

高速公路智能交通监控系统数据传输稳定性优化

杨成龙

云南省交通科学研究院有限公司 云南 昆明 663100

【摘要】：云南省高速公路监控数据传输存在协议不兼容、多级上传不稳定、链路故障易丢包等问题，本文结合云南山区高速地形复杂、设备多样的实际特点，分析数据传输现状及稳定性影响因素，从协议规范、中间件传输、调度策略、差错控制四个维度设计优化方案。试点路段测试与工程部署验证显示，优化后数据传输时延、丢包率等核心指标显著改善，传输稳定性大幅提升，可有效满足全省高速公路实时监控、应急指挥与路网协同管控的业务需求，为山区高速公路监控数据传输系统优化提供实践参考。

【关键词】：高速公路；监控数据；传输稳定性；协议标准化；中间件传输

DOI:10.12417/3083-5526.26.02.006

引言

云南省高速公路路网持续完善，监控系统作为路网管控、应急处置的核心支撑，数据传输稳定性直接关联路网运行安全与管理效率。山区地形复杂、路段跨度大、气候条件恶劣，现有四级传输架构环节多、故障点分散、设备协议不兼容，致使数据传输延迟、丢失、控制指令失效现象频发，难以满足实时监控与应急指挥需求。本文分析监控数据传输现状与关键影响因素，设计科学可行的优化方案并验证有效性，解决山区高速监控数据传输痛点，提升监控系统可用性，为全省高速公路智能管控提供技术支撑。

1 监控系统数据传输现状与稳定性问题分析

1.1 省级高速监控数据传输架构现状

云南省高速公路监控数据传输采用省级监控总中心—区域监控中心—路段监控分中心—外场设备四级传输架构，与路网“统一管理、分级控制”的管理体制完全匹配，昆安高速、安楚高速、蒙新高速等省内早期通车路段均有实际应用。外场设备通过多串口卡或终端服务器接入监控分中心通信计算机，分中心与中心、总中心依托 TCP/IP 专用通信网络实现数据逐级上传，业务数据流沿“外场设备→分中心→中心→总中心”单向汇聚。云南山区地形复杂、路段跨度大、气候条件恶劣，叠加多级转发、长距离传输的架构特性，传输环节增多、故障点分散，稳定性保障难度大幅提升。

1.2 外场设备数据传输协议适配问题

云南省高速公路外场设备涵盖车辆检测器、气象检测器、能见度检测器、可变信息标志、可变限速标志、紧急电话等多类型终端，来自不同厂商、不同建设批次，通信协议互不兼容，数据帧格式、校验方式、地址编码规则差异显著^[1]。云南交投集团管辖的早期运营路段中，分中心需为不同设备开发专用适配接口，协议解析逻辑混乱、兼容性差，易出现数据解析错误、控制指令下发失败、设备状态反馈异常等问题，元谋—武定、永仁—元谋等长下坡、隧道群重点管控路段，协议适配缺陷直接影响监测数据连续性。

1.3 分布式多级数据上传稳定性缺陷

分布式多级上传模式下，外场实时数据先由监控分中心采集、存储，再逐级上传至区域监控中心与省级监控总中心。传输链路长、转发节点多，未建立传输优先级、流量控制与拥塞避让机制。交通早高峰、恶劣气象等大流量场景中，监控分中心轮询数据易堆积，上传队列阻塞，导致省级平台接收数据严重滞后。蒙新高速实际运行中，曾出现分中心上传延迟超3分钟、中心端数据刷新不及时的情况，无法满足实时监控与应急指挥的时效性要求。

1.4 传输链路故障与数据丢失成因

云南山区高速公路传输链路易受地质灾害、强降雨、大雾、施工破坏等因素影响，光纤中断、串口干扰、交换机带宽瓶颈、网络抖动等故障频发。原有系统采用简单校验方式，未建立数据重传、断点续传、本地缓存机制，链路中断或数据包丢失时，无法自动补传与恢复。多雨多雾季节，交通流量、气象参数、设备状态等关键数据丢失现象频繁，难以快速定位故障点与补全缺失数据，直接降低监控系统可用性与应急处置能力（见图1）。

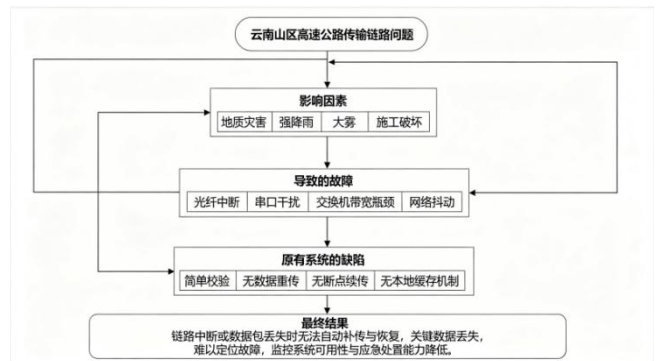


图1 传输链路故障与数据丢失成因

2 影响数据传输稳定性的关键因素研究

2.1 外场设备通信协议标准化程度

外场设备通信协议标准化不足是数据传输不稳定的底层根源，直接决定数据传输的兼容性与可靠性^[2]。云南省早期高

速公路建设中，未统一执行外场设备通信规范，各设备厂商自主制定协议标准，设备地址编码、报文结构、校验算法、控制码定义各不相同，与 GB/T 34428 高速公路监控外场设备通信系列国家标准存在明显差距，协议兼容性极差。多协议并存让外场设备接入适配工作异常复杂，增加系统开发与维护成本，还导致数据解析容错率低、数据格式不统一，引发数据传输错误、丢包、控制指令失效等问题，成为制约数据传输稳定性的核心因素。

2.2 中间件数据传输机制可靠性

中间件是多级架构下数据传输的核心载体，传输机制可靠性直接决定数据传输的稳定性与高效性。原有监控系统未采用成熟分布式中间件封装传输逻辑，数据上传依赖定制化点对点开发模式，缺少统一的对象请求代理、连接保活、断线重连、异步批量传输等核心功能。跨节点、跨区域数据传输中，无法实现服务自动注册与寻址，某个传输节点发生故障，极易引发整个传输链路中断，造成数据传输停滞。缺乏有效数据同步机制，数据的一致性、完整性与时序性难以保障，进一步加剧数据传输的不稳定性。

2.3 网络链路传输与传输负载均衡能力

网络链路质量与传输负载均衡能力是数据稳定传输的基础，直接影响传输速率与可靠性^[3]。云南省高速公路骨干传输网存在诸多短板，带宽不足、单链路无冗余备份、汇聚节点性能瓶颈突出，无法满足大量监控数据的并发传输需求。监控数据与视频流、收费数据等多种业务数据混传，易出现带宽抢占，导致关键监测数据传输延迟。山区、隧道、桥梁等特殊路段网络环境复杂，网络抖动大、丢包率高，未实施科学带宽分配与流量调度策略，传输负载分布不均，进一步加剧数据传输波动，影响传输稳定性。

2.4 数据校验与重传机制有效性

数据校验与差错恢复机制有效性是避免数据丢失、保障数据完整性的最后保障，直接关系数据传输可靠性。原有监控系统仅依赖 CRC 校验实现基础差错检测，未设计分包序号、应答确认、超时重传、断点续传等完整差错控制流程，容错能力较弱。链路瞬断、数据包错乱、局部丢包等情况出现时，系统无法自动识别丢包位置、确认数据接收状态，也无法完成超时重传与断点续传，少量数据缺失即可导致整条报文失效，难以保证数据完整性。不完善的差错控制机制，是数据丢失、传输质量下降的直接诱因。

3 数据传输稳定性优化方案设计

3.1 统一外场设备通信协议规范设计

借鉴高速公路 EGOECP 通用协议成功经验，结合云南省山区高速路网特点、设备现状与业务需求，制定省级统一外场设备通信协议，规范物理层参数与数据链路层格式，从根源解

决协议不兼容问题。物理层统一设置波特率 9600、数据位 8、无校验、停止位 1、无流控，保障设备通信参数一致；数据链路层固定报文格式，以 SYN(0x16)为起始位、ETB(0x17)为结束位，报文包含报文长度、设备地址、控制码、参数、CRC 校验段等核心字段，保障数据传输准确性；统一外场设备 9 位地址编码规则与故障码格式，覆盖所有类型外场设备，实现全品类设备协议兼容，支持存量设备利旧改造与新增设备即插即用，大幅降低设备接入与维护成本。

3.2 基于中间件的可靠传输模块优化

采用符合 CORBA 标准的分布式对象中间件搭建数据传输软总线，构建统一传输架构，在监控分中心、区域中心、省级总中心分别部署传输服务节点，实现三级节点高效联动。名字服务实现接收服务自动注册与寻址，建立透明远程调用机制，简化跨节点数据传输流程，提升传输效率；封装连接保活、心跳检测、断线自动重连、异步批量上传、断点续传等核心功能，实时监测传输链路状态，断线时快速重连，避免数据传输中断；按数据重要性划分传输优先级，将交通流量、事故告警、紧急电话等关键数据设为高优先级，优先保障传输，普通监测数据设为低优先级，合理分配传输资源，提升分布式环境下数据传输鲁棒性（见图 2）。

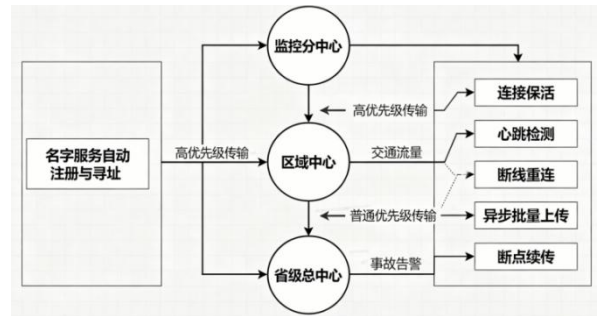


图 2 基于中间件的可靠传输模块优化

3.3 多级分布式数据传输调度策略

构建三级联动传输调度策略，结合各级节点业务职能，实现数据传输有序管控与负载均衡^[4]。监控分中心实施定时轮询与本地缓存策略，按 5 分钟标准周期采集外场设备数据，完成数据初步校验与本地入库，避免数据实时上传带来的链路压力；区域监控中心实施流量整形与拥塞控制，统筹调度各分中心上传数据，避免多路段并发上传引发的链路拥堵；省级总中心实施统一接收、校验、入库与分发，保障数据一致性与完整性。建立分时上传、动态调整轮询间隔、带宽限流机制，根据链路负载实时调整传输参数，均衡跨层级传输负载，避免数据堆积与节点阻塞，提升传输稳定性。

3.4 传输差错控制与冗余备份设计

构建“校验+确认+重传+冗余”一体化差错控制体系，全方位保障数据传输的完整性与可靠性。采用 CRC 校验+分包序

号+应答确认组合机制，CRC 校验完成数据差错初步检测，分包序号与应答确认实现丢包精准定位，检测到丢包时，系统自动触发超时重传机制，确保数据完整传输；关键传输链路采用双链路热备模式，两条链路并行运行，主链路故障时，系统毫秒级自动切换至备用链路，实现链路自愈，避免链路中断引发的数据丢失；监控分中心配置专用数据缓存区，结合 Oracle 分区表存储与 RMAN 在线备份技术，实现故障状态下数据本地保存，链路恢复后自动续传，最大限度降低数据丢失风险，保障数据传输连续性。

4 优化方案实现与稳定性验证

4.1 优化后传输系统架构实现

基于上述优化方案，构建“四层架构、双平面传输、中间件统一调度”的稳定传输体系，全面适配云南山区高速公路传输需求^[5]。外场设备严格遵循统一通信协议接入监控分中心，实现设备统一接入、数据统一解析；监控分中心部署协议解析、数据缓存、中间件客户端模块，完成数据采集、校验、缓存与上传；区域中心与省级中心部署中间件服务端、名字服务及数据接收模块，实现数据统一接收、调度与分发。网络层采用 OTN+PTN 双平面冗余架构，升级昆明核心环网带宽至 40G，地州至省级骨干带宽提升至 10G，关键路段部署工业级环网交换机，实现链路毫秒级自愈，有效解决山区链路不稳定问题，全面提升数据传输的可靠性与高效性。

4.2 数据传输稳定性测试方案

选取云南省蒙新高速、新河高速作为试点路段，结合两条路段地形特点、设备分布与业务需求，构建多场景真实性测试环境，全面验证优化方案有效性。测试场景涵盖单设备连续上传、多设备并发上传、链路中断模拟、高峰期大压力上传、恶劣天气模拟等，覆盖日常运营与极端场景。选取传输时延、丢包率、数据正确率、断线恢复时间、指令响应时延为核心评价指标，采用专业测试工具，连续 72 小时不间断采集测试数据，详细记录优化前后各项指标变化，通过对比分析，全面验证优化方案对数据传输稳定性的提升效果，确保方案可满足实际运营需求（见图 3）。

4.3 关键指标对比与效果验证

试点路段实测数据结果显示，优化后数据传输稳定性显著提升，各项核心指标均达预期目标。数据端到端传输时延由

优化前 3 分钟以上大幅降至 300ms 以内，可满足实时监控时效性需求；数据丢包率从优化前 3.2%降至 0.1%以下，有效保障数据传输完整性；数据完整正确率提升至 99.9%，为路网管控提供精准数据支撑；断线自动重连时间缩短至秒级，避免链路中断引发的传输停滞；设备控制指令响应时延稳定在 500ms 以内，确保控制指令快速下发与执行。长下坡、隧道群、气象复杂路段，传输稳定性提升更为突出，可完全满足云南省高速公路实时监控、应急指挥、路网协同管控的业务要求。

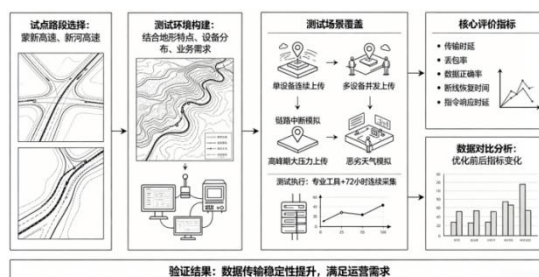


图 3 数据传输稳定性测试方案

4.4 工程部署与运行适配实现

结合云南省高速公路路网分布与运营现状，采用分区域、分路段、逐步替换的工程部署模式，降低部署对现有监控系统运营的影响。蒙新高速、新河高速、永元高速等早期运营路段优先完成系统改造，重点解决协议不兼容、链路不稳定等突出问题，积累部署经验；后续逐步向全省路网推广覆盖，实现全省高速公路监控数据传输系统统一优化。同步开发协议配置工具、链路监控平台、故障告警平台、数据统计分析工具，实现协议参数配置、传输状态监视、故障定位告警、运行报表生成一体化管理，系统适配云南交投“省级统一监管、区域分级运维、路段现场执行”的管理体系，可长期稳定支撑全省高速公路智能监控业务运行。

结语

本文针对云南省高速公路监控数据传输稳定性问题，完成现状分析、因素研究、方案设计及实践验证等工作。统一设备通信协议、优化中间件传输机制、制定多级调度策略、构建差错控制与冗余备份体系，有效解决协议不兼容、链路不稳定、数据易丢失等核心痛点。试点测试与工程部署结果显示，优化方案适配云南山区高速特点，显著提升数据传输的实时性、完整性与可靠性，完全满足实际运营需求。

参考文献:

[1] 朱丁涛.多元数据在高速公路机电系统监控与调度中的应用研究[J].运输经理世界,2025,(10):145-147.
 [2] 赵雷.大数据在高速公路交通监控中的应用与实现[J].汽车画刊,2025,(02):29-31.
 [3] 蔡巍.高速公路智能交通监控系统的设计与实现[J].运输经理世界,2024,(34):67-69.
 [4] 冯雪婧.大数据在高速公路机电系统监控与调度中的应用研究[J].运输经理世界,2024,(30):153-155.
 [5] 赵加信,秦建良,焦阳,等.高速公路收费监控多源信息融合共享服务探析[J].中国交通信息化,2024,(10):76-78.