



基于 F5G 技术的全域机械远控和超远控实践

俞申亮, 吴麒伟, 刘宗轶

(哪吒智慧科技(上海)股份有限公司, 上海 200082)

摘要: 针对港口第五代固定网络(F5G)技术应用中如何搭建全域通信基座并实现各类机械远控、超远控深度融合的问题, 进行上海港罗泾港区 F5G 网络架构及通信基座应用的研究。采用分析港区远控业务特点、分类设计不同业务应用方案的方法, 得出构建 F5G 无源极简网络架构和全光环网超远程通信基座, 能够保障港区全域内川丰、ABB 和 TMEIC 三种不同可编程逻辑控制器(PLC)系统控制信号实时通信, 同时三地全光环网可满足三个超远控中心大带宽、海量连接、低时延和零丢包需求的结果。基于 F5G 技术的远控业务分类设计能为 14 台岸桥和 31 台轨道吊提供稳定的远控业务传输网络, 可为多机械多应用融合协同作业提供理论支持, 对提升装卸作业效率、推动港区全域机械常态自动化、建设超远控中心等方面具有重要的参考借鉴意义。

关键词: F5G; 远控; PLC; 自动化装卸; 工业光网

中图分类号: U653.99

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)S1-0196-07

Practice of full-domain machinery remote control and ultra-remote control based on F5G technology

YU Shenliang, WU Qiwei, LIU Zongyi

(Nize Intelligent Technology Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: Concerning how to build an all-domain communication infrastructure and deep integration of various machines with remote and ultra-remote control based on fifth-generation fixed network (F5G) technology application in ports, we conduct research on the application of F5G network architecture and communication infrastructure in Luojing port area in Shanghai Port. By analyzing the characteristics of remote control operations in the port and the method of designing different business application schemes in a classified manner, we obtain the results that the construction of an F5G passive simple network architecture and an ultra-remote fully optical ring network communication infrastructure can ensure the real-time communication of control signals from three different programmable logic controller (PLC) systems, namely Chuanfeng, ABB, and TMEIC in entire port area. Meanwhile, the three-location fully optical ring network can meet the requirements of large bandwidth, massive connectivity, low latency, and zero packet loss for three ultra-remote control centers. The classified design of remote control operations based on F5G technology can provide stable remote control data transmission links for 14 quay cranes and 31 rail-mounted gantry cranes. The results offer theoretical support for the integrated collaborative operation of multiple machines and applications, and has significant reference value for promoting the normal automation of all-domain machinery in port areas, the establishment of ultra-remote control centers.

Keywords: F5G; remote control; PLC; automated loading and unloading; industrial optical network

数字时代需求勃发, 固定网络技术跃升, 第五代固定网络技术(the fifth generation fixed networks,

F5G)应运而生。F5G 概念最早由欧洲电信标准协会于 2020 年 2 月提出, 主要业务是固定网光纤宽

收稿日期: 2025-05-15

作者简介: 俞申亮(1981—), 男, 高级信息系统项目管理师, 从事港航领域信息化系统建设和研究工作。

带接入。F5G 具备大带宽、海量连接、微秒级时延和零丢包的特点^[1]。2021 年 3 月,国家工业和信息化部印发《“双千兆”网络协同发展行动计划(2021—2023 年)》^[2],系统推进 5G 和千兆光网的建设。

2020 年,上港集团首次把岸桥与场桥远程操控作业从码头现场迁移至临港超远控中心。自此,操作员即使身处 40 km 以外,也能实时对洋山岛的各类大型机械进行远程操控^[3]。这个举措彻底解决了往返码头的通勤问题,显著提升了操作员工作与生活的幸福感。如今,宁波港、天津港、北部湾港也陆续实现基于 F5G 的机械远程控制实践,但如何在同一个港区或多个港区实现全域多种机械的远程控制与超远程控制应用,成为当下亟待深入研究的新课题。

本文结合上海港罗泾港区智慧港口场景的应用实践,详细阐述基于 F5G 工业无源光网络(passive optical network, PON)和光传输网络(optical transport network, OTN)技术,构建无源极简网络架构的全光通信基座和三地全光环网广域互联的完整方案。整体方案可以实现港区全域内配置川丰、ABB 和 TMEIC 三种不同可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)系统的机械群的高效精准远程控制,并可以为 3 个超远控中心提供全域机械超远程控制的应用基础。

1 F5G 关键技术

1.1 PON 技术起源

1966 年,华裔科学家高锟先生奠定了光纤通信的理论基础,此后,光纤通信技术迈入高速发展的阶段。F5G 关键技术以 PON 技术为基础,该技术在光纤到户(fiber to the home, FTTH)场景中已

经成熟运用超过 10 a。

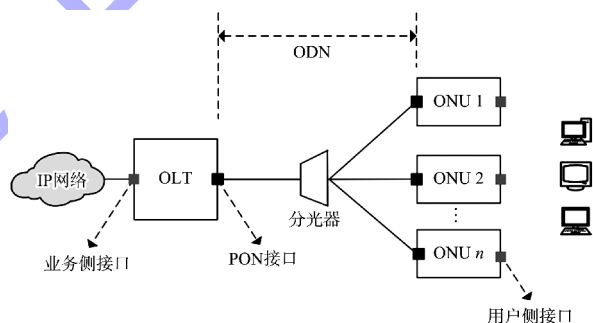
1.2 PON 网络架构

PON 网络架构属于二层网络架构,主要由光线路终端(optical line terminal, OLT)、光分配网(optical distribution network, ODN)、光网络单元(optical network unit, ONU)3 个部件构成。

1) OLT:一般放置在中心机房,是终端 PON 信号的汇聚设备,通过 PON 接口和 ODN 网络连接,对 ONU 进行集中管理^[4]。

2) ODN:由光纤、一个或多个无源分光器等无源光器件组成的无源网络,OLT 和 ONU 通过中间的无源 ODN 连接起来通信。

3) ONU:一般放置在用户侧,提供各种接口连接用户终端。将用户终端信号转换成 PON 信号,通过 PON 上行接口与 ODN 连接后传输给 OLT,OLT 将收到的 PON 信号处理后进行业务转发处理。PON 网络架构见图 1。



注:互联网协议(internet protocol, IP)。

图 1 PON 网络架构

Fig. 1 PON network architecture

2 港区网络架构对比

2.1 传统以太网架构

在港口场景下,传统以太网采用三层网络架构,即核心层、汇聚层和接入层。核心层交换机放置于核心机房,汇聚层交换机放置于变电所和港口机械的电气房,接入层交换机放置于港口机械的各机柜中。传统以太网架构见图 2。

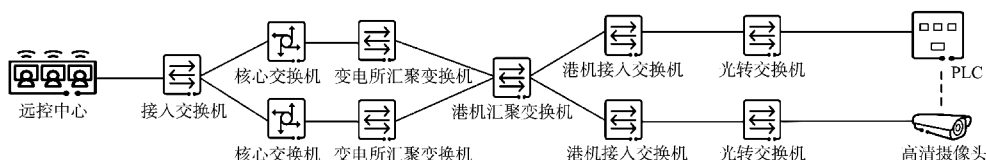


图2 传统以太网架构

Fig. 2 Traditional ethernet architecture

传统以太网架构中，核心和汇聚交换机之间、汇聚和接入交换机之间采用光纤连接。汇聚和接入交换机采用点对点技术通信，中间采用有源设备进行端口汇聚。

传统以太网架构中，汇聚交换机需要考虑有源设备的供电、散热和安全措施。

2.2 F5G 工业光网架构

F5G 工业光网架构采用二层网络架构，即核心层和接入层。核心层交换机和 OLT 设备放置于

核心机房，接入层的 ONU 设备放置于港口机械的各机柜中。F5G 工业光网架构见图 3。

F5G 工业光网架构中，OLT 和 ONU 之间采用光纤连接，OLT 和 ONU 之间采用点对多点技术通信，中间采用无源分光器进行光纤分配和聚合，不需要采用有源设备进行端口的汇聚。

F5G 工业光网架构中，没有汇聚层，不再需要考虑有源设备的供电、散热和安全措施。

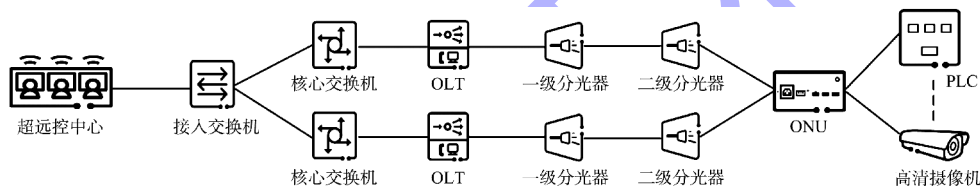


图3 F5G 工业光网架构

Fig. 3 F5G industrial optical network architecture

2.3 网络架构对比

F5G 工业光网架构采用 PON 技术^[5]，通过分光器复用光纤链路，实现多业务传输，减少光纤和交换机数量，节省大量有源设备，同时降低功耗和故障点，简化布线；而传统以太网架构依赖有源交换机，维护复杂、成本较高。

F5G 工业光网架构采用固定周期调度机制（如时分复用），提供微秒级确定性时延，满足工业控制、机器视觉等场景的严苛实时性需求；传统以太网架构采用交换转发机制，时延通常在毫秒级，存在排队抖动和协议处理延迟（如媒体接入控制层交换、生成树协议），当某一个视频流集中转发时会导致网络流量波动较大。

F5G 工业光网架构基于时分多址（time division multiple access, TDMA）的固定周期调度，在流量调度机制上严格保障高优先级业务（如 PLC 控制信号）的时延和带宽；支持硬隔离+软隔离结合，保

障端到端的带宽；通过 OLT 集中管控服务质量（quality of service, QoS）策略，避免数据冲突。传统以太网架构基于交换机的动态队列调度（如严格优先级/加权轮询等），易受突发流量影响，高优先级业务可能受低优先级流量干扰，且多级交换机易拥塞；虽然通过 QoS 策略（如限速、队列管理）可以缓解网络拥塞，但不能完全避免丢包，无法保障端到端的带宽。

通过技术上的相应优势可发现，F5G 工业光网架构在简化架构、降低成本、低时延和时延稳定性上显著优于传统以太网架构，尤其适合对实时性要求严苛的自动化远程控制作业应用场景（如 PLC 控制、机器视觉）。

3 F5G 应用实践

3.1 上海港罗泾港区概况

上海港罗泾港区始建于 20 世纪 90 年代，是

上海港重要的散杂货码头,原有设施已无法适应现代智能化、绿色化港口的发展需求。随着长江经济带战略推进,上海港急需在罗泾港区推动“智慧港口”的建设,以提升集装箱吞吐效率、降低碳排放量。

因此,上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程(简称罗泾改造一期工程)以智能化、绿色化、高效化为核心^[6],将原有散货码头(煤炭、矿石)改造为全自动化集装箱码头,改造后码头平面呈反 F 形,分前、后、内三档布置,前挡泊位总长度 712.1 m,后档泊位长度 360 m;内档泊位长度 360 m。重箱堆场总面积约 44.31 万 m²。自动化码头装卸船作业配置 7 台吊具下额定起吊质量 70 t、4 台吊具下额定起吊质量 65 t、3 台吊具下额定起吊质量 41 t,自动化堆场作业配备 11 台单悬臂自动化轨道式集装箱龙门起重机(automated rail mounted gantry crane, ARMG)、20 台双悬臂 ARMG。水平运输作业配备 60~90 辆智慧型引导运输车(intelligent guided vehicle, IGV)。一期设计吞吐量为 260 万 TEU/a。

本文工程选择多种 PLC 远程控制的岸桥和轨道吊自动化装卸机械,符合基于 F5G 技术的全域机械远控和超远控研究的应用场景。因此,整体改造工程以保障现场整体作业机械实现设备低时延稳定通信为目标,基于 F5G 技术设计网络架构及通信基座应用。通过 F5G 工业 PON 实现多业务应用间的隔离安全,在多种 PLC 控制系统共存的生产环境下,保障生产数据、视频监控、设备控制等多业务并行稳定传输。通过 F5G 和 OTN 部署三地全光环网广域互联,为三地超远控中心搭建坚实基础。

本文工程是散货改成集装箱码头的成功案例,其中“F5G+自动化远控”方案可以为传统内河码头改造智能化集装箱码头工程提供参考依据。

3.2 F5G 工业光网机械侧解决方案

3.2.1 全域机械网络流量设计

本文工程涉及自动化轨道吊 31 台、岸桥 14 台,其中轨道吊根据悬臂结构划分为单悬臂和

双悬臂两种大类,其中双悬臂轨道吊 20 台、单悬臂轨道吊 11 台。

单机按接入工业光网的设备种类和特性划分网络带宽^[7],主要业务分为 PLC 工业控制、视频图像监控、激光成像及智能识别、门禁安全和语音对讲交互等。网络带宽规划见表 1。

表 1 网络带宽规划
Tab. 1 Network bandwidth planning

业务分类	带宽/Mbps	时延/ms	业务优先级规划
PLC 工业控制	10	<2	最高
视频图像监控	10~50	<20	高
激光成像及智能识别	20~50	<1 000	较低
门禁安全	10~40	<1 000	较低
语音对讲交互	5~10	<100	低

单机总流量为 1 970 Mbps,单机带宽设计为 2 Gbps。

单机接入设备端口数量 42 个。按接入设备数量设计规划每台机械的 ONU 终端。

每台双悬臂轨道吊部署 6 套 8 端口 ONU 终端;每台单悬臂轨道吊部署 5 套 8 端口 ONU 终端;每台岸桥部署 7 套 8 端口 ONU 终端。

ONU 接入终端类型分为 PLC 工业控制终端、视频图像监控设备和其他子系统。按系统的重要程度划分接入 ONU 端口的方式和优先级。例如,PLC 系统是远控指令传输的重要系统,必须单独直连 ONU 端口,并分配为第一业务优先级,以保障远控作业的安全和稳定^[8]。

3.2.2 全域机械光功率设计

F5G 工业光网的无源光链路需要进行严格的物理层光功率计算,计算参数应包含设备、材料、光纤传输距离、环境老化等因素。光功率考虑因素见表 2。

表 2 光功率考虑因素
Tab. 2 Optical power consideration factors

设备分类	损耗值	估算量
1:4 分光器	8 dB	1
1:16 分光器	14 dB	1
光纤损耗	0.4 dB/km	10 km
光纤耦合器插损	0.5 dB	10
环境老化预留	3~5 dB	1

光链路总损耗为 35 dB, 选择 35~40 dB 功率的光模块, 以满足设计要求。

为保障远控系统生产作业的稳定性, 结合远控机械单机的光链路汇聚方式, 系统按二级分光的方式设计整体光链路和带宽的冗余度。

第一级 1:4 分光器部署在对应的变电所, 设计接入 3 个 PON 口, 即 3 台单机, 保留 1 芯分光冗余。单机总体流量设计值为 2 Gbps, 单 PON 口选择 XGS-PON, 即 10 Gbps 带宽规格。3 台单机接入后, 仍然有 30% 的冗余带宽保证网络流量的波动, 理论上各应用业务不会中断数据通信。

第二级 1:16 分光器部署于轨道吊和岸桥内的电气房机柜中, 以岸桥的 7 套 ONU 为单机数量计算, 选 1:16 分光器能更好地满足光纤芯数的冗余量, 为远期扩展和运行维护提供条件。

3.2.3 全域机械高可靠设计

1) 光纤冗余设计。单机上所有 ONU 均通过双万兆光纤上联到第二级分光器上。上联光纤为主备模式, 当 OLT 检测到 ONU 主光纤信号丢失, 系统保护机制在 60 ms 内将流量切换至备用链路上, 保证业务稳定运行。

2) 业务优先级设计: 为满足轨道吊和岸桥远控操作时, 不同类型的业务对网络时延和稳定性的要求不同。设计阶段按业务的重要程度划分虚拟局域网(virtual local area network, VLAN)优先级, 实施阶段通过 OLT 统一下发配置到 ONU 业务端口, 实现端到端的网络带宽保障。远控操作台的业务优先级举例如下: ①PLC 控制通信配置固定网络带宽和最高优先级。②PLC 控制通信采用网络带宽补偿策略, 当固定带宽不能满足实际带宽时, 后续控制传输过程中自动加大带宽(带宽补偿上限为分配带宽的 2 倍)。开启固定时延策略, 保证最小的固定带宽抖动值。③远控操作视频通信配置为较高优先级, 采用固定网络带宽+弹性带宽策略, 确保清晰流畅的视频图像传输^[9]。④非远控操作视频和其他子系统通信配置为普通优先级, 仅保障通信延时在可接受范围内。

综上所述, F5G 工业光网机械侧解决方案在

实践中主要聚焦于 ONU 设备的点位规划、终端接入规划、链路冗余保护机制及带宽保障。通过上述方案, 本文工程中远控机械的业务可以在低时延、高可靠的环境下平稳运行。

3.3 F5G 工业光网远控解决方案

为避免业务干扰与提升工作效率, 本文工程分别搭建轨道吊远控室和岸桥远控室。整体 F5G 工业光网远控方案配置两套光传输设备, 分别部署在远控室、罗泾数据中心、变电所和机械上。

整体 F5G 远控网络架构为二层扁平化架构。轨道吊远控和岸桥远控各自配备两台 F5G OLT 设备, 分别部署于罗泾数据中心主备机房内; 每台 OLT 设备均采用双电源、双主控的硬件冗余结构; OLT 采用上行链路聚合保护方式连接各自核心网关实现链路冗余; 通信策略开启 Type C 双归属保护策略, 实现对主干光纤、分支光纤、OLT 设备本身和 ONU PON 端口故障的全域冗余防护; 当故障发生时, 网络切换速度为毫秒级, 实际业务无感知。

本文工程涉及川丰、ABB 和 TMEIC 三种不同 PLC 系统的工业控制通信。工业控制通信质量有严格要求, 还要求避免数据冲突和流量隔离。针对 3 种不同的控制系统, 实施阶段采取软硬结合的隔离和运行维护方式, 具体策略如下。

1) 在软隔离层面: 采取流量调度机制保证业务最高优先级, 开启带宽补偿与固定时延策略, 严格保障 3 种不同 PLC 控制系统的时延和带宽。

2) 在硬隔离层面: 采用 PLC 通信独占 1 310 nm 波长通道, 不仅实现端到端的带宽保障, 还将流量进行严格区分, 避免数据冲突; 通过 OLT 集中下发策略模式, 实现 QoS 策略的快速部署和运行维护策略的更改^[10]。

3) 在运行维护管理层面: 采用 eSight 平台实现可视化运行维护, 统一管理两张 F5G 远控网络中的 OLT 与 ONU 设备, 形成两个独立的可视化拓扑图管理界面。eSight 平台可以立体和直观地展示 F5G 全网设备及链路的状态, 提升运行维护效率。

综上所述, F5G 工业光网远控解决方案在实

践中主要聚焦于网络架构、全网冗余保护机制、流量隔离机制、带宽保障及可视化运行维护管理，通过上述方案，本文工程中远控机械可以在高可靠、易运行维护的环境下平稳运行。

3.4 F5G 工业光网超远控方案

在罗泾数据中心、外高桥数据中心、集团数据中心通过光网络系统 (optical network systems,

ONS)波分设备建立三地 OTN 全光环网，以满足 F5G 超远控方案的通信基础。三地通过 OSN 波分设备互联，通过 ONS+OLT+ONU 的全光架构，可实现超远控距离最远覆盖半径 100 km，未来可在外高桥或集团数据中心所在地建设超远控中心，满足超远控业务的需求。超远控 F5G 工业光网见图 4。

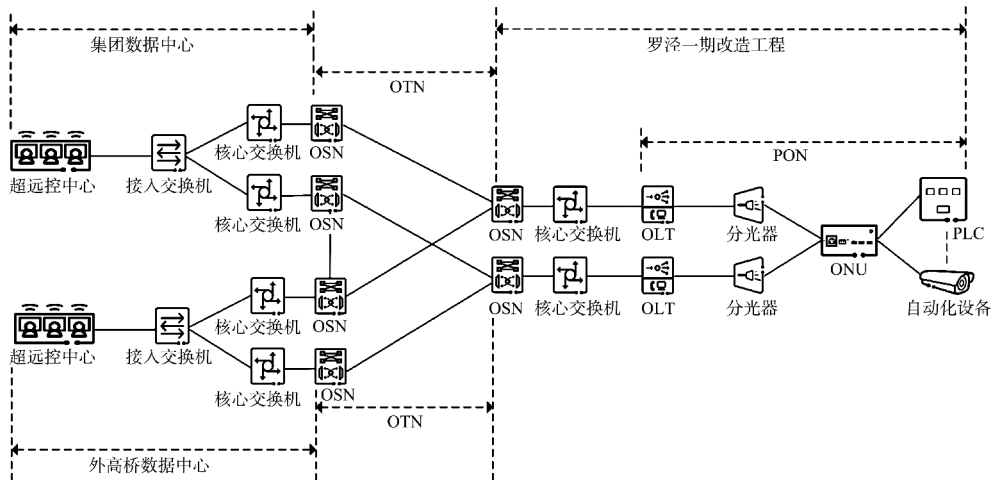


图 4 超远控 F5G 工业光网
Fig. 4 F5G industrial optical network for ultra-remote control

3.5 F5G 工业光网实践小结

无源全光网络目前主要使用吉比特无源光网络 (gigabit-capable PON, GPON) 和对称 10 G GPON 技术，GPON 可以提供下行 2.5 Gbit/s、上行 1.25 Gbit/s 的带宽，对称 10 G GPON 可以提供上下行对称的 10 Gbit/s 的带宽。将来 PON 技术可以向 20 G GPON、40 G GPON，甚至是更高带宽的 100 G GPON 逐渐演进^[11]。

F5G 工业光网要求 OLT 至 ONU 间的光衰值必须小于设计损耗值，否则网络会出现时延变高、视频业务卡顿等现象，严重影响现场业务。在实践过程中，需要对数据中心、变电所、机械的卷盘光缆等重要汇聚点的光纤质量、熔接质量、配件光损耗值进行严格检测。表 2 的损耗值可作为系统设计的依据之一。

部分自动化设备控制系统依赖组播或者工控协议进行通信，F5G 工业光网作为物理层和数据

链路层设备可以透传组播和工控协议数据包。在实践过程中，网络规划阶段必须考虑 5G 工业光网和数通网络设备之间的组播、工控协议的特性，确定数据包透传的响应规则和策略。

4 结语

1) F5G 工业光网架构优于传统以太网架构，基于 F5G 的无源极简网络架构和全光环网超远程通信基座，能够保障港区全域内多种 PLC 系统控制信号实时通信，可以满足超远控中心大带宽、海量连接、低时延和零丢包的需求。

2) 基于 F5G 技术的远控业务分类设计，可以为多机械多应用融合协同作业提供理论支持，对提升装卸作业效率、推动港区全域机械常态自动化、建设超远控中心等方面具有重要的参考借鉴意义。

3) F5G 工业光网应用场景设计，需要根据业

务类型和业务带宽进行 PON 技术选型和带宽规划。需要根据光纤传输链路的情况计算光衰阈值和关键节点质量检测。需要根据不同的网络和工控传输协议进行网络规划和策略设计。

4) F5G 工业 PON 和 OTN 技术的融合使用, 未来具备向更高的带宽、更低的时延、更好的业务隔离等方向延展。“F5G+”的融合应用方案, 可以“一业带百业”, 促进港口智慧建设、交通智能管理、工厂智能制造、矿山无人开采等行业的操作模式转型。

参考文献:

- [1] 李鑫, 赵永利, 李卓桐, 等. 第五代固定通信网 F5G 发展展望[J]. 通信世界, 2021(4): 32-36.
- LI X, ZHAO Y L, LI Z T, et al. Development prospect of the 5th generation fixed communication network (F5G) [J]. Communications world, 2021(4): 32-36.
- [2] 工业和信息化部. “双千兆”网络协同发展行动计划 (2021—2023 年) [A]. 北京: 工业和信息化部, 2021.
- Ministry of Industry and Information Technology. Action plan for the coordinated development of “dual gigabit” networks (2021–2023) [A]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, 2021.
- [3] 《集装箱起重机远程控制 F5G 网络系统技术要求》团体标准简介[J]. 港口科技, 2024(9): 43-44.
- Introduction of group standard *Technical requirements for F5G system of container crane remote control* [J]. Science & technology of ports, 2024(9): 43-44.
- [4] 陆志勇, 丁飞虎. 自动化集装箱码头数字基础设施设计与实现[J]. 水运工程, 2025(3): 215-221.
- LU Z Y, DING F F. Design and implementation of digital infrastructure for automated container terminals[J]. Port & waterway engineering, 2025(3): 215-221.
- [5] 周东, 王伦. 携手华为! 天津港岸桥自动化改造首次应用 F5G 光通信技术[J]. 港口科技, 2024(1): 47.
- ZHOU D, WANG L. Hand in hand with Huawei! Tianjin Port first applies F5G optical communication technology in shore crane automation transformation [J]. Science & technology of ports, 2024(1): 47.
- [6] 黄立纯, 郝瑞祥. F5G 工业光环网通信技术的应用与展望[J]. 通信世界, 2024, 31(9): 37-39.
- HUANG L C, HAO R X. Application and prospect of F5G industrial optical ring network communication technology [J]. Telecom world, 2024, 31(9): 37-39.
- [7] 杨跃强, 陈洁, 刘谦. F5G 时代宽带客户网络安全能力标准化现状与关键技术研究[J]. 信息通信技术与政策, 2024, 50(9): 85-91.
- YANG Y Q, CHEN J, LIU Q. Research on current status of standardization and key technologies for broadband customer network security capabilities in F5G era [J]. Information and communications technology and policy, 2024, 50(9): 85-91.
- [8] 鞠进, 李峰, 吕晓威, 等. F5G 全光工业网络在智慧港口中的应用[J]. 港口科技, 2024(3): 1-8.
- JU J, LI F, LYU X W, et al. Application of F5G all-optical industrial network in smart ports [J]. Science & technology of ports, 2024(3): 1-8.
- [9] 徐海泳, 程继超. 全域 F5G 广电网络建设[J]. 广播电视网络, 2023, 30(3): 57-60.
- XU H Y, CHENG J C. Construction of global F5G broadcasting and television network [J]. Radio & television network, 2023, 30(3): 57-60.
- [10] 徐嘉俊, 唐禹, 叶梁. F5G 和 5G 技术融合的分析与展望[J]. 通信电源技术, 2022, 39(22): 94-97.
- XU J J, TANG Y, YE L. Analysis and prospect of F5G and 5G technology integration [J]. Telecom power technology, 2022, 39(22): 94-97.
- [11] 范立. F5G 时代 PON 技术的演进方向和策略[J]. 无线互联科技, 2022, 19(12): 82-84.
- FAN L. The evolutionary trend and strategy of PON technology in the F5G [J]. Wireless internet science and technology, 2022, 19(12): 82-84.

(本文编辑 王璁)