

边缘计算赋能互联网技术低时延传输优化

柳平¹ 饶毅²

1.中国移动通信集团湖北有限公司武汉分公司 湖北 武汉 430023

2.中国移动通信集团湖北有限公司 湖北 武汉 430023

【摘要】：边缘计算作为新一代信息技术与网络架构深度融合的核心技术，通过将计算、存储与网络资源下沉至靠近终端设备的边缘节点，有效缩短数据传输路径，为互联网技术低时延传输提供了关键解决方案。针对当前互联网传输中存在的路径冗长、网络拥塞、资源调度不灵活、链路稳定性不足及协同机制不完善等导致时延过高的问题，结合边缘计算分布式架构优势，从节点部署优化、资源调度升级、协议适配革新、智能缓存策略、链路质量优化及云边端协同强化六个维度构建低时延传输优化体系。通过边缘节点按需部署、动态资源弹性分配、轻量化协议适配、热点数据边缘缓存、链路动态优化及全层级协同调度等技术手段，实现数据传输时延的显著降低，保障高清视频直播、工业实时控制、车联网等时延敏感型业务的稳定运行，为互联网技术在高实时性场景的深度应用提供高效技术支持。

【关键词】：边缘计算；互联网技术；低时延传输；资源调度；边缘缓存；链路优化

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.048

1 引言

在数字经济快速发展的背景下，高清视频、工业互联网、车联网、远程医疗等新兴业务对互联网传输的实时性要求日益严苛，端到端低时延已成为衡量互联网服务质量的核心指标。传统互联网架构采用“终端-骨干网-云端”的集中式传输模式，数据需经过冗长路径传输至云端处理，不仅导致传输时延过高，还易因骨干网拥塞、链路故障等问题影响传输稳定性，而边缘计算打破了传统集中式架构的局限，通过在网络边缘部署具备计算、存储与通信能力的节点，使数据在靠近生成源的位置完成处理与传输，大幅缩短传输路径，减少核心网络负载^[1]。近年来，边缘计算技术在互联网传输领域的应用受到广泛关注，其分布式架构与低时延特性为解决互联网高时延问题提供了有效路径^[2]。当前，边缘计算赋能互联网低时延传输仍面临节点部署不合理、资源调度效率低、协议适配性差、链路稳定性不足、云边端协同机制不完善等技术瓶颈，亟需构建系统化的优化体系^[3]。基于此，本文立足边缘计算技术优势，聚焦互联网低时延传输核心需求，深入探讨传输优化策略，为提升互联网传输实时性与可靠性提供实践参考。

2 边缘计算赋能互联网低时延传输的核心机理

边缘计算赋能互联网低时延传输的核心逻辑在于“就近处理、缩短路径、资源下沉、协同增效”，通过架构革新与技术优化实现时延的全链路降低^[4]：从传输路径来看，传统集中式架构中，终端数据需经过接入网、骨干网、核心网等多个环节到达云端，传输距离通常在数百甚至数千公里，时延损耗较大；而边缘计算将计算与存储资源部署在基站、路由器等边缘节点，这些节点距离终端设备通常在10公里以内，数据传输路径大幅缩短，可有效减少传输过程中的链路时延与转发时延^[5]。

从资源调度角度，边缘计算采用分布式资源管理模式，边

缘节点可根据终端设备的实时需求动态分配计算、存储与网络资源，避免传统集中式架构中云端资源过载导致的调度延迟^[6]。同时，边缘计算支持“云-边-端”协同调度，云端负责全局资源统筹与策略制定，边缘节点承担本地资源调度与实时任务处理，终端设备根据业务需求灵活选择本地处理或边缘协同处理模式，实现资源利用效率与传输实时性的协同优化^[7]。

从数据处理模式来看，边缘计算倡导“数据本地处理、关键信息回传”，终端产生的海量数据在边缘节点完成过滤、清洗、分析等预处理操作，仅将处理后的关键结果或异常信息上传至云端，不仅减少了核心网络的数据传输量，缓解了网络拥塞，还降低了数据传输过程中的时延损耗^[8]。此外，边缘节点具备本地缓存能力，可将热点数据、常用业务逻辑及终端配置信息等缓存至本地，终端设备无需重复向云端请求数据，进一步缩短了数据获取时延。

从链路传输来看，边缘计算通过“边-边协同”“边-端直连”等模式减少链路转发层级，搭配链路质量动态优化技术，实时规避链路拥堵、信号衰减等问题，降低链路传输时延与丢包率，为低时延传输提供稳定的链路支撑。

从协同机制来看，边缘计算构建“云-边-端”三级协同架构，云端依托强大的算力与存储能力承担全局决策、模型训练与数据备份任务，边缘节点聚焦实时数据处理、本地资源调度与业务响应，终端设备负责数据采集与指令执行，三者通过标准化接口与协同协议实现数据互通、资源共享与任务协同，避免单一节点处理能力不足导致的时延瓶颈，实现全链路传输效率的优化。

3 边缘计算赋能互联网低时延传输的优化策略

3.1 边缘节点部署优化

边缘节点的部署位置与密度直接影响传输时延性能，需结

合终端设备分布、业务需求及网络拓扑结构进行精准规划。采用“热点区域高密度覆盖+广域场景分层部署”的策略，在工业车间、交通枢纽、商业综合体等终端设备密集的热点区域，部署微边缘节点实现近距离覆盖，缩短终端与边缘节点的物理距离，确保实时交互类业务的低时延传输；在智慧农业、远程监控等地理分散的广域场景，采用“边缘节点-区域边缘中心”的分层部署模式，边缘节点负责就近处理终端数据，区域边缘中心承担数据聚合与跨区域协同任务，在覆盖范围与传输时延之间实现平衡。同时，边缘节点部署需与5G基站、工业网关等网络接入点协同，利用“边站协同”优势提升网络接入速率与稳定性，减少接入时延。

3.2 资源调度策略升级

构建基于多智能体深度强化学习的动态资源调度机制，边缘节点通过实时监测CPU、内存、网络带宽等资源利用率，结合业务优先级与时延需求，实现资源的弹性分配与动态调整^[1]。引入“集中训练-分布式执行”架构，云端Critic网络获取全局资源状态与业务数据，评估调度策略的整体效能，边缘节点Actor网络基于本地观测快速做出资源分配决策，无需频繁与云端交互，提升调度响应速度。针对潮汐式流量场景，预设资源扩容与收缩策略，在业务高峰期前自动启动备用边缘节点或扩容现有节点资源，在业务低谷期释放冗余资源，避免资源浪费与过载延迟。同时，建立边缘节点负载均衡机制，当单个边缘节点负载超过阈值时，自动将部分任务迁移至邻近空闲节点，迁移过程采用轻量化迁移协议，确保业务无感知且迁移时延控制在毫秒级。

3.3 协议适配与优化

针对不同业务场景的传输需求，优化边缘计算环境下的协议适配方案。对于工业控制、车联网等超高实时性业务，采用轻量化传输协议，简化协议头部结构、减少冗余字段，降低协议解析时延；引入时间敏感网络技术，通过流量调度与优先级划分确保关键业务数据的优先传输，减少传输抖动。对于高清视频、AR/VR等大带宽业务，采用基于QUIC协议的传输方案，利用QUIC协议的0-RTT握手、多路复用及拥塞控制优化等特性，减少连接建立时延与传输拥塞导致的时延增加。同时，边缘节点部署协议转换网关，支持Modbus、MQTT、HTTP等多种协议的双向转换，解决异构终端设备的协议适配问题，避免协议不兼容导致的传输延迟。

3.4 智能缓存策略革新

构建基于业务类型与访问频率的智能缓存机制，提升边缘节点的缓存利用率与数据获取效率。采用分层缓存架构，边缘节点本地缓存热点数据与实时业务数据，区域边缘中心缓存跨节点共享数据与历史业务数据，云端缓存全量数据与冷数据，形成“本地缓存-区域缓存-云端缓存”的三级缓存体系。引入

缓存替换算法，根据数据的访问频率、访问时间、业务优先级及数据大小等多维指标，动态调整缓存数据的留存与替换策略，确保高优先级、高访问频率的数据始终被缓存。同时，支持缓存预加载功能，边缘节点基于用户行为分析与业务场景预测，提前将终端设备可能需要的数据缓存至本地，例如在视频直播场景中，边缘节点根据用户观看历史与热门推荐列表，预加载即将播放的视频片段，减少用户播放过程中的卡顿与加载时延。

3.5 链路质量动态优化

构建基于实时监测与智能调整的链路质量优化机制，保障边缘计算环境下的数据传输稳定性与低时延。边缘节点内置链路监测模块，以100ms为周期采集链路带宽、时延、丢包率等关键指标，通过加权算法评估链路质量等级，当链路质量低于预设阈值时，自动触发优化策略。采用动态信道选择技术，在无线传输场景中，实时扫描周边信道的干扰强度，自动切换至干扰低、带宽充足的信道，减少电磁干扰导致的传输延迟与丢包；在有线传输场景中，通过链路聚合技术将多条物理链路捆绑为逻辑链路，提升链路带宽与冗余能力，同时利用链路纠错编码技术修复传输过程中的数据错误，避免重传导致的时延增加。针对跨边缘节点传输场景，采用链路动态路由技术，基于实时链路质量数据选择最优传输路径，避开拥堵或故障链路，通过路径冗余设计确保传输连续性，进一步降低端到端传输时延。

3.6 云边端协同机制强化

构建“全局统筹-本地执行-实时反馈”的云边端协同架构，明确各层级的功能定位与协同流程，提升全链路传输效率。云端层面，部署全局协同调度平台，基于大数据分析技术挖掘终端业务需求规律与网络资源状态趋势，制定全局资源分配策略、缓存同步规则与链路优化方案，并将策略指令下发至边缘节点；同时，云端负责边缘节点的生命周期管理与故障容错处理，当边缘节点出现故障时，快速调度邻近节点接管业务，避免业务中断与传输时延激增。边缘层面，建立边缘节点间的协同通信机制，通过专用通信链路实现节点间的实时数据共享与任务协同，对于跨区域业务，采用“就近接入-边缘协同-云端兜底”的处理模式，边缘节点间直接传输数据，无需绕经云端，缩短跨区域传输时延。终端层面，优化终端设备的协同接入能力，支持终端根据业务类型与网络状态自适应选择接入模式，对于实时性要求极高的业务，采用“端-边直连”模式直接与边缘节点交互；对于需要全局数据支撑的业务，采用“端-边-云”协同模式，通过边缘节点快速获取云端资源，实现实时性与业务完整性的平衡。同时，建立标准化的协同接口与数据交互协议，确保云、边、端三者之间的数据传输与指令交互高效顺畅，减少协同过程中的协议转换时延与数据交互损耗。

4 结论与展望

本文围绕边缘计算赋能互联网低时延传输展开研究,深入分析了边缘计算通过缩短传输路径、优化资源调度、革新数据处理模式、提升链路质量及强化云边端协同赋能低时延传输的核心机理,从节点部署、资源调度、协议适配、智能缓存、链路优化及云边端协同六个维度构建了系统化的优化体系。研究表明,边缘计算技术能够有效解决传统互联网架构的高时延问

题,为时延敏感型业务提供稳定可靠的传输支撑。未来研究可进一步聚焦三个方向:一是探索 AI 大模型与边缘资源调度的深度融合,通过轻量化大模型实现资源调度策略的自学习与自优化;二是优化边缘节点的异构资源协同管理方案,提升 CPU、GPU、NPU 等多类型资源的协同利用效率;三是强化边缘计算环境下的安全防护技术,在保障低时延传输的同时,提升数据传输与处理的安全性,推动边缘计算在更多高实时性、高安全性要求的场景中落地应用。

参考文献:

- [1] 施巍松,张星洲,王一帆,等.边缘计算:现状与展望[J].计算机研究与发展,2019,56(1):69-89.
- [2] 邓晓衡,李蕊.基于综合信任的边缘计算资源协同研究[J].计算机研究与发展,2018,55(3):447-460.
- [3] 齐彦丽,周一青,张娇,等.融合移动边缘计算的未来 5G 移动通信网络[J].计算机研究与发展,2018,55(3):461-472.
- [4] 符永铨,李东升,陈鸣.边缘计算环境应用驱动的网络延迟测量与优化技术[J].计算机研究与发展,2018,55(3):485-500.
- [5] 于博文,王兴伟,刘军,等.移动边缘计算任务卸载和基站关联协同决策问题研究[J].计算机研究与发展,2018,55(3):513-526.
- [6] 李磊,郑黎明.适用于边缘计算的 6H 并行计算架构[J].计算机工程与科学,2023,45(9):1544-1552.
- [7] 于亚男,于明帅.基于多层移动边缘计算的工业物联网资源管理与优化[J].移动通信,2023,47(8):33-38.
- [8] 王晓峰,李明.边缘计算在智能电网中的应用研究[J].电网技术,2022,46(3):957-965.