

# 有线通信接入网工程通信线路设计研究

廖宋

云南省通信产业服务有限公司 云南昆明 650200

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19704

[摘要] 本文针对有线通信接入网线路设计的关键环节展开研究, 聚焦路由规划、材料适配、性能验证及优化策略。研究依托智能算法与工程技术创新, 在千兆宽带与 5G 承载需求背景下, 提升网络可靠性及资源效率。

[关键词] 有线通信; 接入网工程; 通信线路设计

随着 5G 小基站前传、千兆城市及高价值业务需求激增, 接入网从传统带宽管道向差异化切片承载平台演进, 对线路设计提出更高要求。路由规划、材料选型及性能保障等环节面临技术升级挑战: 如高密度城区穿放效率低、灾害风险频发导致链路中断、资源闲置与拥塞并存等问题。本研究旨在探索高效可靠的线路设计方法, 通过融合智能算法, 优化拓扑结构、材料适配及风险防控, 为高带宽低时延业务提供物理层支撑。

## 1. 有线通信接入网概述

有线通信接入网作为全程全网的基础段, 承担用户终端与城域汇聚节点间的“最后一公里”带宽交付任务, 其技术演进直接决定业务可达性与体验下限。在技术维度上, 光纤、铜缆及混合介质并存: 光纤方案以 GPON、10G EPON 为代表, 单纤可支持下行 10 Gb/s、上行 2.5 Gb/s, 满足 4K/8K 视频、政企专线等高价值业务; 铜缆依托 G.fast 在百米内实现 1 Gb/s 对称速率, 适用于存量改造场景; HFC 则借助 DOCSIS 3.1 将频谱扩展至 1.2 GHz, 为广电宽带提供性价比路径。网络架构遵循“星—树—环”复合拓扑, OLT/DSLAM 下沉至接入机房, 结合无源分光器或交接箱实现多级分路, 既保证链路冗余, 又降低机房能耗。随着千兆城市与 5G 小基站前传需求激增, 接入网正由“带宽管道”向“差异化切片承载平台”演进, 要求线路设计在路由、材料、工艺层面同步升级, 为后续动态资源调度与多业务融合奠定物理基础<sup>[1]</sup>。

## 2. 有线通信接入网线路设计的核心实施环节

### 2.1 线路路由规划与拓扑结构优化设计

有线通信接入网的线路路由规划与拓扑结构优化设计是

确保网络高效可靠运行的基础, 此过程起始于对服务区域地理环境的精细分析, 需综合考察地形地貌、既有管线资源、市政建设规划以及潜在干扰源分布。在城市密集区, 高层建筑密集、地下管线错综复杂构成主要挑战, 常需采用微管微缆技术进行高密度穿放, 并借助 GIS 平台构建三维路由模型, 规避地下燃气管道、电力缆沟等敏感设施。对于城乡结合部或乡村地区, 则需重点评估直埋敷设的土壤腐蚀性、冻土层深度及洪水风险等级, 优先选择沿公路或既有杆路的架空/管道复合路由方案。成本效益评估贯穿规划全程, 需在满足技术指标的前提下, 通过路径长度压缩、共享杆塔资源利用及管道孔位复用等手段控制 CAPEX, 典型场景下主干路由每公里管道建设成本差异可达 15%~20%<sup>[2]</sup>。

拓扑结构选择需紧密契合业务需求与可靠性等级要求。星型拓扑因其结构简单、故障隔离性强, 成为 OLT 节点至高端政企用户专线的首选, 通过双路由冗余布放可保障 99.999% 可用率。在居民区及中小企业覆盖场景, 树型拓扑凭借高扩展性和低成本优势占据主流, 采用多级 PON 分光 (1:16→1:4 级联) 实现用户接入。值得注意的是, 无源分光器级联深度需严格受限於光功率预算, 每增加一级 1:8 分光将引入约 10.7 dB 插入损耗。环型拓扑则适用于重要汇聚节点互联, 通过自愈保护机制 (如 MS-SPRing) 可在 50 ms 内实现故障切换, 显著提升网络韧性。结构优化需重点解决信号衰减控制问题, 对于 GPON 网络, OLT 至最远 ONU 的链路损耗应控制在 28 dB 以内 (含 1 dB 余量), 可通过优化分光比配置、减少熔接点 (每个熔接点损耗 ≤ 0.1 dB) 及选用 G.652.D 低损光纤实现。

智能化工具的应用极大提升了设计精度与效率,利用 ArcGIS Network Analyst 模块进行最优路径分析,结合人口热力图与业务密度预测,可自动生成成本最低、覆盖最优的候选路由集。针对高密度用户区布线难题,采用高维背包算法进行光交箱端口优化分配,实现 95%以上端口利用率,同时减少管道占用量。典型案例显示,在老旧城区改造中,通过将传统树型拓扑升级为“环+树”混合结构,主干光缆故障率下降 40%,且业务开通时长缩短 30%。此方案核心在于将关键交接箱节点纳入光纤环网,并部署智能 ODN 系统实时监测光纤性能劣化,确保在城域骨干网扩容至 100G PON 阶段仍能维持稳定的传输性能。

## 2.2 线路材料选型与敷设方式的技术适配

线路材料选型与敷设方式的科学适配是保障接入网物理层性能与长期可靠性的关键环节。选型需综合评估材料特性(带宽容量、成本效益、环境耐受性)与具体应用场景的匹配度。光纤作为主干线路核心介质,其选型首要依据传输窗口损耗与抗弯性能。室外主干路由优先采用 G.652.D 标准单模光纤,其 1310 nm 窗口衰减系数低于 0.36 dB/km,1550 nm 窗口低于 0.22 dB/km,可支持 10G PON 及以上速率传输;对于楼宇内多转角场景,则选用抗弯性能优异的 G.657.A2 光纤,其最小弯曲半径降至 7.5 mm,显著降低微弯损耗风险。铜缆选型聚焦于高频传输能力与电磁兼容性,政企专线采用 Cat 6A 类屏蔽双绞线,其 250 MHz 带宽可保障 10GBase-T 传输;老旧小区改造则选用 G.fast 专用双绞线,通过 FEXT 串扰抑制技术实现 106 MHz 频带内 1 Gb/s 对称速率。成本维度上,光纤每公里部署成本约为铜缆的 60%-70%,但需额外计入光端设备投入,故高密度用户区宜采用光纤到户方案,低密度区域可保留铜缆过渡<sup>[3]</sup>。

敷设方式的技术适配需统筹环境约束与全生命周期维护需求。地下直埋适用于地质稳定区域,采用铠装光缆(如 GYTA53)并埋深 $\geq 1.2$  m,穿越公路时加装无缝钢管防护。在土壤腐蚀性强的盐碱地带,需采用 PE 护套+阻水带双层防护结构,并实施阴极保护措施。城市高密度区普遍采用管道敷设,标准 HDPE 管孔直径/缆径比需大于 1.5,管道填充率控制在 60%以内以预留扩容空间;针对道路开挖受限区域,创

新应用微管微缆技术,将外径 5.5 mm 的微缆气吹入 $\Phi 10/7$  mm 微管,单次穿放长度可达 2000 m。架空敷设需重点防控风振与冰凌荷载,ADSS 光缆需依据电场强度选用 AT/PE 护套( $\leq 12$  kV 场强区)或 AT 护套( $> 12$  kV 场强区),跨距超过 80 m 时加装防震鞭;在台风频发地区,自承式光缆(GYTC8S)通过内置钢丝加强芯可承受 60 m/s 风速冲击。

## 2.3 线路性能验证与风险防控方案设计

线路性能验证与风险防控方案设计是有线通信接入网线路实施的核心环节,旨在通过标准化测试流程和主动防控机制,降低网络中断风险并保障业务连续性。性能验证首先依托标准化测试方法,包括带宽测试与误码率检测等关键项目。在光纤接入场景中,光时域反射仪用于测量光纤长度、损耗分布及断点定位,其操作需依据 ITU-T G.984.7 规范执行扫描波长 1310 nm 与 1550 nm 窗口,确保链路损耗控制在预设阈值内;同时,比特误码率测试仪通过发送伪随机二进制序列验证传输质量,如 10 Gb/s 速率下误码率应低于 $10^{-12}$ 。铜缆网络则采用矢量网络分析仪进行带宽测试,评估高频响应特性并检测串扰问题。这些测试需在工程验收阶段实施全路径覆盖,并记录初始基准数据,后续通过周期性复测监控性能劣化。标准化流程强调测试环境一致性,例如避免测试时段与高峰业务重叠以减少误差,确保结果可追溯性。

风险防控策略聚焦故障预测、冗余设计与应急响应三方面。故障预测基于历史运行数据,应用简单趋势分析算法识别潜在隐患,如光纤老化速率或连接器污染累积;算法输入包括光功率监测值与环境参数,输出风险等级用于指导预维护。冗余设计以物理层保护为主,在关键节点部署双路由或环状拓扑,结合自动保护倒换协议实现 50 ms 内故障切换,例如主干光缆采用 1+1 热备份结构,避免单点失效。应急响应机制整合实时监测与预案执行,智能光分配网络系统通过连续采集光功率、温度等参数,触发分级告警;预案涵盖快速定位、资源调度与业务恢复步骤,如利用备纤资源进行紧急旁路。此方案要求风险模型与网络拓扑联动,确保防控措施精准匹配不同可靠性等级业务<sup>[4]</sup>。

## 3. 有线通信接入网线路设计的优化策略与实践应用

### 3.1 基于智能算法的线路资源动态调配优化

为应对千兆宽带与政企切片业务峰谷差异带来的端口闲置与链路拥塞并存问题,接入网线路资源需由静态配额转向动态调配。遗传算法以 OLT 端口、光交箱纤芯及管道孔位为基因片段,将链路利用率、时延、故障概率加权归一后构建适应度函数,通过选择、交叉与变异迭代生成最优资源重配置方案;其优势在于可同时处理离散变量与多目标权衡,避免人工经验导致的局部最优。机器学习侧则采用轻量级在线学习框架:以 15 min 粒度采集历史流量、光功率及气象数据,经特征工程后输入基于增量式梯度提升的预测器,提前 1 h 输出各分光器端口带宽需求曲线;预测误差由滑动窗口持续修正,保证模型对突发直播、云渲染等新业务具备快速泛化能力。预测结果作为遗传算法约束输入,使重配置窗口与业务峰值同步,实现“预测—决策—执行”闭环。为降低算法落地门槛,控制器采用微服务架构嵌入现网 EMS,南向通过扩展的 OpenFlow+ PON TL1 指令驱动可调分光器、可重构光交箱及 ODN 智能端口,北向向运营商城域网编排器暴露 RESTful API,实现分钟级弹性伸缩<sup>[5-6]</sup>。

### 3.2 融合 5G 承载需求的线路设计升级路径

5G 前传、中传与回传对有线接入网提出三级差异化承载需求:前传需 25 Gb/s 级 eCPRI 信号在 10 km 内实现低于 100  $\mu$ s 单跳时延;中传要求 100 Gb/s 可切片管道并支持 1  $\mu$ s 级时间同步;回传则需 200 Gb/s 以上带宽且具备 50 ms 保护倒换能力。为此,接入光缆网率先由 GPON 演进到 50G TDM-PON,采用 G.654.E 大有效面积光纤将 1550 nm 窗口衰减压至 0.17 dB/km,同时引入 DSP 补偿 25 Gb/s 直调直检带来的色散代价;线路拓扑由树型升级为“主干环+接入树”两级架构,环网节点部署基于 OSU-ODUK 的弹性硬切片设备,通过 FlexO 接口与 5G DU 侧半有源 WDM 模块对接,实现波长级资源按需指配。为压缩时延,接入机房下沉至 5 km 覆盖半径,OLT 与 DU 同址部署,并采用 1588v2+SyncE 混合授时,利用光纤前向纠错帧填充补偿不对称时延,确保节点间时间误差低于 30 ns。针对大规模天线阵列带来的光纤芯数激增,引入 16 芯带状微缆+气吹微管方案,外径 1.2 mm 的微管一次吹放 3 km,芯数密度提升 2.4 倍,同时预留

20% 微管冗余,满足后续 64T64R 升级。在管控层面,线路侧通过 OpenFlow+NETCONF 接口将可调分光器、波长选择开关纳入 SDN 域,与 5G RAN 编排器共享拓扑数据库,实现带宽、时延、可靠性三维约束下的跨层协同;当 DU 检测到 eCPRI 流量突发,控制器可在 150 ms 内完成波长重路由与 ODN 分光比调整,无需人工进站。

### 结束语:

本研究系统分析有线通信接入网线路设计的核心实施环节与优化策略,证实智能算法与工程技术协同可有效提升网络韧性。路由规划中混合拓扑结合微管微缆技术降低故障率;材料选型适配环境约束确保长期可靠性;性能验证与冗余设计构建主动防控闭环。在 5G 融合场景下,主干环+接入树架构及弹性切片实现时延误差低于 30 ns,满足前传需求。

### [参考文献]

- [1]魏学先. 物联网通信技术在有源配电网新能源送出线路保护中的应用 [J]. 电气技术与经济, 2025, (12): 144-146.
  - [2]于文鼎. 面向 5G 通信的有源配电网新能源送出线路纵联保护方案 [J]. 数字通信世界, 2025, (12): 94-96.
  - [3]赵慧,林正华. 应用光纤线路自动切换保护装置提升继电保护业务通信通道可靠性 [J]. 上海电气技术, 2025, 18 (03): 11-15.
  - [4]马洪波,李净雅,祝秀英,等. 基于频域均衡的输电线路监测光纤环网通信时延控制方法 [J]. 微型电脑应用, 2025, 41 (08): 203-206.
  - [5]曾迪昂,赵雪丹,郭艺,等. 基于智能物联技术的有线通信线路故障监测与预警系统 [J]. 智能物联技术, 2025, 57 (04): 101-104.
  - [6]张帆. 通信线路工程全生命周期管理中的风险评估与控制策略研究 [J]. 中国宽带, 2025, 21 (02): 172-174.
- 作者简介:廖宋,出生年月:1983年6月,男,汉族,籍贯:云南省个旧市,学历:本科,职称:工程师,研究方向:有线接入通信线路,通信机房绿色节能。