网的 AGV/移动机器人智能运维系统设计方案，包括 5G 网络、智能运维平台和运维业务应用的搭建，以及基于迁移学习和联邦学习的故障模型训练与优化方法。最后，在企业生产环境中进行了相应的系统部署，并通过真实设备数据验证了所提系统设计方案的有效性。

关键词：自动引导运输车；移动机器人；智能运维系统；工业互联网

中图分类号：TP274+.5

文献标识码：A

Design and application of AGV or mobile robot intelligent operation and maintenance system based on 5G and industrial internet of things

XIA Pengcheng, CUI Jixuan, MA Chuan, LI Jun

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210014)

ABSTRACT: Automated guided vehicles (AGV) and mobile robots have gradually become important equipments in warehouse logistics and industrial production, and the demand for monitoring and maintenance of such equipments increases dramatically. To alleviate such concern, an intelligent operation and maintenance system of AGV or mobile robot based on 5G and industrial Internet of things is proposed, including the construction of 5G network, the construction of intelligent operation and maintenance platform, the building of operation and maintenance business application, as well as the training and optimization methods of fault model based on transfer learning and federated learning. Finally, the system has been deployed in the practical production environment of the enterprise, and the effectiveness of the proposed

design has been verified by real data, which is collected, pre-processed, trained from the real operation environment.

KEY WORDS: automatic guided vehicle; mobile robot; intelligent operation and maintenance system; industrial internet of things.

随着中国“互联网+”、“中国制造 2025”等战略的提出，我国工业互联网和智能制造正处于加速发展的阶段。其中在仓储、物流、生产制造等工业场景中，自动导引运输车（AGV: Automated Guided Vehicle）或其他非轮式的移动机器人能够解决传统人工物料运输方式中劳动强度大和环境危险的问题，已经逐步成为工业生产运输过程中的核心装备^[1-2]。但是随着此类设备数量和使用时间的不断上升，企业将会面临设备故障发生频率增加、设备停机、产线停产等问题^[3-4]，因此尽可能有效减少设备故障发生概率和高效解决设备故障是企业在生产过程中的迫切需求。

目前已经有很多研究者提出了针对 AGV/移动机器人的各类故障诊断方法，如基于决策树和长短期记忆网络进行设备故障分类^[5]、基于小波分析和神经网络检测设备的旋转机械故障^[6]等。但是上述事后维修的方法并不能避免设备出现问题，面对有大量 AGV 设备的生产线环境，企业亟需一套能够实现 AGV/移动机器人实时监控和故障隐患提前分析预警的解决方案。随着 5G 技术的不断发展，许多工业互联网服务商与生产制造企业都提出了“5G+工业互联网”设备运维解决方案。三一集团利用 5G 园区专网接入 AGV 设备进行远程实时监控^[7]，上海电信利用 5G 网络切片技术保障设备数据的可靠传输^[8]。“5G+工业互联网”相关技术的引入，可以让大数据驱动的预测性维护方法发挥潜在的优势。相比于传统的基于专家先验知识的预测性维护方法，大数据驱动的方法结合人工智能，利用实时采集监测的工业大数据进行数据分析与训练，能够充分挖掘数据的价值，发现更多设备故障发生前的隐患信息，从而更有效地避免或减少设备故障。

结合上述研究现状与调研分析，本文总结了几点企业的痛点问题：1.AGV/移动机器人原有的 WIFI 通信方式延迟高且稳定性差，但 5G 改造方法和网络部署方案不明确；2.AGV/移动机器人设备类型较多，采集的设备运维数据特征较多，企业缺乏有效的大数据处理方法；3.企业缺少能够进行模型部署推理与快速构建运维业务应用的软件环境。针对上述企业痛点问题，本文提出了基于 5G 工业互联网的 AGV/移动机器人智能运维系统设计方案，从网络、平台和应用三个层面给出了本系统的设计思路和建设方案，对系统中的智能运维模型优化方法进行了分析，并在某上市仓储设备制造企业中进行了系统的部署、测试与应用，实现了企业相关设备的实时状态监测和当前告警通知，并为企业提供预测性维护建议，减少了设备维修成本，提高了生产效率。

1 系统总体架构设计

针对企业目前建设 AGV/移动机器人运维系统存在的问题和需求，本文提出了一种基于 5G 工业互联网的智能运维系统架构，如图 1 所示。

整个系统包含四个部分，其中设备层包括各类 AGV 或移动机器人设备，如 AGV 小车、穿

梭子母车、箱式穿梭车等；网络层、平台层和应用层为智能运维系统的核心部分。网络层面，为各类 AGV 设备部署 5G 工业芯片，搭建企业现场级 5G 室内网络，提供高可靠、低时延的数据传输网络环境；平台层面，搭建面向 AGV/移动机器人的工业互联网智能运维平台，实现企业相关设备的数据采集、汇聚、存储和分析，并提供运维业务应用的开发、构建与运行环境；应用层面，利用迁移学习、联邦学习、深度学习等算法训练优化设备故障诊断/预测模型，开发设备状态监测、预测性维护、质量检测、告警管理等运维业务应用，实现设备运行状态的多维展示和监控，当前告警及时通知，设备效能统计分析以及设备故障提前发现。

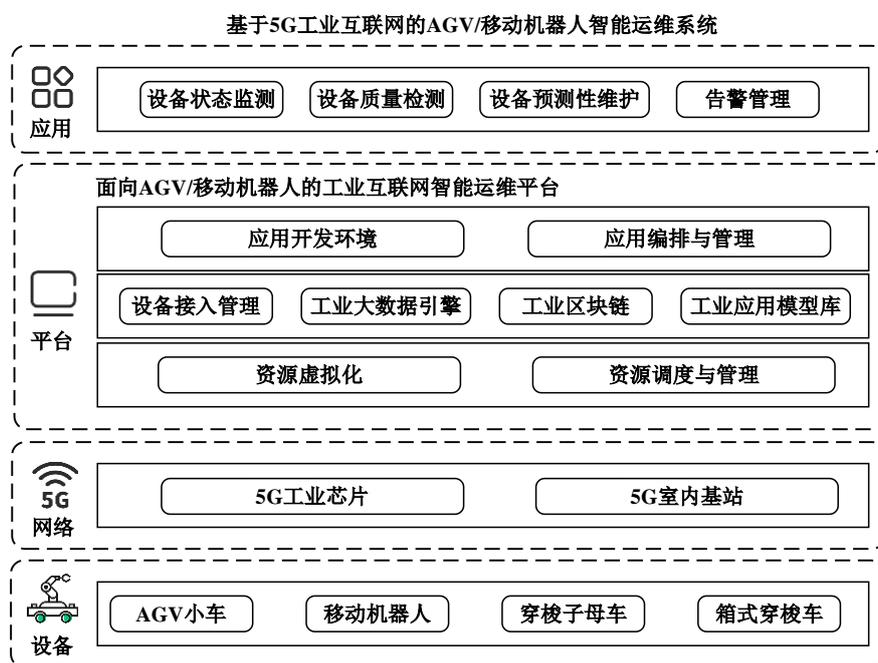


图1 AGV/移动机器人智能运维系统总体架构

2 系统关键模块设计

2.1 5G 网络的设计与搭建

AGV/移动机器人设备原有的 WIFI 通信方式抗干扰能力差、延时抖动大、网络连接稳定性不足，难以满足工业现场对网络传输质量的需求。随着 5G 通信技术的成熟，企业考虑在生产现场引入 5G 网络，但是现有的 5G 网络大多为公网或混合网络的部署模式，无法保证重点生产作业区域的覆盖率和满足企业数据的安全隔离要求。因此，本文采用 5G 基站的室内建设方案，从工业 5G 终端到 5G 核心网均在企业生产环境内部署搭建，满足企业对网络可靠性、隔离性和安全性的要求，如图 2 所示。

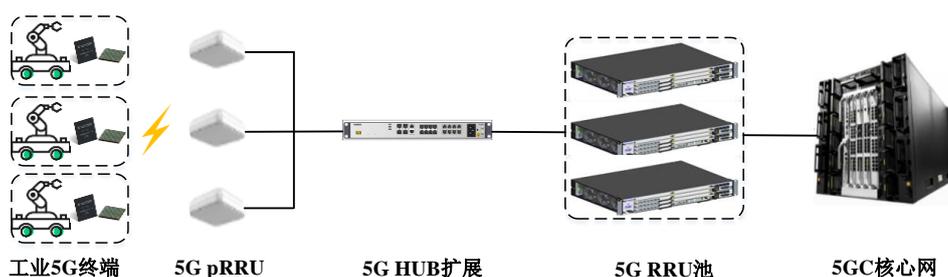


图2 5G 网络设计方案

现场各类 AGV/移动机器人设备安装工业 5G 模组，其中芯片根据高性能的 5G 新空口通信协议需求、生产作业场景的低功耗要求和设备安装尺寸需求进行封装设计，终端模组的基带通信算法采用极化码 Polar 和低密度奇偶校验码的信道编译码技术，可实现时延的精细控制。

针对企业生产环境的 5G 信号覆盖与时延性需求，系统采用现场级室内 5G 基站方案，包括射频拉远单元（pRRU: Pico Remote Radio Unit）、5G 数据汇聚单元 HUB、5G 基带处理单元池（BBU: Building Base band Unit）和 5G 核心网。其中 5G HUB 扩展主要负责通用公共无线接口数据处理；BBU 资源池负责集中调配基带资源，进行信号调制处理；pRRU 主要负责射频信号处理，每个厂区的多个工作区域都会部署 pRRU 以尽可能地覆盖 5G 信号。

上述 5G 网络的室内建设方案，可以为 AGV/移动机器人设备构建大带宽、广覆盖和高可靠低时延的网络通信环境，支持对设备的大规模实时调度控制，并且实时采集的设备运行数据有助于智能运维系统对设备故障的快速诊断与预测分析。

2.2 面向 AGV/移动机器人的工业互联网智能运维平台技术架构设计

考虑到工业企业对各类 AGV 设备的运维大数据和运维业务应用缺少统一和高效的管理工具，并且同类企业间缺少可信的模型共享空间以进一步挖掘运维大数据的潜在价值，本文提出了一种云边协同的工业互联网智能运维平台技术架构，旨在帮助企业快速形成设备运维大数据的治理环境，并为运维业务应用程序的快速开发与构建提供支撑。

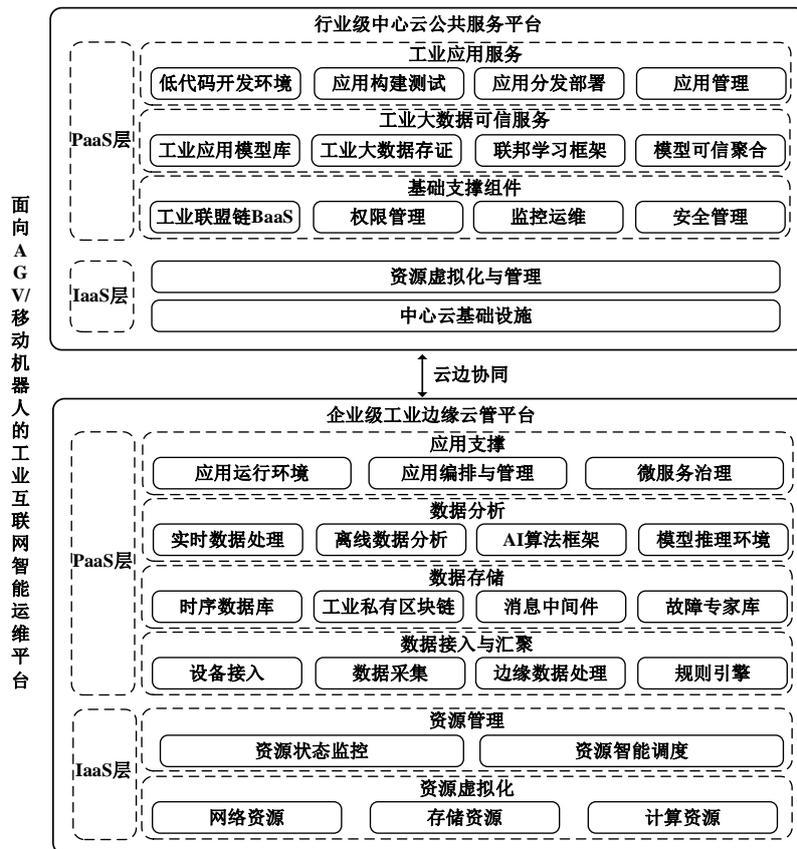


图 3 面向 AGV/移动机器人的工业互联网智能运维平台技术架构

如图 3 所示，整个智能运维平台分为企业级工业边缘云管平台和行业级中心云公共服务平台。企业边缘云管平台部署在各企业的私有云服务器上，IaaS 层主要基于云原生技术将边缘云基础设施的计算、存储和网络资源虚拟化，并通过资源监控和调度功能进行资源的管理和分配，PaaS 层提供针对设备运维数据与运维业务应用的相关服务，包括数据接入与汇聚、数据存储、数据分析与应用支撑。其中数据接入与汇聚服务采集设备的静态信息、运行状态数据和当前故障数据，通过边缘数据处理模块进行数据预处理和格式转换，并利用规则引擎转发数据至上层组件；数据存储服务可存储大量时序数据，通过工业私有区块链进行设备运维日志的可信存证与溯源审计，在故障专家库中不断存储并更新设备故障诊断与维护知识；数据分析服务提供数据的在线/离线分析环境，以及设备故障模型的训练和推理环境；应用支撑服务则提供应用的运行与管理功能。行业公共服务平台部署在公有云服务器上，以工业联盟链为基础，为同类型企业构建可信的模型资源共享环境，利用联盟链进行模型的确权，通过联邦学习框架帮助多家企业在数据不出厂的前提下完成设备故障模型的高效聚合，并提供工业应用模型库以供各参与企业进行模型的共享。平台的工业应用服务则提供运维业务应用的开发、测试、构建、分发和部署功能，方便企业相关应用的快速上线。

2.3 设备智能运维业务应用的构建方案设计

设备智能运维业务应用主要包括设备质量检测 and 预测性维护，需要以人工智能模型为核心进行开发构建，利用训练好的设备故障模型对实时数据流进行分析，从而给出设备维护建议并通知企业运维人员。因此企业在应用构建过程中，存在模型精度优化、模型实时推理、模型在线更新等需求。

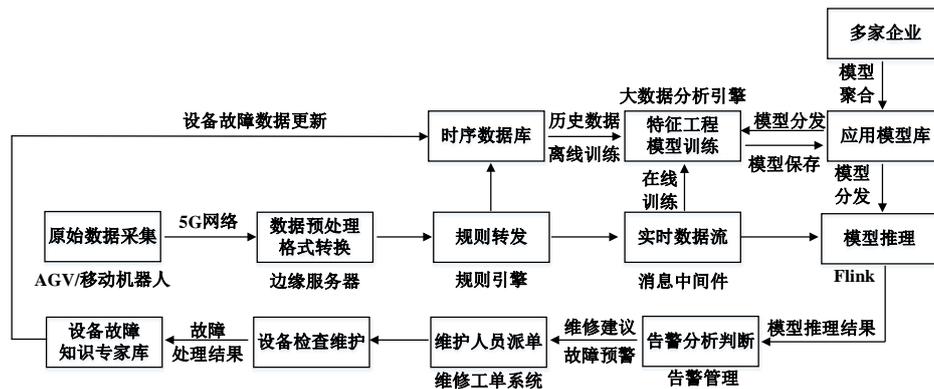


图 4 设备智能运维业务应用构建方案

针对上述需求，本文提出了一种设备智能运维业务应用的构建方案，可以基于智能运维平台高效地构建部署此类应用，如图 4 所示。首先采集各类设备的原始数据，对其进行数据预处理和格式转换，处理后的数据通过编排好的规则进行数据转发，发送给时序数据库存储为历史数据，同时一部分数据会发送至消息中间件进行缓存。时序数据库会将大量历史数据汇聚给大数据分析引擎进行离线的故障诊断/预测模型训练，并将训练好的基准模型保存至工业应用模型库中。消息中间件的实时数据流会传输至大数据分析引擎进行模型的在线训练和优化，同时也会将一段时间内缓存的数据输入至实时计算组件 Flink 进行模型推理，其中用于推理的模型是由工业模型库在聚合、评估和优化多家企业模型后提供的当前最优模型。告警管理组件对模型推理结果进行分析判断，将维修建议和故障预警消息转发至企业的维修工单系统，由该系统向运维人员派发工单进行设备检查维护，最终将故障处理信息反馈至故障专家库，并将故障数据更新至时序数据库。该类应用可以按照上述方案，灵活调用各组件相关接口，最终构建容器镜像部署在企业边缘云管平台。

3 系统关键技术分析

AGV/移动机器人智能运维系统的关键技术在于使用智能运维模型进行实时推理，依据推理结果给出企业运维工作的相关意见，帮助企业快速定位设备故障，减少故障发生率。但是在企业的实际生产环境中，模型的训练和优化总会存在一些问题：支撑模型训练的数据量不足或质量不高、收集的故障样本比例太少、设备类型较多导致各类模型训练开销大。针对这些实际问题，本

文基于所提的系统架构，提出了两种智能运维模型优化方法。

3.1 基于迁移学习的设备故障模型预训练与优化方法

针对多类设备故障模型训练与更新开销大、部分设备缺少高质量训练数据的问题，本文提出基于迁移学习的故障模型预训练与优化方法，如图 5 所示。

将迁移学习应用到模型构建中，即将源域 D_s 中源任务 T_s 知识迁移到目标域 D_t 中目标任务 T_t 中^[9]：

$$\begin{aligned} D_s &= \{X_s, P(X_s)\}, T_s = \{Y_s, f_s(\cdot)\} \\ D_t &= \{X_t, P(X_t)\}, T_t = \{Y_t, f_t(\cdot)\} \end{aligned} \quad (1)$$

其中， X_s 、 X_t 为源域、目标域特征空间， $P(X_s)$ 、 $P(X_t)$ 为对应边缘概率分布， Y_s 、 Y_t 为源任务、目标任务标签空间， $f_s(\cdot)$ 、 $f_t(\cdot)$ 为对应预测函数。

首先选取质量较高的设备数据对模型预训练，固定部分参数后分别用各目标设备数据再训练，完成模型构建。该方法不仅可以节省开销，还能够提升目标设备模型性能。其次，周期性自动化地提取模型参数，利用实时数据不断在线更新模型，从而提高模型实时可用性并减少人为更新所消耗的资源。

根据上述方法，企业可以从系统时序数据库中筛选较高质量的历史数据进行初始模型的离线预训练，将训练好的模型结合其余相似类型的设备数据进一步训练优化，并利用系统采集的实时数据进行在线更新，更新优化后的模型都将定期保存至工业应用模型库中，以供系统的 Flink 组件调用模型进行实时推理。

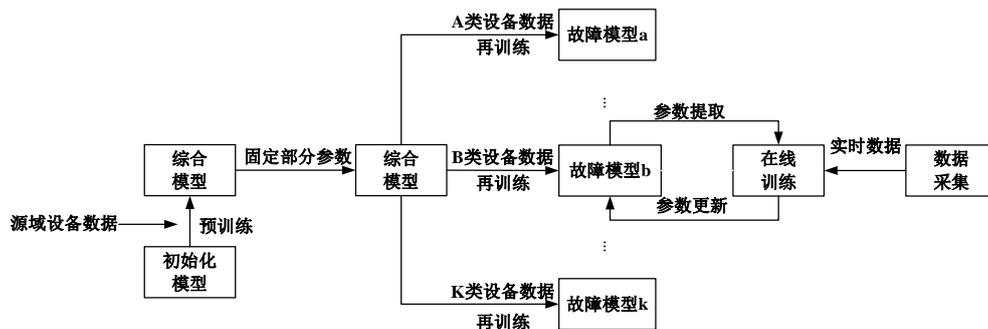


图 5 基于迁移学习的故障模型预训练与优化方法

3.2 基于横向联邦学习的设备故障模型聚合与优化方法

针对多方模型联合优化场景，考虑到同类型企业的设备数据特征相似，但样本数据不会重叠的情况^[10]，本文提出基于横向联邦学习的设备故障模型聚合与优化方法，如图 6 所示。各企业参与方将从中心云服务器下载的全局模型在本地训练后，再上传至中心云服务器。中心云服务器对模型进行安全聚合，再将聚合后的模型发送给各参与企业。

中心云服务器的模型聚合目标函数见公式 (2) :

$$\min_w F(w), F(w) = \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{n} F_k(w) \quad (2)$$

其中, m 是参与企业总数, n 是数据量总和, n_k 是第 k 个参与企业的数据量, $F_k(w)$ 是第 k 个参与企业的本地目标函数。

根据上述方法, 各企业参与方可以使用系统公共服务平台的联邦学习框架, 在数据不出厂的前提下进行模型的安全聚合, 同时利用公共服务平台的工业联盟链进行模型确权, 最后使用联合优化好的模型进行本地实时推理。这样既可以在单个企业数据样本不足的情况下联合提升模型精度, 又可以保护各家企业的数据隐私。

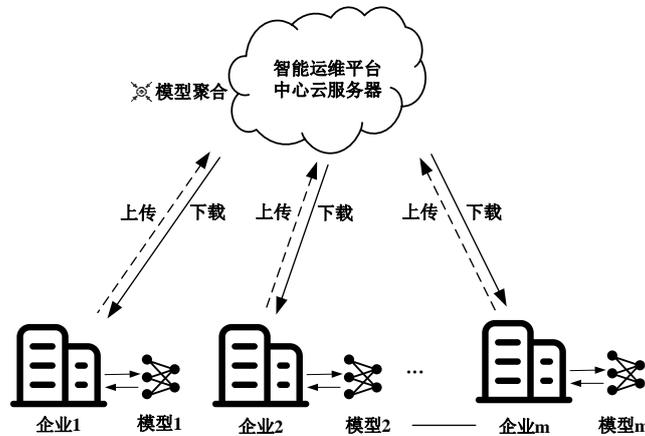


图 6 基于横向联邦学习的故障模型聚合与优化方法

4 系统部署与应用

在某智能仓储设备制造领域的上市企业生产厂区内, 我们进行了整个设备智能运维系统的部署、测试与应用, 具体的实施应用场景如图 7 所示。该生产环境内具有托盘搬运 AGV、三向叉车 AGV、箱式四向穿梭车等 12 种 AGV 或移动搬运机器人设备, 考虑到企业数据通信的低时延高可靠需求, 将每类设备的 WIFI 通信模块替换为工业 5G 模组, 在厂房内各立体库顶部安装 pRRU 设备, 并在室内部署其余相关 5G 网络设备, 使整个生产环境基本都覆盖 5G 网络。选取了厂区内多个不同位置, 使用测试软件对厂区通信环境进行了时延测试, 发现 WIFI 的上下行时延在 4ms 至 111ms 内频繁抖动, 并且终端设备的快速移动会导致时延增大; 而 5G 网络的上下行时延可以稳定在 5ms 至 23ms 范围内, 时延抖动相对 WIFI 明显较小, 平均时延更低, 并且在终端快速移动的情况下时延也未产生明显抖动。由此可见, 5G 网络的部署解决了原有 WIFI 通信方式时延高和不稳定的问题。

由于厂区内每个区域的穿梭车或 AGV 小车均由独立的仓储控制系统 (WCS: Warehouse

Control System) 进行管理, 缺少统一的设备监控运维中心, 故在企业私有云服务器部署了工业互联网企业边缘云管平台, 汇聚了各类设备的运维监测数据 (电机转速/电流、行走里程、伸叉次数、换向次数、告警信息等 30 多类特征维度)。基于企业边缘云管平台, 实现了各类设备实时的运行状态监测, 基于历史状态数据的设备效能统计分析和故障告警通知, 并通过平台内的工业私有区块链实现了重要运维日志的可信存证与追溯审计, 不断积累故障运维模式和数据, 丰富设备故障知识专家库。同时利用大数据分析引擎进行设备故障模型的离线训练, 其中针对重型托盘式四向穿梭车的数据集训练分为对照组和迁移组两种方式, 对照组只使用重型四向车数据单独训练故障模型, 而迁移组先使用轻型四向车数据进行模型的预训练, 再将预训练后的模型用于重型四向车的模型训练。如图 8 所示为轻/重型四向穿梭车设备运行故障预测模型 (预测未来 10 分钟内是否发生故障) 的训练与测试结果。从结果上看, 对轻型箱式穿梭车的数据集单独训练并交叉验证, 可以达到较低虚警率下 82% 的故障预测正确率; 使用本文所提基于迁移学习的方法进行重型托盘式穿梭车 (可用真实数据集较少) 的模型优化, 相对于不使用迁移学习的训练方式可以提升 23% 的故障预测正确率。考虑到该企业的多家客户方均有同类型设备, 故可以利用中心云服务平台的联邦学习框架在保障客户数据隐私的情况下进行故障预测模型的再优化, 提升模型精度。根据故障预测模型的推理结果, 系统能够及时发现设备运行异常情况, 并向企业给出相应的预测性维护建议, 有效减少了由于设备非计划故障停机造成生产效率降低的情况, 从而实现了企业工业生产的降本增效。

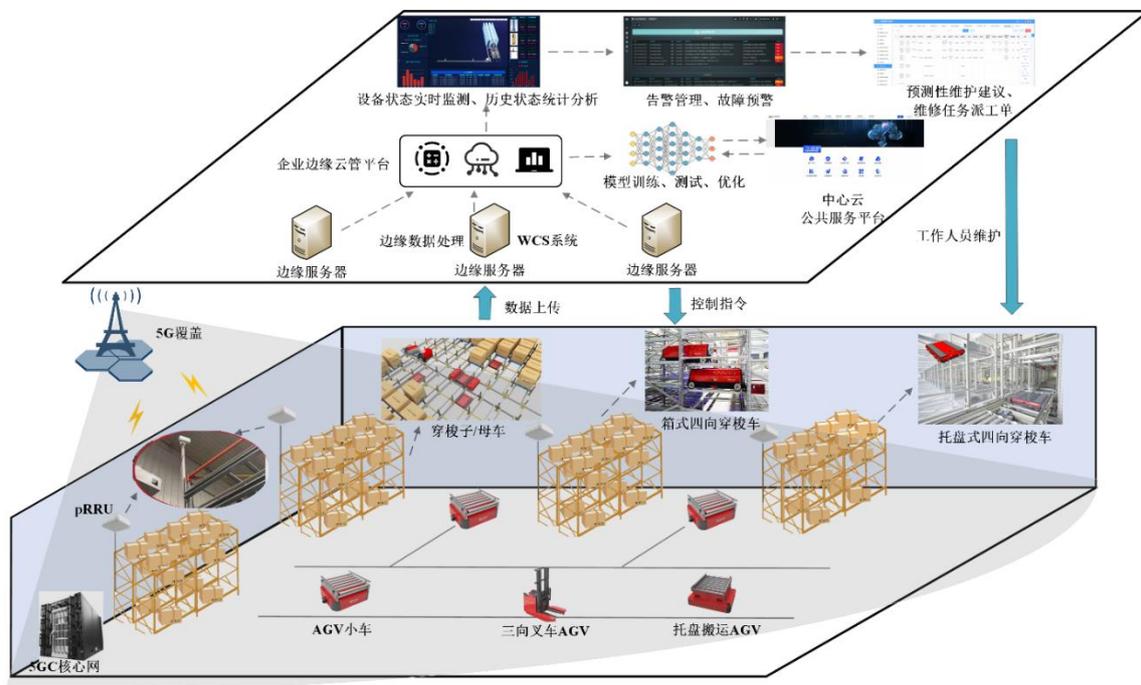


图 7 系统部署实施场景示意图

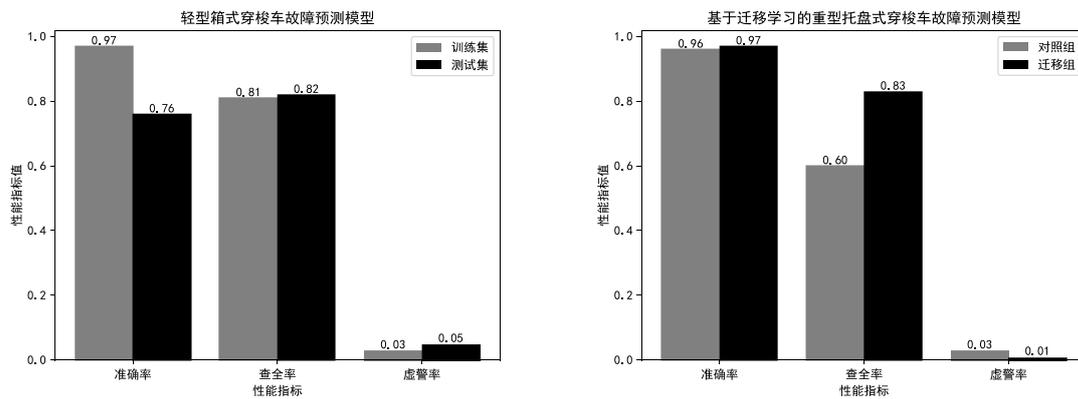


图 8 轻/重型四向穿梭车设备故障预测模型的训练与测试结果

5 结语

本文提出了基于 5G 工业互联网的 AGV/移动机器人智能运维系统设计方案，并在企业实际生产环境中进行了系统的部署、测试与应用，实现了高可靠、低时延的设备数据采集，设备运行状态实时监测，设备告警信息及时通知，设备关键运维日志的可信存储和设备预测性维护建议提示。同时真实数据集的测试结果验证了本文所提智能运维模型优化方法的有效性与可行性。但是要提升各类型设备的故障预测准确性，还需要联合多家企业进一步训练和优化模型，并进行模型的实际效果测试与推理应用。

参考文献

- [1] 刘劲纯. 自动导引运输车发展现状及关键技术分析[J]. 无人系统技术, 2020(3): 19-24.
- [2] Ding G, Lu H, Bai J, et al. Development of a High Precision UWB/Vision-based AGV and Control System[C]// Control and Robotics Engineering (ICCRE), 2020 5th International Conference on. IEEE, 2020: 99-103.
- [3] 叶友华. AGV 的故障诊断与软件系统设计[D]. 哈尔滨工业大学, 2016: 15-38.
- [4] Dares M, Kai W G, Ye S K, et al. Development of AGV as Test Bed for Fault Detection[C]// Control, Automation and Robotics (ICCAR), 2020 6th International Conference on. IEEE, 2020: 379-383.
- [5] Ding X, Zhang D, Zhang, L, et al. Fault Detection for Automatic Guided Vehicles Based on Decision Tree and LSTM[C]// System Reliability and Safety (ICSRS), 2021 5th International Conference on. IEEE, 2021: 42-46.
- [6] 田露旭, 高向远, 廖亚兵等. 旋转机械故障检测在 AGV 设备中的应用研究[J]. 湖北农机化, 2020, 0(5): 184-185.
- [7] 孟月. 5G+MEC+AI 使能三一重工智能制造[J]. 通信世界, 2020(16): 24-24.

[8] 张懿卿, 沈鸣. 5G 边缘计算和网络切片技术在 AGV 上的应用[J]. 通信技术, 2020, 53(6): 1444-1448.

[9] Liang H, Fu W, Yi F. A Survey of Recent Advances in Transfer Learning[C]// Communication Technology (ICCT), 2019 19th International Conference on. IEEE, 2020: 1516-1523.

[10] Wahab O A, Mourad A, Otrok H, et al. Federated Machine Learning: Survey, Multi-Level Classification, Desirable Criteria and Future Directions in Communication and Networking Systems[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(2): 1342-1397.

作者简介

夏鹏程: 男, 南京理工大学电子工程与光电技术学院博士研究生, 研究方向为工业互联网、工业大数据分析和区块链。

崔继轩: 男, 南京理工大学电子工程与光电技术学院硕士研究生, 研究方向为工业大数据分析、深度学习和工业互联网。

马川: 男, 南京理工大学电子工程与光电技术学院讲师, 博士, 研究方向为无线通信、联邦学习与隐私保护融合、以及面向信息论、随机优化理论和人工智能的交叉融合。

李骏: 男, 南京理工大学电子工程与光电技术学院无线传感网研究所所长, 教授, 研究方向为通信、计算以及控制融合的分布式人工智能架构与方法及其在工业互联网中的应用。

联系人

李骏, 江苏省南京市玄武区孝陵卫街 200 号南京理工大学, 210014, 13801597006, jun.li@njust.edu.cn;

夏鹏程, 江苏省南京市玄武区孝陵卫街 200 号南京理工大学, 210014, 13813714198, xiapengcheng1205@foxmail.com。

基于工业级 5G 的柔性机器人协同智造研究及应用

马霄¹, 寇增杰², 袁留记³

(1. 昆山中科晶上信息技术有限公司, 昆山 215300; 2. 中科南京移动通信与计算创新研究院, 南京 210000; 3. 北京中科晶上科技股份有限公司, 北京 100086)

摘要: 基于当前国内企业设备联网率低, 工业通信协议差异性大等造成的数字化信息共享难度高的问题, 以及中小规模企业对于多品种小批量的柔性生产需求大的实际情况, 提出了基于工业级 5G 的柔性机器人协同智造系统。在此系统中, 采用以工业级 5G 终端基带芯片与柔性机器人融合的技术, 建立基于工业级 5G 的柔性智造产线; 以低时延、高可靠的工业级 5G 网络与云化工业控制系统构建基于工业级 5G 的柔性智造物联网, 推进基于工业级 5G 的柔性智造变革。另外, 本文提出了以 OODA 范式构建基于工业级 5G 的孪生控制平台, 实现对工业级 5G 网络及工业生产设备实时孪生控制, 为工业智能制造的网络化协同和精益化管理提供平台支撑。

关键词: 工业级 5G; 协作机器人; 数字孪生; 柔性智造

中图分类号:

文献标识码: A

A new research and application of flexible robot collaborative intelligent manufacturing based on industrial 5G

MA Ying Jiao¹, LIU Yao Qi², YUAN Yao³, QIAN Man Li³

(1. Kunshan Sylincom Information Technology Co., Ltd, Kunshan 215300;

2. Zhongke Nanjing Mobile Communication & Computing Innovation Institute, Nanjing 210000;

3. Beijing Sylincom Technology Co., Ltd, Beijing 100086)

ABSTRACT: Based on the high difficulty of digital information sharing caused by the low networking rate of equipment in domestic enterprises and the large difference of industrial communication protocols, and the actual situation that small and medium-sized enterprises have a large demand for flexible production of multiple varieties and small batches, a flexible robot collaborative intelligent manufacturing system based on industrial 5G is proposed. In this system, the integration technology of industrial 5G terminal baseband chip and flexible robot is adopted to establish a flexible intelligent manufacturing line based on industrial 5G; The industrial 5G network with low delay and high reliability and the cloud industrial control system are used to build the flexible intelligent manufacturing intelligent networking based on industrial 5G, so as to promote the reform of flexible intelligent manufacturing based on industrial 5G. In addition, this paper proposes to build a twin control platform based on industrial 5G with OODA paradigm to realize the real-time twin

control of industrial 5G network and industrial production equipment, so as to provide platform support for networked collaboration and lean management of industrial intelligent manufacturing.

KEY WORDS: Industrial 5G; Cooperative robot; Digital twins; Flexible intelligent manufacturing

以新一代信息技术与工业技术有机融合的智能制造技术正引领第四次工业革命^[1-2]高速发展,推进产业的高智能化生产进程。数字化智能制造的核心是数据连接和以工业大数据^[3-4]为支撑的智能决策与实时控制,但是,由于工业现场的复杂度高、干扰性强以及协议种类繁多而使得设备连接存在一定的挑战性。根据赛迪统计,当前我国规模以上工业企业中,有 80%的机器设备因为没有联网,变成了不会说话的“哑”设备,而 20%的联网设备因遵循的通信协议不同,存在严重语言障碍。由此可见,“信息孤岛”阻碍了资源、数据的集成共享和创新应用。支持丰富工业协议^[5]的通信网络是工厂数字化转型^[6-8]、智能改造的主要瓶颈。

另外在面向未来应用需求时,相关机械、装备、工业用品等产品的制造更呈现出多品种小批量化的定制生产模式。随着工业生产模式逐渐走向以最终客户需求为导向,离散制造模式正从 MTS^[9](Make-to-Stock, 备货型生产),走向 MTO(Make-to-Order, 按单生产)以及 ETO(Engineer-to-Order, 按订单设计)。广大中小规模的离散制造企业对智能制造产线以多品种小批量柔性化生产的需求变得越来越刚性,这一系列的变革需要一张低时延、高可靠的确定性工业控制移动网络来实现。因此,本文提出了基于工业级 5G^[10-12]的柔性机器人协同智造系统,通过柔性机器人技术和以 OODA^[13]范式构建的基于工业级 5G 的孪生控制平台,建立基于工业级 5G 的柔性智造产线,从而推进基于工业级 5G 的柔性智造变革。

1 关键技术

1.1 工业级 5G 终端基带芯片

DX-T502 是一款适用于工业无线通信业务的 5G 终端基带 SOC 芯片,采用授权/非授权频段和异构多核软基带架构,集成了自主研发的 DX-M DSP 多线程处理器^[14],每个 DSP 处理器有四个独立的硬件线程,支持四个独立程序的并行运行,芯片采用自主指令集 DSP 核,实现单核主频不低于 1200MHz,单核处理能力不低于 13GMACs(16bit 定点)。芯片支持 TCP/IP、UDP、PPP 等网络协议,也支持 Profinet 等私有化协议定制,以及外设接口 USB、PCIe、GMAC、UART、GPIO、SDIO 等。

DX-T502 芯片内含 NR 协议栈处理、物理层处理功能,支持 100MHz 信道带宽以及上行峰值速率 2Gbps/下行峰值速率 2Gbps 的性能,支持 uRLLC 功能,在工业控制场景可提供超低时延 2ms,具备集成度高、通信速率高的特点。

1.2 工业级 5G 孪生控制平台技术

首先，平台系统通过对数字孪生技术^[15-17]创新，基于工业生产 5G 互联网络模拟生成数字平行孪生系统，支持对整个生产过程的监测控制以及对网络改造升级提前预测验证；平台通过标准化精准建模技术对工业级 5G 互联网的虚拟化生产组网场景以及复杂电磁环境模型精准构建，实现对整个产线的智能化管控；平台通过三维模型高效渲染技术，实现二维三维场景高效渲染与交互，实现工业生产全场景网络节点部署和仿真。

基于工业级 5G 的孪生控制平台如图 1 所示，由六个子平台组成，分别为场景部署与业务监测子平台、环境监测与模拟子平台、网络监测与模拟子平台、孪生决策子平台、业务管控子平台和系统管理子平台。

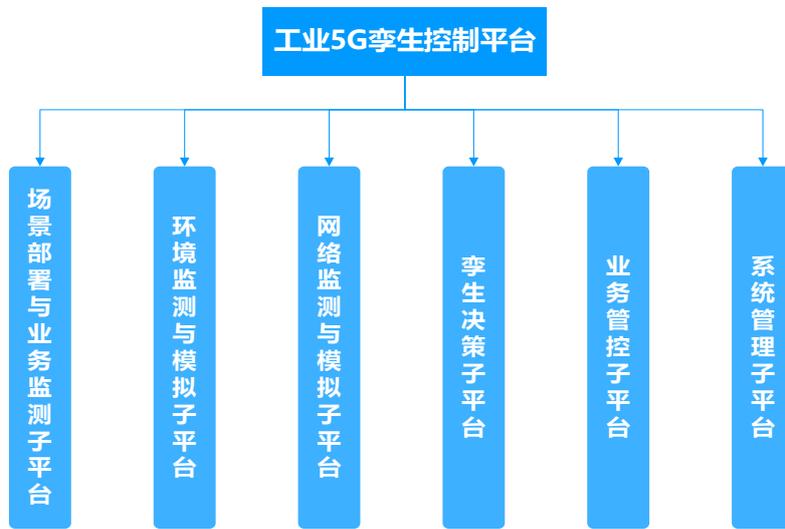


图 1 基于工业级 5G 的孪生控制平台系统组成图

场景部署与业务监测子平台主要提供工业生产物理实体在虚拟平台上的实时孪生呈现和交互分析功能，支持对物理实体生产车间和相关设备进行 1:1 建模、实时呈现工单工序流程、设备状态和位置信息交互以及自定义场景仿真等功能。

环境监测与模拟子平台一方面提供工厂车间各种电磁环境和非电磁环境（温度、湿度、粉尘等）的实时监测和分析功能，另一方面可以在模拟工厂环境的前提下对工业生产流程进行测试。

网络监测与模拟子平台能够感知分析物理工厂车间内的无线通信网络情况，包括基站、终端和核心网运行状态、信令信息、拓扑信息以及告警信息等，同时提供虚拟网络模拟功能，支撑工厂生产试验。

孪生决策子平台实现对真实物理工厂的智能决策优化功能。通过对业务数据、网络环境数据、设备信息数据的感知分析、实时存储、模拟试验论证、智能化分析计算、智能判定决策，自动生成最优化策略，通过决策执行业务管控子平台模块实现配置执行生效的目的。

系统管理子平台负责整个平台的辅助管理，主要包括数据管理、设备管理、告警管理、用户

管理、日志管理、运维监控及服务监控等，另外也负责对外设备和系统的对接和控制。

如图 2 所示，平台采用 B/S 微服务架构^[18]，分为展示与交互层、应用服务层、消息转发层、设备管控层和设备系统层。展示与交互层提供人机交互的可视化 Web 界面；应用服务层提供整个平台的后台服务；消息转发层提供消息分发服务，主要实现上下两层（设备管控层与应用服务层）的解耦以及解决消息实时性以及消息并发性问题；设备管控层主要对接外部的设备与系统，实现的原理是一部分在靠近设备侧直接与设备系统层进行数据交换，数据采集解析后通过 MQTT 队列^[19]传输给另外一部分远离设备侧的设备管控层（提供数据采集与存储，数据分发以及设备控制等功能）；设备系统层属于平台之外的系统，包括基站/终端侧的 OAM、核心网侧的 OAM、生产设备侧的 PLC 系统等。

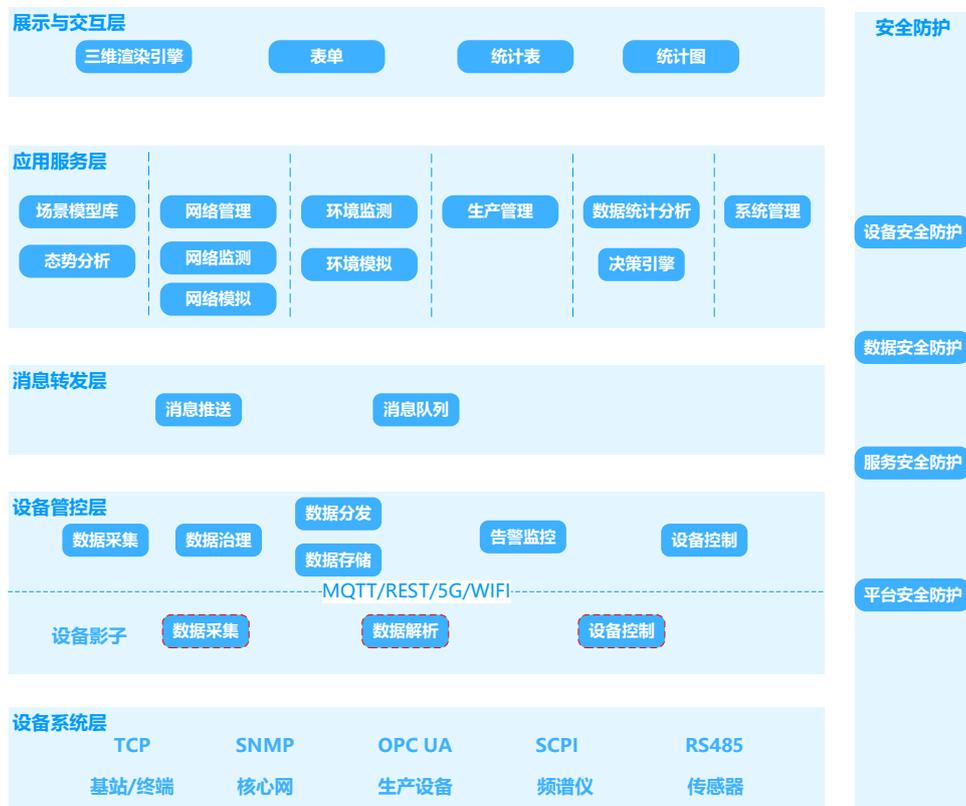


图 2 基于工业级 5G 的孪生控制平台技术架构图

1.3 自学习自演进的 OODA 闭环

随着工业互联网的发展，大量的智能设备终端会并入智能工厂物联网。与此同时系统复杂性和海量终端使得其运行、维护、优化和管控亟须智能处理。智能处理过程可分解为感知(Observe)、判断(Orient)、决策(Decide)、执行(Act)四个环节的循环过程。OODA 闭环可以利用融合控制理论中闭环迭代原理将一个复杂智能过程映射为一个可计算的过程，实现自学习和自演化。

感知(Observe):数据感知是智能化处理的基础。环境数据感知是指将在物理实体生产车间中

采集到的数据（包括设备、工序、环境、网络等）实时上报虚拟孪生平台并呈现。

判断(Orient):当实体生产车间出现故障时，虚拟孪生平台可以进行网络重建优化，恢复设备通讯。同时利用备用基站在虚拟孪生平台上对车间网络覆盖和信号质量进行模拟和分析判断。

决策(Decide): 对试验判断得出分析结果并进行最终方案的决策，包括在物理实体环境下网络设备配置的调整以及对实际设备传达指令时间和类型的确定。

执行(Act):对真实生产车间下发确定指令，控制所有终端连接运转，同时将最新的状态等数据再次实时回传给虚拟孪生平台进行呈现和交互，形成完整的自学习和自演进的 OODA 闭环。

2 技术方案及系统架构

该技术方案以工业级 5G 硬核技术为支撑，结合柔性机器人、孪生控制技术和机械手装配等技术，构建了自主可控的工业级 5G 柔性机器人协同智造系统，其系统架构如图 3 所示。

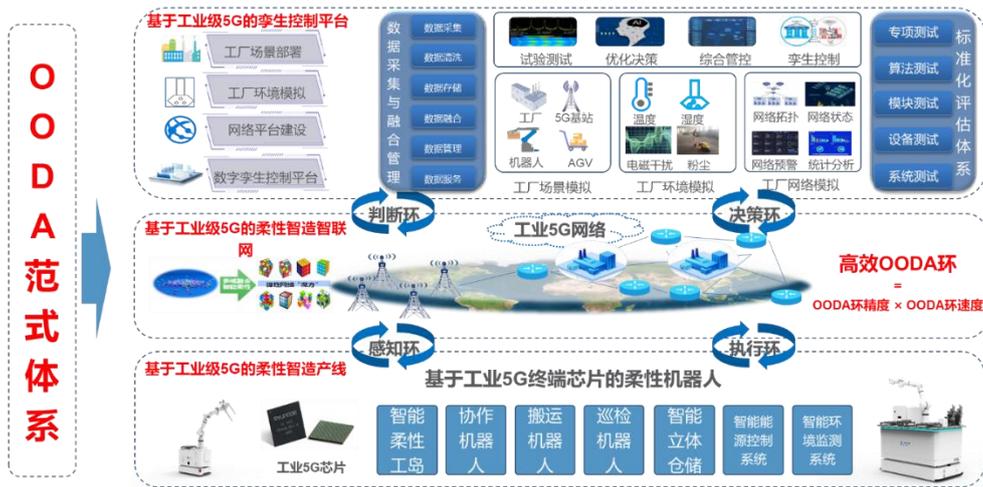


图 3 基于工业级 5G 的柔性机器人协同智造系统总体架构图

该系统利用工业级 5G 网络实现机器人与人之间、机器人与孪生控制平台之间的数据的交互，孪生控制平台实现全域（信息域、控制域和计算域）的实时感知、判定、决策、控制，实现按需服务、按需部署、资源动态复用和重组，为离散制造企业提供了柔性智能化改造和应用示范，加快传统制造业的智能化升级，进而实现高端智造转型。其主要由三部分组成：

第一，基于工业级 5G 的柔性智造产线。该柔性智造产线由智能柔性工岛、协作机器人、搬运机器人、巡检机器人等多种柔性产品共同组成。在工业级 5G 网络实时孪生控制的保障下按生产任务需求完成自动编组，基于视觉系统实现快速分拣、机器人技术^[20-21]配合视觉引导取料、机器人力控装配、电气动力切换、自动化生产线的组装与调试等多项工艺内容，完成试验设备的生产、外观检测、测试、归档入库等功能，实现从原材料库出库到生产完成整机入库的整体柔性智能作业，大幅减少用户的建设成本，同时实现最小单元 1Pcs 的订单定制。

第二，基于工业级 5G 的柔性智造物联网。该柔性物联网是以工业级 5G 终端基带芯片为核心构建低时延、高可靠的工业级 5G 网络，在孪生控制平台支撑下，解决复杂生产环境和生产工艺对工业级 5G 带来的不确定影响。伴随工业级 5G 终端基带芯片的技术突破，实现工业级 5G 与工业设备（机器人、AGV 等）的深度融合，打破现有传统的复杂工业总线的控制模式，演进到基于工业级 5G 的扁平化控制网络，实现控制时延 ms 级和网络可控性可达 99.999%。同时，可对多种工业以太网协议和工业总线协议数据融合，将大幅减少现有复杂的控制设备，实现集中的云化控制。

第三，基于工业级 5G 的孪生控制平台，该平台以动态实时的方式针对工业级 5G 互联网智能化工厂进行建模以及数据采集并做出高度写实的分析，实现工厂真实网络物理实体的试验测试和控制优化。除此之外，还可以通过三维模型高效渲染技术，实现二、三维场景高效渲染与交互和工业生产全场景网络节点部署和仿真。最后，基于工业级 5G 的孪生控制平台同时进行信息的弹性低时延传输技术研究，在复杂多变的电磁环境下，满足工业生产高可靠、低时延要求，实现数字孪生系统与真实生产网络系统保持信息交互，从而达到监测与控制的目的。

3 应用场景

传统制造产线主要是按照人的要求，实现机器设备、系统、生产流水线在多人的直接参与下完成重复性的运行，达到预期目标生产制造的过程。在本论文中，提出了一条高柔性的基于工业级 5G 的柔性机器人协同智造智能试验线体，充分依托基于工业级 5G 的柔性机器人、柔性智造物联网、孪生控制平台构建基于工业级 5G 的柔性机器人协同智造系统解决方案，为广大中小规模的离散制造企业提供了柔性智能化改造和应用示范，加快传统制造业的智能化升级，实现高端智造转型。其设计原型如下图 4 所示。

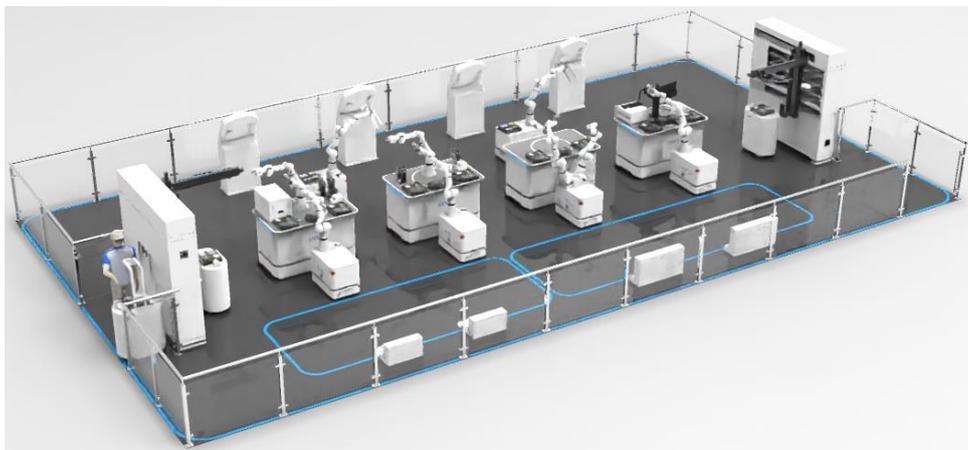


图 4 基于工业级 5G 的柔性机器人协同智造产线仿真图

该智能化柔性协同智造系统基于工业级 5G 机器人控制技术，由柔性工岛、柔性机器人和搬

运机器人共同组成。首先，柔性工岛按任务需求进行工装配置、智能编组，编组就位后进行电气接口智能切换，并进行快速自检，完成生产前准备工作。同时，柔性机器人按工艺任务要求，就位于对应操作位，进行电气接口智能切换，并完成快速自检后，按生产任务要求进行智能夹具快换作业。然后，运输机器人完成原材料从立体库出库到中转平台上，工岛间的设备开始转运工作，完成从原材料库出库到生产完成整机入库等各项工艺内容，整体实现柔性智能化作业，大大提升生产效率，降低人工成本，杜绝作业差错。

与使用 Wi-Fi 的传统智造产线相比，在相同环境条件下使用工业级 5G 网络，可解决传统方案中网络丢包、粘包的问题。此外，在孪生控制平台的支持下，该基于工业级 5G 的柔性机器人协同智造系统建立了所有设备信息交互信息资源池，实现所有节点数据实时上报，可保障在 10ms 内完成调度关联计算并执行，大大缩短原有 Wi-Fi 条件下，轮询周期需要在 50ms 才可完成的调度。通过示范预测，在构建工业级 5G 网络和孪生控制平台后，企业大约提升 34% 的生产效率。其工业级 5G 与 Wi-Fi 在参数及性能上的区别如下表 1 所示。

表 1 工业级 5G 与 Wi-Fi 的区别

参数	工业级 5G	Wi-Fi
支持频段	低频段，中频段，高频段	2.4GHz, 5GHz, 6GHz
频谱类型	授权/非授权频谱	非授权频谱
MIMO	室外：64T64R-16 流 室内：4T4R-4 流	8T8R/12T12R-8 流
调制技术	256QAM	1024QAM
时延(ms)	eMBB: 4 uRLLC: 0.5	20
移动性(ms)	10	50
干扰控制能力	强	弱
覆盖范围	100-300 米 (Small Cell) 几十公里 (宏站)	小于 50 米 (室内) 最高 300 米 (室外)
部署和运维能力	高	低

4 结语

本文提出的以柔性机器人、基于工业级 5G 的柔性智造互联网、基于工业级 5G 的孪生控制平台为核心的柔性机器人协同智造系统，可以为离散型制造企业提供柔性智能化改造的应用示范方案，对加快制造业智能化、柔性化的转型升级有重要意义。

参考文献

- [1] 许莹, 李邵建. 技术创新势在必行——铸就产品创新平台“互联网+工业”颠覆传统[J]. 现代制造, 2015,000(048): 10~13.
- [2] 潘毅良. 打破信息壁垒推动数字化转型 [J]. 智慧工厂, 2019,000(003) - 38~39.

- [3] 王振环. 基于智能制造背景下的质量大数据[J]. 智能制造, 2018,000(008) - 36~38 .
- [4] 柴春蕾, 曹梅. 智能制造系统架构设计与发展路径研究 [J]. 智能制造, 2021,000(003) - 41~44.
- [5] Jeff Thornton. 通过协议转换应对工业物联网挑战[J]. 现代制造, 2016,000(004) - 35~35.
- [6] 陆琨. 传统制造工厂数字化转型路径研究[J]. 中国设备工程, 2021,000(004) - 57~59.
- [7] Walter Huber. 未来工厂向智能化发展[J]. 现代制造, 2019,000(033) - 36~37 .
- [8] 佟伟. 以“透明”工厂赋能智造未来[J]. 现代制造, 2018,000(036) - 24~24.
- [9] 安运杰. 供方运作模式下的经济订货批量模型构建[J]. 财会通讯, 2011,000(012) - 80~81 .
- [10] 陈珍. 5G 网络扮靓工业智能[J]. 中国设备工程, 2017,000(006) - 8~11 .
- [11] 王海滨. 王海滨:新基建时代,工业级 5G 蓄势待发[J]. 智慧工厂, 2020,000(006) - 31~32.
- [12] 吴冬升. 5G 由浅入深赋能工业互联[J]. 通信世界, 2019,000(025) - 20~23.
- [13] 黄东亮, 戴苏榕, 李辰. 人工智能在 OODA 循环中的应用[J]. 航空电子技术, 2020,051(002) - 55~59.
- [14] 张多利, 陈楠, 汪杨, 宋宇鲲. 粗粒度多核系统任务级多线程调度研究[J]. 微电子学与计算机, 2020,037(001) - 46~52.
- [15] 刘阳, 刘旭. 工业数字孪生技术体系及关键技术研究[J]. 信息通信技术与政策, 2021,000(001) - 8~13.
- [16] 陈川, 陈岳飞, 曾麟, 方向. 数字孪生在智能制造领域的应用及研究进展[J]. 计量技术, 2020,000(012) - 20~25.
- [17] 桂宏凡. 数字孪生技术与应用研究[J]. 数字化用户, 2019,025(010) - 136~136.
- [18] 陈建海, 陈淼, 浦云明. 基于微服务架构 B/S 系统的性能分析[J]. 计算机系统应用, 2020,029(002) - 233~237.
- [19] 严彦欢. 消息队列遥测传输协议(MQTT)技术分析[J]. 电子技术与软件工程, 2021,000(012) - 3~4.
- [20] 杨书评. 机器人自动化及生产线关键标准研究 [J]. 制造业自动化, 2010,000(008) - 191~193.
- [21] 王秋惠, 赵瑶瑶. 机器人人机共融技术研究与进展[J]. 机器人技术及应用, 2021,000(005) - 16~22.

作者简介

马英娇: 高级工程师, 北京邮电大学博士, 多年从事工业级 5G 终端基带芯片研发、移动通信系统大型科研装置研发、成果对外推广等工作。作为技术负责人和主要参与人参与了国家科技重大专项、北京市重大科技项目、中科院 BM 项目以及企业横向合作等十余个项目的研发工作, 荣获 2018 年度“中国科学院科技促进发展奖”, 发表多篇 SCI 期刊文章, 专利达 20 余项。

刘壹圻: 博士, 中科院计算所特别研究助理, 主要研究方向为天地一体化信息网络及柔性验证技术。负责空天地一体化信息网络综合试验平台建设, 参与我国多套卫星通信系统架构设计讨论, 标准设计, 试验平台建设及样机工程开发。作为负责人或核心骨干参与重点项目十余项, 包括科技部重点研发计划, JKW173, 民用航天预研, 中科院弘光专项, 北京市科技计划等。发表论文十余篇, 授权/申请发明型专利三十余项, 曾获国家级、省部级各类竞赛或荣誉三十余项。

袁尧: 正高级工程师, 中国科学院计算技术研究所工学博士。长期致力于从事 LTE/5G 芯片系统的研发及在车联网、军事及工业等领域的产业化应用, 先后在国内外通信领域重要期刊及会议上发表核心论文十余篇, 申请发明专利 16 项 (包括实用新型专利、外观设计等合计申请 40 余项), 承担多项国家、省部级重大项目以及院所合作项目。

钱蔓蓁: 副研究员, 中国科学院大学、澳大利亚悉尼大学双博士学位。主要从事新一代移动通信系统、新无线短距通信系统关键技术研究及系统研发工作。先后承担和参与了国家宽带无线重大专项、北京市科技计划、中科院重点部署项目等重大科研任务, 发表论文 20 余篇, 专利授权 11 项。作为核心成员之一, 先后获得北京市科学技术二等奖、中关村十大创新成果、中国科学院科技促进发展奖等奖励。

5G 行业虚拟专网在钢铁行业远程控制的应用研究

邢燕, 徐文杰, 易祖洋

(中国联合网络通信有限公司广东省分公司, 广州 510627)

摘要: 本文基于钢铁行业远程控制的需求和 5G 行业虚拟专网技术的高度契合, 阐述在钢铁行业行车、热处理线、焦炉四大车等设备远程控制应用解决方案以及 5G 边缘计算、网络切片等技术的应用, 将远程控制、视频远程监控等场景引入钢铁企业生产中, 形成具有示范推广价值的解决方案, 极大提升钢铁行业生产效率。

关键词: 虚拟专网; 钢铁行业; 远程控制; 网络切片;

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

Application of 5G industry virtual private network in remote control of steel industry

XING Y, XU WJ, YI ZY

(China Unicom Co., Ltd. Guangdong Branch, Guangzhou 510627)

ABSTRACT: Based on the demand of remote control in the steel industry and high integration of 5G industry virtual private network technology, this essay expounds the application solutions of remote control of equipment such as driving, heat treatment line and coke oven truck in the steel industry, as well as the application of 5G Multi-access Edge Computing, network slicing and other technologies, introduces several scenes into the production of steel enterprises such as remote control, video remote monitoring and etc., and creates solutions with demonstration and promotion value, greatly improve the production efficiency of the steel industry.

KEY WORDS: virtual private network; steel industry; remote control; network slicing;

当前全球钢铁行业面临劳动力成本攀升、劳动强度大、工作环境恶劣、人力短缺的难题。钢铁行业的生产员工工作环境相对恶劣, 便捷性差, 人力投入大, 存在较高人员作业安全隐患。所以钢铁企业需要一张高可靠性的网络, 满足设备远程操控的需求。5G 出现之前, 无线技术难以满足实时控制的需求, 往往需要通过有线传输, 从而限制了设备作业能力和范围^[1]。通过 5G 大带宽和低时延特性, 技术工人可以远程观看现场视频画面和控制机器作业, 顺畅地完成复杂操作,

改善作业环境，提高生产效率。

1 钢铁行业远程控制技术要求

远程控制一直是工业生产中保障人员安全、提升生产效率、实现生产协同的必要手段。目前在钢铁行业行车、热处理线、焦炉四大车等设备的操作过程中，员工作业动作重复性高，操作环境较恶劣，工作时间长。钢铁生产现场存在高温粉尘多的特殊环境，长时间现场人工操作会存在一定的安全隐患。通过光纤网络进行远程控制，能够避免人员现场操控的危险，但由于设备的移动性会对光纤造成磨损，需要定期更换光纤设备，增加运维成本。通过无线网络进行远程控制，可以减少运维成本，但对通信网络时延和可靠性要求较高。

以钢铁行业行车远程控制为例，网络承载的业务主要包括：远程控制业务，高清实时画面回传业务，现场设备运行状态数据采集及实时回传业务，不同业务对于网络性能的需求不同，控制部分需要确保时延 $\leq 20\text{ms}$ ^[1]（行车高速移动时速度可达 1m/s ，考虑设备操作安全及故障急停等情况，一般要求时延在 20ms 以内），视频回传部分需确保上行带宽 $\geq 50\text{Mbps}$ （按单场景共计 10 路高清视频回传计算，根据实际应用场景有差异，部分场景可达 30 路以上高清视频回传），无线传输中仅有 5G 网络能同时满足以上要求。

表格 1 行车远程控制网络需求表

序号	场景描述	网络需求	
		时延	带宽
1	行车远程操作场景（控制部分）	10-20ms	50-100kbps
2	行车远程操作场景（视频部分）	30-50ms	50-150Mbps
3	行车运行状态数据（数据采集部分）	30-50ms	5-15Mbps

2 钢铁行业 5G 行业虚拟专网应用

2.1 5G 行业虚拟专网应用

5G 行业虚拟专网是指利用 MEC 边缘计算、网络切片等技术，为客户提供专属网络覆盖、数据隔离、质量保证的基础连接无线网络，满足客户生产、办公、管理等应用的通信服务需求^[2-3]。基于一张定制的 5G 行业虚拟专网，可实现钢铁厂区 5G 网络全覆盖。通过下沉多接入边缘计算平台 MEC 以及用户面 UPF 构建行业虚拟专网，而核心网控制面还是在公网的，提供部分物理独享的 5G 专用网络，具有数据不出园、超低时延、基础自服务等优点，同时以边缘计算为基础、结合 5G 专网的大带宽、海量连接、低时延和高可靠等特性，能够全面满足海量异构工业设备数据采集、传送和汇聚需求。

2.2 MEC 边缘计算应用

MEC (Multi-access Edge Computing) 是基于 5G 架构演进，将移动接入网与互联网业务深度

融合的一种技术。MEC 一方面可以改善用户体验,将部分的业务功能、内容、应用部署到靠近接入侧的网络边缘,因贴近用户,使得应用下沉到用户侧,实现了本地化分流与就近计算服务提供,可满足用户低时延、大带宽、高安全的业务需求^[4];另一方面通过将计算能力下沉到移动边缘节点,提供第三方应用集成,为移动边缘入口的服务创新提供了无限可能,同时实现了工业业务数据不出工厂,使网络和数据的安全得到保障。

2.3 网络切片应用

网络切片是 5G 关键技术之一,可提供按需定制、按需隔离、资源有保障的差异化网络服务。最简单的理解就是将一个网络划分成多个网络通道,满足不同的业务需求。针对 5G 网络高可靠性、低时延、大带宽、广联接等特性划分不同的 5G 切片,可满足工业控制、视频传输、设备联网等不同业务运行高效、稳定。

企业用户可通过 5G 网络切片业务 SLA 监控平台,自主划分切片业务,同时能监控切片业务整体情况,直观的感受 5G 网络效果、洞察网络异常。平台也可以提供 Open API 接口,与用户内部管理平台对接,提供数据决策,支撑企业的数字化转型需求。

3 5G+钢铁行业远程控制应用解决方案

针对钢铁行业行车、热处理线、焦炉四大车等设备进行远程控制改造项目,基于 5G 行业虚拟专网实现控制信号和图像信号的通信,实现沉浸式的远程监控体验,提升生产效率,改善现场人员作业条件。

3.1 5G+行车远程控制

钢铁企业行车的信息化程度低,主要通过行车吊台控制室现场人工操作,行车吊台操作室在行车边缘侧,操作室操作的工作空间狭小,工作环境相对恶劣,人员作业操作时间长,便捷性差,人力投入大,存在较高人员作业安全隐患。

现场操作人员通过有限的视野进行作业判断,如:判断下方是否准确落入指定区域,卸载位置是否准确到位等待,对操作人员的经验和熟练度依赖程度高

通过对行车设备进行 5G 化改造,通过 5G 工业网关与行业设备 PLC 进行通信实现设备控制信号传输和 5G 工业摄像头实现多路实时高清视频回传,MEC 本地云化数据处理及分发^[5-6],并通过网络切片实现定制化 QoS 网络质量保障,降低传输时延,确保实时可靠交互。在远程操作室内,安装视频综合平台、远程操作台、NVR 等装置,经过核心交换机和 AR 路由器与 5G 工业网关直连,再通过 5G 工业网关与车间现场实时通信,实现控制行车大车的行走、小车的升降、紧急停止、操作模式切换、报警提示等,以及实时观看现场作业画面。同时,可通过 5G 工业平板实现基于 PLC 软控制台的远程控制,增加作业便利性。

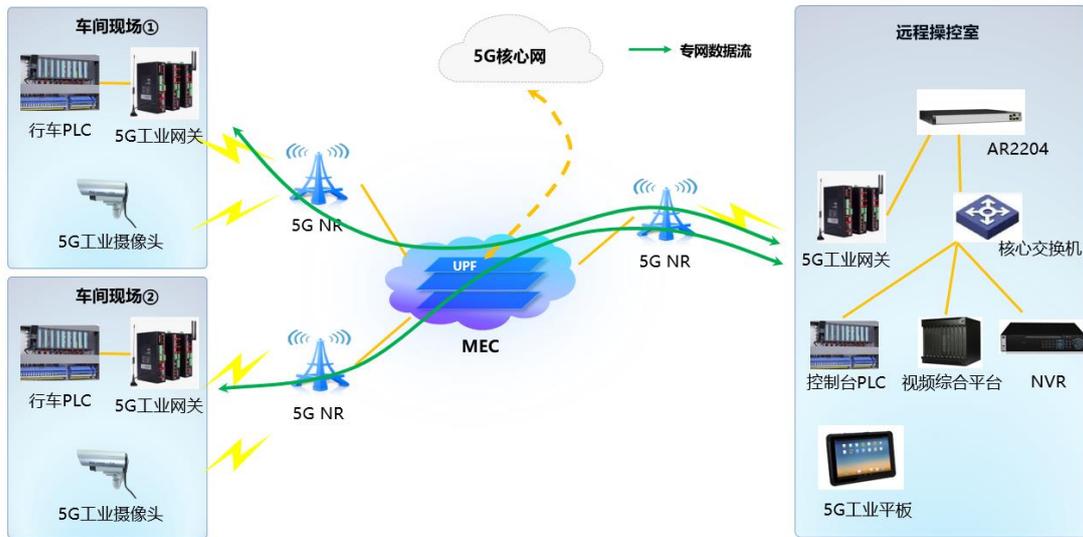


图 4 5G+行车远程控制系统架构图

根据远程控制应用网络承载的业务分类，网络切片设计划分如表 2。

表 2 网络切片设计表

编号	连接类型	单用户带宽/连接	时延	移动范围	业务 Case
专有切片 1	eMBB 上行大带宽	UL: 150Mbps DL: 5Mbps	<30ms	固定路线移动	1、行车远程操作场景（视频部分）
专有切片 2	uRLLC 业务：低时延	DL: 50Mbps UL: 5Mbps	<10ms	固定路线移动	1、行车远程操作场景（控制部分），
其他业务（默认物网切片）					除 2 个专有切片外的其他业务：如设备数据采集、产线视频监控等

基于 5G 行业虚拟专网，叠加网络切片技术，实现行车 5G 远程操控应用，极大提升操作人员体验，提升操作人员的作业效率和安全性，既减少了人员现场作业的风险，也能够有效降低光纤设备的固定损耗，有效降低设备的维护成本。

3.2 5G+厚板厂热处理线远程控制

厚板厂热处理生产线有两个操作室位于煤气危险区域，环境比较恶劣，不利于工人现场作业。以某钢铁企业厚板厂热处理线为例，通过部署 5G 专网和 MEC 边缘计算，为视频传输和 PLC 控制信号设立独立传输通道^[7-8]，加以视频融合和数据图层叠加等新技术，实现“可移动”操作终端和“一张图”式的生产视频监控，降低员工的工作负荷，解决员工操作“两地跑”的困难。

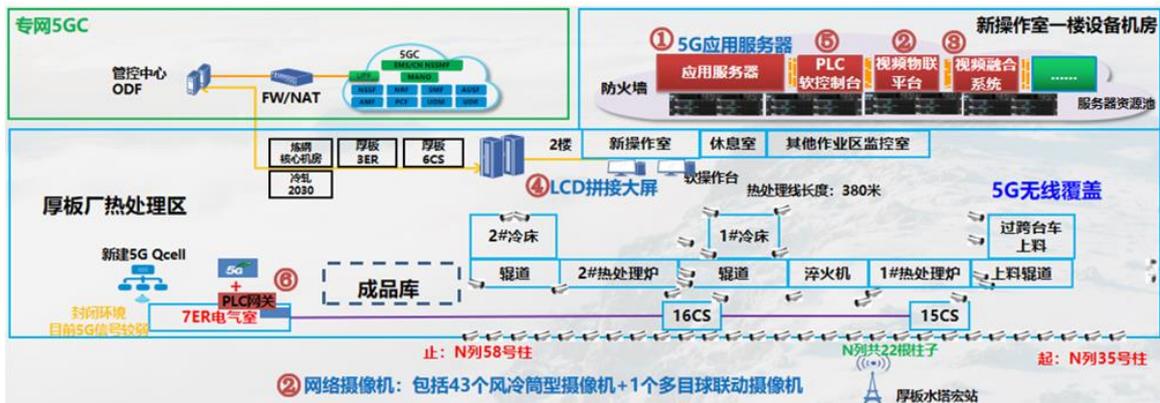


图 5 5G+厚板厂热处理线远程控制系统架构图

远程控制系统主要包括以下模块：

5G 应用服务器①：支撑厚板厂热处理线 PLC 的远程控制系统部署和视频监控图像的本地存储，实现数据本地处理与存储；

三维远程监控平台系统（视频物联系统②+视频融合系统③+LCD 大屏和配套设备④）：把总长 380 多米的热处理产线画面完整无缝地拼接在“一张图”上，将实际视频融合成三维场景，使整个图“活”起来。同时在画面上叠加设备和生产实时数据，含能源消耗、各工序的钢板数量及重量、温度及压力等，使操作工和管理人员更容易掌握产线实况，更好地进行安全生产作业和管理，使网络和数据的安全得到保障。



图 6 三维远程监控平台

软控制台系统（PLC 软控制台服务器⑤+PLC 网关⑥）：通过 5G+PLC 网关与热处理线 PLC 系统连接，通过 5G 网络连接控制台服务器，操作工在远程控制中心的工业触屏监视器上点击 PLC 软控制台界面按键进行生产操作，也可以在热处理生产线机侧设备旁使用 5G 专网手机，在 APP 上进行移动作业，实时查看热处理线运转状态。同时，系统将原有实体操作台的按键（除一键急停类之外）软件化，大幅降低新操作室的空间占用要求。



图 7 PLC 软控制台

3.3 5G+焦炉四大车远程操控

焦化是炼铁的前道工序，肩负着为高炉提供优质焦炭的使命。焦炉是炼焦的主要热工设备，四大机车——推焦车、拦焦车、熄焦车、装煤车是焦炉的配套设备，分工不同又互相联系，通过各信号的传送及连锁构成有机统一的整体，服务于焦炉生产，提供从煤饼入炉到焦炭外送的装载运输任务。

目前焦炉四大车全部由司机操作，各装置动作需要人工辅助确认，炉前作业及走行对位需要人工确认，与其它车辆间的关键作业信息也需要人工对讲联络，自动化程度比较低。操作工处于高温粉尘区域，机车司机长时间监控和频繁操作，劳动强度非常大；作业效率低。设备故障收集全部凭借生产操作和点检人员被动找寻发现；生产调度和管理完全依赖人工决策。

针对钢铁企业对四大车进行远程控制改造项目，通过图像与视频相结合方式实现沉浸式的远程监控体验，设计主要包括推焦车上重要动作视频信息、装煤车重要位置视频信息、导焦车重要位置视频信息、电车关键位置视频信息、及炉顶作业区域视频，实现远程监控，缩短故障处置时间，同时通过 5G 专网实时传输控制信号，员工通过远程控制台，可以实时操控四大车，提升劳动效率，改善现场人员作业条件^[9]。

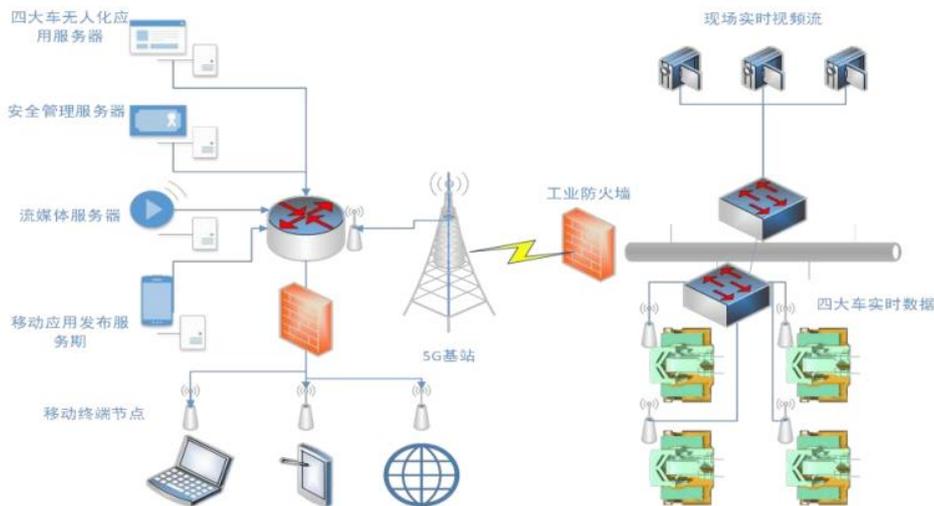


图 8 焦炉四大车远程控制系统架构图

5 结语

借助 5G 行业虚拟网络技术推动钢铁行业设备的智能化改造,将传统现场人工操作的方式转换成远程控制的方式,增强设备进行精细化管理,通过远程操控,改善操作员工作环境,降低事故风险,逐步降低人员作业安全隐患,提高设备作业效率,提升钢铁企业运营效益。

参考文献

- [1] 孙宇彤. 5G 远程实时控制的时延分析[C]// 5G 网络创新研讨会(2019)论文集. 2019.
- [2] 朱金周, 石林, 石阁,等. 5G 在离散制造中的应用研究[J]. 现代信息科技, 2021.
- [3] 冯华骏. 基于 5G 内网的工业互联网应用实践[J]. 中国新通信, 2020, 22(19):3.
- [4] 谭云月. 基于 5G 技术的工程机械远程控制的系统设计[J]. 物联网技术, 2021, 11(11):3.
- [5] 张达鑫, 王东军, 张达瑞. 基于 5G+工业互联网的天车远程控制[J]. 邮电设计技术, 2021(7):6.
- [6] 卢佩琳. 工业工程,5G 与智能制造[J]. 工业技术创新, 2021, 8(1):7.
- [7] 沈彬、李海花、高腾. 工业互联网技术洞察[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(6):4.
- [8] 胡世良. 我国 5G 专网发展的现状分析[J]. 通信世界, 2021(13):3.
- [9] 谢剑超. 5G 专网国内外发展现状探讨[J]. 通信世界, 2021(5):4.

作者简介

邢燕: 广东联通政企客户事业群高级副总裁兼工业互联网 BU 总经理,长期从事 5G+工业互联网规划、新技术演进等方面的研究工作。

徐文杰: 广东联通助理工程师,长期从事 5G+工业互联网行业应用等方面的研究工作。

易祖洋: 广东联通中级工程师,长期从事 5G+工业互联网、智慧医疗、智慧金融等行业应用、新技术演进发展等方面的研究工作。

联系人: 易祖洋

通信地址: 广州市天河区黄埔大道西 666 号联通新时空广场

邮编: 510627

联系电话: 18602031709

邮箱: zuyangyi@sina.com

我国 5G+工业互联网发展面临五大挑战

胡世良

(中国电信研究院, 上海 邮政编码: 200122)

摘要: 近几年来, 在国家政策的大力支持下, 在产业链各方的共同努力下, 我国 5G+工业互联网蓬勃发展, 5G 与实体经济融合正向广度、深度拓展, 5G+工业互联网正成为推动工业企业数字化转型的新引擎。在 5G+工业互联网蓬勃发展的同时, 仍面临跨行业融合难、商业模式尚不成熟、“卡脖子”问题一时难以解决、5G+工业互联网人才紧缺等五大挑战。为应对挑战, 本文最后从总体上提出 5G+工业互联网五点发展建议。

关键词: 5G+工业互联网 融合应用 商业模式 标杆案例

China's 5G + industrial Internet development faces five major challenges

Hushiliang

(Research Institute of China Telecom Corporation Limited, Shanghai 200122)

ABSTRACT: In recent years, with the strong support of national policies and the joint efforts of all parties in the industrial chain, China's 5G+ industrial Internet has developed vigorously. The integration of 5G and the real economy is expanding in breadth and depth. 5G + industrial Internet is becoming a new engine to promote the digital transformation of industrial enterprises. At the same time, it still faces five major challenges, such as difficult cross industry integration, immature business model, difficult to solve the "neck" problem for the time being, and the shortage of 5G + industrial Internet talents. In order to meet the challenges, this paper finally puts forward five suggestions on the development of 5G + industrial Internet.

近几年来, 在国家政策的大力支持下, 在工业互联网产业链各方的共同努力下, 我国 5G+工业互联网蓬勃发展, 工业互联网网络、平台、安全三大功能体系初具规模, 5G+工业互联网支撑实体经济降本减排、提质增效、疫情防控的重要作用不断显现, 有效助力工业制造企业网络化、数字化、智能化转型。截至 2021 年底, 我国 5G+工业互联网项目超过 2000 个, 5G 行业虚拟专网超过 2300 个, 覆盖了 20 多个国民经济重点行业和领域, 具有一定行业和区域影响力的工业互联网平台超过 100 个, 其中工业互联网双跨平台达到 15 个, 平台连接工业设备总数达到 7600 万台, 形成平台化设计、智能化制造、网络化协同、个性化定制、服务化延伸、数字化管理等应用

模式，创新和改变工业制造企业生产方式与企业形态。

1 5G+工业互联网发展面临五大挑战

工业互联网正成为推动新一轮科技革命、产业变革和工业制造企业数字化转型的重要驱动力。工业互联网的蓬勃发展为我国转变发展方式、优化经济结构、转换增长动力提供了新动能。如今，我国 5G+工业互联网发展势头良好，已进入产业深耕、赋能发展的新阶段，但仍面临诸多挑战。主要表现在以下 5 个方面（见图 1）：

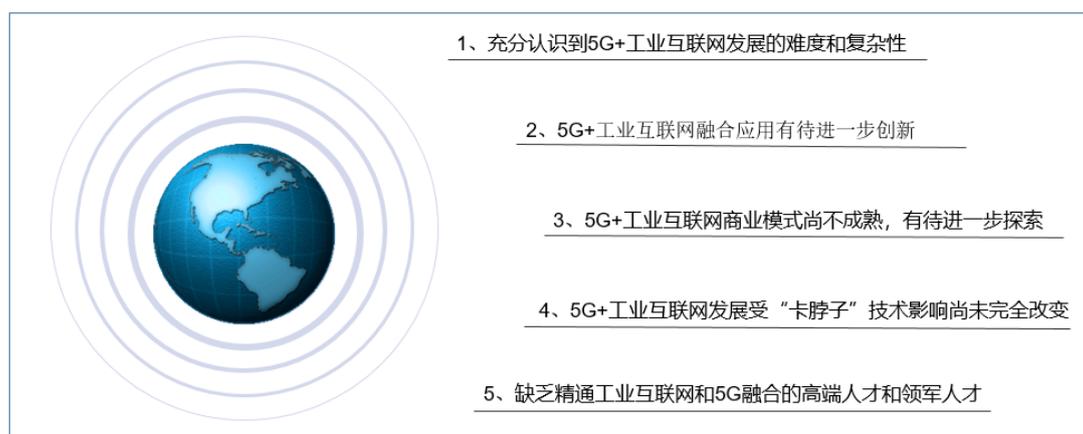


图 1 我国 5G+工业互联网发展面临五大挑战

1.1 要充分认识到 5G+工业互联网发展的难度和复杂性

我国不仅工业门类众多，而且企业所处的数字化阶段各不相同，对数字化、网络化、智能化的需求千差万别；工业制造业生产设备多、产业链长、流程复杂、价值创造环节多、工艺和技术要求高、标准和协议不够统一、行业需求复杂、业务场景分散且碎片化，这给 5G 跨行业、跨领域融合带来了困难；5G+工业互联网跨界融合专业性要求高，运营商、设备商、工业互联网企业间的行业壁垒仍然较高；运营商、设备商对工业企业的主要业务流程以及工艺流程掌握不足，缺乏将先进技术与知识、工艺、流程等融通的运营经验，技术融合、模式融合、业务融合难度大，提供的技术、产品与解决方案难以准确、有效、全面地满足工业企业的实际运营需求。

1.2 5G+工业互联网融合应用有待进一步创新

我国 5G 商用 2 年多来，5G 行业应用案例超过 1.2 万个，覆盖钢铁、电力、矿山、港口等 20 多个重要行业和有关领域，形成了一大批丰富应用场景，成为引领经济高质量发展新引擎。我们对近几年涌现的各类 5G2B 行业应用案例以及近四届“绽放杯”获奖案例分析来看，5G 主要是满足垂直行业客户远程控制、信息采集、高清图像和视频处理等场景化应用需求的阶段。例如，在 5G+工业互联网领域，2021 年 5 月和 11 月工信部公布两批《“5G+工业互联网”典型应用场景和

重点行业实践》来看，共公布协同研发设计、生产单元模拟、精准动态作业等 20 个 5G+工业互联网典型应用场景，很显然这些典型应用都是满足工业制造企业场景化应用。再如，5G 在智慧港口的应用场景主要有装卸作业的远程控制、港口无人运输、5G 智能理货、5G 智慧堆场、港区视频监控和 AI 识别等等，目前这些应用已经在上海洋山港、宁波舟山港、厦门远海码头、天津港、深圳妈湾港得到广泛应用，实现了 5G 全场景的应用落地，提高了港口自动化、智能化水平。但我们同时看到，目前 5G 应用正从场景化应用满足向为垂直行业客户提供融入客户核心流程的整体化解决方案方向转变。如中国移动面向工业互联网打造的“1+1+1+N”产品体系是突破连接、突破离散化场景化需求满足向提供 5G 一体化解决方案方向转变的生动实践。但电信运营商真正实现为垂直行业客户提供 5G 一体化解决方案道路漫长，融合应用创新仍需不断加强和深化。

1.3 5G+工业互联网商业模式尚不成熟，有待进一步探索

1.3.1 5G+工业互联网市场需求没有真正爆发

虽然我国 5G+工业互联网呈现蓬勃发展之势，但仍处于标杆应用案例打造阶段，垂直行业客户还不愿买单，有些是为了获得政府补贴而使用 5G 技术，这一现象普遍存在。出现这一现象的根本原因是 5G 还不是包括工业制造企业在内的垂直行业客户的刚需，而且目前 5G+工业互联网行业渗透率低，5G+工业互联网市场需求还没有真正激发起来。此外，工业企业应用 5G 技术改造传统企业需要一笔较大的投入和通信支出，由于受疫情、俄乌冲突、美国持续对中国高科技等产业的打压等因素影响，企业经营面临更大的困难，在很大程度上影响 5G+工业互联网的健康发展，过高的 5G 投入也抑制了工业企业 5G 应用需求。

1.3.2 5G+工业互联网产品不易进行规模化复制推广

5G+工业互联网组网复杂，而且工业制造流程环节复杂，不同行业、不同企业需求差异大、需求多样性且复杂，5G 需要适应不同的工业场景，提供一体化解决方案，标准化难度高，决定了产品和解决方案规模化复制推广难度大。

1.3.3 5G+工业互联网多元化盈利模式尚未形成

5G 网络建设的巨大投资带动 5G 产业链发展，受益最大主要是电信设备商、终端厂商、芯片公司、通信模组企业、方案提供商等，但面向客户“最后一公里”的电信运营商收费是最大堵点，电信运营商投入大收益少问题最为突出。目前从电信运营商 5G2B 盈利模式实践来看，盈利点主要包括连接收费、流量收费、专线收费等，盈利模式仍比较单一，更加多元化的盈利模式尚未形成。消费互联网以流量、广告、电商和会员费为收入来源的模式无法复制到工业互联网，决定了 5G+工业互联网盈利模式创新的复杂性。短期来看，这是可以接受的，但要是长期没有更丰富、更多元化的盈利模式，5G+工业互联网的发展和建设将无法形成商业闭环，不利于 5G+工业互联网持续健康地发展。

1.3.4 5G+工业互联网网络投资建设模式有待进一步探索

由于工业互联网首先要实现的是工厂内部物与物的相连,就必须对工业企业内网络进行重新配置,这方面需要消耗过多的人力、资金、时间,投入加大,造成许多企业导入工业互联网的意愿不高。目前,一些工业企业对 5G 专网和用户侧 MEC 投资建设认知不够全面,到底是运营商来投资还是由垂直行业客户来投资认识不清楚,垂直行业客户认为网络应该是运营商业务范畴,与自身关系不大,一定程度上造成电信运营商与垂直行业商业需求对接不力,完全由运营商投资面临巨大的资金压力。因此,面向垂直行业客户 5G 网络建设投融资模式需要进一步探索。

1.3.5 5G+工业互联网产业生态有待进一步完善

5G+工业互联网发展涉及到行业终端、模组、芯片、网关等,当前 5G 芯片模组等存在产业分散化、市场碎片化等特点,短期难以通过市场规模降低成本,导致行业终端、模组、芯片等价格偏高,5G CPE 行业终端和通用终端匮乏,在一定程度上制约了 5G 工业应用的规模推广,这从一个侧面反映 5G+工业互联网完整的产业生态尚未形成,不利于 5G+工业互联网规模化发展和普及。

1.4 5G+工业互联网受“卡脖子”技术的影响尚未完全改变

5G 刚刚迈入商用阶段,技术产业生态尚未完全成形,关键技术受制于人。例如,5G 芯片、工业终端、模组还未成熟,且没有实现面向工业领域的标准化,直接影响 5G 工业产品或装备的研发;在工业软件、工业、智能机床、工业机理模型等高端产品和核心技术方面存在短板和弱项,我国 95%的高档数控系统、80%的芯片以及几乎全部的高档液压件、密封件和发动机都依赖进口;工业企业内各种生产设备型号繁多,连接协议等技术标准尚不统一,我国工业制造企业离数字化、智能化尚有较大差距。此外,5G 在工厂内网络部署架构、网络配置模式、上行带宽不足等关键问题尚未解决。我国工业互联网在底层技术和工业软件等方面仍与发达国家存在一定差距。

1.5 缺乏精通工业互联网和 5G 融合的高端人才和领军人才

工业互联网是多个学科、多项技术的交叉领域,其应用延伸较为广泛,急需熟悉行业特点、熟练掌握信息通信技术且具备软件开发能力的复合型、专家型人才。目前,工业互联网专业化人才紧缺问题较为突出,加大人才培养刻不容缓。

2 总体建议

面对挑战,我们唯有勇敢面对,积极应对,才能更好地促进我国 5G+工业互联网持续健康地发展。工业互联网要发展好,真正成为推动工业企业数字化转型的新引擎,应牢固树立创新思维、客户思维、生态思维、跨界思维、平台思维和 5G+思维,制定有效策略,系统推进,更好地推动 5G+工业互联网高质量发展。

2.1 5G 运营企业要提升跨行业运营能力

5G 运营企业要通过招聘和培养懂工业制造、跨行业融合创新等方面的专业人才、成立工业互联网专业共公司或事业部,努力提升对工业制造企业的理解、认识 and 专业化运营能力,同时,

要联合合作伙伴加强与工业制造企业战略合作,发挥多方优势,助力工业企业数字化智能化转型。

2.2 加快推进 5G+工业互联网融合应用创新

加快 5G+工业互联网新型基础设施建设,优化产业园区、港口、厂矿的场景 5G 覆盖,大力推进 5G 专网规模化发展,加快推进 5G 等数字技术与工业制造工艺、制造技术、生产流程等深度融合,围绕研发设计、生产制造、运营管理、产品服务、市场营销等环节,不断丰富 5G+工业互联网新业态新模式,从满足客户生产经营外围场景化应用需求向嵌入工业制造生产核心流程融合方向拓展,推进 5G 融合应用创新,努力为工业企业提供基于数字化平台为核心的 5G 一体化的场景、全要素、全产业链、全生命周期的行业解决方案,不断满足工业制造企业 5G 融合应用需求。

2.3 推动 5G+工业互联网商业模式创新,推进 5G 行业规模化发展

5G 运营企业要突破连接收费的传统模式,积极探索基于为工业企业提供丰富的产品和解决方案为基础的多元化、多量纲的盈利模式,实现一企一策;通过与合作伙伴共建 5G 研发中心、5G 开放实验室、5G 联合创新中心和成立 5G+工业互联网合资公司以及产业联盟等方式开展合作,共同为工业企业提供整体化解决方案、打造 5G 数字化平台,共同实现技术攻关、联合研发;坚持开放合作,实现企业的网络、平台、应用等自身能力和资源向合作伙伴开放,实现能力和资源互换,助力合作伙伴竞争力的提升和商业走向成功;推进“融合发展+资本经营”的发展新模式,与行业领先企业积极开展成立合资公司为重点,积极开展收购、战略投资、成立合资公司等资本经营活动,打造工业互联网投资、并购、孵化平台,不断发展和壮大 5G 产业生态圈。积极探索和创新 5G 网络建设投资建设新模式,快速高效满足工业企业 5G 应用需求,实现多方共赢;积极推进 5G+工业互联网行业应用标杆案例创新升级,实现标杆案例的网络升级、应用升级、平台升级、生态升级和模式升级,加快标杆案例的规模化复制和推广,促进 5G+工业互联网规模化发展。

2.4 实现关键技术的攻关和突破,提升 5G+工业互联网产业链供应链可控水平

面对半导体芯片、部分关键元器件、高端工业机床设备、工业软件受制于人的现状,要真梳理我国在国际大循环中遇到的难点、痛点和堵点,加快形成以产业链“链主”企业为主导的创新联合体,加强产学研用多方协同攻关,发挥集中力量办大事的制度优势,打好关键核心技术攻坚战。要通过申请国家课题、成立重大攻关项目组等多种形式,加大芯片、机床、工业软件等核心技术的研发攻关,加大科技创新投入,解决一批“卡脖子”技术问题,增强产业技术支撑能力,打造自主可控、安全可靠的产业链供应链,构建拥有核心竞争力的技术体系和创新生态,整体提升产业链和供应链安全水平。加强 5G 与云计算、物联网、工业互联网、车联网等领域关键核心技术和产品研发,加速人工智能、区块链、数字孪生、虚拟现实等数字技术与传统行业深度融合发展,以技术创新推动产业升级。

2.5 加快培养和打造精通 5G 和工业互联网的融合跨界的高端人才队伍

对我国 5G 运营企业来说,做好高端人才队伍建设关系 5G+工业互联网长远发展。一方面以

推进 5G+工业互联网专业化经营为契机,加快企业内部 5G+工业互联网专业人才的培养,充分利用企业大学,加大 5G+工业互联网人才专业化培训,推进员工转型,努力打造一批 5G+工业互联网高端人才和领军人才队伍;另一方面加快引进 5G+工业互联网社会成熟人才、领军人才和创新人才,建立与有关高校院所对接的人才引进和培养机制,不仅要重视 5G 通信方面的人才引进,更需要招聘和引进熟悉工业互联网的行业人才和行业专家、技术专家、解决方案专家以及市场专家,以弥补 5G 运营企业拓展 5G+工业互联网市场的短板。

实践中,只要我们坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指引,全面贯彻党的十九大、十九届历次全会和中央经济工作会议精神,切实落实国家“十四五”规划、工信部《“十四五”信息通信行业发展规划》的工作要求,扎实推进《工业互联网创新发展行动计划(2021-2023 年)》,牢牢把握产业数字化发展趋势和规律,统筹好安全与发展,夯实工业互联网发展底座,推进商业模式创新、技术创新、应用创新、市场创新、组织创新和机制创新,我国 5G+工业互联网一定能获得更好更快更持续地发展,5G 一定能更好地赋能工业制造从中国制造走向中国智造发展。

3 结语

本文基于我国 5G+工业互联网发展现状,提出 5G+工业互联网发展面临的五大挑战,对更有效地制定 5G+工业互联网发展策略和建议、促进 5G+工业互联网健康发展具有重要指导意义。

关于如何更好地促进我国 5G+工业互联网快速发展,需要进一步深入产业链、深入客户进行调研和分析,切实把握产业链各方的诉求和工业制造企业的痛点需求,这样才能找到切实可行的发展路径和发展举措。

参考文献

- [1] 《中国“5G+工业互联网”发展报告》 中国信息通信研究院 2021 年 12 月
- [2] 《5G+工业互联网生态合作白皮书》 中国电信 5G 产业创新联盟 2020 年 11 月
- [3] 鲁春丛 《推动工业互联网创新发展的四点经验》 人民邮电报 2022 年 1 月 6 日
- [4] 黄鑫 董庆森 《“5G+工业互联网”赋能千行百业》 经济日报 2021 年 11 月 23 日
- [5] 胡世良 《5G+: 开启商业模式新生代》 人民邮电出版社 2021 年 8 月

作者简介

胡世良: 中国电信研究院高级专家,工业和信息化部信息产业网特约专家,中国互联网协会应用创新工作委员会专家委员。长期从事商业模式、战略规划、企业转型、5G 行业研究等工作,出版《5G+: 开启商业模式新生代》《生态战略: 企业成功转型的力量》等多部著作。

浅谈工业互联网标识解析体系的发展趋势

陈香明, 赵芳梅, 沈越

(中国移动通信集团辽宁有限公司, 沈阳市 110179)

摘要: 工业互联网是近年来在全球范围内兴起的, 以互联网和新一代信息技术与工业系统全方位深度融合为特征的, 新型、重大的工程科技和产业应用, 是支撑全球新一轮产业变革的关键基础。工业互联网标识解析体系作为工业互联网的新兴基础设施, 为工业互联网提供基础数据信息和数据互通能力, 是打通企业数据交互通道, 消除“数据孤岛”的一种低成本手段。对优化企业生产工艺流程、提升企业管理水平, 降低企业管理成本, 促进企业数字化转型具有重要意义。

关键词: 工业互联网; 标识解析体系; 业务系统架构;

中图分类号: F424.3

文献标识码: A

Talking about the trend of Identity Resolution System of Industrial Internet

CHEN Xiang-ming, ZHAO Fang-mei, SHEN Yue

(China Mobile Group Liaoning Co., Ltd, Shenyang 110179)

ABSTRACT: In recent years, industrial Internet has developed rapidly all over the world. It is an engineering technology that combines the Internet and the new generation of information technology with industrial systems, and it is an essential foundation for supporting a new round of global industrial reform. In particular, the Identity Resolution System is an infrastructure of the industrial Internet, which provides basic data information for industrial Internet. In addition, the identity resolution system is a low-cost means to help business eliminate "data islands" too. The identification analysis system is of great significance to optimize the production process, improve business management level and promote business digital transformation.

KEY WORDS: Industrial Internet; Identity Resolution System; business system architecture;

近年来, 随着工业互联网的快速发展, 工业企业越来越重视企业数字化转型。工业互联网标识解析体系是支撑工业互联网网络互联互通和数据互操作的神经中枢, 可以帮助工业企业将整个生产流程数据化、信息化。在此基础上也简化了跨地区、跨领域、跨系统间的数据交互流程, 提供了一种新的异构系统间数据交互方法和思路^[1]。

在工信部发布的《工业互联网创新发展行动计划(2021-2023年)》(以下简称“行动计划”)中,

明确将“标识解析建设行动”列为一项重点任务，要求开展标识解析体系建设，加速标识规模应用推广，强化标识生态支撑培育^[2]。2022 年是“行动计划”的中间年，在整个行动计划中起到承上启下的作用。要在 2021 年标识解析体系建设成果的基础上，持续发挥标识解析体系的能力优势，扩大标识解析体系的影响力。分析未来工业互联网标识解析体系的发展趋势，对促进工业互联网快速发展有重要作用。

1 标识解析体系问题分析

1.1 标识解析体系规模化拓展能力不足

由于工业互联网标识解析体系仍处于发展初期，标识应用大多是行业龙头以项目形式落地，注册企业数与实际应用企业数不成正比，无法快速形成规模化拓展。中小微企业还无法切实享受到标识解析体系带来的优势，急需打造多款普适性高、易实施、低成本的标准 SaaS 应用，助力标识解析体系规模化发展。

1.2 标识解析体系优势体现不足

标识解析体系由国际根节点、国家顶级节点、二级节点、企业节点和递归节点组成。现阶段，项目形式多为企业介入标识解析体系后，通过搭建业务系统的方式，最终用户通过业务系统直接去企业节点进行数据查询，标识解析体系对跨系统、跨平台的数据交互能力体现不足，递归节点缓存解析能力应用不足。

1.3 标识解析体系应用服务能力不足

目前标识项目大多围绕全生命周期管理、质量追溯、防伪防窜等场景开展，但由于客户在数字化转型过程中的需求多样化，导致标识应用场景仍有很大的探索空间；由于目前企业生产工艺流程多样化，导致现有的赋码设备、采集设备等无法满足客户的全部需求，标识解析体系的服务能力亟待扩展。

2 标识解析体系发展趋势

2.1 标识应用行业标准制定

我国工业行业有 41 个行业大类，单制造业就有 31 个行业大类，几百个细分行业小类，这些行业因其工艺流程不同，对标识的需求各不相同^[3]。以铁岭橡胶产业集群标识应用为例，通过调研，在铁岭从事橡胶产业的企业的的需求均各不相同，一些企业偏重成品质量检测环节的信息追溯，有些企业则更偏重产品防伪防窜货的问题处理。同时，不同的企业产品仍沿用原有的企业编码，导致无法形成橡胶制品行业领域的全方面管理。虽然工业互联网标识解析体系在发展的过程中，已经在船舶、家电、汽车零部件、线缆、集装箱等 20 余个行业制定了标识行业标准，效果显著。但仍需加快制定其他行业的标识行业标准，规范标识解析体系，解决标识解析体系规模化发展中

遇到的阻碍，指导各行业企业依托标识解析体系进行工业互联网及数字化改造。目前，围绕标识编码规范、数据模型、行业应用、标识安全等多项标准正在同步开展研制。

2.2 标识服务中间件打造

当前标识解析项目架构如图 1 所示，主要由边缘层、IAAS 层、支撑层和应用层四部分组成。在实际项目拓展中，一般一个项目从开始部署到交付验收大概 1~2 个月的时间。而在整个项目建设周期中，支撑层和 IAAS 层的部署大概要占用 7 个工作日左右。由于这部分内容具有较强的普遍性，部署时有大量重复工作，影响规模化部署。以中国移动正在打造的新型工业网关为例，由服务器基础资源、网络连接资源、标识基础服务和大数据增值服务四部分组成，目前已具备对接 CAN、Modbus 等现场总线协议、通过 IP 配置与指定的二级节点对接、兼具服务器运维和承载业务平台等核心能力。未来将会以标识解析一体机的形式^[4-5]，为企业客户提供便捷的企业节点部署服务。通过标识解析一体机，简化标识解析体系 IAAS 层的部署实施，充分发挥标识解析体系各组成部分的优势。



图 1 标识解析项目架构图

2.3 标识服务应用创新

面对工业领域中的多样化需求，标识解析体系需持续创新标识服务应用和商务模式，从而解决当前标识解析体系应用服务能力不足的问题。目前在国内虽然已有福田、中船、宗申集团等优秀案例落地，在供应链管理方面，已初步解决了异构系统间的数据交互问题，但大部分都是在同一个二级节点下进行数据交互或通过直接访问企业节点，在企业节点中直接查询标识信息来实现具体业务逻辑。目前，全国接入标识解析体系的企业已超 30000 家，为使企业间系统交互更为便

捷,同时保障企业数据安全,未来要充分发挥递归节点的查询能力,企业间系统直接通过递归节点查询标识信息,实现基于标识解析体系的异构系统数据交互。除了传统的被动标识之外,还需加强对虚拟标识、主动标识^[6]、标识与区块链融合等创新领域的应用探索,基于虚拟标识的图档版本管理等,通过与5G、区块链、人工智能、大数据等新兴技术的融合,满足工业领域的多样化需求。目前主动标识载体通过芯片、通信模组、终端中嵌入标识,主动与标识解析节点建立链接,已在磨具、热力等多个领域进行试点应用。支付宝、商米等10余款主流“扫一扫”APP、标识读写设备已经实现与工业互联网标识解析的对接。

2.4 探索联合运营模式

目前,国内二级节点的建设主体多为行业龙头企业,在行业内具备很深的行业认知和影响力,但仍存在行业龙头企业在标识解析体系网络运营等方面还缺乏经验的现象。针对这一现象,以中国移动为首的部分企业正在探索联合运营标识解析节点的模式。作为传统电信运营商企业,它们在网络建设运营领域拥有丰富的经验积累,在全国承建多个标识解析二级节点和递归节点,依托网络、大数据中心等网络基础设施运营经验,充分发挥网络体系运营能力,与行业龙头开展标识解析联合运营模式,强强联合推动标识解析体系规模化发展。

3 标识解析体系带动数字化转型

通过制定标识应用行业标准、打造标识服务中间件,创新标识服务应用,探索联合运营模式等实施路径,解决当前标识解析体系中面临的规模化拓展能力不足、优势体现不足、应用服务能力不足等问题。标识解析体系是支撑工业互联网应用的基础设施,发展标识解析体系的最终目的是推动工业互联网的发展。目前,全国已开通广州等五个标识解析顶级节点,各省积极推进二级节点建设。围绕工业标识,已聚拢了赋码、识读、软硬件开发、系统集成、二级节点建设技术服务商、安全厂商等一批企业及科研机构,标识解析运行监测平台、标识应用平台、标识解析实验室等公共服务平台不断涌现,形成具有影响力的数字产业集群。

未来在发展标识解析体系的同时,更要重视标识解析体系与企业生产系统的融合发展。标识解析体系作为企业数字化转型解决方案中的一部分,一是通过标识解析体系与区块链融合应用,获取可信的企业生产数据,为企业解决工业生产过程中基础数据的获取问题,将数据与企业其他生产系统,如ERP、MES、WMS等打通,提高数据利用率,打破企业内的数据孤岛,实现各系统紧密融合应用。二是运用递归节点的查询能力,打通产业链间的数据流通,下游企业根据客户订单通过标识解析体系发起原材料需求,上游企业通过递归节点对订单标识编码的查询结果进行订单信息获取,根据订单向下游企业供货,打破不同企业间的数据孤岛,实现不同企业多系统间供应链的高效互通。

4 结语

本文从实际经验出发,提出标识解析体系目前面临的三方面问题,并详细分析了问题的产生原因,对目前标识解析体系发展过程中解决问题的方式方法进行剖析。工业互联网标识解析体系通过制定标识应用行业标准、打造标识服务中间件、创新标识服务应用和探索联合运营模式为工业互联网提供基础数据信息和数据互通能力,对优化企业生产工艺流程、提升企业管理水平、降低企业管理成本,促进企业数字化转型和打造产业数字化具有重要意义。

参考文献

- [1] 左京柱. 工业互联网标识解析二级节点发展现状及前景[J]. 家庭科技, 2020.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业互联网创新发展行动计划(2021-2023年)[Z].2020.
- [3] 王晨, 宋亮, 李少昆. 工业互联网平台:发展趋势与挑战[J]. 中国工程科学, 2018, 20(2):5.
- [4] 张钰雯, 池程, 朱斯语. 工业互联网标识解析体系发展趋势[J]. 电信网技术, 2019, 000(008):43-46.
- [5] 王昭洋,池程,许继平,龚向南,姜露.工业软件一体化与标识解析路径研究[J].中国工程科学,2022,24(02):96-105.
- [6] 郑乔露, 刘东坡, 杨昆,等. 工业互联网主动标识载体应用研究[J]. 通信世界, 2022(5):3.

作者简介

陈香明: 中国移动通信集团辽宁有限公司解决方案经理, 员工, 主要从事工业互联网产品建设、标识解析体系和区块链建设及拓展运营工作。

赵芳梅: 中国移动通信集团辽宁有限公司中级工程师, 员工, 主要从事标识解析体系拓展运营工作

沈越: 中国移动通信集团辽宁有限公司解决方案经理, 员工, 主要从事工业互联网产品建设及区块链拓展运营工作。

新型标识解析技术研究

基金项目：2020 年工业互联网创新发展工程项目（工业互联网标识资源搜索系统）

倪东¹，霍如^{2*}，张钰雯³，黄韬⁴

- (1. 网络通信与安全紫金山实验室，江苏 南京 211111; 2. 北京工业大学信息学部，北京 100124;
3. 中国信息通信研究院，北京 100191; 4. 北京邮电大学网络与交换国家重点实验室，北京 100876)

摘要：标识解析体系通过为物理实体及虚拟实体赋予标识，将对象通过网络连接起来，进而实现万物互联。这些体系发展的同时也逐渐暴露了体系架构缺陷、数据安全等各类问题。利用区块链为传统标识解析体系赋能，实现去中心化标识体系，可以消除网络的中心节点，解决传统标识解析体系的痛点问题。本文首先对标识解析体系存在的挑战进行介绍，然后阐述去中心化标识体系的使能技术、研究现状及产业化应用，最后对未来标识体系的发展进行展望。

关键词：标识解析；区块链；去中心化；数字身份；产业化

中图分类号：TP393

文献标识码：A

Research on New Identity Resolution Technology

NI DONG¹, HUO RU^{2*}, ZHANG YUWEN³, HUANG TAO⁴

(1. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China;

2. Information Department, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

3. China Academy of Information and Communications Technology (CAICT), Beijing 100191, China

4. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

ABSTRACT: The identity resolution system assigns identities to physical objects and virtual objects, and connects objects through the network. Realizing the interconnection of all things. The development of these systems gradually exposes various problems, such as system architecture defects and data security. In order to solve these problems, the traditional identity resolution system could be improved to a decentralized identity system with blockchain technology, which could eliminate the central node of the network. This paper firstly introduces the challenges of the existing identity

resolution system. Furthermore, we elaborate the enabling technologies, research status and industrial application of the decentralized identity system. Finally, the future development of the identity system is concluded and prospected.

KEY WORDS: Identity resolution; blockchain; decentralized; digital identity; industrialization.

1 引言

万物通过网络虚拟地连接起来,可以实现全要素、各环节的互联互通。庞大、复杂的物理实体和虚拟实体需要通过“标识”实现对话,标识解析体系为此提供了契机^[1]。其通过给每一个对象赋予标识,并借助标识解析技术,实现跨地域、跨行业、跨企业的信息查询和共享^[2]。目前,国内外已经发展出多种标识解析体系。一类是基于域名系统(Domain Name System, DNS)的改良路径,该路径在DNS体系架构的基础上进行扩充,提供标识解析服务,如美国麻省理工学院提出的产品电子代码(Electronic Product Code, EPC)技术、国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)和国际电信联盟(International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector, ITU-T)联合制订的对象标识符(Object Identifier, OID)技术,我国自主研发的物联网统一标识(Entity Code for IoT, Ecode)技术等。另一类是独立于DNS体系的革新路径,如DONA基金会维护的Handle标识解析技术、东京大学提出的泛在识别(Ubiquitous ID, UID)技术等^[3-4]。

标识解析体系发展的同时也暴露了一些问题,包括1)体系架构缺陷:传统标识解析体系大多采用树状分层架构,导致当体系架构中某一层节点出现问题时,会对整个架构的安全性产生威胁。2)身份管理风险:标识解析体系中各种角色均存在身份管理风险。常见的风险中人员风险主要为身份欺骗、越权访问等;机器和物的风险主要为身份欺骗和设备漏洞等。3)数据安全性问题:标识解析体系包含标识注册、标识解析、标识服务日志等重要数据。在数据的全生命周期流转过程中,存在诸如数据窃取、数据篡改、隐私数据泄露等问题。4)治理偏差:目前,大部分标识解析体系都是中心化的管理模式,系统内存在节点不对等、治理偏差等问题,影响系统间数据互通的效果。

区块链技术具有去中心化、不可篡改、可追溯等特征^[5],利用区块链为传统标识解析体系赋能,可以消除网络的中心节点,打破传统标识解析技术的分层或平行化存储架构,解决传统标识解析体系架构风险;由多方共同参与标识数据治理,实现去中心化标识管理;同时用户对数据的一切操作过程均被记录,确保了标识数据的安全性。从2011年开始,业界陆续对基于区块链技术的去中心化标识体系展开研究,包括去中心化DNS体系和去中心化数字身份等,致力于通过区块链技术打造新型标识方案。现阶段,由于体系结构设计还不完善、区块链技术自身存在性能瓶颈等原因导致这些体系仍处于探索阶段,还没有得到社会普遍认可,且未支持大规模商用。本文从去中心化标识体系使能关键技术出发,首先介绍去中心化标识体系的研究现状及产业化应用,并对各体系进行对比,最后对未来标识体系的长足发展需要改进的部分给予展望。

2 去中心化标识体系使能技术

为了实现去中心化标识体系，需要多项关键技术支持。本文设计去中心化标识体系使能模型如图 2-1 所示，其中区块链层为标识服务层提供底层架构支撑，标识服务层为去中心化标识应用赋能。本节主要介绍区块链层及标识服务层的关键技术。

(1) 区块链层关键技术

区块链技术采用“区块+链式”数据结构实现数据的存储与验证，利用密码学技术实现数据的安全传输与访问，采用共识算法生成与更新数据，利用逻辑代码生成智能合约进而操作数据，其是一种全新的分布式基础架构与计算范式^[6]。其关键技术主要包含共识算法、哈希签名、智能合约、分布式账本等。**共识算法**：共识算法通过选择若干利益不相干的节点进行投票，只要这些节点对交易的确认结果达成一致，则认为全网对此达成共识^[7]，即不同节点之间依赖相同的制度维护区块链节点的数据一致性。**哈希函数**：通过哈希函数可以把任意长度的输入变换成固定长度的输出，并且难以找到不同的输入映射到同一个输出。区块链通过此技术生成默克尔树，保证数据防篡改与安全性验证。**智能合约**：智能合约^[8]是一套通过代码及自动化脚本实现的业务规则，合约参与方可以在上面执行这些规则，用计算机语言取代了语言记录条款并由程序自动执行。**分布式账本**：交易记账由分布在不同地方的多个节点共同完成，每一个节点都记录完整的交易副本，共同参与监督交易的合法性。

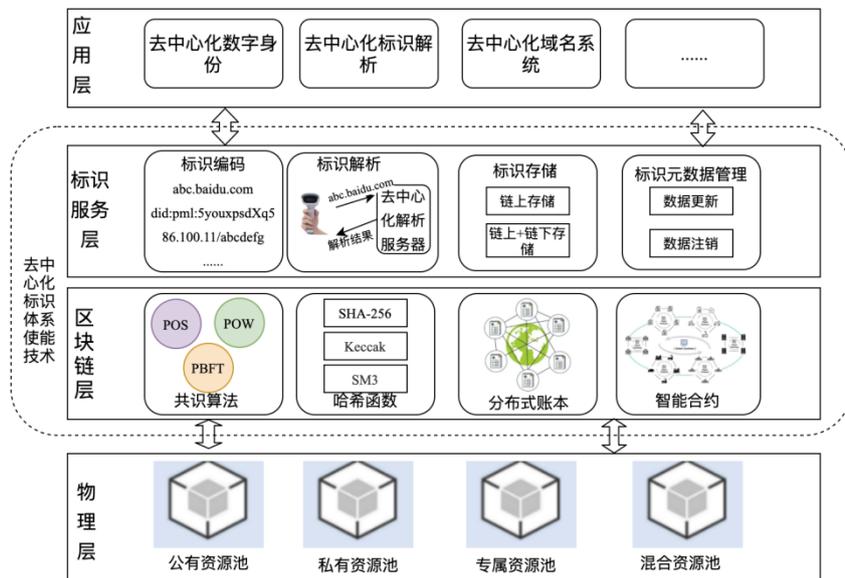


图 2-1 去中心化标识体系使能模型

(2) 标识服务层使能技术

标识服务层通过标识码为实体对象或虚拟对象赋予唯一的身份，进而记录和追溯对象的全生

命周期信息，实现实体的唯一性定位和信息查询。其关键技术主要包含标识编码、标识存储、标识解析、标识元数据管理等。**标识编码**：标识编码指通过设计编码规则为实体对象或虚拟对象提供唯一性的命名方式。目前去中心化标识体系主要采用层次化编码的方式，通过多级语义序列标识不同的实体信息。**标识存储**：标识存储负责将注册到去中心化标识体系的标识元数据信息落盘到区块链节点或外部存储媒介中去。为增加系统可扩展性，部分去中心化标识体系采用链上和链下两种方式并存的存储结构。**标识解析**：标识解析指根据标识编码定位标识元数据信息，并将定位结果返回的过程。去中心化标识体系主要采用扁平解析方式，每个区块链节点被命中的可能性相同，避免解析服务被非法控制，实现分权、对等解析。**标识元数据管理**：标准化元数据结构，实现数据更新与注销等操作^[9]。

3 去中心化标识体系发展现状及产业化应用

3.1 去中心化标识体系管理与解析过程概述

为了说明去中心化标识体系中标识与区块链技术的融合，本文抽象出去中心化标识管理与解析过程，具体如图 3-1 所示。该过程包括标识解析部分、标识管理部分和区块链部分。**标识解析部分**主要针对用户端，为用户提供去中心化标识解析能力。标签识读器读取标签后将识读到的去中心化标识交给解析客户端。如果为域名解析，则解析过程从解析客户端开始。解析客户端将解析请求传递给标识解析服务器，标识解析服务器将该请求封装为可与区块链接口交互的形式后，通过区块链的 RPC 命令或智能合约等获取区块链中的标识解析结果，最终返回给用户。**标识管理部分**主要针对标识申请者或标识所有者，标识申请者通过标识管理客户端向标识管理服务器发起标识注册请求，标识管理服务器封装该请求并发送至区块链进行审核和验证，验证通过的标识及标识元数据信息上传到区块链，生效后对外提供服务。标识所有者可以通过该部分操作区块链上已获得的标识，进行标识的更新、撤销等管理操作。**区块链部分**为去中心化标识体系提供可信及去中心化的基础设施，通过智能合约及 RPC 命令等方式执行标识管理及解析交易。

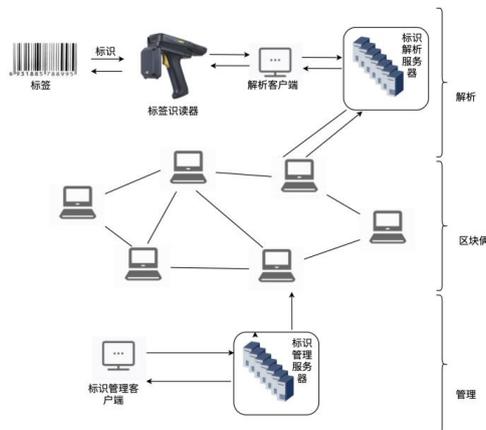


图 3-1 去中心化标识管理与解析过程

3.2 去中心化标识体系发展现状

从 2011 年开始，去中心化 DNS 技术开始发展，如今基于比特币的 NameCoin、BNS 系统，基于以太坊的 ENS 系统等发展迅速^[10]，各体系的域名管理架构如图 3-2 所示。

首先，NameCoin^[11]在比特币基础上拓展新功能，在不违背比特币挖矿、共识等机制的前提下，构建具有唯一性的去中心化域名解析系统。该系统通过一些额外的远程过程调用（Remote Procedure Call, RPC）命令来发送交易请求，链上通过[Key:Value]键值对的方式存储资源记录信息，其中 Key 为域名名称，Value 为对应的资源记录信息。NameCoin 顶级域名固定为“.bit”，主要由 name_new、name_firstupdate、name_update 三个 RPC 命令实现域名的全生命周期管理。① name_new：实现域名的预定，该操作在真正的域名注册操作之前完成，可以防止多个域名注册者同时注册相同的域名，通过 name_new 命令预定的域名在区块链中保留 12 个区块的时间。② name_firstupdate：经过预定后的域名通过 name_firstupdate 实现真正的域名注册。③ name_update：域名成功注册或成功更新后，经过 36000 个区块会失效，为了防止域名失效，name_update 可以用来更新、转让域名或者重置失效时间。

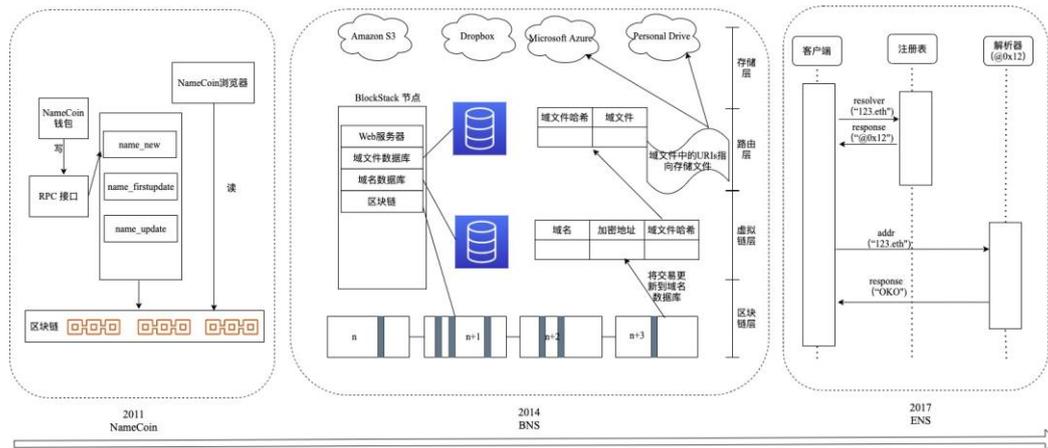


图 3-2 去中心化 DNS 各体系域名管理框架

随着研究的深入及技术的落地，NameCoin 逐渐暴露出安全性、吞吐量等痛点问题^[12]，2014 年穆尼布·阿里和瑞安·谢等人创建 BlockStack 项目，基于此开发了基于区块链技术的 BNS^[13]域名系统。其解决了 NameCoin 存在的问题，并将业务和域名存储分离开来，将系统分成控制层和数据层。其中控制层又分为区块链层与虚拟链层，区块链层采用比特币作为底层区块链基础设施，负责存储 BlockStack 的操作序列，并就这些操作序列达成共识。虚拟链层为 BNS 的核心，定义了 BlockStack 上的操作序列，当区块链层中有一个新区块产生时，BlockStack 会读取该区块，并检查系统的 BlockStack 是否达成共识，达成则将该区块提交到虚拟链层。路由层：该层主要存储区文件信息，可以快速定位到域名所在位置，提升域名解析效率。存储层：以 key-value 的形式存储真实的域名数据，这些数据都会被用户所拥有的公钥进行加密。

2017 年初 ENS^[14]由以太坊基金会创办，于 2018 年作为一个独立的组织分离出来。该系统的所有操作采用智能合约实现，由注册表和解析器两个组件构成。注册表采用智能合约来规范域名与子域名之间的关联关系，并存储域名的所有者、域名解析器、资源记录存活时间等域名关键信息，可以实现域名到相应解析器的映射。解析器的实现也采用智能合约，提供域名到 IP 地址的映射能力，解析器智能合约需要满足一定规范，对存在特殊解析需求的用户需开发定制化合约。ENS 解析主要分为两个步骤，首先用户发起域名解析请求到注册表，注册表智能合约定位到相应的解析器，然后解析器智能合约到链上获得解析结果返回给用户。

2019 年 11 月 7 日，W3C 分散式标识符工作组发布分散式标识符：核心数据模型和语法（Decentralized Identifiers, DIDs）规范的首个公开工作草案。DID^[15]是用于去中心化数字身份的一种新型标识符。与传统的基于公钥基础设施（Public Key Infrastructure, PKI）的中心化数字身份相比，区块链的赋能保证了数据的可信性、实现了用户身份隐私保护，具有身份自主可控、可信的数据交换等优势。首先，一个实体的 DID 标识由多个机构赋予，用户根据确定的算法生成，完全自主可控。其次，生成 DID 标识的同时也会生成一对密钥，并把公钥发布到区块链上，私钥由用户保管。最后，应用方验证用户身份信息时，只需要拿到区块链上的公钥信息，即可实现用户验证。多方可以接入到 DID 标识之间组成的可信数据交换网络中去，建立不同身份标识之间的安全通信。

在以上介绍的可信数据交换网络中有用户、发证方、应用方三种角色，其交互关系如图 3-3 所示。用户为 DID 的使用者，通过不同的 DID 客户端自主创建和管理。发证方是向用户创建并签发可验证声明的机构或个人。应用方是能够让用户使用 DID 的应用服务提供方，会验证用户的 DID 以及可验证声明，从而间接地验证用户的真实性。

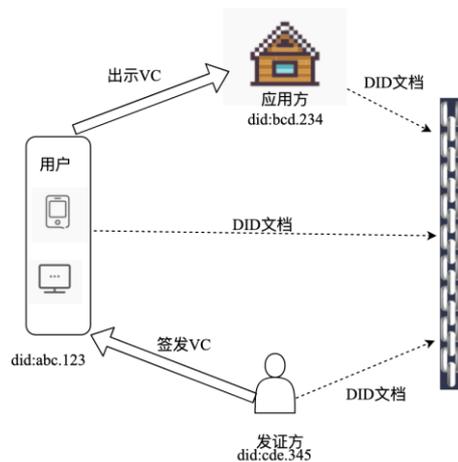


图 3-3 DID 角色交互关系

去中心化 DNS 及去中心化数字身份统称为去中心化标识体系。这些体系的设计目标、底层

架构、智能合约等方面存在差异，本节对此进行对比分析，结果如表 1 所示。

表 1 不同去中心化标识体系对比

条目	NameCoin	BNS	ENS	DID
目标	基于区块链实现安全域名解析系统	基于区块链实现安全域名解析系统	实现包括 Web3 在内的资源解析	基于区块链等技术实现自主可控的去中心化数字身份
底层架构	比特币	比特币	以太坊	区块链或分布式哈希表等
标识注册	顶级域固定为.bit	支持任何级域名注册	支持顶级域名及子域名注册	第一级标识固定为“did”
共识算法	POW	POW+POX	POS	视底层架构而定
标识管理方式	RPC 命令	智能合约	注册表，解析器智能合约	视底层架构而定

3.3 去中心化标识体系产业化应用

去中心化标识体系的应用探索过程，主要围绕去中心化数字身份、去中心化域名解析、去中心化标识解析等领域展开。本节列举了一些国内外大型科技公司及科研机构已经开发或正在推进的去中心化标识体系应用，它们从不同的技术路径出发，以业务驱动和生态推进为目的，提出了不同的解决方案，具体如图 3-4 所示。

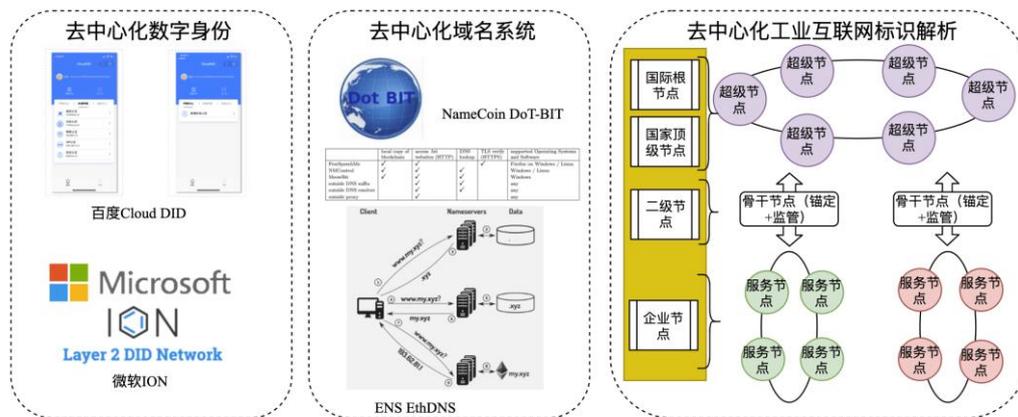


图 3-4 去中心化标识体系典型产业化应用

(1) 去中心化数字身份

微软、百度等跨国科技公司均基于 DID 技术开发了各自的去中心化数字身份解决方案^[16]，其主要应用在用户身份认证与授权两方面。为用户提供统一的个人身份标识，结合电子签名和区块链技术，链接个人各维度数据，在保护用户数据的前提下，实现多个信息系统的数据互通，保证数字身份的自主可控，解决企业和用户隐私泄露难题。目前主流的去中心化数字身份主要面对 toB 的应用场景，例如在联盟链上有多个参与方，比如银行和运营商，对于一个终端消费者而言，如果他既是银行的客户，同时又是运营商的会员，且两家机构注册在同一联盟链上，他们可以相

互认证，而不再需要繁琐的材料来证明用户的真实信息。

（2）去中心化域名解析系统

去中心化 DNS 体系目前最大的应用场景是使用去中心化域名访问网站，其构成的去中心化域名解析系统，具有安全、快速、保护隐私、免费与开源等特点。如 Namecoin 系统使用 .bit 顶级域进行网页访问，其是一个虚拟顶级域名，未经互联网名称与数字地址分配机构认可，因此常规 DNS 服务器无法解析 .bit 域，而是返回 NXDOMAIN 错误。ENS 的典型应用是 EthDNS⁹，是一种从 DNS 访问以太坊域名服务的方法。EthDNS 由两部分内容构成：ENS 解析器和域名服务器。前者允许在区块链上存储和访问域名信息，后者则允许采用与传统 DNS 等效的方式进行域名解析。

（3）去中心化工业互联网标识解析体系

中国信通院已成为 W3C 批准的国际 VAA 发码机构^[18]，使用 DID 方法“did:vaa:”进行全球标识分配。目前，中国信通院已开展 DID 及 VAA 标识注册、标识解析以及标识数据共享等系列服务，助力企业解决数字化转型过程中的数据孤岛难题，促进异构、异主、异地数据的共享使用。VAA 采用的底层区块链基础设施为星·火链网络。星·火链网络采用“1+N”的主子链群架构，其中主链主要负责链群管理、监管规则、公共数据和价值锚定等功能。子链主要针对不同的业务场景进行独立设计，实现数据的安全隔离及网络的高性能运行。星·火链网还支持与现有标识解析系统协同发展，其中标识解析系统中的国际根节点与国家顶级节点与星·火链网中的主链对接，保证更好的服务能力、扩大服务范围、实现国际互联网治理。二级节点和企业节点与子链对接，真正实现产业的带动作用，实现模式创新。

4 标识解析体系未来发展展望

可以看出在对标识解析体系的优化及创新中，去中心化成为未来重要趋势。为了保证基于区块链的去中心化标识体系的大规模发展与商用，应综合考虑多种因素，实现系统的安全、稳定、持久运行。本文对去中心化标识体系的如下方面进行展望。

（1）设计完备的域名组织与管理结构

现阶段大多数去中心化标识体系顶级域名固定，不支持最高级别域名注册。为此未来应解除顶级域名固定的限制，支持用户申请顶级域名，实现多顶级域名共存。设计域名抢注规则，设置域名抢注优先级，当用户持有域名超过一定阈值后，抢注优先级降低，防止域名被少用用户持有。其次，参考现有 DNS 体系设计域名定价方案与域名注册方式，包括先到先得，拍卖，押金租金等。最后，对持有权利到期的域名设计注册规则，如设置一定的时间阈值，在该时间内原持有方的抢注优先级最高。

（2）提升解析性能

区块链受严格的共识及签名认证机制的限制，吞吐量较低且可扩展性差。未来可考虑从存储方

式及区块链技术优化两方面解决问题。第一,可以采用链上链下存储相结合的存储方式,通过链下解析,链上验证实现标识快速解析。第二,可以从网络层、共识层、应用层等主要限制区块链性能的层次入手,通进行区块链层次化体系研究,提升区块链本身性能进而间接地提升标识解析速度。

(3) 增强系统易用性、稳定性及安全性

现有去中心化标识体系大多与传统标识解析体系不兼容,为此应设计与现有标识体系兼容的新型标识方案,做到解析过程的无干预切换,增强系统的易用性;其次,为了防止标识数据劫持等问题的发生,可以参考 DNS 安全扩展(DNS Security Extension, DNSSEC)的认证思想,即在客户端对标识元数据信息进行分级验证。可以在区块链中对存储的标识元数据信息通过私钥加密生成数字签名,同时发布相应公钥,供客户端进行检索。当客户端收到解析结果时,通过链上的公钥对解析结果验证,确保消息的来源,避免恶意诈骗或攻击。

(4) 积极实现推广与生态系统构建

现阶段去中心化标识体系仍处于建设初期,影响力较为薄弱。可以通过吸引更多企业来深入打造更多的商业化应用场景。去中心化标识体系应用项目的标准化制定和推进则可以更好地推进跨领域、跨行业的互联互通,解决信息孤岛问题。最后,去中心化标识体系的应用需要从政策层面进行调研和制定策略。以政府政务为切入点进行推动,更容易形成社会共识,打造去中心化标识体系的生态全面发展。

5 结语

去中心化标识体系借助区块链技术,凭借其分布式、去中心化、透明存储、防篡改等特征,实现标识的完全自主可控。从 2011 年开始,业界开始对去中心化标识体系进行研究与开发,致力于通过区块链技术打造新型标识方案。这些方案的应用在去中心化数字身份、去中心化标识解析等领域表现出色。区块链技术的赋能为开发去中心化标识体系提供了安全的标识管理环境,是未来标识解析体系的重要发展方向。

参考文献

[1]张钰雯,池程,朱斯语.工业互联网标识解析体系发展趋势[J].信息通信技术与政策,2019(08):43-46.

[2]张楠.工业互联网标识解析体系建设稳步推进[N].中国工业报,2022-03-22(003).

[3]任语铮,谢人超,曾诗钦,赵浩然,喻嘉义,霍如,黄韬,刘韵洁.工业互联网标识解析体系综述[J].通信学报,2019,40(11):138-155.

[4]曾楚轩,焦玥,徐海.工业互联网与传统互联网解析体系对比分析[J].长江信息通信,2021,34(11):225-227.

- [5]Gai R, Du X, Ma S, Chen N, Gao S. A summary of the research on the foundation and application of blockchain technology[J]. Journal of Physics Conference Series, 2020, 1693:012025.
- [6]Underwood S. Blockchain beyond Bitcoin[J]. Communications of the ACM, 2016, 59(11):15-17.
- [7]冯了了,丁滢,刘坤林,马科林,常俊胜.区块链 BFT 共识算法研究进展[J].计算机科学,2022,49(04):329-339.
- [8]Clack C D, Bakshi V A, Braine L. Smart Contract Templates: foundations, design landscape and research directions[J]. 2016.
- [9]王昭洋,池程,许继平,龚向南,姜露.工业软件一体化与标识解析路径研究[J].中国工程科学,2022,24(02):96-105.
- [10]张曼,李洪涛,董科军,延志伟.基于区块链的网络空间标识服务[J].数据与计算发展前沿,2020,2(05):52-64.
- [11]Andreas Loibl. Namecoin. Network Architectures and Services[C]. 2014.
- [12] Haferkorn M, Diaz J Q. Seasonality and Interconnectivity within Cryptocurrencies-An Analysis on the Basis of Bitcoin, Litecoin and Namecoin[J]. Social Science Electronic Publishing, 2015.
- [13]Muneeb Ali, Jude Nelson, Ryan Shea, Michael J.Freedman. Blockstack: A Global Naming and Storage System Secured by Blockchains.2016.
- [14]Ethereum Name Service Document[EB/OL]. 2020.[2020-05-01]. <https://docs.ens.domains/>.
- [15]DID Specification Registries[EB/OL]. 2022.[2022-04-15]. <https://w3c.github.io/did-spec-registries/>
- [16]DID 开发者中心[EB/OL].2022.[2022-04-22].<http://did.baidu.com/did-concepts/>
- [17]EthDNS[EB/OL].2018.[2022-04-22].<https://www.wealdtech.com/articles/ethdns-an-ethereum-backend-for-the-domain-name-system/>.
- [18]中国信通院获 VAA 注册管理机构许可证 [EB/OL].2021.[2022-04-22].http://www.cinn.cn/gyrj/202111/t20211123_250085_wap.html

作者简介

倪东:网络通信与安全紫金山实验室工业互联网科研工程师,主要从事工业互联网标识解析、去区块链等方面的研究工作。

霍如:北京工业大学讲师,主要研究方向为未来网络、工业互联网、边缘计算、网络资源管理、区块链等。

张钰雯:中国信息通信研究院工业互联网与物联网研究所工程师,主要从事区块链、新型工业互联网标识解析技术研究。

黄韬:北京邮电大学教授,主要研究方向为未来网络体系架构、软件定义网络、网络虚拟化等。

工业互联网标识解析体系在智慧高速公路 光纤网建设运营中的应用

江亮¹, 王惠¹, 高凯¹, 李士策¹

(1.中交信通网络科技有限公司, 北京 100007)

摘要: 基于中交信通网络科技有限公司建设运营的全国高速公路光纤网、工业互联网标识解析综合型二级节点(中交信通)及相关业务, 提出了利用工业互联网标识解析技术解决智慧高速公路光纤网建设运营中存在问题的技术路线及应用方案。此外, 本文还简要分析了智慧高速建设、智能化光纤网络管理的技术发展方向。

关键词: 工业互联网; 标识解析; 智慧高速; 光纤网络

The Application of Industrial Internet Identity Resolution System in the Construction and Operation of Optical Fiber Network of Intelligent Expressway

JIANG Liang, WANG Hui, GAO Kai, LI Shice

(1.China Transport Information & Communication Network Technology.Co.Ltd., Beijing
100007)

ABSTRACT: Based on the National Expressway Optical Fiber Network constructed and operated by China Transport Information & Communication Network Technology.Co.Ltd., Industrial Internet Identity Resolution Comprehensive Type Secondary Node (CTICN) and the related business., this paper puts forward a technical route and application solutions to solve the problems existing in the construction and operation of Intelligent Expressway Optical Fiber Network by using industrial internet identity resolution technology. In addition, this paper also briefly analyzes the technical development direction of intelligent expressway construction and intelligent optical fiber network management.

KEY WORDS: industrial internet; identity resolution; intelligent expressway; optical fiber network

1 引言

工业互联网是新一代信息通信技术与制造业深度融合的关键基础设施、新型应用模式和全新产业生态, 通过人、机、物的全面互联, 构建起全要素、全产业链、全价值链的连接、数据驱动的工业生产制造和服务体系, 成为第四次工业革命的重要基石。工业互联网标识解析体系的建设

是我国工业互联网发展战略的重要任务之一，《国务院关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》、《工业互联网发展行动计划》等政策文件均对工业互联网标识解析体系的建设进行了部署^[1]。工业互联网标识解析体系经过几年的建设，二级节点及企业级节点已广泛覆盖各行各业，应用落地初见规模。

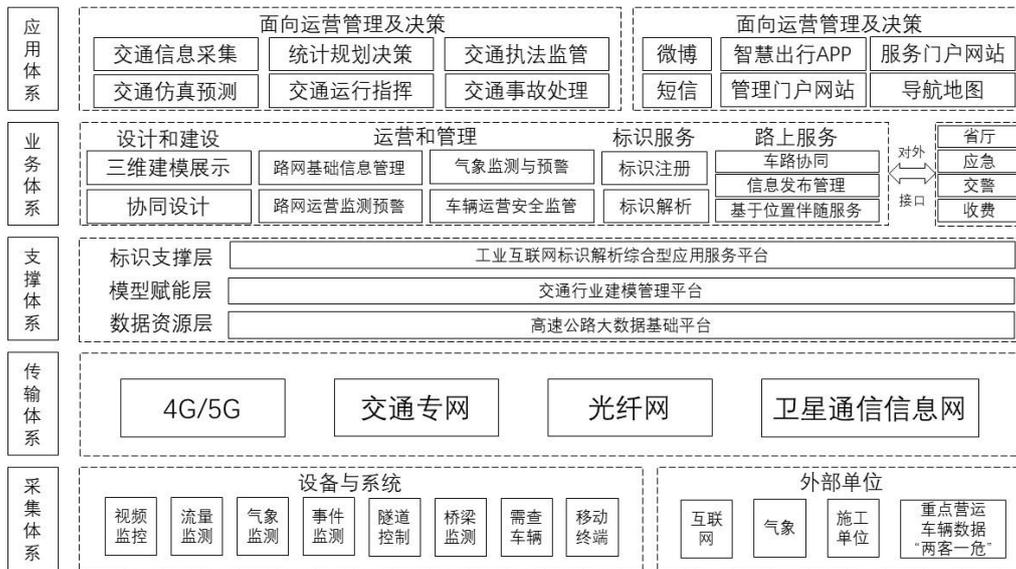
工业互联网标识解析体系能够为离散型产业、过程型产业赋码，为产业链上的工业元素赋予唯一的工业标识，借用被动标识载体（二维码、条码、RFID等）和主动标识载体（工业芯片、SIM卡、设备MCU、通讯模组等），为行业企业特别是供应链企业提供标识应用服务，广泛开展产品全生命周期、供应链优化等行业应用。针对不同行业需求，以工业标识为载体，实现企业内、企业间，产业内、产业间的全面连接。目前，工业互联网标识解析体系已广泛应用在制造业、快消品行业、矿产行业、能源行业等领域^[2]。在交通行业，特别是智慧交通、智慧高速领域，工业标识的应用尚处在初级阶段。本文以智慧高速公路光纤网为核心应用场景，采用标识解析技术，提出提升该领域建设和运营能力的技术解决方案。

2 工业互联网标识解析在智慧高速公路光纤网建设运营中的应用

2.1 智慧高速和全国高速公路光纤网

智慧高速没有一个统一的概念或定义，可以认为它是智能运输系统（Intelligent Transportation System, ITS）衍生出的一个概念。国内外对智慧高速的定义和理解不尽相同，但通常认为智慧高速是对现有高速公路系统进行信息化升级改造后形成的结合高新技术，提升高速公路整体运输能力，提升交通系统安全性，增加交通系统经济效益的新型高速公路。相关从业人员也达成了以下共识：智慧高速以大数据为核心，提升多源感知、融合分析、决策支持能力，实现人、车、路、环境的深度融合，实现建设、管理、养护、运营、服务全过程数字化和智能化的高速公路^[3]。

智慧高速的建设需要组织跨部门、跨行业、跨地区的各方力量共同参与才能实现。当下我国工业互联网体系的建设成为智慧高速建成的关键基础之一，是实现智慧高速集成的重要途径，也促进了互联网和新一代信息技术与工业系统全方位深度融合所形成的产业和应用生态发展。工业互联网在智慧高速中应用的本质是以网络互联为基础，通过高速公路数据的全面深度感知、实时传输交换、快速计算处理和高级建模分析，实现智慧高速的智能控制、运营优化和生产组织方式变革。以现有智慧高速建设为基础架构，结合工业互联网标识解析体系，形成新的智慧高速平台，其整体架构如下图所示：



智慧高速场景引入标识解析能力可实现统一的高速公路全生命周期管理；实现统一的供应链管理；为大数据分析应用提供支撑系统。本文以智慧高速建设的重要组成部分，全国高速公路光纤网为例，进一步分析工业互联网标识解析体系在智慧高速建设运营中的应用。

全国高速公路光纤网作为交通运输行业专用通信网，其依托高速公路国道主干线路，采用先进 OTN 和 SDH 相结合技术，实现面向全国的网络覆盖，能够作为综合交通信息服务体系、综合运输体系、现代物流发展体系建设的基础网络支撑，是交通运输信息化建设重要战略资源储备。智慧高速的建设需要更安全、更稳定、覆盖面更大的网络支撑，从而提升信息通讯的效率，实现数字化高速公路建设运营，提升车路协同能力。因此，全国高速公路光纤网是我国建设智慧高速系统的重要组成部分，也是交通行业关键性基础设施的重要组成部分。

2.2 标识解析技术在高速公路光纤网建设运营中的应用

光纤网络为智慧交通、智慧高速和工业互联网建设提供网络基础。经过多年发展，全国高速公路光纤网光缆资源已经颇具规模。企业投资建设城域光纤基础网络，光纤网络按照共享光纤、独享光纤和预留光纤来敷设，存在利用率低、质量恶化、衰耗增大等问题^[4]。随着光纤网络的敷设范围越来越大，人为原因、自然外力、自身老化都可能导致通信网中断。常见的线路故障原因包括^[5]：

- (1) 外力因素：包括工程施工挖断、架空光缆被车辆挂断等；
- (2) 自然灾害：山体滑坡、泥石流、地震等；
- (3) 光缆自身缺陷：主要是由于使用年限增长造成的光纤老化等问题；

(4) 人为因素：人为故意破坏或盗窃等原因。

由于缺乏有效的光纤监测手段，一旦出现故障，难以找到故障点，故障处理时间长，故障定位难。高速公路光纤网的运营维护首先要保障业务不中断；其次，能够做出预警；第三，做到快速抢修，尽快恢复正常。全国高速公路光纤网作为交通行业的核心光纤网络，是行业公共信息化的重要支撑与保障，在现阶段建设过程与运营过程中也存在上述不足和问题。

引入国家工业互联网标识解析体系，为全国高速公路光纤网中的光纤光缆、机电设备赋予唯一工业标识码。通过标识解析二级节点进行标识注册，产业链中的工业元素从入网起就具备唯一的身份标识，从光纤网建设伊始就让光纤网具备被全覆盖管理能力，从而提升运营商的网络管理能力。由于所有的光纤光缆、机电设备都在标识解析系统中进行注册并拥有唯一标识，其属性数据得以完整保存，一旦出现事故故障，即可通过标识解析、标识查询，获得故障点相关信息，及时解决网络故障，并提升相关企业对光纤网络的整体化规划能力。标识的承载方式，既可以选择传统的被动标识贴码方式，也可以采用主动标识载体技术。标识属性信息需求方可直接通过行业二级节点进行信息查询，也可以通过部署在省网的企业节点进行查询。企业级节点的大范围部署将能够有效提升查询效率。通过以上方法，将为所有光纤网运营单位及相关利益方进行平台赋能，提供链路选择咨询、动态环境监控、中断线路定位等服务，详见图 2。

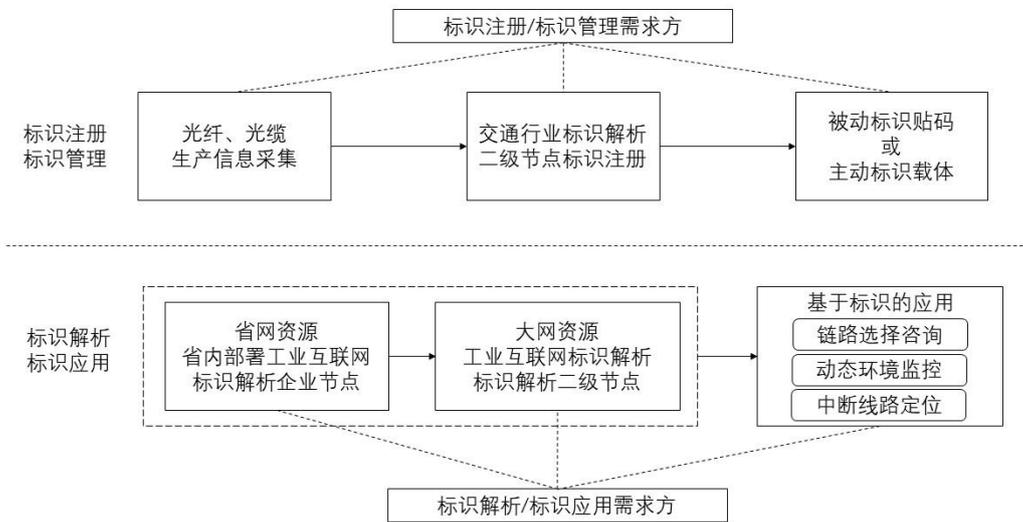


图 2 标识解析技术在全国高速公路光纤网建设运营中的应用

为解决管理困难、故障定位困难以及溯源困难，建立智慧高速可信产品质量追溯系统。以敷设光缆为例，基于工业互联网标识解析体系，利用物联网、分布式存储等新兴技术，通过对过程中的各级产品赋予唯一可信、防篡改的工业标识，实现产品全生命周期追溯和实时监测的过程精

细化管理，具体过程如图 3 所示。生产过程中的各级厂商均为产品注册唯一标识，赋予相关标识属性；供应链中产品的各级工业标识相互关联，可实现产品的溯源与跟踪。光纤网运营单位利用产品的工业标识实现日常运营，并减小故障定位难度。

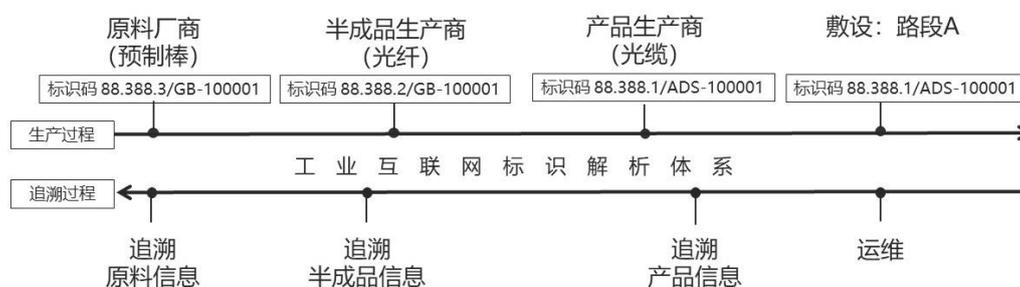


图 3 智慧高速可信产品质量追溯系统应用示例

为实现上述基于标识解析体系的光纤网管理，中交信通网络科技有限公司建设中交信通工业互联网标识解析综合应用服务平台暨综合型二级节点（中交信通），该平台采用三层架构，分别为网络层即全国高速公路光纤网、中交行业云平台层以及标识解析服务系统层。该平台负责向上对接国家顶级节点，向下接入企业节点，详见图 4。

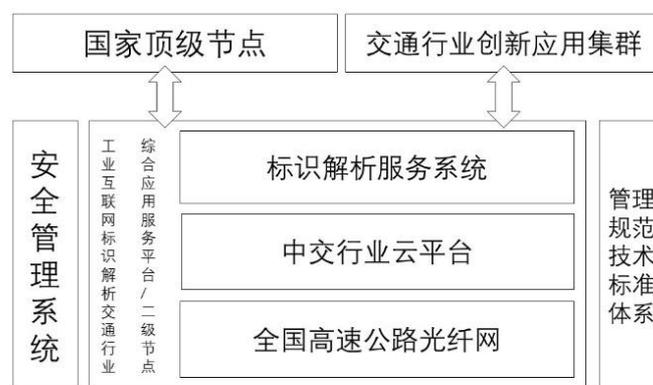


图 4 中交信通工业互联网标识解析综合应用服务平台架构

(1) 网络层即全国高速公路光纤网，以高速公路光纤网为主其他接入方式为辅为企业接入二级节点提供网络服务。

(2) 中交行业云平台层，负责提供云数据中心和边缘计算节点，为企业节点接入到二级节点提供接入能力。云计算平台层提供计算能力和通用应用服务，主要包括服务器、网络、存储等基础计算服务，并实现基础通用的 IAAS、PAAS 和 SAAS 服务。

(3) 标识解析服务系统层，包括标识注册、解析、分配和查询等标识相关的基础服务^[6]。

行业创新应用集群平台负责为客户提供通用及定制化应用服务,包括基于工业互联网标识解析技术的关键资产追溯系统、养护系统、交通设计协同等集成创新应用。通过上述开放式平台结构,可实现持续积累,为工业互联网提供通用化基础服务和定制化应用服务。

3 结语

本文通过分析工业互联网标识解析体系在智慧高速、光纤网络建设运营中的应用方式,提出了一种基于工业互联网标识解析技术的高速公路光纤网管理技术方法,并介绍了相关应用案例。借助工业互联网标识解析技术,可以实现高速公路光纤网从施工到维护过程的端到端电子化、自动化、智能化,最终实现网络资源管理高效、业务管理智能、运行维护简单便捷;同时,为各类网络运营商提供了一种基于工业互联网标识的智慧高速、光纤网管理新型技术解决方案。

参考文献

- [1] 工业互联网标识解析二级节点建设导则(2021)[R]. 北京:中国信息通信研究院,2021.
- [2] 工业互联网产业联盟.工业互联网标识应用白皮书(2021)[R]. 北京:中国信息通信研究院,2021.
- [3] 罗华松,刘志宏.智慧高速公路的内涵及建设内容分析[J].智能建筑与工程机械,2022,4(2):3.
- [4] 曹江海.智能化的光纤网络综合管理系统[J].科学与财富,2014(2):2.
- [5] 孙志国.通信光缆线路日常维护,故障原因,故障判断和抢修分析[J].数字化用户,2019,025(020):17.
- [6] 周志勇,张仲敏,任涛林,等.家电行业工业互联网标识解析应用研究——标识解析二级节点的体系建设研究[J].中国仪器仪表,2020(8):7.

作者简介

江亮: 中交信通网络科技有限公司总经理,博士研究生,主要从事交通运输工程、光纤网通信、工业互联网等方面的研究工作。

王惠: 中交信通网络科技有限公司总经理助理,博士研究生,长期从事交通运输工程、信息化等方面的研究工作。

高凯: 中交信通网络科技有限公司解决方案工程师,硕士研究生,长期从事通信工程、网络安全等方面的研究工作。

李士策: 中交信通网络科技有限公司解决方案工程师,硕士研究生,长期从事工业互联网、系统工程等方面的研究工作。

工业互联网平台的现状、趋势及发展策略研究

吴晓晨¹, 施红明¹, 郭佳¹

(1. 国网数字科技控股有限公司, 北京, 100053)

摘要: 本文从工业互联网平台的定义与内涵出发, 分析当前工业互联网平台的行业现状、竞争格局、未来趋势以及存在的问题, 并从平台定位、应用创新、商业模式等三大方面, 针对工业互联网平台的未来发展提出切实可行的策略建议。

关键词: 工业互联网平台; 竞争格局; 业务模式; 发展策略

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

Research on the status, trends and development strategies of Industrial Internet Platform

WU Xiaochen¹, SHI Hongming¹, GUO Jia¹

(1. State Grid Digital Technology Holding Co., Ltd., Beijing 100053)

ABSTRACT: Starting from the definition and connotation of the Industrial Internet Platform, this paper first analyzes the current development status, competition pattern, future trends and existing problems of the Industrial Internet Platform, and finally puts forward relevant suggestions on the development strategy of the Industrial Internet Platform from three aspects: Platform positioning, application innovation and business model.

KEY WORDS: Industrial Internet Platform; competition pattern; business mode; development strategy

近年来, 我国工业互联网行业发展迅速, 各类平台不断涌现, 平台功能和场景应用水平得到明显提升, 并由制造业向建筑、能源、交通、智慧城市等领域不断延伸。本文从工业互联网平台的定义与内涵、现状与问题出发, 提出工业互联网平台发展的相关策略和建议, 为我国工业互联网平台创新发展提供思路借鉴。

1 工业互联网平台的定义和价值内涵

1.1 定义

工业互联网最初由通用电器 (GE) 公司于 2011 年提出, 并在 2013 年引入中国。时任通用

电器总裁 Jeffrey R. Immelt 将工业互联网定义为一个开放的、全球化的网络，将人、数据和机器连接起来，并认为它是全球工业系统与高级计算、分析传感技术及互联网的高度融合。中国信通院分别从狭义、广义两个维度，对工业互联网进行界定¹。其中，从狭义来看，工业互联网包含工业互联网平台、新型网络、边缘计算等融合创新带来的全新产业领域；而从广义来看，工业互联网核心产业基本等同于工业数字化的相关产业。

工业互联网平台是工业互联网重要的构成部分，其是新一代信息技术与制造业，深度融合的产物，是基于云计算的开放式、可扩展的工业操作系统²。目前，业界基本已形成“智能终端（边缘）+云架构平台+工业 APP”的工业互联网平台架构，平台向下实现海量的多源设备、异构系统的数据采集、交互和传输；PaaS 平台承载工业知识与微服务，支持软硬件资源和开发工具接入、控制及应用；向上支撑工业 APP 和云化工业软件的开发和部署，为企业客户提供各类应用服务。

1.2 价值内涵分析

我们从工业企业、产业链和社会经济三个角度，将工业互联网平台的价值内涵分为降本增效、融通创新和可持续发展三个层面。

降本增效。是工业互联网最基础的价值，主要通过云化工具、数字化服务等打通企业内部客户洞察、研发、生产、流通等环节，从而降低产品研发成本、运营成本，提升产品质量，扩大企业收入、利润等。

融通创新。是工业互联网赋能产业链供应链的延伸价值，主要通过供需对接、底层数字技术创新、数据增值服务等，打通产业链断点堵点，提升工业制造产业的整体竞争力。

可持续发展。是在当前“双碳”、ESG 等理念之下，工业互联网平台需要追求的更高价值，主要通过平台数据感知、数字化技术等，实现低碳生产、安全生产，并积极服务乡村振兴、地方产业集群有序发展，为我国经济社会高质量发展提供支持。

2 工业互联网平台发展现状分析

2.1 发展阶段分析

整体来看，我国工业互联网平台行业处于初步发展期，正在驶入快速成长期。当前，工业互联网多层次系统化平台体系初步形成，创新解决方案和应用模式持续涌现，工业互联网平台行业生态在逐步构建之中，预计还需要很长时间才能真正达到成熟发展阶段。

多层次系统化平台体系初步形成。我国工业互联网平台发展迅速，目前已完成 100 余个平台建设，连接工业设备总数达到 7300 万台套，³其中具有一定区域、行业影响力的平台数量也超过

¹ 资料来源：中国信通院《工业互联网产业经济发展报告》，2020 年 3 月。

² 资料来源：国家工业信息安全发展研究中心《工业互联网创新发展白皮书 2018》，2018 年 12 月。

³ 资料来源：2021 年世界人工智能大会。

了 50 多家。既有航天云网、海尔、宝信、石化盈科等传统工业技术解决方案企业面向转型发展需求构建的平台；也有树根互联、徐工、TCL、中联重科、富士康等大型制造企业孵化的独立运营公司；还有优也、昆仑数据、黑湖科技等各类创新企业依托自身特色打造的平台。

创新解决方案和应用模式持续涌现。如在研发设计方面，涌现出数码大方设计与生产集成打通、索为研发设计与产品运维一体化以及安世亚太基于工业知识生态的先进设计等平台服务。在生产制造方面，形成了富士康 ICT 治具智能维护、航天云网精密电器智能化生产等一批平台解决方案。在企业管理方面，用友、金蝶等平台提供云 ERP、云 MES、云 CRM 等服务。在应用模式创新方面，树根互联、天正等企业探索出“平台+保险”、“平台+金融”、“平台+订单”等新模式新业态。

工业互联网平台行业生态尚在逐步构建之中。工业互联网平台的复杂程度高，部署和运营难度大，其建设和运营需要持续的技术、资金、人员投入，当前行业生态正在逐步构建中，平台市场还没有出现绝对的领导者，大多数企业仍然处于寻找市场机会的阶段；优势互补、协同合作的平台产业生态也还需持续构建。行业仍然处于发展初期，还存在众多不确定性因素，预计还需要很长时间才能达到成熟发展阶段。

2.2 发展驱动因素

从需求层面看，产业升级需求拉动工业互联网平台和应用落地落实。我国制造业发展迅速、体量巨大，但存在以劳动密集型的低端制造为主、人力成本上升压缩利润空间等问题，综合实力与发达国家仍有较大差距，由低端向高端升级的发展趋势日益明显。在产业升级的需求下，工业互联网平台有望广泛应用于工业制造领域，从而促进生产效率提升、化解产能过剩，缓解资源、能源和环境的严峻形势，助力中国工业制造向高端转型升级，在智能制造时代打造全球竞争实力。

从供给层面看，支持政策频出推动工业互联网全方位多领域融合发展。工业制造领域的转型升级是我国政府大力投入和引导的方向。我国政府早在“十七大”就将两化融合政策上升为“促进信息化与工业化融合，走新型工业化道路”；2020 年 12 月，工信部发布《工业互联网创新发展行动计划（2021-2023 年）》，2018 年，工信部成立工业互联网专项小组，连续五年发布年度工作计划，在政府高度重视与积极引导下，我国工业互联网新型基础设施建设量质并进，新模式、新业态不断涌现并加速推广。

2.3 平台竞争格局

工业互联网平台行业中，制造企业、ICT 企业、自动化企业、互联网企业等各类型企业纷纷进场布局，但由于行业处在初级阶段、空间巨大，形成了行业者参与众多、但尚未构成直接竞争的市场局面。各类型企业大多利用自身传统业务优势在相应赛道中进行重点切入，以点连线带面，快速形成各具特色和专长的工业互联网解决方案，以图形成先发优势。

目前，对于平台的分类有通用平台、垂直平台之分，并形成跨领域跨行业的“双跨”平台；也

有根据参与者基因，分成传统工业领域内龙头企业孵化的专业工业互联网平台、从传统系统解决方案提供商向平台解决方案服务商转型的平台、互联网巨头建设的平台、软件企业建设的平台等类型。

我们按照技术、业务⁴两个纵横坐标，根据各个参与者提供的主要技术类型、核心业务范围，将国内工业互联网平台市场划分为六大细分市场。由于市场需求不足，场外物联模式和终端云化模式细分市场现存平台服务商较少，不具有参考价值，因此不纳入本研究范围。目前市场主流的工业互联网平台服务商有四大细分市场：生产物联模式、软件服务模式、流程应用模式、云端制造模式。如图 1 所示。

业务范围

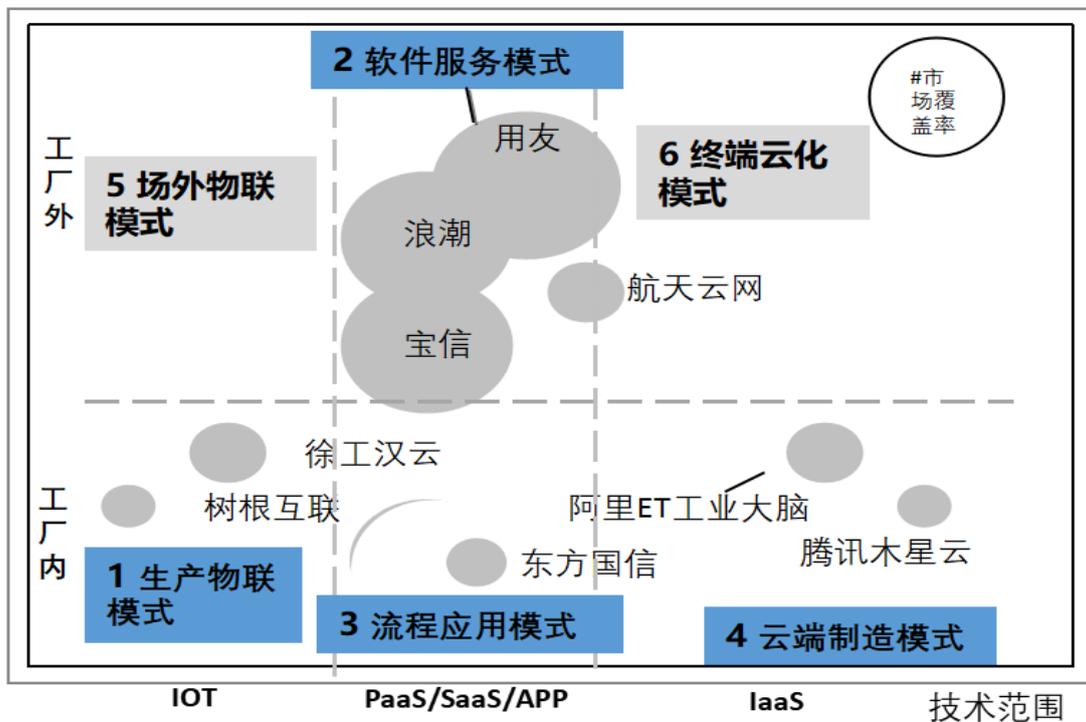


图 1 国内工业互联网平台市场竞争布局⁵

在**生产物联模式**细分市场，典型平台有树根互联“根云”、徐工汉云等。其特点是面向工厂内的制造流程，基于物联网，大规模连接多种类工业设备，通过多源工业大数据、AI 分析提供服务，采用“通用平台+产业生态”的模式获得平台佣金收入。

⁴ 技术坐标：当前各大工业互联网平台提供的技术可以分为 IoT、PaaS/SaaS/APP、IaaS。业务坐标：当前各大工业互联网平台一部分侧重于服务客户工厂内流程，主要以制造流程为主；一部分侧重于服务客户工厂外的流程，如营销、采购、物流等。

⁵ 数据来源：根据各企业的研报/年报/社会责任报告等公开数据整理绘制。

在**软件服务模式**细分市场,典型平台有用友精智、浪潮云洲等。其特点是面向工厂外的设计、营销、采购、财务、人力资源、协同工作等工业企业流程,在提供财务、ERP 等软件服务的基础上,拓展成工业 PaaS 平台,服务成本较低、交付灵活。

在**流程应用模式**细分市场,代表平台有东方国信 Cloudip 等。其特点是面向工厂内的制造流程,提供快速开发环境和工具技术平台,客户和第三方开发者能以更低成本、更高质量快速完成各行业、各领域工业应用 APP 和工业微服务的开发。

在**云端制造模式**细分市场,代表平台有阿里 ET 工业大脑、腾讯木星云等。其特点是将人工智能、大数据、云计算技术嫁接到生产线,对工业数据进行分析、挖掘、建模,并且快速构建智能分析应用,辅助客户进行全局决策。

2.4 行业发展趋势

从短期看,行业呈现“三个明显加速”趋势。一是基础设施布局明显加速。工业互联网作为智能制造时代的关键基础设施,成为各地投资布局热点,且 5G、标识解析等技术应用提速,5G 工业模组价格大幅下降,产业基础越来越成熟。二是场景应用落地明显加速,工业 APP 从协同研发、生产制造、远程运维等方面,多维助力企业复工复产、提质增效。三是产业协同发展明显加速,工业互联网平台及应用在解决供应链断点堵点、中小企业融资难等领域发挥中坚作用,按需生产、精准金融服务等需求显著增加。

从长期看,行业呈现“四个更趋”态势。一是场景融合更趋深化,新基建推动技术融合、场景拓展,工业互联网与 5G、人工智能、数据中心等技术加速融合,推动数据互联互通、细分行业场景深化。二是平台应用更趋移动化、轻量化,开源社区、工业 APP 应用商店等模式创新蓬勃发展,“PC+移动”的灵活部署成为未来发展趋势,移动端、轻量化、可复用的工业应用将更受青睐。三是工业大数据更趋开放共享,数据法规加快完善,海量数据价值将在安全可控前提下逐步释放;围绕数据确权、交易、安全的服务将成为工业互联网产业的一部分。四是工业制造及服务领域的新模式、新业态更趋丰富,数字孪生工厂、多种类机器人、共享制造平台以及新兴工业互联网产业链金融等新模式不断涌现。

3 行业发展存在的主要问题

工业互联网平台行业在稳步发展、加速落地的同时,也存在以下三大痛点:

设备联网、上云率不高,导致数据对接不畅。受制于传统工业技术的封闭性和价值壁垒,目前工业设备联网率、上云率仍然较低,2020 年国内工业设备数字化联网率仅为 23%,远低于同期消费互联网的联网率 70%,⁶且数据孤岛现象突出,企业内部业务集成管控水平不高,工厂内

⁶ 资料来源:2021 年中国工业互联网大会“先进工业网络分论坛”。

外数据、产业链内数据的互联互通严重不足，影响平台价值的进一步发挥。

数据分析水平不足，导致数据价值难以充分发挥。各平台基本处于割裂状态，相互之间数据对接不完全、数据异构、缺乏统一标准，导致数据质量不高；加上工业机理与数据技术融合不足，算法优化、可视化等分析应用不足，如能源电力领域的预防性维护、能耗优化、网络安全等应用仍然相对较少。

商业模式不够清晰，导致客户买单意愿不强。当前各大平台服务同质化严重，针对细分产业专业场景的高端数字化管理工具较少；同时由于成本高、效果争议大、持续服务能力不足，企业买单意愿依然较弱。如综合能源服务多以项目投资为核心，本应作为价值核心的能源优化、运营提升等专业服务供应不足，加上节能量测算难等问题，严重影响投资回收。

4 工业互联网平台发展策略分析

根据工业互联网发展现状、趋势和存在的问题，我们重点从平台定位、应用创新、商业模式等三个方面，为工业互联网平台的发展提出相关策略建议。

平台定位方面。一是加强垂直领域深耕。不同工业行业领域存在较大的行业经验、工业机理壁垒，“双跨”模式或面临成本、纵深推广等难题，当下瞄准优势领域进行行业深耕的价值更为突出。二是强化物联接入服务。针对当前行业设备联网不足的困境，联合通信运营商、独立硬件供应商等，协同打造接入便捷、成本低廉的“5G+物联网”数据采集网关、工业路由、控制终端和工业现场设备连接和数字采集解决方案，解决当前各类平台连接工业设备规模有限的问题。三是强化工业数字底座定位。搭建由技术平台、IOT平台、可视化平台、低代码平台、数据中台、AI中台、iPaaS平台、区块链平台组成的平台体系，提供物联服务、模型服务、集成服务、技术服务、工业APP等。

应用创新方面。一是强化面向核心场景的应用开发。立足于所在垂直行业的产业链，深入现场、深入一线去了解需求，基于业务场景和客户需求设计平台功能和服务；逐步丰富平台上产品和解决方案种类，满足不同类型客户的多元化、场景化的闭环数字服务需求。二是加强面向中小企业客户的服务创新。面对小微企业客户，强调“便捷高效”，通过云原生的方式，提供基于公有云的SaaS服务，降低企业转型成本。三是强化绿色低碳场景应用。瞄准行业绿色低碳转型需求，将其与数字化转型需求相融合，拓展能效提升、节能建议、收益测算、优化咨询、项目推荐等特色化服务和智慧节能技术。

商业模式方面。一是探索“1+N”平台布局模式。在“1”个核心基础性平台（如聚焦底层技术、核心能力）之上，围绕特定行业、区域搭建“N”个子平台的模式。二是打造平台和订阅相结合的盈利模式。其中平台型收入，即由大企业释放个性化开发需求，由生态伙伴承接开发需求，通过撮合大型企业与生态伙伴获得收入分成；而订阅型收入主要来自中小微企业客户，其以标准化产

品为基础,以量取胜。三是强化平台技术和应用接口服务。面向生态伙伴逐步开放平台技术接口,支持生态伙伴开发面向各行业客户的业务方案。

5 结语

本文从定义和价值内涵、规模与结构、竞争格局、未来趋势以及存在问题等方面,全方位对工业互联网平台进行剖析,并从平台定位、应用创新、商业模式三个方面提出工业互联网平台发展的策略建议,对各类工业互联网平台发展具备较强的指导意义。

未来,随着行业的进一步发展,如何做深垂直领域工业互联网、深化生态培育、推动平台数据要素价值释放等话题将越来越受到重视。这需要进一步深入研究和分析,为行业融合发展提供更多支持。

参考文献

- [1] 通用电气公司.工业互联网:打破智慧与机器的边界[M].北京:机械工业出版社,2015.
- [2] 中国信通院,《工业互联网产业经济发展报告》,2020年3月
- [3] 中国信通院,工业互联网产业联盟,《工业互联网平台白皮书 2021(平台价值篇)》,2021.
- [4] 国家工业信息安全发展研究中心,《工业互联网创新发展白皮书 2018》,2018年12月.
- [5] 徐恒.海尔 COSMOPlat: 壮大生态系统,赋能产业未来[N].中国电子报,2018-04-27(5).
- [6] 王建伟,赢在平台解锁工业互联网的动力密码[M].北京:人民邮电出版社,2018.
- [7] 邱君降,李君,成雨,柳杨,文莎.制造业与互联网融合背景下工业设备“上云”的现状、问题与路径研究[J].制造业自动化.2018(10)
- [8] 高新民.推进工业互联网的难点及发展思路建议[J].卫星与网络.2021(10)
- [9] 朱铎先,赵敏.基于四层进阶模型 打造有灵魂的中国工业互联网[J].卫星与网络.2021(10)
- [10] 魏兴.优秀工业互联网案例分析[J].卫星与网络.2021(10)
- [11] 李君,周勇,左越,邵明堃.新冠疫情背景下工业互联网平台的价值作用、面临挑战及应对策略研究[J].制造业自动化.2021(11)
- [12] 中国软件评测中心,工业互联网平台发展八大趋势,软件和集成电路.2022,(Z1)
- [13] 允升,2021 工业互联网创新 TOP50,互联网周刊.2022,(04).

作者简介

吴晓晨: 国网数字科技控股有限公司办公室智库研究员, 高级经济师, 主要从事能源数字经济、产业互联网等领域的行业研究工作。

施红明: 国网数字科技控股有限公司办公室综合处处长, 政工师、中级经济师, 主要从事能源数字经济研究及战略管理工作。

郭佳: 国网数字科技控股有限公司办公室智库研究员, 初级工程师, 主要从事能源电力领域研究工作。

联系人及联系方式

吴晓晨

通信地址: 北京市西城区广安门内 311 号祥龙商务大厦 1 号楼 8 层, 100053

联系电话: 010-52697944 15911060618

电子邮箱: wuxiaochen@sgec.sgcc.com.cn

模型驱动的可视化工业 APP 集成开发 平台研究

朱君¹, 侯庆坤¹, 赵甲¹

(1. 中汽数据(天津)有限公司软件业务部, 天津 300180)

摘要: 基于汽车行业在工业 APP 开发中的实际情况, 提出了基于汽车机理模型的工业 APP 集成开发技术及平台, 论述了该平台的设计思路和实现路径, 并重点论述了以汽车机理模型编译分析及求解引擎、工业软件集成与适配、可视化模型组件拼装发布为核心的平台关键技术, 同时列举在汽车行业的应用案例及实施效果。

关键词: 工业 APP; 工业 APP 集成开发; 机理模型; 模型组件

中图分类号: F403.6

文献标识码: A

Research on model driven visual industrial app integrated development platform

ZHU Jun, ZHAO Jia, HOU Qing Kun

(1. Software business department of China automotive data (Tianjin) Co., Ltd, Tianjin 300180)

ABSTRACT: Based on the actual situation of the automobile industry in the development of industrial app, this paper puts forward the integrated development technology and platform of industrial app based on automobile mechanism model, discusses the design idea and implementation path of the platform, and focuses on the key technologies of the platform with the compilation, analysis and solution engine of automobile mechanism model, industrial software integration and adaptation, assembly and release of visual model components as the core, At the same time, the application cases and implementation effects in the automotive industry are listed.

KEY WORDS: network service model; Industrial app; Industrial app integrated development; Mechanism model; Model component.

当前工业互联网平台以生产制造环节业务为主要服务对象, 通过平台实现人、机器、生产大数据的互联、分析和应用, 助力企业在生产和运营上降本、增效、提质。但是在研发设计仿真领域关注较少, 也缺乏相关平台系统。相关软件的研发往往需要研发工程师与软件工程师反复多次沟通, 不仅效率低也很难满足快速变化的业务需求。特别是当前工业企业面临数字化转型的背景下, 研发设计环节尤为重要。基于以上问题, 本文以汽车行业研发设计仿真领域为切入点, 面向

一线工程技术人员，提出了该领域工业 APP 集成开发平台的解决方案。技术人员通过基础模型库和简单拖拉拽组件的方式可以快速开发以及应用工业 APP 来解决业务诉求。经过验证，达到预期的效果。

1 平台设计及关键技术研究

1.1 平台总体框架

汽车行业工业 APP 集成开发平台(简称“平台”)基于云计算总体框架分为 IaaS 层、PaaS 层、SaaS 层三个层面。如图 1 所示。

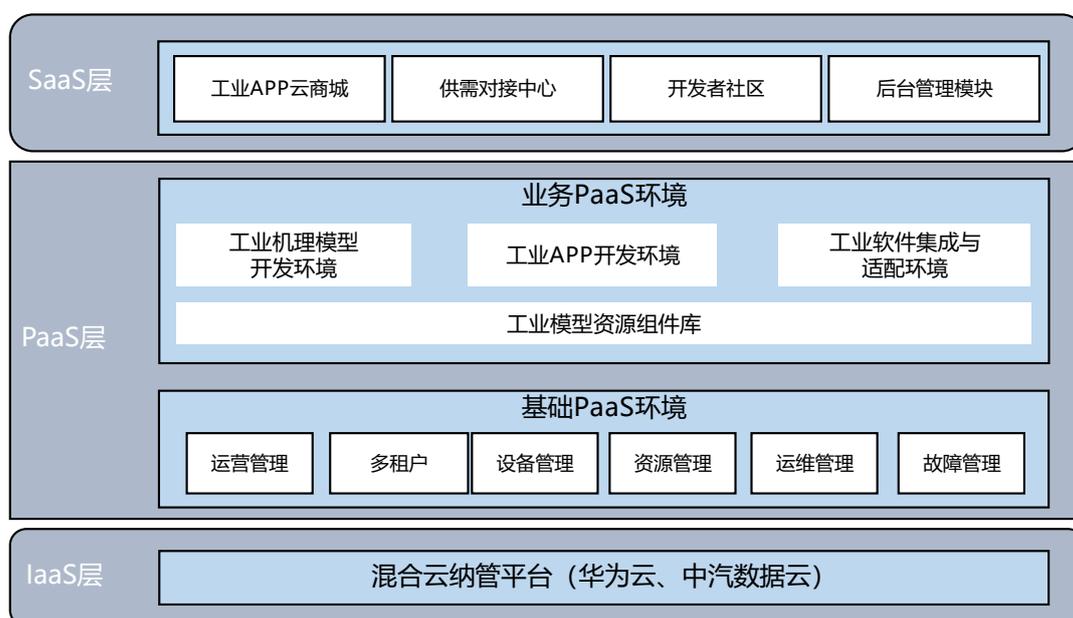


图 1 汽车行业工业 APP 集成开发平台内容框架

在 IaaS 层：利用混合云纳管系统搭建了华为云和中汽数据云互通的混合云基础环境。其中中汽数据云相当于具有访问权限控制的网关+企业私有云或者私有存储区，用于保存、调用用户的机理模型数据，确保用户未公开的知识产权在上云过程中的数据安全。而华为云则属于公有云，为所有上云用户提供平台级别的算力支持、功能服务以及知识输出渠道。

在 PaaS 层：为了实现业务与底层的分离，PaaS 层分为业务 PaaS 环境与基础 PaaS 环境。基础 PaaS 环境利用 K8S 和 docker 技术实现自动化运维、服务器动态发现、容器化等功能。业务 PaaS 环境搭建具体的业务实现逻辑，包括工业机理模型开发环境、工业软件集成与适配环境、工业 APP 开发环境以及工业机理模型资源组件库。实现从机理模型的开发和管理、工业软件的集成适配到基于模型组件的工业 APP 快速开发和测试的一体化流程。

在 SaaS 层，建设工业 APP 生态体系，包括工业 APP 云商城、供需对接中心、开发者社区，促进工业知识的输出并提供工业 APP 在线使用的云化应用服务。

1.2 平台关键技术研究

基于平台总体框架设计，平台关键技术内容包括机理模型编译分析及求解引擎研究、工业软件集成与适配环境研究、面向汽车行业的工业 APP 开发环境研究。

1.2.1 机理模型编译分析及求解引擎研究

为打破 AVL-Cruise、Matlab/Simulink 等国外设计工具在汽车工业设计研发过程机理模型建模的垄断，同时面向涉及“机、电、液、控、声、热、光、磁”等多领域、多学科复杂的汽车工程系统，实现汽车行业多工具异构机理模型的多层次、紧耦合集成，本平台采用基于统一建模语言规范（Modelica）的建模方法[2]构建统一的多领域机理模型编译、分析及求解引擎，采用统一的方式表达工业过程不同机理，支持多领域机理模型库统一开发及统一的建模仿真，实现机理模型开发工具；提供基于 IPO（Input Process Output，输入处理输出）方法的机理建模工具，并构建基于标准功能样机接口规范（Functional Mockup Interface, FMI）的模型集成环境，兼容工业过程已成熟应用的主流机理模型建模工具。

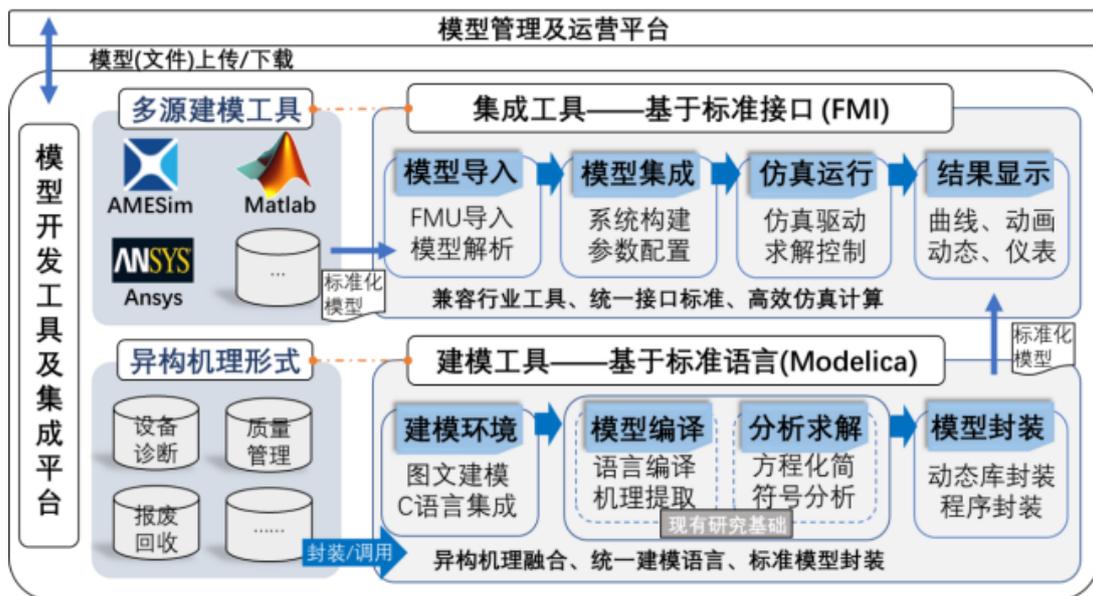


图2 机理模型开发环境技术路线

机理模型编译分析及求解引擎构建包括机理模型开发工具、机理模型集成环境两部分。

（1）机理模型开发工具

面向汽车工业领域整车、总成、分总成、生产设备、故障机理等研究对象进行工业模型建模。本平台采用基于统一语言规范的机理建模工具，支持采用方程、程序、数据等对研究对象进行建模。采用自主统一的机理模型编译、分析及求解引擎实现产品制造生命周期关键环节标准化的异构模型交换与数据互联互通机制，支持多领域机理模型库统一开发及统一的建模仿真。

（2）机理模型集成环境

机理模型集成工具调用机理模型协同开发与模型管理工具提供的服务，完成模型的上传与下载，实现机理模型库综合管理服务，提升仿真人员的工作效率。通过机理模型集成平台，实现多源工具异构模型的系统级集成仿真。

1.2.2 工业软件集成与适配环境研究

工业软件集成与适配环境研究主要分为工业软件集成和适配环境建设两个方面。

在工业软件集成方面，根据目前已有工业软件现状分析，工业软件集成平台所涉及到的软件工具的集成一般包括数据集成、功能集成和界面集成三个部分。数据集成为功能集成提供了数据基础，界面集成为用户的使用提供交互基础，而同时功能集成为界面集成提供了服务基础。例如汽车车门工程师可以依托本项目所构建的工业软件集成环境完成车门从CAD结构设计到CAE强度分析的全流程工作，支持用户自由配置CAD、CAE软件的工作与衔接流程，并实现不同工业软件数据实现共享和自动调用。

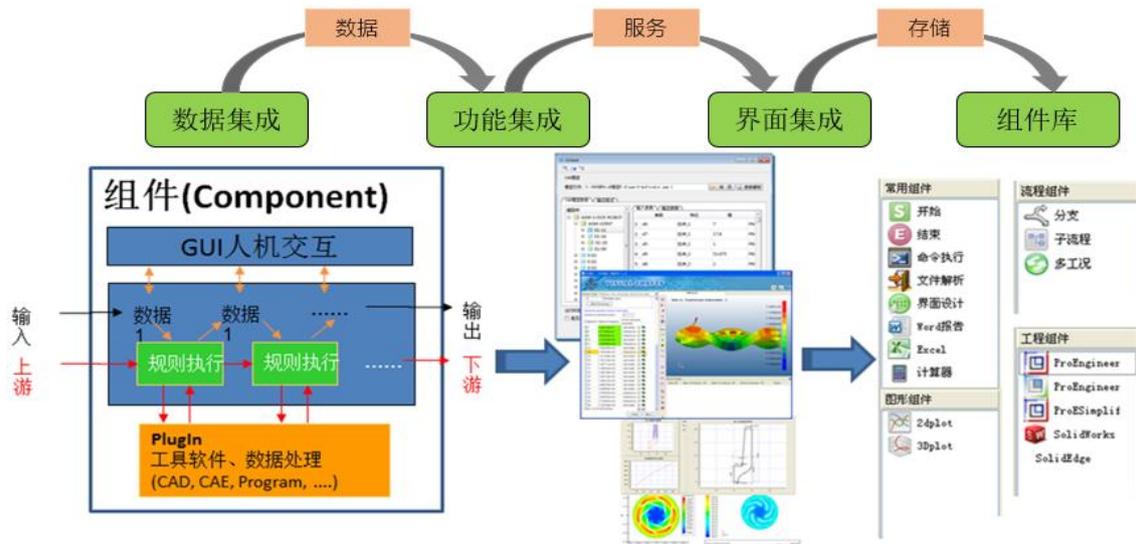


图 3 工业软件集成设计技术路线

在适配环境建设方面，主要技术路径是通过组件化思想，将工程方法及工具软件封装为可重用组件单元，基于这些可重用的组件，工程人员可根据实际业务需求，例如车门工程师常规情况首先需要应用 CAD 软件完成结构设计，其次将车门结构数据导入至 CAE 软件进行网格划分，并最终依托 CAE 软件完成强度分析，通过“搭积木”的方式将这些组件进行任意组合，建立具体业务流程以实现流程的模板化，模板内部既包含了各业务操作流程节点间的逻辑关系，又包含了节点间的数据传递关系。

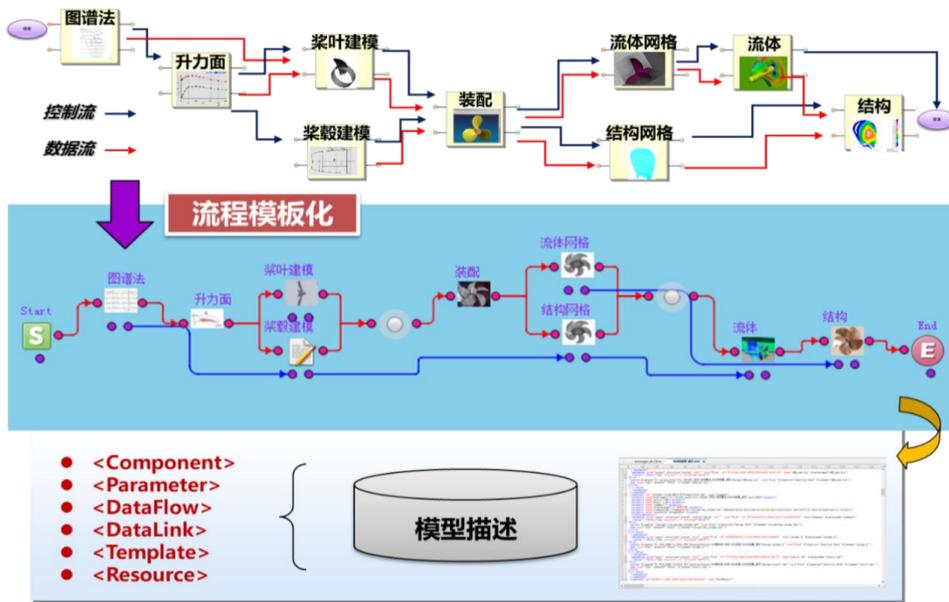


图 4 基于模板的流程设计技术

1.2.3 面向汽车行业的工业 APP 开发环境研究

为打破汽车行业工程技术人员和 IT 开发人员之间的专业屏障，加速技术经验沉淀，本平台建设可视化工业 APP 开发环境，向开发者提供按需配置的工作空间，支持开发者自定义环境，提供可视化的编程方式，拖拽完成基于机理模型微服务组件的工业 APP 流程构建。同时各种工业软件微服务组件的集成，能够补充对机理模型、流程模型等微服务组件[3]的种类和应用范围，实现基于组件的工业 APP 的代码编写、阅读、构建、运行、调试、预览等操作，并直接对接云端代码仓库[4]，使开发者不再受限于本地环境，在线完成工业 APP 的开发。

面向汽车行业的工业 APP 开发环境建设包括可视化的工业 APP 开发环境研发、工业 APP 关键技术与模型集成研发。功能架构如下图所示：



图 5 可视化工业 APP 开发环境功能架构

可视化的工业 APP 开发环境支持通过拖、拉、拽的方式集成工业组件库中的工业软件微服务组件、工业机理模型微服务组件等，通过组件定义和流程建模，完成对各种工业模型与工业化软件接口的封装与组装，使工业 APP 开发者可以在不了解底层实现的情况下，即可通过简单操作进行具体工业业务场景的搭建，实现低代码化开发。目前已完成机理模型、工程算式组件 3736 项、工具栏开发功能 9 项、流程画布功能设计 11 项、面板资源通用组件 20 项，实现工程算式、基于 FMU 的机理模型、非 FMU 机理模型的平台化集成。

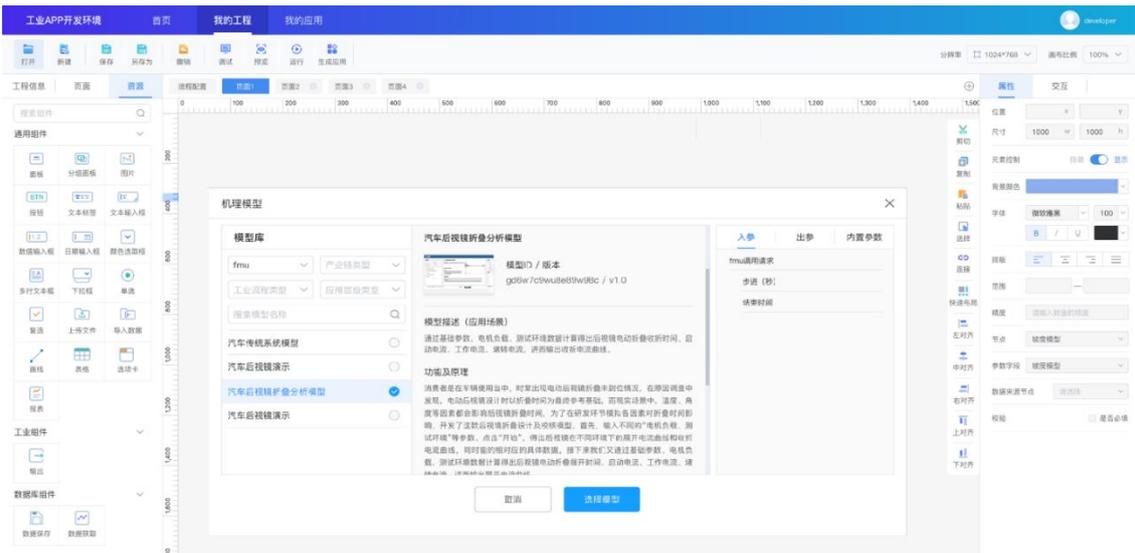


图 6 汽车行业工业 APP 开发环境界面

2 工业互联网 APP 平台的应用

(1) 后视镜电动折叠分析工具

消费者在车辆使用当中，时常出现电动后视镜折叠未到位情况，在原因调查中发现，电动后视镜设计时以折叠时间为最终参考基础，而现实场景中，温度、角度等因素都会影响后视镜折叠时间，极端情况下，实际折叠时间会超过标准折叠时间，因而导致无法折叠。因此为了在研发环节模拟各因素对折叠时间影响，一线技术人员利用本平台开发了后视镜折叠设计及校核 APP。

基于企业实际知识经验，利用工业机理模型开发环境，需要先对车辆后视镜的仿真模型进行开发。建模完成并测试基本符合实际场景的模型以标准 FMU 格式导入到工业 APP 开发环境，系统会自动进行模型识别及组件化封装。研发工程师可以在开发画布上采用拖拉拽的方式进行组件拼装，包括前端界面和后端业务逻辑。如图所示：



图7 工业 APP 开发环境设计画布

搭建完成的工程文件还需要进行一系列的软件级测试，最终由系统基于文件路径自动生成具有独立访问地址可共享的工业 APP 应用。界面如图 9 所示，研发工程师在预置的输入框中输入关键参数并点击执行按钮，云化的工业 APP 就可以调用云端算力加载参数运行机理模型并在 web 页面返回计算结果，如图 10 所示。

参数配置		电机负载		测试环境	
【步长】	0.2	【展开摩擦扭矩/N.m】	0.2	【电压/V】	15.8
【截止】	0.2	【收折摩擦扭矩/N.m】	6.8	【角度/°】	35.1
				【温度/°C】	25.1

开始

图8 后视镜电动折叠分析 APP 参数输入



图9 后视镜电动折叠分析 APP 输出计算结果

通过上述方式，研发设计工程师可以根据实际业务需要，快速搭建工业 APP。不仅可以将企业内部的知识经验固化沉淀，封装完成的工业 APP 工具也可以实现权限可控的共享共用，有利于企业内部知识的标准化输出及应用。

(2) 双电机转矩耦合电动汽车前向仿真工具

除依托工业机理模型开发环境新建模型之外，还可以从机理模型库中直接选取模型，加入到模型组件微服务中进行实例化。同时也提供工业 APP 应用在工业云商城等系统快速发布，实现知识的输出。

在工程师进行整车研发设计过程中，需要根据市场化要求设计包括百米加速度、最大行驶距离、电池容量、整车质量等车辆指标，通过不断调整车辆参数如双电机转矩策略、质量、轮胎半径、电机转矩功率以及电池串并联数量等参数，使得整车的百米加速度、最大行驶距离满足车辆既定的需求。因此平台选取模型库中整车动力性模型、双电机转矩耦合模型、电机效率模型、前向仿真模型以及 SOC 模型搭建了如图的双电机转矩耦合电机汽车前向仿真工具。工程师可以通过此工具封装的既有知识经验沉淀形成的机理模型快速校核车辆性能参数。界面如图所示：

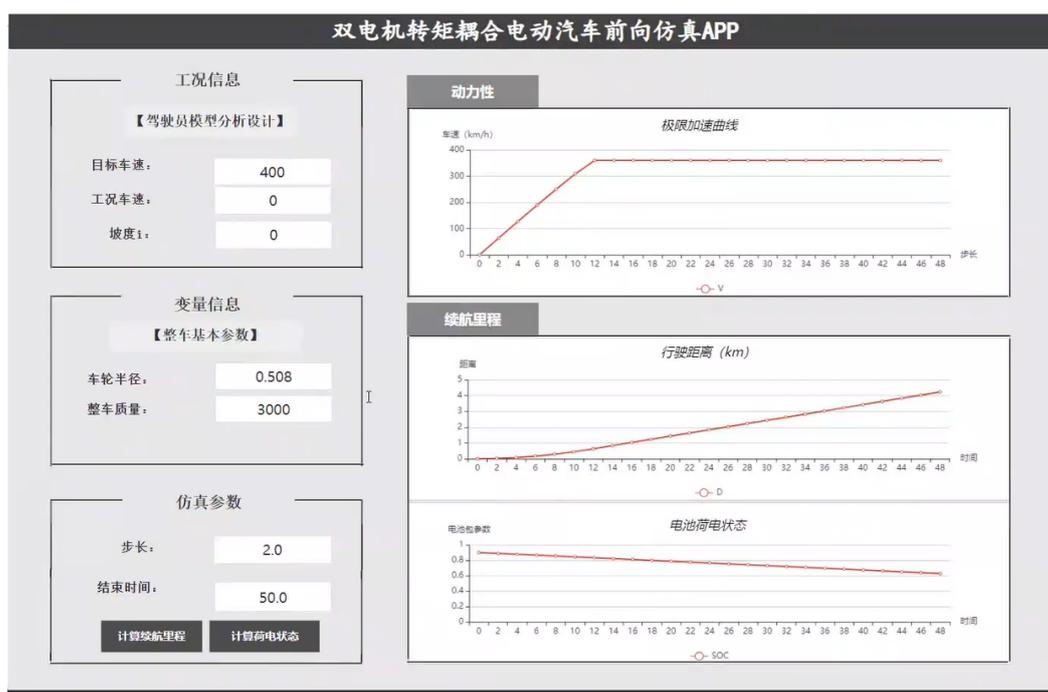


图 10 双电机转矩耦合电动汽车前向仿真工具

首先，输入“目标车速、工况车速、坡度”等工况参数以及步长、结束时间等仿真参数，点击按钮得出双电机转矩耦合电动汽车前向仿真后的具体数据，包括极限加速曲线、行驶距离、电池荷电状态等曲线。通过曲线可以获得百米加速度、最大续航里程等数据，然后通过调整左侧工程师预设的变量信息对结果进行校核，最终得到满足要求的参数设计。

工业 APP 应用中心是工业应用企业与工业 APP 开发者及用户之间的纽带。平台支持工业 APP 一键云化发布，如图所示。实现工程文件向商业化产品的跨越，促进知识的输出，充分利用市场化手段为产业赋能。

相较于工业 APP 的传统开发方式：需要 IT 技术人员经历从调研需求、JAVA/C#/C++等代码编程、测试、交付的繁琐开发流程。本应用案例中一线工程师利用工业 APP 集成开发平台可以实现快速开发，从原来近 2 周的开发时间缩短为 1 至 2 人天，不仅减少了开发成本，后期维护变更也更加灵活，更重要的是能够很好地将已有知识经验固化沉淀，提升车企的研发效率。

3 应用成效

基于本工业互联网 APP 集成开发平台，已在多家主机厂进行实施和应用，在促进研发设计仿真工作提质降本增效方面取得了显著成效，如图所示。由于工业 APP 对原有知识经验的封装，有效减少了大量简单重复的劳动，使得原有设计仿真工作的准备时间大幅降低，从平均 7 天完成一个试验变为平均 2 天，工程师的工作效率得到提升，单位时间内工程师可以开展更多的设计仿真实验，单一实验人工成本率从 1.1 降到了 0.6，促进了整体研发设计仿真工作效率提升，从原来 68.2%提升到 97.9%。其中：

单一实验人工成本率=（一定时期内人工成本总额/ 同期同口径实验数量）/人工总成本；

平均设计仿真时间=（一定时期内实验总耗时/ 同期同口径实验数量）；

研发设计仿真效率=（研发设计仿真实验时间总额/ 同期工作时间总额）。

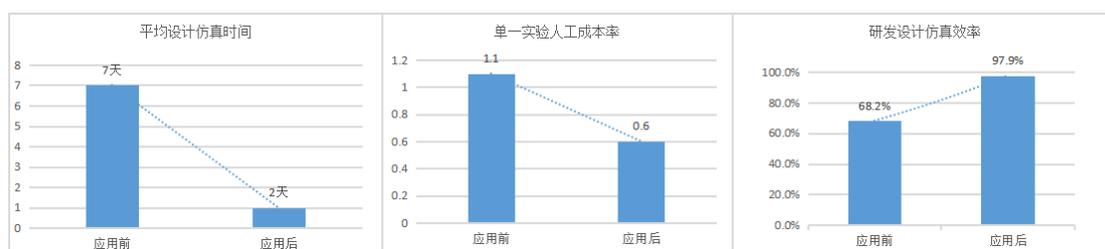


图 11 应用成效

4 应用成效

本文研究了工业互联网平台工业 APP 方向在研发设计仿真领域的平台架构和应用场景^[5]，基于汽车行业工业 APP 集成开发平台面向汽车研发设计仿真领域研发工程师的业务需求，采用 Modelica 建模技术、异构模型库管理技术、工业软件集成与适配技术、低代码开发技术等，开展了聚焦典型业务场景的工业 APP 搭建，实现了企业知识经验的固化，提高了研发设计仿真工作效率，满足了工程师对软件产品快速响应业务变化的诉求。此外，本文实现的对研发设计仿真领域多物理领域异构机理模型的解析及管理，以及基于机理模型组件的流程化封装也是目前同行业

唯一实现的,为其他行业开展相关工作提供了借鉴。在后续工作中将进一步利用数据治理技术实现混合云环境下数据库资源贯通、扩展复杂模型参数定义自由度以及丰富低代码平台组件内容,实现更多场景的适配。汽车行业工业 APP 集成开发平台的建设与应用,为汽车产业数字化转型升级、实现高质量发展提供了助力。

参考文献

- [1] 侯沁.工信部解读《深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》[N]. 中国电子报, 2017-11-07(007).
- [2] 张涛.基于的混合动力汽车建模与仿真[J].华中科技大学, 2011, 01(01):34-35
- [3] 洪华军, 吴建波, 冷文浩.一种基于微服务架构的业务系统设计与实现[J].计算机与数字工程, 2018, 46(01):149-154
- [4] 黄珏.基于部署云计算管理平台[J].无线互联科技, 2018, 15(19):44-45
- [5] 李奇颖, 赵阳, 阿孜古丽·吾拉木, 卷烟制造工业互联网平台建设与应用[J].计算机集成制造系统. 2020,26(12)

作者简介

- 朱君:** 中汽数据(天津)有限公司工程师,主要工业互联网及工业技术软件化相关研究工作。
- 侯庆坤:** 中汽数据(天津)有限公司工程师,长期从事工业软件相关业务工作。
- 赵甲:** 中汽数据(天津)有限公司工程师,长期从事工业互联网、工业 APP 及工业技术软件化等领域新技术演进发展等方面的业务工作。

工业互联网中数字孪生系统的机理+数据融合建模方法

李硕¹, 刘天源¹, 黄锋¹, 解鑫¹, 张金义¹

(1. 百度在线网络技术有限公司, 北京 100086)

摘要: 工业互联网的快速发展为学术界以及工业界带来了新型研发范式——数据密集型科学范式, 融合物理机理以及数据驱动的建模方法是其中的研究热点之一, 这种方式可以充分发挥机理仿真可解释性和泛化能力强、数据驱动模型灵活性和可学习的优势, 为未来数字孪生系统提供高效、灵活的工具和方法; 本文聚焦于工业互联网中构建数字孪生系统的机理+数据融合方法, 首先阐述了基本数学原理以及建模方法, 并对比了机理+数据融合建模与传统数据模型、机理模型的区别; 然后从模型选择、物理机理约束以及实际任务需求三个角度详细给出了机理+数据融合建模方法的构造过程, 总结了目前学术界目前的最新研究进展; 最后介绍了国内外关于机理+数据融合建模方法在工业设备设计优化、生产制造、运行维护方面的实际落地应用场景。

关键词: 深度学习; 机理仿真; 数据驱动; 物理启发神经网络; 数字孪生

Mechanism + data fusion modeling method in Digital twin system for industrial internet

LI Shuo, LIU TianYuan, HUANG Feng, XIE Xin, ZHANG JinYi

(1. Baidu Online Network Technology Co., Ltd, Beijing 100086)

ABSTRACT: The development and prosperity of the Industrial Internet have brought a novel paradigm to the academic and industrial communities - Data-intensive Scientific Discovery. The modeling method of fusion physics mechanism and data driven is one of the research hotspots. which can provide efficient and flexible analysis tools for future Digital twin system. This approach can benefit from both mechanism simulation (interpretability and generalization ability) and data-driven model (flexibility and learning ability), especially in the deep learning architecture. In this context, this paper focuses on the mechanism + data fusion method in the digital twin system for Industrial Internet. Firstly, the basic mathematical principles and modeling methods are established, while the differences between mechanism + data fusion modeling and traditional models are compared. Then, machine-learning model selection, physics mechanism constraints, and actual task requirements are introduced in detail, and the recent research progress and development are summarized. Finally, the actual application scenarios of this method are reported from three perspectives, including design optimization, manufacturing, and operation maintenance.

KEY WORDS: deep learning; mechanism simulation; data driven; physics-informed neural network; digital twin.

0 引言

随着近十年工业互联网技术的快速发展、分布式传感器和高性能计算设备的逐渐进步以及仿真建模算法的更新迭代,在学术界和工业界积累了海量的多层级数据,从不同角度反映了工业生产过程中的内在物理信息^[1],这为大数据的发展提供了良好的土壤,形成了数据驱动的新型范式,学者们^[2]将之称为“第四范式”——数据密集型科学发现,以区别于实验归纳范式、模型推演范式和仿真模拟范式的三种传统研究范式,强调直接从大量已知数据中自行归纳、推导和预测,获得未知且可信的结论。尤其是近五年来,以深度学习^[3]为代表的驱动方法不仅在视觉、自然语言处理以及博弈类问题超越了人类,更在蛋白质结构预测^[4]、三体问题^[5]、气象预报^[6]、核聚变控制^[7]等一系列基础科学以及工业界难题中取得了重大突破,可以断言,我们目前正处于新时代由仿真模拟范式向数据密集型科学范式的过渡发展阶段。

在工业互联网数据和深度学习算法的双重驱动下,“数字孪生系统”(Digital Twin)^[8]在这个时代被赋予了更强大的生命力,这种技术体系可以有效结合目前过渡阶段的仿真模拟和数据驱动方法,充分挖掘服役历史、实时传感数据以及物理知识,用数字虚拟模型表征物理实体状态,实现对物理系统的理解、学习、推理和预测;经过最近十年的技术储备和发展,数字孪生系统已经被认为是工业互联网中的战略性技术之一,是解决新时代工业产品全寿命周期中设计、制造、服役和运维的有效方法。

如何在构建数字虚拟模型,无疑是数字孪生系统技术的重中之重。与传统基于物理机理的模型不同,数字孪生系统更强调仿真的快速实时(快速反映物理世界的变化,计算响应速度快)和反馈学习(利用物理实体反馈的数据进行自我学习和完善),并且要求建模和仿真可以和更多的工业真实场景实现频繁的信息交互,以便实现模型的自动更新迭代;而机理仿真受制于求解速度慢,对计算机资源消耗巨大,难以布置到工业现场的边缘设备中,且无法对物理世界反馈的数据和经验进行再学习,必须借助人对数据的理解进行调整;纯粹数据驱动模型难以嵌入物理规律以及领域知识,而现阶段传感器测量仍然存在固有缺陷,这导致构建的模型缺乏可解释性、尤其是在处理非线性、多学科和多尺度的物理系统时,模型的精度低、稳定性差且泛化能力严重不足。总之,就目前发展而言,无论是机理仿真还是数据驱动均难以满足未来工业互联网的发展需求。

1 基本架构

考虑一般物理系统遵循如下方程:

$$\mathbf{N}[\mathbf{y}(\mathbf{x};\boldsymbol{\theta})]=\mathbf{0} \quad (1)$$

式中: \mathbf{x} 表示对物理系统模型的输入变量(时间、空间坐标等); \mathbf{y} 表示需要获得的输出变量(物理场、信号等超高维变量); $\mathbf{N}[\mathbf{y}]$ 表示输出 \mathbf{y} 对输入 \mathbf{x} 的各阶微分、差分、积分或非线性算子构成的映射,这个方程由物理第一性原理在具体场景中给出,例如描述航天飞行器运动中

的万有引力和牛顿力学定律、流体力学中的 N-S 方程 (N-S: Navier-Stokes)、电磁场的 Maxwell 方程、统计力学中的 Boltzmann 方程、量子力学中的 Schrödinger 方程等; Θ 表示系统参数, 用来表征系统的拓扑、几何以及物理特性。

一般而言, 为了获得 \mathbf{y} 和 \mathbf{x} 的映射关系, 需要求解上述方程组, 例如, 连续介质力学中在空间域上采用有限元方法、有限体积方法离散, 时间域利用 Runge-Kutta 法离散, 当然更加灵活的无网格离散方法近年来也是研究热点之一。虽然在过去半个世纪得益于计算硬件以及算法的进步, 基于机理的建模-仿真-求解方法获得了长足的发展, 被广泛应用于工业领域, 大幅减少了不必要的试验、加快了设计研发周期并节省了实际运维成本; 但目前仍然面临诸多挑战: 前处理以及后处理过程极度繁琐、计算时间过长或计算资源消耗过大、难以适应灵活的任务需求 (如信息缺失时的反向问题); 甚至在近十年基于传统机理方法的发展已经裹足不前^[9]。

数据驱动的方法避免了求解上述复杂的数学物理方程, 通过将关注的物理场或信号 \mathbf{y} 简化为低维信息, 然后采用一个近似模型逼近上述方程的解, 如式 (2), 例如设计优化中常用的经验公式、代理模型以及对物理减缩模型, 从而采用机器学习模型构造了输入和输出之间的映射关系, 通过最小化模型预测和标记数据之间的差异确定模型中的待定参数。

$$\begin{cases} \mathbf{y} \approx \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}; \Theta) \\ \Theta^* = \arg \min_{\Theta} \{ \mathbf{L}(\hat{\mathbf{y}}, \mathbf{y}) \} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\mathbf{F}(\mathbf{x}; \Theta)$ 为构建的预测模型, Θ 为模型中的待定参数, $\mathbf{L}(\hat{\mathbf{y}}, \mathbf{y})$ 衡量模型与标记数据之间的差异, 在机器学习中也称为损失函数, 上述最小化损失函数的过程也称为训练过程; 在经过大量标记数据完成训练后获得模型的最佳参数 Θ^* , 在实际使用时即可带入模型 $\mathbf{F}(\mathbf{x}; \Theta)$ 中进行快速预测, 这种方式能够有效缓解实际使用机理仿真的计算量大/时间成本高的问题。

虽然工业物联网目前可以为数据驱动方法提供大量的训练数据, 但这些数据是有缺陷的: 分散性、有限性、高噪声以及潜在同质化的缺陷 (例如在故障检测中, 大量故障工况运行数据是无法采集的, 而且传感器的可测量位置极为有限且噪声成分极大); 同时目前这种完全数据驱动的方法缺乏对物理系统的建模, 使得专业人员无法解释这些数据, 更不能辅助他们高效地利用数据, 获得模型的精度和可靠性也存疑。

机理+数据融合模型——通过将物理机理嵌入数据驱动模型^[10]中, 充分发挥机理模型可解释性和泛化能力强、数据驱动模型灵活性和可学习的优势。从机器学习的视角来看, 需要根据实际物理问题满足的对称性以及工业场景选择合适的机器学习模型, 此外, 还需引入物理机理以及工业过程任务需求的损失函数:

$$\Theta^* = \arg \min_{\Theta} \{ \mathbf{L}(\hat{\mathbf{y}}_m, \mathbf{y}_m) + \lambda_N \|\mathbf{N}[\hat{\mathbf{y}}](\mathbf{x}; \Theta)\| + \lambda_T \mathbf{T}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{y}}) \} \quad (3)$$

式中: \mathbf{y}_m 、 $\hat{\mathbf{y}}_m$, 表示物理系统中的传感器采集获得的数据以及模型在对应测点预测的数据;

$\mathbf{N}[\hat{\mathbf{y}}](\mathbf{x};\boldsymbol{\theta})$ 表示将机器学习模型预测结果带入式(1)获得的方程残差; $\|\cdot\|$ 表示残差范数; $\mathbf{T}(\mathbf{x},\hat{\mathbf{y}})$ 表示实际任务需求中的目标函数; $\lambda_{\mathbf{N}}$ 、 $\lambda_{\mathbf{T}}$ 表示训练时平衡各个损失的权重。

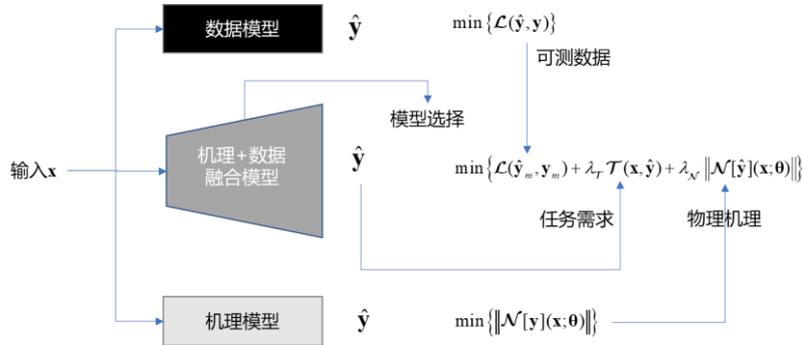


图 1 数字孪生系统中三种建模方法之间的联系以及区别

三种建模方法的关系如图 1, 机理+数据融合模型整合了两种传统建模方式, 具体而言, 相比于式(2), 式(3)修正了所有输出的损失函数为稀疏布置传感器的可测量输出损失, 还引入了物理机理约束的正则项 $\|\mathbf{N}[\hat{\mathbf{y}}](\mathbf{x};\boldsymbol{\theta})\|$ 以及任务需求的目标, 以确保学习获得的模型可以满足物理方程和任务需求的约束。

事实上, 机理+数据融合建模方法的思想可以追溯到更早的物理学建模方法^[11], 例如传热学中的试验关联式和部件剩余寿命预测的经验公式都是基于这类思想——将复杂的物理系统通过经验知识简化为低自由度的系统, 并抽象出简化过程中待定的参数, 由于模型中包含了对物理系统的经验性反应, 增强了模型的可解释性且减少了模型中的待定参数, 推而广之, 理论物理的重整化思想(如 Boltzmann 方程向 N-S 方程简化), 工程的模型降维(如管道中忽略三维流动效应只研究沿管道流动方向的一维流动)本质都属于此类建模方法。相关抽象目前是由人工经验或领域知识给出的, 而在机理+数据融合模型中, 我们希望通过模型选择、物理机理以及任务需求将这个抽象过程通过机器学习或数据驱动方法表征出来, 接下来我们主要从这三个方面讨论融合建模方法的最新研究进展。

2 研究进展

2.1 模型选择

传统的代理模型(Surrogate Model)(如多项式、支持向量机、径向基模型、基于树的模型、Gaussian 过程等方法); 通过直接构造输入参数和输出的映射关系形成代理模型, 由于模型简单且无需人工干预, 被广泛被用于计算成本较高的黑箱函数的优化和控制任务^[12], 但难以处理物理建模中所关注的物理场信息(一般可表示为在空间域和时间域上分布的高维张量), 过分简化的建模方式缺乏对物理系统本身的关注, 依赖繁琐的特征工程以及大量数据采样, 因此难以适用于

精细化的物理系统建模。

减缩模型 (Reduced Order Model) 是通过数据驱动的方法或者经验分解的方法对原始的物理系统进行了降阶或减缩, 减少对高维信息描述的复杂度, 继而可以加快对物理场或信号的求解和预测, 常用的方法有本征正交分解和动态模态分解等方法, 这些方法不仅展现出了良好的效果, 同时也具备一定的可解释性; 但其也有明显缺点: 处理复杂非线性问题依赖于核函数、基函数的选择, 与问题不匹配时可能会导致模型表达能力不足或者训练收敛困难; 此外这些方法将整个物理场或信号展开成一维向量, 未对定义在求解域的时空关联性以及物理量间的关联性建模, 无法捕捉时间上的瞬态突变、空间上多尺度的信息, 不具备物理约束中要求的空间平移、旋转不变性, 限制了其应用范围^[13]。

利用神经网络 (Neural Network) 作为近似映射对物理系统建模-求解可以追溯到上世纪 90 年代的若干工作^{[14] [15]}中, 受制于硬件效率以及算法的灵活性, 一直以来没有被关注; 自 2012 年以来, 神经网络的发展将机器学习方法带入了深度学习 (Deep Learning) 时代, 相比于传统机器学习模型, 深度学习具备更强的表达能力、更广泛的适应性、更显著的灵活性。由计算机视觉和时序信号处理中发展出的各种神经网络算子, 如卷积神经网络 (CNN: Convolutional Neural Network)、关注时序信号的循环神经网络 (RNN: Recurrent Neural Network) 以及近年发展迅速的 Transformer 结构、图神经网络结构 (GNN: Graph Neural Network) 以及处理离散点云数据的 Point-Net 等结构, 可以灵活地处理工业互联网或机理仿真获得的超高维数据; 例如: CNN 可以有效分析结构化数据^[16]; RNN 可以对具备时空关联物理场建模^[17]; 图卷积网络可以适应非结构化网格数据^[18]; 点云网络可以用于处理无网格的物理场^[19]; Attention 机制处理多尺度物理信息^[20]; 利用 Fourier 算子分解^[21]捕捉物理场的低频成分, 提升模型对物理系统的表征性能。同时, 这些方法保留了物理场在空间域、时间域以及拓扑内在不变性, 通过这些物理对称性的约束可以显著减少模型的冗余度并增强可解释性, 使得模型可以更加有效地处理超高维的物理系统。

2.2 物理约束

在损失函数中引入物理系统方程的正则项约束, 典型工作是物理信息神经网络^[22] (PINN : physics-informed neural network) 这种方法通过自动微分机制将物理系统遵循的动力学方程的微分形式纳入模型的损失函数中, 使模型具备更强的物理解释性和对参数 θ 泛化能力; PINN 方法由于采用神经网络, 充分利用深度学习中的自动微分机制, 将物理约束通过损失函数引入神经网络, 形成了端到端的微分方程求解器^[23], 补充必要的边界条件或初始条件等, 即可应用于各种偏微分方程和常微分方程的求解: 如流体力学 N-S 方程^[24]、弹塑性问题的静力学方程^[25]、量子力学中的 Schrödinger 方程^[26]、分数阶微分方程^[27]、气象问题的 Lorentz 方程^[28]、新冠病毒传播的动力学模型^[29]。

PINN 方法是目前机理+数据融合建模方法中发展的较为成熟的方向, 在学术界引起了广泛

的关注，且许多研究机构基于主流深度学习框架开发了相应的架构（如表 1），目前除了美国以外，我国的国防科技创新研究院和百度公司也率先开发了相应架构，尤其是百度目前基于国产化的深度学习框架 PaddlePaddle 开发的 Paddle Science。

表 1 Physics-informed Neural Networks 相关架构

架构名称	开发语言	深度学习框架	开发机构	开发时间
DeepXDE ^[30]	Python	Tensorflow	Brown 大学	2020.2
NeuroDiffEq ^[31]	Python	Pytorch	Harvard 大学	2020.2
SciANN ^[32]	Python	Keras/Tensorflow	MIT 学院	2020.9
ADCME ^[33]	Julia	Tensorflow	Stanford 大学	2020.11
SimNet ^[34] /Modulus ^[35]	Python	Tensorflow	Nvidia	2020.12
NeuralPDE ^[36]	Julia	Julia	Carnegie-Mellon 大学	2021.7
IDRLnet ^[37]	Python	Pytorch	国防科技创新研究院	2021.7
Paddle Science ^[38]	Python	PaddlePaddle	百度	2021.12

当然除了上述的自动微分方法引入物理约束，还有一些结合传统机理仿真模型的引入方式，例如：利用有限差分、有限体积和有限元^[39]格式构造；广义而言，谱方法、无网格方法也可以看作其中的一种，只是选择了另外的可学习模型构造函数逼近器，再用加权余量法等数值求解方法计算损失函数。当然，从物理本质上讲选择合适的网络模型与物理规律的约束实际上是密不可分的，事实上，近两年来 PINN 的重要发展方向正在统一两种方式到一个架构^[10]中，例如：针对采用不同形式的网络模型^[40]、与算子驱动方法结合^[41]、与仿真模拟结合^[39]、模型迁移^[42]、更加高效的计算方式^[43]、更加稳定的训练过程^[44]、更加灵活的任务构造^[45]。

2.3 任务需求

机理+数据融合建模方法的最大优势是可以将虚拟模型本身与数字孪生系统中的设计、制造、控制、运维等任务需求灵活对接，并充分发掘海量传感器获得的数据，这是机理模型方法所不具备的。考虑式（1）中更一般的问题，即方程中描述物理系统的部分参数 θ 需要被识别、控制或优化，在求解方程时是未知的，这导致方程一般是不适定的，在传统机理方法中需要大量的数值仿真对参数进行搜索，甚至结合数据驱动方法对参数进行寻优；而在机理+数据融合模型中，可以将该部分未知参数纳入模型中的，即令 $\theta \in \Theta$ ，显然此时原始方程增加了未知数，因此需要利用具体任务的约束将待求解问题封闭，转化为在机器学习方法中的可优化问题；针对实际工业场景中的任务，可大致如下三类方式构造：

1) 在物理场重构或系统的参数辨识问题中，由于缺失了部分边界条件、初始条件、几何信息或物理性质参数，必须引入必要的可测点使方程封闭，因此，在测点中补充更多的传感器测量，即：

$$L(\hat{y}, y) = \|\hat{y}_m - y_m\| \quad (4)$$

2) 在设计优化任务中, 需要对部件的几何信息或工况参数进行优化, 因此需要补充待优化目标, 使得被设计对象获得更好的设计性能, 即:

$$\mathbf{T}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{y}}) = \left\| \int \mathbf{J}(\hat{\mathbf{y}}) d\mathbf{x} \right\| \quad (5)$$

3) 在控制问题中, 需要保证系统的某个输出参数接近需要达到的控制目标, 因此需要补充待控制目标, 补充待控制目标和实际目标之间的差异, 即:

$$\mathbf{T}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{y}}) = \left\| \int \mathbf{J}(\hat{\mathbf{y}}) d\mathbf{x} - \gamma(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta}) \right\| \quad (6)$$

其中: $\int \mathbf{J}(\hat{\mathbf{y}}) d\mathbf{x}$ 表示需要优化或控制的目标, 一般可表示为系统输出 \mathbf{y} 的函数的积分形式 (例如机翼设计中的升力阻力比、换热结构的传热及阻力性能、承载结构的应力或载荷等); $\gamma(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta})$ 为控制目标; $\hat{\mathbf{y}}_m$ 、 \mathbf{y}_m 表示实际可布置测点的测量结果。

鉴于各种任务的一致性, 可以在机理+数据融合模型中将之统一在一起^[46], 更加凸显了这种方法的灵活性和通用性, 事实上实际工业场景往往需要同时兼顾上述三种任务。近两年来, 这种机理+数据融合方法已经被用于不同的物理场重构任务: 局部测点进行全局 GPU 散热结构的设计^[47]、基于核磁共振图像及少数测点血管状态重构^[48]; 系统参数辨识任务: 材料的几何缺陷检测^[49]、汽车扭振阻尼结构的参数识别及校正^[50]; 优化任务: 机翼形状优化^[18]、电力系统优化^[51]; 控制任务: 流动控制^[45]、四容水箱液位控制^[52]。也能胜任一些复杂系统的物理场以及关注的性能参数预测: 热化学反应过程中的温度场预测^[42]和气动轴承的气膜厚度以及力学特性预测^[53]。

此外, 虽然本文是以监督学习形式给出的物理机理嵌入方式, 实际上该方法还可以与无监督学习方法以及强化学习方法结合: 进一步扩展该建模方式的应用场景, 例如进行物理系统的动力学方程的发现^[54]、形状设计优化^[55]、复杂的湍流控制^[56]和电网系统控制^[57]。

3 应用场景

机理+数据融合模型由于其灵活性以及通用性, 也获得了工业界的广泛关注, 世界范围内的大型重工业企业陆续布局, 将这种方法应用工业领域的设计优化-生产制造-运行维护环节, 从而实现工业互联网中的数据闭环。例如: 美国通用公司和仿真软件公司 ANSYS、英国的 Rolls-Royce 公司、法国 Dassault 公司, 德国 Siemens 公司, 我国的百度公司等相继推出了利用机理+数据融合方法构建数字孪生系统的战略规划, 并在实际工业场景中实现了的落地应用。

在设计优化方面: 美国通用电气公司^[58]基于工业互联网技术与 ANSYS 合作打造了基于数值仿真的数字孪生系统, 结合结构、热学、电磁、流体以及控制等多物理场耦合分析技术, 构建更加精确快速的综合仿真模型来分析、预测航空发动机的性能, 通用电气公司在 2018 年就宣称已经拥有 120 万个数字孪生系统; Nvidia 开发了 Modulus^[34]用于融合物理知识与数据以快速响应设计需求, 为芯片散热的流场模拟提供了新的解决方案, 使计算流体动力学等模拟的速度比传统

工程模拟和设计优化工作流程方法加快 1 万倍。

在生产制造方面:Fero Labs 利用机器学习分析传感器数据,预防机器故障并减少资源浪费,每年为钢铁生产企业节省数百万美元的成本; ANSYS 结合专家经验与机器学习方法用于材料分析,相比反复试验效果更好、改进更快、成本更低; Siemens 利用深度学习使用天气和部件振动数据来不断微调风机,使转子叶片等设备能根据天气调整到最佳位置,以提高发电效率、增加发电量。

在运行维护方面:英国 Rolls-Royce 在最新的 UltraFan 航空发动机^[59]的验证机中对每块风扇叶片都安装了传感器,并构造了数据孪生体,辅助叶片运行的健康管理; Siemens 利用数字孪生的混合建模模型^[60]辅助电厂运维,使得燃气轮机的性能增加 3.5 兆瓦, NOx 排放量下降了多达 10%; 法国电力集团利用融合建模方法的数字孪生系统进行设备故障诊断以及健康管理,达到了 87%的故障检测准确效率; 百度公司^[61]将机理模型、机器学习与环保水务业务深度融合,帮助水务公司实现节能降耗 5%-15%, 停机时间减少 50%, 总成本降低 5-10%, 设备利用率提升 5-15%。

2021 年 8 月, 美国国防部发布^[62]关于开展燃气轮机的大规模集成模拟和综合仿真的研究项目, 相关研究人员认为: 近期流体力学和人工智能方法的融合出现了巨大突破, 有助于提升下一代燃气涡轮发动机的效率和安全性。同时, 俄罗斯土星公司也报道了对船用重型燃气轮机的数字孪生项目, 并声称目前已完成了第一阶段关于变速箱的融合建模, 该方法将有助于减少下一代船用燃气轮机的设计时间和成本、缩短试验测试过程, 提升产品生命周期的管理质量。由此可见, 无论是在民用还是国防工业, 机理+数据融合模型已经逐渐融入了新一代工业互联网的数字孪生系统。

4 结语

综上所述, “第四范式”下的机理+数据融合建模方法是实现数字孪生系统中实时或准实时仿真、模型-数据双向反馈的理想工具, 可以在统一的架构下灵活地处理工业领域不同任务需求, 这种方法正在重塑着传统工业领域, 引领着新一轮工业互联网技术的发展, 也必将在未来扮演关键角色。但仍然需要承认的是: 如何将工业中有限容量的数据的和物理机理更加高效地结合, 无论是将物理知识和经验嵌入机器学习模型, 还是改造机理仿真方法以自适应数据, 相关探索均缺乏理论支撑, 也面临着新的挑战: 首先, 融合模型的精度、收敛性、可解释性和鲁棒性问题无论是理论上还是应用中都是亟需解决的问题; 其次, 构建可验证的标准数据集以及相关开源社区, 在传统工业领域仍然是极为困难的; 最后, 将仿真模拟、试验室中获得的融合模型向真实工业场景下的推广, 确保模型的可迁移性和泛化能力也是一大技术难点。

参考文献

- [1] Brunton S L, Noack B R, Koumoutsakos P. Machine Learning for Fluid Mechanics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2020, 52(1): 477–508.
- [2] Hey T, Tansley S, Tolle K. The Fourth Paradigm: Data-Intensive Scientific Discovery[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(8): 1334–1337.
- [3] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436–444.
- [4] Jumper J, Evans R, Pritzel A, et al. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold[J]. Nature, 2021, 596(7873): 583–589.
- [5] Breen P G, Foley C N, Boekholt T, et al. Newton versus the machine: solving the chaotic three-body problem using deep neural networks[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020, 494(2): 2465–2470.
- [6] Ravuri S, Lenc K, Willson M, et al. Skilful precipitation nowcasting using deep generative models of radar[J]. Nature, 2021, 597(7878): 672–677.
- [7] Degraeve J, Felici F, Buchli J, et al. Magnetic control of tokamak plasmas through deep reinforcement learning[J]. Nature, 2022, 602(7897): 414–419.
- [8] Tao F, Cheng J, Qi Q, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9–12): 3563–3576.
- [9] Runchal A K, Rao M M. CFD of the Future: Year 2025 and Beyond[A]. 见: A. Runchal. 50 Years of CFD in Engineering Sciences[M]. Singapore: Springer Singapore, 2020: 779–795.
- [10] Karniadakis G E, Kevrekidis I G, Lu L, et al. Physics-informed machine learning[J]. Nature Reviews Physics, 2021, 3(6): 422–440.
- [11] Koch-Janusz M, Ringel Z. Mutual information, neural networks and the renormalization group[J]. Nature Physics, 2018, 14(6): 578–582.
- [12] Application of Surrogate-based Global Optimization to Aerodynamic Design[M]. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [13] Kutz J N. Deep learning in fluid dynamics[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2017, 814: 1–4.
- [14] Thompson M L, Kramer M A. Modeling chemical processes using prior knowledge and neural networks[J]. AIChE Journal, 1994, 40(8): 1328–1340.
- [15] Lagaris I E, Likas A, Fotiadis D I. Artificial neural networks for solving ordinary and partial differential equations[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1998, 9(5): 987–1000.
- [16] Long Z, Lu Y, Dong B. PDE-Net 2.0: Learning PDEs from data with a numeric-symbolic hybrid deep network[J]. Journal of Computational Physics, 2019, 399: 108925.
- [17] Mohan A T, Tretiak D, Chertkov M, et al. Spatio-temporal deep learning models of 3D turbulence with physics informed diagnostics[J]. Journal of Turbulence, 2020, 21(9–10): 484–524.
- [18] Xu M, Song S, X Sun, et al. A convolutional strategy on unstructured mesh for the adjoint

vector modeling[J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(3): 036115.

[19] Kashefi A, Rempe D, Guibas L J. A point-cloud deep learning framework for prediction of fluid flow fields on irregular geometries[J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(2): 027104.

[20] Peng W, Yuan Z, Wang J. Attention-Enhanced Neural Network Models for Turbulence Simulation[J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(2): 025111.

[21] Li Z, Kovachki N, Azizzadenesheli K, et al. Fourier Neural Operator for Parametric Partial Differential Equations[J]. arXiv:2010.08895 [cs, math], 2021.

[22] Raissi M. Deep Hidden Physics Models: Deep Learning of Nonlinear Partial Differential Equations[J]. arXiv:1801.06637 [cs, math, stat], 2018.

[23] Sun L, Gao H, Pan S, et al. Surrogate modeling for fluid flows based on physics-constrained deep learning without simulation data[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2020, 361: 112732.

[24] Raissi M, Yazdani A, Karniadakis G E. Hidden fluid mechanics: Learning velocity and pressure fields from flow visualizations[J]. *Science*, 2020, 367(6481): 1026–1030.

[25] Haghghat E, Raissi M, Moure A, et al. A physics-informed deep learning framework for inversion and surrogate modeling in solid mechanics[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2021, 379: 113741.

[26] Pfau D, Spencer J S, Matthews A G de G, et al. Ab-Initio Solution of the Many-Electron Schrödinger Equation with Deep Neural Networks[J]. arXiv:1909.02487 [physics], 2021.

[27] Gulian M, Raissi M, Perdikaris P, et al. Machine Learning of Space-Fractional Differential Equations[J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2019, 41(4): A2485–A2509.

[28] Raissi M, Perdikaris P, Karniadakis G E. Multistep Neural Networks for Data-driven Discovery of Nonlinear Dynamical Systems[J]. arXiv:1801.01236 [nlin, physics:physics, stat], 2018.

[29] Malinzi J, Gwebu S, Motsa S. Determining COVID-19 Dynamics Using Physics Informed Neural Networks[J]. *Axioms*, 2022, 11(3): 121.

[30] Lu L, Meng X, Mao Z, et al. DeepXDE: A deep learning library for solving differential equations[J]. arXiv:1907.04502 [physics, stat], 2020.

[31] Chen F, Sondak D, Protopapas P, et al. NeuroDiffEq: A Python package for solving differential equations with neural networks[J]. *Journal of Open Source Software*, 2020, 5(46): 1931.

[32] Haghghat E, Juanes R. SciANN: A Keras/TensorFlow wrapper for scientific computations and physics-informed deep learning using artificial neural networks[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2021, 373: 113552.

[33] Xu K, Darve E. ADCME: Learning Spatially-varying Physical Fields using Deep Neural Networks[J]. arXiv:2011.11955 [cs, math], 2020.

[34] Hennigh O, Narasimhan S, Nabian M A, et al. NVIDIA SimNetTM: an AI-accelerated multi-physics simulation framework[J]. arXiv:2012.07938 [physics], 2020.

- [35] Modulus | NVIDIA Developer[EB/OL]. /2022-04-24. <https://developer.nvidia.com/modulus>.
- [36] Zubov K, McCarthy Z, Ma Y, et al. NeuralPDE: Automating Physics-Informed Neural Networks (PINNs) with Error Approximations[J]. arXiv:2107.09443 [cs], 2021.
- [37] Peng W. IDRLnet: A Physics-Informed Neural Network Library[J]. : 13.
- [38] 飞桨 PaddlePaddle- 源于产业实践的开源深度学习平台 [EB/OL]. /2021-07-12. <https://www.paddlepaddle.org.cn/tutorials/projectdetail/695184>.
- [39] Fang Z. A High-Efficient Hybrid Physics-Informed Neural Networks Based on Convolutional Neural Network[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021: 1–13.
- [40] Hy T S, Trivedi S, Pan H, et al. Predicting molecular properties with covariant compositional networks[J]. The Journal of chemical physics, 2018, 148(24): 241745.
- [41] Lu L, Jin P, Karniadakis G E. DeepONet: Learning nonlinear operators for identifying differential equations based on the universal approximation theorem of operators[J]. Nature Machine Intelligence, 2021, 3(3): 218–229.
- [42] Amini Niaki S, Haghighat E, Campbell T, et al. Physics-informed neural network for modelling the thermochemical curing process of composite-tool systems during manufacture[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021, 384: 113959.
- [43] Meng X, Li Z, Zhang D, et al. PPINN: Parareal physics-informed neural network for time-dependent PDEs[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 370: 113250.
- [44] Wang S, Yu X, Perdikaris P. When and why PINNs fail to train: A neural tangent kernel perspective[J]. arXiv:2007.14527 [cs, math, stat], 2020.
- [45] Mowlavi S, Nabi S. Optimal Control of Pdes Using Physics-Informed Neural Networks[J]. SSRN Electronic Journal, 2022.
- [46] Brunton S. Machine Learning of Dynamics with Applications to Flow Control and Aerodynamic Optimization[A]. 见: 2021: 327–335.
- [47] Cai S, Wang Z, Chrysosostomidis C, et al. Heat Transfer Prediction With Unknown Thermal Boundary Conditions Using Physics-Informed Neural Networks[A]. the ASME 2020 18th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels[C]. Virtual, Online: 2020: V003T05A054.
- [48] Kissas G, Yang Y, Hwuang E, et al. Machine learning in cardiovascular flows modeling: Predicting arterial blood pressure from non-invasive 4D flow MRI data using physics-informed neural networks[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 358: 112623.
- [49] Zhang E, Dao M, Karniadakis G E, et al. Analyses of internal structures and defects in materials using physics-informed neural networks[J]. Science Advances, 2022, 8(7): eabk0644.
- [50] Yucesan Y A, Viana F A C, Manin L, et al. Adjusting a torsional vibration damper model with physics-informed neural networks[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 154: 107552.
- [51] Misyris G S, Stiasny J, Chatzivasileiadis S. Capturing Power System Dynamics by Physics-

Informed Neural Networks and Optimization[J]. arXiv:2103.17004 [cs, eess], 2021.

[52] Antonelo E A, Camponogara E, Seman L O, et al. Physics-Informed Neural Nets for Control of Dynamical Systems[J]. arXiv:2104.02556 [cs], 2021.

[53] Li L, Li Y, Du Q, et al. ReF-nets: Physics-informed neural network for Reynolds equation of gas bearing[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2022: 26.

[54] Bakarji J, Champion K, Kutz J, et al. Discovering Governing Equations from Partial Measurements with Deep Delay Autoencoders[M]. 2022.

[55] Chen W, Fuge M. B`ezierGAN: Automatic Generation of Smooth Curves from Interpretable Low-Dimensional Parameters[J]. arXiv:1808.08871 [cs, stat], 2021.

[56] Rabault J, Ren F, Zhang W, et al. Deep Reinforcement Learning in Fluid Mechanics: a promising method for both Active Flow Control and Shape Optimization[J]. arXiv:2001.02464 [physics], 2020.

[57] Yu L, Hu W, Zhang X, et al. Automatic generation control of ubiquitous power Internet of Things integrated energy system based on deep reinforcement learning[J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2020, 50(2): 221–234.

[58] Ansys and GE Drive Digital Twin Value and Deliver the Promise of IIoT[EB/OL]. /2021-09-07. <https://www.ansys.com/news-center/press-releases/11-16-16-ansys-collaborates-with-ge-to-drive-digital-twin-valve-iiot>.

[59] Future of flight[EB/OL]. /2021-09-15. <https://www.rolls-royce.com/media/our-stories/innovation/2016/advance-and-ultrafan.aspx>.

[60] AI makes turbines young again[EB/OL]. siemens-energy.com Global Website. /2022-04-25. <https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2020/power-station-with-real-time-rejuvenation.html>.

[61] 百度智能云智能制造解决方案，开启中国制造的 2025-百度智能云-资讯中心-天互数据[EB/OL]. /2022-04-25. <https://www.idcs.cn/a/v2730>.

[62] US DoD to Work on Project for Digital Copy of Gas Turbines[EB/OL]. The Defense Post. 2021-08-26. <https://www.thedefensepost.com/2021/08/26/us-dod-digital-copy-gas-turbines/>.

作者简介

李硕：现任百度副总裁、党委委员、工业互联网产业联盟工业智能实验室主任。负责百度人工智能等核心技术的产业化落地，作为行业数字化转型和智能化升级领域的领军人才，主持多个国家及省市级人工智能相关项目的顶层设计，成功探索行业级标杆项目在金融、制造、能源、媒体、电信和教育等领域落地。百度智能云开物工业互联网平台入选“国家级”特色专业型平台，AI视觉质检平台、新一代智能客服与外呼平台等多个产品持续领先。

刘天源：百度 ACG 算法工程师，主要从事机理-数据融合建模仿真方法及其在动力机械设备

中的设计-优化-运维中的应用研究。

黄锋：现任百度智能云工业能源产品研发总经理，现负责百度智能云工业和能源行业的产品和研发管理，对 AI、大数据等技术在工业、能源行业的应用场景有深刻理解，从 0 到 1 规划建设了工业视觉质检、厂区安全巡检、工业数据智能、工业互联网平台等多个落地的产品和解决方案。同时还担任工业互联网产业联盟工业智能特设组副主席、工业智能实验室副主任、中国通讯学会工业互联网委员会委员等职务。

解鑫：百度智能云开物工业互联网架构师，百度工业数据智能算法负责人，主要从事深度学习算法在工业领域的应用研究。

张金义：百度ACG算法工程师，主要研究系统建模、控制优化与机器学习技术在能源电力行业的产品与技术应用。

(联系人: 张晶 北京市海淀区上地街道方舟大厦 F3A 区, 手机: 18911256610, 邮编: 100085, 邮箱: zhangjing88@baidu.com)

基于工业互联网安全运营中心系统的关系型数据库检索优化策略

基金项目：2020 年工业互联网创新发展工程项目-工业互联网平台企业网络安全综合防护系统项目
(TC200H01J)

陶耀东¹, 姚晓飞^{2,3}, 纪胜龙⁴, 黄东华¹

(1.北京双湃智安科技有限公司, 北京 100000; 2.中国科学院大学, 北京 100000; 3.中国科学院沈阳计算技术研究所, 沈阳 110000; 4.奇安信科技集团股份有限公司, 北京 100000)

摘要：基于工业互联网安全运营中心系统研发过程中的实际情况，提出一种加快关系型数据库检索策略。该策略可实时捕获关系型数据库的增删改等操作，并近实时的同步关系型数据库指定数据表中的指定字段到非关系数据库 Elasticsearch 中。Elasticsearch 中存储所有检索条件。利用 Elasticsearch 在海量数据检索领域的优势，有效解决了在硬件一定的情况下，单表数据量过大的数据表的检索问题。同时，通过变更数据捕获机制，减少了关系数据库中不必要的索引，提高了数据库数据写入性能。

关键词：变化数据抓取；数据库检索；Elasticsearch；工业互联网安全

中图分类号：TP311.13

文献标识码：C

Relational database retrieval optimization strategy based on industrial Internet security operation center system

TAO Yao-dong, YAO Xiao-fei, JI Sheng-long, HUANG Dong-hua

(1. Information and Communication Branch of Yantai Power Supply Company, Yantai 264001;
2. Informatoin and Communication Branch of Qingdao Power Supply Company, Qingdao 266002)

ABSTRACT: Based on the actual situation in the research and development process of the industrial Internet security situational awareness system, a strategy for speeding up relational database retrieval is proposed. This strategy can capture the addition, deletion and modification of relational database in real time, and synchronize the specified fields in the specified data table of the relational database to the non-relational database Elasticsearch in near real time. All retrieval conditions are stored in Elasticsearch. Using the advantages of Elasticsearch in the field of massive data retrieval, it effectively solves the retrieval problem of data tables with too much data in a single table under certain hardware conditions.

At the same time, by changing the data capture mechanism, unnecessary indexes in the relational database are reduced, and the performance of database data writing is improved.

KEY WORDS: change data capture; database search; Elasticsearch; industrial internet security

面对企业庞大而又复杂的网络系统以及层出不穷的高级威胁。传统采用独立分隔防护策略的工业互联网防护技术如防火墙、入侵检测系统、漏洞扫描等已难以有效应对。如何快速且合理的处置企业遭受的网络威胁攻击，如何有效且全面地进行 IT 资源监控，以及如何多角度呈现当前网络环境存在的漏洞、遭遇的威胁以及受到的攻击等等已成为规模以上企业不得不面对的痛点。对此，对工业互联网安全运营中心系统地展开研究。

在工业互联网安全运营中心系统的研发过程中，有如下场景：以某世界 500 强制造业为例，其网络资产规模为十万级左右，每秒需处理各种网络安全设备上报的告警数约四十条，因为告警是系统的核心业务逻辑，故关联业务逻辑复杂，需频繁进行写表操作。此外，Web 端有如下请求：需对关系型数据库中的百万级数据进行多条件随机组合进行快速检索。

数据库检索技术可有效地从海量数据中筛选出满足用户需求的数据。数据库检索优化的目标是尽可能快地从大量数据中检索出满足条件的数据。常见的数据库检索优化方式有硬件层优化、存储引擎优化、表设计优化、利用索引优化、查询结构优化等等。

针对单表多字段百万级以上数据量关系型数据库的多条件随机检索需求，提出一种基于变化数据捕获（Change Data Capture, CDC）^[1]的加快关系型数据库检索速度的优化策略。采用基于日志的 CDC 技术监听关系型数据库中数据的变化情况，将抓取到的信息发送到消息队列 Kafka 中，之后在项目中对该信息进行处理，将关联的检索条件及关系型数据库对应表的主键 ID 写入到 Elasticsearch 中。检索时，首先通过检索条件到 Elasticsearch 中进行分页检索，之后通过从 Elasticsearch 获取到的主键 ID 到关系型数据库中进行检索。实验表明基于 CDC 的加快关系型数据库检索速度的优化策略能有效提高关系型数据库的检索速度。应用于工业互联网安全运营中心系统中，表现良好。

1 相关工作

工业互联网安全运营中心系统，指对工业场景下的网络安全设备进行统一管理，快速且合理的处理网络威胁，有效且全面地进行网络资产管理，以及多角度呈现网络安全状况等等，即以资产为核心，以安全事件管理为流程，建立一套实时的集安全监测、预警与响应于一体的安全管理系统。以便支撑安全服务与安全运维。国内外学术界和工业界对安全运营中心展开了大量研究。其中国外比较完备的 SOC 有 IBM 的 QRadar, Splunk 以及 Micro Focus 的 ArcSight, 国内较为完善的 SOC 产品有绿盟的 NFOCUS ESP, 安恒的 AiLPHA 大数据智能安全平台, 腾讯的 T-Sec 安全运营中心以及奇安信의 NGSOC 等等。针对工业互联网场景下的安全运营中心，相关研究成果

相对较少。



图 1 工业互联网安全运营中心系统整体架构

在 CDC 的研究和应用中，任弘迪^[2]设计了一个基于变更数据捕获的高可用、可扩展的数据复制中心。徐娟等^[3]为汇聚多源异构的医疗数据，设计了基于 CDC 和 ETL 的非结构化数据汇聚模型。Chandra^[4]研究了 CDC 在实时数据仓库中，对三种数据库采用三种不同的测试方法进行变更数据的捕获，得出在相同环境下，不同类型数据源的最佳数据捕获方式是不一样的。谭光玮等^[5]也研究了 CDC 在数据仓库中的应用。采用基于日志的 CDC 机制来实现数据仓库的实时更新方法。江勇等人^[6]提出了一种基于变更数据捕获机制的分布式缓存一致性策略，验证了基于日志的 CDC 在缓存一致性应用中的性能优于基于触发器的 CDC。

在关系型数据库性能调优和查询优化方面，屠要峰^[7]利用新型硬件特性在列式存储引擎中进行优化，利用 GPC 的超高并行计算能力提高查询分析性能。陈渭杰^[8]从硬件加速的角度展开研究，利用可重构硬件作为加速器，研究关系型数据库性能优化技术。李广龙等人^[9]将 AI 技术应用于数据库优化，使用神经网络、深度学习等技术对查询进行优化。Kamatkar^[10]研究了数据库性能调优和查询优化，分析了影响数据库性能的瓶颈并给出了相应的解决方案。将其应用于员工生物识别考勤管理系统表现良好。Hidayat^[11]将遗传算法应用于关系型数据库多表关联查询的优化中，通过对关系的结构进行修改并重新排列关系来优化查询，有效减少了查询的执行时间。

本文在上述研究的基础上，主要研究 CDC 技术在关系数据库搜索优化中的应用，有效解决了单表近千万级数据量、写库频繁从而不适合创建大量索引，但需三秒内快速响应计数请求和多条件随机组合检索请求的问题。同时也满足系统对数据实时性和一致性的要求。

2 基于 CDC 的关系型数据库检索策略的具体实现

本节介绍一种基于 CDC 的加快关系型数据库检索速度的优化模型。

CDC，即变化的数据捕获技术，通常指数据仓库技术(Extract-Transform-Load, ETL)中的 extract。可用于捕获对数据库的修改操作。本文利用 RedHat 开源的 Debezium^[12]实现基于日志的变化数据捕获。Debezium 可实时捕获数据源的变更，形成数据流输出。

非关系型数据库是基于键值对的对应关系，且无需经过 SQL 层的解析，故性能非常高。Elasticsearch 是一个基于 Lucene 的分布式可扩展的搜索服务器，是以文档的形式进行存储。采用倒排索引。将 Term Index 存入内存，可在极短的时间内实现对海量数据的检索。

2.1 配置数据库

设置数据库日志处理参数：

- 1.配置启动数据库时加载 ‘decoderbufs’ 逻辑解码器插件，用于将数据作为协议缓冲区传送；
- 2.配置对预写日志 wal 使用逻辑解码；
- 3.配置最多使用 10 个单独的进程来处理预写日志；

```
1.shared_preload_libraries = 'decoderbufs'
2.wal_level = logical
3.max_wal_senders = 8
4.max_replication_slots = 4
```

- 4.配置服务器允许为流式预写日志的更改创建 10 个逻辑复制槽。

设置复制权限：

- 1.配置 postgres 允许 postgres 用户在本地进行复制；
- 2.配置 postgres 允许 postgres 用户在本地主机使用 IPV4 接收复制修改；

```
1.local replication postgres trust
2.host replication postgres 127.0.0.1/32 trust
3.host replication postgres ::1/128 trust
```

- 3.配置 postgres 允许 postgres 用户在本地主机使用 IPV6 接收复制修改。

设置逻辑复制输出到 Kafka 中的记录信息：

```
alter table table_name REPLICA IDENTITY FULL;
```

2.2 配置 Kafka

本文采用将 Debezium 以插件的形式，部署在 Kafka Connect。Kafka Connect 是单独的服务，需下载 debezium-connector-postgres 连接器(以下简称 DCP)。将 DCP 下所有的 jar 包复制到 kafka 的 lib 下。并手动配置 postgres.properties 以连接 PostgreSQL。

第一次连接到 PostgreSQL 服务器时，连接器会保存数据库指定表的快照。快照完成后，连接器会持续捕获插入、更新和删除数据库内容以及提交到 PostgreSQL 数据库的行级更改。生成数据更改事件记录，并将其发送到 kafka 的主题中。

2.3 数据同步

数据同步的主要功能为消费 Kafka 对应主题中的消息，并将其写入到 Elasticsearch 对应索引中。其核心代码如下：

```
public void accept(String cdcMessage) {
    PayloadDTO payloadDTO = messageToObject(cdcMessage);
    judgeOperation:
    if(DELETE){
        deleteEsById(payloadDTO);
        return;
    } else {
        asyncUpsertEs(payloadDTO);
    }
}
```

accept 方法接收 Kafka 主题中的消息记录，首先将其转换为 Java 中的对象实体。根据操作类型的不同，执行不同的处理逻辑。若为删除操作，则根据主键 ID 删除 Elasticsearch 中的对应数据。如果是插入或更新操作，则判断指定字段是否修改，若未修改，则什么都不做。否则创建 Elasticsearch 中对应的实体对象，实体对象的属性为 PostgreSQL 中对应记录的主键及全部检索条件。之后异步批量插入到 Elasticsearch 中。为兼顾性能和实时性，此处采用周期为 1 秒的定时任务异步进行批量插入或更新。

2.4 数据检索

数据同步至 Elasticsearch 之后，检索功能关键代码如下：

```
public Result<List<EventDTO>> queryAlarmList(QueryDTO queryDTO) {
    Result<List<EventDTO>> results = ResultUtil.success();
    Result<List<LogCdcEvent>> esAlarmEvents = queryEsAlarmList(queryDTO);
    List<Long> alarmEventIds = esAlarmEvents.getData().stream()
        .map(e -> Long.valueOf(e.getEventId()))
        .collect(Collectors.toList());
    List<AlarmEvent> pgEvents = alarmEventMapper.selectBatchIds(alarmEventIds);
    List<EventDTO> alarmEventDtoList = new ArrayList<>();
    fillResultsByPg(alarmEventDtoList, pgEvents);
    return result.setData(alarmEventDtoList).setCount(esAlarmEvents.getCount());
}
```

因 Elasticsearch 中保存数据与关系型数据库中的数据一一对应，且 Elasticsearch 中的数据属性均为检索条件。故检索数据时，首先通过 Elasticsearch 索引进行检索，获取到对应关系型数据库记录的主键 ID，之后，通过主键 ID 在关系型数据库进行批量检索。大大提高了检索效率。

3 应用场景

3.1 应用场景分析

以某一工业互联网安全运营中心系统为例，系统主要功能为接收各类探针上报的各种数据，经清洗、分析、融合后，通过可视化大屏进行展示。以接收到的威胁告警数据为例，经数据清洗模块与数据融合模块处理后，告警数据会被解析，并与资产数据进行融合，写入到关系型数据库中。关系型数据库中的资产表与告警表均有约 50 个字段。现 Web 模块有如下需求：

- 1.通过资产的十多种属性与威胁的十多种属性随机组合进行分页检索；
- 2.对全部告警进行计数统计。

3.2 在工业互联网态势感知系统的具体实施

数据库配置中，将资产表和告警表的逻辑复制发送到 Kafka 中。

```
alter table alarm_event REPLICA IDENTITY FULL;
alter table asset_info REPLICA IDENTITY FULL;
```

Elasticsearch 中只有一个索引 `log_cdc_asset_alarm`，维护告警的检索条件及与告警相关的资产检索条件。在数据同步模块，监听 Kafka 中的资产变更事件和告警变更事件。消费资产变更事件时，更新 `log_cdc_asset_alarm` 中的字段。消费告警变更事件，新增或删除 `log_cdc_asset_alarm` 中的数据。

如 2 所示，在工业互联网安全运营中心系统中，Application 在多数场景下都是直接和 PostgreSQL 进行交互的，但针对上述需求，因直接对 PostgreSQL 数据进行检索，响应时间很慢。故引入基于 CDC 的关系型数据库检索策略以提高 Web 端对 PostgreSQL 数据检索的响应速度。通过 Debezium 组件监听 PostgreSQL 数据库的 Wal 日志信息，将数据记录的变更捕获并发送到消息队列 Kafka 中。之后在同步服务中对 Kafka 中的消息进行处理，同步数据到 Elasticsearch 中。Elasticsearch 中存储的是关联的检索条件及关系型数据库对应数据的主键 id。当 Application 进行检索时，首先根据检索条件到 Elasticsearch 中进行检索，得到告警事件主键 ID，之后通过告警主键 ID 检索 PostgreSQL 中的告警相关属性。从而得到所需信息。

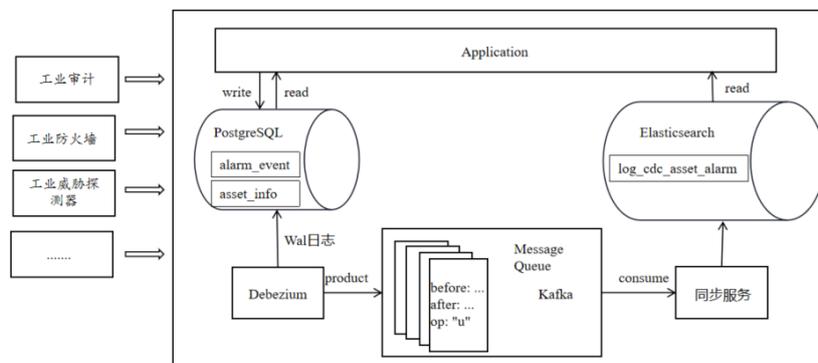


图 2 工业互联网安全运营中心系统中的 CDC 模型

3.3 实验设计

本文使用工业互联网态势感知系统中的关键业务验证本文检索策略的有效性。单表行数超过 500 万行或者单表容量达到 2G 以上,才推荐进行分库分表^[13]。故本文选用 800 万的数据量进行测试。分别从数据一致性和检索数据的响应速度进行验证。实验环境如表 1 所示。

表 1 实验环境软硬件配置

name	configure
Hardware	Intel(R) Core(TM) i3-6100 CPU @ 3.70GHz 16GB Memory
PostgreSQL	9.6.17
Elasticsearch	6.8.4
Kafka	2.12-2.5.0
Java	1.8
Debezium	1.5.2

1.数据一致性验证

本文提出的检索策略主要是基于数据同步实现的,故可通过设置 PostgreSQL 的入库时间戳与 Elasticsearch 的入库时间戳,分析二者时间戳的差值,从而得出数据不一致的时间间隔。实验结果如图 3 所示,其中,横轴代表告警 ID,纵轴代表 Elasticsearch 数据入库时间戳与 PostgreSQL 数据入库时间戳的差值。实验结果表明数据不一致的平均时延在三秒内,完全在用户可接受范围内。

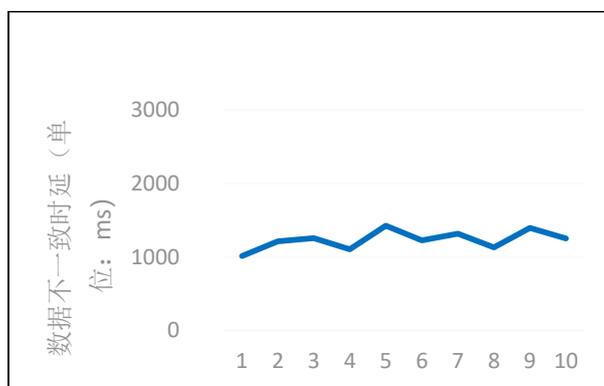


图 3 数据同步时延

2.检索数据的响应速度

对比了直接通过数据库进行分页查询和通过本文提出的基于 CDC 的检索策略进行分页查询消耗的时间。实验结果如图 4 所示,其中,横轴代表实验次数,纵轴代表消耗时间,即检索数据的响应速度,单位为毫秒。实验结果表明,基于 CDC 的检索策略响应时间稳定在 200 ms 以内,而基于索引的检索策略响应时间在 2000 ms 以上。相比于基于索引的分页查询的性能,本文提出的基于 CDC 的检索策略分页查询的性能提升约 10 倍。

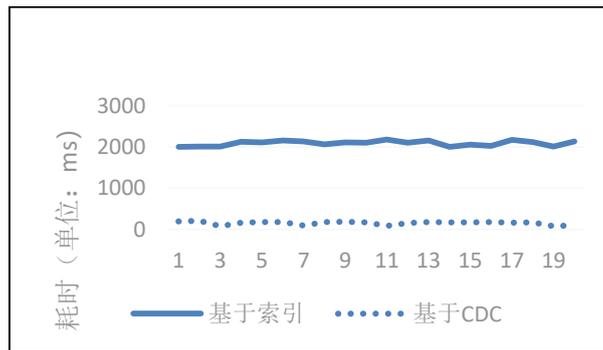


图 4 数据检索响应时间对比

实验表明,本文提出的基于变动数据捕获机制的关系型数据库检索策略能快速响应多条件随机检索的请求。有效解决了以下问题:

- 1.单表多索引进而影响数据插入性能;
- 2.多条件随机检索,进而不适合创建大量索引。

3.4 效果展示

以某家电集团真实场景为例,如图 5 所示,工业安全运营中心部署在企业生产管理层的内网环境中,管理并监控各网络安全设备,并对网络安全设备上报的安全信息进行清洗、融合,经关联分析之后进行可视化展示。即以资产为核心,以安全事件管理为流程,建立一套实时的集安全监测、预警与响应于一体的安全管理系统。其网络资产数为 13,000,企业侧部署的安全信息采集器有工业审计、工业防火墙、工业威胁探测器等网络安全设备,每秒上报的告警数为 5 条左右。单日上报告警数为 40,000 条。

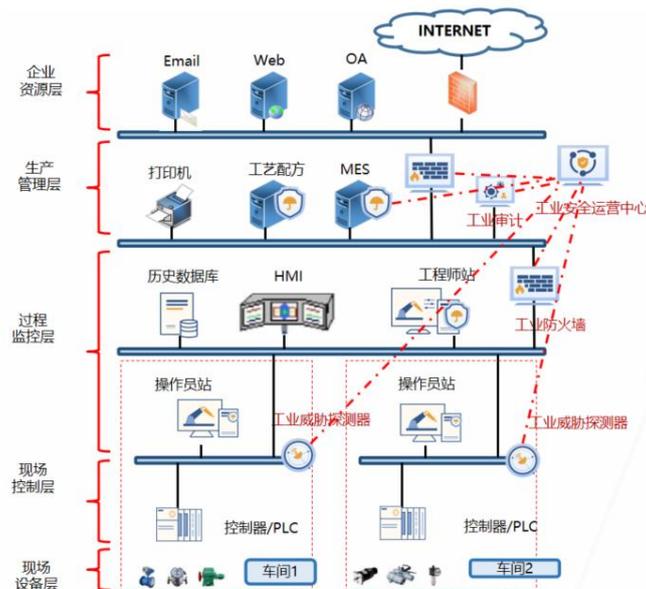


图 5 某家电集团工业互联网安全运营中心系统部署

在 Web 端多次使用不同条件，进行多条件随机组合检索，效果如图 6 所示，服务器后端接口的响应时间均在 1 秒以内，用户体验良好。

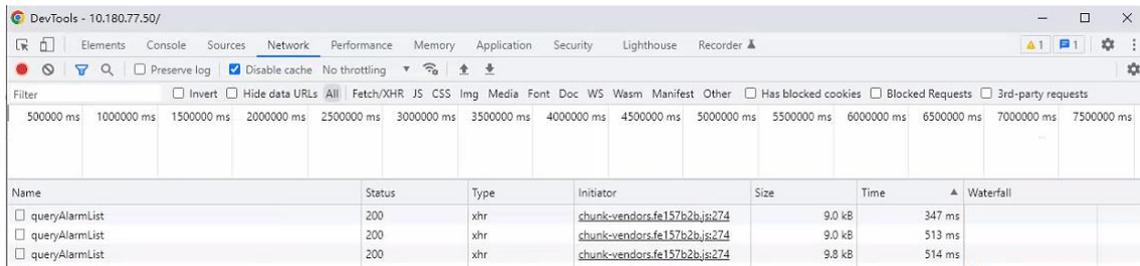


图 6 Web 端多条件随机检索效果

4 结语

本文首先对工业互联网安全运营中心系统研发过程中面临的问题展开介绍。之后，为解决安全运营中心系统面临的问题，分析了当前 CDC 的研究与应用以及关系型数据库性能调优与查询优化，提出一种基于 CDC 的加快关系型数据库检索速度的优化策略。该策略通过基于日志的 CDC 组件 Debezium，将关系型数据库对应表的数据实时同步至 Elasticsearch 中，之后，利用 Elasticsearch 的特点，实现大量数据的多条件随机检索。避免了创建大量索引带来的弊端。将其应用于工业互联网安全运营中心系统，表现良好。

本文中基于 CDC 的关系型数据库检索策略的设计与实现仍存在很大改进空间，需在接下来的工作中进行改进优化：（1）数据同步阶段为综合考虑性能与实时性，采用周期为 1 秒的定时任务异步批量来同步数据到 Elasticsearch 中，对实时性要求较高的场景不适用。（2）本次实验是在单机单节点的场景下进行的，下一步将采用分布式部署，以此验证此方法是否依然有效。（3）针对工业互联网安全运营中心系统的研发，应加强其对不同日志采集的快速适应性。

参考文献

- [1] Redhat.what-is-change-data-capture[EB/OL][2021-03-23].<https://www.redhat.com/en/topics/integration/what-is-change-data-capture/>.
- [2] 任弘迪. 数据复制中心的设计与实现[D].上海交通大学,2020.
- [3] 徐娟,魏子重,高妍方,包国峰.基于多源异构的医疗数据汇聚方法设计与应用[J].软件导刊,2021,20(02):18-23.
- [4] Chandra Harry. Experimental Results on Change Data Capture Methods Implementation in Different Data Structures to Support Real Time Data Warehouse[J]. International Journal of Business Information Systems, 2020, 1(1) : 1-1.
- [5] 谭光玮,武彤.基于 CDC 机制的数据仓库实时数据更新方法研究[J].计算机科学,

2015,42(S1):546-548.

[6] 江勇,苗宗利,王伟等.基于变化数据捕获机制的分布式缓存一致性策略[J].计算机系统应用,2016,25(12):149-154.

[7] 屠要峰,陈河堆,王涵毅,闫宗帅,秦小麟,陈兵.面向 GoldenX 软硬协同优化的异构加速列式存储引擎研究[J].计算机学报,2022,45(01):207-223.

[8] 陈渭杰.数据库硬件加速引擎技术研究[D].浙江大学,2020.

[9] 李广龙,申德荣,聂铁铮,寇月.数据库外基于多模型的学习式查询优化方法[J].浙江大学学报(工学版),2022,56(02):288-296.

[10] Kamatkar S J, Kamble A, Vilorio A, et al. Database Performance Tuning and Query Optimization[C]// International Conference on Data Mining and Big Data. Springer, Cham, 2018:3-11.

[11] Hidayat Kukuh Triyuliarno and Arifudin Riza and Alamsyah Alamsyah. Genetic Algorithm for Relational Database Optimization in Reducing Query Execution Time[J]. Scientific Journal of Informatics, 2018, 5(1) : 27-27.

[12] Debezium[EB/OL][2021-12-16].<https://debezium.io/>.

[13] Alibaba.Alibaba-Java-Coding-Guidelines.[EB/OL][2022-01-05]<https://alibaba.github.io/Alibaba-Java-Coding-Guidelines/>.

作者简介

陶耀东:北京双湃智安科技有限公司首席科学家。长期从事工业互联网安全、信息安全、工业控制系统等方面的研究工作。

姚晓飞:中国科学院大学沈阳计算技术研究所硕士研究生在读。主要研究方向为工业互联网安全。

纪胜龙:奇安信科技集团股份有限公司工程师,长期从事工业互联网安全、机器学习、边缘计算等方面的研究工作。

黄东华:北京双湃智安科技有限公司,长期从事项目管理、工业互联网安全等研究。

基于 5G SA+MEC 企业园区组网的安全方案

胡兆烜¹, 张建敏¹, 冯晓丽²

(1. 中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209; 2. 中国电信集团有限公司, 北京 100033)

摘要: 多接入边缘计算 (MEC, Multi-Access Edge Computing) 在 5G SA (Standalone) 网络下具备低时延、大带宽、高算力等特征, 企业可在园区内基于 5G SA+MEC 组网实现生产、管理业务的数据本地处理, 降低网络时延和抖动, 获得更优质的业务体验。由于 MEC 在 5G 网络边缘引入了容器、虚拟化等技术, 并支持向所承载的应用提供网络能力开放, 在接入、传输、MEC 平台、数据安全及运维管理等层面面临着不同的安全威胁, 因此重点探讨了 5G MEC 在企业园区组网中面临的常见安全风险、对应的安全防护方案及典型案例。

关键词: MEC; 安全; 组网; 5G; 企业园区

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

A Security Scheme of Enterprise park networking based on 5G SA+MEC

HU Zhaoxuan¹, ZHANG Jianmin¹, FENG Xiaoli²

(1. Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. China Telecom Co., Ltd., Beijing 100033, China)

ABSTRACT: Multi-access Edge Computing (MEC) on a 5G SA (Standalone) network has the advantages of low latency, large bandwidth, and high computing power. By using the 5G SA+MEC networking, enterprises can realize locally processing of production and management data, reduce delay and congestion of network, and obtain a better quality of service. Due to the introducing of technologies like container and virtualization at the edge of 5G network, and exposing network capability to the applications it carries, MEC faces different security threats in access network, transmission network, MEC platform, data security, management of operation and maintenance and other aspects. This paper focuses on the common security threats which 5G SA+MEC networking is up against, corresponding security schemes and typical cases.

KEY WORDS: MEC; Security; Networking; 5G; Enterprise park.

随着我国工业互联网的快速发展,以及制造、冶金、矿山等行业的数字化转型升级驱动,企业对时延、算力、安全的要求正在不断提高。在时延方面,工业自动化控制中运动控制通常要求时延在 1ms 级别,过程控制要求时延在 10ms-100ms 级别^[1]。在算力方面,需要系统支持大量工业终端的高并发和对结构化、非结构化数据的本地处理。在安全方面,企业需要降低内部数据的泄露风险,需要应用具备较高的可用性,支持故障时的快速切换和恢复。

MEC 通过将计算存储能力与业务服务能力向网络边缘迁移,使得应用、服务和内容可以实现本地化、近距离、分布式部署^[2]。而 5G MEC 同时具备低时延、大带宽、高算力、数据本地处理等特征,可以准确匹配行业客户业务需求,比较典型的应用场景包括:AGV 搬运、AR 维修等室内大范围移动场景,以及远程驾驶、无人机巡检等室外光纤难覆盖的场景。同时,MEC 还支持异构工业终端的多种网络接入,面向固定或室内小范围移动场景,兼容企业的已有固网、Wi-Fi 接入设备,降低改造成本和对现有业务的影响。

得益于上述优势,目前 5G MEC 在垂直行业中的应用不断深入,正逐渐融入制造、矿山、电力、交通、警务等关系基础设施和国计民生的重要领域。此类业务对准确度、可靠性要求较高,因网络攻击导致的网络拥塞、计算资源宕机、应用软件不可用、数据篡改都极易引发严重事故。所以做好安全防护,规避和减少 5G SA+MEC 组网下的安全风险,已经是业界普遍关注的重点问题。

1 5G SA+MEC 园区组网的安全分析

常见的企业园区 5G SA+MEC 组网如图 1 所示,由运营商在企业园区内部署下沉的 UPF 网元((User Plane Function,用户面功能)和 MEC 平台,当要求严格的数据不出园区时,还会下沉部署承载网接入层设备。运营商侧 5G 核心网只负责与园区的终端、UPF 进行 5G 的控制信令交互。各类终端从 5G 宏站、室分接入,经承载网传输至园区下沉 UPF,本地业务流量由园区 UPF 以 DNN 或 ULCL 等模式分流至 MEC 平台,通过 MEC 平台提供的高算力实现数据在企业园区的就近处理。MEC 支持客户自主管理,可以与企业内网按需打通,实现与内网各业务平台的协同。

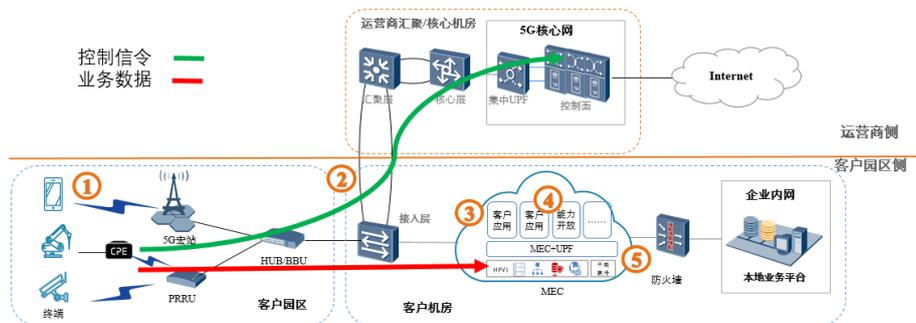


图 1 常见企业园区的 5G SA+MEC 组网架构

在上述常见的 5G SA+MEC 组网下，整个业务流程主要面临的安全风险可归纳为五类：

一是接入风险，主要包括终端和接入网面临的安全风险，例如：基站被物理破坏、入侵；伪基站对用户欺诈；非法用户凭证（SIM 卡）和非授权终端接入；终端非法滥用（离开园区、攻击等异常行为）；空口数据/信令被窃取/篡改；大量恶意连接造成基站不可用等。

二是传输风险，主要包括数据传输过程中面临的安全风险，例如：接入层设备故障或被物理破坏；数据传输过程中被窃听、篡改；传输链路被物理破坏或不可靠；UPF 等转发网元的故障；不同用户/业务共用传输链路，缺乏保密性和可用性保障等。

三是 MEC 平台风险，主要包括 MEC 节点面临的从物理层至应用层面面临的安全威胁以及不规范的运维操作导致的安全风险，例如：对主机的物理破坏、非法插线接入；不安全组网导致 MEC、UPF 甚至 5GC 被攻击；物理机、NFVI 等基础设施被黑客登录、操作系统的漏洞；宿主机/虚机的漏洞、容器/虚拟机镜像的篡改、容器逃逸；平台非授权登录、通过 API 接口窃取通信数据、非法调用 API 接口；APP 的非法创建删除修改、植入恶意 APP 进行东西向攻击；后台删改日志、数据，无备份情况下升级等不规范的运维操作等。

四是数据风险，主要包括客户、应用数据的面临的风险，例如：数据的损毁、篡改、窃取；对敏感数据的非授权导出、创建、删除等。

五是管理风险，网络与信息安全是由技术、人员、管理三者共同构成的，缺乏规范的管理制度、操作规范和安全意识，精心设计的网络安全防御体系也会形同虚设。

2 基于 5G SA+MEC 园区组网的安全防护方案

下沉 MEC 节点同时与运营商网络、企业内网存在连通路径，安全边界进一步泛化，暴露面增加，目前一般基于业界共识和主流技术，针对前述五类安全风险采用如下的安全防护：

2.1 接入安全

接入安全是指围绕终端安全接入 5G 网络，而在终端、基站侧涉及的一系列包括认证、鉴权、加密、限制、保护等安全手段，具体可包括：

- 物理环境安全

即对基站设备所处的机房采用门禁、监控、入侵告警、设备维护记录、机房准入管理，对设备实施网络接入管理、关闭物理端口等方式保护。

- 用户凭证保护

即对 5G 用户唯一标识符 SUPI 加密以防范伪基站攻击；将用户凭证的长期会话密钥(K 值)在终端加密存储并通过 HTTPS/SFTP 安全协议传输；SUPI 保护方案存储在 UICC 中并限制尝试访问次数等。

- 接入二次认证

即终端应支持 3GPP 主认证（5G-AKA 认证机制等）并在特定场景下支持主认证之外的二次 AAA 认证。

- 非法访问限制

即基于 SUPI、CGI、TAI 等用户和位置标识、流量限制、机卡绑定、IMEI 黑名单多种手段对异常终端限制接入。

- 信令&数据加密

即用户面数据和控制面信令采用 NEA0、128NEA1/2/3、128NIA1/2/3 等 3GPP 算法加密。

- 基站抗重放及可用性保护

即基站具备对重放 RRC 信令和用户面数据识别丢弃能力,通过网管监控 5G 基站关键指标,如 RRC 连接成功率/阻塞率、掉话率等,基站设备启用控制访问。

2.2 传输安全

传输安全主要指业务数据、控制信令在基站、MEC、5G 核心网之间经承载网传输过程中涉及的安全,围绕加密传输及提高传输链路的可靠性和可用性,如图 2 示意,主要包括:

- 高可靠组网

即对承载网接入层设备采用环状组网、对汇聚层设备采用成对组网部署。

- 传输通道加密

即对 N2/N3/X2 接口部署 IPsec 实现加密传输;在接入层和汇聚层设备间基于 PWE3 端到端伪线仿真技术建立 PW 虚链路,数据通过二层隧道(点到点 L2 VPN)承载。

- 承载链路主备

即接入层与汇聚层设备间的 PW 虚链路主备;汇聚层设备提供双网关保护。

- UPF+MEC 主备容灾

即通过下沉 UPF+MEC 间、下沉与大网 UPF+MEC 间的主备/负荷分担等模式提高传输容灾可靠性,参见图 3。

- 端到端切片隔离

无线网切片主要是指无线网会根据报文中已配置的 GBR/Non-GBR (Guaranteed Bit Rate, 保证比特速率)、5QI (5G QoS Identifier, 5G QoS 指示符)等 QoS (Quality of Service, 服务质量)参数,为特定业务、用户群体甚至单个用户提供专用、高优先级的无线网络资源,具体包括为 GBR 业务提供最低带宽保障且不允许其他业务抢占,不同 5QI 对应差异化的转发优先级、丢包率、时延等。

承载网切片可分为硬、软两种不同实现方式,两者可叠加使用。硬切片主要指在公众业务和企业业务之间,以及不同需求的企业业务之间(例如视频监控和应急救援),通过配置不同的 IS-IS 和 OSPF 进程、专用的 VLAN ID 等方式实现网络完全隔离。软切片主要依靠 DSCP

(Differentiated Services Code Point, 差分服务代码点) 以及专用 VPN 实现。其中, DSCP 是 IP 报文头部用于标识优先级的字段, 5G 基站会按照预置规则将 5QI 参数映射为对应的 DSCP 标识, 参见表 1 示意。

表 1 不同类型业务 5QI 与 DSCP 映射

业务	资源类型	5QI 编号	DSCP (示意)
4K/8K 直播 (上行)	GBR	71	34
超低时延保障 (工业控制、远程医疗)	GBR	83	34
通用带宽保障	GBR	4	46
通用优先保障	Non-GBR	6	46

注: 不同 5QI 编号不区分大小, 只在 3GPP 标准中对应不同的无线侧时延、丢包率, 且不对应更高的 DSCP 优先级。比如工业控制要求的时延极低, 但数据处理通常在下沉的 MEC 进行, 不通过承载网长距离传输, 因此虽然配置了对应空口时延极低的 5QI, DSCP 优先级反而低于通用带宽保障。

承载网设备 (STN-A、STN-B) 以及 5G 核心网 UPF 会根据 DSCP 标识进行优先转发并提供 QoS 保障, 转发过程中依据特定的 RT 值 (Route Target, 路由目标) 将报文导入到对应的 VPN 中。

核心网切片主要是指, 核心网侧为特定的某类或单个业务提供独立的 UPF+MEC 或独立的轻量级 5G 核心网, 实现业务享有独立的数据面、控制面。

- 毫秒级故障检测

即在接入层与汇聚层设备间部署双向转发检测 (BFD, Bidirectional Forwarding Detection) 机制, 快速检测链路故障; B 设备与 UPF 间部署 BFD 保护 eBGP/静态业务路由。

当未部署 BFD 时, 常见的 OSPF、IS-IS 等路由协议的 Hello 报文发送间隔默认为 10s, BGP 协议的 Keepalive 报文发送间隔默认 60s, 当 3 个周期以上未接收到报文则判定故障。而 BFD 是一种基于 UDP 的应用层协议, 提供通用、标准、和协议无关的快速故障检测, 实际应用中可与 OSPF、IS-IS、BGP、MPLS 等其他协议联动, 由其联动的协议通知 BFD 邻居信息, 两台邻居设备建立 BFD 会话, 之后相互以毫秒为单位 (常见设备上可设置为 10 至 2000ms) 周期性发送接收 BFD 控制报文, 当指定的检测周期 (例如 3 个接收周期, 30ms) 内检测不到 BFD 报文时, BFD 会通知上层应用进行故障处理, 从而将故障检测周期控制在毫秒级别。

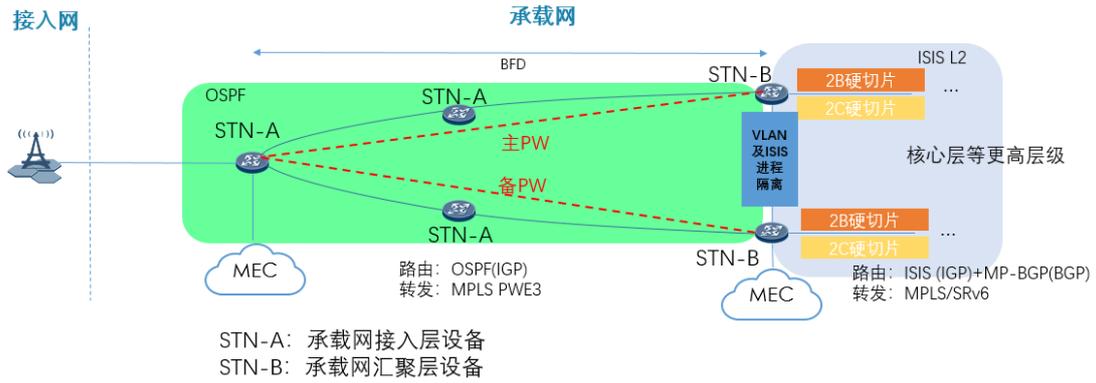


图2 常见承载网传输安全保障方案

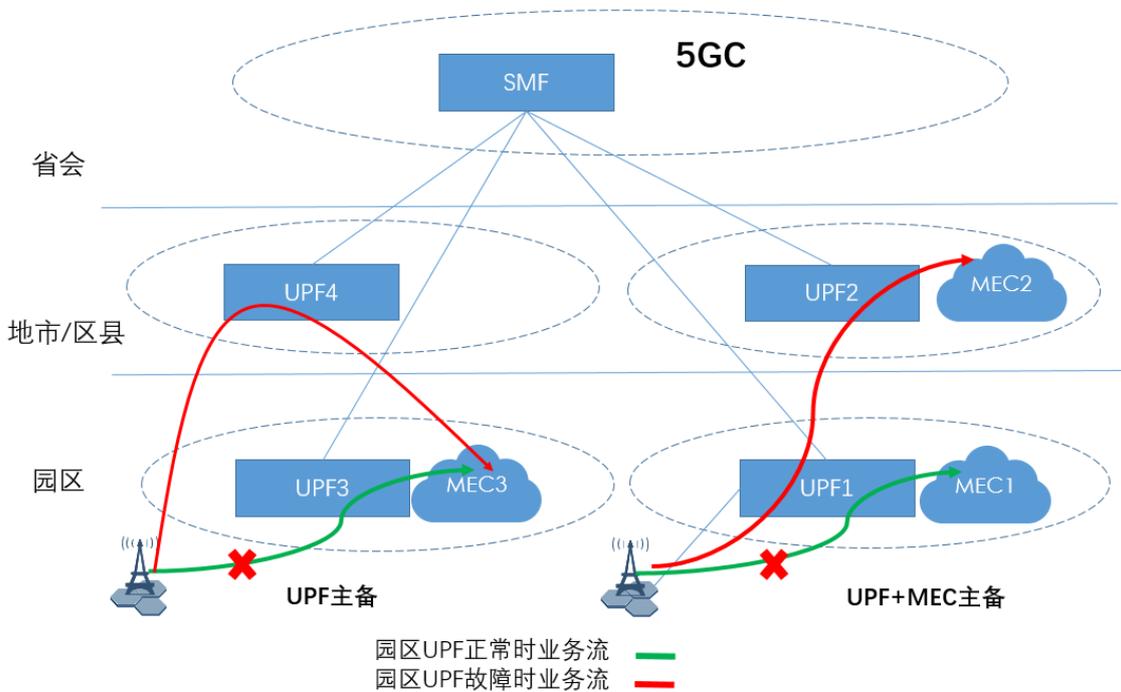


图3 UPF+MEC 主备容灾方案

2.3 MEC 平台安全

MEC 平台安全主要指边缘 MEC 节点涉及的安全，重点从 MEC 自身安全、MEC 承载的应用、与外部系统互联等方面出发，提供从物理层至应用层自底而上的全方位安全防护，如图 4、图 5 所示：

- 物理环境安全

即确保 MEC 节点所在机房具备防拆、防盗、防断电、防火、防水、电磁防护、人员进出等物理安全防护。

- 组网安全

将 MEC 平台流量划分为管理、存储、业务三平面，不同平面独占网口，物理隔离；通过部署防火墙实现 MEC 平台与 UPF 间、MEC 平台与客户内网安全隔离；交换机配置 VLAN 隔离、防火墙配置访问控制、资源池与其他系统不共用物理资源；UPF 侧配置白名单，针对 N4、N6、N9 配置 VRF 隔离，与 SMF 的 N4 接口设置访问控制。

- 基础设施安全

即对底层硬件、NFVI 等基础设施配置认证/鉴权和访问控制，包括：复杂口令、登录失败次数限制、支持账号主动退出、管理账号权限最小化等；关闭不必要的服务/端口，进行安全基线配置和加固，对接集中安全平台进行安全审计；确保 UPF 具备防地址欺骗、异常报文丢弃、ACL 过滤、告警和 IPsec 隧道等能力；确保 MEC 平台具备资源管理机制，限定单个用户、进程对资源使用的最大限度，并在单个虚拟机崩溃后不会影响 Hypervisor 和其他虚拟机。

- 虚拟化安全

即对宿主机、虚拟机、虚拟化等不同层面进行安全加固；开启镜像完整性校验，使用 HTTPS 等安全传输通道进行镜像上传；Hypervisor 设置对虚拟机操作和使用资源权限的限制，同一物理机上不同虚拟机隔离并监控资源使用情况；MEC 平台在部署阶段对镜像仓库进行安全监管、对上传的容器镜像进行漏洞扫描，在运行时确保容器实例与宿主机内核隔离。

- 平台安全

在 MEC 平台上开启访问的认证和授权机制，防止非法访问篡改；确保 MEC 平台对外接口支持通信双方双向认证；MEP-APP 之间通信进行加密；API 接口采用安全的通信协议和通道，如 TLS，不使用 Telnet、FTP、SSHv1 等不安全协议；对接入到 MEC 节点的终端进行身份识别。

- 应用安全

确保 MEC 平台可对应用全生命周期管理和监控，防止应用的非法创建、修改及删除；同时基于 K8S 内部网络、虚拟防火墙等手段实现应用间隔离；确保 MEC 平台对 APP 资源使用情况进行实时监控和限制管理；对应用进行漏洞扫描和加固，对镜像进行病毒查杀。

- 运维管理安全

即通过统一自服务门户对宿主机、虚拟机、虚拟化管理、MEC 平台、APP 进行运维管理，提供性能告警并留存系统日志，并按需对接集中告警监控平台。

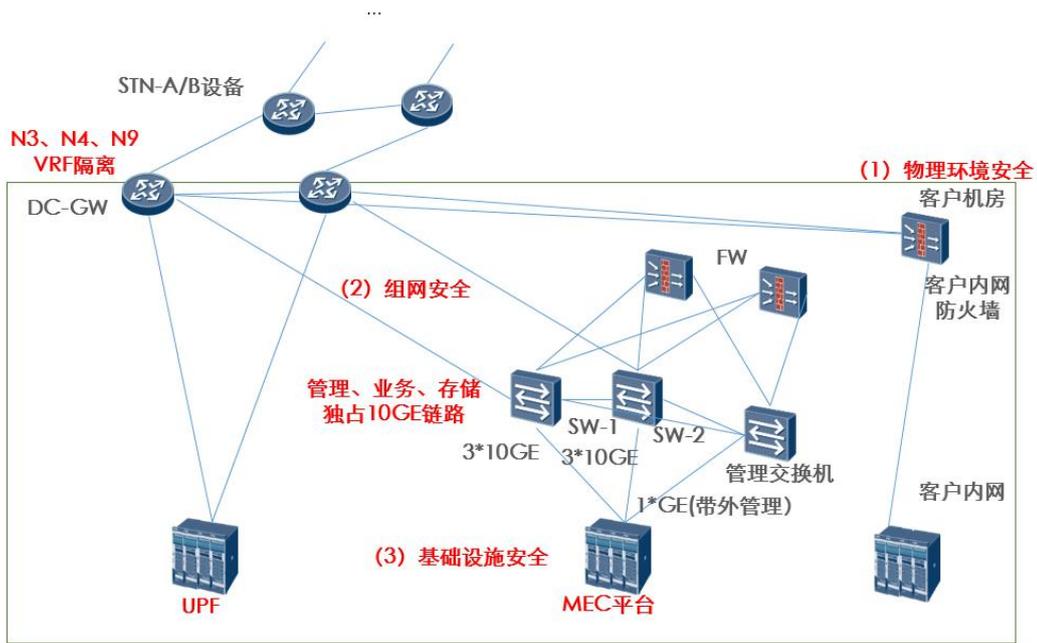


图 4 典型 MEC 企业园区机房组网拓扑

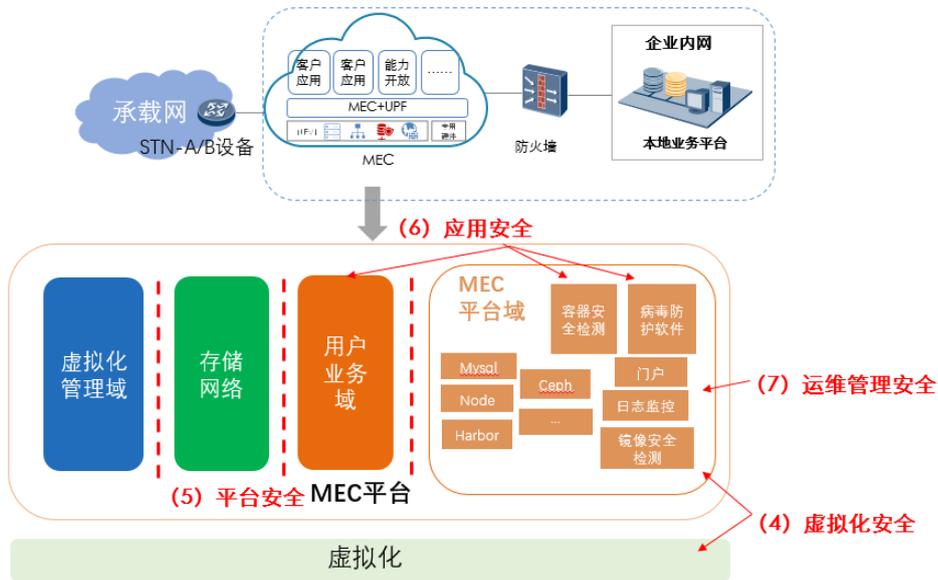


图 5 MEC 平台虚拟化层以上安全架构示意图

2.4 数据安全

近年来，企业数据泄露、篡改等问题频发，数据安全问题愈发凸显。我国在《数据安全法》中明确建立数据分类分级保护制度，根据数据的重要程度及一旦遭到篡改、破坏、泄露或者非法获取、非法利用造成的危害程度，对数据实行分类分级保护。因此数据安全主要应防止数据的篡改、破坏和泄露，一般通过以下手段对数据提供保护：

- 数据备份恢复

采用基于软件定义存储（SDS）技术的多副本分布式存储方案，如图 6 所示，数据依据算法自动均衡分布在不同存储节点，支持节点的快速添加和删除横向扩展，支持节点故障或损坏后数据自动重建自愈，避免数据受到破坏。

- 数据本地处理

通过 UPF+MEC 下沉部署，实现数据采集、处理、存储等全生命周期本地化，规避数据泄露至企业园区外部。

- 数据安全审计：

按需部署审计设备或对接集中安全审计平台对数据导出、变更、系统日志进行审计，避免数据被非法篡改、获取。

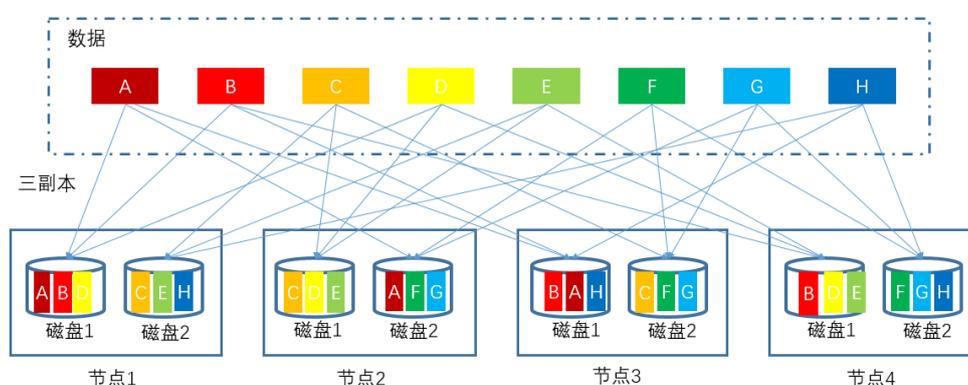


图 6 多副本分布式存储方案（以三副本为例）

2.5 运维管理安全

即便再先进的安全技术和完善的防护方案，也需要安全管理人员的执行，因此除了前述四部分安全外，MEC 所有者还需要建立规范的安全管理制度、设置安全管理机构、配置专兼职安全管理人员、进行安全意识及技能培训、系统建设和运行维护过程中遵循相应制度和规范等。

3 典型案例

某大型石化企业在进行 5G MEC 项目建设时，考虑到石化原料通常具有易燃易爆有毒等危险特征，一旦企业遭受网络攻击、数据篡改产生业务中断，极易引发严重的生产事故导致人员伤亡，因此对于网络安全保障存在强需求。项目依据客户需求，以至少满足等保 2 级为目标为企业提供网络与信息安全保障，网络拓扑如图 7：

整体物理安全由企业园区机房提供不低于等保 2 级要求的门禁、机房准入、防火防水防静电等措施，不再赘述。

在接入安全方面，除提供 5G SA 网络标准的认证、鉴权、加密算法、基站安全防护外，还通

过限制特定 DNN、只允许用户在特定位置和基站接入等方式实现网络的安全接入和终端访问控制。

在传输安全方面，承载网接入层设备（STN-A）和网关设备在企业园区内成对部署，各传输链路呈双星型或口字型冗余互联，数据传输过程中采用 IPsec 加密。

在 MEC 平台安全方面，一是组网安全，将 MEC 平台流量三平面隔离，在 MEC 平台、边缘 UPF 和企业内网间部署防火墙，并在防火墙、交换机配置 VLAN、ACL 控制访问策略，同时 UPF N4、N6、N9 等接口配置独立的 VRF 隔离和访问控制。

二是基础设施安全，对网络设备、服务器、NFVI 等配置复杂口令认证和访问控制，关闭不必要的服务/端口，部署安管一体机，实现基础设施的漏洞扫描、安全基线配置和安全审计，UPF 提供防地址欺骗、异常报文丢弃等安全能力，MEC 平台提供资源管理机制。

三是虚拟化安全、平台安全和应用安全，此三部分安全能力主要由 MEC 平台提供，通过部署和运用镜像安全扫描、容器安全检测、TLS 加密协议、用户登录鉴权、VPC 隔离等技术实现。

最后，企业可通过 MEC 平台自助服务门户统一对宿主机、虚拟机、MEC 平台等不同层面进行启动、关闭、查看告警、业务恢复等操作，实现运维管理安全。

在数据安全方面，一是采用三副本分布式存储和存储计算分离的架构提供数据恢复和可靠保障，二是通过安管一体机实现日志安全审计，三是通过下沉专用的承载网接入设备和独享型 MEC 实现数据不出园区，避免数据泄露风险。

在管理安全方面，企业已建立安全管理制度和机构、配置专职安全管理人员，并制定应急预案，定期组织应急演练，运营商负责提供专业安全响应团队进行 7*24 小时技术支持。

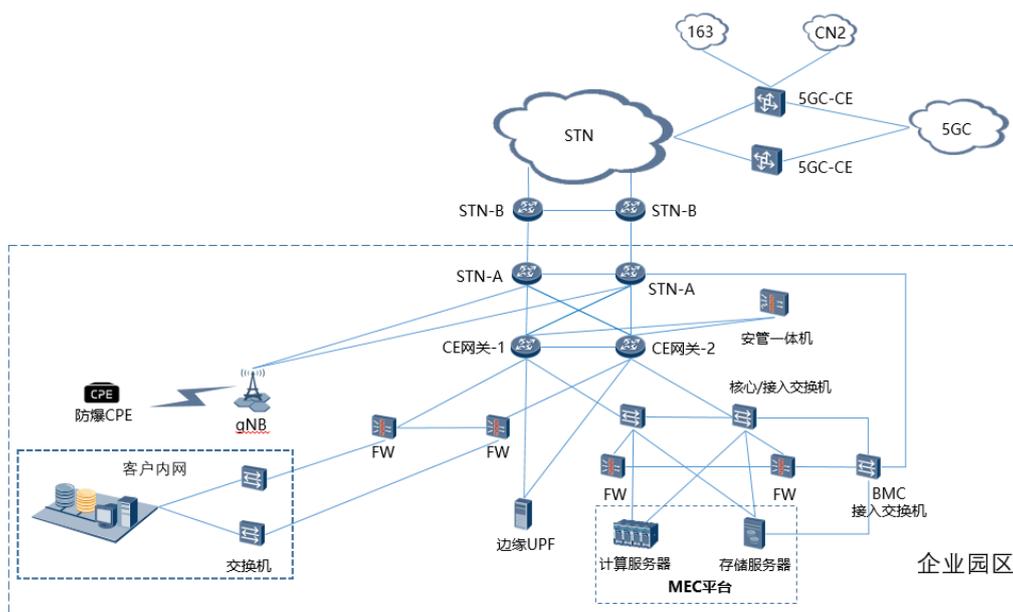


图 7 5G SA+MEC 企业园区安全典型案例

4 结语

5G MEC 在运营商网络边缘引入了云计算和 IT 服务环境,使得运营商原本封闭的承载网网络架构更加开放,企业业务数据会经运营商承载网再进入企业,所以对运营商和企业来说,MEC 均不属于传统的安全域,云网基础设施、企业内网与业务应用在 MEC 上交错,网络安全边界进一步模糊,而相关的行业标准还在探讨制定,因此 5G SA+MEC 企业园区组网的安全防护还面临很多问题与挑战亟待研究解决:

● 容器逃逸带来的安全挑战

由于容器与宿主机共用内核,并且在内核层面的隔离性不足,这使得攻击者可通过利用漏洞“逃逸”出自身拥有的权限,实现对宿主机或宿主机上其他容器的访问[3]。由于 MEC 平台一般采用云原生架构,因此也不可避免地面临着容器逃逸问题,容器逃逸将直接影响到了 MEC 承载容器的底层基础设施,攻击者可以借此获得主机上的 root 级访问权限甚至接管 K8S 集群。

● 网元下沉带来的安全挑战

在当前 5G SA+MEC 组网下,企业园区内下沉部署边缘 UPF 和 MEC,使得用户数据在本地处理,大幅提高了数据安全性,并可以基于前文方案加强安全防护,但 5G 控制信令主要仍由企业园区外的运营商核心网处理,控制信令在园区外传输过程中同样面临着传统网络架构下的窃听、篡改等威胁,因此部分对安全程度需求极高的企业,典型的如矿山等,会进一步希望在企业园区内下沉轻量级的 5G 核心网,实现控制信令和业务数据完全在本地处理,5G 核心网的下沉又会进一步增加 5G 网络暴露面,使得 5G 网络更易受到攻击。

● 第三方应用带来的安全挑战

MEC 节点上一般承载了多个第三方应用,一旦一个应用出现安全漏洞,极易被攻击者利用、入侵甚至利用共享的底层设施并进行横向渗透,因此需要各应用厂商遵循统一的安全规范和标准,避免出现木桶效应。另外,云边协同、多个 MEC 间的容灾备份也使得安全问题更加复杂,入侵者植入的病毒、木马可能会随着第三方应用的部署从企业园区复制扩散至运营商 5G 核心网,甚至利用共享 MEC 或公有云进一步渗透至其他企业。

参考文献

[1] 边缘计算产业联盟,工业互联网产业联盟,网络 5.0 产业和技术创新联盟.5G 时代工业互联网边缘计算网络白皮书[R].北京:边缘计算产业联盟,工业互联网产业联盟,网络 5.0 产业和技术创新联盟,2020.

[2] 张建敏,谢伟良,杨峰义,等.5G MEC 融合架构及部署策略[J].电信科学,2018,34(04):109-117.

[3] 陈俊杰,陈奋,陈荣有.Docker 容器逃逸的防御方法研究:2020 中国网络安全等级保

护和关键信息基础设施保护大会论文集, 2020[C].南宁: 《计算机工程与应用》编辑部, 2020: 163-168.

作者简介

胡兆炬: 男, 工程师, 硕士, 任职于中国电信股份有限公司研究院, 主要研究方向为边缘计算、网络与信息安全等

张建敏: 男, 教授级高级工程师, 博士, 任职于中国电信股份有限公司研究院, 主要研究方向为移动通信技术、边缘计算等。

冯晓丽: 女, 硕士, 中国电信集团有限公司高级项目经理, 主要从事 5G MEC 产品运营等工作

联系人:

胡兆炬

地址: 北京市昌平区北七家镇未来科技城南区中国电信北京信息科技创新园 邮编: 102209

手机: 19110352826 电子邮件: huzhx6@chinatelecom.cn

基于 5G+边缘计算的智能安防系统 在工业安全生产中的应用实践

刘鹏英¹, 杜召娟¹, 陈振宇¹, 赵士超¹, 任涛林¹, 胡明臣¹, 于海东¹, 林宏¹

(1.卡奥斯工业智能研究院(青岛)有限公司, 青岛 266426)

摘要: 针对当前智能视频监控业务基于公有云无法保障用户数据私密性及实时可靠性的问题, 本文提出了基于 5G+边缘计算的智能安防系统, 通过构建 5G 虚拟专网并结合边缘计算 (MEC) 技术, 在保障园区数据不出厂、传输低时延的基础上, 实现安防视频的 AI 算法分析, 有效用于人车分流、劳保用品识别、人岗匹配、电子围栏等多个场景。在海尔工厂实践中实现了多场景安全事件的主动预警, 极大程度降低了监控人员的人工成本及安全事件事后处理成本。

关键词: 智能安防系统; 5G; 边缘计算; AI; 视频分析

中图分类号: TN05

文献标识码: A

Application practice of intelligent security system based on 5G + MEC in industry safety production

LIU PY, DU ZJ, CHEN ZY, ZHAO SC, REN TL, HU MC, YU HD, LIN H

(1. COSMOPlat Institute of Industrial Intelligence, Qingdao 266426)

ABSTRACT: Aiming at the problem that the current intelligent video surveillance based on the public cloud cannot guarantee the privacy of user data and real-time reliability, this paper proposes an intelligent security system based on 5G + MEC (Multi-access Edge Computing) by building a 5G virtual private network and combining with MEC technology, data privacy and low transmission delay are ensured, and finally realized the AI algorithm analysis of security video, which is effectively used in multiple scenarios such as people-vehicle diversion, labor protection equipment identification, person-post matching, and electronic fence. In the practice of Haier factory, active early warning of various safety incidents has been realized, which greatly reduces the labor cost of monitoring personnel and the post-processing cost of security incidents.

KEY WORDS: Intelligent security system; 5G; edge computing; AI; video analysis.

随着人们对于工业生产安全防护意识的提高, 工业园区视频安全防护系统的重要性也愈发突出^[1]。工业园区规模较大, 人员较多较杂, 安全系数要求高, 而传统的视频监控对园区中发生的

安全事件只具备记录功能，很大程度上依赖于人的判断，人受限于精力和注意力等多方面因素，会导致误判、误报、漏报、瞒报等现象发生，带来安全隐患^[2]。除此以外，传统监控系统在前期布线过程中易受监控地域诸多物理条件限制，且由于网络布线架构的复杂性也使后期监控系统的维护费用居高不下^[3]。

针对传统视频监控中的不足，将智能化分析模块转移到云端处理是目前工厂普遍采用的解决方案，由传统人防转变为智能安防。然而一方面由于该方案视频数据传送路径长导致时延较高，一些实时的视频分析功能因数据滞后而减少实用性；另一方面，由于该方案需要连接到公网，工厂特殊的应用环境以及高要求的数据保密，使得数据安全性存在严重风险。

5G 和边缘计算（Multi-access Edge Computing, MEC）技术可以实现业务本地化及近距离部署^[4]，已成功应用于校园^[5]、电力^[6]，车联网^[7]等应用场景。由此，针对目前视频监控的痛点，本文提出了基于 5G+边缘计算的智能安防系统，通过构建 5G 虚拟专网保障数据不出厂，通过 MEC 在边缘侧进行计算存储降低时延，实现工厂多场景安全事件的主动预警。

1 基础架构

1.1 网络架构

基于 5G+边缘计算的智能安防系统以 5G 关键技术为保障，结合边缘计算技术，并将 UPF（用户平面功能）下沉到工业园区内，对业务数据进行分流和卸载，可以满足园区数据不出厂并且有效降低时延。图 1 所示为 5G+边缘计算的智能安防系统的网络架构，主要由终端、无线侧的 5G 基站、MEC、传输网、核心网几部分组成。工厂的终端设备--摄像头如具备 5G 模组，可接入 5G 网络；如果是普通摄像机点位，需增设 5G 网关接入至 5G 网络。5G 核心网网络架构的关键基础技术之一是控制面和用户面分离（CUPS），控制面的功能由多个 NF（网络功能）承载，用户面的功能由 UPF 承载^[8]。由此可以将本地业务的数据直接分流到 MEC，在工厂边缘侧提供视频分析的信息技术服务，并且网络的安全功能、管理功能等同时下沉到边缘，就近提供前端服务，避免了流量在核心网的迂回，降低了传输时延。工厂终端设备的控制面信令如 IP 地址由核心网 SMF（会话管理功能）或 UPF 分配^[9-10]，如图虚线所示。工业设备的数据流(如图 1 所示实曲线)经由基站，转发到下沉到工厂的 UPF，由 UPF 转发至 MEC。视频在 MEC 系统中进行 AI 分析后，检测分析结果传回终端的可视化管理平台，最终实现安全场景的可视、可管、可控，安全问题的及时发现、及时处理。

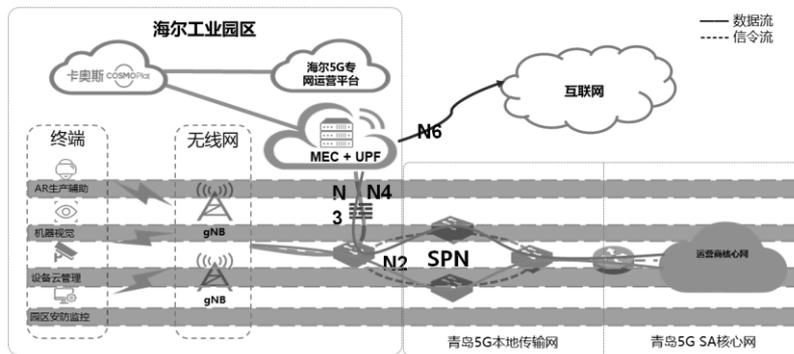


图 1 5G+边缘计算的智能安防系统的网络架构

1.2 边缘计算视频分析单元架构

MEC 视频分析单元，融合网络，视频编解码处理，视频分析和存储等核心能力，可以在靠近工厂现场的网络边缘侧就近提供视频分析服务，满足工业现场对视频安防智能分析实时业务的关键需求。边缘计算节点的视频分析单元架构如图所示，MEC 的平台层 (MEC Platform, MEP)，负责控制和管理部署在 MEC 系统中 SAAS 化应用的算力、GPU、存储空间和网络等资源，在此基础上，进行自动化业务编排^[11]。视频管理平台提供视频接入、存储、转发等服务，实现多种 AI 算法调度和策略分发。可自行配置 AI 算法，涵盖人脸识别、人机识别、人岗检测、安全帽检测、安全服检测、反光服检测和电子区域划定、位置检测和人员追踪等服务。视频管理平台通过调度不同算法及其组合，用于不同的应用场景，输出可视化平台。例如，视频管理平台通过叠加人脸识别、人机识别、电子区域划定、位置检测和人员追踪算法，可形成人车分流可视化管理平台，用于判断行人（车辆）是否处于人行道（机动车道），若检测结果出现异常，人车分流可视化管理平台会联动警报装置，对现场进行告警，并在可视化平台上显示告警信息。同理可用于智能访客、人岗匹配、劳保用品检测、电子围栏等多个场景，实现对工业园区内各种安全事件进行主动预警，做到无盲点自动监控，实现视频监控的智能化转型。

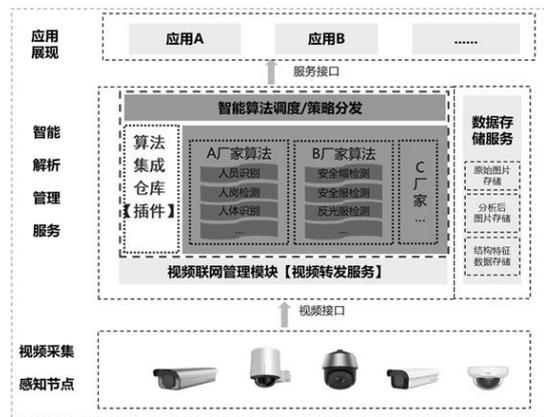


图 2 边缘计算视频分析单元架构

2 应用场景

2.1 人车分流

基于 5G+边缘计算的 AI 视频分析-人车分流检测，能够自动分析摄像机捕捉的图像数据，实现厂区内车行道、人行道的车间交警管控，当异常发生时，系统会准确及时地发出警报。其算法流程图如图 3 所示，首先对接收的视频流进行对象检测、识别确定人员/车辆，然后将其对象区域与开始标定的车行道区域进行重合度检测，若重合度检测合格，用绿颜色在视频管理平台标记，若不合格，则记录车辆的车牌号/人员姓名，在视频管理平台标记并显示预警信息，并联动客户端麦克风发出警报。

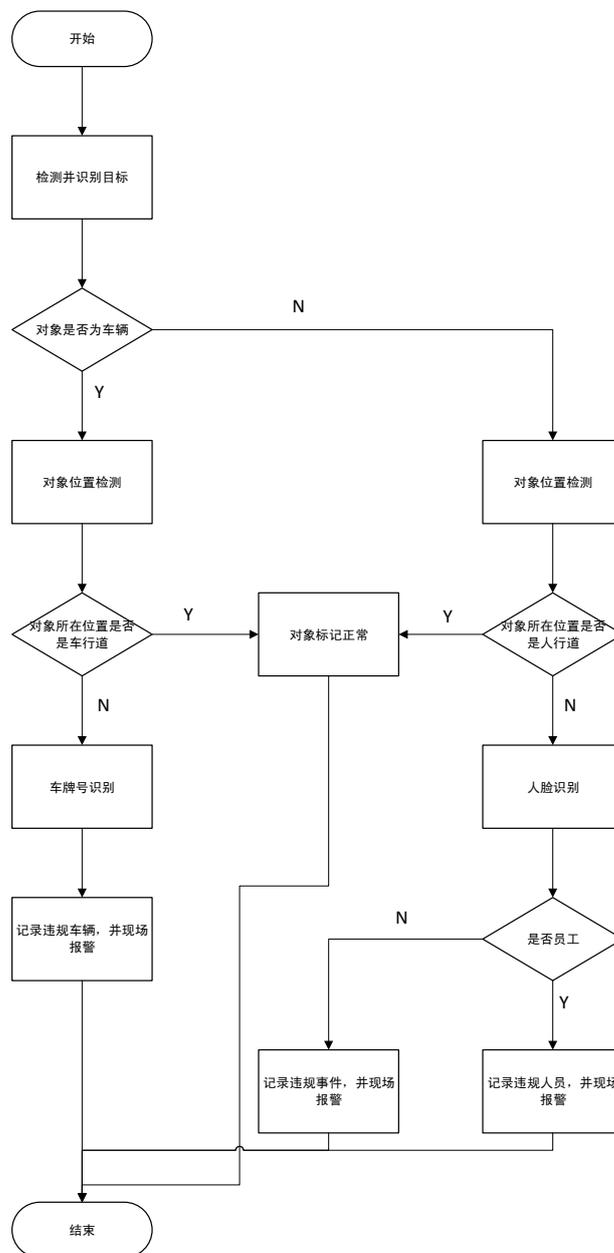


图 3 人车分流算法流程图

目前基于 5G+边缘计算的 AI 视频分析-人车分流检测已在工厂物料运输、特种车辆与人交替作业等场景得到了广泛的应用，如图 4 所示，采用 5G 边缘计算的 AI 视频分析人车分流，摄像头无需连接网线，取而代之的是集成了 5G 模组的摄像头，现场部署轻量化，算法上移到 MEC 可实现数据、算法的多地点共享，整体投资降低 20%，同时交付周期缩短了 50%以上。且该系统自应用以来，海尔智慧工厂摆脱了现场安保工作依靠人工排班，24h 轮流值守现场监控的问题，大大降低了事故发生；对于车辆违章也可以即时纠偏；实时抓拍、报警推送相关危险行为给工厂负责人员，避免安全事故发生，减少工伤损失。24h 异常抓拍报警，广播、大屏滚动播出，对员工形成警示、震慑，由事后被动追责变事前主动预防。



图 4 海尔智慧工厂的人车分流监控平台

2.2 劳保用品识别

基于 5G+边缘计算的 AI 视频分析-劳保用品识别，能够对进入作业区域员工进行劳保用品佩戴识别，杜绝因劳保用品佩戴不当引发的危险，保障工厂工人的生命安全。

目前基于 5G+边缘计算的 AI 劳保用品识别已广泛应用于海尔工厂静电房、立体库等区域，如图 5 所示。采用 5G 边缘计算的 AI 视频分析操作工人劳保用品佩戴情况，以“眼”、“线”、“脑”的模式实现生产安全的智能管理，“眼”是通过摄像头来采集基本数据；“线”是借助 5G 的高可靠性、低时延、广物联的特点进行数据传输，达到监控画面与数据分析结果输出实时同步的要求；“脑”是基于边缘计算视频分析单元中人工智能算法模型对实时上传的数据进行实时智能监测。通过这样一套处理可以对企业生产进行实时智能监测，发现安全隐患并及时现场报警、形成可视化的违规操作记录图，让管理者对车间的生产安全管理情况有更全面的了解并做出及时的管理决策。



图5 海尔智慧工厂的劳保用品监控平台

2.3 人岗匹配

基于 5G+边缘计算的 AI 视频分析-人岗匹配, 实现生产车间内摄像头面部识别, 自动匹配岗位, 既能满足员工无感考勤的需求, 又能匹配员工岗位权限、审查操作资质, 解决人为替岗的现象, 为工厂管理带来便捷。

目前基于 5G+边缘计算的 AI 人岗匹配已在海尔智慧工厂得到了广泛的应用, 如图 6 所示, 其摆脱了依靠人为纸质排班, 现场检查确认员工值班情况的痛点, 大大降低了管理成本; 人岗匹配可实时检测违规操作、越权操作等行为, 及时发现危险行为并实施报警提醒大大降低了事故发生, 确保了员工安全, 减少工伤损失。月度人岗匹配, 工时统计也便于管理人员运营排班管理。边缘计算的智能化应用也保证了 5G+视频监控系统的稳定性和可持续性, 有效降低了工厂安全管理人员投入, 保障了工厂系统的高可用性和持续稳定运行。



图6 海尔智慧工厂的人岗匹配监控平台

2.4 电子围栏

基于 5G+边缘计算的 AI 视频分析防跨越线体电子围栏检测，对进入电子围栏的人员进行信息识别、行为感知、对违章进行抓拍报警。其算法流程图如图 7 所示，根据业务需求在后端基于地图设定报警的电子围栏区域，并由对应的边缘侧服务器对电子围栏区域进行信息处理、业务维护。边缘侧实时监测人员轨迹和特征，当监测到人在电子围栏范围时，进行动作行为判定，判定是否违反了电子围栏设定的规则。如果没有违反，则视为正常事件，作为人员轨迹记录；如果违反了安全规则，则视为违规事件进行报警，边缘侧将违规事件相关的信息生成报警消息发给后台，后台接收报警消息并第一时间将消息推送给现场大屏广播及第三方联动系统，急停机械设备，降低工伤事故。

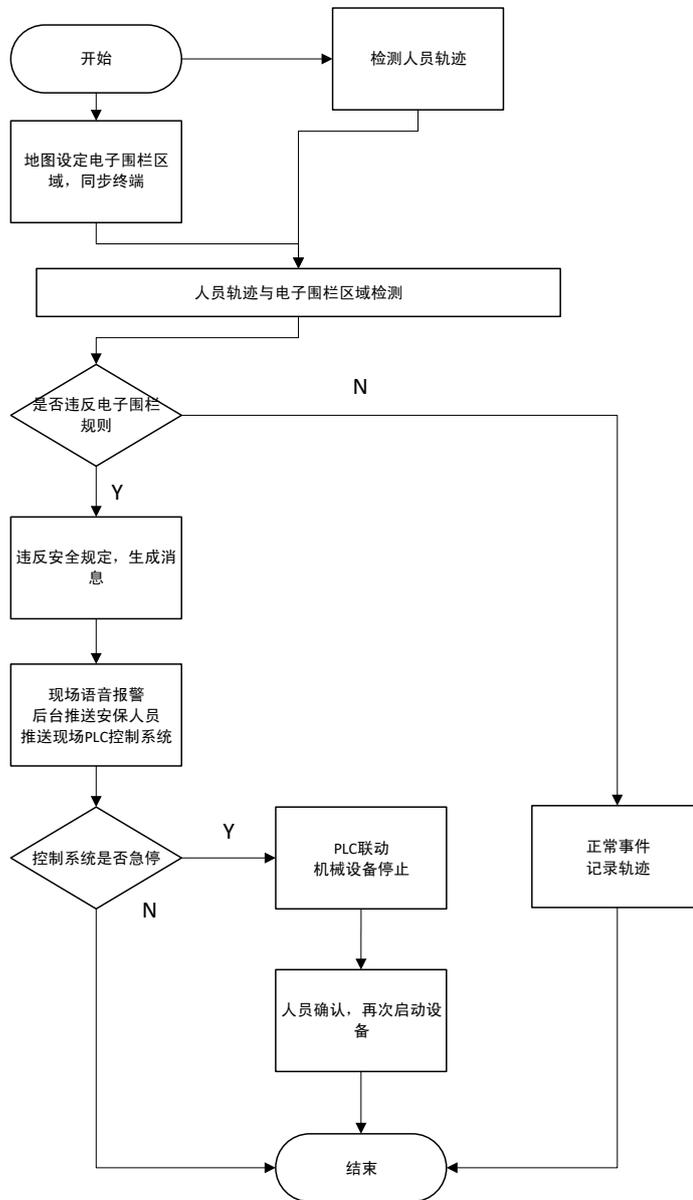


图 7 电子围栏流程图

目前基于 5G+边缘计算的电子围栏检测系统已在海尔工厂的激光切割区域、提升机区域、粉室中间通道、FPA、TOX 冲压铆接等区域都有广泛应用,如图 8 所示,实现生产车间内危险区域无人值守进出限制检测,达到 24h 交警检查的智能化检测,保证人身安全,降低事故发生,减少工伤损失。



图 8 海尔智慧工厂的电子围栏监控平台

3 结语

基于 5G+边缘计算构建 5G 虚拟专网的智能安防,可以将传统的“被动型传统管理”到“智能型分析决策”,聚焦碎片化复杂场景,以边缘计算视频分析平台为底座,为工厂提供的安全、实时、高效、可靠的解决方案,在满足工厂数据不出场,问题快发现、快处理、及时闭环,改进提升的要求下解决了工厂安全监管难、成本高、无预警无追击等痛点问题。

参考文献

- [1]李琰,王斌.智能分析技术在视频监控系统中的集成应用[J].电子技术与软件工程,2018(02):98.
- [2]顾春宁.智能视频分析技术在安防系统中的应用[D].江苏:南京邮电大学,2011.
- [3]乐胜年.离散制造车间生产系统运行绩效综合评价研究[D].湖北:华中科技大学,2013.
- [4]宋晓诗,闫岩,王梦源.面向 5G 的 MEC 系统关键技术[J].中兴通讯技术,2018,24(1):21-25.
- [5]李伶,王华.5G 智慧校园业务场景中 MEC 分流方案研究[J].电信科学,2022,38(1):170-178.
- [6]祁欣学,宋俊廷,范子涛,等."5G+MEC"在配网差动保护中的应用[J].中国新通信,2022,24(4):10-13.
- [7]陈海燕,刘冰.基于 5G 和 MEC 的车联网综合测试基地研究[J].通信电源技术,2021,38(19):76-79.

[8]刘图楠. 5G 工业互联网的边缘计算技术架构与应用分析[J]. 长江信息通信,2021,34(4):44-45,53.

[9]李爽,郭忠志,肖羽,等. 5G 网络针对工业互联网需求的边缘云解决方案[J]. 邮电设计技术,2022(2):81-87.

[10]孙丽楠,朱红绿,孙慧.面向工业的 5G 组网方案研究[J].电子技术应用,2021,47(05):5-10.

[11]张呈宇,李红五,屈阳,等. 面向工业互联网的 5G 边缘计算发展与应用[J]. 电信科学,2021,37(1):129-136.

作者简介

刘鹏英: 卡奥斯工业智能研究院边缘计算助理工程师,主要从事 5G+边缘计算创新应用等方面的研究工作。

杜召娟: 卡奥斯工业智能研究院边缘计算中级工程师,主要从事 5G+边缘计算创新应用等方面的研究工作。

陈振宇: 卡奥斯工业智能研究院边缘计算助理工程师,主要从事 5G+边缘计算创新应用等方面的研究工作。

赵士超: 卡奥斯工业智能研究院边缘计算中级工程师,主要从事 5G+边缘计算创新应用等方面的研究工作。

任涛林: 卡奥斯工业智能研究院边缘计算高级工程师,已从事 10 年智能制造和工业互联网领域国际国家标准制定、机器人设计以及金属材料研发工作。作为主要起草人,牵头和参与制定国际标准 5 项、国家标准 14 项;作为第一作者,出版著作 1 部;

胡明臣: 卡奥斯工业智能研究院边缘计算助理工程师,主要从事 5G+边缘计算创新应用等方面的研究工作。

于海东: 卡奥斯工业智能研究院边缘计算助理工程师,主要从事 5G+边缘计算创新应用等方面的研究工作。

林宏: 卡奥斯工业智能研究院边缘计算助理工程师,主要从事 5G+边缘计算创新应用等方面的研究工作。

基于数据变化率检测的控制领域信息安全行为识别方法

马霄¹, 寇增杰¹, 袁留记¹

(1. 天融信科技集团股份有限公司, 北京 100193;)

摘要: 随着两化融合的持续推进, 信息安全问题不再仅存在于信息网络, 控制网络因自身脆弱性问题, 其攻击面相比较传统信息网络更大; 又因其不可逆的特点, 攻击影响范围更广。传统信息安全技术因兼容性、计算资源、容错性等多种问题, 表现出极大的不适应性, 如何构建行之有效的控制领域信息安全体系, 切实保障生产过程可用性, 成为自动化与信息化从业者共同考虑的问题。在这一过程中, 部分传统安全技术均需根据控制领域特点进行升级与优化。

关键词: 白名单技术; 行为分析; 抵御越限风险; 数据变化率检测;

中图分类号: TP3

文献标识码: A

Identification method of behaviors in OT security based on data change rate detection

Pride Ma, Yuan LJ

(1. Beijing Topsec Network Security Technology Co., Ltd, Beijing 100193;)

ABSTRACT: With the continuous integration of IT and OT, the information security problems no longer exist only in the IT network. Due to its own vulnerability, the OT network has a larger attack surface and wider scope of impact. Due to various problems such as compatibility, computing resources, and fault tolerance, traditional IT security technology is not fully suitable for OT security. Therefore, how to build effective OT security system and ensure normal production process has become the common issue of both automation and information professionals. In this process, some IT security technologies need to be upgraded and trimmed according to the characteristics of the OT field.

KEY WORDS: Whitelisting techniques; Behavioral analysis; Protect against the risk of exceeding the limit; Data rate change detection.

随着近些年信息化技术在控制领域的深度发展^[1-2], 信息安全威胁^[3]也逐步从传统信息领域渗透至控制过程。在这一过程中传统信息安全技术表现出较多的不适应性。传统的五元组+黑名单检测、防护措施, 因其高误报、兼容性弱、计算资源占用高等问题, 普遍不被应用于控制领域。

以行为分析^[4]+白名单^[5-7]的技术手段被广泛应用于控制过程信息安全威胁的识别与处置。在这一过程中，通过对报文中数据相关字节的还原解析^[8-9]，通过其中计算指令、寄存器地址、寄存器数值（点位数据）与实际控制过程进行比对、判别，面对超出限定的指令、数据，形成处置方法。上述方式可有效在不对控制流程造成干扰的情况下，构建最小化控制流程，抵御面向控制单元的越限攻击。但弱攻击过程操作过程始终保持在限定界限内，则无法识别，且控制单元自身保护程序同样无法生效，促成攻击过程的闭环。

需要构建一种方法，可在合法路径、合法内容的场景中，通过目标数值的内容，对控制环境通信过程存在的威胁进行判别。且考虑到控制过程的实时性、不可逆性，判别过程需置于底层进行，以此确保处置的实时性。

1 对象场景说明

本文中方法建立在行为分析+白名单的技术基础之上，主要面向合法路径、合法内容下的组合非法攻击过程。如震网（Stuxnet）类恶意代码形成的攻击方式，通过破解目标设备实时数据库权限，利用实时数据库发起对相关控制器的写操作。写入数据始终位于应告警区间内（HA-n；LA+n），造成控制设备通过其 IO 对物理设备发送错误执行指令，最终形成物理设备的超载，破坏控制流程。如图 1 所示：

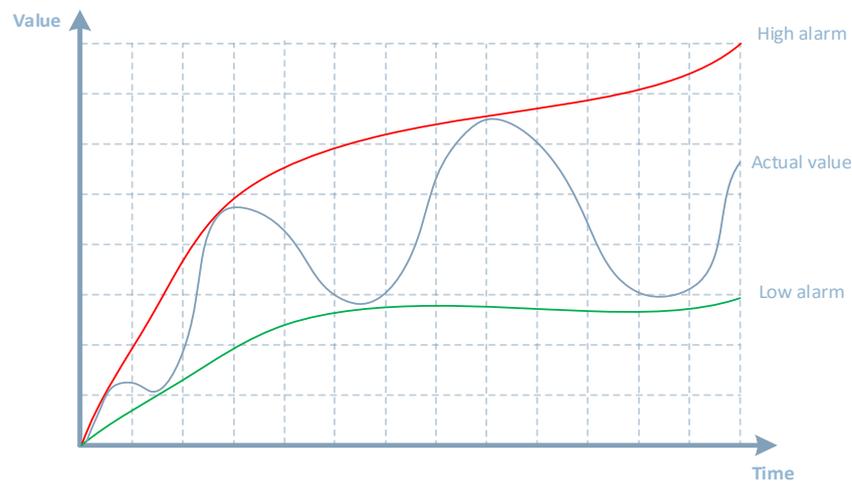


图 1 合法区间内异常数据趋势曲线

上述环境中，攻击发起的路径合法（破解实时数据权限后，攻击动作从操作员站发起），协议合法（非控制器可识别的协议，报文自动丢弃，不做解析），内容合法（如图 1 所示，实际数据始终在上、下限间，未触发告警）；因此，若基于独立报文进行判定，无论传统五元组+黑名

单或行为分析+白名单方式，均无法识别出异常。识别与判定过程需要综合多包报文中内容，进行综合定义。

2 算法说明

控制环境中对于外部干涉对过程形成的影响通常以指数型(过程控制)与阶梯型(离散控制)为主。如图 2 所示：

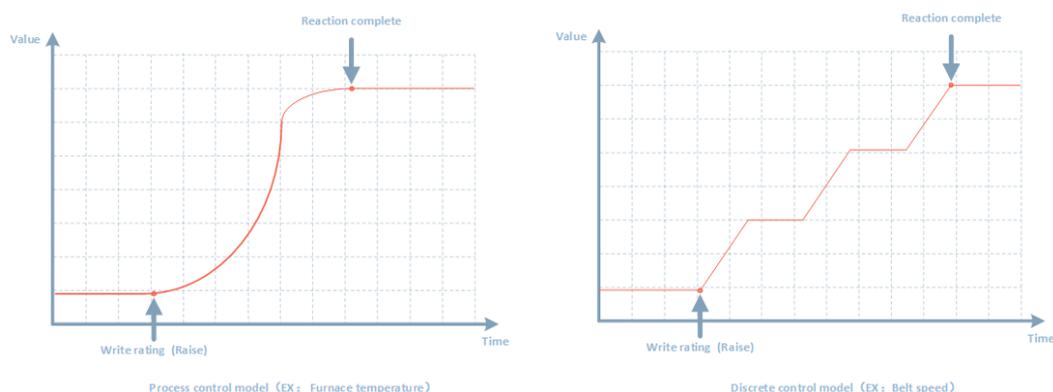


图 2 过程控制与离散控制趋势模型

可以看出，随着额定值写入，物理数值存在一个变化过程，该过程与工艺相关（如化学反应、加速度运行等），其中数据变化趋势从写入至平稳运行保持一致，即数据变化率始终保持在第二（上升）、第四（下降）象限，因此可以得出，在常规操作过程中，数据变化率的绝对值在 90° 内。

数据变化率的识别可以通过如下方式：任意取一个时间节点对数值趋势曲线做切割，其中割线与数据变化趋势切线的夹角 α 即数据变化率。如图 3 所示：

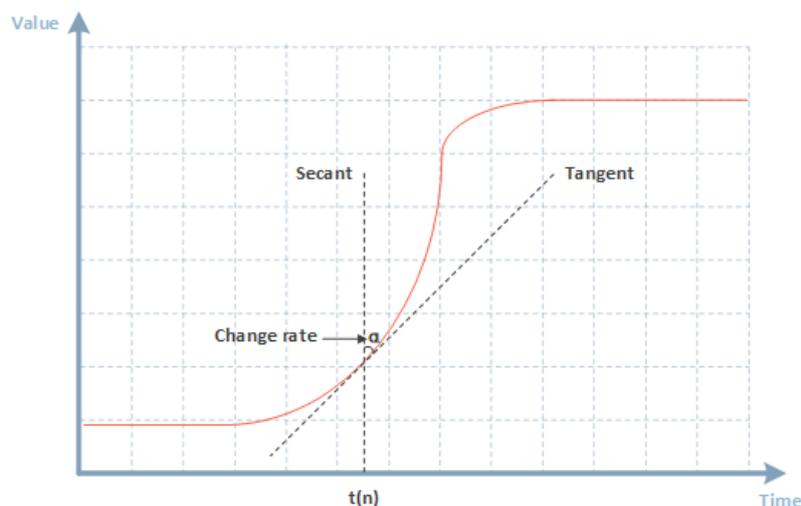


图 3 数据变化率识别算法

所求 α 公式为:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{1}{V'(n)}\right) \quad (1)$$

其中 $V'(n)$ 为 $t(n)$ 时刻曲线斜率, 即

$$V'(n) = \frac{V(n) - V(n+1)}{t(n) - t(n+1)} \quad (2)$$

数据变化率的识别与判定根据计算得出的 α 进行判定, 首先则是对单次数据变化率进行检测, 在这一过程中识别单次数据变化率 α (时间状态不可逆), 之后以单次数据变化率作为检测基础, 获得数据变化率 α 在某个时间段内的最大值 $|\alpha|^{\text{上限}}$ 和最小值 $|\alpha|^{\text{下限}}$, 数据变化率阈值 $Ra(n)$ 即可参考最大值 $|\alpha|^{\text{上限}}$ 和最小值 $|\alpha|^{\text{下限}}$ 进行自定义设定。由于单次数据变化率的判定存在误判的概率, 实际应用中采用短周期内多次取样对比的方式, 计算 $|\alpha| > Ra(n)$ 的次数。判定次数 $>$ 取样次数 $\times 20\%$ (经验值) 则判定异常。

3 模型说明

3.1 应用流程模型

考虑到控制环境中, 可编程逻辑控制器 (PLC: Programmable Logic Controller)、分布式控制系统 (DCS: Distributed Control System) 本体与数据采集与监视控制系统 (SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition) 系统等上位交互普遍采用同步类型协议, 但从经济成本判断, 检测节点可部署在高一级的网络节点, 通过多重镜像方式获取信息, 所以在实际应用中, 识别、检测的对象会以多线程方式进行。流程模型如图 4 所示:

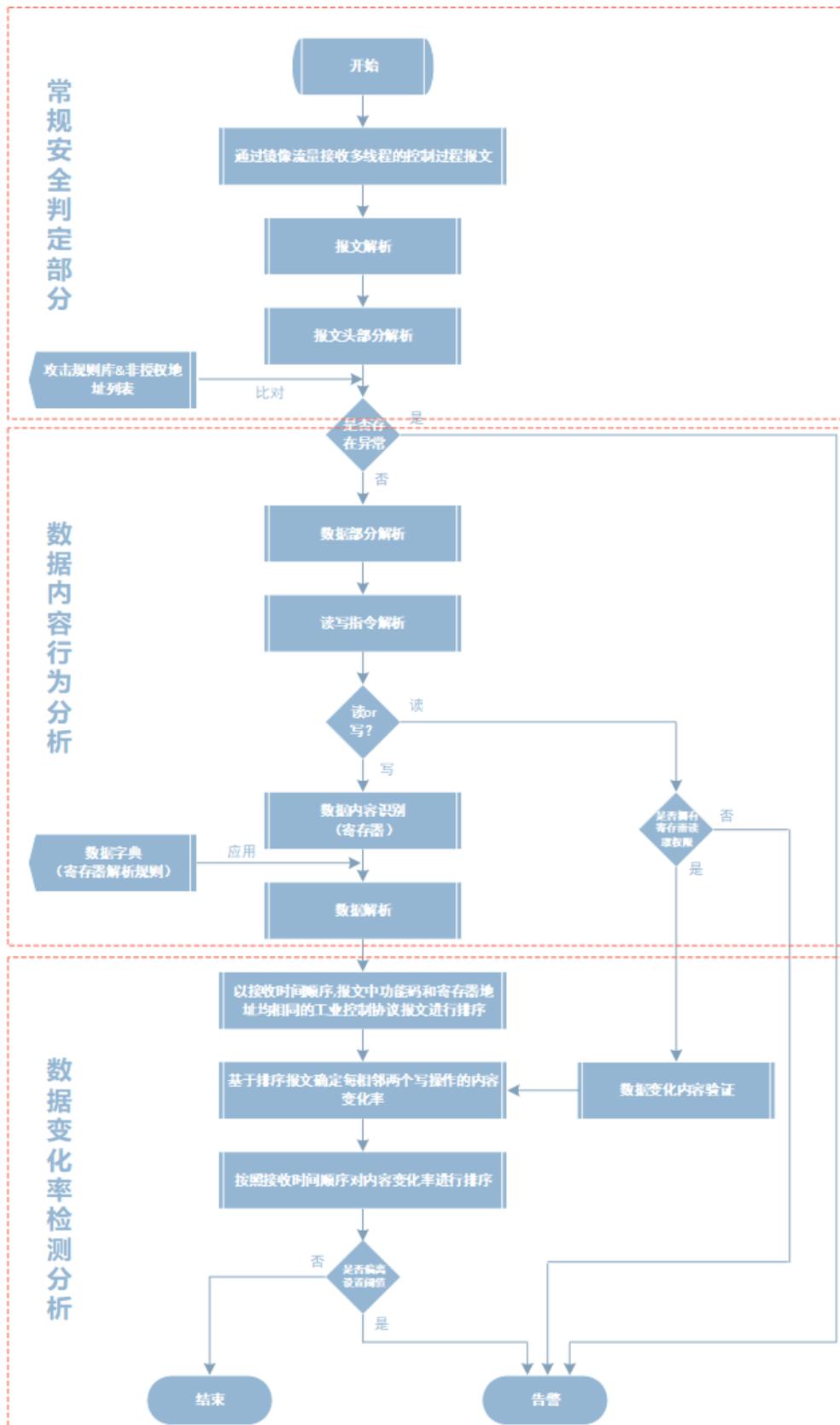


图 4 数据变化率检测流程模型

3.1.1 常规安全判定部分

根据控制系统通信与控制过程特点,围绕场景下通信关系与控制逻辑,采用与传统信息安全不同的白名单手段作为评判依据。同时考虑到白名单技术对于交付过程中对控制与安全融合理解程度较高,策略设置不可避免存在疏漏,增加黑名单技术手段作为验证。(黑名单技术由于其误报率、离线更新困难等问题,应用过程中其安全级别低于白名单技术。

3.1.2 数据内容行为分析

该部分主要面向报文中的数据(Data)部分,通过将其解析还原。采用此类技术的原因主要在于控制领域攻击过程通常利用合法路径,写协议仅为控制器可解析的协议类型,则若想判定是否为攻击,并针对攻击对象进行定义,及时响应,通过对行为分析形成有效的途径识别、检测、处置能力。其中,内容行为分析的第一步是指令分析,通过指令,区分报文的读写属性。以 Modbus TCP 为例:当监测到报文(3)时,可以根据其标记字节,识别其指令。

[01][00][00][00][00][06][01][03][00][00][00][0A] (3)

01/02/03/04 读取操作、05/06/15/16 为写入操作以此作为判定条件,结合控制环境中通信与控制逻辑,对于不具备操作权限的地址进行限定,用来补充大部分控制系统缺少访问控制的缺陷(当前大部分控制器系统缺少基础的访问控制能力,网络可达即可读写)

第二步则是寄存器地址分析,控制过程多基于实时数据,以寄存器形式存在,对于寄存器地址的区分旨在明确访问对象是否具备对应数据的访问、操作权限。仍以报文(3)为例,[00][00][00][0A]则代表了访问的对象首寄存器地址与数据长度。通过对寄存器地址的限制,落实基于数据的访问控制。

第三步则是数据内容解析,该部分建立在数据字典基础上,即将寄存器与物理点位进行对应,根据数据内容与物理阈值区间进行判断。

3.1.3 数据变化率检测分析

数据变化率识别与检测技术出现的需求旨在补充数据内容行为分析过程中的不足。通过镜像流量(为保证控制过程的可用性,通常不在控制单元内部署访问控制措施,行为监测过程多以镜像流量旁路审计方式实现)获取多线程控制场景通信报文。分析过程以实际数据数值作为参考值,在识别异常数据变化后,对数据异常变化区间进行阈值比对(变化率阈值需自定义),比对结果若超出设定阈值范围,则对其通信链路进行取样检测,如近 10 条(需自定义)报文中分别提取数值内容进行变化率分析,这一过程中,若取样检测变化率相对恒定,误差小于 2%,则可判定为控制过程处于逻辑正常的合理状态,检测过程关闭。若取样检测变化率存在较大波动,特别是变化率出现正负两种状态,则可断定数据处于抖动变化中。前文提及,正常控制过程不会存在高频的数据抖动过程。

对于抖动变化数据,为保证识别与检测结果的有效性,降低误报率,可从写操作内容识别进

行辅助验证。在写操作内容识别方面主要是在数据变化率发生改变的时间区间内，确认是否存在更改数据额定值的写操作行为，对比相邻的 3-5 次写操作内容，若存在较大偏差，则可确认为异常威胁，发出告警（误操作的修正过程也会造成对应的数据变化模型，但该过程仅会出现 2-3 次偏差较大的写操作过程，故对写操作内容的对比设置为 3-5 次）。

3.2 应用拓扑模型

在技术应用过程中，考虑数据变化率检测技术面向对象主要为写操作过程，可以理解为其作用节点需要在写操作流程的路径中，于是则需要对控制环境中写操作路径的有效性进行分析。随着信息化技术的应用，写操作路径主要为三类：①基于硬接线的控制输入，该过程主要基于 4~20mA 电流，以按钮、档杆、旋钮等物理介质进行输入，通常称为“现控”，由于其控制过程不涉及通信过程，不在本技术应用范围内。②基于通信的本地操作员站输入，该过程主要基于以太网或总线（RS485/RS232 等）通信，操作发起节点位于 Level2 层级的操作员站，该过程通常称为“远控”。③基于通信的调度操作员站输入，该过程主要基于以太网通信，与远控方式相同，但其输入发起节点位于 Level3 层级的调度操作员站，该过程通常称为“集控”。在当前国内控制领域中，电力、石油等流程控制类行业，Level3 通常作为生产过程监测，即不参与写操作，控制操作由远控方式进行。在离散控制类行业中，如汽车制造、电子制造等信息化程度较高行业，集控与远控方式并存，但在冶金、有色等传统行业，采用集控方式较少（生产过程风险较大，集控过程响应较慢）。因此可以判断，数据变化率检测技术应用节点应位于 Level2 余 Level1 层级间，考虑到国内控制单元运维过程的特殊性，采用镜像流量方式进行识别、监测与审计。如图 5 所示：

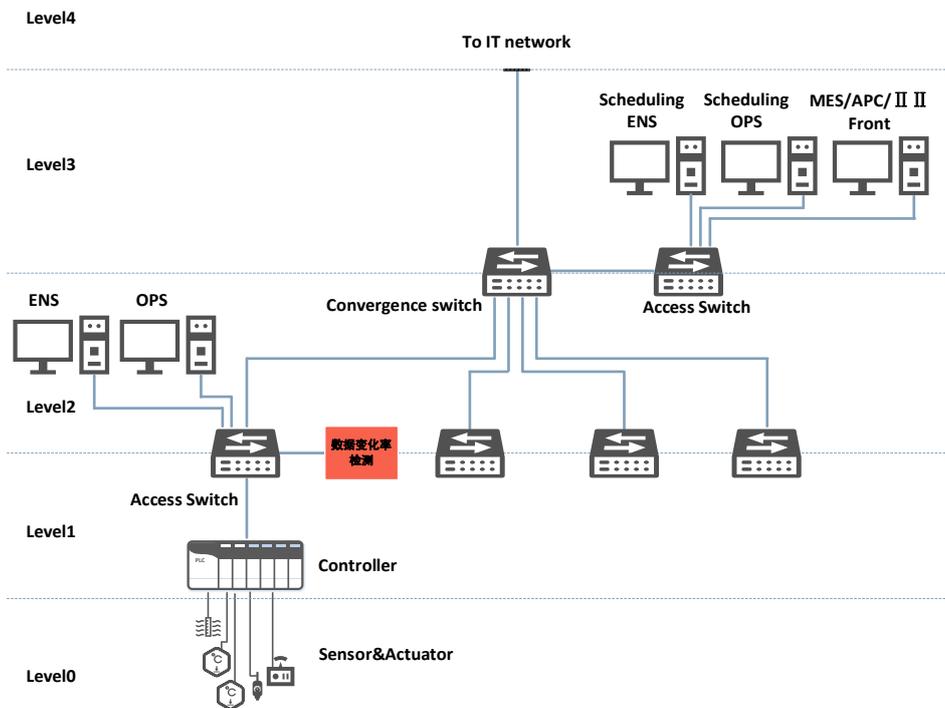


图 5 数据变化率检测逻辑应用模型

技术应用在 Level1.5 层级的接入交换节点，以镜像流量获取数据信息，对控制过程零影响。在实际应用过程中，控制单元数量众多，在 Level1.5 节点会形成大量技术措施的应用，对于用户形成较大的经济压力，为解决此类问题，可采用交换设备多重镜像方式，将镜像流量递推至上一层交换节点，降低技术措施部署数量，节约用户经济成本，参考图 6。

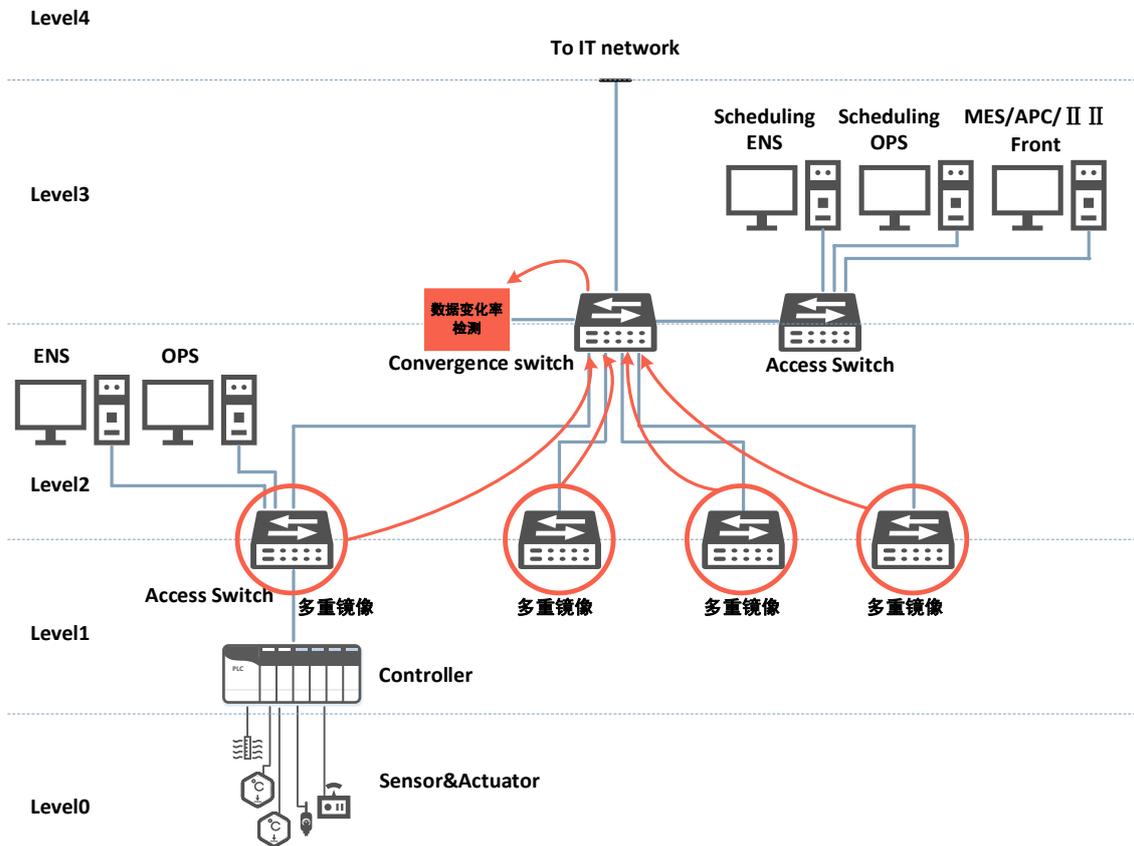


图 6 数据变化率检测物理应用模型

4 应用示例

基于数据变化率检测的控制领域信息安全行为已在多个控制领域进行应用，数据变化率检测技术应用节点以镜像流量获取控制过程中的数据信息，首先在数据变化率检测技术应用节点系统内配置主机（操作员站）点列表，如图 7 所示：

主机	协议标识	点名	数据类型	系数	偏移量	寄存器类型	寄存器地址	数据格式	位地址	黑白名单策略	操作
sdfghj	ModbusTcp	sdfg	浮点数	1.0		保持寄存器	10	单精度浮点型ABCD	0	先黑名单后白名单	点表审计规则/编辑/删除

图 7

然后根据不同应用场景业务流程和工艺参数分别配置主机点表审计规则，自定义设置操作员站写操作变化率范围及对应的风险等级，如图 8 所示：

图 8

完成以上配置信息后，数据变化率检测技术应用节点即可依据审计规则和识别判定方法对超出阈值的数据变化率进行检测、判定及告警。

5 结语

基于数据变化率的检测能力旨在补充当前控制领域信息安全在行为监测过程中的不足，该技术的立足可以理解为在信息安全的基础上，综合考虑功能安全的能力与价值，在双安融合的基础上，对合法路径、合法协议、合法内容的行为进行深度分析的能力。其作用于控制单元底层，采用实时的方式识别潜在的风险。

随着工业产业结构的调整，安全技术也在快速发展与变革过程中，这其中出现了纷繁的技术分支，而产业需求则是最好的验证方式。安全技术不是一种炫技，复杂也好，简单也罢，其价值就是可以真正满足用户的实际需求，从用户角度出发，服务于用户。

参考文献

- [1] 孙艺, 马玉文, 葛婷,等. 电气自动控制中电子信息化技术的应用[J]. 消费导刊, 2020..
- [2] 王昱缤, 陈思, 程楠. 工业控制系统信息安全防护研究[C]// 第 32 次全国计算机安全学术交流会论文集. 2017..
- [3] 陈星, 贾卓生. 工业控制网络的信息安全威胁与脆弱性分析与研究[J]. 计算机科学, 2012(S2):3..
- [4] 雷远东. 工控系统攻击行为分析[J]. 网络安全和信息化, 2018(6):1.
- [5] 汪锋, 周大水. 白名单主动防御系统的设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(7):5..
- [6] 王永峰, 张晓东, 孔令武,等. 一种基于自学习白名单的工控异常行为分析方法及系统:, CN112383514A[P]. 2021..
- [7] 孟令强, 关勇, 张向红,等. 基于可信计算的应用程序白名单管理系统[J]. 计算机安全, 2010(10):3..
- [8] 张怡新. 一种数据通信协议的解析方法及系统:, CN108183890A[P]. 2018..
- [9] 高魏轩. 基于 Modbus 协议的工业控制系统信息安全主动防御系统设计与实现[D]. 西安电子科技大学.

作者简介

马霄: 天融信科技集团工业互联网方案中心总监, 主要从事自动化领域与信息安全领域技术研究与咨询工作。《工业互联网企业网络安全分类分级指南(试行)》评审专家组成员, 某 SM 行业“十四五”规划专家组成员。

寇增杰: 山东寿光人, 清华大学 EMBA, 天融信科技集团副总裁, 主要研究方向: 数学与密码、网络安全、工业互联网安全等。

袁留记: 天融信工业互联网安全产品线总监, 长期从事网络安全、物联网安全、工业互联网安全等新技术、工业互联网安全防护与管理体系构建等方面的研究

助力钢铁行业实现碳中和的 工业互联网技术研究及应用

杨冬靓¹

(河钢数字技术股份有限公司战略发展本部,石家庄市 050035)

摘要: 钢铁行业能耗高碳排放量大,且综合能耗管控与污染排放监测能力薄弱。为实现碳达峰碳中和目标,利用工业互联网技术促进钢铁行业低碳转型尤为重要。建立低碳炼钢数字化平台,将工业互联网关键技术与钢铁制造场景深度融合。通过构建集过程控制、能耗管理、能源调度、碳平衡优化为一体的管理范式,可实现钢铁生产全过程的碳排放高精度计量、能耗监测预警及分析,对助力碳中和、碳达峰目标实现和钢铁行业高质量发展具有重要意义。

关键词: 钢铁行业; 工业互联网; 碳达峰碳中和

中图分类号: TP29

文献标识码:

Research and application of industrial Internet technology to help steel industry achieve carbon neutrality

YANG Dongliang

(Dept. of HBIS Digital Technology Co.,Ltd, 050035, China)

ABSTRACT: The current mode of steel industry is high energy consumption and large carbon emission, with the weak ability of comprehensive energy consumption control and pollution emission monitoring. In order to achieve the goal of carbon neutrality and emission peak, it is urgently needed to use industrial Internet technology to promote the low-carbon transformation of steel industry. Establishing a digital platform for low-carbon steel-making to deeply integrate the key technologies of the industrial Internet with the steel manufacturing scenario. By constructing a management paradigm integrating process control, energy consumption management, energy scheduling and carbon balance optimization, high-precision carbon emission measurement, energy consumption monitoring, early warning and analysis in the whole process of steel production can be realized, which is important to help achieve the goal of carbon neutrality and emission peak as well as the high-quality development of the steel industry.

KEY WORDS: steel industry; industrial Internet; carbon neutrality and emission peak

习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布，中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰值（碳排放达到峰值），努力争取 2060 年前实现碳中和（碳排放净值为零）。^[1]其中钢铁行业是关系碳达峰目标和碳中和愿景实现的重要制造行业之一。工业互联网以数据为核心，基于传感器集中收集的海量数据，结合平台和大数据分析技术可以实现工业自动化控制、智能化管理。^[2]围绕钢铁行业低碳炼钢对于设备远程监控、工艺流程优化，能耗实时监管等多方面的场景需求，结合工业互联网技术，实时展示等功能于一体的低碳炼钢数字化平台，对于促进钢铁行业低碳转型高质量发展有积极意义。

1 钢铁行业在碳中和背景下的挑战

在“碳达峰、碳中和”愿景下，高能耗产业必须优化 产业布局，调整能源结构及供给方式等，同时国家发改委 也提出了新要求——研究制定钢铁、有色金属、建材等行业碳达峰方案。^[3]钢铁行业是 41 个制造业门类中碳排放量最大的行业。2019 年钢铁行业煤炭消费量占能源消费总量的 17%以上，二氧化碳排放占能源活动相关排放总量的 15%以上，^[4]是关系碳达峰目标和碳中和愿景实现的重要制造行业之一。

1.1 时序运行与系统规划不同步

大多数钢铁产线停留在“单兵作战”，注重单体设备能耗评估和节能减排，并以对单一能源研究为主，而缺乏从全局角度和战略层面进行能源统筹优化配置。^[5]其能源管理平台未完全发挥集中统一的作用，不利于统筹规划和综合协调，难以应对重大能源形势变化和经济社会发展突出矛盾的挑战。

1.2 系统创新与工艺创新不匹配

低碳先进工艺技术装备的应用与推广力度不断提升，但节能技术涉及领域较多、涵盖范围较宽，同时技术装备运行时相互关联。而由于大型钢铁企业由众多生产单位组成，相互之间除主体生产线外，包括节能设施在内的基础设施往往缺乏统一调度指挥，其效能发挥受制于产线与工艺间的信息数据壁垒。

1.3 实物信息与管理信息不平衡

炼钢产线能源资产数量庞大、种类型号繁多，流程链跨度长且变动频繁，导致无法实时跟踪能源资产当前实际所处位置和状态，^[6]没有将数据价值进行差异化区分，缺少智能化的数据分析，未能从数据驱动层面解决能源与减碳管理决策面临的实际问题。

2 工业互联网对于实现钢铁行业碳中和的机遇

2.1 工业互联网技术可提供数据采集和智能决策的能力

基于物联网的实时采集、时序存储等技术，采集钢铁生产过程中的直接排放数据，并监测采

集能源系统运行情况数据，进行更加合理的能源系统规划，实现碳排放的精准分析与预测需求，做出更加明智的运营和建设决策。^[7]

2.2 工业互联网技术可完善资产管控

对某一钢种碳排放计算来说，可根据物联网采集的数据，通过建立好的工艺流程模型，实时碳排放核算，供钢铁下游使用，不需要进行线下收集数据再进行建模计算，省时省力；对整个钢厂来说，物联网技术监测碳排放，匹配碳排放限额指标，实现配额碳资产与减排碳资产的管理。^[8]

2.3 工业互联网技术可助力打破数据壁垒

规范化的传输协议和数据格式，可以统筹考虑各领域大数据标准化需求。通过梳理分析生产业务，不同生产单位之间、不同生产线之间，形成信息系统架构图，确定信息系统之间的输入、输出关系，确定数据共享系统分类，形成数据接口清单，通过推进生产信息化顶层设计建设助力打破数据壁垒的阻碍。^[9]

3 关键技术问题

3.1 靠近边缘侧的采集、计算、协议解析问题

在边缘节点的计算能力与协议解析方面，存在设备数据不开放、接口不统一，因此设备的数据兼容性差、采集门槛高、采集难度大。打造标准化、统一的接入引擎的系统平台，可以便于钢铁行业实现设备即插即用，数据快速获取。解决众多钢铁设备厂商接入数据异构难以统一的问题，实现设备多源异构数据的快速接入。

3.2 大量的工业时序数据存储问题

钢铁行业大多数都是千万级设备连接，设备产生的数据呈爆炸式增长，^[10]面临着时间序列数据的高吞吐、横向扩展等难题。因为产生的数据通常都具备时间序列特征，主要围绕着时序数据建立一套钢铁行业的时序数据库，支持高效率的采集和高速的读取。满足千万级的秒级数据读取和百万级的秒级数据写入能力。据存储问题。

3.3 碳排放核算指标与相关数据融合分析问题

工业是碳排放的重要来源，目前来看工业需尽快解决产业结构和能源结构不平衡、资源利用效率相对较低等问题，需要加速传统产业与数字产业深度融合。围绕着碳排放核算与融合分析研究，旨在实现低碳管理的精细化、数字化和标准化，通过核算引擎实现对基础数据的加工处理，结合企业节能降碳考核体系，为企业节能降碳考核管理提供数据支撑，以此来改进生产工艺流程、提高设备运转效率、提升生产过程管理精准性，助力钢铁企业节能减排和转型升级。

4 主要研究内容

建立低碳炼钢数字化平台，利用工业互联网技术促进行业低碳转型。综合应用边缘计算、智

能采集、物联网监测、数据融合与分析等技术，研发集生产过程管理、能源管理、碳排放管理于一体的数字化平台，主要研究内容包括以下 4 个方面。

4.1 基于边缘智能的实时数据采集、处理技术研究

针对钢铁产线的工业设备数据采集、协议解析、数据处理等要求，研究具备一定计算能力的边缘智能网关。主要研究对钢铁产线设备的数据采集、协议解析及边缘计算。采集的设备数据通过协议传输到边缘网关，网关对协议进行解析，获取设备数据，并通过对设备数据进行一定的计算处理，再将处理好的数据传输到上层的物联网平台。

4.2 基于时间节点的时序数据存储技术研究

针对钢铁产线千万级设备时序存储要求，研究高性能的数据读写以及丰富的查询能力的时序数据管理技术。针对实时采集的具有时序特征的海量传感数据，实现具备极高的事务处理能力、数据压缩比和查询检索速度，实现对海量实时/历史数据的高效管理。可以满足工业物联网领域的海量数据存储、高速数据读取和复杂数据分析需求。

4.3 基于物联网的实时数据计算技术研究

针对钢铁设备数字化及数据实时计算的要求，研究具备海量数据采集、设备建模、实时计算、消息服务、规则引擎、数据服务的物联网平台技术。面向行业建立丰富的工业协议数据接入解析处理，建立海量设备的接入、数据建模和管理功能，实现对边缘网关的监控、告警、配置升级，以及信息的实时推送。实现包括时序数据存储、文件存储、对象存储以及结构化数据存储的能力。建立边云协同实时计算数据服务能力，并通过数据建模沉淀设备数据资产，为上层应用提供数据服务，打造“综合采集、统一管理、高效分发”的物联网数据服务体系。

4.4 碳排放核算与融合分析技术研究

针对低碳炼钢碳排放核算与融合分析的需求，研究生产设备数据、能源消耗及碳排放活动等基础数据的融合，建立基础数据与核算公式、参数因子之间的关联关系，形成核算方法标准库。通过核算方法标准实现对基础数据的加工处理，结合钢铁企业节能降碳考核体系，汇总分析炼钢过程中能耗及碳排放详细情况，为企业节能降碳考核管理提供数据支撑，辅助企业实现低碳管理，实现重点领域能效与碳排放核算与融合分析；另外还可以为下游企业提供批次订单产品的碳排放清单或报告。

5 平台技术路径

通过物联网的实时采集、时序存储等技术，采集钢铁生产过程中的直接排放数据，并监测采集能源系统运行情况数据，从而进行更加合理的能源系统规划。其中，具体到某一钢种的碳排放计算，可根据物联网采集的数据，通过建立好的工艺流程模型，实时进行碳排放核算。物联网技术监测碳排放，匹配碳排放限额指标，可以帮助整个钢厂实现配额碳资产与减排碳资产的管理。

本技术架构分为三层，从下往上分别为连接层、融合层、应用层。技术路线图如图 1 所示。

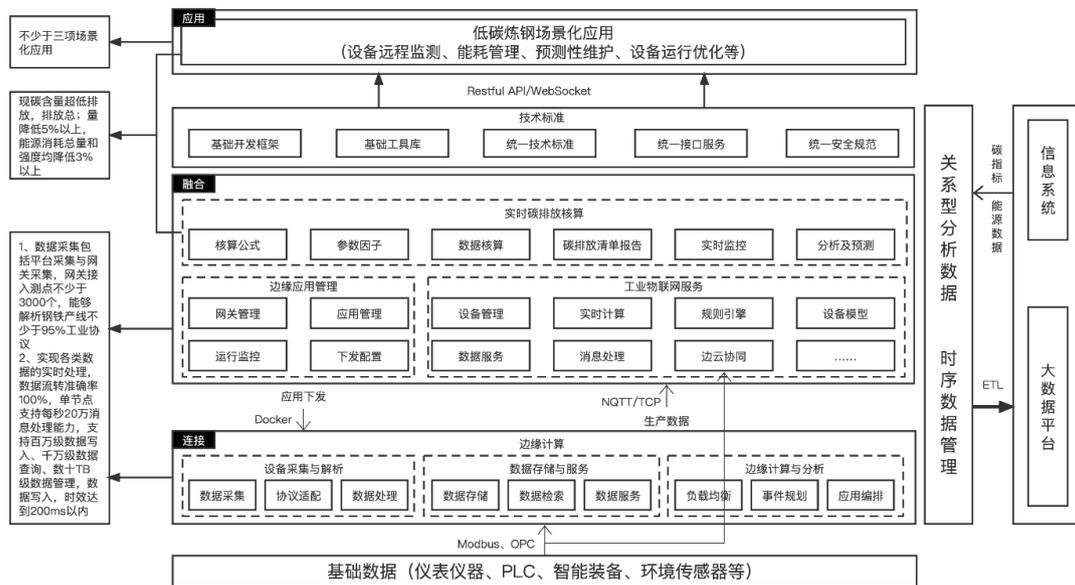


图 1 技术路线图

连接层是由各个边缘计算节点和设备组成。主要工作是接入生产现场的基础数据包括但不限于仪器仪表、主控 PLC/传动 PLC、智能装备、环境传感器等，通过边缘节点的数据处理能力进行数据的过滤、清洗、计算。当数据量过大的时候，边缘节点及服务能够将负载进行平衡、分摊到多个部署在边缘节点的服务实例上进行执行，实现边缘节点的高可用性，避免出现单点故障。

融合层由边缘应用管理、工业物联网服务和碳排放核算组成。边缘应用管理是利用云协同对边缘节点进行控制，指导和监督边缘节点的运行，还能够根据各个节点的资源情况，将任务动态的分配到资源充足的节点，保证边缘节点的稳定性和连续性。工业物联网服务在本技术架构当中定位于承上启下，与连接层的边缘节点共同形成边云协实时计算数据服务能力，通过工业物联网服务的数据建模沉淀碳排放数据资产，利用实时计算、输入规则引擎、数据服务等能力，进行实时碳排放核算，打造统一的技术标准、统一接口服务、统一安全规范为上层低碳炼钢场景化应用提供保质保量的数据服务。

应用层为低碳炼钢场景化应用，通过物联网技术与低碳炼钢的深度融合，形成如炼钢重点环节的能效与碳排放分析及预测、融合分析典型源汇碳排放核算、实时展示能耗及碳排放详细报告等低碳炼钢的示范应用促进节能减排管理工作的标准化、实时化、可持续化。助力钢厂进行生产工艺改善、能耗实时监管等工作。

5.1 数据存储及处理

各个物联网传感器将实时采集的数据汇集到边缘网关，通过边缘网关将数据上传到 MQTT

服务器上,利用 MQTT Broker 直接将消息写入到 Kafka,直接存储到时序数据库里,最终结果转发至其他服务或持久化至目标数据库中。通过边云协同对边缘端进行控制,指导和监督边缘端的运行,边缘网关及服务能够将负载进行平衡、分摊到多个部署在边缘端的服务实例上进行执行。采用分布式时序数据库,利用其高效的写操作将数据持久化。从钢铁生产现场获取海量多源异构数据,根据设定的规则对海量异构数据进行序列化

5.2 工序单元模型

工序模型是产品生产过程中单个工序,用来展示单个工序的物料输入种类及主产品与副产品的输出。进行生命周期清单分析时为量化输入和输出数据而确定的最基本部分。碳排放计算需要基于实际产线设计的工序单元模型,并可以根据计算结果进行生产工序的优化设计。其中工序主产品指单个工序生产过程中的主要产品,比如焦化工序的主产品为焦炭,烧结工序的主产品为烧结矿。副产品为生产过程中能够回收利用的物质或资源。

5.3 碳足迹计算

生命周期影响评价(LCIA)指生命周期评价中理解和评价产品系统在产品整个生命周期中的潜在环境影响大小和重要性的阶段。需要对工序流程进行碳足迹的计算分析,首先确定最终产品的产量,逐步向前推出各道工序所需原材料的量。确定各工序的用量后,依次计算出每道工序的碳足迹,得出最终的产品的碳足迹。其中排放因子是指排放标准中限定的某种具体污染物,比如废水中的 COD、烟气中的 SO₂ 等,系统中的排放因子数据库持续完善。

直接负荷值=SUM(各能源单耗*直排因子)+SUM(各原料单耗*直排因子)+SUM(各辅料单耗*直排因子)-SUM(各主产品单耗*直排因子)-SUM(各副产品单耗*直排因子)

能源负荷=SUM(各能源单耗*间排因子)+第一道(用到上道工序主产品单耗*能源负荷)

当前工序中间产品负荷=上一道[用到上道工序主产品单耗*(直接负荷+中间负荷)]

副产品内部收益=-SUM(未参与系统分配的副产品单耗*间排因子)+上一道(用到上道工序主产品单耗*副产品内部收益)

运输负荷=SUM(各能源对应运输类型*对应运输因子)+SUM(各原料对应运输类型*对应运输因子)+SUM(各辅料对应运输类型*对应运输因子)+上一道(用到上道工序主产品单耗*上游负荷)

上游负荷=SUM(各原料单耗*间排因子)+SUM(各辅料单耗*间排因子)-上道工序以产品作为原料的输入(用到上道工序主产品单耗*间排因子)+上一道(用到上道工序主产品单耗*上游负荷)

副产品外部收益,依赖上道工序副产品外部收益。

无上道工序,副产品外部收益=-SUM(参与系统分配的副产品单耗*间排因子)

有上道工序,副产品外部收益=-SUM(参与系统分配的副产品单耗*间排因子)+上一道(用

到上道工序主产品单耗*副产品外部收益)

内部合计--对应为直接排放=直接负荷+能源负荷+中间产品负荷+副产品内部收益

外部合计--对应为间接排放=运输负荷+上游负荷+副产品外部收益

生命周期=内部合计+外部合计

6 结语

通过进行边缘计算、智能采集、实时数据处理、物联网监测、数据融合与分析等关键技术研究,有助于解决全流程炼钢的能源与废料数据的采集、实时数据处理与分析等难题,为吨钢的碳排放分析与碳足迹跟踪提供数据与技术支撑,为钢铁上下游提供碳排放数据。可以提高钢铁产业在碳达峰、碳中和的领域研究应用水平和自主创新能力,不断提升自身产业核心竞争力,具有重大的科学和技术价值。

参考文献

- [1] 习近平. 继往开来, 开启全球应对气候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话人民日报[N]. 2020-12-13(01)
- [2] 彭昭. 物联网将成为实现“碳中和”的关键[J]. 中国工业和信息化,2021(5):40-46
- [3] 何思思. 工业制造“碳中和”的主战场与新路径[J]. 中国工业和信息化,2021(05):28-33.
- [4] Ren M ,Lu P ,Liu X , et al. Decarbonizing China's iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality[J]. Applied Energy, 2021, 298:117209.
- [5] 陈建华. 能源智能管控系统在钢铁企业的应用前景分析[J]. 现代冶金,2012,40(2):1-4.
- [6] 中国钢铁产业互联网行业研究报告 2020 年[R].艾瑞咨询系列研究报告(2020 年第 9 期).
- [7] 丛力群. 工业互联网中边缘计算的实现方法[J]. 自动化博览,2018,35(5):48-52
- [8] 李辉,谭显春,顾佰和,等. 物联网环境下碳配额和减排双重约束的企业资源共享策略[J]. 系统工程理论与实践,2018,38(12):3085-3096.
- [9] 许宪春,王洋. 大数据在企业生产经营中的应用[J]. 改革,2021(1):18-35.
- [10] 贾一波,唐宇.钢铁冶金的污染治理及环保措施探析[J].价值工程,2020,39(28):217-218.

作者简介

杨冬靓: 河钢数字技术股份有限公司系统集成项目管理工程师, 主要从事战略管理、政策研究工作。

数字化技术赋能生物医药行业实现新发展

马战凯

摘要: 数字化技术赋能生物医药行业, 在药物研发、医疗影像、辅助筛查与诊断、临床治疗决策、数字化临床试验、数字化生产、脑科学、健康管理等主要方向正在实现新发展, 本文在阐述生物医药产业数字化转型技术框架体系的基础上, 结合我国生物医药企业数字化转型中普遍存在的问题和挑战, 提出了生物医药产业数字化转型的建议。

关键词: 数字化转型; 医学诊疗; 新药研发

Digital technology enables the biomedical industry to achieve new development

Abstract: Digital technology enables the biomedical industry in drug research and development, medical imaging, auxiliary screening and diagnosis, and clinical, New developments are being made in the main directions of treatment decision-making, digital clinical trials, digital production, brain science and health management Based on the technical framework system of digital transformation of biomedical industry, this paper combines the digital transformation of biomedical enterprises in China .It also puts forward some suggestions on the digital transformation of biomedical industry.

Key words: Digital transformation, Medical diagnosis and treatment, Drug Discovery

1 引言

在 5G、物联网、人工智能、大数据等数字化技术推动下, 全球医药制造企业持续创新发展, 数字化转型成为生物医药行业提升创新研发能力、提高产品质量、降低运营成本、打造竞争优势的必经之路。生物医药产业由生物制药产业与医疗产业共同组成。生物医药产业数字化转型是一个复杂的系统工程, 从研发到生产, 涉及数字化技术与生物医药行业深度融合的诸多方面。目前, 生物医药行业正在加速数字化转型, 实现全方位技术突破, 无论是在医疗领域还是在新药研发领域都面临新的机遇和挑战。

2 生物医药行业数字化转型现状和必要性

5G、人工智能、大数据等数字化技术的快速发展使药物研发得到了突破性进展, 尤其是在 2020 年 11 月, 谷歌母公司 Alphabet 旗下人工智能公司 DeepMind 实现重大突破, 解决了生物

学界 50 年来的重大难题——蛋白质折叠预测。目前，数字化技术重塑生物医药行业，无论是在医疗领域还是在新药研发领域，都在提质降本增效。

从医院来看，在新冠疫情大流行的当下，5G、大数据和 AI 技术正在加速赋能医疗数字化转型的步伐，提升各类医疗需求的快速响应能力和为患者提供个性化诊疗的服务能力，使远程医疗和互联网医疗得以灵活开展，为患者提供预防、治疗、康复、健康促进等连续性服务，推动从以治病为中心转向以健康为中心，促进优质资源下沉、工作重心下移，推动分级诊疗等。人工智能技术正在加速赋能医学诊疗领域，尤其是医学影像辅助诊疗、包含新冠肺炎的临床辅助诊疗、智能健康管理、医院智能管理、医疗机器人进行病区服务等。目前，AI 结合大数据技术还用于科学防疫和流行病学调查，并通过与新技术应用的弹性集成，支撑医疗全生态的临床决策，正逐步成为医院信息系统变革的核心力量。

从生物制药来看，数字化技术，尤其是 AI 技术正在赋能生物制药的全产业链，正在加速全方位技术突破。新药研发作为一项高风险、高投入复杂系统工程，需长期投入大量的资金、技术和人力，且具有高度的不确定性。新药研发要跨越“药物早期初选探索”、“体外药效实验”、“小规模临床前研究”、“大规模临床试验”、“审批上市”五个阶段才能成功研发。新药研发通常需要花费 10 年到 15 年的时间，耗资高达 15 亿到 25 亿美元，已经成为生物制药企业的不可承受之重。因此，生物制药企业迫切需要通过数字化转型来创新药物研发模式。目前，数字化技术，尤其是 AI 技术已经深入生物新药研发的全产业链中，正在扮演越来越重要的角色，不仅仅推动新药研发，还促进整个生物制药产业链的加速变革及商业模式的重塑。

3 数字化技术赋能生物医药行业的主要方向和模式

3.1 赋能新药研发

AI 技术打破新药研发周期长、研发费用高、研发成功率低三大困境，成为制药领域有力的突破性技术。在功能上，AI 不仅是发现先导化合物的工具，更是一个促进生物学研究、发现新的生物靶点和开发新的疾病模型通用的工具，将在变构类药物、老药新用等领域产生深远影响。AI 通过自动分析和聚合数据、高通量筛选、分子砌块库、超大的虚拟筛选库、转变数据交互方式、结合云计算 GPU 的应用有机嵌入到新药研发的各个环节，大大缩短了新药研发周期、提高药品研发质量和效率，实现降本增效，推动新药研发创新。具体来讲，AI 技术通过应用于“药物发现与设计”、“上游工艺开发”、“下游工艺开发”、“生产与质量控制”等环节，全程赋能新药研发。

3.1.1 药物发现与设计：

● **AI 辅助靶点发现：**传统靶点发现基于基因组学和蛋白质组学高通量筛选方法，成本较高、实验周期长、不具有普适性。AI 则通过深度学习算法建立分子靶标数据库，在蛋白质或者酶、

细胞水平、动物模型、临床四个层面构建与疾病的相关性，能高效预测药物分子的潜在靶标，确保靶点真正有效。

● **AI 辅助适应症发现：**药物重定位（老药新用）是一种将现有药物用于治疗新的适应症的药物发现方式。相比较传统的新药开发，它可以有效缩短药物研发周期，降低成本，规避风险，目前利用 AI 算法能够成功地快速模拟临床试验，为现有药物和疗法找到新用途。

● **药物靶点药物设计：**传统方法根据靶点结构和功能，开展药物分子的设计，设计每一个化合物的实用性。筛出活性高、毒性低的最优化候选药物或类药物分子。AI 则通过对靶点的结构及理化性质大数据与相关靶点结构及其理化性质的规律的学习，来进行药物精准设计开发。

● **AI+化合物筛选：**传统化合物筛选策略主要是基于已知活性化设计，通过高通量筛选和 DNA 编码化合物库来实现，成本非常高昂。而 AI+化合物筛选则通过深度学习技术，从药化、生物学的大量数据中挖掘有效信息筛选化合物，并准确预测它们的理化性质、成药性质和毒性风险，完成成药性预测及优化，大幅度降低新药研发的时间和成本。常见的方法有两种，一种是利用 AI 深度学习开发出新型虚拟筛选方法取代传统的高通量筛选，提升筛选效率。另一种是利用 AI 图像识别技术优化高通量筛选过程。

● **蛋白结构聚合预测：**药物分子与人体结合主要通过蛋白质中的氨基酸侧链相互作用来实现。AI 能精确预测蛋白质的侧链结构和蛋白质之间的结合形式。发现蛋白质的折叠、聚集、变构、灵活性等，准确确定蛋白质的拓扑结构。

● **AI 密码子优化：**AI 密码子优化是一种通过增加靶基因的翻译效率来提高生物体内蛋白质表达水平的新技术。

● **AI+临床前辅助研究：**临床前辅助研究是为了减少不可预测性，临床前研究需要开展药效学、药动学和毒理学研究以及药剂学研究，AI 利用深度神经网络算法有效提取结构特征的预测方式，能实现对 ADMET 性质的预测和结构优化改造，提高药物研发的成功率。

● **AI+患者招募筛选入组：**做药物临床试验，需要招募患者，AI 患者招募则采用自然语言处理技术来学习研究人员标记过的医疗记录样本、训练识别同义词、解释未标记的医疗记录、搜索医生的记录和病理报告，来寻找那些符合标准参加特定临床试验的患者。

3.1.2 上游工艺开发

● **AI 辅助 HIS：**AI 准确地以数字方式存储患者数据，执行数据处理和数据分析，管理患者数据流，与医院患者无缝集成，并对床位占用情况进行状态分析，提高 HIS 的整体绩效。

● **AI 辅助细胞工艺培养：**AI 使用稳定和标准化参数，提供了一种比视觉评估更强大和量化的方法来确定汇合度和细胞计数，能实现细胞培养工作流程自动化。

● **AI 代谢产物预测：**临床使用的抗菌药物中，超过一半来源于微生物。抗菌肽能抑制病原

微生物,抵御多重耐药菌,同时不易产生耐药性,被认为是可能替代传统抗生素的下一代抗菌剂。AI把氨基酸序列当做“语言”,训练现有抗菌肽的组织方式,能快速识别氨基酸短序列,区分相似的多肽,找到抗菌肽。

- **AI 辅助中试放大:** AI能辅助中试放大试验,将实验室小试工艺进行放量、进而走向生产。

3.1.3 下游工艺研发

- **AI 辅助色谱方法选择:** AI会辅助选择亲和色谱法、离子交换色谱法来做下游加工。
- **AI 辅助表征分析:** 利用AI评估批次多变的收获物成分,调整工艺关键参数来进行,抗体筛选、药物动力、多糖分析、肽图分析等。
- **AI 辅助纯化工艺设计:** 用AI实现对化合物的纯化设计。
- **AI 辅助智能 HPLC/GC 分析:** 用AI对高效液相色谱和气相色谱进行分析。
- **AI 辅助晶型分析:** 晶型与药物稳定性和溶解度等理化性质(如溶解度、稳定性、熔点等)相关,晶型变化,可以强烈影响药物的生物利用度,最终影响药物的疗效。传统单纯依赖人工获得稳定性强且溶解度好的晶型,需要耗费大量时间并且成功率很低。AI结合实验的晶型预测和筛选技术可以在2-3周内预测出潜在的最佳药物晶型,实现高效动态配置药物的晶型,有效加速研究和决策过程,大幅降低固体形态在后期应用的风险。

3.1.4 生产与质量控制

- **AI 辅助工艺放大:** AI辅助工艺放大实验,引导药品生产。
- **质量分析知识图谱:** 利用AI构建知识图谱嵌入模型分析各类预测问题,保证药物质量。
- **AI 辅助 GCP/GMP 法规支持:** AI技术通过抓取不同渠道的数据进行分析,包括化学、生物、患者数据,以及文献中的法规信息,实现对良好制造实践(GMP)、良好临床实践(GCP)的支持。

3.2 赋能医院诊疗

AI在医院诊疗上也有很多应用,主要有以下几个方向:

- **AI 医疗影像:**

AI应用于医学影像,是通过深度学习实现机器对医学影像的分析判断,来协助医生完成诊断、治疗工作,帮助医生更快地获取影像信息,进行定性定量分析,提升医生看图/读图的效率,协助发现隐藏病灶。AI主要通过影像分类、目标检测、图像分割、图像检索等方式,完成病灶识别与标注、三维重建、靶区自动勾画与自适应放疗等功能,应用在疾病的筛查、诊断和治疗阶段。

主要解决三种影像需求:

- **病灶识别与标注:** 针对X线、CT、MRI等影像进行图像分割、特征提取、定量分析和对比分析,识别与标注病灶,帮助医生发现肉眼难以发觉的病灶。

靶区自动勾画与自适应放疗：针对肿瘤放疗环节进行影像处理，帮助放射科医生对 CT 片进行自动勾画，在患者上机照射过程中不断识别病灶位置变化以达到自适应放疗目的。

影像三维重建：基于灰度统计量的配准算法和基于特征点的配准算法，解决断层图像配准问题，有效节约配准时间，常用于手术环节。

● AI 辅助筛查与诊断

在疾病辅助筛查与诊断环节，AI 算法模型经过海量医学影像数据训练后，即可对 CT、MR、DR、超声等多模态影像进行分析，辅助医生进行病灶筛查与评估，实现对多部位、多病种的筛查与诊断。

● AI 临床治疗决策

在临床治疗决策环节，AI 模型可基于疾病筛查与诊断结果，立足于疾病知识、经典病例数据，制定相应的术前规划，实现手术导航和预后评估等功能。

● AI 数字化临床试验

临床研究领域常见的数字化产品主要分药企端和医院端两大类：

药企端产品主要有：临床试验项目管理系统、CTMS 临床试验文档管理系统、eTMF 药物警戒系统、PVS 电子化数据采集系统、EDC 患者报告结果 ePRO。

医院端产品主要有：临床试验项目管理系统 CTMS、电子化数据采集系统 EDC、药物管理和随机系统 IWRS、I 期病房系统、科研管理系统、临床试验培训管理系统。

临床研究的首要工作就是数据的搜集和交换，传统方式是数据在研究部门、CRO 间来回传输，不仅效率低下，而且容易造成数据丢失和泄密。通过数字化大幅提高临床试验的效率，缩短新产品上市时间。通过临床试验患者招募、布放临床试验管理系统、临床数据分析系统等数字化工具，可以对海量的临床试验数据进行大数据分析，提取试验关键指标数据，加速临床试验进程。基于人工智能来模拟疾病的进展，预测移植人体器官后的有效工作寿命，大幅加快移植新药的临床试验，或开发出支持传感器的远程患者监测系统，跟踪患者的健康和活动。

● AI 数字化生产

在生产阶段，AI 技术主要改变传统的“生产制造”模式，实现“智能制造”。

(1) 在生产状态管控方面：通过建设电子批次记录系统和完全自动化的制造执行系统(MES)，传感器能够连接、监测、记录和控制整个制造过程和数据流，AI 提供预测性生产和维护，将精益化先进制造与数据分析相结合。

(2) 在批次转换优化方面：企业生产多种产品，车间需要不定期重新配置生产线设备，以匹配不同产品的生产制造，同时对人和生产流程也要进行耗时的标准化工作，批次转换长期以来一直是对产能的极大损耗，AI 可以实现柔性制造。另外，采用虚拟现实眼镜等先进数字化辅助

工具可以在批次转换过程中引导工人，提高操作效率。

● AI 医疗机器人

在诊前阶段，医疗机器人可提供导诊与预问诊服务；在治疗阶段，手术机器人可协助医生进行术前规划、术中定位与导航以及手术操作；在诊后阶段，康复机器人可辅助人体完成肢体动作，协助制定康复计划，缩短恢复周期。

● AI 脑科学

AI 脑科学诊疗主要采用因果推断、深度学习、血流动力学相结合的创新算法。该算法可以有效甄别出统计学的混杂因素，找出具有因果关系的疾病关联指标，实现不同数据分布状态下的稳定预测。通过统一算法平台解决不同的脑科疾病问题，提高了算法鲁棒性和可解释性。一般而言，通过脑机接口，实现用户脑信号被采集、处理、解码并据具体应用要求进行信号转换。AI 脑科学诊疗平台可实现对计算机系统、机器系统（康复机器人、神经假肢等）等外设的控制和脑机交互。

● AI 健康管理

健康管理是变被动的疾病治疗为主动的自我健康监测，通过将物联网及人工智能技术应用于用户全生命周期的数据采集、监测、并对各项数据指标进行综合智能分析，目前主要的应用范围是疾病预防、慢病管理、运动管理、睡眠监测、母婴健康管理、老年人护理等。主要集中应用于风险识别、虚拟护士、精神健康、移动医疗、可穿戴设备、健康干预以及基于精准医学的健康管理等。

4 生物医药产业数字化转型的技术框架体系

生物医药产业数字化转型的技术框架体系通过生物药企和医院两类主体来分别阐述。

4.1 生物制药企业数字化转型的技术框架体系：

数字化技术对生物医药行业赋能，体现在网络化协同、智能化生产、个性化定制与业务化延伸等方面。通过建立数字化转型平台，实现系统整合、流程打通等。从而推进上下游企业生产要素互通共享、统一监测、分析、集中显示、报警和控制，简化生产流程，减少人工干预。主要分为工艺设备层、网络通信层、采集控制层、平台层、业务应用层五层和安全管理、合规管理二列。如下图：

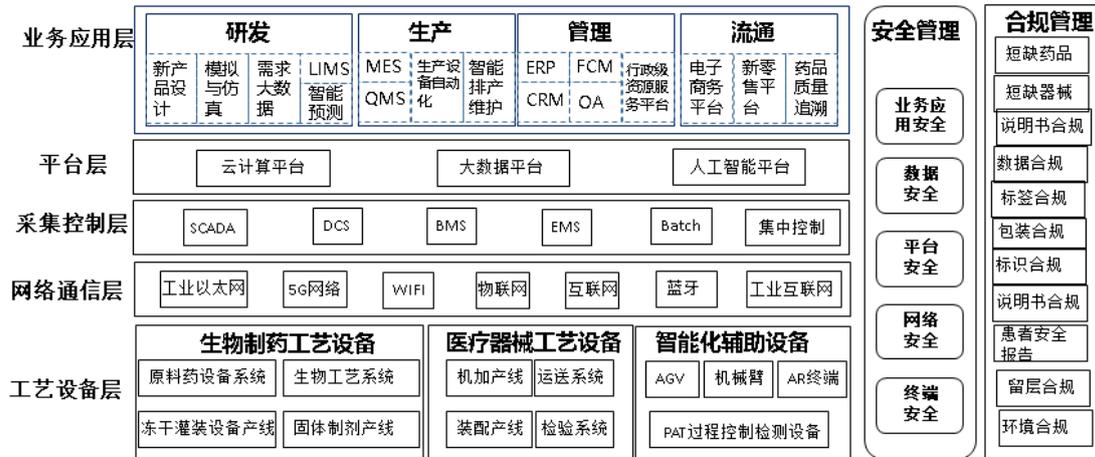


图 1 生物医药企业数字化转型技术框架体系

工艺设备层：是生物医药企业数字化转型的核心基础，包括生产工艺设备和智能辅助设备，通过传感器传导收集数据，来探究关键数据是否满足工艺需求。

网络通信层：主要为生产、服务、运营等提供网络和通信服务。有稳定的工业以太网，有高带宽、低时延、大连接的 5G 网络，大链接的物联网，以及互联网、WiFi、蓝牙等。

采集控制层：主要进行信息化可视化管理，通过设备进行连接，收集、整合设备层有关数据，涉及数据采集及监控系统（SCADA）、集散控制系统（DCS）、空调控制系统（BMS）、指环境监测系统（EMS）、批处理（Batch）系统、集中控制等。

平台层：云计算平台通过池化技术将硬件基础设施资源、平台资源、软件应用资源等虚拟化，实现按需服务的计算和存储能力。大数据平台提供数据采集，数据计算，数据存储，数据分析，数据可视化等。人工智能平台通过智能化算法为企业提供预测、判断和支撑能力，形成可行的解决方案。

业务应用层：通过生产制造执行系统（MES）、仓储管理系统（WMS）、实验室信息管理系统（LIMS）、质量信息管理系统（QMS）等系统的单项建设和系统间集成，实现智能制造业务管理一体化应用。

4.2 医院数字化转型的技术框架体系：

医院的数字化转型创新平台主要思路是构建基于中台思维的技术架构，通过建设数据中台、业务中台和技术中台来构建医疗数字化转型平台。首先数据中台集成了各类传统业务系统的数据，技术中台升级旧业务系统，采用运行基础数据和开放架构支撑，业务中台创新开发业务系统，实现流程即服务，整体按照标准化流程与合规性要求来构建。如下图：

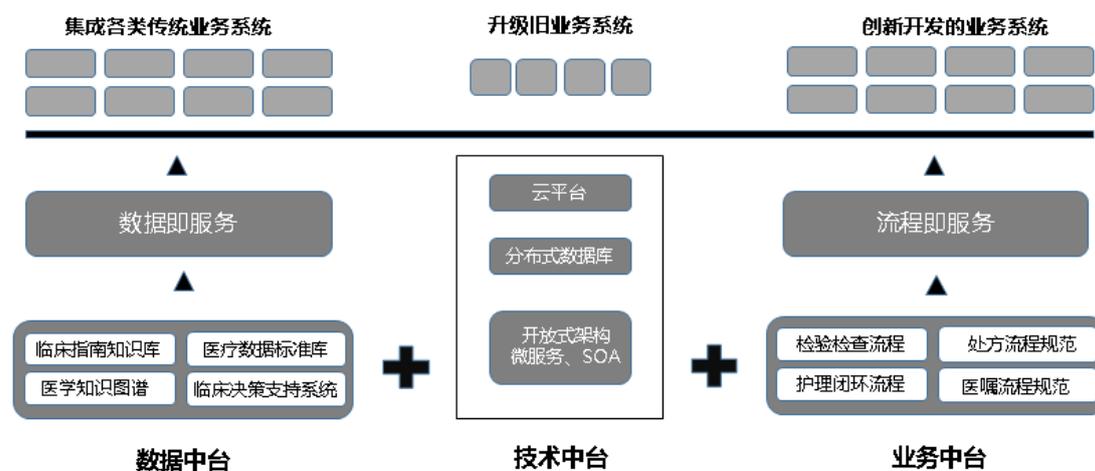


图2 医疗数字化转型平台的组成框架

中台运行机制：

(1) 以业务中台的流程服务为启动点，调入医疗业务标准数据，结合临床指南库数据，通过业务服务 API 结合数据服务 API 来开发构建包括核心系统、电子病历、互联网医疗等在内的各类临床系统。

(2) 各类临床系统产生的源头数据一方面存储在数据中台以供服务随时调用，保证中台对数据的实时使用，另一方面支持数据输出到临床数据仓库并加工处理形成知识，再流入数据中台，供服务调用。

(3) 利用大数据和 AI 分析机器学习，可在数据中台形成新的知识图谱和知识库，通过审核流程，形成创新的医疗知识服务，反哺给业务中台，同时，从创新医疗模式中形成新的医疗流程标准库，根据新政策调整的新规也可以添加到业务中台。

(4) 技术中台始终支撑上述业务中台与数据中台的交互以及动态循环过程。

5 目前生物医药行业数字化转型存在的问题挑战及建议

5.1 连接层面的挑战：

如何连接医院的医生、患者。如何连接药企的研发设计中心、终端设备、监控设备，实现生物医药智慧化生产是一个挑战。

建议：应用人工智能、大数据、物联网等新技术构建以患者为中心的全连接的“数字化智能生态系统”，打造服务集约化、智能化配置，如：终端一体机、自助机、预约挂号与诊疗、互联网 APP 等，实现与患者、医院、药企、合作伙伴等精确、便捷、可信、智能地连接。同时，与患者良性互动，让患者利用手机或传感器借助网络快速上传血压、血糖和睡眠节律等诊疗数据到云端，可在云端系统中心获得诊疗结果。通过构筑医学诊疗和新药研发互动新模式，可实现“行为

标准化、信息数字化、数据结构化”的全域数据智能化 SaaS 服务，只有提高数据的可用性和质量，增加效率，才能延展自身服务能力的深度和广度。

5.2 数字化应用动力不足：

生物医药行业的谨慎特质催生了内部阻力，数字化技术给生物制药行业带来的“现实”利益尚不明确，研发人员往往不愿意使用新的技术和方法，担心失败，这使得新技术难以推广。

建议：无论是对医院还是药企，数字化战略的产生和制定必须具有前瞻性以及全局观，在转型落地的过程当中牵头人必须能够调动研发、运营、市场营销、人力资源等各个部门的参与，要明确数字化转型，是一项长期的整体战略，数字化转型不仅仅是业务的变革，重点在于组织的进化与升级，核心是构建用户数据、内容数据统一看板，利用数据驱动精准营销，实现精益生产和运营。要在清晰的战略目标和举措中，不断试错中成长，进而才能重塑商业模式。

5.3 数据制约困境，缺乏多方协作：

目前，生物医药领域的数据横跨很多地点、不同公司、不同的部门，针对靶点、药物研发相关的数据可能很少或难以获得。

建议：通过“开源”和“增效”两个角度来解决 AI 训练数据量不足的问题，针对目前生物制药企业真实数据相对匮乏，导致 AI 训练数据不足的情况。“开源”即是增加训练数据量，除了利用传统的数据处理思路，如：机器预标注、数据增强等方式来减少数据准备成本从而扩增数据量，还可以通过行业整合的方式，跨界合作，延展数字化转型的能力深度和广度，联合多方数据源头搭建数据共享平台，利用区块链和联邦学习等技术，在保证数据隐私和所有权的情况下，**共享多家制药企业之间的药物数据。联合开发基于机器学习的算法和工具，以加快药物的设计-制造-测试-分析周期**，实现行业数据的合理利用与有效整合。如：国内的太美医疗科技打造 TrialOS 医药数字化协作平台，通过临床研究中的数据交互，流程协作，标准统一，消除信息不对称，整合行业资源，实现各方价值的升级与共赢。在平台上，可构建不同临床研究智能平台，如：适用于医院的“智能临床试验平台”，适用于药企的“临床研究管理和数据中心”，为第三方服务商匹配商机和进行数字化管理的“合作伙伴协作平台”等。“增效”即是通过创新和改良深度学习方法，提高对有限训练数据的使用效果，比如利用迁移学习、小样本学习等方法，利用少量训练数据对现有预训练模型进行微调，预训练模型可以来自相同任务下现有的通用模型，或者通过低成本大体量的数据集训练获得，从而实现模型在新数据集下的相应功能。

5.4 数字化诊疗缺乏：

目前，在靠近居民小区的区域，还普遍缺乏数字化诊疗的基础设施和手段，无法满足居民在突发紧急状况的快速医疗诊治的要求。

建议：构建全社会的医疗数字化诊疗服务，目前，我国疫情防控形势严峻，疫情形势下的数字化诊疗发展迫在眉睫，构建全社会的数字化诊疗服务十分必要。建议把医院、社区或居民小区

作为数字化诊疗服务的重点区域，尤其解决居民就近最后一公里的诊疗服务问题。现在，全国大多数居民小区并没有配置医疗健康诊疗场所，居民的诊疗服务并没有相应的设施和手段提供，如：医疗服务（核酸检测）、医药流通（应急急救药）、便利的医疗保险支付、自助机器人、心脏 AED 除颤急救设施布放等。很多时候，居民疾病紧急救助及染疫情况不能在第一时间被处置和发现。因此，建议在全国居民小区构建数字化诊疗驿站，运用 5G、AI、大数据、云等技术实现数字化诊疗平台服务。居民可通过自助机器人服务和 AI 生物识别（人脸、静脉、虹膜）技术实现人员自动判定、比对和识别，并自动完成医疗信息采集、采样工作。采集样本信息通过网络可上传到云端分析系统，并快速反馈结果。数字化诊疗平台，能为用户提供 7X24 小时全天候一站式服务，同时，建议还可通过视频通话实现在线咨询、药物购买、预约实验室检测及送药上门、居家实验室测试、心理健康支持和其他集成医疗服务等。建议全国一体化构建实施，集结全国的各科优秀名医签约入驻平台，这样能减少了医护人员配置，极大提升诊疗效率，真正打造出居民身边的“数字化诊疗服务圈”。

6 结束语

本文对数字技术赋能生物医药行业实现新发展，做了系统详尽的分析，详细描述了数字技术在生物制药和医院两类不同主体赋能的主要方向和模式，同时也对两类主体的技术框架做了阐述，结合目前的问题和挑战，最后对数字技术如何赋能生物医药领域的发展提出了很好的建议。

参考文献：

- [1] 2022 年中国医疗 AI 行业洞察报告[R].36 氪研究院,2022
- [2] 生物医药企业数字化转型白皮书[R].工业互联网产业联盟,2021
- [3] 2021 中国 AI/计算制药产业报告：药物发现篇[R].亿欧智库,2021
- [4] 以中台思维构建医疗数字化转型平台突破医院信息系统瓶颈[R].IDC 卫宁健康, 2021

[作者简介]

马战凯 1968 年 1 月出生，性别：男，复旦大学 MBA，中国电信研究院战略研究所（上海），高级分析师，主要研究方向是数字化转型。