

400G 高速全光品质算网探索与实践

李志刚 张俊平 李光

中国电信股份有限公司河北分公司, 河北石家庄, 050000;

摘要: 随着国家明确提出加快实施“东数西算”工程, 以及日益发展的各产业、多行业对业务入算需求的快速增长, 以算力为中心, 打造面向未来算力服务的品质算网架构, 全面推进算力基础设施的快速高质量发展, 进一步促进我国数字经济的发展, 成为了全光网络的主要演进方向, 这不仅满足了全光基础设施和算力基础设施的充分协同, 匹配了城市发展定位和业务需求, 更支撑了全光基础网络价值的持续变现, 以及未来算力资源的价值释放。本文从算力时代网络的关键需求入手, 讲述了以 400G 超高速、全光交 OXC 以及光电协同 ASON 等技术来构建全光品质算网的网络架构, 并加以讲述本地化算网实践, 构筑算力服务的基石, 助力千行百业数字化转型的典型案列。

关键词: 全光算网; 400G; OXC; ASON

前言

“东数西算”作为国家的重要发展战略, 将网络底座、算力硬件等视为重要的基础设施, 特别对算力和网络的协同控制、演进和融合提出了更高的要求。不仅如此, 围绕数据中心建网, 以强大的运力满足算力的随取随用已成为通信基础设施、新技术基础设施和算力基础设施的主要建设发展方向。

算力中心所提供的强大算力是当下数字经济时代发展最直接的技术承载, 而网络底座作为管道, 发挥着将算力送到企业以及算力互通的重要作用。在这一趋势下, 全光算力网络成为了重要的建设目标^[1]。

面对算力网络在架构、带宽、时延等方面对网络提出的新需求, 光网络需转型升级构建承载算力的基础网络底座, 需要围绕全光高速互联、灵活、光电联动与智能网络调度, 构建新一代基于 400G 超高速以及 OXC 的光电联动型全光网架构, 实现敏捷入算。

1 行业趋势

随着云计算、大视频、算力等业务的发展, 以及 IT 技术与 CT 技术的深度融合, 算力时代正在到来。而构建一张面向算力时代的网络底座, 即算力网络, 是继西电东送、西气东输、南水北调之后又一国家重大工程, 有利于技术创新发展和业务应用创新, 从而带动国家数字经济发展。面对算力网络在架构、带宽、时延等方面对网络提出的新需求, 光网络需转型升级构建承载算力的基础网络底座^[2], 需要围绕全光高速互联、灵活光电联动与智能网络调度, 构建新一代基于 OXC 的光电联动型全光网架构, 实现敏捷接入, 打造任务式服务, 助力算力“一点接入、即取即用、东西横贯、绿色节能”。

1.1 全光品质算网业务演进方向

结合算力网络特征, 以及我国东西部数据中心和业务分布的特征, 算力目标网络架构应面向“东数西算”、“东数西存”以及“东数西训”等业务背景, 在如下关键需求方面持续演进。

1.1.1 超大带宽演进

DC 到 DC 之间的东西向流量过去 5 年增长了 4 倍, 同时视频等业务驱动南北向流量快速增长, 移动流量未来年复合增长 54%, 整体骨干网流量每 2.5 年增长 1 倍。工业和信息化部发布的《“双千兆”网络协同发展行动计划 (2021~2023)》, 明确指出提升骨干网传输能力, 推动基础电信企业持续扩容骨干传输网络, 按需部署骨干网 400Gbps 超高速、超大容量传输系统, 提升骨干网传输网络综合承载能力。因此运营商在网络建设时, 需要场景化考虑如何有效提升容量, 同时降低建网成本, 降低每 bit 的带宽成本。

“东数西训”场景, 是面向各行业产业中大量的互联以及物联需求, 基于实际生产/业务场景, 进行实时或周期性的数据更新迭代而生^[3]。主要是在我国广袤的西部建设人工智能大训练中心以及大数据分析中心, 并利用强大的算力, 对来自于各行业产业收集传达而来的业务数据, 以特定的条件为输入, 进行业务场景模拟分析以及数据能力的更新输出, 对于业务系统向更加智能、更加系统化的方向持续演进。而在“东数西存”场景中, 需要将大量企业生产活动中产生的重要数据, 以一定时间为周期, 从本地运输至西部存储云池。在以上两种场景中, 都有 PB 级的样本数据需要从本地经过全光网络传输至西部算力/存储集群, 这要求有超大网络带宽随时可取, 使能远端

存力算力随时可用。

1.1.2 超低时延演进

为了降低时延,加快业务发放,传统网络的逐层汇聚架构无法满足要求,需要逐步演进到一条直达的扁平化极简网络架构。例如《中国电信 CNet-2025 网络架构白皮书》中提出的“简洁”网络能力指标,全国 90%地区提供不大于 30ms 的传输时延[4]。《“双千兆”网络协同发展行动计划(2021~2023)》明确指出优化数据中心互联(DCI)能力,推动基础电信企业面向数据中心高速互联的需求,鼓励数据中心直联网络、定向网络直联等建设。

从业务需求来看,当前网络在线直播平台的愈发流行以及国家广告产业,媒体产业愈发健壮,“东数西渲”场景也越来越典型,该场景是利用西部部署的算力集群,以及万级配置的 GPU 算卡,提供本地主机无法比拟的渲染能力以及渲染速度,相较于传统的渲染手段,有更强的时效性。通过全光网络将本地大量的视频素材或者实时采集的视频数据传输到西部算力中心,按照一定规格以及参数设置,实时输出选然后的视频,在传输到本地广播中心、或者直播平台,继而广发给终端用户。在这个过程中,直播平台需实时与终端客户进行在线互动,这对视频渲染的时间以及网络传输超低时延提出了很高的需求,只有在人无法感官出来得时间窗口内,完成渲染以及数据传输,才可以打造线上与终端极致的互动体验。

1.1.3 超高可靠网络演进

业务发展往往是网络发展的主要驱动力,在当前的算力时代下,诸多企业选择将生产以及质检系统部署在云端,还有诸多需要使用的数据仿真的企业都选择利用云端计算完成数据仿真。将东部密集的算力需求有序引导到西部,使数据要素跨域流动。然而,算力网络建设并不是简单“算力”与“运力”相加,如何确保高效可靠的互联通路?如何促进数据跨区域融通及保证数据安全传输?这些都是目前所面临的问题。根据报道,超过 60%的流量诞生于数据中心之间,超过 85%的新业务去向了数据中心,这意味着以算力为中心的数字经济,在我国的经济体系中所占据的分量日益增加,数据中心之间,企业到数据中心之间要求有非常高的网络可靠性,以抵抗突发事件导致的网络中断带来的巨大经济损失。

1.1.4 超低成本演进

算力时代对网络带宽的需求越来越大,意味着需要有新的网络成本的投入,以支撑网络持续演进匹配

算力需求。传统的 10G/100G/200G 传输技术以及 C 波段光放大技术堆叠,可以满足需求,但传输比特成本会居高不下,算力随取随用的网络成本会均摊给终端用户,这不利于算力时代背景下的数字经济持续发展。并且大量的机房空间资源、光缆资源会被消耗,投入成本难以回收,人工运维成本也显著上升,业务可持续发展的空间持续压缩。因此,需要有更先进的技术方

1.2 全光品质算网愿景

为了满足算力时代背景下,各行业的稳健发展以及数字经济的蓬勃前行,全光品质算网需要具备如下能力:

- 超大带宽能力以满足 PB 级别的数据传输;
- 超低传输时延以满足极致的在线用户体验;
- 超高网络可靠性为大力数字经济发展保驾护航;
- 超低网络成本使能业务持续性空间持续做大。

1.3 全光品质算网关键技术

面向上述算力时代业务场景以及演进方向,全光品质算网应具备大带宽、低时延、高可靠等特点,可为千行百业提供高品质联接,同时能够支撑千行百业进行数字化转型,其主要采用了以下核心硬件以及软件技术。

1.3.1 单波 400G 技术

单波 400G^[4]是从传送网相干传送技术演进而来,相较于传统 100G 和 200G^[5]技术,因为使用了更高波特率器件,其单比特成本更优,并且可以大幅减少低阶速率技术所带来的设备堆叠情况,可节省运营商建网成本。不仅如此,其拥有更高的承载容量,可以满足算力时代企业数据上云等大流量网络承载需求。当前主流 400G 技术包括用在城域核心、DC 机房互联场景的 PCS-16QAM 编码,其使用了高性能 FEC 纠错编码技术,相对传统的软判决方案提升~1.0dB 编码增益,可以更好支撑 400G+高速光传输系统的应用需求,构建数据中心场景间高品质互联通道。

另外,该技术使用超奈奎斯特 FTN 算法压缩信号以消除波道串扰,可达到业界频谱效率 SE=4bit/s/Hz,实现 100GHz 间隔的单波 400G 传输谱宽。面向未来,可将超宽频谱光纤放大技术与单波 400G 技术相结合,实现 C 波段以及 L 波段共 120 波同时传输,持续提升 400G 传输单纤容量,承载未来算力时代数据洪流。

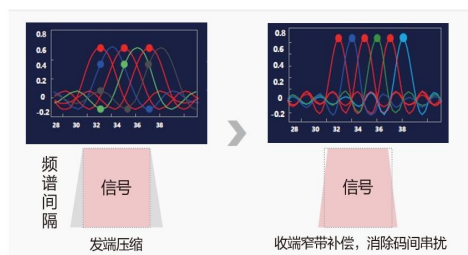


图 1 FTN 频谱整形

而用在国家干线和省际干线等长途传输场景的 400G QPSK 编码, 如图所示, 相较于 PCS-16QAM 编码来说, 其使用编码星座点只有 4 个, 仅为 PCS-16QAM 编码的四分之一, 但较为松散的星座点分布, 也意味着相同的传输条件, 系统对于误码的识别能力更强, 光传输系统对 QPSK 编码的容错率更高, 因此 QPSK 更适合长途传输场景。

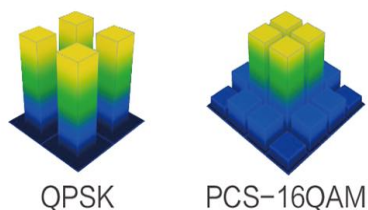


图 2 400G 编码星座图

而传统光电器件带宽只支持到约 90G 波特率码型, 基于 90G 波特率的 400G 性能可满足城域场景应用, 还无法满足 QPSK 长距和超长距干线传输要求。进一步提升性能, 130G+波特率的高速光电器件必不可少, 当前高速调制器有多种技术路径可帮助其突破 130G+波特率, 业界通用的做法是使用 InP 材料作为调制器的材料, 该材料天然具备高波特率, 可支撑 QPSK 等低阶高容错率的调制方式实现 400G 以及更高速率的传输。除了调制器外, ADC、DAC、ICR 等器件均在进步, 如图所示, 这些技术可提升器件带宽和解决器件指标离散性导致的性能差异。

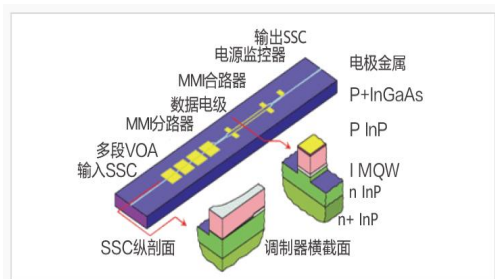


图 3 InP 调制器组件

1.3.2 全光立体骨干 OXC

以 DC 为中心, 构建超低时延圈, 已经成为大家的共识, 过去的链型组网、环状组网, 不同站点之间

的业务需要绕行, 增加传输路径时延, 会逐步演进到 Mesh 化、立体化的组网方式, 不同站点之间业务选择最优的路径, 保证低时延。这样运营商传送网站点容量、维度将持续增长。

传送网发展经历了第一阶段的环网, 第二代的分核心节点 ROADM, 算力驱动下当前已经演进到全网全 Mesh 互联, 在网络全 Mesh 互联时代必须要采用全光交换技术^[6]。

传统的波分系统光平台的缺点是只能点对点组网, 缺乏多方向的交叉调度的能力, 占用光层平台的设备数量多, 不同局向调度只能通过外部物理连纤解决, 导致开通效率低。OXC 设备应用了高精打印、数字化 AI、液晶技术等新技术, 通过器件微型化、组件集成化、管理智能化, 实现将“全光立体调度网”塞进“一张 A4 纸”大小的背板里, 大幅简化复杂光调度场景, 实现光信号调度“不用等且随意调”、“立交桥化”; OXC 设备还可进行智能运维、智能调度, 在核心节点不需要上下业务的地方, 可按波长进行智能的透传穿通, 大大降低时延。OXC 技术推动了光调度节点设备的小型化、智能化, 节省空间、降低功耗, 是全光品质算网建设中演进的关键技术之一。

具备 OXC 全光交换能力的网络具备以下能力:

业务直达, 少中转: OXC 设备相对于传统的老光层平面, 助力实现业务智能一跳直达, 减少复杂光电转化, 有效降低传输时延。类似“高铁”大站直达, 无阻塞, 超低时延;

立体调度, 更高效: 全光调度式“高速立交”, 高效疏导业务流量, 极大提升带宽调度效率, 提升数字化通讯网调度能力。

简化操作, 更快捷: 解决传统网络光方向扩容困难, 交付周期长的难题, 通过数字化技术实现自动化运维和信息智能化, 打造数字化光层基础设施。

绿色集约, 更节能: 一台 OXC 设备可以替代传统光层的八个机柜空间, 节约宝贵机房资源。

1.3.3 超高可靠 ASON 网络

超大规模网络面临灵活调度和高可靠性的需求, 传统的 1+1 保护难以满足超高可靠性业务。而 ASON^[7] (自动倒换光网络) 快速的倒换反射, 能够在物理网络中, 快速的感知故障, 恢复故障。ASON 在兼容传统保护的机制的基础上, 从架构、算法、协议, 硬件方面等进行创新, 从而提升极致的重路由性能和可保证的重路由时间, 增强网络可靠性。传统的 1+1 保护业务只能抗 1 次光纤故障, 而 ASON 业务可以抗多次

故障。网络 Mesh 化程度越高,可用的恢复路径越多,则 ASON 网络的可靠性越高。通过区域精准算路,可进行确定性断纤-恢复计算仿真,实际断纤时,可实现确定性恢复电层百毫秒级、光层秒级,业务高可用率高达 99.9999%。

核心层加持 ASON，光电协同保障传输品质，网络资源高效调用。一条端到端业务同时使能光层 ASON(WSON)和电层 ASON(OTN ASON)^[8]，光电链路信息协同交互，电层自动继承光层参数及距离等信息，光层路径发生变化，电层信息同步更新，仅需维护光层链路属性即可。而电层 ASON 实现业务级快速恢复时，也可同时驱动光层 ASON 恢复电层链路。基于这种光流量集中算法，小颗粒电层流量边缘汇聚，波长直通减少中间光电转换成本，提升整网资源利用率^[9]。在实际应用中，小颗粒政企业务使用电层 ASON，管道利用率高，可靠性高。大颗粒宽带及 DC 互联等业务使用光层 ASON，成本最优。

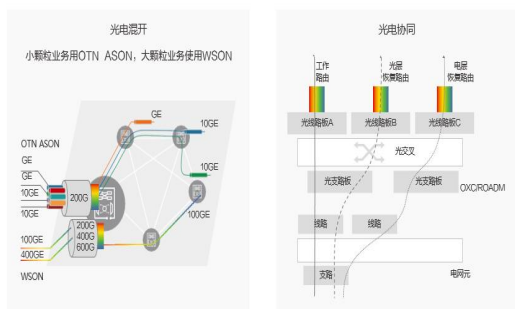


图 4 光电协同 ASON 工作原理

1.3.4 Super C+L 超宽频谱

传统光传输系统只使用 C 波段进行业务传输，而随着业务流量增加，如何最大化单纤容量以提升光纤使用率，降低光缆资源以及光纤铺设成本成为了热点话题，使用 L 波段进行光传输也成为了业界焦点。L 波段光纤放大器和 C 波段类似，也采用铒元素离子作为增益介质。目前 C 波段光纤放大器支持 120 个波长，继续扩展放大器增益谱宽以支持 C120+L120 是一个大趋势。

传统 L 波段光纤放大器的研制挑战很大,主要原因是铒离子的吸收峰位于 C 波段, L 波段长波位置处的增益很小,并且 L 波段长波处的激发态吸收 (ESA) 效应明显,其增益被进一步限制。通过改变增益光纤的掺杂组分和结构可解决 L 波段增益范围受限的问题。向增益光纤中引入不同的共掺离子,调节共掺率离子的比例及分布,可提高 L 波段光纤放大器长波处的增益。同时,通过优化增益光纤的掺杂结构,可进

一步提高泵浦效率、降低光纤放大器的噪声系数,进而实现商用。

增益光纤掺杂成分创新，支持超宽频放大

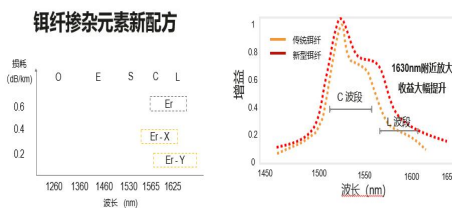


图 5 L 波段放大增益谱

1.3.5 算网协同智慧运维

算力时代下的网络与算力需要从传统的分离配合逐步演进到融合管理,才能对算力资源和网络资源进行同步协调,同步升级,并更好的适配业务需求。当前业界主流是通过算网大脑对算力和网络进行统一协同和编排。管控系统提供标准化的网络服务 API 接口,通过运力地图的方式向算网大脑提供网络资源可视,网络最优路径选择等能力。

用户或者应用向算网大脑申请算力，算网大脑识别算力类型，指定网络 SLA。算网大脑指定备选算力节点，向网络资源管理器查询运力地图，进行入算评估。网络管控器进行入算评估，返回运力地图信息给算网大脑。算网大脑综合网络管控器的入算评估信息，选择最合适的路径下发给网络管控器。算网大脑综合网络管控器的入算评估信息，选择最合适的路径下发给网络管控器。



图 6 光算协同流程

同时，因 AI 训练、HPC 等业务兴起，跨算力节点的临时性 TB 级大数据量传输将在算力网络中变得非常普遍，因此，为满足像临时性大数据量跨算力节点搬运这类新兴业务的品质承载需求，光网络应具备电驱光业务自动发放的能力，以提升其业务发放效率和资源使用效率，如下图所示。

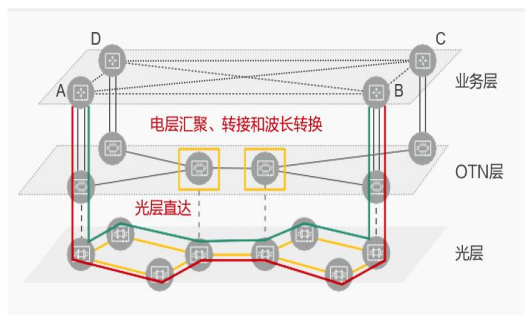


图 7 电驱光网络架构示意

具体来说，应具备如下关键技术能力。

光/电算路算法：大小颗粒业务自动校验波长通道，并驱动波长发放以及端到端链路打通。小颗粒业务自动汇聚并选择最佳穿通波长，提升带宽资源利用率。降低波长一致性约束影响，提升波长资源利用率。

基于余量监控的光层调测：结合电层丰富的 OAM 开销能力和光层光功率检测能力，实时对业务路径余量进行监控，业务发放以及重路由根据路径余量选择最优调测策略匹配，确保业务性能最优。

OTN 电层链路驱动光层建路，构建半永久连接链路，很好地匹配了算力节点间临时性 TB 级大数据量搬运需求，E2E 提升了全光品质运力网络的业务发放效率和资源使用效率。

1.4 全光品质算网网络架构

以算力时代需求为背景，打造全光品质算网对于推进企业数字化转型，国家数字经济持续发展有重大意义。全光品质算网可满足“东数西算”以及“东数西存”等应用场景对带宽、时延、以及可靠性等参数的要求，是现今 OTN 传送网重要演进方向，其具备以下几个明显特征。

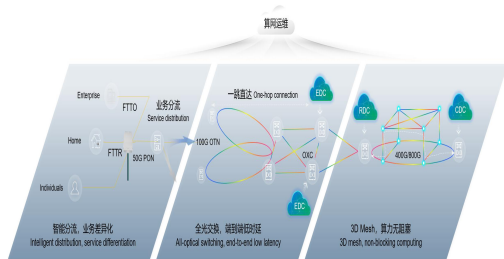


图 8 全光品质算网架构

1.4.1 单波 400G+联算

在城域数据中心/核心局点之间使用 400G PCS-16QAM^[10]进行互联,以 100GHz 的谱宽持续满足新兴业务/流量的带宽需求,满足未来不确定的企业入云以及行业入算需求。面向未来可进一步演进至 800G

64QAM 编码, 占据相同的谱宽, 具备更高传输速率, 最大化单波传输带宽。

1.4.2 单波 100G 入算

将 OTN 下沉至城域接入，使能 100G 相干技术到边缘，将传统相干光发送组件与相干光接收组件集成封装，降低器件功耗，更适配城域范围传输需求，并同时满足头部政企大带宽入算以及多行业数据入云需求，使能带宽随取随用。

1.4.3 端到端 OXC

将 ROADM 能力释放到城域边缘,与核心层 OXC 组成端到端组网,减少 60%以上传输时延,使网络架构从多跳转发演进至业务一跳直达,满足算力背景下业务低时延需求以及线上终端实时交互需求。

1.4.4 电驱光动态建联

算网运维系统实时协同管理算力资源与网络资源，针对临时或永久传输业务，基于网络波长实时携带的身份标签，对新上波长业务自动赋值未占用波长，并自动打通链路端到端光通道，简化运维，大幅降低业务上线 TTM。

1.4.5 网络 SLA 可承诺

算网运维系统可提供全方位 SLA 保障能力,根据硬件侧实时检测反馈的光学参数,进行持续迭代的大模型学习分析,可在在网络规划、建设、维护阶段以及物理、网络、业务各个层次分别做到了风险主动识别、故障主动模拟、风险主动预警,由传统的被动排障实现了主动保障。

1.4.6 差异化保护 SLA 可视

算网运维系统规划&建设阶段能够做到可用率规划即部署：通过不同的可用率模板来进行差异化的路径规划，根据对应的模板，可以规划并下发相应的工作+保护+重路由路径，从而实现 5 个 9 超高可用率，用户可根据自身实际情况以及业务反馈需求进行选择。

在运行阶段能够做到业务快速恢复：通过 ASON 保障业务抗多次断纤，实现秒级重路由，业务零中断，通过 NCE 生存性分析功能，对网络进行故障模拟以及 what-if 分析，完成规划结果在线验证，确保规划路径实际满足抗 N 次光纤故障能力。

2 结束语

本文从当前算力网络背景以及实际网络及业务痛点入手，结合全光品质算网超大带宽、超低时延、超高可靠的网络承载能力，针对性讨论了 400G 告诉

全光算网解决方案,可有效满足算力时代背景下各类场景对传输网络提出的需求,支撑数字国家数字经济建设,支撑算力应用场景的持续扩展,满足千行百业数字化转型需求,惠及民众生活,全面提升社会经济发展。

基于河北电信全光品质算网的 xxxx 项目,实现了光网通信产业与算力产业的融合发展,构建了新型网络发展形态,实现了网络建设与新兴应用的高效协同,这将进一步推动基础网络、数据中心、城市应用等多个产业环节的协同发展,推动河北省数字产业生态建设与产业发展,打造网络强省、数字强省。

河北电信将持续深耕算力时代城域全光底座,以更先进的超高速 OTN 传输以及全光交换技术,赋能优质网络,为千行百业在算力浪潮中驰骋提供有力保障,为数字经济提供最佳联接,让算力持续普惠大众。

参考文献

- [1]任晓旭,谭靖超,邓辉,曹一凡,仇超,王晓飞.基于端边云超融合的算力网络架构[J].计算机应用,2022,42(S01):195-200.
- [2]雷波,刘增义,王旭亮,等.基于云,网,边融合的边缘计算新方案:算力网络[J].电信科学,2019(9):8. DOI:CNKI:SUN:DXKX.0.2019-09-007.
- [3]莫益军.算力网络场景需求及算网融合调度机制探讨[J].信息通信技术,2022(002):016.
- [4]戴中华.算力网络关键技术研究 and 实践[J].中国新通信,2022(012):024.
- [5]严敏.OTN 技术在城域传送网的应用分析[J].移动通信,2017(1):2.
- [6]周敏,张健,王寅.全光交换网络的技术发展与演进趋势[J].电信科学,2019.
- [7]林洁平.电力通信传输网 ASON 技术及应用研究[J].低碳世界,2022,12(9):3.
- [8]傅寿熹.一种结合 SDN+ASON+OTN 智能光传送网的方法. CN202210429902.1 [2023-09-07].
- [9]温志坤.关于 ASON 技术的电力通信网优化及应用[J].电脑乐园,2022(11):0124-0126.
- [10]李允博,张德朝,李晗,等.400G 光传输技术与产业进展[J].通信世界,2023(5):42-44.