



信息通信领域产学研合作特色期刊 十佳皖刊
第三届国家期刊奖百种重点期刊 中国科技核心期刊

ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN

中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

<http://tech.zte.com.cn>

2020年12月·第6期

专题：工业互联网技术与应用



《中兴通讯技术》第8届编辑委员会成员名单

顾问 侯为贵(中兴通讯股份有限公司创始人) 钟义信(北京邮电大学教授) 陈锡生(南京邮电大学教授)

主任 陆建华(中国科学院院士)

副主任 李自学(中兴通讯股份有限公司董事长) 糜正琨(南京邮电大学教授)

编委(按姓名拼音排序)

- | | | | |
|-----|-----------------|-----|-------------------------|
| 陈建平 | 上海交通大学教授 | 唐雄燕 | 中国联通网络技术研究院首席科学家 |
| 陈前斌 | 重庆邮电大学教授、副校长 | 陶小峰 | 北京邮电大学教授 |
| 葛建华 | 西安电子科技大学教授 | 王文博 | 北京邮电大学教授、副校长 |
| 管海兵 | 上海交通大学教授 | 王文东 | 北京邮电大学教授 |
| 郭庆 | 哈尔滨工业大学教授 | 王喜瑜 | 中兴通讯股份有限公司执行副总裁 |
| 洪波 | 中兴发展股份有限公司总裁 | 王翔 | 中兴通讯股份有限公司高级副总裁 |
| 洪伟 | 东南大学教授 | 卫国 | 中国科学技术大学教授 |
| 黄宇红 | 中国移动研究院副院长 | 吴春明 | 浙江大学教授 |
| 纪越峰 | 北京邮电大学教授 | 邬贺铨 | 中国工程院院士 |
| 江涛 | 华中科技大学教授 | 肖甫 | 南京邮电大学教授 |
| 蒋林涛 | 中国信息通信研究院科技委主任 | 解冲锋 | 中国电信研究院教授级高工 |
| 李尔平 | 浙江大学教授 | 徐安士 | 北京大学教授 |
| 李红滨 | 北京大学教授 | 徐子阳 | 中兴通讯股份有限公司总裁 |
| 李厚强 | 中国科学技术大学教授 | 续合元 | 中国信息通信研究院副总工 |
| 李建东 | 西安电子科技大学教授 | 薛向阳 | 复旦大学教授 |
| 李军 | 清华大学教授 | 薛一波 | 清华大学教授 |
| 李乐民 | 中国工程院院士 | 杨义先 | 北京邮电大学教授 |
| 李融林 | 华南理工大学教授 | 杨震 | 南京邮电大学教授、原校长 |
| 李少谦 | 电子科技大学教授 | 叶茂 | 电子科技大学教授 |
| 李自学 | 中兴通讯股份有限公司董事长 | 易芝玲 | 中国移动研究院首席科学家 |
| 林晓东 | 中兴通讯股份有限公司副总裁 | 张宏科 | 北京交通大学教授 |
| 刘健 | 中兴通讯股份有限公司高级副总裁 | 张平 | 中国工程院院士 |
| 刘建伟 | 北京航空航天大学教授 | 张卫 | 复旦大学教授 |
| 陆建华 | 中国科学院院士 | 张云勇 | 中国联通集团产品中心总经理 |
| 马建国 | 广东工业大学教授 | 赵慧玲 | 工业和信息化部通信科技委信息通信网络专家组组长 |
| 孟洛明 | 北京邮电大学教授 | 郑纬民 | 中国工程院院士 |
| 糜正琨 | 南京邮电大学教授 | 钟章队 | 北京交通大学教授 |
| 任品毅 | 西安交通大学教授 | 周亮 | 南京邮电大学教授 |
| 石光明 | 西安电子科技大学教授、副校长 | 朱近康 | 中国科学技术大学教授 |
| 孙知信 | 南京邮电大学教授 | 祝宁华 | 中国科学院半导体研究所研究员 |
| 谈振辉 | 北京交通大学教授、原校长 | | |

目次

中兴通讯技术 (ZTE TECHNOLOGY JOURNAL)
总第 155 期 第 26 卷 第 6 期 (卷终) 2020 年 12 月

专题：工业互联网技术与应用

5G+ 工业互联网应用实践 **02**
陈亿根, 尹晓峰, 邵黎勋

5G+ 工业互联网能力开放进展和研究 **07**
邢真, 邵伟翔, 高峰

水泥行业融合 5G+ 工业互联网的技术发展思考 **11**
黄颖, 杨晓芳, 王鹏

可定制的 5G+ 工业互联网安全能力 **14**
王继刚, 王庆, 滕志猛

工业互联网场景下 5G TSN 关键技术研究 **21**
张强, 王卫斌, 陆光辉

工业互联网标识在家居定制行业中的应用探索 **27**
区景安, 汪毅, 陈琴

专家论坛

工业互联网技术洞察 **34**
沈彬, 李海花, 高腾

38 中国工业互联网投融资现状分析与建议
王欣怡, 肖荣美

企业视界

43 5G 室内分布：数字化转型之道
徐法禄

技术广角

50 基于 REC 技术的可调谐半导体激光器
陈向飞, 肖如磊, 陆骏

57 硅集成磁光非互易光学器件技术
刘书缘, 邓龙江, 毕磊

64 基于智能算法的光子器件研究展望
宋宇锋, 张晗

综合信息

37 《中兴通讯技术》2021 年专题计划

I 《中兴通讯技术》第 26 卷总目次

2020 年第 1—6 期专题计划及策划人

1. 蜂窝车联网产业与技术

中国移动通信研究院首席科学家 易芝玲
中国移动通信研究院技术经理 潘成康

3. 5G 核心网技术与挑战

工业和信息化部科技委
信息通信网络专家组组长 赵慧玲

5. 网络人工智能技术

电子科技大学教授 虞红芳

2. 智能化通信应用芯片技术

中国科学院半导体研究所研究员 祝宁华
中国科学院半导体研究所研究员 李明

4. 无线网络空中计算

中国科学技术大学教授 卫国
中国科学技术大学副研究员 陈力

6. 工业互联网技术与应用

中国信息通信研究院副总工 续合元

MAIN CONTENTS

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol. 26 No. 6 Dec. 2020

Special Topic: Technologies and Applications of Industrial Internet

- Applications of 5G + Industrial Internet **02**
CHEN Yigen, YIN Xiaofeng, SHAO Lixun
- Development and Research of 5G + Industrial Internet Capacity **07**
XING Zhen, SHAO Weixiang, GAO Feng
- Thoughts on the Integration of 5G + Industrial Internet in Cement Industry **11**
HUANG Ying, YANG Xiaofang, WANG Peng
- Customizable 5G + Industrial Internet Security Capabilities **14**
WANG Jigang, WANG Qing, TENG Zhimeng
- 5G TSN Key Technologies in Industrial Internet Scenario **21**
ZHANG Qiang, WANG Weibin, LU Guanghui
- Application of Industrial Internet Identification in Home Customization Industry **27**
OU Jing'an, WANG Yi, CHEN Qin

Expert Forum

- 34** Insights into Industrial Internet Technologies
SHEN Bin, LI Haihua, GAO Teng
- 38** Status Analysis and Suggestions of Industrial Internet Investment and Financing in China
WANG Xinyi, XIAO Rongmei

Enterprise View

- 43** 5G Indoor Distribution System: the Way of Digitalized Transformation
XU Falu

Technology Perspective

- 50** Tunable Semiconductor Laser Based on Reconstruction-Equivalent-Chirp Technique
CHEN Xiangfei, XIAO Rulei, LU Jun
- 57** Silicon Integrated Magneto-Optical Nonreciprocal Photonic Devices
LIU Shuyuan, DENG Longjiang, BI Lei
- 64** Research Prospect of Photonic Devices Based on Intelligent Algorithm
SONG Yufeng, ZHANG Han

期刊基本参数: CN 34-1228/TN*1995*b*16*68*zh*P* ¥ 20.00*15000*12*2020-12

敬告读者

本刊享有发表文章的版权, 包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权, 所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。未经本刊许可, 不得以任何形式全文转载本刊内容; 如部分引用本刊内容, 须注明该内容出自本刊。



工业互联网技术与应用专题导读

专题策划人



续合元

中国信息通信研究院副总工程师，教授级高级工程师，享受国务院政府特殊津贴，担任国际电信联盟电信标准化部门（ITU-T）第13研究组（SG13）副主席、2020世界电信标准化全会（WTSA-20）亚太区筹备组副主席、中国通信标准化协会（CCSA）物联网技术委员会（TC10）主席，同时担任北京通信学会理事及专业委员会主任委员、边缘计算产业联盟副秘书长、无锡物联网创新促进中心理事等；目前主要致力于未来网络、互联网、卫星互联网，物联网、车联网，工业互联网等领域的研究。

工业互联网是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。通过人、机、物的全面互联，实现全要素、全产业链、全价值链的连接，工业互联网将推动全新的工业生产制造和服务体系的形成。工业互联网由网络、平台、安全3个部分构成。其中，网络是实现各类工业生产要素泛在深度互联的基础，包括网络互连体系、标识解析体系和信息互通体系。建设低延时、高可靠、广覆盖的工业互联网网络基础设施，可以实现数据在工业各个环节的无缝传递，支撑形成实时感知、协同交互、智能反馈的生产模式。平台是工业全要素链接的枢纽，它下连设备，上连应用，通过对海量数据的汇聚、建模分析与应用开发，推动制造能力和工业知识的标准化、软件化、模块化与服务化，支撑工业生产方式、商业模式创新和资源高效配置。安全是工业互联网健康发展的保障，涉及设备安全、控制安全、网络安全、应用安全、数据安全5个方面。建立工业互联网安全保障体系，能够有效识别和抵御各类安全威胁，化解多种安全风险，为工业智能化发展保驾护航。

党中央、国务院高度重视工业互联网发展，习近平总书记多次作出重要批示，要求实施工业互联网创新发展战略，加强新型基础设施建设。中国工业互联网取得积极进展，有力支撑了经济高质量发展。5G+工业互联网加速向企业生产核心环节延伸：已上线的标识解析二级节点达75个，标识注册总量突破84.62亿，工业互联网平台接入工业设备达到

4 000万台；5G+工业互联网的应用创新生态持续壮大：工业互联网已覆盖制造业主要门类，并向能源、交通、医疗等领域拓展；经济社会贡献不断增强：2019年工业互联网产业经济规模达到2.1万亿元。在2020年的抗击新冠肺炎疫情的过程中，工业互联网为物资保障、供需对接、复工复产等提供重要支撑，发挥重要作用。

当前，中国石化、钢铁、电子信息、家电、服装、机械、汽车、装备、航空航天等行业广泛应用了5G+工业互联网技术，助力企业实现生产成本下降、产品质量优化、绿色低碳发展等数字化转型目标。本期专题及专家论坛栏目针对5G+工业互联网的技术能力、行业应用、安全保障开展了讨论，同时也对工业互联网与新技术的结合进行了探索，并对中国工业互联网投融资活动的一些关键问题进行了研究。

本专题论文的作者是来自运营商、设备商和研究机构等工业互联网技术研究优势单位的专家学者。这些论文凝聚了他们多年的研究成果和工作经验。我们希望这些论文能给读者提供有益的启示和参考。在此，对各位作者的大力支持表示衷心感谢。工业互联网产业和技术还将持续发展，我们欢迎各位专家交流合作。

续合元

2020年11月12日

5G+ 工业互联网应用实践

Applications of 5G + Industrial Internet



陈亿根 /CHEN Yigen, 尹晓峰 /YIN Xiaofeng, 邵黎勋 /SHAO Lixun

(浙江蓝卓工业互联网信息技术有限公司, 中国 宁波 315000)

(Bluetron Industry Internet Information Technology Co.,Ltd., Ningbo 315000, China)

摘要: 5G 的高速率、大容量以及超可靠低时延的特性在工业互联网场景中得到应用。在工业企业数字化转型的过程中, 5G 无线传输技术将分散在企业内的生产实时数据及时上传至工业互联网平台, 以做进一步分析处理; 5G 网络切片技术结合工业互联网平台提供的边缘计算能力, 为网络提供了更低的时延、更好的灵活性和安全性; 5G 大宽带技术可以将工业视频实时回传, 并利用人工智能技术进行分析, 极大地提高了企业的现场管控能力; 5G 的定位技术给制造业智能巡检带来了新的技术选择。

关键词: 5G; 增强移动宽带(eMBB); 超可靠低时延通信(URLLC); 海量机器类通信(mMTC); 工业互联网平台

Abstract: High-speed, large-capacity and ultra-reliability, low-latency are the main features of 5G, which are used in industrial Internet scenarios. In the process of digital transformation of industrial enterprises, the real-time production data scattered within the enterprise will be uploaded to the industrial Internet platform for further analysis and processing by 5G wireless transmission technology. Combined with the edge computing capability provided by the industrial Internet platform, 5G network slicing technology can achieve lower latency, better flexibility and security. In addition, 5G wide broadband technology can transmit industrial video back to the platform in real time, and analyze it by artificial intelligence (AI) technology, which greatly improves the on-site management and control ability. 5G positioning technology brings new technology choice to intelligent inspection in manufacturing industry.

Keywords: 5G; enhanced mobile broadband (eMBB); ultra-reliable and low latency communications (URLLC); massive machine type communications (mMTC); industrial Internet platform

DOI: 10.12142/ZTETJ.202006002

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20201110.1104.002.html>

网络出版日期: 2020-11-10

收稿日期: 2020-10-10

物联网、云计算、大数据等新一代信息通信技术的发展, 正深刻改变着传统制造业的模式, 也将会引发其生产方式、商业模式乃至产业形态的变革。5G 技术加速智能制造转型, 通过生产设备网络化, 实现工厂车间“物联网”; 通过生产数据可视化, 利用大数据分析进行生产决策; 通过生产文档无纸化, 实现高效、绿色制造;

通过生产过程透明化, 实现智能工厂的“神经”系统; 通过生产现场无人化, 真正实现“无人”工厂^[1]。

工业企业内部目前存在工控网络、生产物联网、视频监控网、移动办公网等复杂的多元化网络。现有的工业总线存在产业封闭、发展缓慢、技术落后等问题, 严重制约了企业的发展。随着人工成本的快速增加, 企

业自动化、智能化转型迫在眉睫。现有网络以有线和 Wi-Fi 的方式传输, 有线网络布线成本高、周期长、走线难, 严重限制了设备的移动范围, 影响了产线柔性化, 难以解决工业互联网发展进程中大量的新增物联网设备的灵活接入、大范围移动的需求; 采用 Wi-Fi 也是无奈之选, 因其移动范围有限, 抗干扰差, 切换性能差, 容

量受限。5G 可凭借高带宽、高可靠、低时延等一些特点助力企业向无线化、自动化、智能化、柔性制造方向演进。

1 工业场景下的 5G 技术

1.1 工厂 5G 服务平台整体架构

不同于非工业场景，工业场景中工厂 5G 服务平台的整体架构也有所变化。5G 无线技术可以使工厂内的各种控制、质量、管理、可视和安全领域的行业应用场景向柔性化、自动化和无线化的方向演进；5G 云网一体化的属性，可以解决现场应用云端实时控制问题；5G 企业专网方案，可以提供安全可靠的网络支撑；网络切入、公有云、私有云、边缘云的融合战略^[2]为企业提高性价比的 5G 解决方案选择。图 1 为工厂 5G 服务平台整体架构图。

1.2 5G 网络部署模式

5G 网络部署共有 3 种模式^[3]：

(1) 纯 5G 网络逻辑切片模式。

该模式依托于电信运营商 5G 公网，适用于对数据安全性不是特别敏感的用户。企业不需要本地化部署相应的硬件设备，可以根据企业的需求，配置不同的网络切片。

(2) 公网、私网公用基站设施模式。

该模式仍依托于电信运营商的 5G 基站与 5G 核心网，但企业会自建核心网。企业和电信运营商共享 5G 空口，控制面数据上传至电信运营商核心网，而用户面数据分流至企业内核心网。在该模式下，用户面数据不经过公网，安全性大大增加。与此同时，企业内核心网的建设成本会大大增加。

(3) 所有网络本地独立部署模式。

该模式下，企业 5G 端到端设备全部需要新建，因此该模式适用于对数据安全极为苛刻的企业。虽然所有数据都在企业内流传，整体安全性大大提高，但与此同时带来的是建设维护成本的急剧增加，与公网的数据交互能力为零。

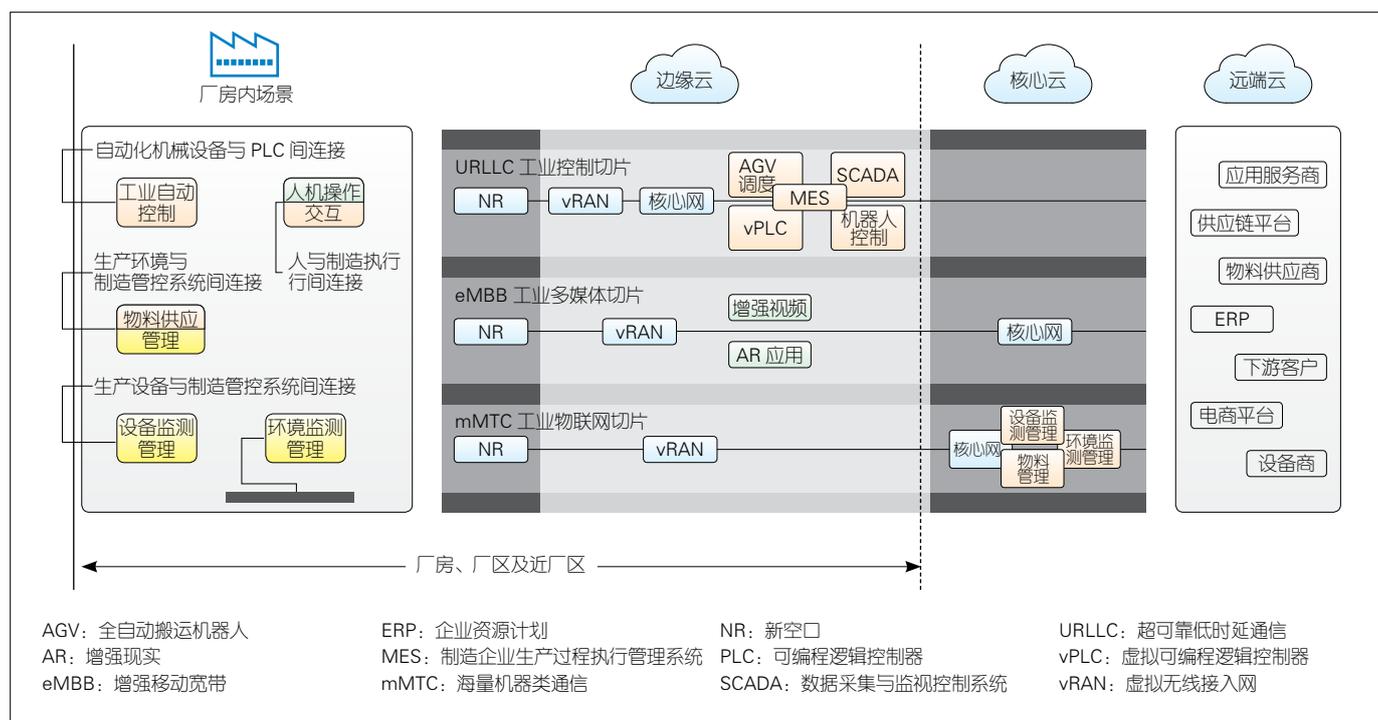
1.3 5G 通信系统设计方案

为了满足工业制造的需求，5G 通信系统做了如下的设计方案：

(1) 5G 无线网络支持有源天线处理单元 (AAU)、集中单元 (CU)、分布单元 (DU) 的灵活切分和部署，满足不同场景下的切片组网需求。CU 可实现云化部署，便于无线资源集中管理，也可以下沉到边缘部署，从而降低传输时延，满足工业低时延需求。

(2) 为了满足工业制造对无线网络在端到端延时、吞吐量、连接数密度、可靠性、能源效率等性能指标的要求，5G 通信系统采用了高频段传输、多天线传输、同时同频全双工、对等节点间通信 (D2D)、密集网络以及新型网络架构等关键技术。

(3) 5G 传输网切片运用虚拟化技术，实现网络拓扑资源虚拟化，构建虚拟网络。支持多层次的切片隔离技术，如：灵活以太网 (FlexE)、标签分发协议 (LDP)、标签交换路径 (LSP) 等技术，满足不同隔离要求下



▲图 1 工厂 5G 服务平台整体架构图

的切片需求，实现工业高隔离要求下的底层快速转发。

(4) 5G 网络采用软件定义网络 (SDN) 架构的层次化控制器，实现物理网络和切片网络的端到端统一控制和管理，满足不同类型工业业务对传输的不同要求。

(5) 5G 网络基于多层次的切片技术和移动边缘计算 (MEC) 技术，从接入安全、网络安全、外网访问安全 3 个方面，为工业领域的不同业务提供差异化的隔离服务和安全保障。

(6) 5G 网络通过统一的智能化系统，实现切片的端到端编排管理。电信级持续交付 (DevOps) 平台跨越切片的设计域和运行域，实现了从设计、测试、部署到运行监控，以及动态优化的切片全生命周期管理自动化闭环，并通过全流程模型化来驱动。该平台具备较为完备的网络管理能力

和网络资源的灵活匹配，满足工业场景下快速定制和部署需求。

2 5G+ 工业互联网平台

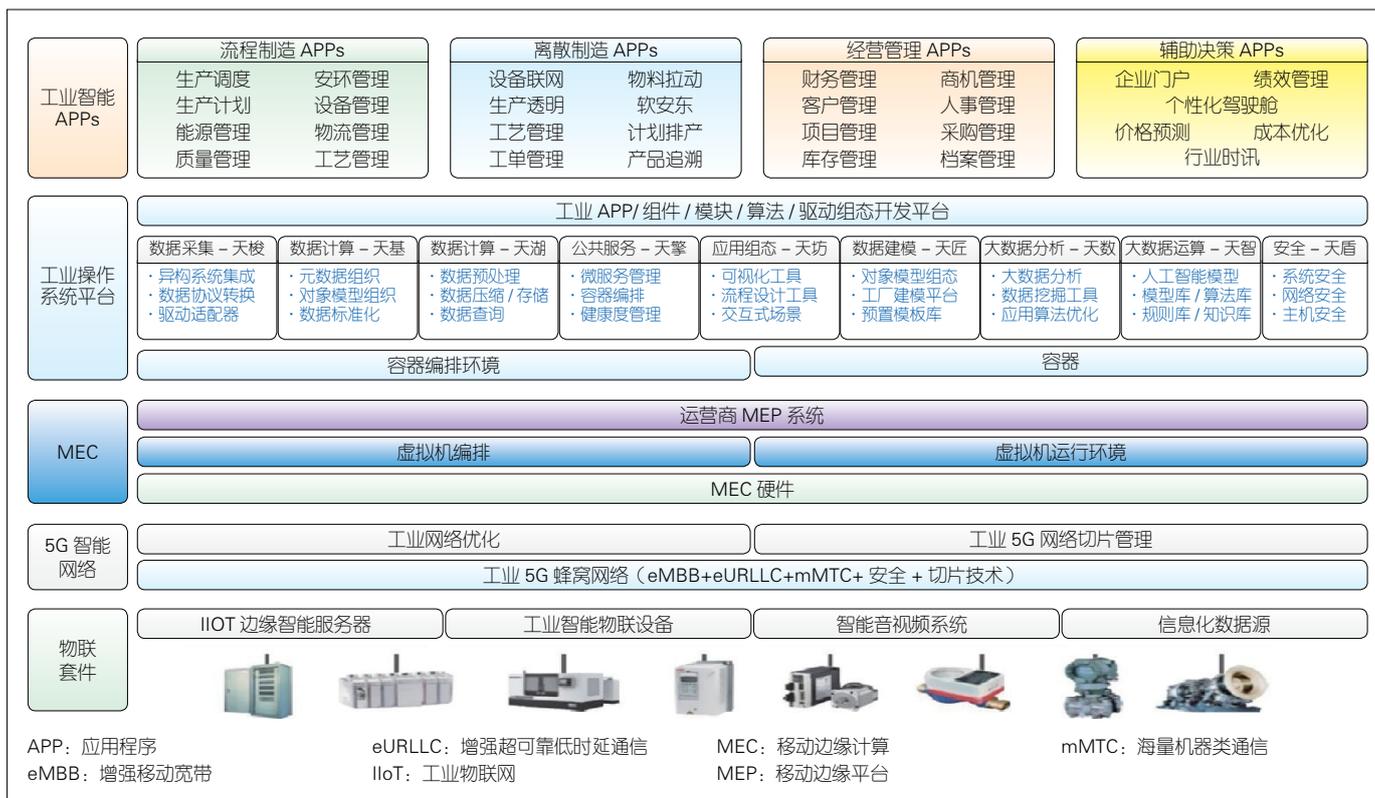
MEC 改变了 4G 中网络和业务分离的状态，通过给传统无线网络增加 MEC 平台网元，将业务平台 (包含内容、服务、应用) 下沉至移动网络边缘，为移动用户提供计算和数据存储服务。将工业互联网平台部署在 MEC 上，可在无线接入网络与现有应用服务器之间的回程线路上节省大量带宽使用^[4]。

根据工业制造对无线通信的严格要求，基于 5G 网络 + MEC 的全新服务化架构，以及增强移动宽带 (eMBB)、超可靠低时延通信 (URLLC)、海量机器类通信 (mMTC) 和网络切片等关键技术，可以实现制造企业内网无线接入网络和传输网络。解耦 5G 网络功能为服务化组件，调用轻量级组件开放接口，能够满足工业企业实现按需、

动态、弹缩和高可靠的网络分配、运维和管理的需求，可以构建满足工业制造需求的 5G 通信系统。5G+ 工业互联网的总体技术架构如图 2 所示。

为了建设 5G 网络化推广平台，满足工业企业快速开发行业应用的需求，浙江蓝卓工业互联网信息技术有限公司提供了搭建赋能工业制造的工业互联网测试平台。该平台可以利用 5G 低时延的特性，控制工业设备；利用 5G 网络的高带宽特性，采集工业的实时运行数据和视频类数据；利用 5G 的海量连接特性，连接众多的工业互联网设备，实现设备“上网”。5G+ 工业互联网平台网络拓扑如图 3 所示。

5G+ 工业互联网平台的工业数据采集使用基于 5G 的无线网络，对不同类型的设备和系统进行数据采集，支持 3 000 余种工业设备通信协议的转换和数据接入，可自由连接业界主流的远程终端单元 (RTU)、可编程逻



▲图 2 5G+ 工业互联网技术架构图

辑控制器(PLC)、集散控制系统(DCS)等系统,实现数据的远程采集和通信,在数据传输过程中通过数据加密进行数据安全防护。数据采集软件支持热备冗余、自动重连和断线回补机制,保证数据传输的可靠性和完整性。

工业实时数据库软件能够保证采集的多元数据进行分析、处理、存储和应用,具体包括采集接口组件、权限管理组件、组态服务组件、实时数据处理组件、磁盘历史数据库等。

微服务和容器技术的采用,使得5G+工业互联网平台在MEC的部署上非常方便。对于中小企业应用程序的部署,5G+工业互联网平台采用了一键式的应用商店下载和部署方法,提供了统一的应用程序管理界面管理应用,给用户带来了极大的便利。

5G+工业互联网平台帮助企业实现了工厂区域的信息全集成,并在此基础上搭建集工业智能APP组态开发平台、工业大数据分析平台、工业人工智能引擎服务、工业智能APP多位一体的工业操作系统平台,实现云(云

互联网平台)、企(工厂互联网平台)、端(边缘计算节点)3层架构的有机统一,从而实现管控一体化交互,并赋能用户,以集成化、数字化和智能化手段解决生产控制、生产管理和企业经营的综合问题。

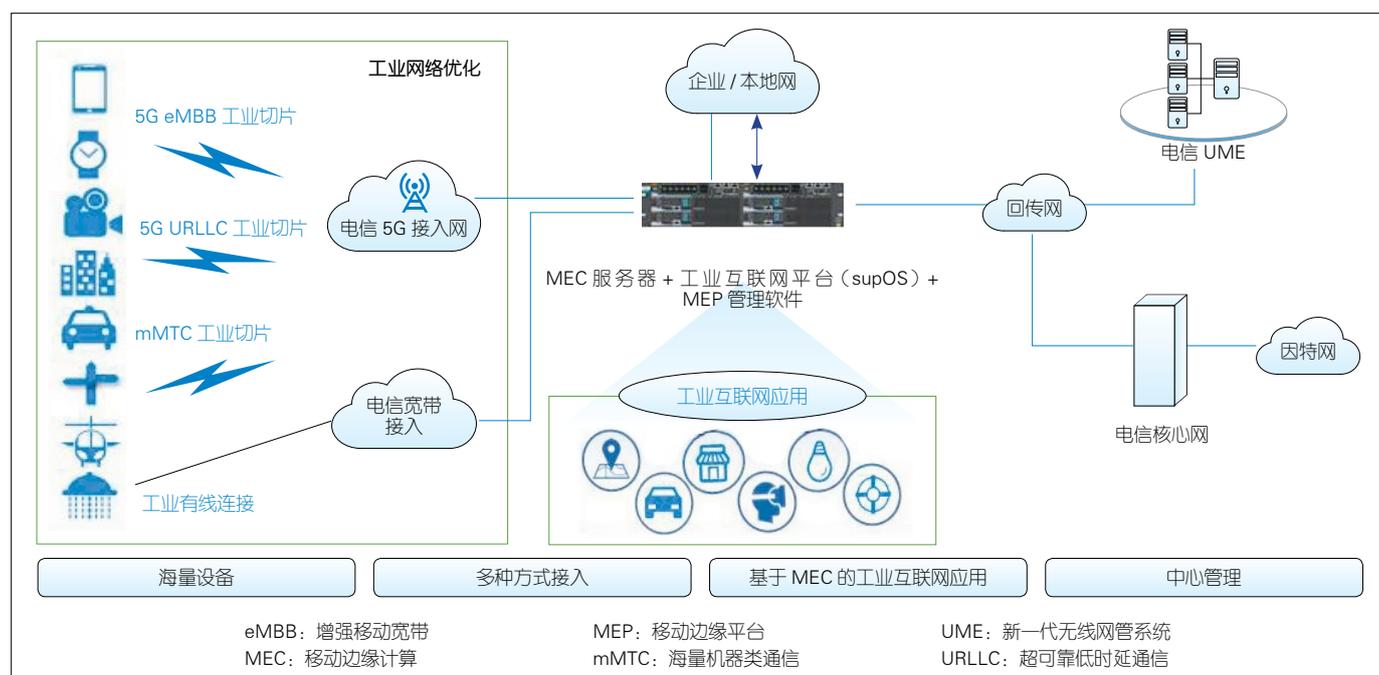
3 5G+ 工业互联网平台落地方案

我们以红狮集团桐庐公司为例,来介绍5G+工业互联网平台的落地方案。红狮集团正处于高速发展期,分厂多、分布广。为了及时掌握分厂的产、供、销、管、控数据,从而实现不同分厂在产量、质量和单耗方面的集中管控和优化,红狮集团采取了5G+工业互联网的技术路线,实施了本项目。本项目利用supOS工业操作系统,在集团和分厂两层构建大数据中台。单个厂区可借助5G实现各类终端高速接入,通过MEC承载supOS平台实现业务本地化和边缘计算,确保业务数据的低时延和高可靠。云上supOS总部平台还可通过高速专网,对各个厂区的平台应用进行支撑和管理。该项目

将工厂运维过程中的生产数据、视频监控数据、操作数据和管理数据进行有效融合,为工业大数据的分析和挖掘奠定基础,构建水泥行业互联智能工厂,实现面向水泥行业的工业大数据平台和工业智能APP生态圈。

supOS工业操作系统提供“平台+工业智能APPs”的应用模式,用统一工厂模型、数据平台和APP应用平台的方法来解决传统的烟囱式垂直应用带来的信息孤岛和数据融合困难问题。基于supOS工业互联网平台和5G网络,可解决工厂/基地/集团三层的大数据互动和业务联动,在实现工厂精细化管理的同时,更好地进行集团化管控,实现异地多数据中心数据容灾、同步、双活、信息技术(IT)资源虚拟化管理、动态扩展设厂迁移。

中控、蓝卓与中国电信、中兴通讯正在开展5G+工业互联网实践。当前红狮水泥厂已实现室外5G宏站全覆盖,厂区南部利旧一个现网站点,厂区中部新建一个站点。这样的部署可满足上行100M带宽和下行600M



▲图3 5G+工业互联网平台拓扑示意图

带宽的要求。借助 5G 网络低时延、高带宽、移动边缘计算等特性，融合基于 supOS 工业操作系统的工业智能应用 APP、大数据分析和人工智能优势，深入开展基于 5G 的场景化智能制造应用：工业设备物联、远程数据可视化、工业现场巡检、厂内物流跟踪追溯等。

(1) 数字化决策分析：基于统一的 supOS 数据平台和数据分析应用，集团和分厂可分级管控，即不同层级、不同业务、不同区域的管理者通过 5G 网络可看到不同的可视化大数据分析，穿透不同的数据深度，实现多维度个性化驾驶舱画面。

(2) 大数据分析应用：supOS 大数据分析平台借助 5G 网络，利用多条水泥生产线两年的历史生产数据，建立水泥抗压强度预测模型，实现水泥抗压强度的提前精准预测，平均相对误差可以控制在 2.1% 以内。

(3) 机器视觉分析应用：通过机器视觉技术和 5G 网络，可以实现水泥包计数检测、进料秤断料检测、物料颗粒大小检测、链条齿轮磨损检测、链条机轮子停转检测、禁入区检测、装车时对准检测等智能化应用，从而实现替代人工现场巡检。

(4) 工业设备远程运维：采用动设备监测诊断 APP，可通过 5G 网络对辊压机、生料磨等水泥设备进行在线诊断与远程运维，实现设备状态监测、动态风险、智能预警、智能诊断、预测维修等服务。

(5) 智能点检与视频轮巡：整合设备近场通信 (NFC) 位置识别、视频监控、移动巡检、隐患登记、震动预测等应用，实现智能化多元信息感知巡检应用。现场维护人员携带高清清单终端或增强现实 (AR) 眼镜，通过 5G 网络，利用高清或 AR 图像与平台专家实时交互，远程指导快速定

位解决问题。

(6) 视频分析与分散控制系统 (DCS) 联动：通过对来自 5G 网络生产过程视频数据的实时分析，产生预警提醒，并与 DCS 生产过程控制系统进行联动，实现联动响应，提升生产工艺自动化控制水平。

(7) 大数据与先进控制系统 (APC) 联动：基于 5G 网络并利用平台集成的大数据分析，可以预测关键指标数据及最佳参数匹配，指导 APC 进行优化自动调控，打破 APC 独立进行参数稳定调节这样的常规功能模式，通过平台整合不同系统，进行综合管控。如与 DCS 程序的启停顺控和联锁保护实现同步，可以实现对工序、设备的一键启停、自动控制。利用平台集成的大数据分析算法，对获取的综合数据进行大数据分析，预测关键指标数据及最佳参数匹配，以指导 APC 进行优化自动调控。

(8) 智能物流应用：实现智能仓储物流一体化管理，从手机 APP 预约、自助制卡终端的射频识别系统 (RFID) 到地磅无人值守系统的地磅/人体秤、视频/红外限位、车辆显示大屏及语音叫号、出入门禁管理、车辆地理信息系统 (GIS)、装卸车和罐区测量，基于数据平台实现基于 5G 网络的自动信息流转和互动，减少作业人员，提高了物流效率。

(9) 远程驾驶：偏远、有毒有害物质较多的特殊场景的工厂，面临着工作环境恶劣、投入成本高、危险性高等诸多问题。5G 远程巡检系统可以实现人车分离远程作业。工程机械设备部署在园区现场，操作人员在本地控制舱中进行远程操控，车载的多路高清图像通过 5G 的大带宽回传至本地服务器，操作人员发送的控制指令通过 5G 网络发送至现场，从而实现 5G 远程驾驶巡检，解决园区作业难题。

4 结束语

5G 在工业中的应用目前仍处于起步阶段，有很多内容需要探索，如运动控制、机器人控制、移动面板、移动机器人、大规模连接和工业 AR 及监控等场景。未来我们将努力使 5G 技术和工业互联网技术深度融合，让制造业变得更加智能，使 70% 以上工控场景受益。我们须要充分发挥 5G+ 平台 +APP 的联合优势，赋能工业企业，共同探索 5G 工业标准!

参考文献

- [1] 孙松林. 5G 时代经济增长新引擎 [M]. 北京: 中信出版集团, 2019
- [2] 王映民, 孙韶辉. 5G 移动通信系统设计与标准详解 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2020
- [3] 基于 5G 技术企业级网络解决方案 [EB/OL]. (2019-10-23)[2020-10-10]. <http://www.cww.net.cn/article?id=459730>
- [4] 中兴通讯齐晓虹: “四轮驱动”, 边缘计算驶入商用部署快车道 [EB/OL]. (2020-04-29)[2020-10-10]. <http://www.cww.net.cn/article?id=469202>

作者简介



陈亿根，浙江蓝卓工业互联网信息技术有限公司解决方案专家，从事 5G 与工业互联网融合解决方案的规划设计。



尹晓峰，浙江蓝卓工业互联网信息技术有限公司解决方案技术经理，主要负责油气、建材水泥行业解决方案的规划设计。



邵黎勋，浙江蓝卓工业互联网信息技术有限公司解决方案总监，负责公司整体产品与解决方案的规划。

5G+ 工业互联网能力开放 进展和研究

Development and Research of 5G + Industrial Internet Capacity

邢真 /XING Zhen, 邵伟翔 /SHAO Weixiang, 高峰 /GAO Feng

(中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)



摘要: 面向 5G 网络与工业互联网融合发展的背景, 提出了一种 5G 网络能力开放体系架构。该架构分为终端层、网络层、能力层、应用层, 并包含网络功能虚拟化、软件定义网络、网络功能管理等内容。应用层为能力开放的需求方, 借助能力层所提供的统一接口, 通过对终端和网络层资源的调用实现 5G+ 移动机器人、5G+ 远程控制等新型融合应用。

关键词: 工业互联网; 5G; 能力开放; 网络切片; 边缘计算

Abstract: Facing the background of the integration and development of 5G network and industrial Internet, a 5G network capability exposure system architecture is proposed. The layered architecture includes terminal layer, network layer, capability layer, application layer as well as network functions virtualization, software-defined network, network function management, etc. The application layer is the user of exposed capabilities. With the help of the unified application programming interfaces provided by the capability layer, new integrated applications such as 5G + mobile robot and 5G + remote control can be realized by invoking the terminal and network layer resources.

Keywords: industrial Internet; 5G; capability exposure; network slicing; edge computing

DOI: 10.12142/ZTETJ.202006003

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20201125.1343.002.html>

网络出版日期: 2020-11-25

收稿日期: 2020-10-12

1 5G 能力开放赋能工业互联网

工业互联网综合了工业系统和信息技术优势, 实现了工业智能化发展, 具有提高生产效率和产品质量, 降低生产成本和资源使用的巨大潜力。同时, 工业互联网引领着互联网从消费虚拟经济向以垂直行业为代表的实体经济转型, 为企业带来了新模式、新生态和新机遇。为了满足这一工业智能化发展需求, 具有高可靠、低时延、广覆盖特点的 5G 网络基础设施必不可少。基于服务的网络

架构, 使得 5G 网络能够通过开放接口为第三方提供技术支撑; 按需选择的核心理念, 使得 5G 网络能提供定制化的服务能力, 从而赋能垂直行业, 驱动工业互联网发展。因此, 只有实现行业业务应用和 5G 能力开放的有益结合, 才能真正创造价值。

作为网络的重要功能和运营商数字化转型的关键途径, 能力开放并非首次在 5G 网络中提出。追溯至 4G 时代, 第 3 代合作伙伴计划 (3GPP) 定义了网络业务能力开放功能 (SCEF), 提出北向 T8 接口对外开放、南向各类

网元对内连通的架构, 实现了全网通用的统一能力开放。随着信息技术 (IT) 与通信技术 (CT) 的深度融合、垂直行业新业务需求的凸显, 5G 时代的能力开放需要在保障与现有 4G 网络兼容的同时充分考虑自身网络架构及能力体系。对此, 3GPP 在 R15 中, 定义了网络开放功能 (NEF), 并面向应用功能 (AF) 提供事件监控、流量策略、参数配置等类型的标准能力开放服务。3GPP R16 对已有开放接口做了补充和增强, 同时新增了数据分析、非互联网协议数据传输 (NIDD)、网

网络侧统计等能力开放服务。随着网络切片、边缘计算、确定性网络等技术的发展，除了上述网络标准开放能力外，5G 网络抽象出更多类型的能力如网络切片服务、边缘计算服务等提供给上层业务。

除了信息通信技术 (ICT) 行业 and 标准组织，世界各国的工业操作技术 (OT) 企业、学术界等也在推动 5G 发展与工业领域需求的融合^[1]。工业互联网产业联盟 (AII)、工业互联与自动化 5G 联盟 (5G-ACIA) 等组织从工业需求的角度对组网架构、运营模式、频谱需求等话题深入探讨并向 3GPP 标准导入。通过开放接口，5G 将在工厂流程自动化、IT 生产、物流和仓储等工业应用场景提供服务能力。

例如，交通运输、能源分配等控制应用通过调用事件监控能力实现通信服务监控和网络管理功能；未来工厂、园区等工业应用通过流量策略服务能力实现服务质量 (QoS) 保障和移动办公加速等。

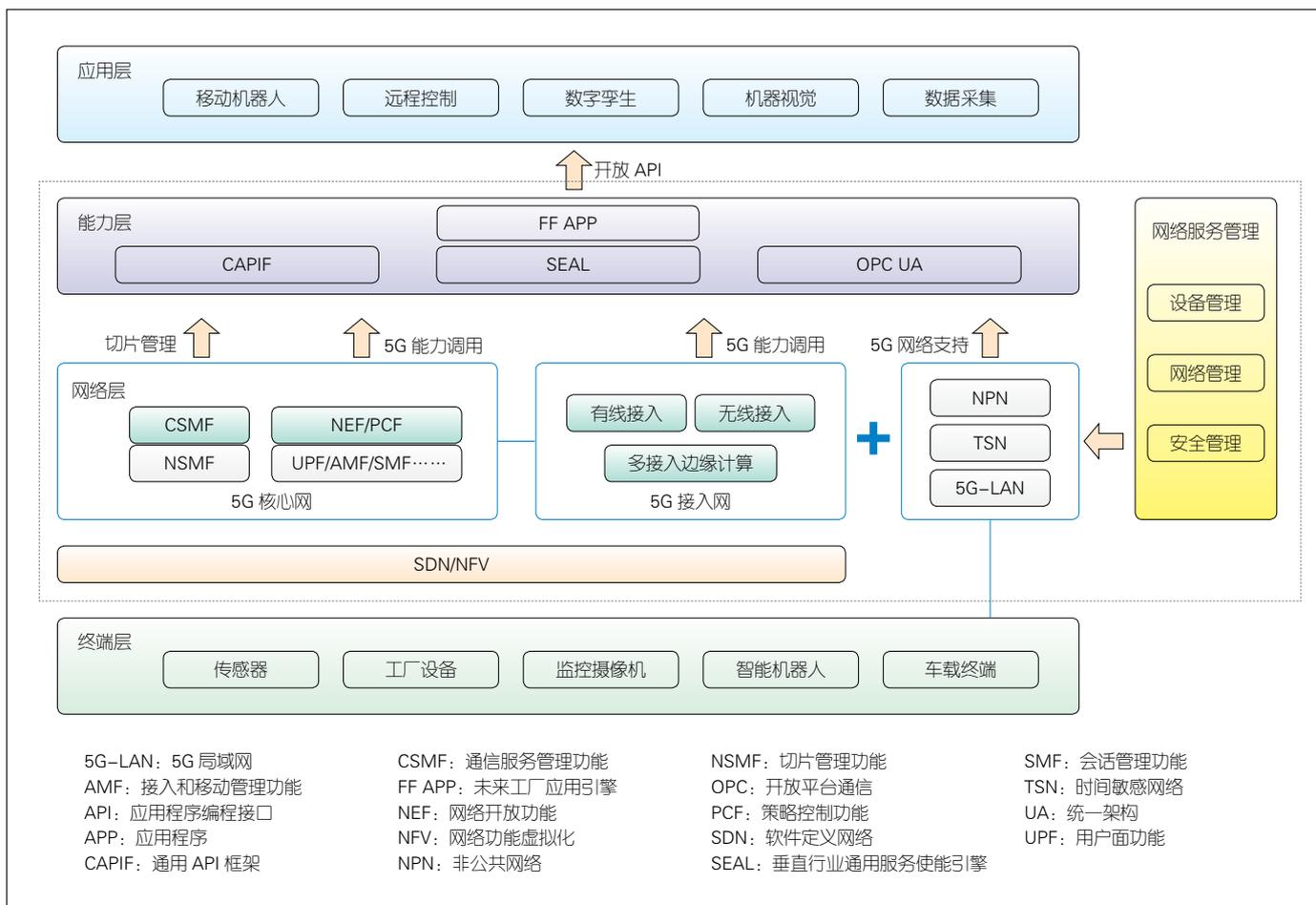
2 面向工业互联网的 5G 能力开放架构

为了向第三方工业应用提供所需的 5G 网络能力，我们提出了一种基于 5G 网络的能力开放体系分层架构，主要包含网络层、能力层和网络服务管理。如图 1 所示，应用层 (移动机器人、远程控制、数字孪生、机器视觉、数据采集等) 为能力开放的需求方，通过对底层资源的调用实现 5G+ 移动机

器人、5G+ 远程控制等新型融合应用。网络层整合终端层 (传感器、工厂设备、监控摄像机、智能机器人、车载终端等) 接入的功能为能力开放的供给方，所提供能力包括：网络基础能力 (语音、视频、计费、专线等)、策略类能力 (切片管理、流量加速等)、控制能力 (接入控制、QoS 保证等)、数据服务能力 (数据共享、负载和状态信息等) 等。能力层位于中间，是架构的核心和桥梁，主要负责对底层资源的抽象、封装、编排以及对上层应用的统一应用程序编程接口 (API) 开放。

2.1 网络层

5G 核心网的内部借助统一数据存储 (UDR) 实现网络功能 (NFs)



▲图 1 5G 网络能力开放体系架构

间的信息开放,通过 NEF、策略控制功能(PCF)等实现 AF 对网络功能直接或间接访问,并向授信或非授信的调用者开放服务能力。此外,网络切片是软件定义网络(SDN)/网络功能虚拟化(NFV)技术应用于 5G 网络的关键服务。根据 3GPP TS23.501^[2]中的定义,不同的网络切片能够利用网络切片选择协助信息(S-NSSAI)进行识别。通信服务管理功能(CSMF)和切片管理功能(NSMF),实现面向工业企业可定制、可安全隔离的网络切片服务。

在接入网中,边缘计算使运营商和第三方服务托管在靠近用户终端(UE)接入点的位置,从而通过减少端到端延迟和传输网络上的负载来实现高效的服务交付。根据 3GPP 标准中对边缘计算能力的介绍,5G 网络原生支持边缘计算功能,核心网选择靠近 UE 的用户面功能(UPF)并通过 N6 接口执行从 UPF 到本地数据网络的流量控制。为了将敏感数据保存在工业现场并保持自动化过程独立于 Internet 连接,本地化的方法(多接入边缘计算)相比于集中的方法(云计算)更为可取^[2]。

根据 3GPP R16 和 5G-ACIA 工作组相关进展,时间敏感网络(TSN)、非公共网络(NPN)和 5G 局域网(LAN)等垂直组网类技术是实现 5G 网络对工业 4.0 支持的关键内容,可满足工业互联网场景下的确定性、独立性和协同性需求。为了实现对时间敏感服务能力的支持,3GPP 将整个端到端 5G 系统视为 TSN 桥接器,与外部网络集成在一起,实现逻辑上的“TSN 桥”和时间同步。为了实现专网专用,3GPP 提出了两种 5G NPN 部署方式:独立非公共网络和集成 NPN 的公共网络,以解决运营商公网和垂直行业私网之间的漫游问题^[3]。5G-LAN 提供了组管

理服务,使第三方 AF 可以对组创建、更新和删除,并可以对 5G 网络中的虚拟网络(VN)配置数据,对组成员 UE 的配置进行处理。

2.2 网络服务管理

为了便于在工业场景下对 5G 开放能力的调用,相关接口的实现通常需要屏蔽底层网络细节,使接口具有易用性,并且通过模块化使其功能可选、对新功能后向兼容。在这一过程中,网络服务管理功能必不可少。下面从设备管理、网络管理和安全管理 3 方面对网络服务管理需求进行简要介绍。

对于设备管理,关键的开放能力包括设备身份管理、设备配置和上线、设备连接管理和监控、设备群组管理、设备位置信息管理等^[4-7]。

- 设备身份管理:不同的通信和应用层通常使用多种标识符类型。由于 OT 设备的复杂多样性、垂直行业通信的隐私和安全性等,应当避免在 5G 系统中使用应用层 OT 设备标识符。在 5G 能力开放接口中应使用唯一标识符,例如 3GPP 定义的通用公共订阅标识符(GPSI),以将 UE 标识作为设备的组成部分。

- 设备配置和上线:通过开放能力接口向 5G 核心网络获取 UE ID 标识符和网络访问身份验证密钥等 UE 信息,以支持将设备在 5G 系统中集成、配置、激活和连接。因此,该开放接口需要支持单个设备和设备组的配置和上线,并且在设备连接到网络时通知订阅用户。

- 设备连接管理和监控:在设备连接管理中,UE 到数据网络连接的比特率、端到端延迟等 QoS 特性需要按需定义;在设备监控功能中,开放接口需要实现对按需、定期和事件触发的设备连接性监控的支持。这样的开放能力可用于物流追踪、交通管理、

设备故障处理等多种使用场景^[8]。

- 设备群组管理:5G 开放能力接口具有创建、修改和删除设备组的能力,以便于区域性的通信服务。一个设备可能同时属于多个组,因此 5G 开放能力接口也应当支持将单个设备添加至群组中或从中删除。

- 设备位置信息管理:5G 系统支持用于跟踪移动资产的精确定位服务,例如自动导引车、可移动组装平台和控制面板等。在这一过程中,应用程序通过相关的能力开放接口获取设备不同颗粒度的位置数据、设备移动事件和时间事件等。

对于网络管理,关键的开放能力包括网络监控、网络配置与保持等。

- 网络监控:相关的能力开放接口需要在启动和运行期间提供监控网络状态的方法,以验证是否正确配置和连接了网络组件,监控 5G 系统中是否正确配置了端到端逻辑网络,以及该逻辑网络是否正在按照规定的服务水平规范(SLS)运行。同时,还需要监控来自物理/逻辑网络组件和连接的错误警报,并对错误的检测、定位、原因分析和解决方式提供监控信息。

- 网络配置与保持:在发生故障后完全或部分重启 5G 系统(即特定的网络节点或功能)以重新建立设备连接,无须进一步的手动交互。这种能力包括完全或部分备份、还原 5G 系统,添加、删除和修改现有无线接入网(RAN)设备和逻辑网络等。该方式中,对 5G 网络的任何更改均以受控方式进行,从而最大限度地减少故障和服务中断^[9]。

对于安全管理,能力开放过程需要支持能力提供方(5G NPN)和需求方(工业应用程序)之间的相互身份认证,并且保证通信的机密性和完整性。此外,UE 的安全日志记录信息对于外部调用程序应当是可用的。

2.3 能力层

能力层位于应用层和底层资源中间，作为能力提供引擎实现对底层资源的抽象、封装、编排，并对上层应用的统一 API 接口开放。面向 5G 赋能工业互联网场景，能力层主要包括通用 API 框架（CAPIF）、垂直行业通用服务使能引擎（SEAL）、开放平台通信统一架构（OPC UA）工业自动化组件和未来工厂应用引擎（FF APP）。

CAPIF 的推出是为了避免不同 API 规范之间的重复和方法不一致，以指导 3GPP 范围内的能力开放建设。CAPIF 功能实体能够被提供服务 API 的任何 3GPP 功能使用。CAPIF 的逻辑功能包含核心功能、API 公开功能、API 发布功能和 API 管理功能 4 个部分，这 4 个模块可以在实际组网时采用集中或分布式部署和灵活组合^[10]。

为了确保垂直行业应用（VA）在 3GPP 系统上能够有效使用和部署，SEAL 功能架构考虑了支持垂直行业应用的通用能力。架构对于 3GPP TS23.401^[11] 和 3GPP TS23.501^[12] 中定义的使用 E-UTRA 或 NR 接入的应用均可适用。SEAL 以 API 的形式向 VA 提供 SEAL 服务，并且服务器之间的 API 交互符合 CAPIF 的定义。SEAL 服务规范包括组管理、配置管理、位置管理、身份管理、密钥管理和网络资源管理等部分^[12]。

OPC 是用于不同制造商的设备、控制器、机器人和系统之间数据安全交换时的互操作性标准。OPC UA 则是一个将各个 OPC Classic 规范的所有功能集成的可扩展框架，它与平台无关，并且面向服务，作为通用和中立的通信体系结构被开发和维护。在工厂中，5G 成为连接机器、人和物体的重要手段。从 OPC UA 的角度来看，在确定

性通信中使用 5G，已经包含在 OPC UA 的规划中。

FF APP 是未来工厂 5G 应用架构的解决方案，能够确保未来工厂应用在 5G 网络中的有效使用和部署。3GPP TR 23.745^[11] 提出了面向 FF APP 支持的体系结构和功能模型的研究方案。该模型结合 SEAL 架构，通过工业服务使能引擎（FAE）在北向为工业应用提供服务使能，最终实现 5G 网络与未来工厂应用的融合。

3 结束语

在 ICT 和 OT 企业的双重推动、5G 与工业互联网融合发展的背景下，各行业、各组织都在积极推动 5G 工业互联网能力的开放标准研究，中国各省市也通过制定相关政策推进 5G+ 工业互联网的应用示范落地。目前中国已经完成了对主要融合场景的定义、需求分析和网络架构设计，并且在一些典型场景中进行了案例应用。然而，面向未来，5G 工业互联网的发展仍存在问题和挑战。例如，工业场景基础设施数字化改造水平不足制约着融合业务的发展；作为供需主体，ICT 和 OT 企业间的相互认知、理解仍处在初级阶段等。对此，需要加强 ICT/OT 行业的对接交流，实现 5G 网络由局部增强到全网变革的延伸，使工业互联网由特定场景的数字化转型到全面智能化发展，最终实现 5G 能力开放对工业互联网的深度赋能。

参考文献

- [1] 工业互联网产业联盟 (AII) 与 5G 应用产业方阵 (5G AIA). 5G 与工业互联网融合应用发展白皮书 [R/OL]. (2019-10)[2020-9-29]. http://www.aii-alliance.org/static/upload/202002/0226_155231_117.pdf
- [2] 3GPP. System architecture for the 5G system: 3GPP TS 23.501 [S]. 2017

- [3] 5G-ACIA. White paper-5G non-public networks for industrial scenarios [R]. 2019
- [4] 3GPP. Study on communication for automation in vertical domains: 3GPP TR 22.804 [S]. 2018
- [5] Industrie 4.0 plug-and-produce for adaptable factories: example use case definition, models, and implementation [R]. 2017
- [6] 5G-ACIA. White paper-exposure of 5G capabilities for connected industries and automation applications [R]. 2020
- [7] 5G-ACIA. White paper-alignment i4.0 architecture and 3GPP architecture [R]. 2020
- [8] 汤凯. 基于 5G 的垂直行业安全新特征与对策 [J]. 中兴通讯技术, 2019(4): 50-55. DOI: 10.12142/ZTETJ.201904009
- [9] 韩玮, 江海, 李晓彤. 5G 网络设计与规划优化探讨 [J]. 中兴通讯技术, 2019(4): 59-66. DOI: 10.12142/ZTETJ.201904011
- [10] 3GPP. Common API framework for 3GPP northbound APIs: 3GPP TS 23.222 [S]. 2017
- [11] 3GPP. General packet radio service (GPRS) enhancements for evolved universal terrestrial radio access network (E-UTRAN) access: 3GPP TS 23.401 [S]. 2015
- [12] 3GPP. Service enabler architecture layer for verticals (SEAL): 3GPP TS 23.434 [S]. 2019
- [13] Study on application layer support for factories of the future in 5G network: 3GPP TR 23.745 [S]. 2020

作者简介



邢真，中兴通讯股份有限公司标准战略工程师；主要研究领域为工业互联网、5G 网络安全技术和标准化；已发表论文 5 篇。



邵伟翔，中兴通讯股份有限公司标准专家，并担任 3GPP TR23.745 研究项目报告人；主要研究领域为 5G+ 工业互联网、物联网、网络能力开放等。



高峰，中兴通讯股份有限公司标准总工；长期从事下一代网络、物联网、工业互联网、安全等领域的技术研究和标准化工作。

水泥行业融合 5G+ 工业互联网的技术发展思考

Thoughts on the Integration of 5G + Industrial Internet in Cement Industry

黄颖 /HUANG Ying¹, 杨晓芳 /YANG Xiaofang², 王鹏 /WANG Peng³

(1. 中国信息通信研究院, 北京 100191;

2. 中国互联网协会, 北京 100086;

3. 上海社会科学院, 上海 200020)

(1. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China;

2. Internet Society of China, Beijing 100086, China;

3. Shanghai Academy of Social Sciences, Shanghai 200020, China)



摘要: 分析了水泥行业与 5G+ 工业互联网融合发展对数字化、信息化的诉求, 以及其典型应用场景, 并提出了建设公共服务平台等产业建议。认为 5G+ 工业互联网融合了云计算、大数据、人工智能等技术, 促进水泥行业业务发展需求的无线网络基础设施的构建, 催生融合创新应用, 为水泥行业高质量发展增添新动能, 带来发展新机遇。

关键词: 水泥行业; 5G+ 工业互联网; 新旧动能转换

Abstract: Demand for digitalization and informatization, and typical application scenes during the integration of cement industry and 5G + industrial Internet are analyzed. Then industrial suggestions such as building public service platform are proposed. 5G + industrial Internet, which integrates cloud computing, big data, artificial intelligence and other technologies, can promote the integration of innovative applications, add new momentum to the high-quality development of the cement industry, and bring new development opportunities.

Keywords: cement industry; 5G + industrial Internet; replacing old growth drivers with new ones

DOI: 10.12142/ZTETJ.202006004

<https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20201124.1419.003.html>

网络出版日期: 2020-11-24

收稿日期: 2020-10-18

水泥行业的发展正处于新旧动能更迭的关键阶段, 自动化、智能化和信息化水平参差不齐, 亟需采用融合智能化和信息化的技术, 来推动生产、管理和营销模式从局部、粗放、高污染、高能耗向全流程、精细化和绿色低碳发展方向变革, 解决资源、能源与环境的约束问题, 以提高生产制造水平和效能。在水泥行业, 借助 5G+ 工业互联网技术, 实现人、机、物交互融合, 加速场景应用落地, 打造更加安全、精准、高效的生产运维管理模式已经成为未来探索的重要方向。通过分析水泥行业的数字化转型需求, 本文提出 5G+ 工业互联网在水

泥行业的典型应用场景, 并对发展提出建议。

1 水泥行业数字化转型需求

从生产工艺的数字化转型角度看, 水泥行业具有无间断的生产特性, 一旦停机可能造成巨额经济损失。机器视觉、人工智能 (AI) 检测等技术手段的使用, 可第一时间排除生产故障, 保障生产的连续性。智能操作系统的使用, 降低了生产系统操作难度, 提升设备的可操作性, 可加快生产节奏。根据现有工艺情况制定一套完整、标准、自动控制的操作方式, 可减少操作员人为干预, 避免人力执行的不

确定性, 推动生产更加高效。

从设备运行数字化转型的角度看, 数量众多的水泥生产设备, 会导致设备检修工作量大、备品备件库存压力大。设备一旦发生突发故障, 则无法按计划生产。这不但会影响生产进度, 还无法保证产品质量。提高设备可靠性、减少故障停机成为数字化生产的重要方向。通过数据分析可以提前进行预知性检修和检查, 加快故障分析判断进度, 进而提升维修速度, 有效保障水泥生产的连续性和稳定性。

从安全与环境管理的角度看, 水泥生产的不安全因素较多, 公司内部人员安全防护, 外来人员安全识别、

行走路线、危险区域预警等都可通过数字系统进行及时有效的辨别。在环境管理方面，强化环境污染的实时监测，通过机器视觉和 AI 分析，可有效避免污染事件的发生；强化生产工艺管理，自动调节氨水、脱硫剂等辅助材料，达到控制指标值，可降低能源消耗，减少环境污染。

2 水泥行业融合 5G+ 工业互联网的典型应用场景

5G+ 工业互联网是打造数字化工厂的核心内容，万物互通互联的网络则是 5G+ 工业互联网发展的根基。水泥工厂借助低时延、高可靠的 5G 网络，连接了生产环境、物料、物流车辆、生产设备、控制系统、人 6 大要素，逐步推动矿区、厂区信息、数据、命令的实时交互，实现智慧生产。目前 5G+ 工业互联网赋能水泥行业，主要体现在监测、控制和采集 3 大类业务，在矿山开采、智能生产、安全运维等场景发挥较大作用。图 1 为水泥行业

5G+ 工业互联网网络构架图。

利用工业高清摄像头、编码器、测距仪、扫描仪、可编程控制器(PLC)、传感器等终端设备可以完成数据采集的主要工作，从而对厂区情况实时了解。以 5G 为核心的万物互联网络，承担了数据传输的重要任务，并可以利用低延时、高可靠等性能实现各要素之间的深度联系。移动边缘计算(MEC)逐渐成为数据处理的重要手段，低延时的 5G 网络保障了设备指令传输的效率。在水泥行业中，基于云架构的工业互联网平台，连接了原料、物流、金融、上下游客户等合作伙伴，并以数据为纽带建立产业协同生态圈，打造了最具效益的水泥产业价值链。

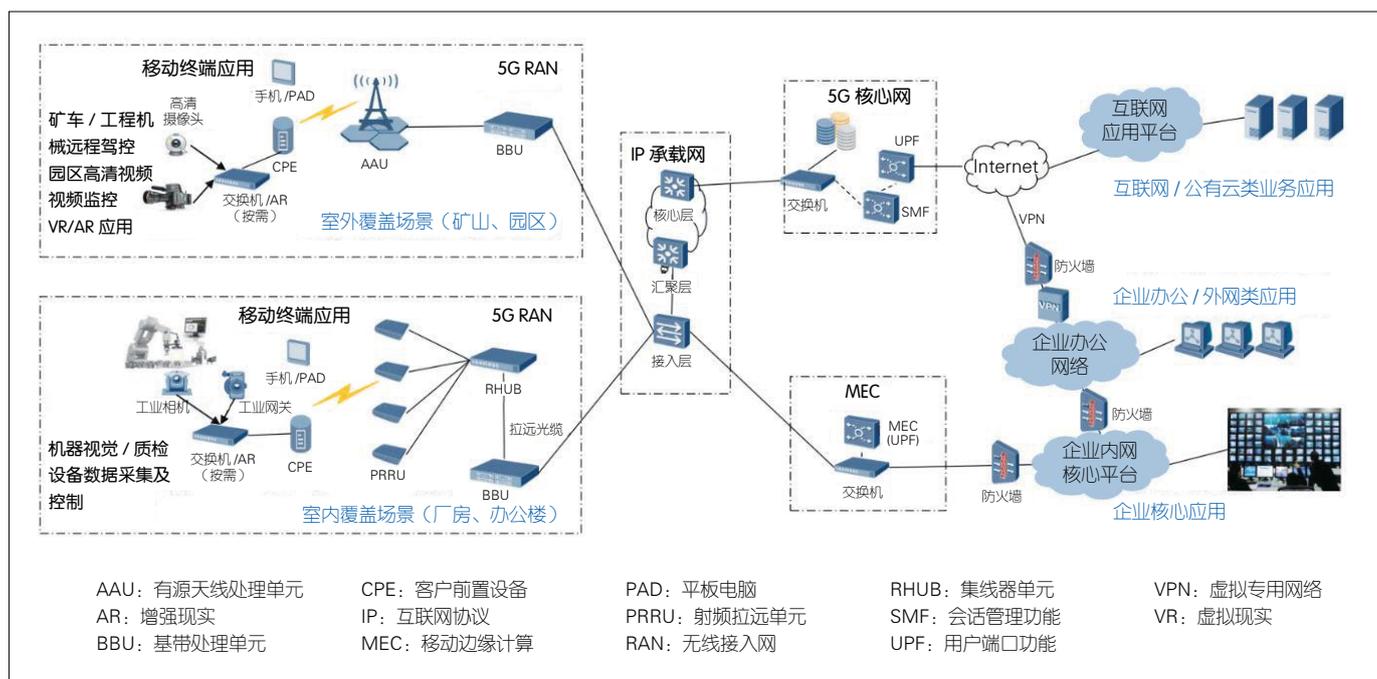
2.1 无人机巡检监测场景

在水泥行业中，开采、爆破可能会造成严重伤亡事件的发生，因此人们对矿区进行安全巡查。5G 无人机航拍，结合 MEC 云端智能 AI 图像识别，有效提升了巡检效率：无人机

大广角的拍摄方式使得巡检范围提升；AI 智能图像识别将巡检人员从繁重的人工作业中解放出来；高清摄像头的配置有效提升了图像识别的准确性。这些均使得漏检、误检的概率大大缩小，巡检工作效率实现了质的飞跃。爆破区域的智能化警戒，可以使运维及调度人员不受距离限制，随时随地通过图像设备查看现场状况，真正实现智慧巡视。爆破完成后，无人机定期采集地形变化信息，将地形变化数据更新到地形数据库中，作为下次矿山开采和爆破规划的依据。

2.2 水泥生产业务场景

5G+ 机器视觉技术可实现厂区全天候、无死角的安全监控。现场数据通过高清摄像头进行采集，并通过 5G 高速网络上传至 MEC 平台，再利用 MEC 上集成的 AI 智能识别算法，进行实时智能检测分析，从而对异常情况发出预警，满足工厂对日常生产调度、安全事件以及应急处理需求。



▲图 1 水泥行业 5G+ 工业互联网网络构架图

针对生产工序的难点问题,如投料口、翻板阀堵塞堆积,传送皮带反转、打滑、破损抽丝,以及生产过程中的冒灰污染等情况,5G+AI技术可针对性地进行实时监测。以投料口为例,水泥堆积容易造成堵塞,而通过在石灰石投料口加入AI工业高清视觉检测,利用5G通信与后端口控平台的高速数据传输,并使用平台前置算法判断检测,可及时发现堵塞问题并做出预警。

2.3 安全运维业务场景

人机全周期监控一直是安全生产的核心内容。在人员管理方面,5G+工业互联网实现了无线回传,解决了厂区布线难等问题,降低了维护成本,提升了工作效率,保障了人员安全。通过智能佩戴终端,利用5G精准定位技术,将相关信息传送到MEC平台,可实现对人员的精准定位、轨迹追踪、健康监测等功能。在设备侧,AI智能检测结合云边协同架构,实现算法的快速迭代,检测准度和精度的不断提升,满足长期演进需求。收集设备运行状态下的实时振动、温度数据,利用5G网络上传至云端存储,再通过智能报警和设备模型算法,能使人们准确掌握设备运行状态和故障部位,确定故障根源,为检修、备件、生产技术提供数据支持。

3 5G+ 工业互联网赋能水泥行业发展的建议

(1) 建设5G+工业互联网水泥行业公共服务平台。

建议政府机构、第三方服务机构等各产业主体,立足行业发展需求,打造水泥行业5G网络化改造及推广服务平台,建设满足工业企业开展5G网络应用研发验证的网络测试环境,向水泥企业提供标准研制、专利申请、

场景咨询、研发培训等系列服务。各产业主体需要进一步在矿业开采、智能水泥工厂建设、自动采选配矿、窑炉优化控制等方面形成一批样板工程,向企业输出系统化的解决方案。

(2) 加快5G、工业互联网等新型基础设施建设。

建议企业开展工厂内外网升级改造,加速5G专网、互联网协议第6版(IPv6)等新型信息基础设施建设升级,打造高质量园区网络,实现工业互联网资源大规模、高时效、高安全互联;加强企业安全防护能力建设,从云-网-端3个层面形成一体化信息安全防护技术体系,强化安全产品和解决方案定制化供给,促进水泥企业工业网络、工业云平台及业务系统安全保障能力提升。

(3) 构建5G+工业互联网水泥行业标准体系。

建议在中国工业互联网标准总体组、专家咨询组的指导下,形成标准化主管部门、研究机构、企业协同推进的标准推进机制;加快构建水泥行业工业互联网标准体系^[1],重点制定面向水泥生产全流程的5G+工业互联网应用场景及技术要求的标准,加快创新技术成果向标准转化,保障工业互联网建设的相关工程及相关环节在水泥行业有章可循,并强化标准的实施与监督。

(4) 建设5G+工业互联网技术应用测试床。

建议产业主体加快边缘计算、区块链、数字孪生、深度学习、虚拟现实等新兴前沿技术在水泥行业集成运用,围绕重点方向和核心环节,推动测试床建设落地,为行业探索5G+工业互联网树立标杆应用示范。推动融合创新应用由生产外围、视频监控、巡检安防、物流配送等场景应用向产品的设计仿真、生产控制、质量监测、

安全生产等内部环节深层次延伸^[2]。

4 结束语

5G+工业互联网与垂直领域的深度合作已经成为未来制造业发展的重要方向。虽然目前水泥行业与5G+工业互联网的融合发展取得了一定的成果,在部分业务场景中已经有突破性的进展,但无论从深度还是广度来说,5G+工业互联网对水泥行业新旧动能转换的助力尚未实现关键性的突破。作为传统制造业,水泥行业仍然需要进一步在智能生产、安全运维等诸多领域强化与5G+工业互联网的深度合作。在未来,水泥行业必将借助5G+工业互联网,实现生产运营的智能化、精细化、绿色化发展。

参考文献

- [1] 工业和信息化部. 工业互联网发展行动计划(2018—2020年) [R]. 2018
- [2] 刘艳. 3年20个典型应用场景 5G工业互联网将这样落地 [N]. 科技日报, 2019-12-16

作者简介



黄颖, 中国信息通信研究院技术与标准研究所高级工程师; 长期从事5G+工业互联网、工业互联网、边缘计算、信息模型等相关技术研究、标准化工作。



杨晓芳, 中国互联网协会监管支撑部助理会计师; 从事数据分析等工作。



王鹏, 上海社会科学院在读经济学硕士; 从事决策咨询工作。

可定制的 5G+ 工业互联网 安全能力

Customizable 5G + Industrial Internet Security Capabilities



王继刚 /WANG Jigang, 王庆 /WANG Qing, 滕志猛 /TENG Zhimeng

(中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

摘要: 5G+ 工业互联网安全以 5G 自身安全能力为基础, 结合工业互联网的实际应用场景, 参考网络安全等级保护相关指导, 通过融合创新, 将零信任、内生安全、微分段等前沿安全技术融入 5G 工业互联网场景安全方案中, 以定制化的安全能力来满足工业互联网整体的安全防护需求。这些定制化的安全能力包括: 差异化切片满足企业网络安全隔离需求, 用户面功能 (UPF) 下沉 + 灵活以太网 (FlexE) 可靠地支持企业低时延业务需求, 多重机制提供企业端到端数据安全保障, 零信任架构增强企业自主控制接入安全策略, 以及态势感知保障网络整体安全能力。

关键词: 5G; 工业互联网; 可定制安全能力; 零信任网络; 内生安全

Abstract: Based on the security capability of 5G network, 5G + industrial Internet security is deeply combined with the actual application scenarios of the industrial Internet. At the same time, it also complies with the relevant requirements of network security level protection. Zero trust networks, endogenous security, differential segment and other cutting-edge security technologies are integrated into the 5G industrial Internet scenario security scheme. Through customized security capabilities, security researchers can meet the overall security protection needs of the industrial Internet. These customized security capabilities include: The differential slicing meets the needs of enterprise network security isolation; the user port function (UPF) sinking + flexible Ethernet (FlexE) reliably supports the enterprise low latency business requirements; the multi-mechanism provides the enterprise end-to-end data security guarantee; the zero trust architecture enhances the enterprise independent control access security strategy, and the situation perception guarantees the network overall security ability.

Keywords: 5G; industrial Internet; customizable security capabilities; zero trust networks; endogenous security

DOI: 10.12142/ZTETJ.202006005

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20201124.1844.005.html>

网络出版日期: 2020-11-25

收稿日期: 2020-10-18

工业互联网是互联网和新一代信息技术与工业系统深度融合所形成的产业和应用生态, 是工业智能化发展的关键信息基础设施。5G 将以其高带宽、低时延、海量连接等特性大幅提升工业互联网的信息化水平, 逐步成为支撑工业生产的基础设施。同时, 5G 网络提供的灵活定制、弹性部署、

多层次隔离等智能网络能力与工业生产中既有的研发设计系统、生产控制系统及服务管理系统等相结合, 可以全面推动工业系统的生产流程产生深刻变革。

5G 的引入, 打破了工业互联网相对封闭、可信的制造环境: 病毒、木马、高级持续性攻击等对工业生产的威胁

日益加剧, 一旦网络受到攻击, 将会造成巨大的经济损失, 并可能带来环境灾难和人员伤亡。在第 3 代合作伙伴计划 (3GPP) 标准中^[1-3], 5G 网络的基础安全能力还不能完全契合不同业务场景下工业互联网对网络安全的要求。为此, 需要在现有 5G 安全架构基础之上, 结合工业互联网行业特征

与运营模式，构建 5G+ 工业互联网安全定制能力，从而满足企业安全技术体系对于 5G+ 工业互联网安全能力的要求。本文主要介绍 5 个方面的能力，即终端接入认证、网络切片隔离、高实时性业务保障、数据端到端安全、未知安全威胁防御。

1 差异化切片满足企业网络安全隔离需求

5G 网络切片是基于无线接入网、承载网与核心网基础设施，以及网络虚拟化技术构建的一个面向不同业务特征的逻辑网络。运营商可以为不同行业应用在共享的网络基础设施上，通过能力开放、智能调度等技术构建

网络切片，提供差异化的网络服务。这对安全提出了新的挑战，带来了包括切片间非法访问、切片内不同安全域间的非法访问等多种安全威胁。

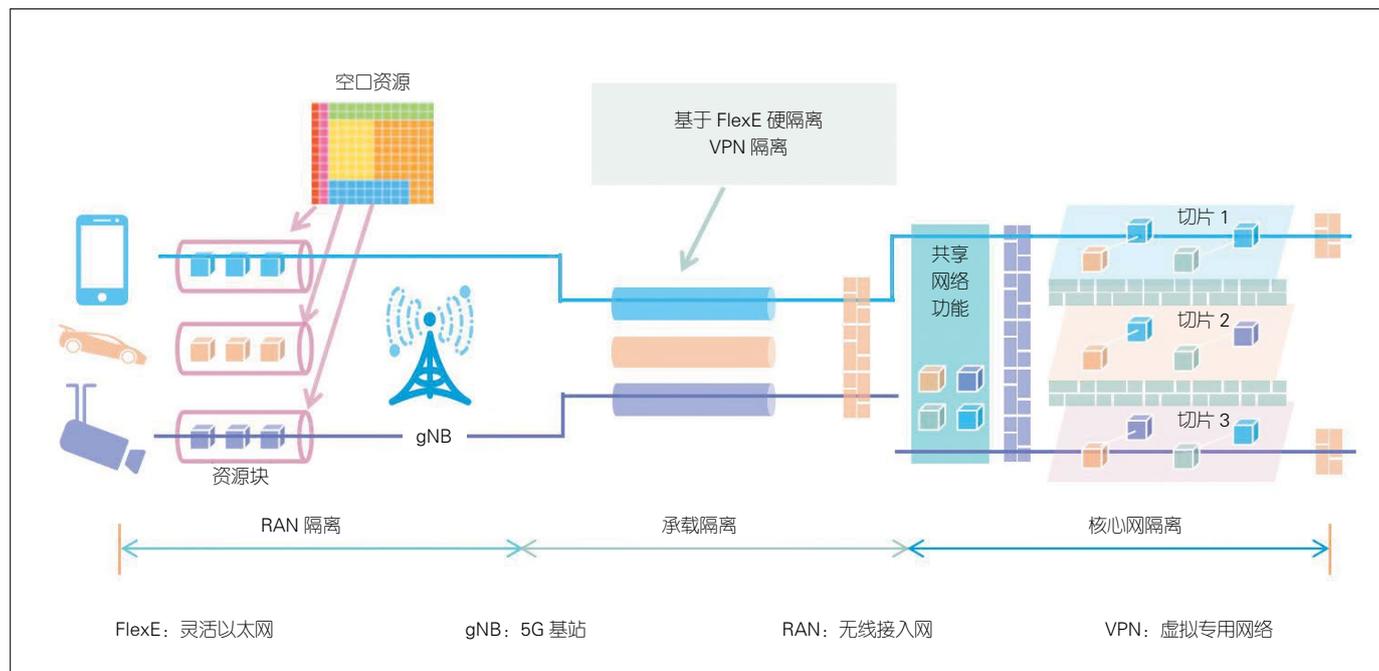
为了安全地支持各种差异化的业务场景，需要提供网络切片隔离（如图 1 所示），为不同业务提供差异化的安全服务。工业互联网切片隔离符合《网络安全等级保护 2.0》中对安全通信网络的要求，并通过一套参数配置，实现切片的资源隔离和业务质量保障。可以根据行业的安全隔离要求和需要保障的关键服务等级协议（SLA）选择不同类型的切片，并进行参数配置。从资源隔离和业务保障的角度，无线网络可以提供多种切片

隔离技术。如表 1 所示，工业互联网切片隔离方案分为 4 类，分别对应等级保护中的 1—4 级，不同业务系统可以根据自身需求选择不同的网络隔离方案。

1.1 无线接入网（RAN）隔离

网络切片在 RAN 侧的隔离主要面向无线频谱资源以及基站处理资源。最高安全等级的工业控制类切片采用独立的基站或者频谱独享；其他类型切片则根据安全需求，通过物理资源承载（PRB）独享、数据资源承载（DRB）共享，以及 5G 服务质量特性（5QI）优先级调度等多种方式组合来实现。

（1）独立基站 / 频谱独享。部分



▲图 1 端到端网络切片隔离

▼表 1 工业互联网切片隔离方案

切片类别	隔离类别	RAN	TN	MEC	5GC
专用切片	完全独占	基站 / 频谱独享	FlexE 隔离	MEC/UPF 业务独享	CPF 全部独享
定制切片 1	部分共享	PRB 独享	VPN/VLAN 隔离	MEC/UPF 企业独享	CPF 部分独享
定制切片 2	部分共享	DRB 共享、5QI 优先级调度	VPN/VLAN 隔离、QoS 资源保障	MEC/UPF 企业独享	CPF 全部共享
普通切片	完全共享	DRB 共享	VPN/ VLAN 隔离	VLAN/ VxLAN 隔离	CPF 全部共享，UPF 独享

5GC: 5G 核心网

DRB: 数据资源承载

PRB: 物理资源承载

TN: 承载网

VPN: 虚拟专用网

5QI: 5G 服务质量特性

FlexE: 灵活以太网

QoS: 服务质量

UPF: 用户面功能

VxLAN: 虚拟扩展局域网

CPF: 控制面功能

MEC: 移动边缘计算

RAN: 无线接入网

VLAN: 虚拟局域网

专网的应用（如工业控制类）或局部区域（如无人工厂、无人发电站、矿山等）的通信独立性和可控性要求很高，共享基站无法满足；因此，可以考虑采用独立基站的形式提供无线切片。另外，对于资源隔离和业务质量保障更高的应用，可以在运营商频谱资源中划分出一部分单独给该应用使用（如 5 MHz）。

（2）PRB 独享。在 5G 正交频分多址（OFDMA）系统中，无线频谱从时域、频域、空域维度被划分为不同的 PRB，用于承载终端和基站之间数据传输。对于一些要求资源隔离且对业务质量保障要求高的切片用户，可以为其配置一定比例的 PRB（如 5%）。此时，该小区 5% 的空口资源和带宽为该切片专用，不受其他用户影响。PRB 的正交性保证了切片的隔离性，PRB 专用也保证了业务质量的稳定性。

（3）DRB 共享。可以配置 DRB 接纳控制参数，以确保切片在该小区内能够接入的用户数不被其他业务抢占。DRB 接纳控制可以采用灵活的配置策略，既可以固定配置，也可以配置一个较小的比例，超过后还可以在资源池中抢占。

（4）5QI 优先级调度。对于不需要严格确保资源隔离和业务质量的切片，如视频监控类的增强移动宽带（eMBB）切片，可采用 5QI 优先级调度方式。该方式基于单一网络切片选择辅助信息（S-NSSAI）的不同优先级（可以依据切片业务需保障的程度进行配置）和业务，并能在一个调度周期内计算出不同业务的调度优先级。5QI 软切片的本质是基于调度，即以调度策略来实现业务质量，但当基站业务繁忙时并不能确保达到该目标。

1.2 承载网（TN）隔离

5G 网络依托数据中心部署，其跨

越数据中心的物理通信链路需要承载多个切片的业务数据。网络切片在承载侧的隔离可通过软隔离、硬隔离和服务质量（QoS）资源保障等多种方案实现。

（1）虚拟专用网（VPN）/虚拟局域网（VLAN）隔离。软隔离方案基于现有网络机制，通过 VLAN 标签与网络切片标识的映射来实现。网络切片具备唯一的切片标识，能够根据切片标识为不同的切片数据映射封装不同的 VLAN 标签，再通过 VLAN 隔离实现承载隔离，从而保障 QoS。

（2）灵活以太网（FlexE）隔离。硬隔离方案引入了 FlexE 技术。FlexE 分片基于时隙调度，将一个物理以太网端口划分为多个以太网弹性管道（逻辑端口）。这使得承载网络既具备类似于时分复用（TDM）的隔离性好的特性，又具备以太网的网络效率高的特点。对于工业控制应用等对时延和安全保障较高的业务，可以在承载侧独占时隙，从而实现切片硬隔离。

1.3 核心网隔离

5G 核心网由多种不同的网络功能构成，有些网络功能为切片专用（工业控制），有些则在多个切片之间共享；因此，在核心网侧的隔离需要采用多重隔离机制。

（1）控制面功能（CPF）全部独享。核心网的所有控制面网元^[4-5]，包括接入和移动管理功能（AMF）、统一数据管理功能（UDM）、鉴权服务功能（AUSF）、统一数据仓库功能（UDR）、策略控制功能（PCF）、会话管理功能（SMF），以及用户面网元功能（UPF）都需要新建。该模式适用于如工业控制、典型专网等对安全需求最高的应用场景。

（2）CPF 部分共享。核心网的部分控制面网元（包括 AUSF、UDR、

PCF、SMF）需要新建，AMF 和 UDM 被多个切片共享。这种方式可根据容量、时延等要求，选择在核心机房或者边缘机房新建 UPF。对于希望数据隔离的大部分切片，或对部署位置有严格要求（比如工厂、园区）且有本地应用部署需求的切片用户，我们建议采用这种模式。

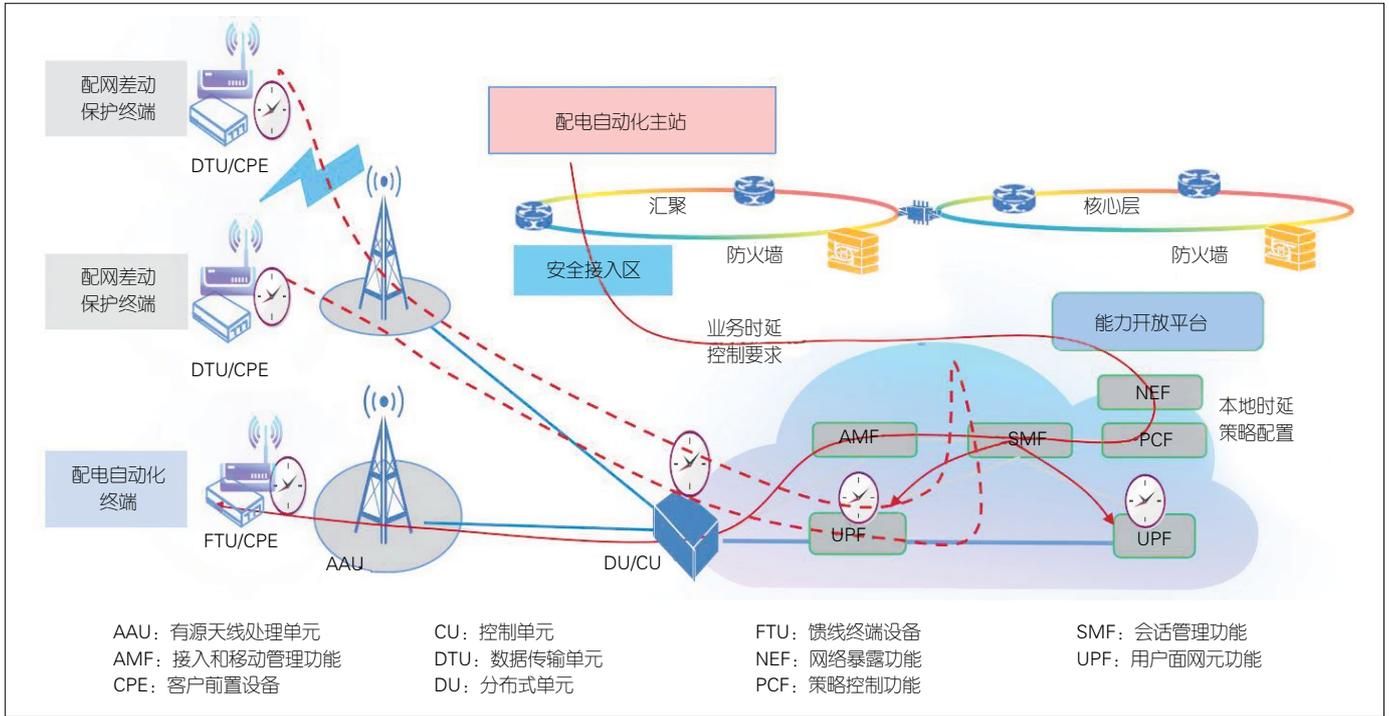
（3）CPF 全部共享，UPF 独享。核心网的控制面网元被多个切片共享，UPF 需要新建，切片通过 S-NSSAI 来区分，数据网络名称（DNN）也需要新建。该模式适用于管理信息网、视频监控等对于安全隔离有一定要求的业务场景。

2 UPF 下沉 + FlexE 可靠地支持企业低时延业务需求

智能车间内设备的互联，以及生产运营的数字化转型，使得工业系统对实时性、抗抖动性的无线网络需求变得迫切。传统无线网络无法满足该要求，而 5G 网络以其高带宽、低时延、大连接的特性获得工业生产系统的青睐^[6-8]。

传统端到端移动通信，必须经过无线接入网、核心网、平台、应用层处理，这导致端到端时延较长，无法满足对时延要求比较高的工业控制应用的要求。为了进一步降低端到端通信时延，可以将 5G 网络中 UPF 下沉到移动边缘计算（MEC）。图 2 中的架构就是将数据、应用、智能引入基站边缘侧，从而减少数据传输路由节点，降低端到端通信时延。

在网络传输方面，服务于工业控制的网络切片，对时延要求更高。传统分组设备对于客户业务报文采用的是逐跳转发策略，网络中每个节点设备都需要对数据包进行媒体接入控制（MAC）层和多协议标签交换（MPLS）层解析。这种解析耗费大量时间，单设备转发时延高达数十微秒。为此，



▲图 2 5G 工业应用延时保证

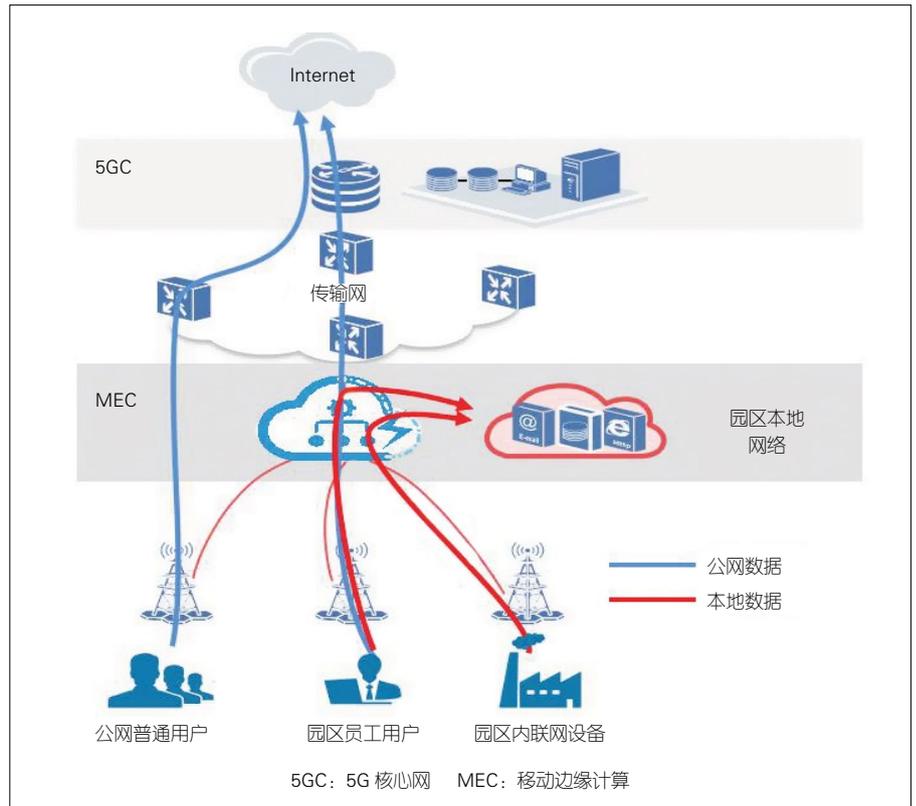
可以采用 FlexE 交叉技术，来实现网络设备之间的信息传递。这种方式可以实现基于物理层的用户业务流转发，用户报文在网络中间节点无须解析，业务流交叉过程近乎瞬间完成，实现单跳设备转发时延 1~10 μs，可有效解决时间报文的模拟、欺骗。

3 多重机制提供企业端到端数据安全保障

用户数据在传输过程中存在被窃听、篡改、泄露等安全威胁。为降低行业应用中数据安全风险，5G 提供了更强大的数据安全保护方法，如图 3 所示。

3.1 接入认证

在为高安全等级工业系统提供定制化服务过程中，5G 网络采用的是切片二次认证机制，即在用户接入网络并做了认证之后，为接入特定业务建立数据通道而进行的认证。在该认证过程中，使用了非运营商控制的信任



▲图 3 5G 工业园区数据安全

状要求，即用户通过接入认证后并不能直接与业务系统建立连接，而是利

用业务相关的信任状与用户终端进行认证，并在认证通过的情况下才允许

5G 网络为用户建立与业务系统间的通信链路，从而保证企业对安全策略自主可控。

3.2 访问控制

访问控制遵循最小权限授权原则。系统为不同用户分配不同的数据操作权限。访问者未经授权不能访问用户信息，以防止非法访问、越权访问等手段获取用户的数据。

为避免不可靠来源用户的接入，系统提供选择多种访问控制方式。系统不允许时间、来源、登录方式等访问控制条件不满足的用户登录系统并建立会话。另外，关键敏感数据采用 SHA256、AES256 等加密算法进行加密存储。

3.3 数据传输安全

在机密性保护方面，5G 网络采用的高级加密标准（AES）、3GPP 流密码（SNOW 3G）、祖冲之密码（ZUC）

等算法。这些算法采用 128 位密钥长度，被证明是安全的。

数据传输安全机制为工业互联网中的数据产生、处理、使用等环节提供了安全保护。首先，在数据产生和处理过程中，数据根据敏感度进行分类，建立不同安全域间的加密传输链路，并根据不同的安全级别采用差异化的数据安全技术。其次在数据使用过程中，数据管理者对使用者进行授权和验证，保证数据使用的目的和范围符合安全策略，并对重要业务数据的使用进行审计，最终为行业用户提供数据的机密性和完整性保护。

另外，采用基于会话的加密机制，需要按需配置加密算法与密钥强度。采用数据加密、完整性校验能够保证数据在空口、用户设备（UE）和 MEC 之间的安全传输。例如，建立互联网协议安全（IPSec）/安全套接字协议（SSL）VPN 隧道，可以预防数据被嗅探窃取、篡改等威胁，同时结合 UPF

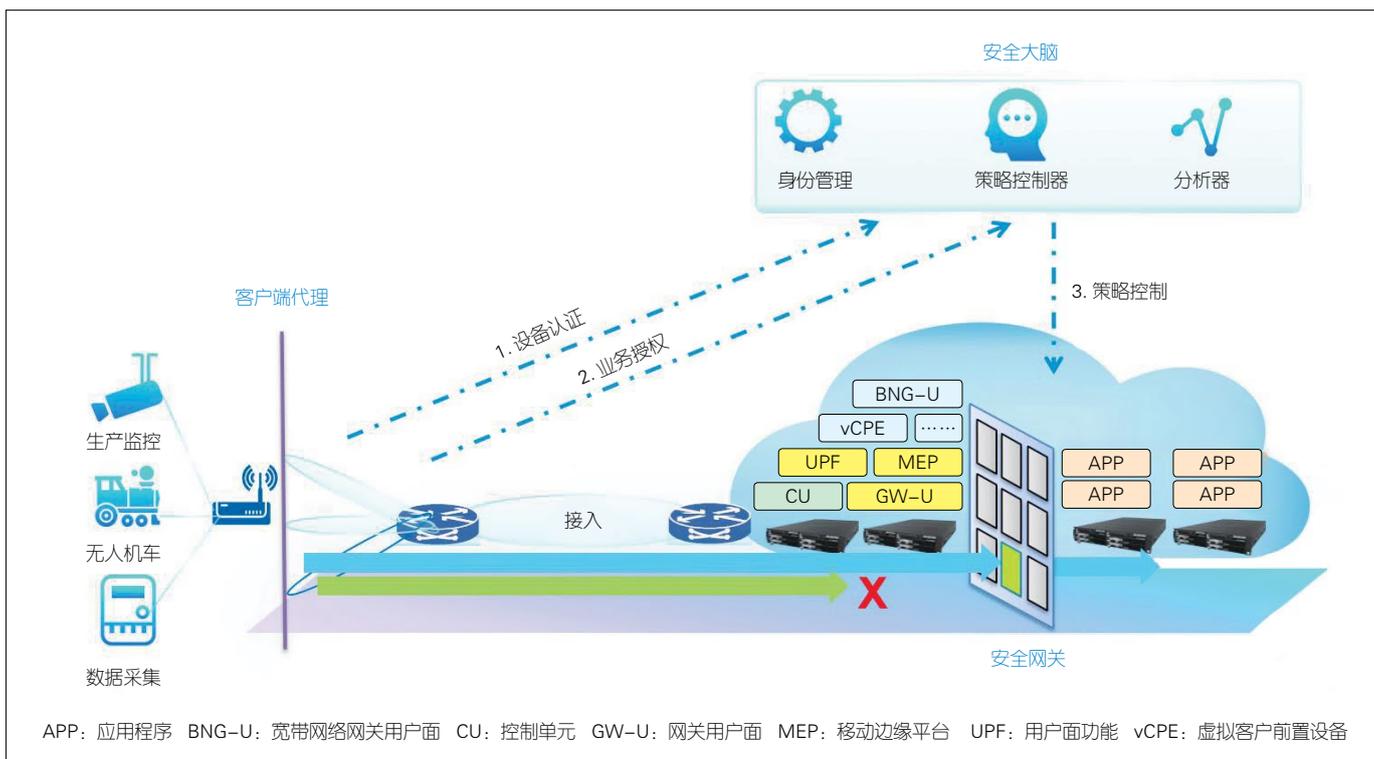
分流技术及内部边界安全隔离，能够实现数据不出园区。

4 零信任架构增强企业自主控制接入安全策略

随着安全边界下沉，5G 网络架构中的身份验证凭据成为了新的核心安全边界。一旦 5G+ 工业互联网场景下海量的工业生产终端被入侵利用，将会产生非常严重的后果。

传统边界安全模型中的信任是来自网络地址的，即在网络边界验证终端身份，确定用户是否被信任。如果终端的 IP 地址可信，用户被认定为可信，并通过验证进入内网。随着攻击方式和威胁多样化，传统网络接入安全架构凸显出很大的局限性。为此，5G+ 工业互联网安全架构引入基于零信任安全理念，并启用新型身份验证管理模式，充分利用身份验证凭据、设备、网络、应用等多种资源的组合安全边界^[9]。

如图 4 所示，零信任安全系统包



▲图 4 基于 5G 的工业零信任安全系统

括控制器、可信网关、分析器 3 大组件。控制器作为安全控制面的核心组件，为可信网关提供自适应认证服务、动态访问控制和集中管理能力。控制器对所有的访问请求进行权限判定。权限判定不再基于简单的静态规则，而是基于身份库、权限库和信任库的上下文属性、信任等级和安全策略等。

分析器为控制器提供信任等级评估。分析器持续接收可信网关、控制器的日志信息，结合身份库、权限库数据，并基于大数据和人工智能技术，对身份进行持续画像，对访问行为进行持续分析，对信任进行持续评估，最终生成和维护信任库，为动态访问控制引擎提供决策依据。

可信网关作为 5G 网络 MEC 用户面的网络控制节点，是确保业务安全访问的第一道关口，是动态访问控制能力的策略执行点。根据应用终端访问控制规则，可信网关拦截访问请求后，通过控制器对访问主体进行认证，

对访问主体的权限进行动态判定。只有认证通过并且具有访问权限的访问请求才予以放行。

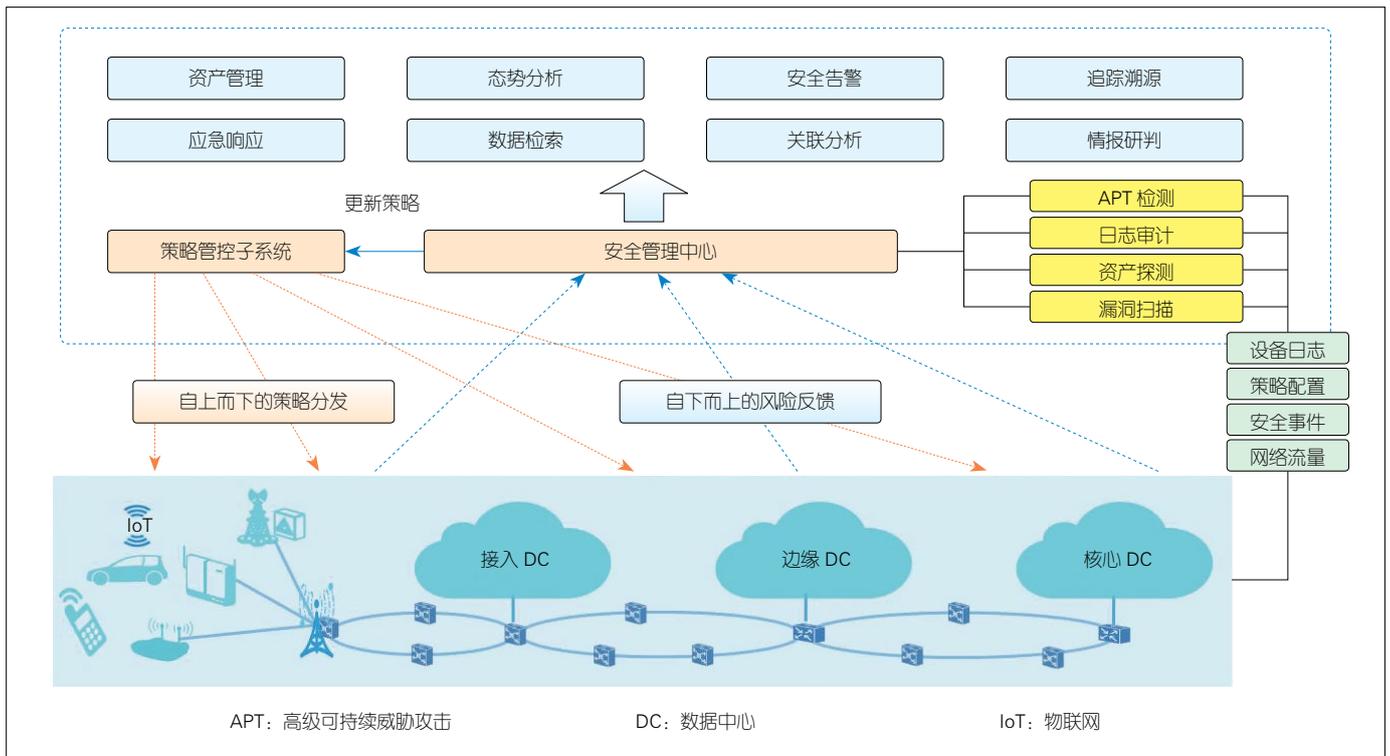
5G 工业互联网零信任安全架构下的终端安全接入不再以网络边界为限，这使得原来的被动防御向主动防御转变，边界防御向内生安全转变。

5 态势感知保障网络整体安全能力

5G 网络的应用，有力地推动了有线工业控制向无线接入工控自动化转型^[10-12]。云虚拟现实（VR）/增强现实（AR）技术的大量应用，工业可穿戴、远程操控的普及，使得传统工业系统势必与 5G 移动互联网产生大量信息和数据交互。这也给工业互联网行业安全防护提出了更高的挑战，原有的被动式防御已不可靠，无法有效防止有组织的规模性攻击。

首先，5G 工业互联网态势感知技术，可以覆盖 5G 资产（包括 5G 网元、切片、虚机、物理机、中间件等），

能先将各层级资产进行关联，然后根据关联关系来判断漏洞、脆弱性与攻击事件等威胁事件对业务的影响，并在大量的安全事件中寻找事件之间的因果关系。通过这样的方式，态势感知技术能够追踪攻击链定位威胁发生的源头，并分析可能的波及范围，根据资产价值及业务影响来确定处置方式与手段。其次，态势感知技术可以对网络攻击事件深度挖掘，结合网络的基础设施情况和运行状态，对网络安全态势做出评估，从而对未来可能遭受的网络攻击进行预测，并提供针对性的预防建议和措施。另外，在工业互联网业务与 5G 移动互联网交互的关键路径上，态势感知技术可以对网络中的流量和各种日志信息持续地收集分析，对网络异常流量（包括攻击流量特征、威胁文件传输等）进行解析，从而发现网络流量异常行为或者用户异常行为，以便主动对未知威胁提前干预。图 5 为 5G 安全态势感知架构。



▲图 5 5G 安全态势感知架构

6 结束语

在 5G 与工业互联网融合的过程中必然会出现安全问题，目前的 5G 工业互联网安全防护发展尚处起步阶段。随着 5G 融入工业互联网的广度和深度持续增强，有必要引入新的安全理念、安全技术，不断完善 5G 工业互联网安全防护体系，以支撑工业数字化转型升级行稳致远^[13-15]。

可定制的 5G+ 工业互联网安全能力，贴合工业互联网应用场景，通过引入主动式、智能化的威胁检测与安全防护技术，构建全面的预测、基础防护、响应和恢复能力，同时利用机器学习、深度学习等人工智能技术分析处理安全大数据，从而不断改善安全防御体系。可定制的 5G+ 工业互联网安全能力可以有力保障 5G 行业应用的安全，为后续更多的 5G 行业应用落地创造了安全的网络环境。

参考文献

- [1] 3GPP. Security architecture and procedures for 5G system: 3GPP TS 33.501 [S]. 2019
- [2] 3GPP. System architecture for the 5G system: 3GPP TS 23.501 [S]. 2019
- [3] 杨红梅, 赵勇. 5G 安全风险分析及标准进展 [J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(4): 2-5.
- [4] 3GPP. 5G security assurance specification (SCAS); access and mobility management function (AMF): 3GPP TS 33.512 [S]. 2018
- [5] 3GPP. 5G security assurance specification (SCAS); user plane function (UPF): 3GPP TS 33.513 [S]. 2018
- [6] 工业互联网园区网络白皮书 [R]. 工业互联网产业联盟, 2020
- [7] 工业互联网安全框架 [R]. 工业互联网产业联盟, 2019
- [8] 陆平, 李建华, 赵维铎. 5G 在垂直行业中的应用 [J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(1): 67-74.
- [9] Zero trust architecture: NIST, draft special publication (SP) 800-207 [R]. NIST 2019
- [10] 许书彬, 甘植旺. 5G 安全技术研究现状及发展趋势 [J]. 无线电通信技术, 2020, 46(2): 133-138.
- [11] 5G 网络安全需求与架构白皮书 [R]. IMT-2020, 2017
- [12] 5G-ENSURE_deliverable D2.7 security architecture (Final) [R]. 5GPPP, 2017
- [13] 基于 SDN/NFV 的电信网安全技术白皮书 [R]. SDN/NFV 产业联盟, 2018
- [14] 5G security white paper: security makes 5G go further [R]. GSMA, 2019
- [15] 5G 行业应用安全白皮书 [R]. 中兴通讯股份有限公司, 2019

作者简介



王继刚，中兴通讯股份有限公司网络安全与操作系统首席专家；主要研究领域为网络安全、操作系统、云计算；先后主持和参加基金项目 10 余项，获得多项科研成果奖；已发表论文 30 余篇，其中被 SCI/EI 检索 20 余篇。



王庆，中兴通讯股份有限公司网络安全规划部部长；主要研究领域为 5G 及垂直行业网络安全；已发表论文 20 余篇。



滕志猛，中兴通讯股份有限公司网络安全产品线总工；主要研究领域为网络安全；发表论文 30 余篇、国际标准组织提案 20 余篇。

工业互联网场景下 5G TSN 关键技术研究

5G TSN Key Technologies in Industrial Internet Scenario

张强 /ZHANG Qiang, 王卫斌 /WANG Weibin, 陆光辉 /LU Guanghui

(中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)



摘要: 研究了如何用 5G 时间敏感网络 (TSN) 的精准授时、流量调度、内生确定性等关键技术解决工业互联网中柔性制造、确定性通信的相关问题。分析了 5G 与 TSN 技术融合面临的挑战, 以及在工业互联网中的应用。5G TSN 是 5G+ 工业互联网关键业务通信的基础, 未来可以逐步替换部分场内总线通信, 实现智能制造的无线化和柔性化。

关键词: 时延敏感网络; 确定性通信; 低时延; 精准授时; 流量调度; 内生确定性

Abstract: How to solve the related problems of flexible manufacturing and deterministic communications in industrial Internet with precision timing, traffic scheduling, endogenous certainty and other key technologies of 5G time sensitive network (TSN) is studied. The challenges faced by the integration of 5G and TSN, and the applications of 5G TSN in the industrial Internet are analyzed in detail. 5G TSN is the basis of key service communications of 5G + industrial Internet. In the future, some field bus communications can be gradually replaced to achieve wireless and flexible intelligent manufacturing.

Keywords: time sensitive network; deterministic communications; low latency; precise timing; traffic schedule; native determination

DOI: 10.12142/ZTETJ.202006006

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20201123.1658.002.html>

网络出版日期: 2020-11-24

收稿日期: 2020-10-30

1 5G+ 工业互联网的需求和挑战

1.1 工业互联网中 5G 应用场景分析

工业互联网可以实现人、机、物全要素的网络互联。工业互联网平台则可以把设备、生产线、工厂、供应商、产品和客户紧密地连接且并融合起来。5G 是工业互联网的关键使能技术, 而工业互联网是 5G 的重要应用场景之一, 5G+ 工业互联网是赋能智慧工厂数字化、无线化、智能化的重要方向。

5G 网络的大带宽、低时延、高可靠特性, 可以满足工业设备的灵活移动性和差异化业务处理能力需求, 推动各类增强现实 (AR)/虚拟现实 (VR) 终端、Robot、自动导引运输车 (AGV)、场内产线设备等的无线化应用, 助力工厂柔性化生产大规模普及。工业互联网给 5G 带来了广泛的应用场景, 同时也带来了前所未有的挑战。例如, 有的工业应用可能需要网络具备 1 ms 时延、1 μ s 抖动和 99.999999% 的网络传输质量^[1]。

时间敏感网络 (TSN) 是工业互联网实现低时延、高可靠和确定性传输的重要技术之一, 5G+TSN 是未来实现工业互联网无线化和柔性制造的重要基础。TSN 在做数据转发时, 可以针对工业互联网不同优先级的业务数据进行队列调度, 从而实现质量差异化保证。在工业互联网场景下, TSN 可以针对各类工业应用涉及的业务流特性进行建模和定义, 并在此基础上, 提供不同的优先级与调度机制。工业互联网的业务流量类型非常多, 例如

视频、音频、同步实时控制流、事件、配置 & 诊断等，表 1 是工业互联网业务流的典型分类示例。

从表 1 中可以看出，工业互联网中不同的业务流有不同的服务级别协议 (SLA) 需求。按照周期性划分，业务流可以分为周期和非周期两种。同步实时流对时延的要求最高，时延主要用于运动控制，其特点是：周期性发包，其周期一般小于 2 ms；每周期内发送的数据长度相对稳定，一般不超过 100 B；端到端传输具有时限要求，即数据需要在一个特定的绝对时间之前抵达对端。事件、配置 & 诊断、Best Effort 类无时延特定要求；音频和视频类主要是依赖于帧率和采样率；周期循环和网络控制类对时延有要求，但相比同步实时类要低。

1.2 5G TSN 在工业互联网中的应用

如图 1 所示，TSN 在工业互联网中的应用场景，可以包括控制器与现场设备之间、控制器与控制器之间、信息技术 (IT) 网络与运营技术 (OT) 网络之间等。5G TSN 兼具 TSN 确定性传输和 5G 网络移动性的特点，在工业互联网中，可以替代部分有线工业以太网实现无线化和柔性制造。

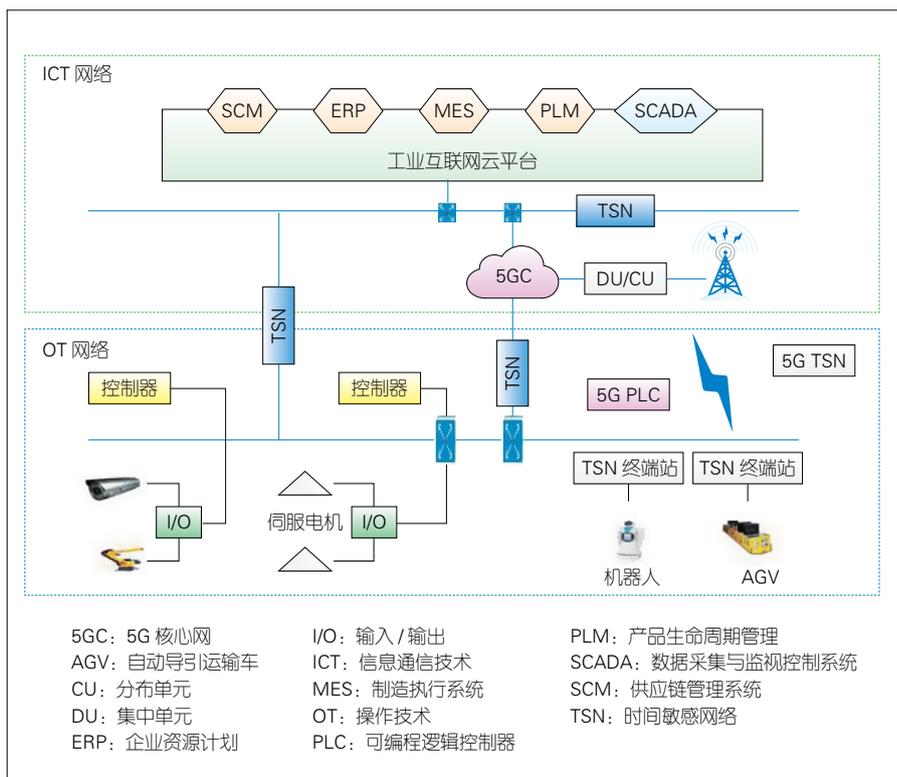
5G TSN 典型的应用场景包括场内产线设备控制、机器人控制、AGV 控制、5G 可编程逻辑控制器 (PLC)。

(1) 场内产线设备控制：面向数控机床、立体仓库、制造流水线，基于 5G TSN 打通产线设备和集中控制中心的数据链路，实现工业制造产线的远程、集中控制，以更好地提升生产效率。

(2) 机器人控制：在工业自动化产线，利用 5G TSN 低时延特性，结合传感器技术，实现机器人和机械臂的环境感知、姿态控制、远程操作、自动控制等功能，满足智能生产需求。

▼表 1 工业互联网业务流分类示例

流类型	周期性	时延要求	同步	传输保证	允许丢包	包大小/B
同步实时	周期	<2 ms	是	时限	无	固定 30~100
周期循环	周期	2~20 ms	否	时延	1~4 帧	固定 50~1 000
事件	非周期	不适用	否	时延	是	可变 100~1 500
网络控制	周期	50 ms~1 s	否	带宽	是	可变 50~500
配置 & 诊断	非周期	不适用	否	带宽	是	可变 500~1 500
Best Effort	非周期	不适用	否	无	是	可变 30~1 500
视频	周期	帧率	否	时延	是	可变 1 000~1 500
音频	周期	采样率	否	时延	是	可变 1 000~1 500



▲图 1 5G TSN 在工业互联网中的应用

(3) AGV 控制：在生产车间及园区中，通过视觉、雷达、无线等多种技术进行融合定位和障碍物判断，经低时延 5G 网络上传位置和运动信息，实现 AGV 的自动避障和相互协同工作，提升产线自动化水平。

(4) 5G PLC：在生产过程中，利用 5G 网络实现 PLC 之间、PLC 与厂内系统间的系统数据传输，在保证数据安全和实时性的同时，减少车间内布线成本，快速实现产线产能匹配，助力柔性制造。

2 5G+ 工业互联网 TSN 关键技术分析

2.1 5G 与 TSN 的融合架构

目前，如何在工业互联网中，对 5G 和 TSN 技术进行融合部署，已经成为产业界、学术界、标准组织研究的热点之一，尤其是第 3 代合作伙伴计划 (3GPP)，已经开始了 5G TSN 的标准化工作，并建立了基本的融合架构。目前 TSN 与 5G 融合架构主要采用桥接技术^[2-4]。

如图 2 所示，5G 整个网络包括终端、无线、承载和核心网，在 TSN 中作为一个逻辑网桥。TSN 与 5G 网络之间通过 TSN 转换器功能进行用户面和控制面的转换和互通。5G TSN 转换器包括设备侧 TSN 转换器 (DS-TT) 和网络侧 TSN 转换器 (NW-TT)，其中 DS-TT 位于终端侧，NW-TT 位于网络侧。5G 网络对 TSN 是透明性的，通过 DS-TT 和 NW-TT 提供 TSN 入口和出口端口。

TSN 是时延敏感网络，而 5G 网络本身是一个 Best Effort 网络；因此融合的难点和关键点为如何在不确定性的 5G 网络上实现确定性网络。5G 和 TSN 融合具有如下的技术挑战：

(1) 5G 网络低时延、低抖动的实现。5G TSN 包括终端、无线、传输和核心网，其中无线侧是实现端到端确定性的关键，无线传输容易受到环境影响，时延难以保障。

(2) 5G 与 TSN 融合网络的时间同步。当前 TSN 与 5G 网络有各自的时钟同步机制，实现时间同步是面向工业应用场景的关键能力需求之一。工业以太网的 TSN 采用广义精准时钟协议 (gPTP) (IEEE 802.1AS) 实现时间同步。如何协同实现 5G 网络与工业控制系统的时钟同步是需要考虑的问题^[5-6]。

(3) 5G TSN 终端到终端的直接通信。在工业互联网中，存在场内设备之间的直接通信，如移动机器人之间、AGV 小车之间的协同工作。如何保障终端到终端之间的确定性通信也是需要考虑的问题。

(4) 5G TSN 的工业互联网部署环境。TSN 的产业链比较长，在工业互联网中实现 TSN，会涉及工业设备、工业以太网、控制系统等的升级改造。另外，TSN 技术也在发展和完善中，规模商用还需要一定的时间。因此，

在工业互联网实际环境中，不是所有的设备都支持 TSN 协议。如何保障这些设备在初期的确定性传输，而不需要支持复杂的 TSN 协议是需要进一步考虑的问题。TSN 与 5G 的融合是需要逐步推进的，并将会随着关键技术的突破以及应用场景的需求变化不断向前演进。

2.2 5G TSN 关键技术

2.2.1 低时延低抖动敏感通信

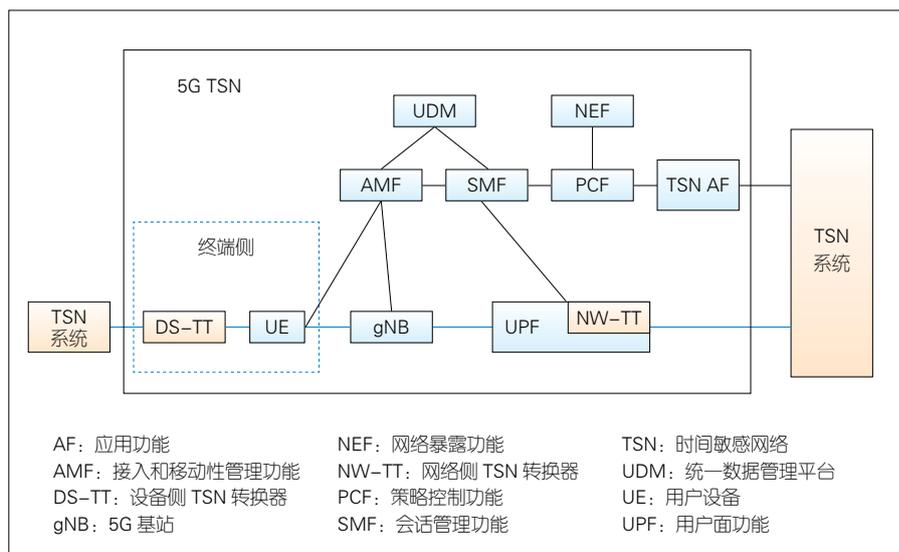
如图 3 所示，在 5G TSN 中，整体传输时延是 $T=(T1+...+T7)$ 。其中，无线侧的时延 $T3+T4$ 和传输的时延 $T2$ ，在整个时延中最难保障且容易

出现抖动的。

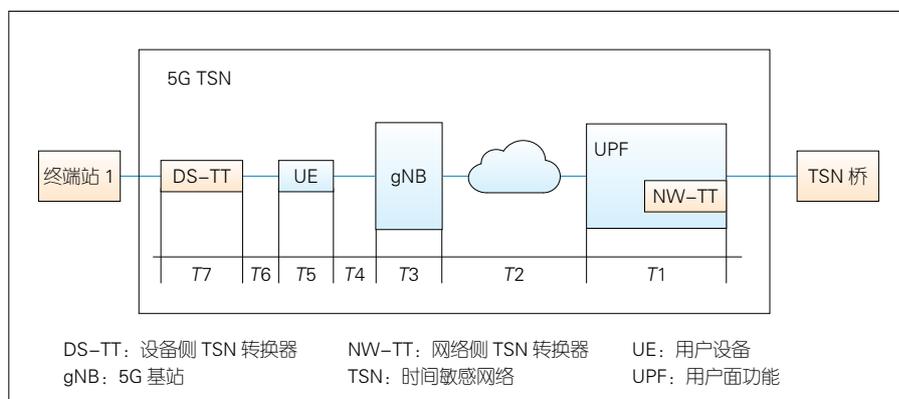
那么，5G TSN 是如何降低抖动，并保证时延传输的确定性呢？首先，采用延时关键可保障比特速率 (Delay Critical GBR)、切片、用户面功能 (UPF) 下沉分流等技术来降低传输的时延，然后再结合时延敏感通信辅助信息 (TSCAI)、保持和转发机制等消除抖动。

(1) 延时关键 GBR。

首先，根据工业互联网业务流的特征，对业务进行分类，例如周期性低时延的同步实时流、对时延无特殊要求的 Best Effort 业务流等。对于要求高的同步实时流的工业互联网业务 (如 Motion Control)，建议采用专门的 5G 服务质量特性 (5QI)，如表 2 中所示



▲图 2 5G TSN 融合架构



▲图 3 5G TSN 传输时延

的 85、86 等，从而提高工业互联网业务在无线侧调度的优先级，降低传输的时延。

(2) 5G TSN+ 网络切片。

如图 4 所示，对于高隔离、低时延的工业互联网业务，如果无线与 2C 网络共享，则建议无线侧采用物理资源承载 (PRB) 预留的切片，传输采用灵活以太网 (FlexE) 硬切片，核心网采用专用 UPF；对于时延要求特别高的业务，如场内产线设备控制，UPF 可以下沉至园区，以减少传输网络带来的时延，如图 4 中的工业切片 2 中的 UPF。

(3) 周期性确定服务质量 (QoS)。

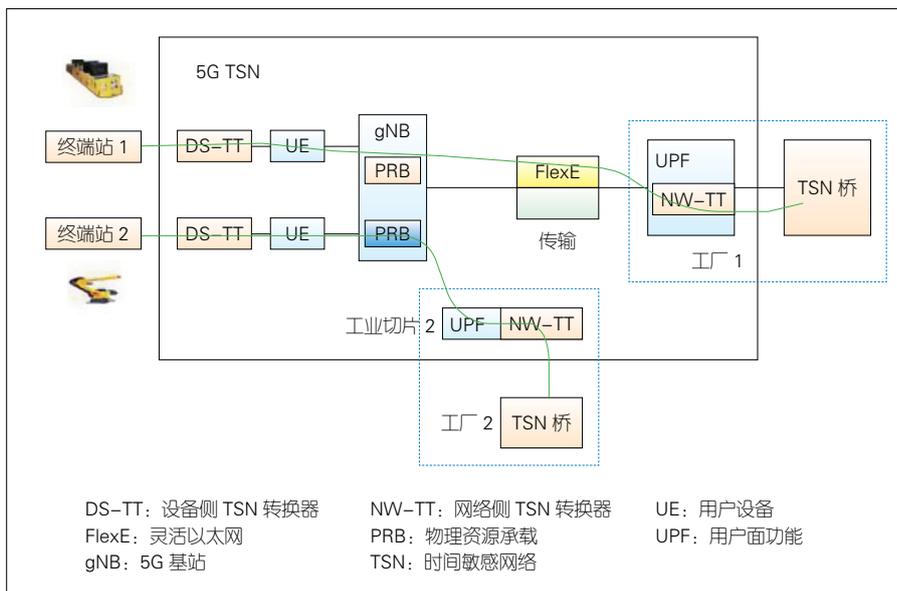
5G TSN 如何解决周期性确定 QoS？首先，5G TSN 采用 TSCAI 来描述工业互联网业务的流量特征，包括通信模式 (周期、非周期)、流量方向 (上行、下行)、流量到达的时间；其次，DS-TT 和 NW-TT 根据业务流量的特征信息和流量调度策略，采用保持和转发的调度机制，以减少时延抖动。

如表 3 所示，5G TSN 支持电气与电子工程师学会标准 (IEEE 802.1Qbv) 中定义的流量调度的保持和转发机制，其数据包只需在预定的周期上，打开门控以进行数据传送，就可以控制报文经过 5G TSN 的时延。例如，对于工业控制的业务，数据和门控发送周期都是 20 ms。第 1 个报文于 T_1 到达 5G 入口 (DS-TT 或 NW-TT)，5G 传输时延为 10 ms，5G 在出口侧 T_1+10 ms 发送报文；第 2 个报文 5G 传输时延为 9 ms，达到 5G 出口提前了 1 ms，出现了抖动，如图 5 所示。此时，报文 2 需要等待 1 ms，在 T_1+30 ms 才发送，这样一来报文 2 在 5G 的时延延长到 10 ms，从而消除了报文经过 5G 网络传输带来的 1 ms 抖动。保持转发可消除早到报文引发的

▼表 2 延时关键可保障比特速率

5QI	优先级	包时延预算 /ms	包错误率	最大包长 /B	平均时间窗 /ms	包大小/B
82	19	10	10^{-4}	255	2 000	固定 30~100
83	22	10	10^{-4}	1 354	2 000	固定 50~1 000
84	24	30	10^{-5}	1 354	2 000	可变 100~1 500
85	21	5	10^{-5}	255	2 000	可变 50~500
86	18	5	10^{-4}	1 354	2 000	可变 500~1 500

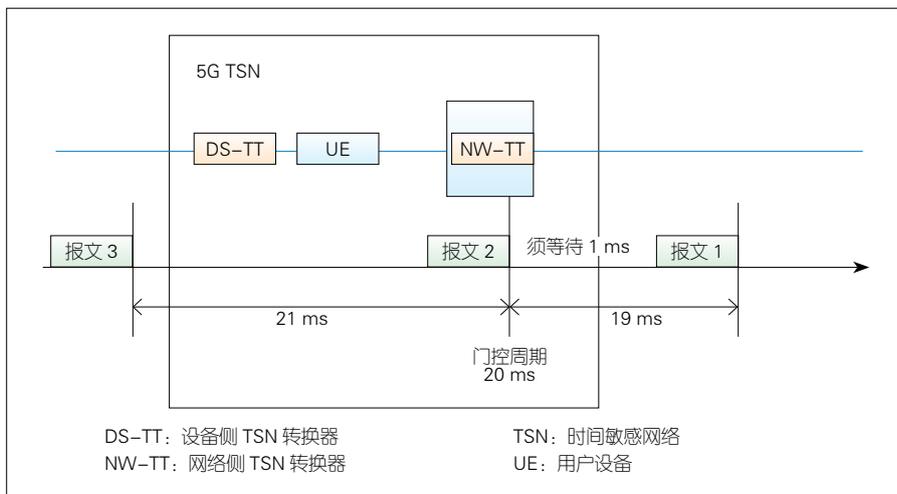
5QI: 5G 服务质量特性



▲图 4 5G TSN + 网络切片

▼表 3 5G 时间敏感网络流量调度

业务数据	到达 5G 时刻 / ms	5G 传输时延 / ms	5G 抖动 / ms	等待时间 / ms	离开 5G 时刻 / ms	包大小/B
报文 1	T_1	10	0	0	T_1+10	固定 30~100
报文 2	T_1+20	9	1	1	T_1+30	固定 50~1 000
报文 3	T_1+40	10	0	0	T_1+50	可变 100~1 500
报文 4	T_1+60	8	2	2	T_1+70	可变 50~500 B



▲图 5 NW-TT 流量调度消除时延抖动

抖动，但是无法消除延迟带来的抖动；因此，5G 网络需要采用加速技术快速的转发报文，例如延时关键 GBR、切片、UPF 下沉等。

2.2.2 5G 与 TSN 融合的时钟同步

时钟同步是确定性通信的前提，那么 5G TSN 是如何与工业互联网协同实现时钟同步的呢？

如图 6 所示，5G 网络和工业互联网有各自的主时钟（GM）。5G 网络中的各网元设备，包括用户设备（UE）、5G 基站（gNB）、UPF、NW-TT 和 DS-TT 与 5G GM 同步（即 5G 内部系统时钟）。整个端到端的 5G 系统可视为 IEEE 802.1AS “时间感知系统”，只有 NW-TT 和 DS-TT 需要支持 IEEE 802.1AS 协议，并与工业互联网保持时钟同步，执行与 IEEE 802.1AS 相关的所有功能，例如 gPTP、时间戳、最佳主时钟算法（BMCA）、rateRatio 等。因此，DS-TT 和 NW-TT 需要同时支持 5G 网络和工业互联网两种时钟，并需要计算两种时钟的偏差。

当工业互联网业务需要 DS-TT 和 NW-TT 通过门控进行流量调度以消除 5G 网络的时延抖动时，通知给 5G 网络的报文达到时间和周期时间将以工业互联网的时钟为基准。因此，5G 网络收到调度设置请求后，调度周期需要先转化为以 5G 时钟为基准的时间，然后进行流量门控的调度。

2.2.3 5G TSN 中用户设备（UE）的通信

在工业互联网中，经常有工业设备之间的协同且设备都是移动的，比如 AGV 协同搬运、机器人协同作业等，因此，需要终端与终端直接进行确定性的通信。当前，满足如下条件的 DS-TT/UE 可以直接进行 5G TSN 的通信。

(1) 相同的数据网络名

(DNN) 和单网络切片选择辅助信息（S-NSSAI）；

(2) 相同 UPF 的网络实例。

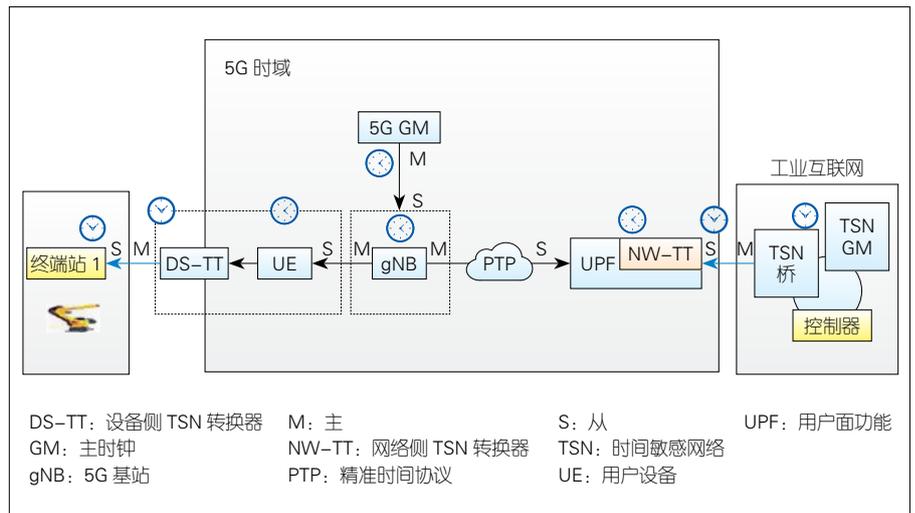
因此，当工业互联网中的设备之间需要进行 TSN 直接通信时，需要合理地划分切片，设置 DNN，部署相应的 UPF，如图 7 所示。

UE-UE 的通信，需要考虑 5G 网桥的时延计算变化，需要叠加两个 UE 的包时延预算（PDB）和 UE-DS-TT 驻留时延。工业互联网中的集中网络

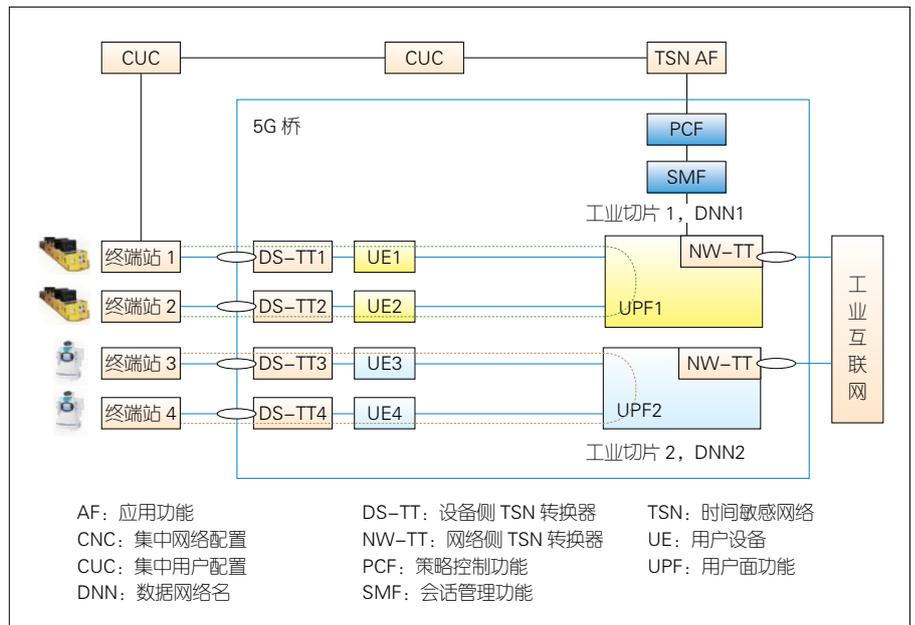
配置（CNC）需要分别给两个 UE 下发门控调度策略。

2.2.4 5G TSN 内生确定性

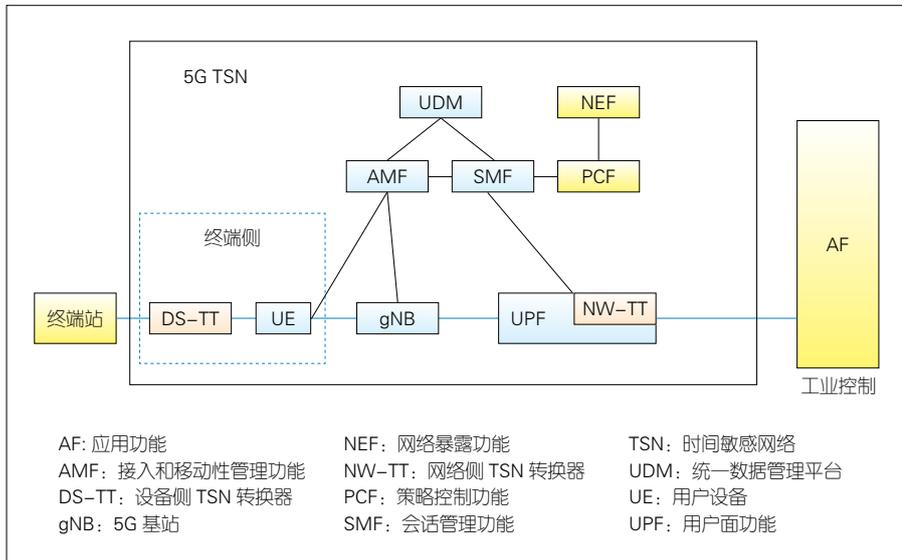
如图 8 所示，在工业互联网的应用场景中，并不是所有的控制系统都支持 TSN。那么，如何保证 5G 不在 TSN 网桥的场景下，仍可以进行确定性时延传输是需要考虑的问题，这就涉及内生确定性。所谓内生确定性，就是 5G 自身保证传输时延的确定，消



▲图 6 5G TSN 与工业互联网时钟同步



▲图 7 终端到终端的 5G TSN 通信



▲图 8 5G TSN 内生确定性通信

除抖动。

5G 内生确定性在工业互联网中应用时要考虑的问题包括：（1）工业互联网如何获取 5G 网络的 QoS 信息？

（2）工业互联网如何提供确定性通信要求？

首先，可以考虑工业互联网应用通过网络暴露功能（NEF）/策略控制功能（PCF）获取 DS-TT/UE 间、DS-TT/UE 间，以及 NW-TT/UPF 间的时延和抖动。

其次，因为没有 TSN 的 CNC，所以工业互联网应用可以自己构造 TSN QoS 需求，保持和转发门控制参数，并通过 NEF 向 5G 提供。通过 5G 内生确定性，工业互联网在初期不需要支持复杂的 TSN 协议。

3 结束语

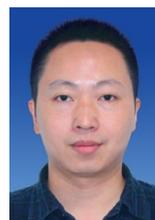
5G TSN 是实现工业互联网的重要技术。一方面，延时关键 GBR、切片技术、精准授时、流量调度和内生确定性等为工业互联网提供低时延、低抖动的确定性通信，助力工业互联网的无线化和柔性制造；另一方面，5G TSN 当前的产业链发展还不够成熟，并涉及终端、无线、核心网，甚至传输的改造。因此，需要逐步地推进商用，预计 2020—2022 年是 5G TSN 的研发与试点验证阶段，2022 年以后逐步开始应用。

参考文献

[1] 3GPP. Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains; stage 1:3GPP TS 22.104 [S]. 2019

[2] 3GPP. System architecture for the 5G system: 3GPP TS 23.501 [S]. 2020
[3] 3GPP. Procedures for the 5G System (5GS); stage 2: 3GPP TS 23.502 [S]. 2020
[4] 3GPP. Policy and charging control framework for the 5G system (5GS); stage 2:3GPP TS 23.503 [S]. 2020
[5] IEEE. Local and metropolitan area network – bridge and bridged: IEEE 802.1Q [S]. 2018
[6] IEEE. Timing and synchronization for time-sensitive applications in bridged local area networks:IEEE 802.1AS [S]. 2010

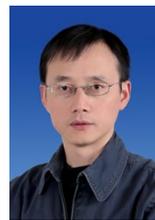
作者简介



张强，中兴通讯股份有限公司核心网架构师；从事 5G 新技术研究、5G 核心网产品规划的相关工作。



王卫斌，中兴通讯股份有限公司网络首席科学家；从事 SDN/NFV、电信云研究，以及核心网产品规划；相关产品解决方案荣获 5G 论坛、SDN/NFV 全球大会、世界边缘计算论坛、中国通信学会等多项大奖；发表核心期刊论文 10 余篇，获国家发明和实用新型专利 20 余项。



陆光辉，中兴通讯股份有限公司网络首席架构师；从事 5G、SDN/NFV、电信云研究，以及核心网产品规划。



工业互联网标识在家居定制行业中的应用探索

Application of Industrial Internet Identification in Home Customization Industry

区景安 / OU Jing'an, 汪毅 / WANG Yi, 陈琴 / CHEN Qin

(广东鑫兴科技有限公司, 中国 佛山 528200)
(Guangdong Xinxing Technology Co., Ltd., Foshan 528200, China)

摘要: 阐述了工业互联网标识二级节点在家居定制行业中的重要作用, 提出了标识在家居定制行业的技术方案。通过探讨标识解析在个性化定制中的应用以及应用推进方案, 认为标识可解决家居行业大规模生产和个性化定制化的矛盾, 助力全屋定制, 迎接发展新机遇。

关键词: 工业互联网; 标识解析; 标识二级节点; 个性化定制; 兼容互通

Abstract: Through interpreting the important role of industrial Internet identification secondary nodes in the home customization industry, a technical plan for identification in the home customization industry is proposed. In addition, the application of identification analysis in personalized customization and its promotion plan are also discussed. Industrial Internet identification can solve the contradiction between large-scale production and personalized customization in home furnishing industry. It can also help the whole house customization to embrace new development opportunities.

Keywords: industrial Internet; identification analysis; identification secondary node; personalized customization; compatibility and intercommunication

DOI: 10.12142/ZTETJ.202006007

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20201130.1346.002.html>

网络出版日期: 2020-11-30

收稿日期: 2020-10-30

在工业互联网、制造业转型升级和大数据广泛应用的背景下, 工业互联网创新应用的发展前景广阔, 需求巨大。工业互联网标识解析给生产要素赋予标识, 可以实现跨地域、跨企业、跨系统信息的共享和查询, 是构建工业互联网的核心基础^[1]。作为整个标识解析体系的中间环节, 工业

互联网标识解析体系二级节点连接着顶级节点, 并面向行业平台、大型企业平台和通用性平台提供服务, 对服务制造业和整个工业互联网的建设起到了关键作用^[2]。

“全屋定制”是一项集家居设计及定制、安装等服务为一体的家居定制解决方案, 是目前中国家具行业的重要发展趋势之一。全屋定制的消费理念为建材家居行业开辟了新市场。尤其是在进入 2016 年以后, 家居界更是刮起一阵强劲的定制风: 维尚、索

菲亚、欧派等都开始向全屋定制转型, 即从单品家具供应商向系统解决方案提供商转变, 为消费者提供“设计+产品+服务”一站式的解决方案。鉴于家具行业的未来发展趋势, 利用工业互联网及标识解析技术, 通过“个性化定制”获取用户的个性化需求, 可实现设计、制造资源和生产流程的灵活组织, 发挥工业互联网标识在产品溯源、材料数字化等方面的重要作用, 从而可实现低成本、大规模定制, 促进家具行业定制家居模式的发展。

基金项目: 广东省 2019 年工业互联网标识解析二级节点引导资金项目 (面向家居定制行业的工业互联网标识解析二级节点项目)

1 工业互联网标识二级节点的定位和作用

(1) 二级节点是标识解析体系中直接服务行业企业的核心环节。

通过对接中国顶级节点和企业节点，二级节点接入到整个国家工业互联网标识解析体系，可以为企业和用户提供灵活的标识编码注册和标识解析服务。随着标识解析应用的快速发展，二级节点是满足特定行业或者区域要求，进一步扩展标识解析服务能力、服务范围、服务深度的重要方式。二级节点是构建安全、稳定、高效、可靠的工业互联网标识解析体系的重要基础和支撑环节^[3]。

(2) 二级节点是推动标识应用的重要抓手。

二级节点直接面向行业企业提供服务，是标识服务的窗口。从这个意义上讲，二级节点的发展情况将直接决定标识解析体系在应用中的发展情况。首先，二级节点是构建行业级标识解析应用的平台，在充分保证数据主权的前提下，可以促进跨企业的信息共享和信息交易。其次，二级节点本身将产生大量有价值的信息，包括注册信息、解析日志等。对数据的分析和挖掘就可能衍生出很多新的应用和模式^[4]。

(3) 二级节点是打造标识生态的重要引擎。

工业互联网标识解析体系不仅仅是基础设施，它还可以围绕标识标签、标识读写器、标识解析软硬件、标识解析集成、标识解析应用、标识解析体系运营、标识解析公共服务等，形成一个巨大的产业生态体系。二级节点的建设推广，可以加速产业聚集，推动标识产业生态培育^[5-6]。

基于标识解析二级节点在工业互联网体系和产业应用中的重要作用，构建家居定制行业工业互联网标识公

共服务平台，面向家具行业提供标识解析服务，对于中国家具行业工业互联网的发展具有关键性的意义。通过对接国家顶级节点和企业节点，二级节点为定制家居领域的企业和用户提供灵活的标识编码注册和标识解析服务。这不仅对家具行业的供应链管理、重要产品追溯、产品全生命周期管理等应用具有积极的促进作用，还能够有效加速家具产业聚集，推动标识产业生态培育。

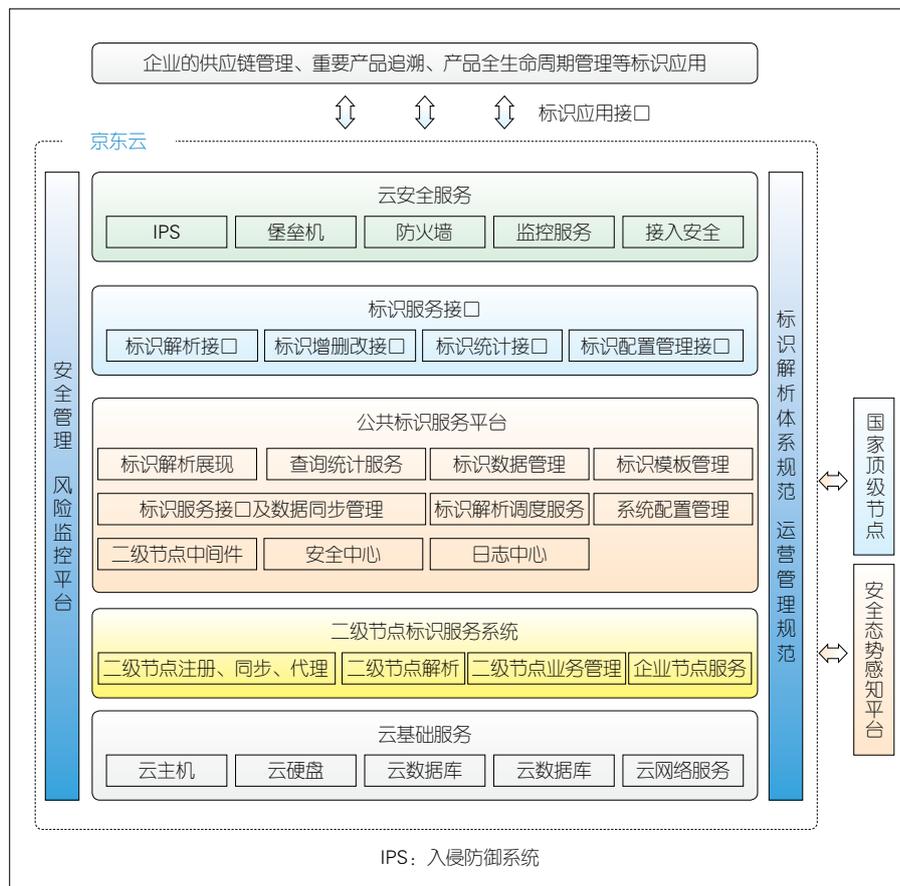
2 工业互联网标识公共服务平台

基于工业互联网标识二级节点提供的基础服务，面向家居定制行业的工业互联网标识公共服务平台，利用标识解析技术的优势和特性，融合了目前主流的中间件技术、公钥基础设施(PKI)安全技术、云服务技术、

大数据分析技术，以进行整体的合理规划设计。

如图1所示，在总体架构设计中，依托基础平台(标识解析二级节点、顶级节点)提供的标识创建、标识解析、标识管理等服务，遵循工业互联网标识解析体系规范和安全、风险管理、风险控制相关规范，可构建一码到底的定制家具全生命周期、透明生产状态信息的跟踪追溯系统。该系统主要由公共标识服务平台和标识服务接口构成。其中，公共标识服务平台是建立在二级节点服务系统上的。

公共标识服务平台可以提供标识解析调度服务模块、安全服务模块、标识配置管理模块、应用接口模块、标识解析展现模块、查询统计模块等多种功能模块的服务。通过与对外提供服务接口的配合，标识公共服



▲图1 工业互联网标识公共服务平台

台在面向定制家具企业的各种业务场景时,为接入的信息化系统提供标识解析应用服务。

工业互联网标识公共服务平台的具体功能应用包括:

(1) 标识解析调用服务模块。

该模块不仅可对接调用标识解析二级节点或标识解析企业节点的标识注册、标识管理(标识关联信息的增、删、改)等服务接口,还可对接调用国家顶级节点提供的标识解析服务接口,并提供调用接口的配置管理。此外,该模块还支持通过超文本传输协议(HTTP)或 handle 协议访问的调用标识解析二级节点、标识解析企业节点及国家顶级节点相关标识解析服务接口。各级标识解析节点的通信过程须建立 HTTPS 安全隧道,同时调用过程须符合各级标识解析节点的权限管控机制。

(2) 标识配置管理模块。

该模块除了提供标识前缀初始化配置、标识前缀的管理和维护外,还提供证书配置、节点服务互联网协议(IP)地址配置。其中,IP地址支持 IPv4 和 IPv6(分别指第4版、第6版 IP)双栈协议,即在界面上允许选择输入 IPv4 或者 IPv6。标识配置管理模块能够根据标识二级节点系统颁发的前缀码和自定义码自动合成标识码,并创建标识码的关联产品信息,绑定标识码与应用企业提供的产品批次关系等。

(3) 标识应用接口模块。

面向不同平台架构和不同开发语言的异构行业信息化系统,提供统一规范的标识解析应用层接口,有助于实现调用方全流程标识解析应用。通过融合安全服务模块的各种接口安全管控功能,该模块可提供标识注册、标识管理、标识解析服务接口。提供数据结构校验功能,可以验证调用方

上传标识关联信息结构的完整性和规范性。此外,应用接口还支持跨平台调用和不同开发语言的对接。接口需要采取 HTTPS 安全隧道,并且支持轻量级的数据交换格式对象简谱(JSON)或者可扩展标记语言(XML)。

(4) 标识解析展现模块。

该模块基于移动终端提供统一的标识码关联信息来展现功能,并支持各种主流的移动端操作系统。标识解析展现模块不仅支持各种移动应用程序(APP)软件(微信、支付宝、移动浏览器等)进行扫码(二维码)展现,还可同时展现企业信息、品类信息、单品信息,并支持展现信息的收缩、嵌套标识码关联信息的扩展展现,以及统一资源定位系统(URL)链接跳转、电话信息拨打、邮件信息的调用(发邮件)等。

(5) 查询统计模块。

查询统计模块具有标识发码量查询、标识码追踪、事务日志分析、发码统计分析和数据查询功能。该模块具有可视化分析功能,支持报表的导出,可提供产码报表(日、周、月)和趋势分析图。

(6) 账号权限管理模块。

为应对工业互联网标识应用接口层的调用、内部管控及企业信息化系统所提供的接口服务,在服务平台上建立账号,可以管理和区分用户身份及其对应的权限,即根据用户身份集合来确定角色,并按照角色所面对的系统功能来分配权限。用户初始化固定后,仍可进行添加或修改。权限设定管理可灵活实现到功能菜单级别。账号权限管理的对象覆盖了整个服务平台数据、功能、操作和接口。配置管理设置了专门的界面入口,并且需要最高角色权限才可进行操作。安全服务模块为该管理提供安全保障。这类管理方式,保证了平台服务和企业

信息化系统的权责分明,使之具有可控性和可追溯性。

(7) 安全服务模块。

安全服务模块向工业互联网标识应用接口层及内部管控提供统一的安全服务功能,例如:向企业信息化系统应用接口提供权限管控功能,提供多种调用方身份确权机制(账号+密码确权或数字证书验证)和相关配置管理功能;提供调用方 IP 白名单控制及相关管理配置功能,控制调用方 IP 地址,以实现调用方服务器的控制。为保障调用方通信数据安全,在应用接口创建 HTTPS 安全隧道及相关的密钥管理配置(支持 RSA 2048 或 SM2 算法),可以实现接口通信数据的加密。此外,该模块可为标识应用支撑服务系统调用方部署和配置数字证书。基于 PKI 体系的数字签名技术,不仅可以实现接口调用方在标识创建、标识管理、标识删除过程中对标识关联信息的数字签名,还能实现调用方标识关联信息操作过程的数据完整性验证和行为不抵赖。

(8) 存储备份模块。

备份不仅仅是数据的保护,其最终目的是在系统遇到人为或自然灾害时,能够通过备份内容对系统进行有效恢复。因此,在考虑备份选择时,除了消除传统输入指令的复杂程序或手动备份的麻烦外,更要实现自动化及跨平台的备份,以满足用户的全面需求。

(9) 日志分析模块。

作为整体系统的重要组成部分,日志分析模块由多台服务器构成,并通过网络的协调同步共同完成日志分析。面向海量的日志信息,该模块可通过实时的日志分析为用户提供服务。日志分析系统会周期性地产生众多日志分析任务。这些任务在系统的调度下被分派到适合的计算节点。日志分

析任务具有计算量大、时效性强、准确性高等特点，其性能好坏决定着整个系统的成败。日志分析系统的模块结构介绍，使任务调度模块在整个系统中的核心作用得到明确。与此同时，一个高效任务调度模块需要实现的目标也被提出。日志分析模块不仅可以针对异构企业信息化系统的调用过程进行日志记录，例如记录故障、权限获取信息，还能够提供日志信息查询检索、可视化的日志分析报表、IP访问分析报表、错误记录统计报表，并且具有日志定期自动清理功能。

3 应用集成和推进方案

3.1 标识在定制家居供应链端的数据互通应用

工业互联网标识解析体系及工业互联网标识解析二级节点提供的标识解析服务，可以解决上下游企业在供应链端的编码转化和产品数据信息互通问题。这对发挥工业互联网标识在数据共享、数据互通的优势，降低上下游企业在供应链端的管理成本和提高数据互联互通的效率具有重要意义。

(1) 供应商企业结合自身对成品管理的要求，为所有生产成品分配统一的产品编码。简而言之，供应商企业无须改变自己原有的编码体系，也无须为下游的供货产品打上额外的条码或二维码。

(2) 供应商企业在自身的仓库管理系统中，特别是在出库的业务流中对接工业互联网标识应用接口时，可通过前缀码+自定义码的方式构建标识码，并在工业互联网标识解析体系中创建工业互联网标识对象。标识关联信息采用预先与下游企业协商的数据结构。该过程在出库业务流程的后台执行，不会对相关管理系统的操作界面产生影响。

(3) 供应商企业在完成标识创建后，只需要在产品外包装打印自家产品的产品编码即可，无须增加其他额外条码。随后，物流系统将会把产品配送给下游的定制家居企业。

(4) 定制家居企业在供应商企业产品入库过程中，可通过原有条码扫描外设获取供应商供货产品编码信息。仓库管理系统不仅能够通过产品编码确定供货商企业的标识前缀(88.168.106)，将标识前缀+产品编码进行拼装形成标识码，还可以调用工业互联网标识解析接口获取标识关联信息(获得结构化的产品信息数据)，并将供货商产品信息数据添加到自身的仓库管理系统中。

(5) 基于标识解析获取的结构化产品信息及自身“物料编码”的编码规则，定制家居企业可以进行编码转化，给存入的供应商产品创建唯一的“物料编码”，为自身的业务管理提供服务。

3.2 标识在定制家居全生命周期透明生产状态信息中的跟踪追溯

在面向家居定制行业的工业互联网标识解析二级节点项目的应用案例中，工业互联网标识能够对异主、异构、异地数据进行跨流程、跨设备、跨系统、跨平台的互联互通。作为数据对象的载体，工业互联网标识能够串通并承载各个生产环节的状态信息，可实现厂内、厂外双线数据信息流的监控。厂内数据信息流是指定制家具企业原有的生产制造系统数据流。厂外数据信息流则是通过一码到底的工业互联网标识码的解析查询，实现定制家具的透明生产过程状态的跟踪和产品信息溯源，具体如图2所示。

为降低工业互联网标识对现有生产制造体系的影响，避免直接在生产制造设备系统上改造调用工业互联网

标识接口的操作，可以选择后台的企业资源计划(ERP)、制造执行系统(MES)、仓库管理系统(WMS)等信息化系统的旁路形式接入。由于状态跟踪即时性要求不高，所以亦可以采用异步的形式对工业互联网标识解析信息中的状态生产信息进行更新。

接单是消费者缴纳定金确认购买行为的环节，也是定制家具整体服务开始的环节。作为工业互联网标识自定义码的部分，订单号可以拼接该定制家具企业的标识前缀，形成工业互联网标识码。该标识码，即一码到底的“一码”，贯穿于定制家具的全生命周期。

工业互联网标识解析体系的核心价值是共享互通。作为工业互联网标识的解析信息而上传的数据，属于定制家具企业可公开查询的信息内容。企业自身不愿将内部生产等敏感数据标识化以供用户查询解析。如果的确存在厂内生产深入应用工业互联网标识实现协同制造的案例场景，企业可考虑在本地建设和部署节点，并将工业互联网标识数据存放于该节点中。企业可直接掌控管理标识数据，同时设定权限控制和完善安全防护机制。

各个环节上传作为工业互联网标识解析的信息，以进行定制家具生产制造、销售、服务状态的跟踪和信息追溯。

(1) 接单环节。生成的订单编码作为工业互联网标识私码部分，然后拼接定制家具生产制造企业的前缀作为一码到底的工业互联网标识码。该环节上传的标识解析信息包含客户基础信息和订单基本内容，例如客户姓名、联系方式、住址、购买产品名称等。

(2) 现场测量环节。在这一环节中，定制家具企业将安排专业测量人员上门测量定制家具的尺寸。相关

尺寸数据将被录入该环节的标识解析信息中，以供用户解析查询。

(3) 拆单环节。该环节主要是指物料清单(BOM)分单。由于此类信息属于生产制造数据，对外信息追溯展现的意义不大，因此详细信息不必展示，仅须展示拆单状态和完成时间即可。

(4) 材料入库环节。该环节是供应链应用的延申，即在解析信息中记录并嵌入供应商提供的物料货品的工业互联网标识码。这些标识码由于分别使用各自供应商企业的标识前缀，因此具有唯一性。用户点击嵌入的工业互联网标识码，就可获取相应供应商货品的相关信息，从而实现溯源。如果供应商企业未申请工业互联网标识前缀，则以供应商名称和供货货品名称代替即可。

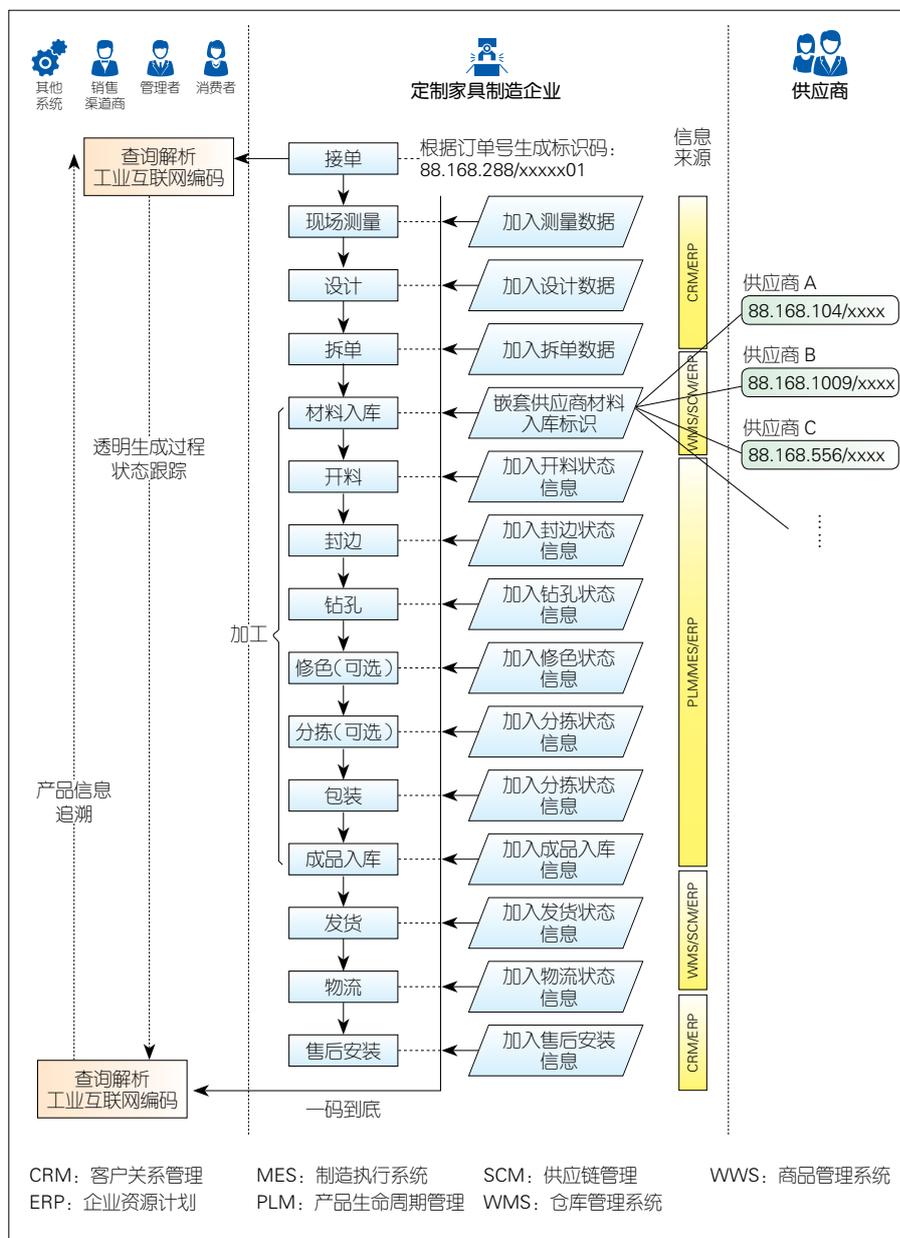
(5) 开料、封边、钻孔、修色、分拣、包装、成品入库。这些环节均属于内部生产制造的环节。此类环节可解析展示“加工环节名称”“完成状态”“加工地点”和“完成时间”4个基本状态信息。

(6) 发货和物流环节。在这一环节中，工业互联网标识可以承载“发货地点”“发货联系人”“收货地点”“收货联系人”“发货状态”“所选物流”和“物流状态”等基本信息。

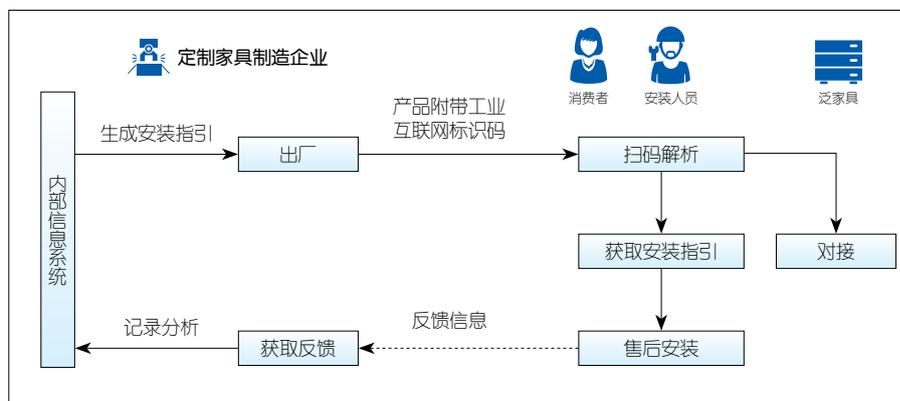
(7) 售后安装环节。售后安装可以在标识解析信息中存放产品安装指引示意图。

3.3 标识在定制家居售后安装指引的应用

基于一码到底的案例设计理念，在定制家具产品的生产制造过程中，企业根据不同产品情况确定不同的安装指引过程，并形成图文或视频材料记录在该产品工业互联网标识码的解析信息中。该标识码以二维码的形式



▲图2 一码到底的定制家具全生命周期信息追溯流程图



▲图3 定制家具售后安装流程图

被打印在产品外包装上。

如图3所示，当定制家具产品抵达现场时，任何安装人员（安装师傅或者消费者）都可以扫码解析产品上的工业互联网标识码获取每一个产品部件的安装指引信息。安装人员只须根据该安装指引进行定制家具的安装即可，无须特别关注每套产品的不同安装方法。另外，涉及泛家具生态圈的相关企业也可解析获取该定制家具产品的安装指引信息，用以对接自身产品的配套生产或安装。在未来，要实现这种更深入、跨企业的协同工作，还需要克服很多困难。

如图4所示，在安装人员完成售后安装后，消费者可直接在扫码解析的界面对该服务和产品进行评价反馈。反馈信息将返回至定制家具企业，以供企业进行分析。此类反馈信息甚至可以包括交付安装地址等终端消费者的相关信息。

3.4 标识应用推进方案

(1) 加入相关产业联盟。

这类联盟包括工业互联网产业联盟和家具产业联盟。联盟可向成员企业大力开展关于应用工业互联网标识解析体系的宣贯活动，以全方位构建本地家具企业应用工业互联网标识解析体系。

(2) 寻找试点应用企业。

针对本地代表性家具企业展开调研，有助于收集相关重要信息：企业基本经营情况、企业信息系统建设应用状况和企业全流程管理过程中标识码（私码、自定义码）的使用情况。通过现场参观等方式调研企业，向被调研企业宣贯工业互联网标识的基本知识、应用意义和应用案例（如图5、图6所示），有利于推动试点企业落地。

(3) 参与应用平台规划建设。

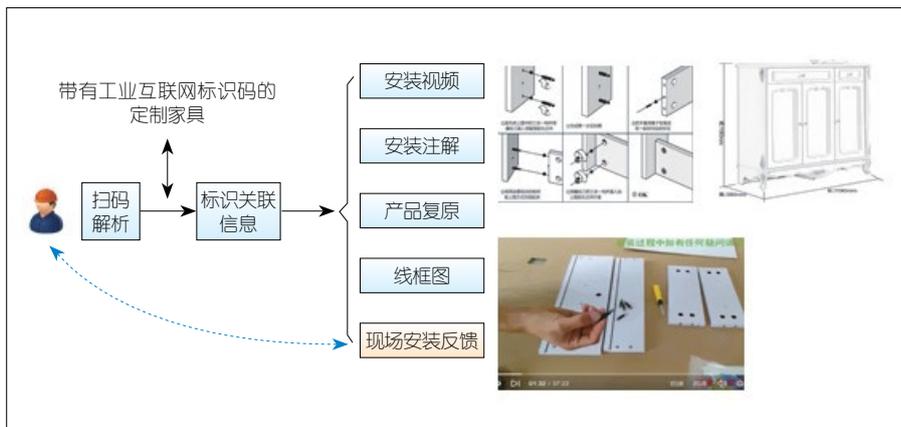
本地的工业互联网公共服务平台、家具智能制造平台、定制家居服

务平台的规划和设计工作需要各方积极参与进来。工业互联网标识体系需要被融入各个应用平台的建设方案中，以逐步推进工业互联网标识体系在家具产业生态圈的建立。

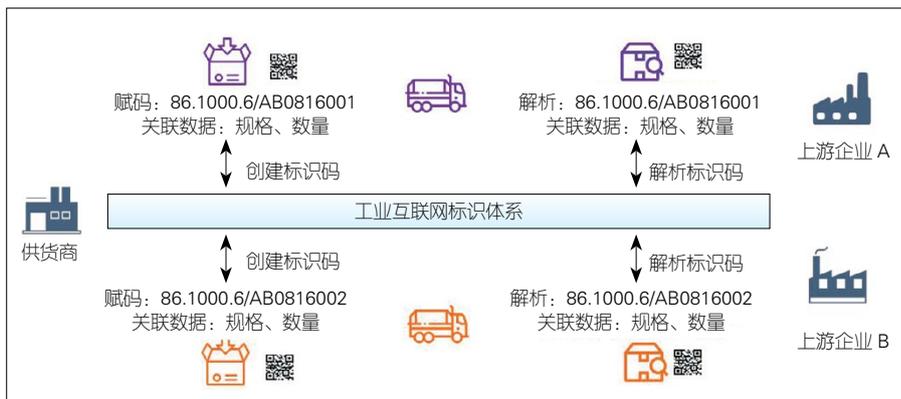
(4) 寻求服务商和渠道商深入

合作。

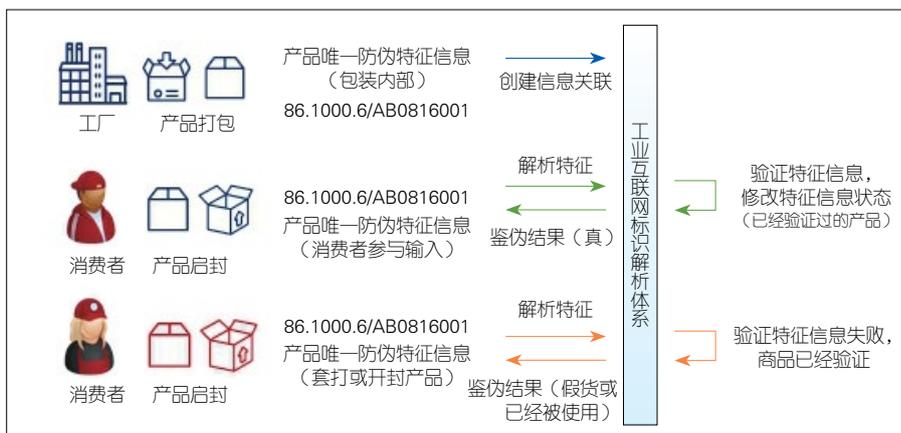
针对工业互联网标识体系的应用接入，企业应与区域软件服务商和渠道合作伙伴进行现场技术交流和培训，重点介绍工业互联网标识体系的应用层接口、标识关联信息的结构、标识码的各种操作过程。现场演示各种接



▲图4 定制家具售后安装实现效果图



▲图5 供应链打通（数据共享、满足定制化需求）



▲图6 产品防伪溯源

口调用（包括标识创建，标识关联信息的增加、修改、删除，标识的销毁），可促进合作伙伴从技术层面深入理解工业互联网标识体系对其平台或者产品创造的价值。

（5）打造示范应用和经典案例。

工业互联网标识二级节点基于家具行业实际应用场景，挖掘工业互联网标识体系在家具行业的应用案例。如图5、图6所示，应用案例能够展现企业应用工业互联网标识体系的价值，帮助企业更好地认识标识体系，推动家具企业真正落地应用工业互联网标识解析体系。

4 结束语

“个性”是全屋定制的核心部分。它的优势在于能满足不同个性需求、减少库存积压和降低营销成本。虽然这有利于加速新产品的开发，但是相关细节却错综复杂，环环相扣。这就需要发挥工业互联网标识在产品溯源、材料数字化等方面的重要作用，灵活组织设计、制造资源和生产流程，以解决家居行业大规模生产和个性化定制

的矛盾。人、数据和机器的全连接，能够推动数字工厂、智能产品、生产服务化、跨界合作的逐步实现，促进虚拟世界和物理世界的融合。这不仅能使生产力得到极大提高，还使人与人、人与厂商的低成本地连接成为现实。有了工业互联网标识的助力，定制家居行业必将迎来发展好机遇。

参考文献

- [1] 李海花, 期治博. 工业互联网标识解析二级节点建设思路 [J]. 信息通信技术与政策, 2019, (2): 61-65. DOI: CNKI:SUN:DXWJ.0.2019-02-019
- [2] 刘阳, 韩天宇, 谢滨, 等. 基于工业互联网标识解析体系的数据共享机制 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(12): 3032-3042. DOI: 10.13196/j.cims.2019.12.005
- [3] 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, (8): 43-46. DOI: CNKI:SUN:DXWJ.0.2019-08-011
- [4] 贾雪琴, 罗松, 胡云. 工业互联网标识及其应用研究 [J]. 信息通信技术与政策, 2019, (4): 1-5. DOI: CNKI:SUN:DXWJ.0.2019-04-001
- [5] 任语铮, 曾诗钦, 霍如, 等. 新型工业互联网标识解析体系探讨与实践 [J]. 信息通信技术与政策, 2019, (8): 74-77
- [6] 刘阳. 一种面向制造的层次化的工业互联网标识设计 [J]. 自动化博览, 2019, (3): 32-34. DOI: CNKI:SUN:ZDBN.0.2019-03-012

作者简介



区景安，广东鑫兴科技有限公司副总经理、工业互联网产业联盟标识工作组副主席、广东省工信厅工业互联网专家、佛山市南海区工业互联网产业联盟秘书长、佛山市网信办专家、工业互联网标识体系二级节点（佛山）项目负责人；

研究领域为信息安全、工业互联网等；承担阿里云创新中心（佛山）、国家安全大数据平台（华南）、工业互联网创新发展工程等多个重大项目。



汪毅，广东鑫兴科技有限公司技术总监，高级工程师；曾参与工信部工业互联网创新发展工程和多项省市级重大专项；获发明专利4项。



陈琴，广东鑫兴科技有限公司项目经理，工程师；曾参与工信部工业互联网创新发展工程和多项省市级重大专项；发表论文3篇。



工业互联网技术洞察

Insights into Industrial Internet Technologies

沈彬 /SHEN Bin, 李海花 /LI Haihua, 高腾 /GAO Teng

(中国信息通信研究院, 中国 北京 100191)
(China Academy of Information and Communications Technology,
Beijing 100191, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202006008

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20201124.0914.001.html>

网络出版日期: 2020-11-24

收稿日期: 2020-10-26

摘要: 5G、时间敏感网络(TSN)、边缘计算、工业智能、数字孪生、区块链、虚拟现实(VR)/增强现实(AR)等技术正在与工业互联网加速融合应用,不断拓展工业互联网的能力内涵和作用边界。这些技术已经成为影响工业互联网后续发展的核心技术,为产业数字化转型和经济高质量发展提供关键支撑。

关键词: 工业互联网; 5G; TSN; 边缘计算; 工业智能; 数字孪生; 区块链; VR/AR

Abstract: 5G, time sensitive network (TSN), edge computing, industrial artificial intelligence, digital twin, blockchain, and virtual reality (VR)/ augmented reality (AR) are accelerating the integration and application of industrial Internet, and constantly expanding the capability connotation and function boundary of industrial Internet. These technologies have become the core technologies and indispensable components that affect the follow-up development of industrial Internet, providing key support for industrial digital transformation and high-quality economic development

Keywords: industrial Internet; 5G; TSN; edge computing; industrial intelligence; digital twin; blockchain; VR/AR

1 工业互联网技术概述

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,工业互联网通过人、机、物的全面互联,实现了全要素、全产业链、全价值链的连接^[1],正在全球范围内不断颠覆传统制造模式、生产组织方式和产业形态。这将推动全新工业生产制造和服务体系的形成,成为企业数字化转型和经济高质量发展的重要途径。工业互联网产业联盟(简称“联盟”)自2016年起,快速推动工业互联网的发展,并在每季度召开的工作组全会上,深入探讨工业互联网最新发展情况。通过联盟2020年第3季度工作组全会,我们观察到,5G、时间敏感网络(TSN)、边缘计算、人工智能、数字孪生、区

块链、虚拟现实(VR)/增强现实(AR)等新型技术,已成为大家广泛探讨的焦点。这些新技术正在与工业互联网加速融合,不断拓展工业互联网的能力内涵和作用边界。

工业互联网技术体系由制造技术、信息技术以及由这两大技术交织形成的融合性技术组成。其中,制造技术构建了专业领域技术和知识基础体系,是工业数字化应用优化闭环的起点和终点。制造技术贯穿于设备、边缘、企业等各层工业互联网系统的实施落地。以5G、TSN、边缘计算为代表的信息技术,可直接作用于工业领域,支撑工业互联网的通信、计算、安全基础设施。以人工智能、数据孪生、区块链、VR/AR等为代表的融合性技术,构建符合工业特点的数据采集、处理、分析体系,并重新定义工业知

识积累和使用方式,以提升制造技术优化发展的效率和效能,同时推动信息技术不断向工业核心环节渗透。

2 工业互联网关键技术

2.1 5G 技术

5G技术作为移动通信技术的典型代表,具有大带宽、低延时、高可靠的特性。5G技术弥补了通用网络技术难以完全满足工业生产要求的技术短板,并通过灵活部署,帮助工业企业加快工厂生产内网的网络化改造^[2]。

5G与工业互联网的融合发展,已拓展至航空、矿业、港口、医疗、冶金、汽车、家电、能源、电子、交通等10余个重点行业,已初步形成5G+超高清视频、5G+AR、5G+VR、5G+无人机、5G+云端机器人、5G+远程控制、

5G+ 机器视觉以及 5G+ 云化自动导引车 (AGV) 等 8 大典型应用场景。与此同时, 这些应用场景对 5G 网络也提出了新的需求。其中, 5G 与超高清视频的融合应用已进入应用成熟期, 成为第一批典型应用场景; 5G+AR、5G+VR 以及 5G+ 机器视觉等应用已进入高速发展期, 所产生的经济价值正在逐渐显现, 在未来 1—2 年内将成为工业互联网的主流应用场景; 5G+ 云化 AGV、5G+ 无人机等应用受限于与设备深度融合的需求, 需要等待相关产品发展成熟, 在未来 2—3 年内将有较快发展; 5G+ 远程控制和 5G+ 云端机器人等应用由于涉及工业核心控制环节, 目前还处于探索期, 有待进一步的测试验证。

联盟工业无线特设组正在开展工业 5G 的相关研究, 具体包括: 网络质量指标体系现状、典型的工业互联网业务场景分析、终端对 5G 网络质量评价方法、5G 无线网络质量评价指标、工厂内 5G 网络覆盖配置标准参考等。

2.2 TSN 技术

TSN 技术用以太网物理接口实现工业有线连接, 并基于电气和电子工程师协会协议 (IEEE 802.1) 实现工业以太网数据链路层传输^[3]。TSN 技术遵循标准以太网协议体系要求, 打破原有封闭协议模式, 提高了工业设备的连接性和通用性, 具有良好的互联互通能力。在提供确定性时延、带宽保证等能力的同时, TSN 技术实现标准、开放的二层转发, 提升了互操作性, 为传统运营技术 (OT) 与互联网技术 (IT) 网络向融合扁平化的架构演进提供了技术支撑。由于 TSN 的互操作架构是基于 SDN 体系架构的, 因此 TSN 技术可实现设备以及网络的灵活配置、监控、管理及按需调优。TSN 技术的时间片调度、抢占、流监控以

及过滤等一系列网络流量调度特性, 有效支撑二层网络, 为不同等级的数据业务流提供了差异化的承载服务, 有助于工业数据在工业设备和工业云之间的传输和流转能力的提升。

联盟网络组正在进行 TSN 产业测试, 以加速推动 TSN 芯片、模组、操作系统等产品的应用。同时, 联盟已经启动 TSN 产业链名录创建计划, 以更好地推动 TSN 的产业落地, 加速产业链的成熟发展。

2.3 边缘计算技术

边缘计算技术是指, 通过靠近物或数据源头, 实现计算、网络、存储等多维度资源的统一协同调度及全局优化^[4]。通过云计算、网络协同联动, 边缘计算技术打通云、边、网、端等关键环节, 实现了工业互联网数据的纵向集成, 可满足工业在敏捷连接、实时业务、数据聚合、应用智能等方面的关键需求。作为工业互联网数据的第一入口, 边缘计算基础设施是各类工业应用的重要载体。

当前, 由于在工业现场存在 40 多种工业总线技术, 工业设备之间的连接需要边缘计算提供“现场级”的计算能力, 以实现各种制式的网络通信协议相互转换、互联互通, 同时又能够应对异构网络部署与配置、网络管理与维护等方面的挑战。边缘计算技术可提高工业数据计算的实时性和可靠性。在工业控制的部分场景中, 计算处理的时延要求在 10 ms 以内。如果数据分析和控制逻辑全部在云端实现, 则难以满足业务的实时性要求。同时, 工业生产要求计算能力具备不受网络传输带宽和负载影响的“本地存活”能力, 以避免断网、时延过大等意外因素对实时性生产造成影响。

目前, 边缘计算技术已应用于工业现场数据采集与处理、基于边缘视

频技术的缺陷检测系统、马达类震动物器本地管理系统、智慧物流运输管理、智慧安监等典型场景。联盟边缘计算特设组已经于 2020 年上半年启动“边缘计算标准件计划”, 以解决边缘计算在实际部署应用过程中存在的突出问题, 比如产业碎片化、供给侧研究方向分散、需求侧建设选型困难、设备及平台标准缺失、可信开放测试机制不完善等。

2.4 工业智能技术

工业智能 (亦称工业人工智能) 技术是人工智能技术与工业融合发展形成的, 贯穿于设计、生产、管理、服务等工业领域的各个环节, 实现了模仿甚至超越人类感知、分析、决策等能力的技术、方法、产品及应用系统^[5]。工业智能技术包括专家系统、机器学习、知识图谱、深度学习等, 已在工业系统各层级、各环节广泛应用, 并且其细分应用场景已达到数十种。

在工业生产现场, 对于库存管理、生产成本管理等流程清晰、机理明确、计算复杂度较低的问题, 可通过专家系统沉淀大量专业知识与经验, 进行推理和判断, 使问题得到有效解决。对于设备运行优化、制造工艺优化、质量检测等场景, 这类问题的工业机理相对复杂, 但不需要大量的数据和复杂计算, 可以通过机器学习进行处理, 就能够提升预测准确率, 降低成本, 并减少故障率。产品需求分析、风险预测等场景, 需要依靠大量数据的推理作为决策支持。尽管这类场景计算复杂度相对较高, 但其问题原理或对象间的关系相对清晰; 因此可利用知识图谱技术来解决。复杂产品质量检测、设备复杂控制、生产安全等场景, 则需要通过深度学习技术对以图像、视频类为主的数据, 进行深度分析挖掘, 从而解决工业领域的“疑难杂症”。

而产品智能研发、无人操作设备等更为复杂的问题，通常需要多种方法组合进行求解。

通过联盟工业智能特设组，我们了解到，目前基于视觉识别与分析类的工业智能技术最为成熟。联盟对基于数据分析的智能类应用在设备制造等环节中进行了初步探索，认为基于数据分析算法类应用的必要性和有效性有待进一步研判。

2.5 数字孪生技术

数字孪生技术是指通过数字空间实时构建物理对象（包括资产、行为、过程等）的精准数字化映射，基于分析预测以形成最佳综合决策，进而实现工业全业务流程的闭环优化。数字孪生技术以数据与模型的集成融合为核心，是由制造技术、信息技术及融合性技术交织形成的新产物、新模式，覆盖产品全生命周期及生产的全过程。在产品的设计阶段，使用数字孪生可以提高设计的准确性，并可以验证产品在真实环境中的性能；在产品的生产制造阶段，使用数字孪生可以缩短产品生产周期，提高设计质量，降低生产成本；在产品服务阶段，使用数字孪生可以提高设备远程维护的效率，减少宕机时间，降低整体的维护成本。建设面向产品与生产线感知、仿真分析、运行决策和执行优化等过程的物理实体模型层、虚拟空间模型层，有助于构建虚实相互关联和映射的数字孪生对象模型。通过各种开放工控协议和规范与现场自动化集成，可实现产品与生产线的孪生对象数据同步和交换，以实现面向产品全生命周期的产品设计与仿真、数字化工艺设计与仿真、生产线建模与仿真、生产过程建模与控制及设备故障诊断与远程运维的应用。

目前，数字孪生技术尚处于发展

初期。联盟中已有部分成员单位进行相关应用探索，例如组织开展中国技术供应商征集工作、不断完善正在编制的《工业数字孪生白皮书》等，以加快推动数字孪生技术的应用探索。在未来，数字孪生技术的成熟发展，能够驱动生产方式和制造模式的变革。

2.6 区块链技术

区块链是由多种技术集成创新而成的分布式网络数据管理技术^[6]。该技术利用密码学技术和分布式共识协议，保证了网络传输与访问安全，实现了数据多方维护、交叉验证、全网一致和不易篡改。区块链技术在工业互联网中能够解决高价值制造数据的追溯问题，充分发挥促进数据共享、优化业务流程、降低运营成本、提升协同效率、建设可信体系等方面的作用，有助于打通数据孤岛，加速工业企业内部的生产流程管理和设备安全互联。此外，区块链技术还能够辅助制造业在不同主体间进行高效协同，例如，在工业企业之间实现产业链协同，在工业企业和金融机构之间构筑可信互联的新型产融协同生态。

目前，工业区块链技术也处于发展初期。为此，联盟成立了工业区块链特设组，以加紧区块链技术在工业领域应用的研究。此外，联盟还发布了《工业区块链应用白皮书》，开展了典型应用案例征集活动。这对加快推动工业区块链基础核心技术研发和行业应用落地具有重要意义。

2.7 VR/AR 技术

VR 技术是指以计算机、电子、信息和仿真技术为核心，利用各种现代科技手段来生成包括视觉、听觉、触觉、嗅觉和味觉在内的一体化的虚拟环境。VR 可为用户提供沉浸式、无边界的虚拟体验，并具备自主性、构

想性和多感知性等多种能力。AR 技术是将真实世界和虚拟世界的信息综合在一起，为用户提供特定感官体验的人机接口的技术。AR 技术的本质是用计算机和信息处理技术，将原本现实世界中不存在的目标进行模拟仿真处理，并将这些虚拟信息叠加在真实世界当中被用户感知，从而实现超越现实的特殊体验效果。其中，VR 技术发展较早，相关产业链最为成熟。随着 5G 和边缘计算的发展，AR 技术逐渐从概念走向成熟，大大加速了终端轻量化的进程。目前，AR 在工业领域的应用已有赶超 VR 的趋势。

VR/AR 技术在工业领域中有诸多应用场景。例如，工程师和设计师可以使用 VR/AR 技术，以新的动态方式协作、审查 3D 模型和数字原型。此外，AR 技术还能够实现产品可视化，增强显示产品操作说明，改善现场机械和产品的操作水平等。VR/AR 技术在产品开发、设计、制造、销售、服务、物流、培训、产品体验等多个环节均可进行部署应用，其可视化和增强功能指示将会对工业生产带来较大的影响。

目前，联盟 VR/AR 特设组联合有关单位，开展了工业 VR/AR 的技术研究，并征集到了一批应用案例。通过研究分析，联盟发布了《工业 VR/AR 白皮书》。在未来，联盟拟开展虚实融合实验室建设和新一代虚拟现实终端设计，以加快推动工业 VR/AR 产业的发展。

3 结束语

工业互联网技术是工业互联网发展的关键动能。工业互联网技术形成的技术体系是工业互联网体系架构落地实施的重要支撑。由于工业互联网技术已经超出了单一学科和工程的范围，因此需要将各个独立的技术联系

起来,以构建一个相互关联、各有侧重的新技术体系。该体系的核心在于推动重点技术率先嵌入工业互联网实施系统中,进而发挥整体技术体系的赋能作用。

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) [EB/OL]. (2020-04)[2020-10-26]. http://www.aii-alliance.org/static/upload/202004/0430_162140_875.pdf
- [2] 工业互联网产业联盟. 5G应用产业方阵. 5G与工业互联网融合应用发展白皮书 [EB/OL]. (2019-10)[2020-10-26]. http://www.aii-alliance.org/static/upload/202002/0226_155231_117.pdf
- [3] 工业互联网产业联盟. 时间敏感网络(TSN)产业白皮书(V1.0版) [EB/OL]. (2020-08)[2020-10-26]. http://www.aii-alliance.org/static/upload/202009/0901_165010_961.pdf
- [4] 边缘计算产业联盟, 工业互联网产业联盟. 边缘计算参考架构 3.0 [EB/OL]. (2020-08)[2020-10-26]. <http://www.eccconsortium.org/Uploads/file/20190225/1551059767474697.pdf>
- [5] 工业互联网产业联盟. 工业智能白皮书

- 书 [EB/OL]. (2020-04)[2020-10-26]. http://www.aii-alliance.org/static/upload/202004/0430_161537_192.pdf
- [6] 工业互联网产业联盟, 可信区块链推进计划. 工业区块链应用白皮书(1.0版) [EB/OL]. (2019-02)[2020-10-26]. http://www.aii-alliance.org/static/upload/202003/0302_110455_445.pdf

作者简介



沈彬, 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、工业互联网产业联盟副秘书长; 主要研究领域为工业互联网, 负责工业互联网产业联盟工作; 先后参与工业互联网发展战略重大课题、工业互联网体系架构、工业互联网标准体系框架、5G+工业互联网等研究工作。



李海花, 中国信息通信研究院工业互联网与物联网研究所副所长、工业互联网产业联盟总体组主席、中国仪器仪表学会理事、中国仪器仪表学会智能制造推进工作委员会委员; 主要从事与信息通信相关的政府支撑、战略咨询、新技术跟踪研究、标准研制工作, 目前聚焦工业互联网及标识解析体系相关研究与推动工作。



高腾, 中国信息通信研究院技术与标准研究所助理工程师; 主要研究领域为工业互联网, 主要从事工业互联网体系架构、标准化、新技术等研究工作。

专题预告

《中兴通讯技术》2021年专题计划

期次	专题名称	策划人
1	视频技术和用户体验评测	华中科技大学教授 江涛 中兴通讯股份有限公司副总裁 陆平
2	6G 愿景及技术挑战	中国工程院院士 张平 北京邮电大学教授 张建华
3	边缘计算与算力网络	工信部通信科技委信息通信网络专家组组长 赵慧玲
4	高铁智能通信技术与应用	北京交通大学教授 艾渤
5	低轨卫星通信技术与应用	哈尔滨工业大学教授 郭庆
6	触觉通信技术	南京邮电大学教授 周亮



中国工业互联网投融资 现状分析与建议

Status Analysis and Suggestions of Industrial Internet Investment and Financing in China

王欣怡 /WANG Xinyi, 肖荣美 /XIAO Rongmei

(中国信息通信研究院, 中国 北京 100191)
(China Academy of Information and Communication Technology,
Beijing 100191, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202006009

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20201118.1437.002.html>

网络出版日期: 2020-11-19

收稿日期: 2020-10-25

摘要: 通过对工业互联网领域进行分类, 以及对上市企业和非上市企业的投融资活动进行研究, 认为科创板已成为中国工业互联网企业上市融资的主要渠道。工业互联网的创投活动与经济水平呈现正相关关系, 各类投资机构正在积极展开布局。整体上看, 中国工业互联网投融资活动的水平在一定程度上可以解释现有发展格局。但是, 投融资活动也暴露了一些当前发展中亟待解决的关键问题。通过对这些问题的阐述, 为产业发展提出了相关意见和建议。

关键词: 工业互联网; 分类; 上市企业; 创投活动

Abstract: According to the classification of industrial Internet and the study of the investment and financing activities of listed and non-listed companies, the science and technology innovation board has become the main channel for industrial Internet companies to list and raise funds in China. Industrial Internet's venture capital activities and economic levels show a positive correlation, and various investment institutions are actively deploying. Overall, the level of industrial Internet investment and financing activities in China can explain the current development pattern to a certain extent. However, the investment and financing activities also reveal that some key issues in the current development still need to be resolved. Based on the analysis of these issues, relevant opinions and suggestions are put forward for industry development.

Keywords: industrial Internet; classification; listed company; venture capital activity

工业互联网是新一代信息通信技术与工业经济深度融合下的关键基础设施、新型应用模式和全新工业生态。通过人、机、物的全面互联, 工业互联网实现了全要素、全产业链、全价值链的连接, 将推动全新工业生产制造和服务体系的形成。近年来, 中国政府高度重视工业互联网的发展。2020年, 工业互联网被正式纳入“新型基础设施”范畴。伴随着各项改革的深入推进, 工业互联网进入了一个新的发展阶段。

随着资本市场各项改革的深入推

进, 战略层面“金融支持实体经济”发展的整体导向愈加显现。科创板的推出和创业板注册制改革都为新技术、新模式、新业态的创新提供了融资新渠道。作为新一轮信息通信技术与实体经济深度融合的产物, 工业互联网不仅对未来产业的发展起到了支撑作用, 还为经济社会的发展注入了新动能。作为典型的资本和技术密集型产业, 工业互联网不仅需要产业和技术的创新支持, 更需要庞大的资金持续为产业发展提供资金保障。本文中, 我们尝试从工业互联网企业的边

界探讨入手, 并从上市企业和非上市企业的角度, 梳理中国工业互联网企业的整体投融资情况。

1 工业互联网的范畴和边界界定

(1) 工业互联网产业范围界定。

自“工业互联网”这一概念被引入中国以来, 产业界一直广泛讨论其边界和范围。有些认为工业互联网与智能制造、工业自动化等在产业范围和边界上高度重合, 有些则认为工业互联网主要是指工业软件产业。2020年年初, 中国信息通信研究院发布了

《工业互联网产业经济发展报告（2020年）》^[1]，首次从经济核算的角度对工业互联网产业范围给出了清晰的界定。工业互联网核心产业主要包括工业互联网网络、工业互联网平台与工业软件、工业互联网安全、工业数字化装备、工业互联自动化5大产业。此后，工业互联网产业联盟发布的《中国工业互联网投融资报告（2019）》^[2]以此为基础，从投融资活动监测的目的出发，进一步将工业互联网产业范围细化为工业智能设备、工业自动化与边缘计算、网络和标识、平台、工业软件及应用程序（APP）产品、安全、相关服务7类^[2]。

（2）工业互联网企业范围界定。

由于目前并没有官方的统计数据，本文中，我们综合借鉴中国信息通信研究院发布的《工业互联网产业经济发展报告》和工业互联网产业联盟发布的《中国工业互联网投融资报告（2019）》^[2]，并结合工业互联网的特色，将工业互联网企业界定为“能够为非个人用户提供工业智能设备、工业自动化与边缘计算、网络和标识、平台、工业软件及APP产品、安全及相关服务的企业”，具体如图1所示。目前，市场中领先的工业互联网

企业均为上市企业，例如海尔、徐工、三一重工等。除此之外，在一些细分领域中，也逐渐涌现出了一些创新活跃的初创企业。因此，综合考虑中国工业互联网产业的发展现状和数据的可获得性，本文中，我们将以上市企业和非上市企业分别作为研究对象，从投融资的视角观察中国工业互联网产业的发展情况。

2 工业互联网投融资整体情况

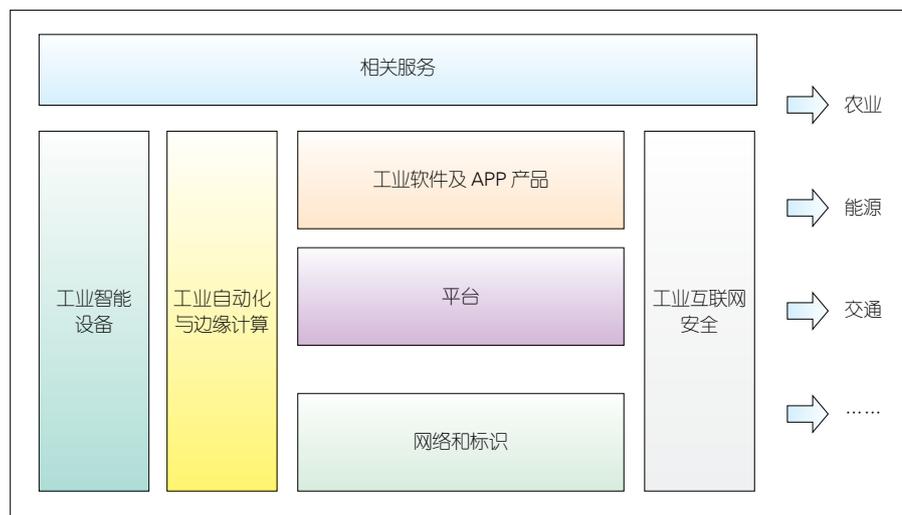
（1）工业互联网上市企业整体表现。

根据上文确定的企业范围，并结合对万德、同花顺等数据库中工业互联网板块企业的交叉比对和主营业务甄别，截至2020年9月30日，我们共遴选出146家工业互联网上市企业。从上市时间来看，2019—2020年是工业互联网企业上市的活跃期：2019年新增上市企业23家，2020年1—9月新增上市企业25家。从板块分布来看，如图2所示，上市企业在A股的各个板块均有分布，其中在创业板和科创板上市的企业共计82家。与此同时，科创板已经成为中国工业互联网企业融资最重要的渠道。从融资规模来看，2020年1—9月，35家工业互联网企

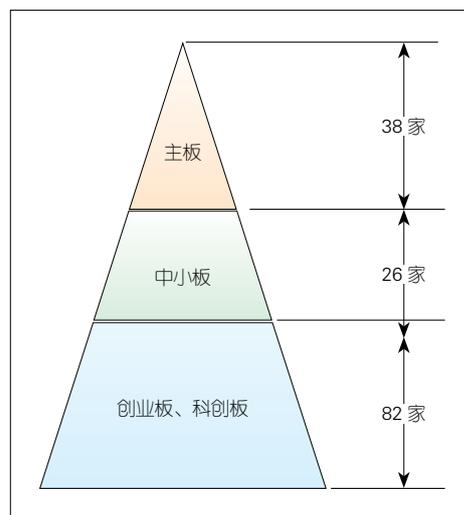
业通过首发、增发、配股等方式，累计融资规模已超过440亿元人民币。从区域分布来看，上市企业多集中在东部经济发达地区。北京、广东、江苏、浙江、上海的工业互联网上市企业最多，体现出工业互联网与经济发展的高度正相关性。从企业类别来看，提供相关服务的企业多达36家，工业自动化企业共34家，工业智能设备企业共25家。由此可见，工业企业仍然是工业互联网的发展主体。

（2）工业互联网领域创投活动整体情况。

中国工业互联网领域的创投活动较为活跃。如图3所示，2020年1—9月，通过对初创企业公开的融资事件和投融资金额进行整理，我们共追踪到302家企业的318次投融资事件，累计投融资金额超过310亿元。由于受到疫情影响，2020年1—5月融资事件数量下降幅度超过30%。从2020年7月开始，虽然中国工业互联网领域的创投活跃度逐渐回升，但是仍然没有达到2019年同期水平。在轮次方面，有53.5%的事件处于A+轮及以前，这说明中国工业互联网的初创企业相对比较活跃。在领域方面，提供相关服务的企业占比最多，其中以解决方



▲图1 工业互联网企业的边界和范畴



▲图2 中国工业互联网上市企业的板块分布

案提供商和技术服务供应商为主，安全、工业软件及 APP、网络与标识领域的初创企业数量相对较少。在地域分布方面，创投活动较为活跃的地区仍然以东部地区为主，其中北京、上海、广东、江苏最为活跃^[3]。

3 工业互联网投融资活动特点

(1) 科创板成为中国企业上市融资的主要渠道。

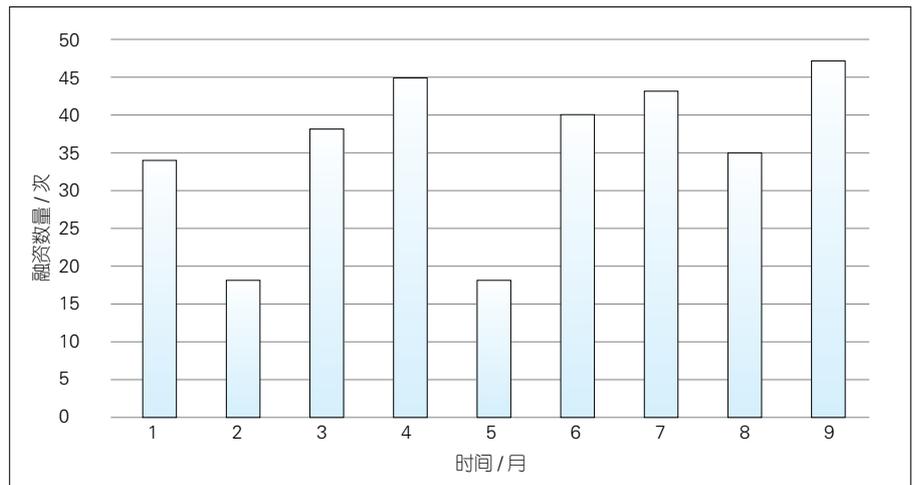
如图 4 所示，从企业上市的时间分布来看，工业互联网上市企业的数量从 2019 年开始激增，并且多数企业在科创板上市。2018 年 11 月，习近平总书记宣布，将在上海证券交易所设立科创板并实施试点注册制。自 2019 年 1 月起，证监会和上海证券交易所围绕设立科创板并试点注册制推出了多项管理文件和配套细则。2019 年 4 月初，相关制度体系基本搭建完成。2019 年 6 月 13 日上午，科创板宣布开板，并在同年 7 月 22 日正式开市。科创板支持的重点领域包括新一代信息技术、高端装备等高技术产业和战略性新兴产业。工业互联网作为新型基础设施、新模式、新业态，其覆盖范围涵盖了科创板支持的重点产业。自 2019 年 3 季度以来，已有 37 家企业通过科创板上市，占到了新上市企业总量的八成，同时相关企业的累计融资金额已超过 200 亿元，总市值突破了 4 000 亿元。可以说，科创板已成为中国工业互联网企业融资的重要渠道，不仅拓宽了企业的融资渠道，还提升了企业的融资效率。在科创板的带动下，支撑工业互联网创新发展的多层次资本市场加速建立，金融支持实体经济发展的作用进一步彰显。

(2) 工业互联网创业创新集群化发展趋势明显。

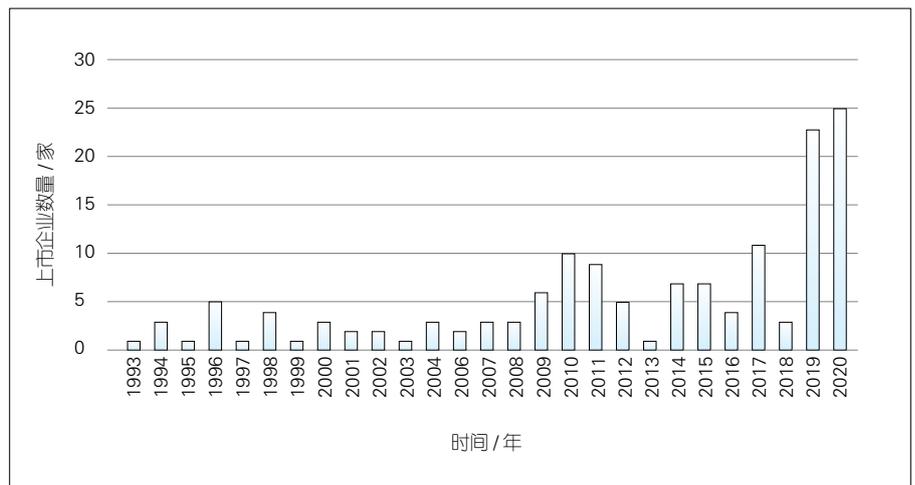
工业互联网发展水平与制造业和信息化发展水平、要素市场的资源配

置能力、资金人才要素的保障能力等密切相关。这一特点在中国东部经济发达地区表现得尤为明显。工业互联网产业联盟发布的《中国工业互联网发展成效评估报告》也指出，中国工业互联网发展整体存在“东强西弱”的格局。对工业互联网领域投融资活动的分析，也能够印证这一点。目前，上市企业和初创企业主要集中在东部经济发达地区，并且占比超过七成。这主要得益于：(1) 相关地区的产业基础好，企业转型发展的意愿和积极性较高；(2) 当地主管部门的重视程度很高。图 5 给出了中国主要省市工业互联网初创企业的融资事件数量。值

得注意的是，北京、广东、上海、江苏不仅是工业互联网企业活动中最为活跃的省市，还是国家区域一体化重点战略的核心省市。这些省市对周边地区发展的赋能带动作用不断凸显。由此可见，工业互联网发展已经呈现出明显的集群化发展的趋势。以长三角地区为例，从获得融资的创投企业数量上看，尽管上海、江苏、浙江单独一省(市)的数量仍不如北京和广东，但与京粤两地在区域内的绝对主导地位相比，长三角地区各省市之间工业互联网创业创新活动的活跃程度相差不大。2020 年年初，江苏、浙江、安徽、上海三省一市签署战略协议，着



▲图 3 2020 年 1—9 月中国工业互联网初创企业融资事件数量



▲图 4 中国工业互联网企业上市年份及数量（截至 2020 年 9 月 30 日）

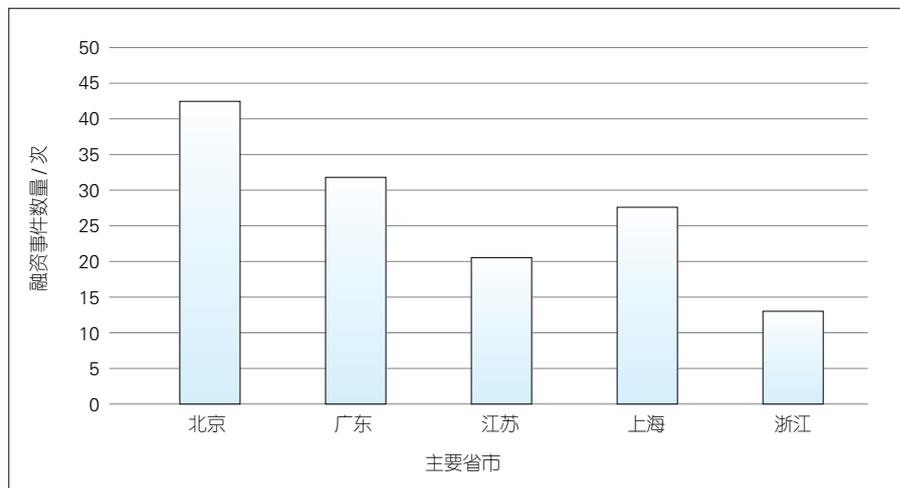
力推动长三角工业互联网一体化发展。随着金融市场的不断开放，长三角地区的各类优势必然会不断强化，中国工业互联网发展高地的地位也将进一步夯实。

(3) “明星企业”的融资能力不断增强。

随着工业互联网创业创新活动的日趋活跃和资本关注度水平的不断提升，一批“明星企业”逐渐涌现，企业融资能力持续增强。2019年，三一集团孵化的树根互联公司获得了5亿元的B轮融资，创下工业互联网企业融资金额的最高水平。2020年以来，一些“明星企业”实现上市。例如，作为工业互联网安全领域的行业龙头，奇安信于2020年7月22日在科创板首次公开募股（IPO），上市当日累计融资超过50亿元。与此同时，一些新的“明星企业”也正在涌现，如表1所示。例如：海尔孵化的卡奥斯物联在已累计获得11.5亿元融资，其中A轮即获得9.5亿元，创下了工业互联网企业A轮融资的新纪录；浪潮云在2020年3月和8月获得了超过2亿元的融资。业界普遍认为，工业互联网是最有可能诞生“独角兽”企业的领域之一。

(4) 不同类型的投资机构关注的领域各有侧重。

随着工业互联网热度的不断提升，各种类型的投资机构也开始进入这一领域。与早年的观望态度相比，2018年“工业富联”30多天快速上市的事件，开始让更多的资本方关注并进入这一领域。2019年以来，大型的投资机构都开始在相关领域进行布局，例如红杉资本中国基金、腾讯投资、国际数据集团（IDG）资本等。一些原本活跃于智能制造的中小型投资机构也将投资范围延伸至工业互联网领域，例如金沙江创投、达晨资本、源码资



▲图5 2020年1—9月中国主要省市工业互联网初创企业融资事件数量

▼表1 2020年1—9月获得两轮及以上融资的企业案例

公司	交易轮次	企业类型	融资时间	金额规模
卡奥斯物联	A轮	平台企业	2020年4月1日	9.5亿元
	A+轮		2020年7月28日	2亿元
浪潮云	C轮	平台企业	2020年3月17日	亿元及以上
	C+轮		2020年8月31日	1.5亿元
长扬科技	B轮	安全企业	2020年4月15日	/
	C轮		2020年8月6日	1.5亿元
六方云	B轮	安全企业	2020年4月21日	数千万元
	B+轮		2020年7月17日	

本等。此外，一些政府投资产业基金也开始布局工业互联网，例如中国工业互联网产业基金、中国国有资本风险投资基金等。目前，市场中对工业互联网领域进行布局的各类投资机构数量已超过100家，不同机构间的投资逻辑也存在差异。对于风险投资，由于具有资金、人才等方面的综合优势，大型机构在工业互联网全领域都展开了积极布局，例如红杉资本中国基金、腾讯投资、IDG资本；中小型的机构则更加聚焦自身更加熟悉的领域，例如，达晨资本重点投资工业软件，金沙江资本主要偏向智能制造等。对于产业投资，一些大型龙头企业综合考虑到各自在未来产业的布局、承担的战略任务目标等因素，主要围绕相关业务或产业链进行布局，纷纷成立了投资公司，通过资本运作的方式扩展

业务版图和提升在产业生态中的位置。

4 投融资活动折射出的问题

通过对工业互联网整体投融资情况的分析，我们发现了中国产业发展过程中出现的一些现象和问题。

(1) 各地区之间“不均衡”的现象普遍存在。

正如上文所述，工业互联网投融资活动呈现出明显的“不平衡”现象。东部地区企业的融资活动比较活跃。除四川和重庆外，西部地区企业的融资能力和创业创新水平明显处于弱势。这种“不均衡”属于正常现象，这是因为工业互联网的发展本身就是经济和发展水平的一种客观反映。从供给侧看，工业互联网的创新发展需要依靠龙头企业的牵引来实现。京沪粤等省市在漫长的历史演进过程中，

形成了众多产业规模大、资源配置能力强、要素保证程度高的龙头企业，自然具有先发优势。从需求侧看，由于经济活跃水平更高、行业涵盖的范围更广，很多企业尤其是中小企业能够首先感受到最前沿科技革命和产业变革带来的冲击，因此企业接受新兴技术的渠道更加畅通、意愿更加强烈。这为工业互联网的蓬勃发展创造出优越条件。尽管这在当前发展阶段属于正常，但地区间“不均衡”的现象要引起重视。持续提升中西部地区的创业创新水平，应成为下一步工业互联网发展的重要工作之一。

(2) 短板领域的创业创新水平仍然不够活跃。

由于工业互联网是制造业和新一代信息技术深度融合的产物，具有极强的融合属性，在兼具相关领域的发展优势时，也自然地“继承”了其发展的短板。以工业软件及 APP 为例，长期以来，中国工业软件尤其是高端软件主要依靠进口。国内市场的占有率靠前的企业产品主要以国外巨头厂商的产品为主。这些巨头企业的产品由于经过了数十年的发展，不仅功能完备，而且操作便捷，极易使企业形成使用“惯性”。这种“惯性”也在工业互联网的投融资活动中也存在。通过对 300 余家创业企业的分类分析，我们发现，从事工业软件及 APP 产品创业的企业仅占 6.3%，是 7 大领域中除网络与标识外，创新最不活跃的领域。我们认为，除了“惯性”导致新产品的市场前景不明之外，安全可靠的工业软件及 APP 产品的产生

均需要较大规模的资金投入和较长时间的试验验证以及演进升级。这些都使得企业在进入工业软件及 APP 行业时，面临着较高的门槛。因此，如何进一步激发在工业软件及 APP 领域的创新活力，也是下一步工业互联网发展的重点工作。

(3) 资金供需信息不对称的问题仍然普遍存在。

在从事工业互联网投融资相关工作的过程中，通过对大量的企业和投资机构的调研，我们发现，信息不对称会导致资源配置不及时和低效率问题。虽然一些企业拥有竞争力比较强的产品，但是由于对工业互联网的了解程度仍然不高、叠加工业互联网短期的市场回报率不明朗等因素，想要获得融资的工业互联网企业往往无法匹配到专业化的投融资机构。而对于投融资机构来说，由于此前重点投向 2C 领域，几乎不涉及 2B 领域产业链上的相关企业，在寻找投资标的时，“广撒网”的现象十分突出。因此，如何提升资金供需双方的匹配水平，也是下一步工作的重点。

5 结束语

通过对中国上市企业和非上市企业投融资活动的综合分析，我们可以发现，在当前资本市场中，工业互联网是各方资本关注的重点领域之一。自 2020 年 1 月以来，虽然受到新冠疫情的影响，中国工业互联网领域的投融资活动强度有所减弱，但是随着中国经济的逐渐复苏，上市工业互联网企业的数量正在逐渐增加，非上市企

业的创投活动强度也有所回升。通过对投融资活动的分析，我们发现中国工业互联网的发展仍然存在一些短板问题，例如创新活力不强、资金供需信息不对称等。整体上看，中国工业互联网蓬勃发展的局面已经形成。在未来，中国要继续加强新型基础设施建设、大力推广行业应用、着力突破核心技术短板等，也要更加重视产业生态的建设，还要吸引更多的金融机构加入到产业生态中，以加快形成可持续发展能力。

参考文献

- [1] 中国信息通信研究院. 工业互联网产业经济发展报告(2020年) [R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2020
- [2] 工业互联网产业联盟. 中国工业互联网投融资报告(2019年) [R]. 北京: 工业互联网产业联盟, 2020
- [3] 中国信息通信研究院. 2020年上半年中国工业互联网投融资整体情况 [R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2020

作者简介



王欣怡，中国信息通信研究院政策与经济研究所经济师；主要研究领域为工业互联网相关产业政策。



肖荣美，中国信息通信研究院政策与经济研究所政策研究部主任、高级工程师；主要从事工业互联网、数字化转型等方面的研究工作。



5G 室内分布：数字化转型之道

5G Indoor Distribution System: the Way of Digitalized Transformation

徐法禄 / XU Falu

(中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202006010

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20201125.1725.004.html>

网络出版日期: 2020-11-26

收稿日期: 2020-08-16

摘要: 室内分布向数字化转型已经成为中国运营商的共识。针对运营商在 5G 室内建设过程中的痛点, 详细分析了两种主流 5G 室内分布方案: 5G 分布式天线系统 (DAS) 和 5G 数字室内分布。通过深入探讨每种方案的适用场景, 认为数字室分在 5G 室内分布领域拥有巨大的应用前景。最后展望了 5G 室内分布系统的演进。

关键词: 5G; 室内覆盖; 数字室分; DAS; 2.1 GHz 重耕

Abstract: The digitalized transformation for indoor coverage has become the general consensus of operators in China. According to the pain points of operators in the process of 5G indoor construction, two main solutions are analyzed in detail: 5G distributed antenna system (DAS) and 5G indoor digital system. Based on the discussion on the scenarios of each solution, it is considered that indoor digital system has a great application prospect in 5G indoor distribution field. Moreover, the evolution of 5G indoor distribution system is pointed out in the end.

Keywords: 5G; indoor coverage; indoor distribution system; DAS; 2.1 GHz refarming

1 5G 室内覆盖的需求和挑战

随着 5G 新基建的到来, 5G 建设进入了高峰期^[1-2]。其中, 室内覆盖是 5G 建设的重点: 据业界预测, 在 5G 时代约 85% 的应用将发生在室内场景。作为 5G 业务的主战场, 室内覆盖不仅是运营商的核心竞争力之一, 还是运营商管道增值的极佳切入点。室内覆盖有着自身独特的特点及需求, 具体包括:

(1) 业务类型多样化。

5G 室内业务包括移动互联网和移动物联网两大类。这两类业务可以进一步细分, 具体如表 1 所示^[3]。相应地, 多样化的 5G 室内业务具有差异化的指标需求, 这对网络能力提出了不同的要求。通常, 部署一套室内网络需要满足多样化的业务指标。

(2) 部署场景多样化。

室内部署场景具有多样化的特征: 既有交通枢纽、体育场馆、大型商场等空间开阔的高热场景, 又有高端酒店、写字楼、学校宿舍等多隔断的场景; 既有居民楼等普通场景, 又有地铁、隧道等特殊场景。因此, 室内覆盖的设备需要满足各种场景的需求, 并且具备易安装、方便部署的特点。

(3) 频谱带宽多样化。

截至目前, 通信技术已经发展到

第 5 代, 同时主流运营商存在“四世同堂”的情况: 拥有多个频段, 开通多种制式。以中国市场为例, 3 大电信运营商的频谱资源分布在各个频段。当前 5G 频谱资源分配如下:

- 中国电信和中国联通 (简称“电联”) 频谱分配: 3 300~3 600 MHz 共 300 MHz 的带宽。3 300~3 400 MHz 为电联与中国广电共享, 3 400~3 500 MHz 分配给电信, 3 500~3 600 MHz 分配给联通。对于电联而言, 5G 室分至少需

▼表 1 5G 室内典型业务分类

业务类型	业务细分	说明
移动互联网	消息类	5G 消息
	交互类	增强现实 (AR)、云桌面、在线游戏
	会话类	高清视频会议、虚拟现实 (VR)、全景直播
	传输类	云存储
移动物联网	流媒体类	4 K、8 K、8 K (3D)
	控制类	智能制造、远程医疗、智慧仓储等
	采集类	视频监控、智能家居、远程抄表等

要支持 200 MHz 的带宽（优选支持 300 MHz 的带宽）。

- 中国移动的频谱分配：包括在 2 515~2 675 MHz D 频段范围内共 160 MHz 的带宽，以及在 4.9 GHz 频段 4 800~4 960 MHz 共 160 MHz 的带宽。因此，中国移动的设备需要在 2.6 GHz 频段与 4.9 GHz 频段分别支持 160 MHz 的带宽。

具体到室内部署时，运营商需要考虑两种类型的设备：对于已经部署了 3G/4G 室分的建筑，只需要增加 5G 频段的室分部署，可采用 5G 单模的设备；对于新盖的建筑，以前没有部署过 3G/4G 室分，室内需要同时部署多个频段，可采用 3G/4G/5G 多模的设备。其中，后一种场景对设备与工程有更高的要求，即要求一套设备一次部署就可以满足需求。

（4）运营维护智能化。

信息通信技术（ICT）的融合已经成为潮流。5G 时代人工智能（AI）对网络赋能。运营技术（OT）与 ICT 的融合成为新的趋势。具体到室内覆盖时，需要具备可视化运维的能力：

- 端到端可监控：室内覆盖设备各级节点可监控，发生异常时会及时报警；

- 按建筑物管理：室内网络拓扑连接可视化，性能指标精细化；

- 能力开放：可提供各种应用程序接口（API）接口，开放给第三方定制各种运维功能。

（5）综合成本最优化。

5G 基建适度超前，新的业务模式还在不断探索中。在每用户平均收入（ARPU）值没有明显提升的背景下，先行建设的网络需要在满足市场需求的前提下做到成本最优：总体成本中的资本支出（CAPEX）包括设备成本、设计成本和施工成本，而运营成本（OPEX）包括运维人力成本和电费。

对于各种场景，运营商需要综合考虑场景价值和总拥有成本（TCO）选择最优的解决方案。

4G 时代的电费支出在运营商网络 OPEX 中占比较大。5G 带宽增加，使设备对应的功耗也有一定幅度的提升，因此需要引入智能化的节能手段使节能效果达到最优。

2 5G 室分方案

目前成熟的 5G 室分方案包括 5G 分布式天线系统（DAS）与 5G 数字室分。经过通信行业几十年的发展，运营商积累了庞大的存量 DAS 系统。利旧 DAS 完成室内 5G 覆盖是最经济的方案。而对于新建场景，数字室分则逐渐成为主流。下面我们将分别介绍这两种方案。

2.1 5G DAS

从 2G 时代开始，DAS 室分是室内覆盖建设的主流方案。DAS 具有产业链成熟、价格适中的特点，在 2G/3G 时代深受运营商的青睐。2G/3G 时代用户的业务以语音为主，同时有少量的数据业务。由于数据业务话务量不高，单路 DAS 就可以匹配用户的

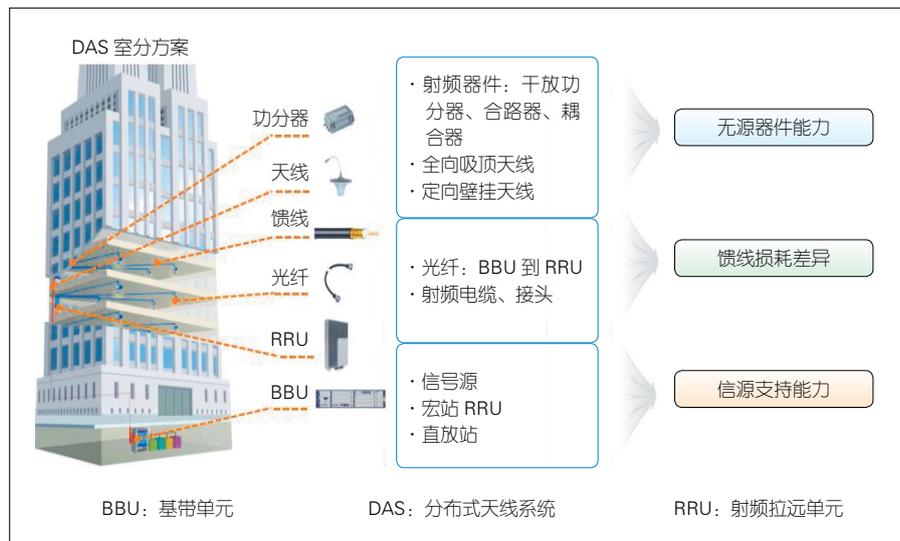
需求。

到了 4G 时代，用户业务演变为以数据业务为主。由于中国市场竞争激烈，运营商提前结束了“流量收入红利”。相继推出的不限流量套餐，使布置在话务量偏高的建筑内的单路 DAS 显得很吃力，急需扩容改造。然而，将单路 DAS 改造为双路 DAS 的工程非常复杂，同时链路不平衡会导致多输入多输出（MIMO）性能难以保证。在话务量偏高的区域（机场、火车站、学校、医院等），运营商倾向进行数字化改造，部署 4G 数字室分。

2.1.1 5G DAS 的挑战^[4-7]

5G 用户设备（UE）支持 2T4R（指 2 发射通道、4 接收通道），下行最大支持四流接收。在高话务场景下，室内覆盖需要给 UE 提供四流数据，但是四路 DAS 在工程施工上非常复杂，4 收发通道（TR）MIMO 难以保证。实际落地时，DAS 以单路或双路为主，多用于中低流量的场景。

在建设 5G DAS 室分时，需要考虑 3 个方面的能力：信源支持能力、馈线损耗差异和无源器件能力，如图 1 所示。



▲图 1 建设 5G DAS 时的能力评估维度

存量 DAS 网络的无源器件（功分器、耦合器、合路器、室分天线等）支持的频段范围是 800 MHz~2.7 GHz。3 大运营商的 5G DAS 分析如表 2 所示。

对于电联场景，3.5 GHz 频段无法利用存量的 DAS 无源设备。如果采用 DAS 部署 5G，就需要新建一套 DAS 系统，并且要采用新的无源器件支持 3.5 GHz 频段。由于新建双路 DAS 工程复杂，3.5 GHz 馈线损耗高，所需室分天线点位较多，以及建设成本偏高，因此不建议电联采用 DAS 来建设 5G 室分。

由于主流 5G 的频段是 2.6 GHz，因此中国移动可以利用旧有室分无源器件，在中低容量场景中可采用增加 2.6 GHz 信源的方法部署室内 5G。已有室分大部分是单独 DAS，不能体现 5G 大容量多通道的优势。中兴通讯独创的多通道联合收发技术，可在不改变传统 DAS 系统网络架构的前提下，通过信源改造的方式快速实现单路 DAS 双流、双路 DAS 四流的效果，大大提升了传统 DAS 网络的性能。2.6 GHz 多通道联合收发技术对于有存量 DAS 的低价值场景来说是一个优选方案。

2.1.2 DAS 多通道联合收发提升网络容量

根据现有 DAS 的部署情况，如图 2 所示，多通道联合收发技术可以应用于以下 3 类典型场景：

（1）跨楼层 - 双流实现四流：

现有 DAS 已经部署双路，并且具备支持 2×2 MIMO 的能力。此场景可以实现在上下楼层重叠覆盖区域组成支持 4×4 MIMO 的网络；

（2）跨楼层 - 单流实现双流：

现有 DAS 仅部署单路。此场景可以实现在上下楼层重叠覆盖区域组成支持 2×2 MIMO 的网络；

（3）同楼层 - 双流实现四流：

现有 DAS 有多个运营商分别部署双路，

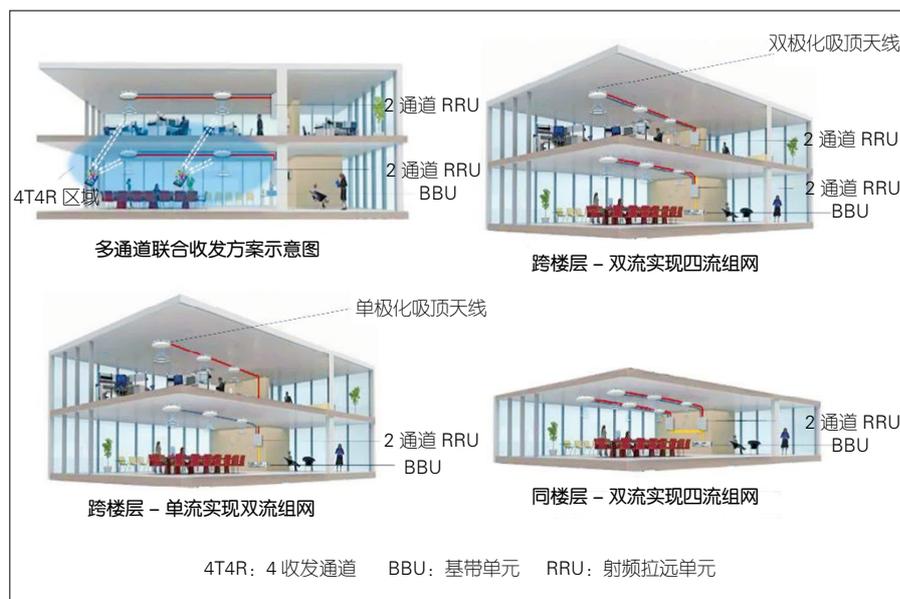
并且可被用于共享。此场景可以实现同楼层重叠覆盖区域组成支持 4×4 MIMO 的网络。

多通道收发技术的容量增益与楼层间隔度密切相关。实测结果显示，如表 3 所示，对于跨楼层 - 双流实现四流的场景，随着隔离度的增加，速率、RANK（指矩阵的秩）增益逐渐下降。因此，我们建议，DAS 多通道联合技术可应用于楼层隔离度小于 30 dB 的部署环境。

▼表 2 中国 5G DAS 器件能力评估

运营商	频段 / GHz	信源支持	无源器件	馈线损耗	采用 DAS 建设 5G
中国移动	2.6	支持	可利用	低	适用
	4.9	支持	不可利用	很高	不适用
中国电信和 中国联通	3.5	支持	不可利用 有可用器件 价格偏高	高	不建议

DAS：分布式天线系统



▲图 2 多通道联合接收的典型场景

▼表 3 不同隔离度下跨楼层 - 双流实现四流的性能提升效果

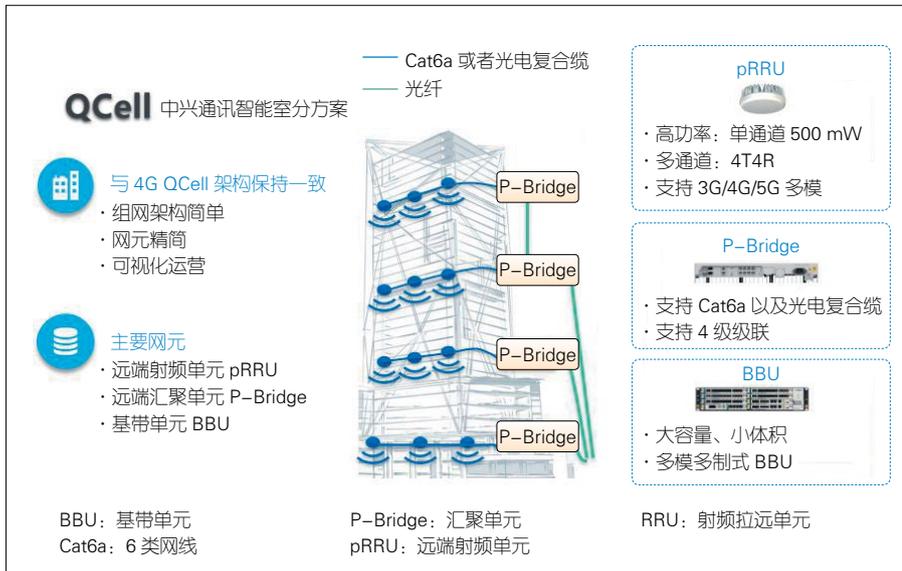
隔离度 / dB	对应场景	下行路测速率提升 / %	下行定点速率提升 / %	RANK 提升 / %
0	同楼层	40	56	97
10	楼层隔断低穿损	23	36	59
20	楼层隔断中穿损	15	22	52
30	楼层隔断高穿损		无明显增益	

RANK：指矩阵的秩

2.2 数字室分

数字室分在 4G 时代崭露头角并实现了规模部署。目前，主流设备商都支持数字室分，如中兴通讯的 QCell、华为的 LampSite 和爱立信的 Dot 等^[8]。

数字室分采用三级架构。如图 3 所示，以中兴通讯 QCell 为例，QCell 由基带单元（BBU）、汇聚单元 pBridge（PB）和远端射频单元（pRRU）组成。其中，BBU 实现多模基带及多



▲图 3 中兴通讯 QCell 智能室分方案典型架构

模协议栈功能；PB 对 pRRU 供电，同时通过对多路 pRRUIQ（IQ 指通信调制的 I 路数据和 Q 路数据）数据求和来实现小区合并功能；pRRU 实现 RRU 功能，且发射功率为毫瓦级。

数字室分具备 DAS 无法比拟的优势，具体包括：

(1) 部署快捷。与 DAS 系统采用的信源、合路器、耦合器、馈线、小天线的多级架构相比，数字室分只有 BBU-PB-pRRU 三级架构。此外，用光纤和网线替代笨重的馈线，极大地降低了部署的工程量，同时缩短了施工的时间。

(2) 弹性容量。DAS 信源容量固定，并且一个信源通常配置一个或两个逻辑小区。数字室分则采用独特的小区合并技术，其一个光链路下最大 4 级 PB 相连的若干个 pRRU 合并成一个逻辑小区，并可根据话务情况弹性改变小区数：当用户少、话务量低时，最大可将 32 个 pRRU 合并成一个小小区；当话务量高时，可将少数几个（最少一个）pRRU 合并成一个逻辑小区。

(3) 全链路可监控。DAS 采用无源器件部署室分网络，器件损坏时

无法被及时监控到，比较影响用户体验。数字室分的各级网元 BBU-PB-pRRU 是有源设备，可通过告警、诊断等功能实时监控设备状态。

(4) 多频多模。pRRU 实现 RRU 的功能。由于功率是毫瓦级，pRRU 可以在 2.5 L 的体积内支持运营商的多个频段，并且每个频段可开通不同制式。

(5) 多通道 MIMO。对于 DAS 系统，如果要支持 4TR MIMO，那么每个点位均需要部署四路馈线。这意味着工程将会极其复杂，同时四流的效果也很难保证。pRRU 集成 4TR 通道，同时采用一根光纤与 PB 相连，可轻松实现 4TR MIMO 功能。

数字室分在 4G 时代已经成为规模部署的室分方案。目前，传统的 DAS 厂商正在逐步向数字化转型，并且推出了数字室分产品。可以预见，数字室分在 5G 时代将逐渐成为主流的室分方案。这里，我们以中兴通讯的 QCell 为例，探讨数字室分涉及的关键技术。

2.2.1 多运营商共享

多运营商共享在 5G 时代成为一个

强需求。这要求一个 pRRU 能支持多个运营商的频段。以中国电联共享为例，pRRU 需要支持 3 400~3 600 MHz 的 200 MHz 带宽。如果要支持 3 300~3 400 MHz，那么 pRRU 的能力需要进一步提升到 300 MHz 带宽。具体来说，共享场景需要以下几种规格：

- 5G 单模 200 MHz：用于电联各 100 MHz 独立载波方式共享场景；
- 5G 单模 300 MHz：用于电联各 100 MHz 独立载波共享，同时有支持 3 300~3 400 MHz 带宽的潜在需求；
- 多模 200 MHz：用于新建场景支持多模，电联各 100 MHz 独立载波共享；
- 多模 300 MHz：用于新建场景支持多模，电联各 100 MHz 独立载波共享，同时有支持 3 300~3 400 MHz 带宽的潜在需求。

2.2.2 精准匹配行业应用

5G 行业应用逐步升温，行业应用中室内场景占据了半壁江山。中国移动针对 5G 行业定义了“优享”“专享”与“尊享”3 种模式，每种模式对应了不同的基础网络能力与增值能力，具体如图 4 所示。

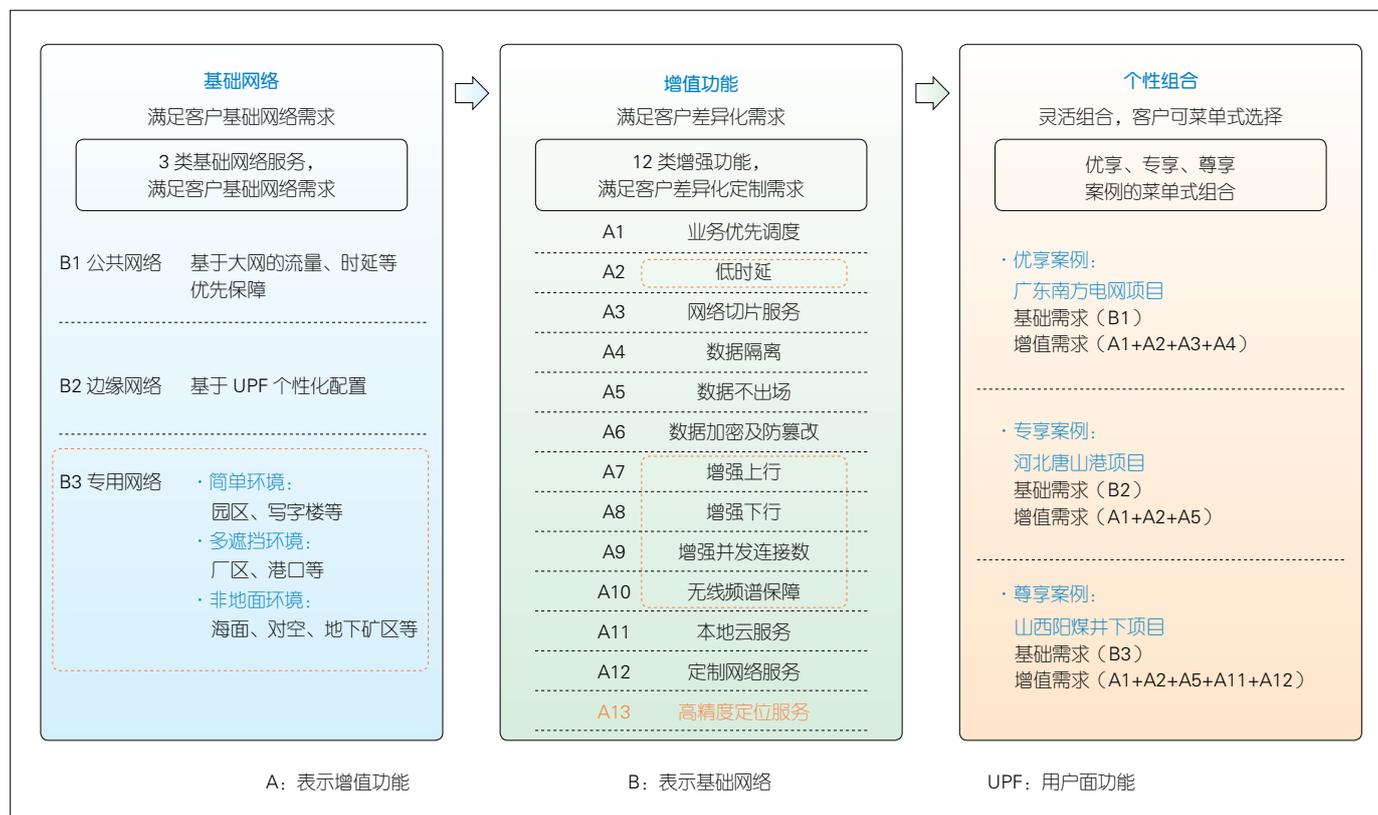
在具体到 5G 室内分布时，行业应用要求的功能主要有容量增强、高精度定位等。由于 DAS 已经不能满足这些需求，目前只能采用数字室分。

2.2.2.1 容量增强

行业应用场景对带宽有更高的需求。此时可采用以下方式全面提升上下行容量。

(1) 上行带宽增强。

1D3U 帧格式能够给上行分配更多的时隙资源。5G 公网主要有 2.5 ms 双周期和 5 ms 单周期两种帧结构。这两种帧结构给下行分配了更多的时域资源，因此小区下行容量高于上行。



▲图4 5G行业应用的基础网络 - 增值功能 - 个性组合架构

而行业应用可能需要上行有更多的时域资源。这类场景可采用 2.5 ms 单周期的 DSUUU (1D3U) 帧格式。

(2) 下行带宽增强。

虚拟 8TR 可增强下行带宽。射频单元在硬件上最大只支持 4TR。部分 5G 终端，如客户前置设备 (CPE)，支持 8 根接收天线。两个射频单元的覆盖重叠区可以支持 8 通道的下行数据发送。

(3) 上下行带宽增强。

载波聚合 (CA) 可同时提高上行与下行带宽。主流运营商通常有多个新空口 (NR) 频段，并且在同一个频段可能会存在超过 100 MHz 的连续带宽。可开通同频内多个 NR 载波 CA 以及不同频段间载波 CA，以提高上行与下行带宽。

(4) 区域面积容量增强^[9]。

当采用 CA 和虚拟 8TR 都无法满

足场景的容量需求时，可以考虑采取小区分裂（极限情况下是一个 pRRU 组成一个逻辑小区）的方式在该区域部署更多的小区，提供更多容量。

随着分裂的小区数增加，小区之间同频干扰的程度也会增加。由于干扰会降低网络容量，因此可以考虑采用基带合并（超级小区）的方式将多个小区合并成一个逻辑小区，以消除多个小区之间的同频干扰。与此同时，在合并后的逻辑小区中开启空分复用功能，可保证整个区域的容量不会因为基带合并而降低。

2.2.2.2 室内定位

位置信息是未来建设智慧城市的重要组成部分。对于室内场景定位，目前有两种定位方法^[10]：

(1) QCell 设备自身定位。这种方式可基于探测参考信号 (SRS) 测量

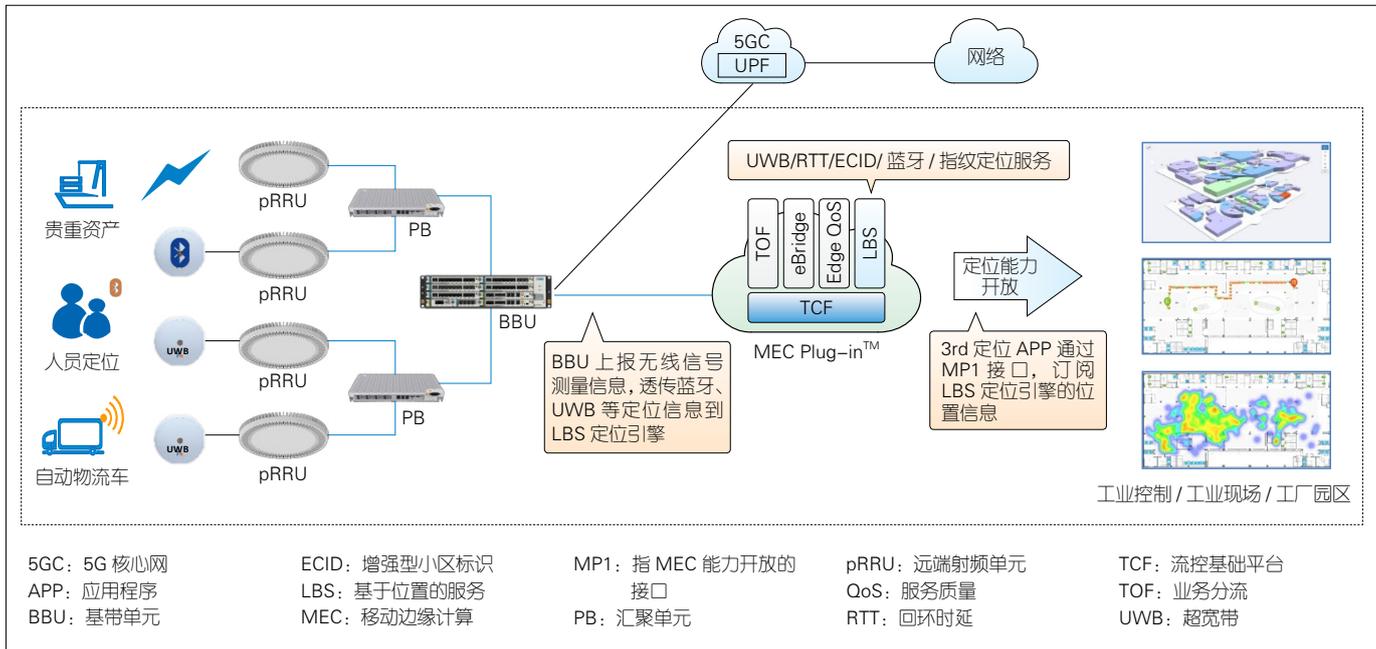
来计算 UE 的位置坐标，不需要借助其他辅助定位设备。该方式的定位精度可达 5 m。

(2) 借助蓝牙 / 超宽带 (UWB) 方式定位。这种方式首先通过 pRRU 的网口连接蓝牙 / UWB 设备，然后借助蓝牙 / UWB 测量对终端进行测量。测量的数据借用 pRRU-PB-BBU 物理链路透传到定位服务器 MEC，最后由 MEC 计算终端位置，如图 5 所示。这种方式的定位精度可达亚米级。

2.2.2.3 能力开放

5G 核心网是基于服务化架构 (SBA) 构建的。能力开放是核心网的一个基本功能。在行业应用中，5G 工业园区需要在无线侧提供能力开放业务。目前，借助 MEC 可以实现能力开放功能^[11-12]。

MEC 能力开发是基于 X86 的虚拟



▲图 5 pRRU 外接蓝牙/UWB 定位架构

化特性设计的。4G BBU 并不支持虚拟化，需要采用独立的硬件来实现 MEC 的功能，这大大提高了 MEC 部署的难度。由于 5G BBU 本身支持网络功能虚拟化（NFV），MEC 可以以软件应用的方式部署在 5G BBU 上。与 4G 时代独立硬件的方式相比，这极大地降低了部署难度，间接推动了 5G 行业应用的发展。

2.2.3 AI 节能

传统节能方式通常是根据话务需求进行分层分级、关断相应设备的，具体包括：

（1）符号级关断。在没有数据发送的符号时隙，及时关闭射频单元的功放。

（2）通道级关断。在小区话务低时，关闭射频单元的部分通道。比如，4TR 射频单元关闭 2 通道，只用 2 通道收发数据。

（3）小区级关断。通过定义网络覆盖层和容量层，在低话务期间关闭容量层小区，只保留覆盖层。

（4）设备级关断。在无话务的时间段，将射频单元下电或进行深度休眠。

传统的节能方式因为无法精准定制差异化策略影响了节能效果。如图 6 所示，AI 节能方案借助 AI 和大数据技术，可以在保证网络关键绩效指标（KPI）不受影响的基础上，使节能效果达到最优，实现能耗与性能的最佳平衡。

（1）场景特征自学习。根据网络拓扑和历史性能数据归纳小区场景特征，并基于场景特征来预测未来各时段的话务量。

（2）节能参数自配置。基于场景特征与话务预测自动编排各种节能策略，同时自动配置各种策略的节能参数。

（3）节能效果自优化。节能策略实施后，根据策略报告（MR）、KPI、用户感知等数据综合评价节能实施后的效果，并且自动对节能参数进行优化调整。节能效果自优化可使网络性能和节能效果达到最优。

2.2.4 可视化运维

与室外 RRU 的形态不同，数字室分的射频头端是在室内密集部署的，这对网络运维提出了更精细化的要求。

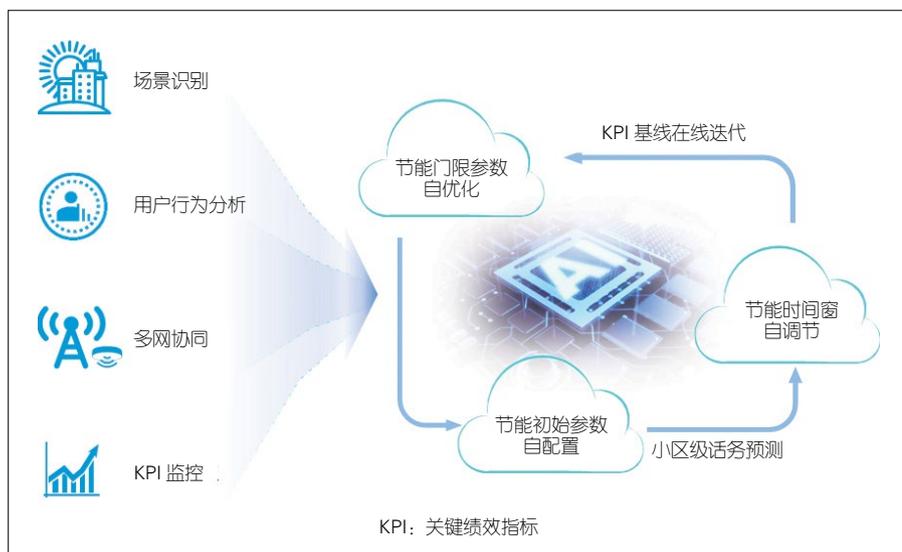
（1）拓扑管理。基于设计院计算机辅助设计（CAD）施工图能够直接生成 2D/3D 建筑物模型，并可按建筑和楼层展示汇聚单元与射频单元的部署位置及连接关系，同时展示小区配置等拓扑信息。

（2）资产管理。按建筑分楼层统计数字室分资产信息。

（3）无线运维。按建筑分楼层生成性能报表、楼层覆盖栅格图并，给出针对性的网络优化建议。

3 频谱重耕

在话务量不低的区域，利旧 DAS 是最经济的 5G 室内部署方案。在中国的电联市场，存量 DAS 系统不支持 3.5 GHz 频段，不能通过更换信源的方式来支持 5G。对于庞大的存量 DAS 系统，在短期内全部改造成数字室分并不现实，只能逐步向数字室分过渡。



▲图 6 人工智能节能策略

▼表 4 n1/n3 支持 NR 各种带宽的路标

NR 频段	SCS/kHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz	40 MHz	50 MHz
n1 (2.1 GHz)	15	R15	R15	R15	R15	R16	R16	R16	R16
	30	/	R15	R15	R15	R16	R16	R16	R16
	60	/	R15	R15	R15	R16	R16	R16	R16
n3 (1.8 GHz)	15	R15	R15	R15	R15	R15	R15	R16	/
	30	/	R15	R15	R15	R15	R15	R16	/
	60	/	R15	R15	R15	R15	R15	R16	/

n1: n1 频段

NR: 新空口

R16: R16 标准

n3: n3 频段

R15: R15 标准

SCS: 子载波间隔

采用 4G 频谱重耕的方式把现有 DAS 用起来也是一种可行的方案。目前主要采用的方式是将 2.1 GHz 频段重耕到 NR。

R15 的终端只支持 2.1 GHz 频段 20 MHz 带宽 NR，因此可以在话务量要求不高的区域部署 2.1 GHz 20 MHz NR DAS（如居民楼、经济型酒店、地下停车场等场景），如表 4 所示。R16 的终端则可以利旧 DAS 开通 2.1 GHz 40 MHz/50 MHz 大带宽的 NR。由于 2.1 GHz 属于频分双工（FDD）频段，40 MHz/50 MHz NR 小区容量和 3.5 GHz 频段 100 MHz NR 小区容量基本相当，可以满足大部分中低容量场景业务需求。因此，2.1 GHz DAS 频段重耕支持 40 MHz/50 MHz NR 可以作为一种主流

的 5G 室内部署方式。

4 结束语

5G 网络赋能各行各业，并推动全社会数字化转型。室内覆盖是 5G 时代的关键战场。在选择 5G 室内室分方案时，应综合考虑目标、需求、成本等多因素，采用多种解决方案来建设高效、经济的室内覆盖网络。

主流 5G 室分部署有 DAS 利旧和数字室分两种。现有 DAS 系统支持的频段为 800 MHz~2.7 GHz。如果 5G 的频谱在这个频段内，那么可以考虑采用更换信源的方式来利旧 DAS。中国移动在现有 DAS 系统上支持 2.6 GHz 频段 160 MHz 带宽。电联的 3.5 GHz 频段无法在现有 DAS 上使用。此时可

考虑采用 2.1 GHz 频谱重耕的方式来利旧 DAS。对于新建和话务量较高的场景，我们建议可直接部署 5G 数字室分。数字室分具有高容量、全链路可监控、成本适中等特点，不仅能够全面满足国际电信联盟（ITU）定义的各种 5G 指标，同时还可以结合 MEC 支撑各种行业应用。随着 5G 的发展，数字室分将会在 5G 室内分布领域扮演越来越重要的角色。

参考文献

- [1] 李珊, 张春明, 汪卫国. 5G 商用起步, 融合应用蓬勃兴起 [J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(6): 2-7. DOI: 10.12142/ZTETJ.201906001
- [2] 严斌峰, 袁晓静, 胡博. 5G 技术发展与行业应用探讨 [J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(6): 34-41. DOI: 10.12142/ZTETJ.201906006
- [3] 中兴通讯. 5G 室内覆盖白皮书 [EB/OL]. (2020-07)[2020-10-25]. <http://www.199it.com/archives/1088041.html>
- [4] 周玮, 王凤明. 5G 时代室内分布系统发展趋势分析 [J]. 中国新通信, 2018, 20(23): 171. DOI: CNKI:SUN:TXWL.0.2018-23-127
- [5] 于建辉. 5G 网络室内覆盖解决方案的分析 [J]. 中国新通信, 2019, 21(1): 37. DOI: CNKI:SUN:TX-WL.0.2019-01-028
- [6] 舒文琼. 新型数字化室分系统已成中国移动 5G 时代主流 [J]. 通信世界, 2018, (19): 47. DOI: 10.13571/j.cnki.cww.2018.19.027
- [7] 孙胜齐. 5G 网络室分建设思路 [J]. 电子技术与软件工程, 2018, 141(19): 37
- [8] GTI-22ND-W5-5G-MN-07-5G. Small cell solutions utilizing GPP and virtualization aicells_ [Z]. 2018
- [9] 达尔曼, 巴克浮, 舍尔德. 5G NR 标准: 下一代无线通信技术 [M]. 朱怀松, 王剑, 刘阳, 译. 北京: 机械工业出版社, 2019
- [10] 中国移动. 室内定位白皮书 (2020) [EB/OL]. (2020-06-19)[2020-10-25]. <http://www.199it.com/archives/1077558.html>
- [11] 中兴通讯. Common Edge 边缘计算白皮书 [R]. 2019
- [12] 陆平, 李建华, 赵维锋. 5G 在垂直行业中的应用 [J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(1): 67-74. DOI: 10.12142/ZTETJ.201901011

作者简介



徐法祿, 中兴通讯股份有限公司系统产品 MKT 总监, 曾任中兴通讯通信室分 QCell 总监; 拥有 17 年的通信研发和市场经验; 曾获 2019 年深圳市科技进步一等奖、2020 年国家科学技术奖二等奖。



基于REC技术的可调谐半导体激光器

Tunable Semiconductor Laser Based on Reconstruction-Equivalent-Chirp Technique

摘要: 重构-等效啁啾(REC)技术可以灵活、等效地实现各种复杂结构的光栅和对等效光栅布拉格波长的高精度调控。基于REC技术,分别实现了宽波段、窄线宽、低切换时间的3类半导体可调谐激光器。借助高精度波长调控的优势,制备的3类可调谐半导体激光器均实现了良好的性能。

关键词: 半导体激光器;可调谐激光器;REC技术

Abstract: Reconstruction-equivalent-chirp (REC) technique can flexibly and equivalently implement various gratings with complex structures and achieve high-precision control of the grating period. Based on the REC technique, three types of tunable semiconductor lasers are realized with wide-band tuning range, narrow linewidth and low switching time, respectively. With the advantages of high-precision control of the grating period, these tunable semiconductor lasers we prepared have achieved good performance.

Keywords: semiconductor laser; tunable laser; REC technique

陈向飞/CHEN Xiangfei

肖如磊/XIAO Rulei

陆骏/LU Jun

(南京大学,中国 南京 210000)

(Nanjing University, Nanjing 210000, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202006011

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20200415.1902.002.html>

网络出版日期: 2020-04-16

收稿日期: 2020-02-17

半导体激光器具有体积小、功耗低、可靠性高、适合大规模量产等诸多优势,正在逐步成为光子技术中最重要的光源之一。可调谐半导体激光器由于波长灵活可调的特性而得到广泛应用,例如:使用波分复用的光接入网或相干光通信网,需要可调谐激光器来实现灵活的波长配置;光学相干断层扫描成像、光频域反射计或激光气体传感等系统,需要可调谐激光器实现波长扫描来进行相关检测。

可调谐半导体激光器的实现难度主要体现在以下几个方面。首先,可调谐半导体激光器需要实现单波长激光,这意味着它需要具有更精细的波长选择功能的谐振腔,以实现在纵向和横向的单模工作。其次,它的

谐振腔需要具备灵活可调的功能,同时在谐振腔调节的过程中依然保持单模的工作状态。最后,相比于光泵浦的激发方式,虽然电泵浦的半导体激光器仅注入电流就可实现发光,具有易配置、易使用等特点,但是电泵浦结构需要高效率的电致发光,而这对材料的设计与生长都提出了更高的要求。

1 可调谐半导体激光器主要技术

最近几十年,研究者通过构建不同类型的谐振腔调谐方式,实现了多种可调谐半导体激光器。根据谐振腔的集成方式,可调谐半导体激光器可分为分立外腔结构和单片集成腔体结构两大类。其中,分立外腔结构是指将半导体增益结构与外部谐振腔通过空间光学耦合在一起,并通过对外部谐振腔的调节来实现对激光波长的调谐。这里的外部谐振腔通

常包括衍射光栅^[1]、集成化波导谐振腔结构^[2]等。单片集成谐振腔结构类型主要包括分布反馈结构^[3]、分布布拉格反射结构^[4]、V型腔结构^[5]、多通道干涉结构^[6]、集成微电子机械系统^[7]等。

(1) 分立外腔结构可调谐半导体激光器。

最早期的可调谐半导体激光器就是通过分立外腔结构实现的,即通过透镜光学耦合结合衍射光栅来进行波长选择,并通过改变光栅的衍射角度来选择不同的激光波长^[1]。如图1(a)所示,在半导体增益结构的一个解理面上镀上抗反射膜,将一个固定的反射型衍射光栅作为色散元件,通过压电陶瓷控制镜面围绕一个虚支点旋转,使不同波长的1级衍射光在激光光源和外腔镜之间形成振荡,同时使0级衍射光为输出光。外腔镜在改变位置的同时仍能满足相应波

基金项目:国家重点基础研究专项基金(2018YFE0201200、2017YFA0206401、2018YFA0704402、2018YFB2201801)、国家自然科学基金(61975065)

长的相位匹配条件,并使其形成谐振输出,从而实现波长的连续调谐。

随着近年来微加工工艺水平的快速提高,以及硅基、氮化硅基、聚合物基等集成化波导体系的迅速发展,研究者们提出了基于这些材料体系的可调谐腔结构。通过将谐振腔结构与半导体光放大器芯片的耦合,可以实现波长可调谐激光器。如图1(b)所示,首先在半导体光放大器芯片的一个解理面上镀了抗反射膜,同时两个不同半径的微环波导被耦合在一起,并与半导体放大器芯片进行耦合。然后,在这两个微环波导上分别集成一个薄膜电阻加热器^[2],通过改变两个薄膜电阻加热器的电流,即可实现两个微环波导透射谱的偏移。由于这两个微环波导的透射谱具有不同的平均自由程,因此通过透射峰的错位就可以实现宽带的波长调谐范围。该结构在硅、氧化硅、氮化硅或聚合物波导上都可以实现,其调谐范围主要受限于半导体材料的增益谱宽。

由于聚合物具有较大的热光系数或电光系数,改变温度或电压可以对其折射率进行很大的改变,因此在聚合物波导中也可以直接使用布拉格光栅作为外腔来实现宽带可调。如图1(c)所示,通过对-10~70℃聚合物温度的调节可以实现25 nm的波长调谐范围^[8]。

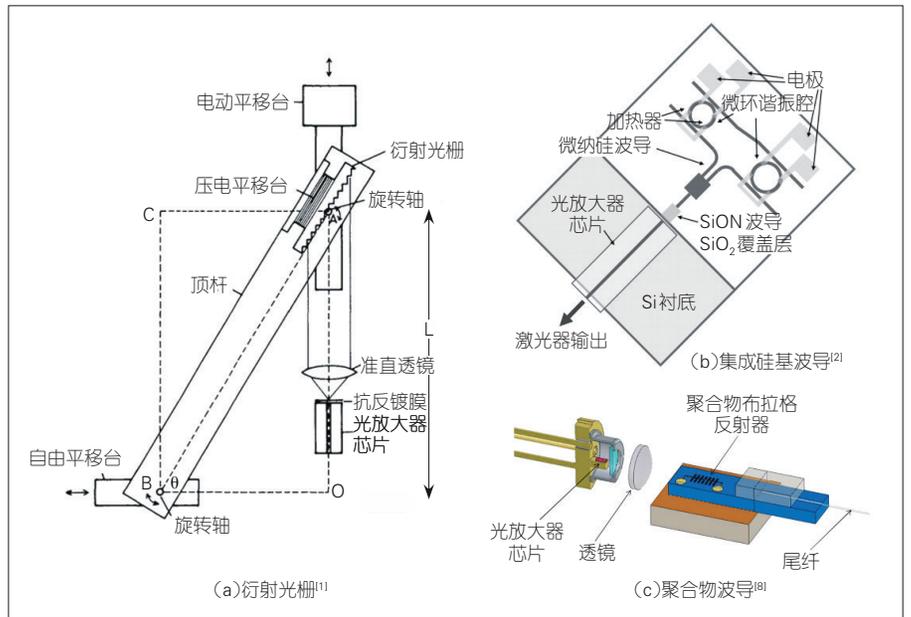
(2) 谐振腔单片集成可调谐激光器。

分布反馈结构(DFB)是指其布拉格光栅谐振腔正好与增益材料在位置上重合。基于DFB结构可以实现良好的单波长激光激射。虽然该激光具有高边模抑制比、高输出功率、良好的直接调制效果等,并已成为目前光通信网络中最常用的光源,但是DFB结构谐振腔难以实现大范

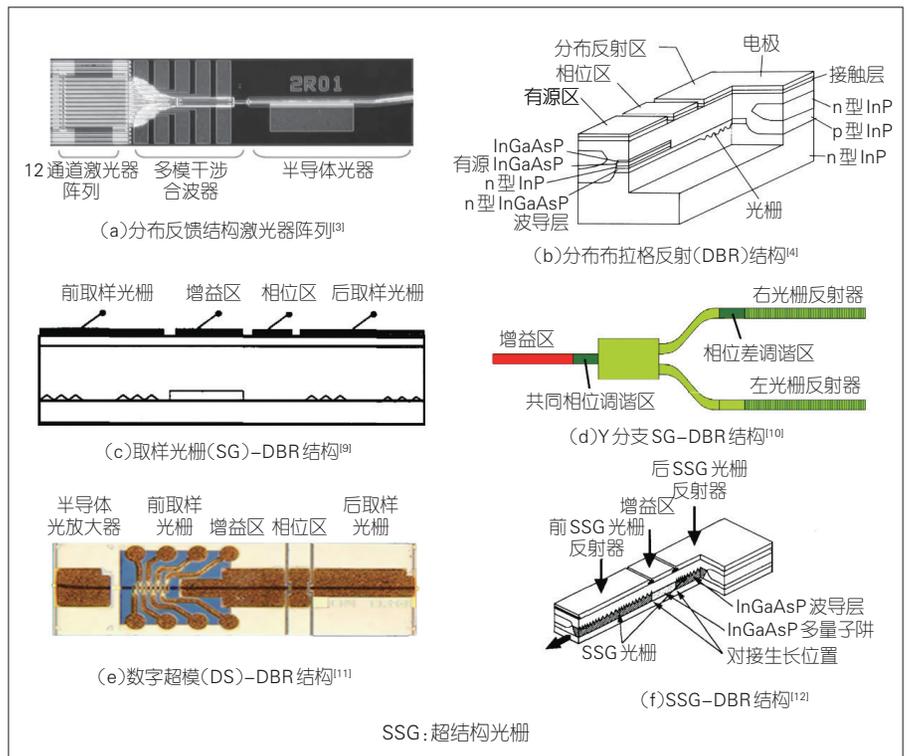
围可调谐功能。为实现基于DFB结构的宽波段可调谐激光器,一种常用方法是集成多波长DFB激光器阵列,即先通过选择阵列中对应波长的激光光源并使其发生激射,再配合上温度调谐装置,最终得到想要的光输

出。如图2(a)所示,通过集成12个不同波长的DFB激光器和1个多模干涉合波结构,结合温度调谐的功能可以实现40 nm的波长调谐范围^[3]。

分布布拉格反射(DBR)结构,是指在激光器有源区的外部集成无源



▲图1 3种外部谐振腔结构



▲图2 几种单片集成谐振腔结构类型

的布拉格光栅反射器,通过改变该光栅结构处的电流调节其布拉格波长,从而改变激光器的输出波长,如图2(b)所示。为获取更良好的单纵模工作特性,通常会在波导中设立一个相位调节区^[4],但仅通过改变无源光栅波长的调谐范围比较有限(通常都小于10 nm)。为增加调谐范围,很多研究者会利用取样光栅结构的宽带梳状谱,即通过改变两个不同周期梳状谱的对齐位置,来实现宽波段的波长可调。图2(c)中^[9]是最早提出的基于取样光栅的DBR结构(SG-DBR),之后通过改变光栅的精细结构或波导的耦合方式,衍生出了多种类似结构,包括图2(d)所示的Y分支波导SG-DBR^[10]、图2(e)所示的DS-DBR^[11]和图2(f)所示的SSG-DBR结构^[12],这几类结构都可以实现大于35 nm的宽波段调谐范围。

除了基于光栅结构的谐振腔结构,也有研究人员提出基于其他结构的谐振腔。例如,一种基于多通道干涉器的谐振腔结构^[6],通过改变不同反射臂的相位差实现波长的选择和大于50 nm的准连续波长调谐。此外,还有一种V型谐振腔结构^[5]被提出,其原理为构建两个不同自由程的法布里-珀罗谐振腔产生的梳状谱,即通过调节相位来选择重合的波长进行激励。该谐振腔结构可以实现40 nm的调谐范围。另外,随着近年来微电子机械系统的成熟发展,在垂直面反射半导体激光器中引入压电材料,通过对外部反射镜的微机械调节,同样可以实现宽带的波长调谐^[7]。

2 重构-等效啁啾技术(REC)技术

REC技术最早是在光纤光栅的

相关研究中被提出,并从2007年开始被用于半导体激光器的制备中。相较主流的加工技术而言,REC技术是一种全新的加工技术^[13-14]。在通信半导体激光器中,精度最高、加工难度最大的部分是波导光栅(其最小尺寸达到0.1 μm),而激光器的波长等主要性能都是由光栅直接决定的。目前主流的加工技术有两种:一种是电子束曝光,即利用聚焦的电子束进行扫描式的曝光形成图案,如图3(a)所示,该技术的优点在于技术灵活、可制作任意复杂图形,缺点在于设备成本高、制备时间长、周期很难控制;另一种是全息曝光,即利用两束光的干涉形成的均匀明暗条纹,从而曝光形成光栅,如图3(b)所示,其优点在于设备便宜、制备时间短、光栅的均匀性非常好,缺点在于结构单一、只能制作均匀光栅、无法满足高端器件的要求。REC技术是基于全息曝光后再加一次普通光刻,能等效实现复杂光栅结构,如图3(c)所示,在具有电子束曝光技术的技术灵活性的同时,还拥有全息曝光方法低成本、制备快和光栅均匀性好的优点。例如,基于REC技术可以实现等效的λ/4相移光栅。具有该光栅的DFB激光器有优异的动态单模特性,能很好地满足可调谐激光器在工作过程中保

持单模的需求。

REC技术是基于取样光栅结构实现的。取样光栅折射率形貌 $\Delta n_s(z)$ 在数学上可以描述为公式(1):

$$\Delta n_s(z) = \frac{1}{2} s(z) \Delta n \exp\left(j \frac{2\pi z}{\Lambda_0}\right) + c.c. \quad (1)$$

其中, $s(z)$ 表示取样结构, Λ_0 表示种子光栅的周期, z 是光栅的轴向坐标, j 是虚数单位, $c.c.$ 表示共轭, Δn 是种子光栅的折射率调制幅度。将均匀取样结构展开为傅里叶级数,如公式(2)所示:

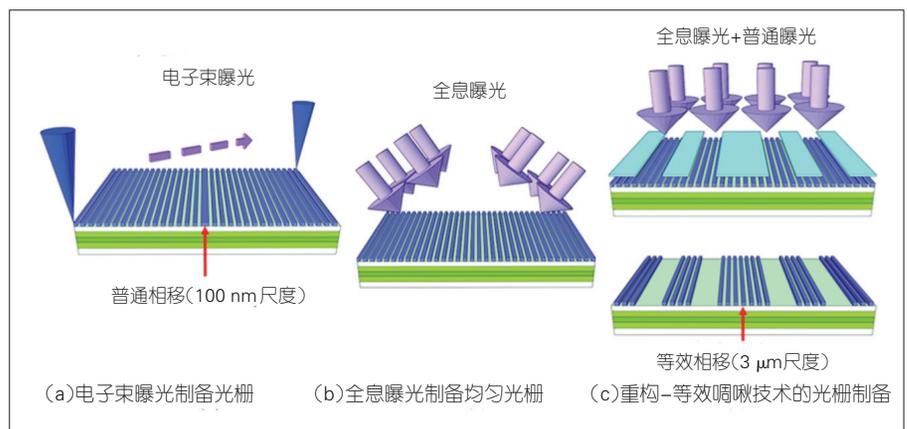
$$s(z) = \sum_m F_m \exp\left(j \frac{2m\pi z}{P}\right) \quad (2)$$

其中, m 是傅里叶级次, F_m 是第 m 级的傅里叶系数。取样光栅可以进一步表述为:

$$\Delta n_s(z) = \sum_m \frac{1}{2} \Delta n F_m \exp\left(j \frac{2m\pi z}{P} + j \frac{2\pi z}{\Lambda_0}\right) + c.c. \quad (3)$$

从公式(3)可以看出,取样光栅是很多级次的傅里叶子光栅的线性叠加。每个级次的子光栅都有特定的光栅周期、初相位以及光栅强度。

如果取样光栅的初相位发生变



▲图3 3种光栅制备技术

化,即 Δz 发生变化,那么公式(3)可以表示为:

$$\Delta n_s(z) = \Delta n \sum_m \frac{1}{2} F_m \exp \left[j \left(2\pi \frac{z}{\Lambda_0} + 2\pi m \frac{z}{P} \right) \right] \exp \left(-j 2\pi m \frac{\Delta z}{P} \right) + c.c. \quad (4)$$

可以看出, Δz 能够改变傅里叶子光栅的初相位。对于第 m 级而言,相关变量为 $\varphi = -2\pi m \frac{\Delta z}{P}$ 。 Δz 与初相位呈线性关系。同理,如果改变取样周期 P ,同样可以改变傅里叶子光栅,也就是说可以改变DFB激光器的激励波长。因为取样周期 P 和傅里叶子光栅周期 Λ_m 有直接的关系,其具体关系根据公式(3)可以得到:

$$\frac{1}{\Lambda_m} = \frac{m}{P} + \frac{1}{\Lambda_0} \quad (5)$$

以-1级子光栅为例,-1级子光栅DFB激光器的波长可表示为:

$$\lambda_{-1} = 2n_{eff}\Lambda_{-1} = 2n_{eff} \frac{P\Lambda_0}{P - \Lambda_0} \quad (6)$$

而-1级子光栅的波长误差与制造工艺中取样光栅的误差关系为:

$$\Delta\lambda_{-1} = -2n_{eff} \cdot \frac{\Lambda_0^2}{P^2} \cdot \Delta P \quad (7)$$

在通常情况下,由于取样光栅周期 P 为微米量级,种子光栅周期 Λ_0 为几百纳米,因此利用REC技术,DFB激光器的波长精度可以比传统工艺提高约两个数量级^[15]。在实际应用中,除了具有加工简单、快速等特点外,REC技术最大的优势在于能够实现对光栅结构的精准控制。 $\lambda/4$ 相移结构在REC技术中的尺度为 $3 \mu\text{m}$ 左右,而在常规结构中只有 100 nm 的尺度。基于REC技术高精度的波长控制能力,我们制备了目前报道数最多

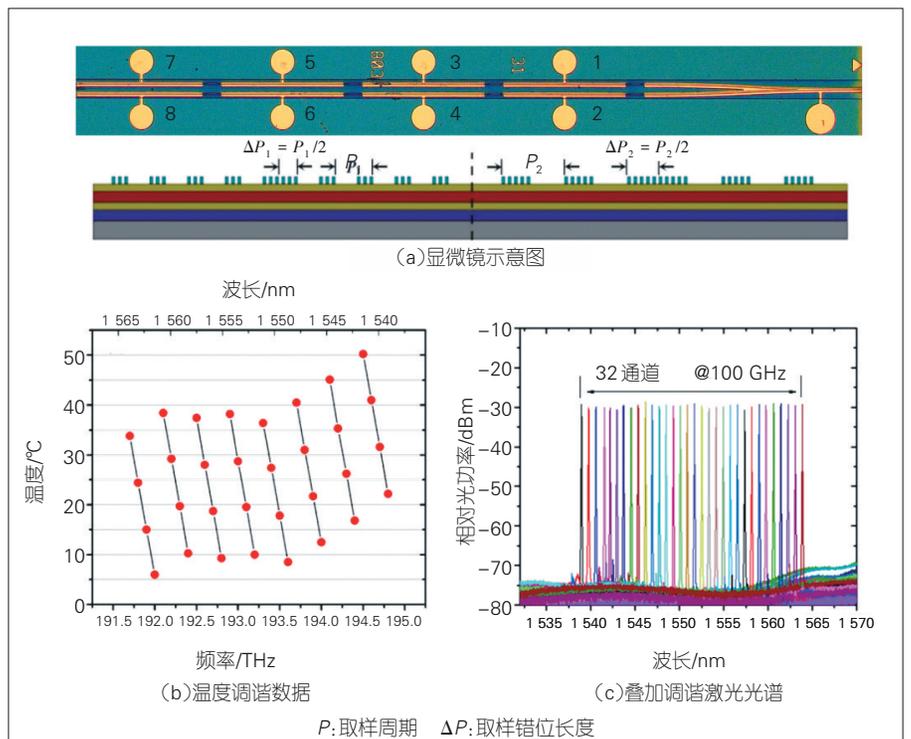
的60波长激光器阵列,并得到非常均匀的波长分布特性,83%的波长偏长在 $\pm 0.2 \text{ nm}$ 范围内^[16]。也正是基于高精度的波长控制能力,我们将REC技术应用与可调谐半导体激光器中,使其在宽波段、窄线宽、快速切换可调谐激光器方面具有特定的性能优势。

3 基于REC技术的宽波段可调谐激光器

与文献[3]类似,基于REC技术的宽波段可调谐激光器也是通过集成多波长DFB激光器阵列的方式来实现。与之不同的是,基于REC技术的多波长激光器阵列具有高精度波长控制的优势,因而可以实现更低的激光器阵列波长间隔,从而大幅降低温度调谐范围,提高激光器整体的良品率。与文献[3]中的并联结构相比,DFB激光器的并联结构由于不同的激光器光栅之间没有相互干扰,可

以得到更优的单模特性。然而,并联结构的合波器会带来较大的损耗,并且该损耗会随着激光器数目的增加而增加。虽然DFB激光器的串联结构可以减少合波器的使用,但是串联结构对光栅周期精度提出了更高的要求。尤其是在相邻激光器波长间隔小的情况下,如果光栅周期的误差过大,则会引起激光器之间较大的串扰。正是因为REC技术具有很高的光栅周期精度控制,我们目前研究的基于REC技术的宽波段可调谐激光器会使用到串联结构。该结构主要包括串联和串并联两种类型。

如图4(a)所示,我们实现了一个串并联结构的可调谐激光器,其中有2根平行的波导通过1个Y分支合波器进行合波,每根波导上集成了4个不同波长的DFB激光器,一共集成了8个均匀波长间隔的DFB激光器^[17]。激光器芯片采用传统的两步金属有机化学气相沉积(MOCVD)工艺制作,使用脊波导结构,在两端镀膜反



▲ 图4 2x4串并联可调谐激光器的结构及性能

射膜。其中,相邻2个波长的激光器被分别设计在2根不同波导上,这样可以有效降低光栅串扰。如图4(b)所示,通过选择激射的激光器进行大致调谐,改变芯片温度进行精细调谐,可以实现32通道100 GHz间隔的调谐范围。其中,每个激光器负责4个通道,整体的波长调谐温度范围为45℃,边模抑制比均大于40 dB。同样地,基于REC技术对波长的高精度控制,我们还实现了激光器芯片的串联结构^[18],如图5所示。我们得到了32通道50 GHz间隔的波长调谐范围,并使该结构保持了良好的单模特性,不同波长的边模抑制比均大于40 dB。

4 基于REC技术的窄线宽可调谐激光器阵列

窄线宽可调谐激光器被广泛应用于相干光通信、水听器、雷达等领域。根据半导体激光器线宽理论的研究报道,半导体激光器线宽的表达式如公式(8)所示。其中, v_g 是材料中光的群速度, h 是普朗克常量, ν 是光频率, g 是阈值增益, n_{sp} 是自发辐射因子, α_m 是谐振腔损耗, P_0 是光功率, α 是线宽展宽因子。可以看出,决定半导体激光器线宽的因素主要在两个方面:一是构成激光器的材料特性,因为材料特性直接影响激光器的阈值增益 g 和线宽展宽因子 α ;二是因为激光器的结构特征,激光器的结构特征会影响谐振腔损耗 α_m 、阈值增益 g 等。

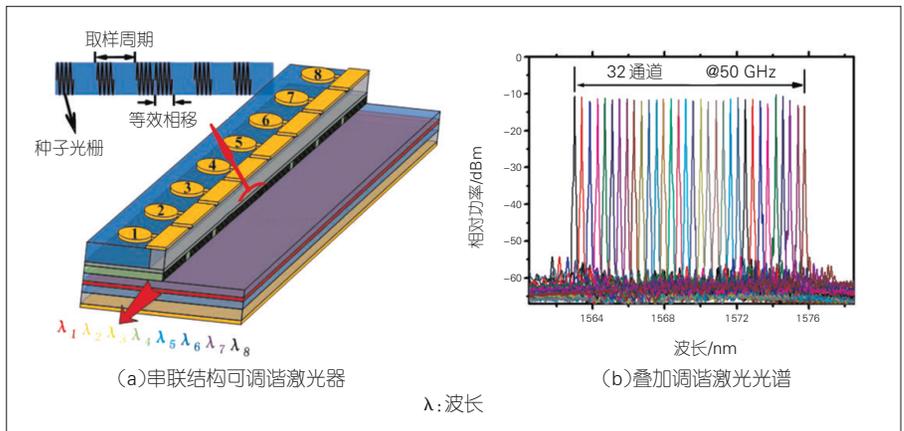
$$\Delta\nu = \frac{v_g^2 h \nu g n_{sp} \alpha_m}{8\pi P_0} (1 + \alpha^2), \quad (8)$$

$$\alpha_m \approx 2\pi^2 / (\kappa^2 L^3). \quad (9)$$

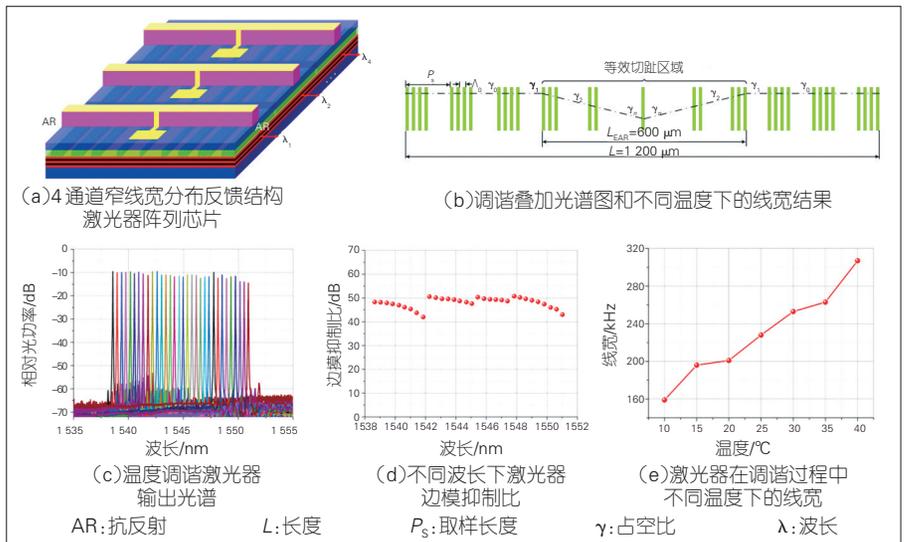
对于DFB激光器而言,其谐振腔损耗满足公式(9)。可以看出,提高

DFB激光器光栅强度,增大DFB激光器的腔长,能够降低DFB激光器的腔内损耗,从而降低DFB激光器的线宽。但是提高 κ 和 L 又会加剧激光器的空间烧孔效应,并降低DFB激光器在大电流注入时的单模特性,使激光器线宽展宽。因此,需要对DFB激光器的光栅结构进行优化以获得窄线宽输出。传统可调谐窄线宽DFB激光器芯片的腔长一般较长,且波导光栅均为具有特殊相移结构的光栅,其制作过程复杂、制造成本较高。基于REC技术正好可以利用低成本的加工方法实现复杂、高精度的光栅结构,十分适合制备可调谐窄线宽激光器芯片。

我们基于REC技术设计了4通道窄线宽DFB激光器阵列^[19],并通过改变温度实现了波长调谐。图6(a)是4通道DFB激光器阵列芯片结构示意图,其中,芯片腔长为1200 μm,4个DFB激光器波长间隔3.2 nm。DFB激光器芯片的光栅是利用REC技术设计的等效内切趾光栅结构,如图6(b)所示。该光栅结构能够有效降低激光器腔内空间烧孔效应,利于激光器线宽的压窄。且该区域位于芯片中间,切趾区域长度为600 μm。等效切趾采用的是改变采样光栅占空比的方式实现的,其占空比的类型为线性,切趾区域两端占空比最大为0.5,切趾区域中心占空比最小为0.3。



▲图5 串联结构可调谐激光器结构及其性能



▲图6 4通道窄线宽分布反馈结构激光器阵列结构及其性能

图6(c)和(d)分别展示了在激光器注入电流为100 mA时,通过温度调谐测得的激光器输出光谱以及不同波长下激光器边模抑制比。通过将激光器的工作温度从10℃调谐到40℃,可得到32通道间隔50 GHz的波长可调谐输出,其波长调谐范围是1 538.58~1 550.92 nm。在调谐过程中激光器的边模抑制比均大于42 dB,保持了较好的单模特性。通过自外差法,我们测得激光器在调谐过程中不同温度下的线宽,具体如图6(e)所示。由测试结果可以看出,低温下激光器线宽更窄。在芯片温度由10℃升高到40℃的过程中,激光器线宽由160 kHz升高到307 kHz,同时保持了窄线宽输出。

的时间在纳秒量级,因此波长调谐的方式也可以达到纳秒量级。虽然这种调谐方式速度快,但对于激光器波长的精准性要求却很高;因此,在设计每个DFB激光器的光栅结构时,可采用能够实现波长间隔精准控制的REC集成激光器阵列技术。激光器芯片的设计思路是设计多波长串并联的DFB半导体激光器芯片。如图7(a)所示,该激光光源将 $m \times n$ 个DFB激光器单片集成在一个芯片上,并通过可编程逻辑控制器(PLC)合束器耦合在同一根光纤内输出。激光器的个数即为光源输出通道数,决定了光源的波长调谐范围。基于串并联DFB激光器阵列芯片,我们开发了8

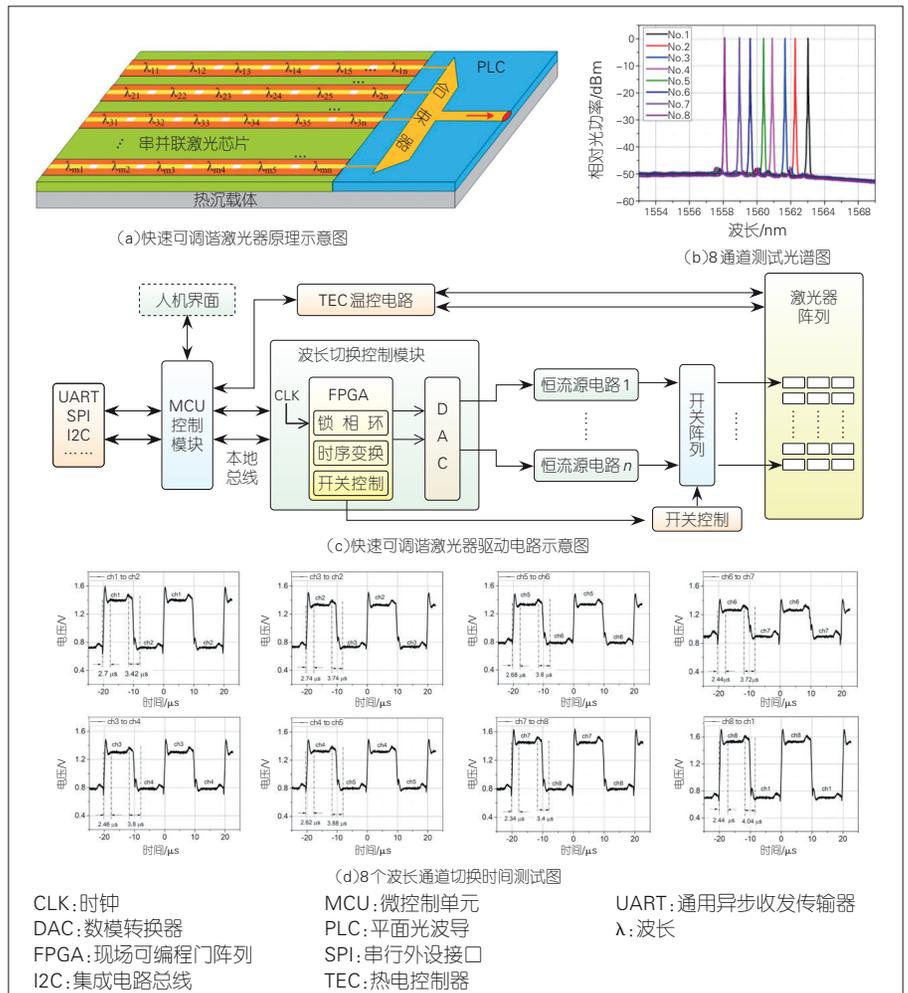
通道快速可调谐激光器模块。8通道激光器光谱如图7(b)所示。由测试结果可以看出,各通道具有较好的单模特性。

对于快速可调谐激光器,驱动控制电路是其关键部分。驱动控制电路的作用包括温度控制、激光器工作电流驱动、波长切换、工作参数通信控制。基于REC技术激光器阵列的快速可调谐激光光源系统及电路实现结构如图7(c)所示。其中,微控制单元(MCU)控制模块提供人机交互接口,或与其他系统互连的控制接口。通过这些接口,MCU模块负责传递各路激光器的波长切换控制、激光工作电流及工作温度等参数,并对信

5 基于REC技术的快速可调谐激光器

不断增长的数据通信迫切需要大型、低时延交换节点来提供高速、大容量、有效的数据交换功能。光交换技术是打破信息交换瓶颈的关键技术。光交换技术有多种方案能够实现,其中一种是基于快速可调谐激光器利用源端波长切换实现的光信息交换^[20]。基于可调谐激光光源和阵列波导光栅路由器的组合的方案,可以形成灵活、大容量的光交换能力。这不仅能够提供大端口数,还可以实现低阻塞和低时延的快速路由;但该方案最大的难题在于很难实现低成本的稳定、快速可调谐激光光源。

要实现半导体激光器的波长调谐,一般采用改变温度或无源区电流的方式,但是这两种方案都存在激光器调谐稳定时间较长的问题。目前最快的调谐方式是对激光器阵列进行开关切换,以实现固定多波长通道之间的快速切换。由于激光器点亮



▲图7 快速可调谐激光器结构及其性能

息进行识别和格式变换,将其转换成波长切换模块、驱动电流模块及热电控制器(TEC)模块所需的数字及模拟控制信号。波长切换控制模块是以现场可编程门阵列(FPGA)为核心实现的。由于快速可调谐激光器波长调谐/切换时间一般在微秒量级甚至是数十纳秒量级,因此波长切换的控制信号须提供比调谐时间更快的上升/下降沿,而且要保持多路控制信号的严格同步。图7(d)是不同通道间波长切换时间测量结果,可以看出,激光器波长调谐时间为4 μs 左右。

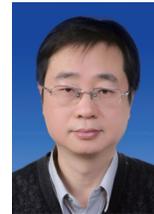
6 结束语

总体来看,可调谐半导体激光器由于体积小、适合大规模生产和易于集成等优点,有望被大量应用于包括光通信、光传感和光计算等诸多领域。目前也有许多其他不同实现方法,比如外腔激光光源、DFB激光光源、DBR激光光源以及垂直腔面发射激光器(VCSEL)等。不同实现方案具有各自的优缺点,可以分别适用于不同的场合。基于自主发明的REC技术,我们以一种低成本的加工方案实现了精准的布拉格光栅制作。基于该精准的光栅,可以实现面向相控阵雷达和相干光通信的窄线宽可调谐激光器、面向光交换激光器雷达的快速可调谐激光器和面向5G前传波分复用无源光网络(WDM-PON)的宽波段可调谐激光器。

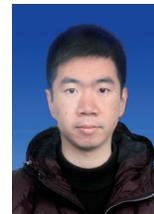
参考文献

- [1] FAVRE F, LE GUEN D, SIMON J C, et al. External-cavity semiconductor laser with 15 nm continuous tuning range [J]. Electronics letters, 1986, 22(15): 795. DOI: 10.1049/el:19860545
- [2] FUJIOKA N, CHU T, ISHIZAKA M. Compact and low power consumption hybrid integrated wavelength tunable laser module using silicon waveguide resonators [J]. Journal of lightwave technology, 2010, 28(21): 3115-3120. DOI:10.1109/jlt.2010.2073445
- [3] ISHII H, KASAYA K, OOHASHI H, et al. Widely wavelength-tunable DFB laser array integrated with funnel combiner [J]. IEEE journal of selected topics in quantum electronics, 2007, 13(5): 1089-1094. DOI: 10.1109/jlt.2010.2073445
- [4] KOTAKI Y, MATSUDA M, ISHIKAWA H, et al. Tunable DBR laser with wide tuning range [J]. Electronics letters, 1988, 24(8): 503. DOI: 10.1049/el:19880342
- [5] ZHANG S, MENG J, GUO S, et al. Simple and compact V-cavity semiconductor laser with 50×100 GHz wavelength tuning [J]. Optics express, 2013, 21(11): 13564. DOI: 10.1364/oe.21.013564
- [6] CHEN Q, MA X, SUN W, et al. Demonstration of multi-channel interference widely tunable semiconductor laser [J]. IEEE photonics technology letters, 2016, 28(24): 2862-2865. DOI: 10.1109/pt.2016.2624308
- [7] HUANG M C Y, CHENG K B, ZHOU Y, et al. Demonstration of piezoelectric actuated GaAs-based MEMS tunable VCSEL [J]. IEEE photonics technology letters, 2006, 18(10): 1197-1199. DOI:10.1109/pt.2006.873923
- [8] NOH Y-O, LEE H-J, JU J J, et al. Continuously tunable compact lasers based on thermo-optic polymer waveguides with Bragg gratings [J]. Optics express, 2008, 16(22): 18194. DOI:10.1364/oe.16.018194
- [9] JAYARAMAN V, CHUANG Z-M, COLDREN L A. Theory, design, and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings [J]. IEEE journal of quantum electronics, 1993, 29(6): 1824-1834. DOI:10.1109/3.234440
- [10] WESSTRÖM J O, SARLET G, HAMMERFELDT S, et al. State-of-the-art performance of widely tunable modulated grating Y-branch lasers [C]//Optical Fiber Communication Conference. Los Angeles, CA, USA: IEEE. 2004: 389-391.
- [11] WARD A J, ROBBINS D J, BUSICO G, et al. Widely tunable DS-DBR laser with monolithically integrated SOA: design and performance [J]. IEEE journal of selected topics in quantum electronics, 2005, 11(1): 149-156. DOI:10.1109/jstqe.2004.841698
- [12] TOHMORI Y, YOSHIKUNI Y, ISHII H, et al. Broad-range wavelength-tunable superstructure grating (SSG) DBR lasers [J]. IEEE journal of quantum electronics, 1993, 29(6): 1817-1823. DOI:10.1109/3.234439
- [13] DAI Y, CHEN X, JIANG D, et al. Equivalent phase shift in a fiber Bragg grating achieved by changing the sampling period [J]. IEEE photonics technology letters, 2004, 16(10): 2284-2286. DOI:10.1109/pt.2004.834530
- [14] DAI Y, CHEN X. DFB semiconductor lasers based on reconstruction-equivalent-chirp technology [J]. Optics express, 2007, 15(5): 2348-2353. DOI:10.1364/oe.15.002348
- [15] SHI Y, LI S, LI L, et al. Study of the multi-wavelength DFB semiconductor laser array based on the reconstruction-equivalent-chirp technique [J]. Journal of lightwave technology, 2013, 31(20): 3243-3250. DOI: 10.1109/jlt.2013.2280715
- [16] SHI Y, LI S, CHEN X, et al. High channel count and high precision channel spacing multi-wavelength laser array for future PICs [J]. Scientific reports, 2014, 4: 7377. DOI: 10.1038/srep07377
- [17] ZHENG J, SHI Y, ZHANG Y, et al. Monolithically integrated four-channel DFB semiconductor laser array with an equivalent-distributed coupling coefficient [J]. IEEE photonics journal, 2015, 7(3): 1-9. DOI: 10.1109/jphot.2015.2420621
- [18] LI L, TANG S, LU J, et al. Study of cascaded tunable DFB semiconductor laser with wide tuning range and high single mode yield based on equivalent phase shift technique [J]. Optics communications, 2015, 352: 70-76. DOI:10.1109/jphot.2015.2420621
- [19] ZHANG Y, ZHENG J, ZHANG F, et al. Study on DFB semiconductor laser array integrated with grating reflector based on reconstruction-equivalent-chirp technique [J]. Optics express, 2015, 23(3): 2889. DOI: 10.1364/oe.23.002889
- [20] GRIPP J, DUELK M, SIMSARIAN J, et al. Demonstration of a 1.2 Tbit/s optical packet switch fabric (32×40 Gbit/s) based on 40 Gbit/s burst-mode clock-data-recovery, fast tunable lasers, and a high-performance $N \times N$ AWG [C]//Proceedings 27th European Conference on Optical Communication (Cat. No. 01TH8551). Amsterdam, Netherlands: IEEE. 2001, 6: 58-59. DOI: 10.1109/ecoc.2001.989048

作者简介



陈向飞, 南京大学教授; 主要研究领域为光通信、光子集成技术、半导体激光器、微波光子学等; 先后主持和参加“863”项目、国家重点研发计划等10余项, 获2018年国家科技发明二等奖; 已发表论文200余篇, 获授权发明专利10余项。



肖如磊, 南京大学副研究员; 主要研究领域为可调谐半导体激光器、光子集成芯片等; 已发表论文20余篇, 获授权发明专利5项。



陆骏, 南京大学副研究员; 主要研究新型可调谐半导体激光器的设计和制作、多波长阵列激光器的芯片设计和制作工艺, 以及有源/无源集成技术; 已发表论文10余篇。



硅集成磁光非互易光学器件技术

Silicon Integrated Magneto-Optical Nonreciprocal Photonic Devices

摘要: 基于磁光非互易移相原理,采用硅基异质沉积磁性氧化物薄膜的技术路线,在绝缘体上硅(SOI)晶圆上,制备了基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构的宽带磁光隔离器和微环结构的窄带磁光隔离器件。两个器件在 1 550 nm 波长下的隔离度分别达到了 30 dB 和 40 dB,插损分别为 5 dB 和 3 dB,性能接近分立器件水平。这些工作为硅基单片集成非互易材料和器件提供了可行的技术途径。

关键词: 硅基光电子;磁光;非互易;光隔离器

Abstract: Based on the magneto-optical nonreciprocal phase shift effect, Mach-Zehnder interferometer (MZI) broadband optical isolators and microring narrowband optical isolators on silicon on insulator (SOI) substrate are monolithically integrated by using the technique of hetero deposition of magnetic oxide film on silicon substrate. The devices achieve high isolation ratios of 30 dB and 40 dB at 1 550 nm, and insertion loss of 5 dB and 3 dB respectively, which are close to the performance of discrete isolator devices. Our work provides a feasible technical way for silicon integration of nonreciprocal materials and devices.

Keywords: silicon photonics; magneto-optics; nonreciprocal; optical isolator

刘书缘/LIU Shuyuan

邓龙江/DENG Longjiang

毕磊/BI Lei

(电子科技大学,中国 成都 611054)
(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611054, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202006012

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200407.1516.002.html>

网络出版日期: 2020-04-07

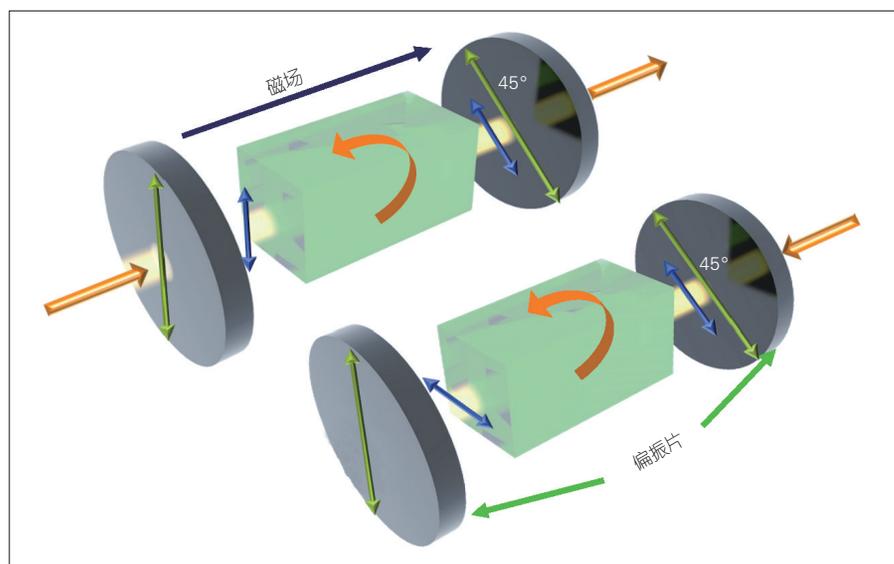
收稿日期: 2020-02-20

非互易光学器件包括光隔离器、光环行器等,是光学系统中不可或缺的核心器件。以光隔离器为例,非互易光学器件的主要作用是实现光的单向通过。该器件可阻止远端反射光进入激光器谐振腔或放大器,以避免由反射光造成的相对强度噪声(RIN)和相位噪声。这对确保光学系统的稳定工作具有非常重要的意义。在中国,光隔离器的需求量每年高达数千万甚至上亿只。光隔离器不仅被广泛应用于骨干网、城域网、接入网等光纤通信系统中,还被大量用于光互连模块等数据通信系统中,具有不可替代的作用。

目前,商用的非互易光学器件主要是基于磁光材料[稀土掺杂钇铁石榴石(RIG)]的法拉第旋光效应制备

的,如图1所示^[1]。其工作原理是:利用光在磁性介质中的法拉第旋光效应,先使正向传播的线偏振激光偏振方向旋转45°,然后再通过检偏器;由于法拉第旋光效应的光学非互易性,反射光的偏振状态不会回到入射光的偏振方向,而会继续旋转45°与起

偏器偏振方向正交,从而实现消光。这一器件的核心材料是实现法拉第旋光的磁光晶体厚膜RIG。这一材料主要采用液相外延方法在钆镓石榴石(GGG)基片上生长。由于实现45°旋光需要生长数百微米厚的RIG薄膜材料,工艺难度和材料成本都很



▲图1 基于法拉第旋光原理的磁光隔离器^[1]

基金项目:国家重点基础研究专项基金(2018YFE0201200、2017YFA0206401、2018YFA0704402、2018YFB2201801)、国家自然科学基金(61975065)

高,且目前只有美国(II-VI)和日本(Granopt/信越)的少数公司掌握这种技术,这导致中国相关材料和元器件长期依赖美、日进口,已成为光电子领域的一个“卡脖子”问题。

近年来,随着集成光模块、硅基光电子芯片技术的进步,光通信/光互连系统均逐渐向更小尺寸、更低成本、更高性能的光电集成芯片发展。其中一个迫切的需求是实现非互易光学材料和器件的平面集成化、小型化和低成本化。围绕这一难题,尽管全球开展了30余年的研究,但仍没有完全攻克这一难题。虽然近年来有学者提出了一些非磁性的解决方案,如非线性效应^[2-4]、时空调制^[5-6]等,但是器件带宽、功耗、功率依赖等科学问题尚在基础研究层面,离实际应用还有一定的距离。因此,基于磁光效应的集成非互易器件仍是目前最接近实际应用的技术方向。这一领域的研究面临的主要困难在于3个方面:(1)高性能磁光材料难以实现半导体集成。RIG等磁光薄膜材料与Si等半导体材料晶格的失配(钇铁石榴石(YIG):12.4 Å;Si:5.4 Å)、热失配(YIG:约 10^{-5} K^{-1} ;Si:约 $2.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$),导致材料难以实现硅基外延,材料磁光效应弱,损耗高。(2)法拉第旋光效应难以应用于磁光波导器件。由于波导器件对于横电模(TE)/横磁模(TM)存在不同的传播常数,即器件造成的双折射,使磁光波导无论多长都不能实现 45° 的旋光^[7]。(3)工艺兼容困难。磁光材料需要高温,并且存在Fe等半导体前端工艺不兼容的元素,这造成了芯片制备过程工艺整合的困难。这些问题导致了非互易光学器件较少能够实现半导体集成的光学器件,被称为集成光学的根本性难题之一^[5]。

世界各国在集成磁光非互易器

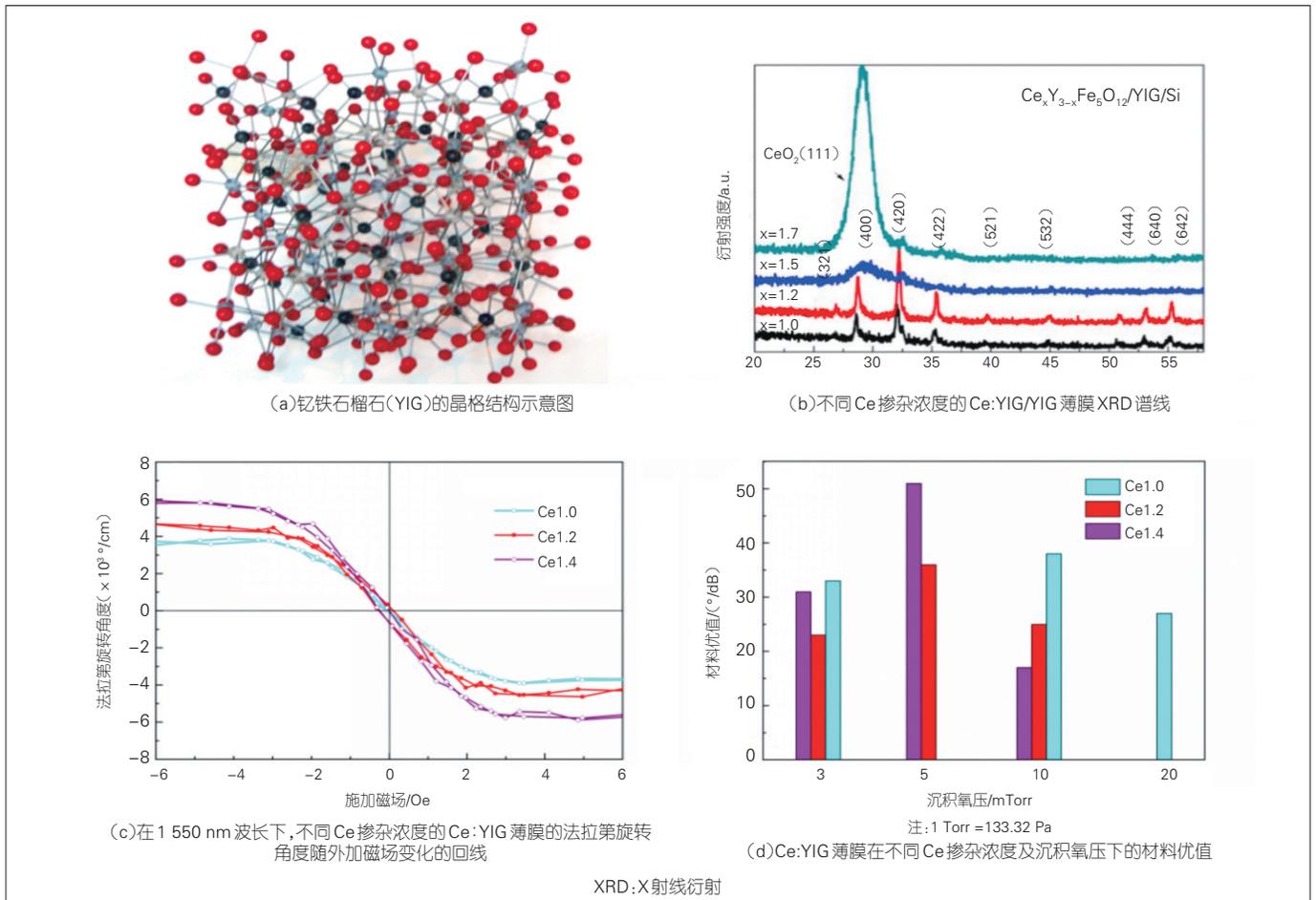
件领域的研究取得了长足的进展。东京工业大学MIZUMOTO T.教授是这一领域的先驱。他首先采用磁光非互易移相原理解决波导器件中法拉第旋光效应弱的问题,并采用晶圆键合的方法克服高性能磁光薄膜材料的半导体集成困难,实现了TM和TE模式宽带磁光隔离器的硅基集成,并使器件隔离度达到了30 dB,插损为8~10 dB^[8]。美国加州大学圣芭芭拉分校(UCSB)的BOWERS J. E.教授也采用这一方法研究隔离器集成技术。他采用金属电极的电流来提供局域磁场,避免了外加偏置磁场的问题,使器件性能与MIZUMOTO T.教授小组的相当^[9]。另外,欧洲微电子中心(IMEC)的研究者也采用晶圆键合的方法研究隔离器的硅基集成技术。其区别是采用苯并环丁烯(BCB)作为键合媒质。由于BCB减少了模式在磁光材料中的限制因子,他们实现的器件相对更大一些,性能也略低于东京工业大学和UCSB研究小组的器件性能^[10]。采用晶圆键合技术路线的优势,在于可以利用高性能的外延单晶RIG薄膜,在工艺兼容上也相对容易处理。然而,RIG与硅波导界面质量难以控制(实际上造成了6 dB左右的插损),并且器件尺寸大,结构设计受限,同时无法满足隔离器需求量大产能需求。采用单片集成,即直接在硅上沉积磁光材料的方法,可以解决上述问题。开展这一方面研究的小组,主要有中国电子科技大学的毕磊教授小组、美国麻省理工学院的ROSS C. A.教授和HU J. J.教授小组。这些小组主要采用在硅基光波导中沉积Bi掺杂YIG或Ce掺杂YIG薄膜的方式,实现材料和器件集成。目前这些小组已实现宽带和窄带光隔离器的硅基单片集成^[11-13]。美国明尼苏达大学的STADLER B.教授小组和英

国格拉斯哥大学的HUTCHINGS D.教授小组,也都采用沉积方法制备硅基集成磁光薄膜。他们采用准相位匹配的方法,制备了波导法拉第旋光器件,并克服了结构双折射带来的旋光小的问题^[14]。然而目前还没有完整的隔离器研制和性能报道。虽然采用单片集成可以实现大规模并行制备,使成本显著降低,但仍存在的几个难点:(1)材料性能比单晶外延薄膜较差,限制了器件的整体性能;(2)仍须发展新的器件设计并解决损耗、偏振依赖和带宽问题;(3)还须解决材料沉积与模块制成工艺的兼容整合问题。

本文中,我们主要综述本小组近5年来在这一领域的研究情况。通过材料缺陷结构-性能关系的理论分析和工艺控制,我们研制接近单晶质量的硅基集成磁光薄膜。基于磁光非互易移相原理,我们设计并制备了TE/TM模式的磁光隔离器件。研制的硅基集成光隔离器件的尺寸、成本都显著优于分立器件,性能接近分立器件水平。我们认为,单片集成磁光薄膜和非互易光学器件都可以获得较高性能,有望在不久的将来应用在光电子芯片中。

1 硅基集成高价值磁光薄膜材料

作为磁光非互易器件的材料基础,磁光材料很大程度上决定了磁光非互易光学器件的最终性能,因此磁光材料的生长是制备磁光非互易光学器件的关键技术。以铈(Ce)和铋(Bi)为代表的稀土金属掺杂的YIG,在通信波段有较高的透过率和较强的磁光效应。它们是制备磁光非互易光学器件的理想材料体系。YIG的晶格结构如图2(a)所示,其1个晶胞由8个 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 单元组成,存在十二面体(c位)、八面体(a位)、四面体(d



▲ 图2 YIG晶格及其掺杂物性能

位)3种空位类型。其中,c位间隙最大,由稀土金属离子占据;a位和d位由Fe离子占据。研究表明,通过在十二面体间隙位置引入Ce离子,可以大幅提高材料的磁光性能。在目前已开展的 $Ce_1Y_2Fe_5O_{12}$ 薄膜的研究基础上,我们基于理论计算和工艺优化,探索了提高材料优值的途径。

铈掺杂钇铁石榴石(Ce:YIG)薄膜的磁光效应,强烈依赖于 Ce^{3+} 在钇铁石榴石晶格中的离子浓度。为了优化器件性能,使材料达到更高旋光, Ce^{3+} 的固溶度需要提高,然而,实际上提高YIG晶格中 Ce^{3+} 离子的浓度是较为困难的,这是因为 Ce^{3+} 离子的半径远大于 Y^{3+} 离子,从而造成 Ce^{3+} 离子倾向于析出形成热力学更稳定但对磁光无贡献的 CeO_2 相。

针对上述问题,我们首先采用密度泛函理论(DFT+U)的方法,来计算氧空位效应对磁光特性的影响。我们发现, $Ce(4f)-Fe(3d)$ 的电荷转移是Ce:YIG在近红外产生吸收的主要原因,同时氧空位的存在会使 Ce^{3+} 离子的晶格场发生改变。提高 Ce^{4+} 离子的生成焓,抑制 Ce^{3+} 转化为 Ce^{4+} ,可以避免 CeO_2 和 Ce^{4+} 离子的生成。在较低氧气压下,虽然Ce:YIG薄膜结晶性良好,但是由于薄膜中氧空位浓度较高,由第一性原理计算可知,氧空位可导致邻近 Fe^{3+} 离子被还原成 Fe^{2+} ,从而增强了薄膜的光学吸收。当氧气压过高时,Ce、Fe元素倾向于形成更加稳定的 CeO_2 和 Fe_2O_3 相,导致材料磁光效应减弱。这说明氧分压对材料的磁光和光学性能有重要

影响^[15]。

基于上述分析,我们采用激光脉冲沉积技术,分别在硅基底上生长不同组分的 $Ce_xY_{3-x}Fe_5O_{12}/YIG$ 薄膜,并通过X射线衍射仪(XRD)表征其结晶性,如图2(b)所示。当Ce含量为1.0及1.2时,薄膜可以结晶为石榴石相。当Ce含量达到1.5时,较大的非晶衍射鼓包会出现;进一步增加Ce含量至1.7时,主要衍射峰将对应 CeO_2 相,此时薄膜无法完全结晶为石榴石相。随后,通过改变外加磁场,在1550 nm的波长下,测试我们Ce掺杂浓度分别为1.0、1.2、1.4样品的法拉第旋转角度。测试结果如图2(c)所示。在此波长下, $Ce_{1.4}Y_{1.6}Fe_5O_{12}$ 材料在磁化到饱和的情况下具有 -6000 ($^\circ$)/cm的法拉第旋转角度。因此, $Ce_{1.4}Y_{1.6}Fe_5O_{12}$ 是

构建硅基集成磁光非互易器件较为理想的掺杂材料。

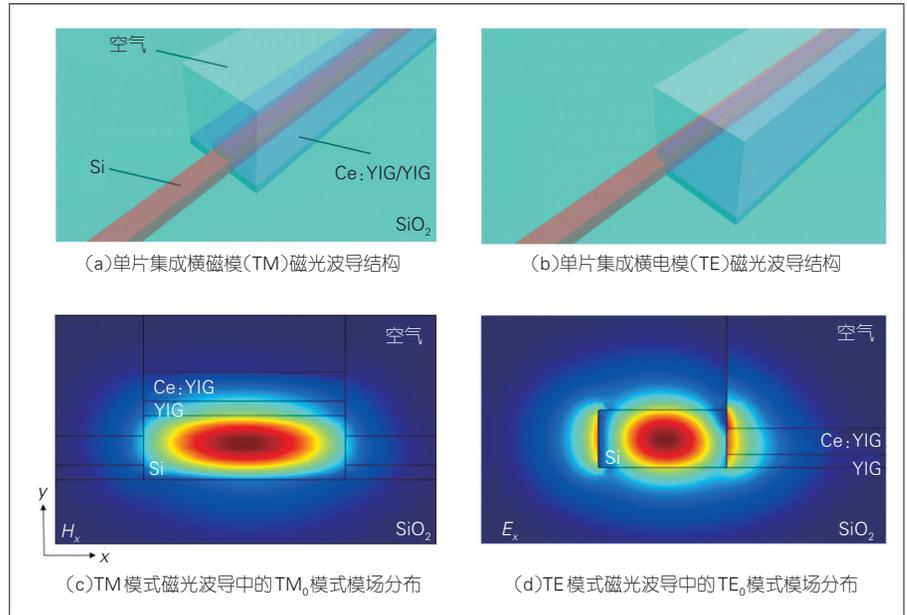
我们进一步研究氧分压对材料优值的影响。图2(d)给出了Ce:YIG薄膜在不同Ce掺杂浓度及沉积氧分压下的材料优值。从图中可以看出,同一Ce掺杂浓度的Ce:YIG薄膜存在一个最优的沉积氧分压。当小于该氧分压时材料损耗增加,大于该氧分压时材料法拉第旋光降低。通过寻找 $Ce_{1.4}Y_{1.6}Fe_5O_{12}$ 最佳氧压值,我们在666.6 kPa氧压下得到 $Ce_{1.4}Y_{1.6}Fe_5O_{12}$ 薄膜最大材料优值为 $51 (^{\circ})/dB$,该值优于 $Ce_1Y_2Fe_5O_{12}$ 薄膜的 $37.5 (^{\circ})/dB$ 。以 $Ce_{1.4}Y_{1.6}Fe_5O_{12}$ 为基础,可以设计制备损耗更低、尺寸更小的磁光非互易光学器件。

2 集成磁光隔离器的设计

基于磁光非互易移相效应可以构建高性能的集成光隔离器。这一效应是指,在与磁光波导中光传播方向垂直的方向施加磁场,使光在正反向传输时的传播常数不同。通过波导构建马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构、微环谐振器(MR)结构或多模干涉仪(MMI)器件结构等,可以利用这一效应实现低损耗、高隔离度的集成磁光隔离器。

2.1 单片集成磁光波导结构

基于单片集成技术路线设计的TM及TE模式磁光波导结构如图3(a)和图3(b)所示。TM模式磁光波导是由硅波导及沉积在波导上表面的磁光材料薄膜(YIG/CeYIG)组成的。波导中的 TM_0 模式模场分布如图3(c)所示。在磁光材料层,由于存在沿y方向梯度分布的 H_x 场分量,在施加外磁场后,波导中正反向传播的 TM_0 模式传播常数会不同,即能够实现TM模式的非互易相移。其非互易



▲图3 单片集成磁光波导结构及其模场分布

相移数值可由微扰理论公式计算得到:

$$\Delta\beta(TM) = \frac{2\beta^{TM}}{\omega\epsilon_0 N} \iint \frac{\gamma}{n_0^4} H_x \partial_y H_x dx dy, \quad (1)$$

其中, ω 是光的频率, ϵ_0 是真空介电常数, γ 是磁光材料介电常数张量的非对角元, n_0 是磁光材料的折射率。而TE模式的非互易相移计算公式为:

$$\Delta\beta(TE) = \frac{2\omega\epsilon_0}{\beta^{TE} N} \iint \gamma E_x \partial_x E_x dx dy. \quad (2)$$

公式(2)不为0的条件是,磁光材料中存在沿x方向梯度分布的 E_x 场分量,即需要面内方向磁光材料分布的不对称性。因此,磁光材料只能沉积于磁光波导单侧侧壁,波导中支持的 TE_0 模式模场分布如图3(d)所示。在完成磁光波导基本单元的设计后,我们还可以进一步进行磁光非互易器件的设计及优化。

2.2 MZI型磁光隔离器设计

MZI型磁光隔离器由两个3 dB耦合器和包含非互易波导及互易波导的两波导臂组成,其工作原理如图

4(a)所示。在光正向传输时,互易波导造成的两波导臂相位差为 $\pi/2$,同时非互易波导造成的两波导臂相位差为 $-\pi/2$,总相位差为0,两束光干涉相长可以正向透过;在光反向传输时,互易波导造成的两波导臂相位差仍为 $\pi/2$,但由于磁光非互易效应,此时非互易波导造成的两波导臂相位差为 $+\pi/2$,总相位差为 π ,两束光干涉相消导致反向截至。传统MZI型磁光隔离器为使两臂磁光非互易相移相叠加,通常需要在两臂施加反向磁场。这增加了磁场集成的难度。此外,传统MZI型磁光隔离器还存在磁光波导长度较长、器件尺寸较大等问题。

基于上述问题,我们提出如图4(b)的优化设计^[12]。使用S型臂波导结构的好处包括两方面:一方面,S型臂波导结构可以使器件结构更为紧凑,大大减小器件的尺寸;另一方面,这一特殊的波导结构也使两波导臂中同时存在 $+z$ 方向和 $-z$ 方向传播的波导段,通过在两臂不对称的波导位置沉积磁光材料,在x方向上施加单向磁场即可实现两波导臂中磁光非

互易相的叠加,大大降低了施加磁场的难度。

2.3 TM 模式微环型磁光隔离器设计

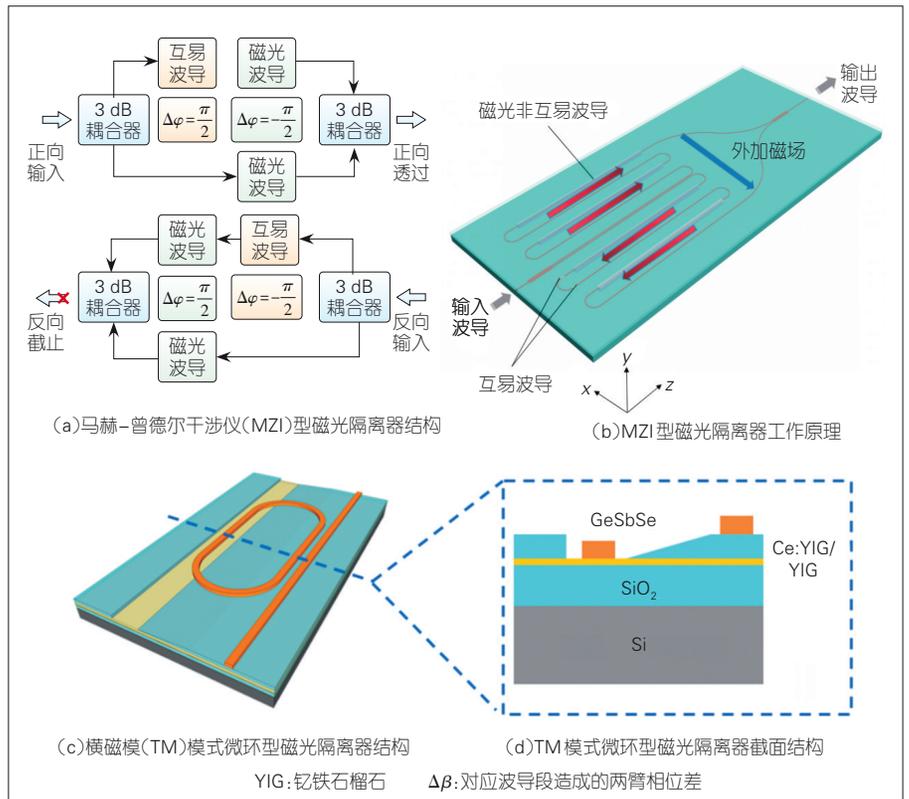
微环型隔离器是根据在正反向传输时,微环的谐振波长不同所构建的。正向传输时,由于相位不匹配,能量不能耦合进微环,光可以正向透过;反向传输时,满足微环的谐振条件,能量进入微环并通过散射及材料吸收耗散,导致光反向截止。通过对单片集成的TM模式微环型磁光隔离器进行损耗分析,我们发现器件损耗的两大主要来源:(1)沉积于磁光波导侧壁的Ce:YIG/YIG磁光材料,相较于在波导上表面结晶性较差,不仅不能增强磁光非互易移相效应,反而会造成相当大的吸收损耗;(2)单模波导与磁光波导连接处的模式失配,会造成大量的耦合损耗。

为消除上述两大损耗来源,我们设计了如图4(c)所示的TM模式微环型磁光隔离器^[13]。在Ce:YIG材料上生长GeSbSe材料,并通过微细工艺将其图形化作为波导芯层,可使磁光材料仅出现在特定位置波导的下表面,进而消除侧壁磁光材料带来的吸收损耗。同时,我们采用灰度曝光,构建如图4(d)所示的垂直绝热渐变结构,以匹配单模波导与磁光波导中的模式,从而消除由于模式失配造成的耦合损耗。

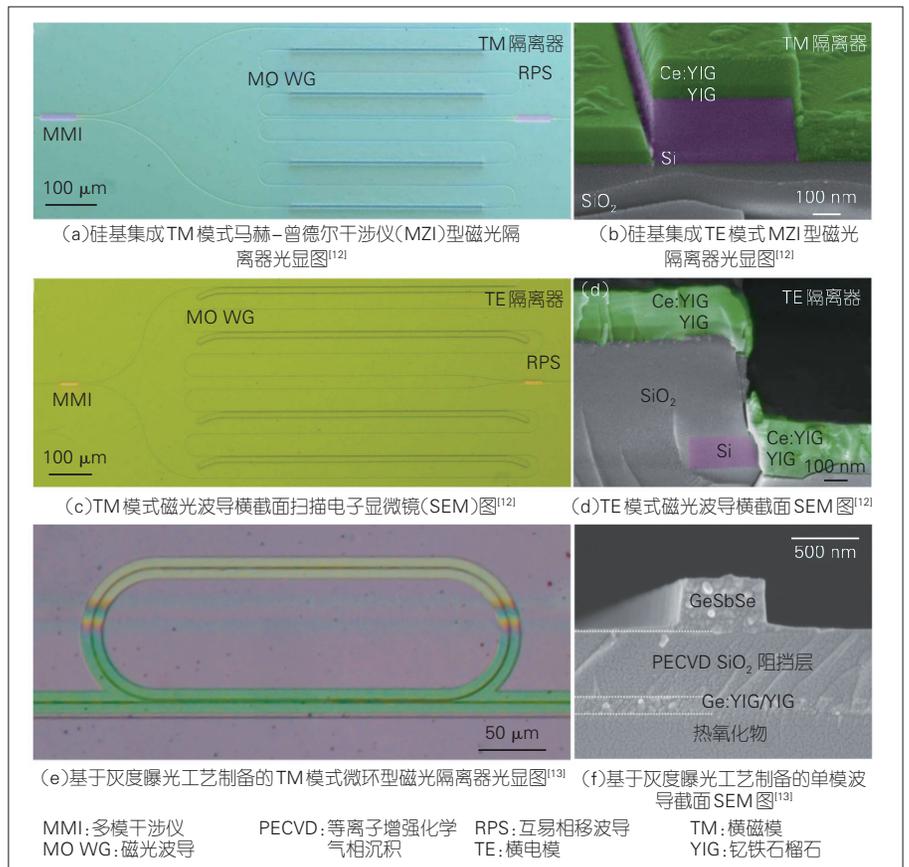
3 硅集成磁光隔离器性能

3.1 硅集成磁光隔离器结构表征

TM及TE模式MZI型器件光显图如图5(a)和图5(c)所示。器件两端使用基于多模干涉原理的3 dB耦合器,其中长条形区域为磁光材料沉积窗口结构。图5(b)和图5(d)为TM及TE模式磁光波导截面的扫描电子显



▲图4 优化设计的MZI型磁光隔离器和TM模式微环型磁光隔离器结构^[13]



▲图5 硅基集成磁光隔离器的结构表征

显微镜(SEM)图,其中紫色为Si波导结构,绿色为磁光材料薄膜。磁光波导实际结构与仿真模型相吻合^[12]。

图5(e)为基于灰度曝光工艺制备的TM模式微环型磁光隔离器光显图,其中绿色区域SiO₂下包层,黄色区域对应Ce:YIG下包层,两层通过垂直渐变结构过渡连接。图5(f)为SiO₂下包层区域波导横截面示意图^[13]。

3.2 硅集成磁光隔离器性能表征

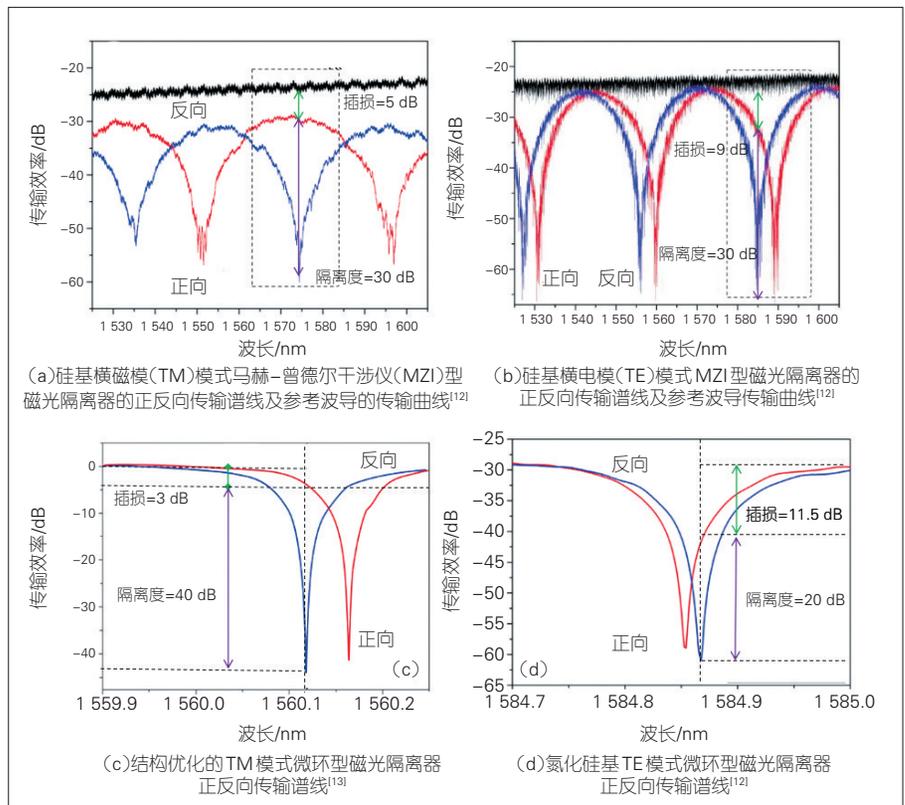
在完成器件制备后,我们进行硅基集成的TM及TE模式MZI型和微环型磁光隔离器的性能表征。

对于MZI型磁光隔离器的优化设计,我们给出了在红外波段测试TM及TE模式器件的正向及反向传输曲线,如图6(a)和图6(b)所示。其中,黑色曲线为用于判断插入损耗的直波导传输曲线,红、蓝曲线分别代表器件的正向及反向传输谱线。TM模式器件在1574.5 nm波长处,插入损耗约为5 dB,隔离度约为30 dB。TE模式器件在1588 nm波长处插入损耗约为9 dB,隔离度约为30 dB。由于器件加工误差,器件的正向传输最高点与反向传输最低点不在同一波长,因此引入了额外的插入损耗^[12]。对于采用基于灰度曝光工艺的TM模式微环型磁光隔离器,传输

谱线如图6(c)所示,其中,红色、蓝色曲线分别代表器件的正向及反向传输谱线。器件在谐振波长工作时,相应的插入损耗仅为3 dB,隔离度高达40 dB^[13]。同样地,通过侧壁沉积的工艺路线,我们在氮化硅基底上制备TE模式微环型磁光隔离器,其性能如图6(d)所示。该器件在谐振波长工作时,插入损耗约为11.5 dB,隔离度为20 dB^[12]。

3.3 同类型器件间的性能对比

表1给出了本工作与其他同类宽带磁光隔离器的性能对比。对于TM模式宽带磁光隔离器,我们证明了单片集成的可行性,并获得了不错的器件性能。TE模式宽带磁光隔离器目前仍存在较高的插入损耗,这主要是由器件加工误差造成的。因此,急需进一步的设计和工艺优化,以进一步提高相关器件的性能。



▲图6 硅集成磁光隔离器的性能表征

▼表1 红外波段宽带磁光隔离器性能对比

单位	隔离器类型	制备工艺	工作偏振	器件尺寸/mm	隔离度/dB	插入损耗/dB
东京工业大学 ^[16]	硅基马赫-曾德尔干涉仪型	晶圆键合	TM	1.5 × 1.5	27	13
根特大学 ^[10]	硅基马赫-曾德尔干涉仪型	晶圆键合	TM	4 × 4	25	8
根特大学 ^[17]	硅基马赫-曾德尔干涉仪型	晶圆键合	TE	4 × 4	32	22
加州大学圣芭芭拉分校 ^[9]	硅基马赫-曾德尔干涉仪型	晶圆键合	TM	1.7 × 0.3	30	8
格拉斯哥大学 ^[14]	硅基法拉第旋转器	直接沉积	TE/TM	4 (一维)	11	4
电子科技大学 ^[12]	硅基马赫-曾德尔干涉仪型	直接沉积	TM	0.94 × 0.33	30	5
电子科技大学 ^[12]	硅基马赫-曾德尔干涉仪型	直接沉积	TE	0.87 × 0.34	30	9

TE: 横电模 TM: 横磁模

4 结束语

硅基磁光非互易器件的集成是硅基光电子技术中的重点和难点。器件性能的提升需要同时从磁光材料的异质异构集成和非互易器件的设计及制备两方面进行优化。提高 Ce:YIG 磁光材料薄膜中 Ce 的掺杂比,同时控制材料沉积过程中的氧压,可以进一步提高材料优值,这将为设计小型化、高性能的集成磁光非互易器件提供材料基础。在器件设计中,尽量避免器件结构带来的模式失配和不必要的磁光材料吸收,可以大幅减小器件整体插入损耗。此外,合理优化器件结构可以有效减小器件尺寸。未来面临的最大挑战是磁光器件的工艺兼容性问题,因此需要发展后端兼容的材料单片集成方法。基于这一技术的发展现状,我们相信,低成本、小型化、高性能的硅基集成磁光隔离器,有望在不久的将来走向实际应用。

参考文献

- [1] BI L. Materials for nonreciprocal photonics [J]. MRS bulletin, 2018, 43(6): 408–412. DOI: 10.1557/mrs.2018.120
- [2] FAN L, WANG J, VARGHESE L T, et al. An all-silicon passive optical diode [J]. Science, 2012, 335(6067): 447–450. DOI: 10.1126/science.1214383
- [3] SHI Y, YU Z F, FAN S H. Limitations of nonlinear optical isolators due to dynamic reciprocity [J]. Nature photonics, 2015, 9(6): 388–392. DOI: 10.1038/nphoton.2015.79
- [4] PENG B, ÖZDEMİR Ş K, LEI F C, et al. Parity-time-symmetric whispering-gallery microcavities [J]. Nature physics, 2014, 10(5): 394–398. DOI: 10.1038/nphys2927
- [5] YU Z F, FAN S H. Complete optical isolation created by indirect interband photonic transitions [J]. Nature photonics, 2009, 3(2): 91–94. DOI: 10.1038/nphoton.2008.273
- [6] SOUNAS D L, ALÙ A. Non-reciprocal photonics based on time modulation [J]. Nature photonics, 2017, 11(12): 774–783. DOI: 10.1038/s41566-017-0051-x
- [7] LIU Q, GROSS S, DEKKER P, et al. Competition of Faraday rotation and birefringence in femtosecond laser direct written waveguides in magneto-optical glass [J]. Optics express, 2014, 22(23): 28037–28051. DOI: 10.1364/oe.22.028037
- [8] SHOJI Y, MIZUMOTO T. Magneto-optical non-reciprocal devices in silicon photonics [J]. Science and technology of advanced materials, 2014, 15(1): 014602. DOI: 10.1088/1468-6996/15/1/014602
- [9] HUANG D N, PINTUS P, SHOJI Y, et al. Integrated broadband Ce: YIG/Si Mach-Zehnder optical isolators with over 100 nm tuning range [J]. Optics letters, 2017, 42(23): 4901–4904. DOI: 10.1364/ol.42.004901
- [10] GHOSH S, KEYVANINIA S, VAN ROY W, et al. Ce: YIG/silicon-on-insulator waveguide optical isolator realized by adhesive bonding [J]. Optics express, 2012, 20(2): 1839–1848. DOI: 10.1364/oe.20.001839
- [11] BI L, HU J J, JIANG P, et al. On-chip optical isolation in monolithically integrated non-reciprocal optical resonators [J]. Nature photonics, 2011, 5(12): 758–762. DOI: 10.1038/nphoton.2011.270
- [12] ZHANG Y, DU Q Y, WANG C T, et al. Monolithic integration of broadband optical isolators for polarization-diverse silicon photonics [J]. Optica, 2019, 6(4): 473–478. DOI: 10.1364/optica.6.000473
- [13] DU Q Y, WANG C T, ZHANG Y F, et al. Monolithic on-chip magneto-optical isolator with 3 dB insertion loss and 40 dB isolation ratio [J]. ACS photonics, 2018, 5(12): 5010–5016. DOI: 10.1021/acsp Photonics.8b01257
- [14] ZHANG C, DULAL P, STADLER B J H, et al. Monolithically-integrated TE-mode 1D silicon-on-insulator isolators using seedlayer-free garnet [J]. Scientific reports, 2017, 7: 1–8. DOI: 10.1038/s41598-017-06043-z
- [15] LIANG X, XIE J L, DENG L J, et al. First principles calculation on the magnetic, optical properties and oxygen vacancy effect of $\text{Ce}_x\text{Y}_{3-x}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ [J]. Applied physics letters, 2015, 106(5): 52401. DOI: 10.1063/1.4907413
- [16] SHOJI Y, SHIRATO Y, MIZUMOTO T. Silicon Mach-Zehnder interferometer optical isolator having 8 nm bandwidth for over 20 dB isolation [J]. Japanese journal of applied physics, 2014, 53(2): 22202. DOI: 10.7567/jjap.53.022202
- [17] GHOSH S, KEYVANINIA S, SHIRATO Y, et al. Optical isolator for TE polarized light realized by adhesive bonding of Ce: YIG on silicon-on-insulator waveguide circuits [J]. IEEE photonics journal, 2013, 5(3): 6601108–6601108. DOI: 10.1109/jphot.2013.2264275

作者简介



刘书缘, 电子科技大学在读硕士研究生; 主要研究领域为集成非互易器件结构优化及新型集成非互易器件的设计; 发表论文 1 篇, 申请中国发明专利 2 项。



邓龙江, 电子科技大学国家电磁辐射控制材料工程技术研究中心主任、长江学者特聘教授; 主要从事新型电磁波吸收剂及吸波材料、红外低发射率及可变发射率薄膜、微波磁性材料等方面的研究工作; 发表论文 237 篇, 获授权中国发明专利 4 4 项。



毕磊, 电子科技大学教授、博士生导师, 国家自然科学基金委优秀青年基金获得者; 研究领域为微纳尺度下光与材料的相互作用机理、新型功能光电薄膜材料及器件集成技术; 在《Nature Photonics》《ACS Nano》《Optica》等期刊发表学术论文 90 余篇; 获授权美国专利 2 项、中国发明专利 5 项。



基于智能算法的光子器件研究展望

Research Prospect of Photonic Devices Based on Intelligent Algorithm

摘要: 人工智能与光子学相结合成为光学领域的新热点。遗传算法、机器学习、时间拉伸等技术被陆续应用到非线性光学领域。简要回顾了近年来出现的智能光子器件的研究及发展, 结合发展现状对该领域的未来做了初步展望。认为智能光子器件的研究在进一步拓宽和加深相关领域研究的同时, 可为相关光学器件及系统智能化和产业化奠定基础。

关键词: 光纤激光器; 超快光学; 激光锁模技术; 智能算法

Abstract: The combination of artificial intelligence and photonics has become a new hotspot in the field of optics. Genetic algorithm, machine learning, and time stretch have been applied to the field of nonlinear optics. The research development of intelligent photon devices in recent years is briefly reviewed, and a preliminary outlook on the future of this field based on the development status is made. The research of intelligent photonic devices will further broaden and deepen the research of related fields, laying a foundation for the intelligence and industrialization of related optical devices and systems.

Keywords: fiber laser; ultrafast optics; mode locking technique; intelligent algorithm

宋宇锋 / SONG Yufeng
张晗 / ZHANG Han

(深圳大学, 中国 深圳 518060)
(Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202006013

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/34.1228.TN.20200416.1011.003.html>

网络出版日期: 2020-04-16

收稿日期: 2020-02-25

激光是 20 世纪最重要的科学发明之一, 它的出现极大地推动了科学技术的发展。以掺杂稀土元素的光纤作为增益介质的光纤激光器, 由于其在光通信、光数据存储、传感技术、医学等领域的广泛应用, 近年来发展十分迅速。脉冲形式的光纤激光器可保证良好的光束质量, 在较低的平均输出功率下获得极高的重复频率和峰值功率, 同时还具有极好的柔性、与灵活性、可设计高可靠性、易于系统集成等优点。由于在未来高速光通信领域具有重要应用价值, 超短脉冲光纤激光器已成为目前激光技术领域最具活力的研究对象。

随着人工智能等技术的蓬勃发展, 智能化成为近年来各行各业发展的一个趋势。人工智能技术的广泛应用为各行各业带来了前所未有的发展

机遇。人工智能技术正在不断渗透到人类的生产生活各个领域。人类的生产生活方式也将因此发生深刻改变。激光制造作为高端制造产业的重要分支, 具有柔性、绿色、高速、高精度等特点。这些先天“基因”优势非常适合与信息化、互联网、人工智能相结合, 因此, 对于高端制造行业的激光产业来说, 智能化也将成为必然趋势。经过多年发展, 通信与光电子行业的融合正在显示巨大的产业前景。可以预见, 智能光电子及智能光通信领域将是未来光电子产业的重点发展方向。

1 智能光子器件研究简介

最近 10 年来, 人工智能技术快速发展, 以算法为基础的人工智能技术正在广泛应用到各行各业。算法是

用来解决一个具有良好规格说明的计算问题的工具。随着科技的发展, 计算机软硬件技术不断更新, 越来越多规模大且复杂程度高的工程和经济问题迫使研究者们研发更多的算法以进一步提高效率、节约资源。模拟自然现象和人类智慧的智能优化算法近年来逐渐成为研究热点。按照智能优化算法解决问题的方式划分, 已经开发出的算法有模拟退火算法、神经网络算法、遗传算法、蚁群算法和粒子群算法等, 这些算法有各自的适用域和局限性。随着人工智能技术的快速发展, 智能算法将在越来越多的场景中发挥独特作用。

智能光子器件是将智能算法等数学工具应用到光学领域并实现某种特定功能的器件。伴随着人工智能技术的发展, 智能光子器件近年来开始吸

引来越来越多研究者的注意。

2 智能光子器件研究进展

根据功能划分,智能光子器件包括智能激光器、智能通信器件、智能光传感器等。目前已经被研究者们重点研究并取得重要成果的是智能锁模光纤激光器。

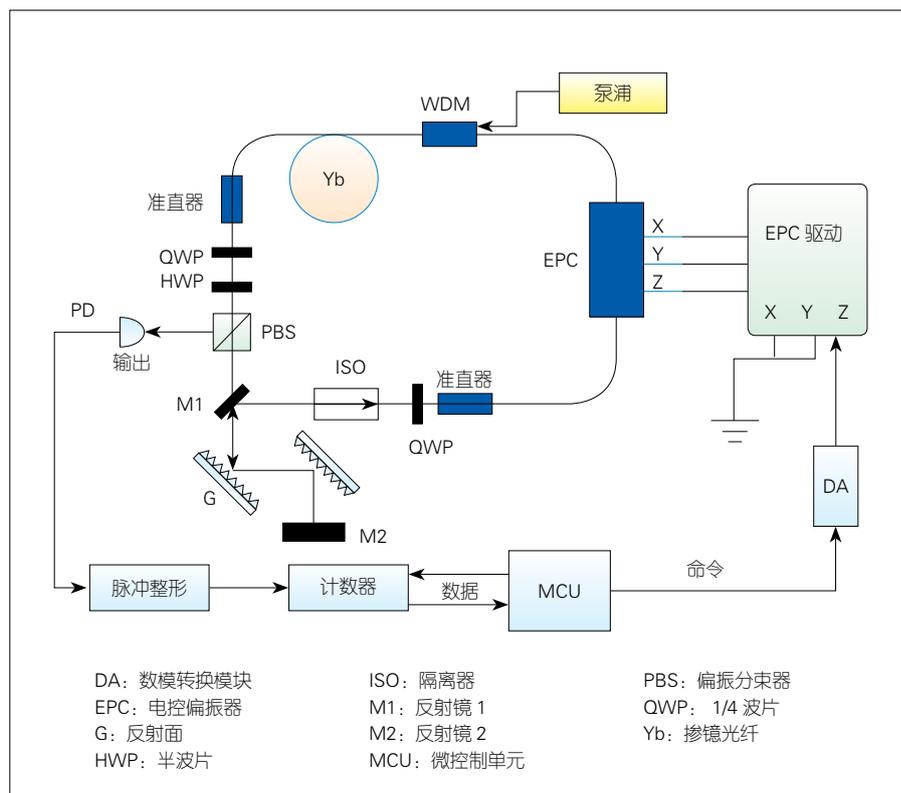
锁模激光技术是在激光器内不同振荡纵模之间实现位相锁定,最终获得规则序列的超短脉冲的技术。光纤激光器中产生超短脉冲的主要方式是被动锁模技术。被动锁模技术通过引入可饱和吸收的机制来实现激光锁模。根据机制引入的方式,被动锁模激光器中的可饱和吸收体主要包括真实可饱和吸收体和人工可饱和吸收体两类。真实可饱和吸收体是指在激光腔内插入具有可饱和性质的材料器件实现锁模。目前在近红外波段比较成熟的是半导体可饱和吸收镜 (SESAM)^[1]。由于其稳定性较好的特点,SESAM 锁模激光器是目前主流的商用锁模激光器。然而,SESAM 波长响应范围比较窄,无法适用于宽波段的激光锁模。尤其是对于 2 μm 及以上的波段,由于缺乏稳定可靠的可饱和吸收体,锁模光纤激光器的发展一直相对滞后。

人工可饱和吸收体包括非线性偏振旋转 (NPR)^[2]、非线性光纤环形镜^[3]等。在非线形偏振旋转被动锁模的情况下,当具有任意偏振的光入射到装置中时,由于光纤前起振器的作用,入射光的偏振态将被转换成线偏振。当入射光在光纤中传播时,由于单模光纤双折射的存在,光的偏振在一定长度的传播后将变成椭圆偏振。在光强较弱的情况下,随着光纤长度的增加,光的偏振将在每一拍长内旋转。然而,如果光的强度较大,在光克尔效应 (即光纤的自相位调制) 的作用下,非线性相移会被引入,从而

导致光的偏振发生改变。此外,光通过起偏器的传输也取决于光的强度。若偏振控制器和偏振器的方向设置得当,光越强,通过分析仪的光强传输就越大,由此将形成可饱和吸收效应,最终产生锁模脉冲。值得注意的是,在非线形偏振旋转锁模光纤激光器中,偏振相关元件必须插入激光器腔中。腔中存在偏振敏感元件时将固定光在空腔位置的偏振态,因此,在非线形偏振旋转锁模光纤激光器中形成的孤子表现为标量孤子特性。1992年, MATASA V. J. 等首次通过非线性偏振旋转锁模技术实现输出脉宽 1.55 ps 的全光纤激光器^[4]。2007年, TANG D. Y. 等对非线性偏振旋转锁模激光腔内进行非线性管理,得到 38.8 MHz 重复频率、47 fs 脉宽的输出脉冲光^[5]。然而,基于非线性偏振旋转效应的被动锁模光纤激光器具有偏振敏感性且不够稳定,这大大限制了其在科学研究和工

业生产中的应用。

目前,现有报道的智能锁模光纤激光技术主要针对基于非线性偏振旋转的锁模技术的缺点,即为了解决非线性偏振旋转锁模存在的不稳定等问题而发展出来的改进技术。智能激光锁模技术也开始兴起,并且取得了不错的研究成果。2010年,德国明斯特大学 HELLWIG T. 等通过在激光器腔内加入模块结构化的压电式挤压器作为自动偏振控制器件,并使用全光纤振幅分割偏振计测量腔内的偏振态,得到了基于非线性偏振旋转效应的锁模特征分布图^[6],为自动锁模的发展奠定了良好的基础。2012年,华东师范大学曾和平教授团队利用遍历和脉冲计数的方法,结合电控偏振控制器 (EPC),实现了初步的自动锁模^[7]。该实验装置如图 1 所示,其中偏振分束器 (PBS) 作为输出耦合器将谐振腔中的部分光输出到腔外进行检测。光



▲图 1 基于非线性偏振旋转锁模自动控制实验装置图^[7]

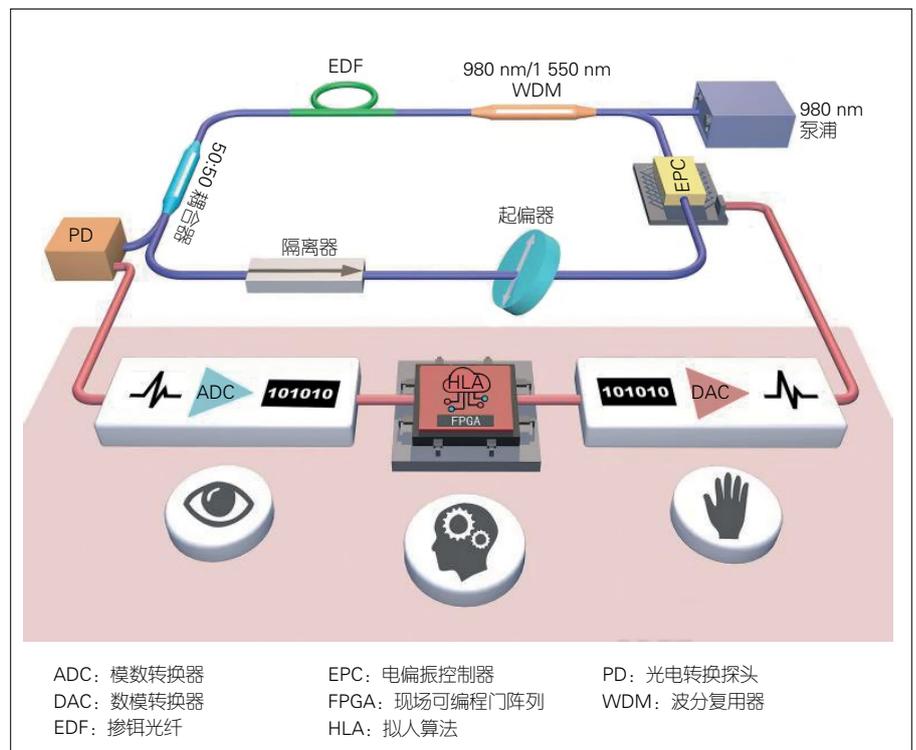
电探测器 (PD) 获得的电信号之后进入脉冲整形模块变成数字信号。该装置用一个高速计数模块进行脉冲计数, 然后将计数结果传递给微控制单元 (MCU)。MCU 根据计数的结果来判定当前是否为锁模状态, 并改变 EPC 的控制电压, 直至找到锁模状态为止。为实现脉冲的高信噪比, 可通过调节 2 个腔内衍射光栅之间的距离, 将光纤激光器腔内的色散优化接近为零, 并通过调整腔内的 3 个波片来微调腔内的偏振态。该实验装置还能精调锁模状态的光谱形状、脉冲宽度和载波包络偏置频率。在光路不变的情况下, 可通过 MCU 设置精确的电压值, 来驱动 EPC 直接复现锁模状态。

2014 年, 中国科学技术大学李莎等利用 MSP430 型单片机、电磁铁偏振控制器以及数模转换器等器件实现光纤激光器自动锁模^[8]。他们同样采用整形电路来获取数字信号并在 MCU 中进行数据处理, 在 MCU 上运行以脉冲计数为核心的快速鉴别算法来反馈控制偏振控制器, 最后达到锁模状态。该锁模激光器通过持续监测输出信号, 实现失锁恢复功能, 具备一定的抗环境干扰能力。此外, 锁模时 MCU 输出的参数可以被保存在带电可擦可编程只读存储器中, 这样系统下次工作时可以立刻进入锁模状态。该实验得到了重复频率为 6.238 MHz 的自动锁模脉冲, 并且锁模启动时间小于 90 s。基于此结构实现的自动锁模在后续改进算法和提高系统工作频率后可以将锁模时间降低到 20 s 以内。同年, 美国华盛顿大学西雅图分校 KUTZ J. N. 教授团队首次将机器学习应用到自动锁模, 并提出“自调谐光纤激光器”的概念^[9]。自适应控制的机器学习策略, 能够产生有效的自调谐锁模算法。其中, 基于多参数的极值寻找控制算法的自适应控制器能够在锁模激光器中

获得并保持高功率单脉冲状态, 而且机器学习算法能够学习谐振腔的特征, 并进行快速的状态识别来改善性能。该实验中的目标函数将输出功率除以脉冲频谱的四阶中心距, 从而使得总能量与锁模方案的时间保持平衡。2015 年, 法国勃艮第大学的 ANDRAL U. 等首次提出利用演化算法, 结合电动偏振控制器实现自动锁模^[10]。该演化算法模仿生物进化过程来优化给定的控制目标, 并且算法能够在 12 代之内收敛, 即 12 代之内可以找到目标脉冲状态, 这对应着 30 min 的算法运行时间。该实验中的收敛时间主要受限于 EPC 的热响应时间, 所以使用更快的 EPC 可以大大减少算法收敛的时间。此外, 该实验不仅实现了基频锁模, 还实现了不稳定的调 Q 锁模。2016 年, 英国帝国理工学院 WOODWARD R. I. 等^[11]通过使用遗传算法对腔内的偏振态进行优化实现了自动锁模。2017 年, 美国科罗拉多大学的 WINTERS D.

G. 等利用遗传算法实现全正常色散光纤激光器的自动锁模, 同时利用爬山算法进行失锁恢复^[12]。在这些自动锁模相关的研究中, 自动锁模往往需要耗时约 30 min。其中, 已经实现的最短锁模时间为 90 s, 最短的失锁恢复时间为 30 s。

最近, 上海交通大学义理林教授课题组开发了基于拟人算法的智能锁模激光器, 如图 2 所示。该装置利用模数转换器 (ADC)、现场可编程门阵列 (FPGA) 和模数转换器 (DAC) 组成实时反馈控制电路。结合拟人算法和实时反馈控制电路, 该智能锁模光纤激光器可以自动锁定至基频锁模、谐波锁模、调 Q 和调 Q 锁模等多种脉冲状态。此外, 该智能锁模光纤激光器大幅刷新自动锁模和失锁恢复的耗时记录。实验中最快自动锁模仅耗时 0.22 s, 最快失锁恢复仅耗时 14.8 ms^[13]。之后该课题组又结合时间拉伸技术, 利用实时光谱对智能锁模激光器做了



▲图 2 基于拟人算法的智能锁模光纤激光器装置示意图^[13]

进一步研究^[14]。

值得注意的是,目前智能激光器的研究报道仅限于利用非线性偏振旋转锁模的光纤激光器,该领域的研究刚刚起步,尚有很大的发展空间。

3 智能光子器件研究展望

本节中,我们将介绍智能光子器件的未来研究发展方向。

3.1 基于实时光谱探测的智能光子器件

最新研究表明,智能锁模技术与时间拉伸色散傅里叶变换技术相结合。时间拉伸色散傅里叶变换,又称时间拉伸变换或时域傅里叶变换,是一种光谱学技术。其基本思想是利用光学色散来区分不同波长的光,进而实现实时分析光谱的目标。该技术被最早提出应用于模数转换,以克服模数转换的速度及分辨率限制,其后又被应用到实时光谱仪、实时成像、光学怪波、高速显微镜、受激拉曼光谱仪等。如果把时间拉伸色散傅里叶变换技术所测的实时光谱数据融入智能算法中,将有望大幅提高算法的准确度,进而可缩减激光器锁模启动时间,快速找到目标状态进行研究。时间拉伸色散傅里叶变换技术还可以对智能锁模的启动过程实时监控,快速排查系统故障,便于改进及优化算法等。将智能锁模技术与时间拉伸色散傅里叶变换技术同时运用到光纤激光器锁模,有望解决锁模激光稳定性不高的问题。深入研究激光器的锁模脉冲动力学特性,有助于加深对光纤激光器特性的理解和认识。

3.2 基于二维材料的中红外智能光子器件

近年来,中红外波段光纤激光器已成为领域内新的研究方向。中红外波段的激光在激光通信、激光雷达、

环境监测、医疗、工业加工、激光武器对抗等领域中有着极其重要的应用。比如,2 μm 中红外波段激光对水吸收强烈,因此可在医学上用于激光微治疗和组织切除手术。传统的塑料材料对于紫外到近红外的激光几乎没有吸收,而2 μm 波段激光正好位于大部分聚合物的吸收带,因此,2 μm 激光可用于聚合物材料的切割焊接等。中红外波段位于大气吸收窗口。位于中红外波段的脉冲激光可用于激光测距、远程遥感、无线通信等方面。大部分军用探测传感器的响应波长都位于中红外波段,峰值功率高的中红外超短脉冲激光用于红外干扰。中红外激光的广阔应用前景以及中红外激光器极具活力的市场,在近年来引起学术界和工业界的广泛关注。大力发展中红外激光已经成为激光领域的新趋势。现有的中红外激光产生的方式包括半导体激光器、光学倍频激光器、过渡金属元素掺杂 II-VI 族化合物激光器、光纤激光器等。而较为常见的在2 μm 波段产生超短脉冲的激光源,主要有掺铊激光器、铊钽共掺激光器、基于拉曼频移的掺铟光纤激光器等。

相比于近红外锁模激光器,由于缺乏该波段的可饱和吸收体,2 μm 的中红外锁模激光发展相对滞后。2014年,黑磷作为厚度相关的直接带隙材料被发现,它具有实现新型光电器件的应用潜力,特别适合用于2 μm 中红外波长锁模光纤激光器的研究。江苏师范大学、上海交通大学、国防科技大学、波兰华沙理工大学等均对基于黑磷锁模的中红外激光器进行了相关报道。虽然黑磷材料的出现有效地解决了中红外波段可饱和吸收体器件缺乏的问题,但是目前黑磷在2 μm 波段的超短脉冲研究还处于早期阶段。由于缺乏黑磷锁模的中红外光纤激光器的系统性研究,人们对谐振腔脉冲产

生机制缺乏足够认识,仍然存在无法自启动、脉冲质量不高、无法满足高功率激光需求等问题。针对中红外超短脉冲的应用需求及传统锁模技术难以适用于中红外波段的局限,智能算法可以被进一步用于研究中红外波段被动锁模脉冲的产生机理及其特性,和研发中红外波段的智能锁模激光器。同时针对黑磷等二维材料制备工艺尚不完全成熟的现状,智能算法可对材料品质进行快速测试,同时反馈出符合要求的材料,以加快二维材料相关的光电应用及发展。

3.3 智能光学频率梳

光学频率梳由等距线组成,而频谱是由一系列均匀间隔且具有相干稳定相位关系的频率分量组成的光谱。光学频率梳光源的发展仍然是一个相对年轻的研究领域。近年来,光频梳的应用逐渐增多,如精密激光光谱和频率计量遥测、光学波形、微波合成、超高数据速率传输、微波滤波、太赫波产生等。目前已经有多个产生光频梳的方法,基于微谐振器的光频梳生成、垂直外腔表面发射激光器和锁模光纤激光器。

光频梳对输出频率梳齿的稳定性有很高要求,这对于锁模光纤激光器的脉冲稳定性是个很大的挑战。而基于智能锁模的孤子光纤激光器,有望解决这一问题。如前所述,可编程的智能锁模光纤激光器具有自动恢复的功能,可对脉冲抖动情况进行实时监控,这对于提高脉冲的稳定性具有重大意义。2015年,美国 KUTZ J. N. 等介绍了利用机器学习的方法稳定锁模激光器及频率梳的方法^[15]。他们将近年出现的数据驱动的方法结合起来,构建一种能够在锁模激光器中实现自校正和接近最优性能算法。该算法结构既有学习模块,也有执行模块。

该算法实现了光学频率梳的自调谐。这一探索为未来智能光频率梳的发展提供了重要参考。

3.4 其他智能光子器件

可以预见的是,智能光子器件的研究并不局限于上述介绍的部分,例如全光通信、光传感等应用场景对智能化同样具有较高的需求。结合目前的发展状况,研究者们有望在未来开发出智能波长转换器、智能光开关、智能光纤传感器、智能光滤波器等一批新型光学器件。

4 结束语

本文中,我们简要回顾了智能光子器件的相关研究,重点梳理了将传统超短脉冲光纤激光器优化改进成输出特性可编程的智能锁模激光器的相关研究进展,同时对该领域的未来发展做了一些展望,包括中红外光纤激光器、光学频率梳、光纤通信器件等相关领域,为未来光子技术智能化和产业化提供重要参考。

参考文献

- [1] KELLER U, WEINGARTEN K J, KARTNER F X, et al. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers [J]. IEEE journal of selected topics in quantum electronics, 1996, 2(3): 435-453. DOI:10.1109/2944.571743
- [2] MATSAS V J, NEWSON T P, RICHARDSON D J, et al. Selfstarting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation [J]. Electronics letters, 1992, 28(15): 1391. DOI:10.1049/el:19920885
- [3] WU S, MORSE T F, STRAIT J, et al. High-power passively mode-locked Er-doped fiber laser with a nonlinear optical loop mirror [J]. Optics letters, 1993, 18(17): 1444. DOI:10.1364/ol.18.001444
- [4] POOLE S B, PAYNE D N, FERMAN M E. Fabrication of low-loss optical fibres containing rare-earth ions [J]. Electronics letters, 1985, 21(17): 737-738. DOI:10.1049/el:19850520
- [5] TANG D Y, ZHAO L M. Generation of 47 fs pulses directly from an erbium-doped fiber laser [J]. Optics letters, 2007, 32(1): 41-43. DOI:10.1364/ol.32.000041
- [6] HELLWIG T, WALBAUM T, GROB P, et al. Automated characterization and alignment of passively mode-locked fiber lasers based on nonlinear polarization rotation [J]. Applied physics B, 2010, 101(3): 565-570. DOI:10.1007/s00340-010-4224-2
- [7] SHEN X L, LI W X, YAN M, et al. Electronic control of nonlinear-polarization-rotation mode locking in Yb-doped fiber lasers [J]. Optics letters, 2012, 37(16): 3426-3428. DOI:10.1364/ol.37.003426
- [8] LI S, XU J, CHEN G, et al. An automatic mode-locked system for passively mode-locked fiber laser[C]//2013 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Devices and Optical Signal Processing. Beijing, China: International Society for Optics and Photonics, 2013
- [9] BRUNTON S L, FU X, KUTZ J N. Self-tuning fiber lasers [J]. IEEE journal of selected topics in quantum electronics, 2014, 20(5): 464-471. DOI:10.1109/jstqe.2014.2336538
- [10] ANDRAL U, SI FODIL R, AMRANI F, et al. Fiber laser mode locked through an evolutionary algorithm [J]. Optica, 2015, 2(4): 275-278. DOI:10.1364/optica.2.000275
- [11] WOODWARD R I, KELLEHER E J R. Towards 'smart lasers': self-optimisation of an ultra-fast pulse source using a genetic algorithm [J]. Scientific reports, 2016, 6: 37616. DOI:10.1038/srep37616
- [12] WINTERS D G, KIRCHNER M S, BACKUS S J, et al. Electronic initiation and optimization of nonlinear polarization evolution mode-locking in a fiber laser [J]. Optics express, 2017, 25(26): 33216-33225. DOI:10.1364/oe.25.033216
- [13] PU G Q, YI L L, ZHANG L, et al. Intelligent programmable mode-locked fiber laser with a human-like algorithm [J]. Optica, 2019, 6(3): 362-369. DOI:10.1364/optica.6.000362
- [14] PU G Q, YI L L, ZHANG L, et al. Intelligent control of mode-locked femtosecond pulses by time-stretch-assisted real-time spectral analysis [J]. Light: science & applications, 2020, 9: 13. DOI:10.1038/s41377-020-0251-x
- [15] KUTZ J N, BRUNTON S L. Intelligent systems for stabilizing mode-locked lasers and frequency combs: machine learning and equation-free control paradigms for self-tuning optics [J]. Nanophotonics, 2015, 4(1): 459-471. DOI:10.1515/nanoph-2015-0024

作者简介



宋宇锋, 深圳大学助理教授; 主要研究领域为非线性光纤光学及全光信号处理; 已发表论文 50 余篇, 总被引用超过 1 400 次, H 因子 21。



张晗, 深圳大学特聘教授、博士生导师, 深圳市黑磷工程实验室主任, 美国光学学会会士, 首届基金委“优青”, 国家“青年人才”, 高被引科学家, 广东省领军人才; 长期致力于信息功能器件带宽、动态调控、响应速度等性能优化, 研制出面向

国家重大战略需求的高性能新一代光电子材料与器件; 获教育部自然科学二等奖、中国产学研合作创新奖、中国光学十大进展奖、广东省丁颖科技奖、深圳市青年科技奖、深圳市自然科学基金奖等; 在《Physics Reports》《Proceedings of the National Academy of Sciences》等期刊发表论文 200 余篇, 总被引超过 3 万次, H 因子 85。

《中兴通讯技术》第 26 卷总目次

卷·期·次

卷·期·次

卷首特稿

关于 5G 的十点思考 邬贺铨 26-1-02

专题

专题：蜂窝车联网产业与技术

车联网产业进展及关键技术分析	
..... Wai CHEN, 李源, 刘玮	26-1-05
基于车辆行为分析的车联网超可靠低时延通信关键技术	
..... 张海霞, 刘文杰, 薛彤, 梁聪	26-1-12
C-V2X 与智能车路协同技术的深度融合	
..... 张杰	26-1-19
基于数字孪生的网联自动驾驶测试方法研究	
..... 葛雨明, 汪洋, 韩庆文	26-1-25
基于 C-V2X 直连通信的车辆编队行驶性能优化	
..... 付思雨, 姜之源, 张舜卿	26-1-30
车联网高层协议关键技术	
..... 罗薇, 汪梦珍, 许玲	26-1-35
5G NR-V2X 直连通信频率需求研究	
..... 李俨, 高路	26-1-40
感知 - 通信 - 计算融合的智能车联网挑战与趋势	
..... 尉志青, 马昊, 张奇勋, 冯志勇	26-1-45
中欧 V2X 联合试验关键场景及技术	
..... 陈涛, Matti KUTILA, 郑银香, 邓伟, 王江舟	26-1-50

专题：智能化通信应用芯片技术

智能光子处理系统：概念与研究进展	
..... 邹卫文, 马伯文, 徐绍夫	26-2-02
面向 6G 的可见光通信	
..... 迟楠, 贾俊连	26-2-11
智能微波光子射频前端与链路	
..... 邹喜华, 李沛轩, 刘丰玮	26-2-20
自动锁模光纤激光器研究进展	
..... 义理林, 张力, 蒲国庆	26-2-28
半导体智能视觉系统芯片	
..... 吴南健	26-2-38
硅基集成激光雷达技术	
..... 王鹏飞, 罗光振, 潘教青	26-2-43
智能硅基多维复用与处理芯片	
..... 王健, 郑爽, 曹晓平	26-2-51
智能化可重构硅光集成器件及芯片应用研究	
..... 谢意维, 张涛, 戴道锌	26-2-64

专题：5G 核心网技术与挑战

5G 核心网的部署问题与建议	
..... 聂衡, 赵慧玲, 毛聪杰	26-3-03
5G 核心网商用关键技术与挑战	
..... 王卫斌, 陆光辉, 陈新宇	26-3-09
5G 核心网规划建设挑战及策略	
..... 肖子玉	26-3-17
5G 核心网技术演进及挑战	
..... 赫昱, 苗杰, 童俊杰	26-3-23
MEC 的云边协同分析	
..... 杨鑫, 赵慧玲	26-3-27
硬件加速在核心网转发面应用的思考和实践	
..... 王升, 班有容, 陈佳媛, 张昊	26-3-31
ENI 辅助的 5G 网络切片智慧运营	
..... 王海宁	26-3-37
5G SA 网络引入 IPv6 的思路探讨	
..... 马晨昊, 解冲锋, 郑伟, 李聪	26-3-43
5G 核心网创新技术研究及应用探索	
..... 陆光辉, 毛磊, 冯建业	26-3-49

专题：无线网络空中计算

移动边缘计算中的资源管理	
..... 游昌盛	26-4-02
大规模移动边缘计算网络：空间建模及计算吞吐量优化	
..... 韩凯峰, 胡昌军, 刘铁志	26-4-06
基于神经网络计算的无线容量高实时预测	
..... 赖昱辰, 钟祎, 王建峰	26-4-13
基于空中计算的无线群智感知	
..... 李晓阳, 贡毅	26-4-18
面向高效通信边缘学习网络的通信计算一体化设计	
..... 朱光旭, 李航	26-4-23
面向边缘智能的空中计算	
..... 曹晓雯, 莫小鹏, 许杰	26-4-31

专题：网络人工智能技术

分布式深度学习系统网络通信优化技术	
..... 董德尊, 欧阳硕	26-5-02
新型拓扑感知的参数交换方案	
..... 万鑫晨, 胡水海, 张骏雪	26-5-09
地理分布式机器学习：超越局域的框架与技术	
..... 李宗航, 虞红芳, 汪漪	26-5-16
面向分布式 AI 的智能网卡低延迟 Fabric 技术电信	
..... 熊先奎, 袁进辉, 宋庆春	26-5-23
运营商泛在智联网络的构建	
..... 解云鹏	26-5-29

算力网络中面向业务体验的算力建模	
..... 李建飞, 曹畅, 李奥, 庞博文	26-5-34
基于 AI 的运营级 IDC 节能研究	
..... 曾宇, 袁祥枫, 王海宁	26-5-39
超密集蜂窝网络智能干扰协调算法	
..... 秦爽, 董星辰, 冯钢	26-5-45

专题：工业互联网技术与应用

5G+ 工业互联网应用实践	
..... 陈亿根, 尹晓峰, 邵黎勋	26-6-02
5G+ 工业互联网能力开放进展和研究	
..... 邢真, 邵伟翔, 高峰	26-6-07
水泥行业融合 5G+ 工业互联网的技术发展思考	
..... 黄颖, 杨晓芳, 王鹏	26-6-11
可定制的 5G+ 工业互联网安全能力	
..... 王继刚, 王庆, 滕志猛	26-6-14
工业互联网场景下 5G TSN 关键技术研究	
..... 张强, 王卫斌, 陆光辉	26-6-21
工业互联网标识在家居定制行业中的应用探索	
..... 区景安, 汪毅, 陈琴	26-6-27

专家论坛

车联网产业发展分析	
..... 汤立波	26-1-56
C-V2X 技术在智能网联行业中的应用探讨	
..... 宋蒙, 刘琪, 许幸荣, 王题	26-1-60
下一代非易失性硅基集成光开关探讨	
..... 周林杰	26-2-70
网络融合深化使能 5G 全场景多维度服务	
..... 孙滔, 陆璐, 刘超	26-3-56
万物互联, 任重道远	
..... 李少谦	26-4-38
网络管理自动化中闭环形成的概念	
..... 孟洛明	26-4-40
通信产业发展回顾与展望	
..... 张云勇	26-4-43
知识 + 数据驱动学习: 未来网络智能的基础	
..... 朱近康	26-4-46
针对 5G/B5G 的大规模 MIMO 系统射频前端设计	
..... 马建国	26-4-50

无线物理层认证技术: 昨天、今天和明天	
..... 任品毅	26-4-58
数据驱动的智能电信网络	
..... 程强, 刘姿杉	26-5-53
工业互联网技术洞察	
..... 沈彬, 李海花, 高腾	26-6-34
中国工业互联网投融资现状分析与建议	
..... 王欣怡, 肖荣美	26-6-38

企业视界

5G: 期待中发展 质疑中生长	
..... 王喜瑜	26-1-64
5G 核心网演进需求及关键技术	
..... 王卫斌, 朱进国, 王全	26-1-67
5G 场景化网规方案探讨	
..... 邹广玲, 潘彩华	26-2-74
6G 技术挑战、创新与展望	
..... 方敏, 段向阳, 胡留军	26-3-61
5G 赋能 B 端, 助力行业转型	
..... 左罗, 陈亚斌	26-3-71
确定性网络技术及应用场景研究	
..... 魏月华, 喻敬海, 罗鉴	26-4-67
5G+ 工业互联网的思考与实践	
..... 赵维铎, 蒋伯章	26-5-57
5G 室内分布: 数字化转型之道	
..... 徐法禄	26-6-43

技术广角

NR 中集中式网元和分布式网元架构现状与进展	
..... 高音, 韩济任, 刘壮	26-1-73
高稳频窄线宽半导体激光器	
..... 陈伟, 班德超, 穆春元	26-3-78
微波光子镜频抑制混频系统及芯片技术	
..... 唐震宙, 潘时龙	26-5-61
智能可重构多芯光纤空分复用通信与光信号处理	
..... 唐明, 霍亮	26-5-67
基于 REC 技术的可调谐半导体激光器	
..... 陈向飞, 肖如磊, 陆骏	26-6-50
硅集成磁光非互易光学器件技术	
..... 刘书缘, 邓龙江, 毕磊	26-6-57
基于智能算法的光子器件研究展望	
..... 宋宇锋, 张晗	26-6-64

《中兴通讯技术》杂志（双月刊）投稿须知

一、杂志定位

《中兴通讯技术》杂志为通信技术类学术期刊。通过介绍、探讨通信热点技术，以展现通信技术最新发展动态，并促进产学研合作，发掘和培养优秀人才，为振兴民族通信产业做贡献。

二、稿件基本要求

1. 投稿约定

- (1) 作者需登录《中兴通讯技术》投稿平台：tech.zte.com.cn/submission，并上传稿件。第一次投稿需完成新用户注册。
- (2) 编辑部将按照审稿流程聘请专家审稿，并根据审稿意见，公平、公正地录用稿件。审稿过程需要1个月左右。

2. 内容和格式要求

- (1) 稿件须具有创新性、学术性、规范性和可读性。
- (2) 稿件需采用 WORD 文档格式。
- (3) 稿件篇幅一般不超过 6000 字（包括文、图），内容包括：中、英文题名，作者姓名及汉语拼音，作者中、英文单位，中文摘要、关键词（3~8 个），英文摘要、关键词，正文，参考文献，作者简介。
- (4) 中文题名一般不超过 20 个汉字，中、英文题名含义应一致。
- (5) 摘要尽量写成报道性摘要，包括研究的目的、方法、结果/结论，以 150~200 字为宜。摘要应具有独立性和自明性。中英文摘要应一致。
- (6) 文稿中的量和单位应符合国家标准。外文字母的正斜体、大小写等须写清楚，上下角的字母、数据和符号的位置皆应明显区别。
- (7) 图、表力求少而精（以 8 幅为上限），应随文出现，切忌与文字重复。图、表应保持自明性，图中缩略词和英文均要在图中加中文解释。表应采用三线表，表中缩略词和英文均要在表内加中文解释。
- (8) 所有文献必须在正文中引用，文献序号按其在文中出现的先后次序编排。常用参考文献的书写格式为：
 - 期刊 [序号] 作者. 题名 [J]. 刊名, 出版年, 卷号 (期号): 引文页码. 数字对象唯一标识符
 - 书籍 [序号] 作者. 书名 [M]. 出版地: 出版者, 出版年: 引文页码. 数字对象唯一标识符
 - 论文集中析出文献 [序号] 作者. 题名 [C]// 论文集编者. 论文集名 (会议名). 出版地: 出版者, 出版年 (开会年): 引文页码. 数字对象唯一标识符
 - 学位论文 [序号] 作者. 题名 [D]. 学位授予单位所在城市名: 学位授予单位, 授予年份. 数字对象唯一标识符
 - 专利 [序号] 专利所有者. 专利题名: 专利号 [P]. 出版日期. 数字对象唯一标识符
 - 国际、国家标准 [序号] 标准名称: 标准编号 [S]. 出版地: 出版者, 出版年. 数字对象唯一标识符
- (9) 作者超过 3 人时，可以感谢形式在文中提及。作者简介包括：姓名、工作单位、职务或职称、学历、毕业于何校、现从事的工作、专业特长、科研成果、已发表的论文数量等。
- (10) 提供正面、免冠、彩色标准照片一张，最好采用 JPG 格式（文件大小超过 100 kB）。
- (11) 应标注出研究课题的资助基金或资助项目名称及编号。
- (12) 提供联系方式，如：通讯地址、电话（含手机）、Email 等。

3. 其他事项

- (1) 请勿一稿多投。凡在 2 个月（自来稿之日算起）以内未接到录用通知者，可致电编辑部询问。
- (2) 为了促进信息传播，加强学术交流，在论文发表后，本刊享有文章的转摘权（包括英文版、电子版、网络版）。作者获得的稿费包括转摘酬金。如作者不同意转摘，请在投稿时说明。
- (3) 编辑部地址：安徽省合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 1201 室，邮政编码：230061。
- (4) 联系电话：0551-65533356，联系邮箱：magazine@zte.com.cn。
- (5) 本刊只接受在线投稿，欢迎访问本刊投稿平台：tech.zte.com.cn/submission。

中兴通讯技术

(ZHONGXING TONGXUN JISHU)

办刊宗旨:

以人为本, 荟萃通信技术领域精英
迎接挑战, 把握世界通信技术动态
立即行动, 求解通信发展疑难课题
励精图治, 促进民族信息产业崛起

双月刊 1995 年创刊 总第 155 期
2020 年 12 月 第 26 卷 第 6 期 (卷终)

主管: 安徽出版集团有限责任公司
主办: 时代出版传媒股份有限公司
深圳航天广宇工业有限公司
出版: 安徽科学技术出版社
编辑、发行: 中兴通讯技术杂志社

总编辑: 王喜瑜
主编: 蒋贤骏
执行主编: 黄新明
责任编辑: 徐烨
编辑: 杨广西、卢丹、朱莉、任溪溪
设计排版: 徐莹
发行: 王萍萍
外联: 卢丹
编务: 王坤

《中兴通讯技术》编辑部
地址: 合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 1201 室
邮编: 230061
网址: tech.zte.com.cn
投稿平台: tech.zte.com.cn/submission
电子信箱: magazine@zte.com.cn
电话: (0551)65533356

传真: (0551)65850139
发行方式: 自办发行
印刷: 合肥添彩包装有限公司
出版日期: 2020 年 12 月 25 日
中国标准连续出版物号: ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN
定价: 每册 20.00 元