

# 高速公路交通信息控制系统中通信可靠性保障研究

刘应华

云南省交通科学研究院有限公司 云南 昆明 650011

**【摘要】**：高速公路交通信息控制系统是实现交通流全面优化、高效安全管理的关键，其效能直接关系到通信链稳定传输，但是现实环境的复杂性影响，信号干扰、设备故障、网络拥堵等经常导致通信中断，严重制约系统可靠性，在本文中，将探究通信可靠性影响因素，并提出对应的保障框架，提升通信可用性，降低数据包丢失率，同时确保延迟敏感应用性能需求等，期望能够为强固高速公路通信系统韧性提供参考思路，促进智能交通持续发展，响应国家相关政策。

**【关键词】**：高速公路；交通信息控制系统；通信保障

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.023

智能交通系统演进让高速公路管理呈现出对信息技术更加依赖的特征，通信网络作为在这之中起到数据交互作用的载体，可靠与否直接影响高速公路三大系统、隧道机电的功能有效性，在实际中，通信链路面临设施设备迭代、交通事故、恶劣天气、鼠患、恶意攻击等风险，传统措施很难有效应对，虽然已有一些应对策略，但是多数效果不佳，缺乏系统级协同保障方案。构建集成化通信可靠性保障体系，能够提高系统在异常条件下的工作能力。

## 1 高速公路交通信息控制系统中通信可靠性的影响因素

高速公路交通信息控制系统应当是多层次集成平台，物理构成主要包括路侧单元、中心服务器（处理层+应用层）、移动终端等，路侧单元部署在公路沿线，包括线圈检测器、视频摄像机与气象传感器等，负责采集车辆速度、密度及环境数据；中心服务器处理层对数据进行数据存储、清洗及数据分析，生成控制指令下发给执行机构，如交通信号灯、可变信息板或应急广播系统，应用层实现动态路径诱导、事故应急处理与信息提示等功能。在实际应用当中，通信需求随路段特征变化，例如隧道区域需强化覆盖连续性及大包数据量转发性，而枢纽路段则需应对高并发流量，这要求保障策略具备灵活性与可扩展性。

从影响因素角度来说，通信可靠性大多受制多重因素，并不会因单一因素而发生明显变化，可以将其归类成固有缺陷、环境扰动、操作因素三个方面，一是固有缺陷，对于高速公路来说，其交通信息控制系统通信可靠性影响因素中的固有缺陷，一般源自技术层面的局限性，如半导体器件老化导致发射功率漂移，或者协议设计未充分考虑移动性管理，造成切换指令冗余。二是环境扰动因素，环境扰动包括物理环境变化（如机房高温、火灾雷电等引发的通信系统故障），且高速公路的线性拓扑使得网络易受切割攻击，即单点故障可能隔离整段通信。三是操作因素，一般包括设备配置错误、维护滞后及人为干扰，例如数据通道配置错误引发冲突、接口自适应配置错误造成中断等。除此之外，在部分情况下，经济与规制层面也需

要引起重视，通信设施投资受预算限制可能导致冗余部署不足，波分复用分配政策可能制约到新技术整体应用，因此，保障策略需要在技术可行、经济可持续上寻求平衡，从预防、检测与恢复入手，构建闭环控制机制。

## 2 高速公路交通信息控制系统中通信可靠性的保障策略

### 2.1 设计多层次冗余容错网络架构

冗余是提升系统可靠性的典型策略，对于大规模部署的高速公路通信系统，简单的全系统冗余将导致成本增加、运维复杂度提高，因此，有必要设计一种智能型、分层次的冗余容错架构。

#### 2.1.1 物理拓扑

可以从设计“骨干环形双网+接入混合网状”复合拓扑结构入手，在沿高速公路架设的主干通讯光缆应用物理路由分离的双环拓扑（如分别部署在道路两侧或中分带的隔离管道中），使得任何单点光缆切断故障发生时系统可借助反向环路完成毫秒级的链路自动保护切换，避免业务中断；对通信接入网络（包含全光接入和网线接入），则在关键区域（如收费站、长隧道、服务区）部署网状网络，每个单元（RSU）或接入点与至少两个相邻节点建立至少两条回程链路，形成多条传输路径。单独节点失效、某个接入链路受到干扰的情况下，数据流可以动态选择替代路径做迂回传输。

#### 2.1.2 设备与链路

基于业务关键性，从设备和链路落实差异化冗余策略，对于路段或者是区域控制中心的核心服务器、交换机及电源，采用“N+1”或“2N”级别的热备份，并配以负载均衡与状态实时监测机制，实现故障时的无缝切换；对于负责传输安全关键信息（如碰撞预警、匝道控制信号）的特定RSU，采用“热备份”模式，备用设备处于低功耗待机状态，主用设备故障时可通过远程指令快速激活，切换时间控制在2秒以内；对于一般的数据采集RSU，则可采用成本更低的“冷备份”或区域共享备份策略；传输媒介上推行“固移融合”，即固定光纤链路与

无线公网/专网（如 LTE、5G 切片网络）互为备份，系统持续监测主用光纤链路的性能，当误码率超过阈值或中断时，自动将关键业务流量切换到备用无线链路，尽管带宽可能下降，但保证了控制指令的不断流。

## 2.2 设计自适应智能抗差错传输技术

通常来说，无线信道固有特性可能会造成传输错误，传统抗差错策略很容易在信道良好的时候浪费资源，信道不佳的时候却又难以应对，因此必须要设计一种自适应性强的抗差错传输机制，构建“感知-决策-执行”的闭环系统。

### 2.2.1 感知

感知层面上，收发双方通过周期性的导频信号或利用数据包中的已知训练序列，对信道进行实时估计；获取的关键状态信息包括瞬时信噪比、多普勒频移、延迟扩展以及包丢失率的短期统计，这些信息得以整合、集合成信道质量的指示向量。

### 2.2.2 决策

决策层面是抗差错机制关键环节，因此，可以设计轻量级强化学习代理，结合上文感知环节的指示向量，增设抗差错技术组合，下文将阐述一个基础方案：

一是前向纠错编码的类型与码率、自动重传请求的最大重传次数、交织器的深度、调制方式以及发射功率的微调。

二是奖励函数，其是多目标权衡函数，综合传输成功率、时间延迟、能量效率、带宽利用率等。

三是代理通过与环境的交互（即不断的传输尝试），学习在不同信道状态下选择最优抗差错动作的策略。举例来说，车辆高速远离 RSU 导致信噪比持续下降的场景，代理会逐步采取更稳健的策略，先降低调制阶数（从 16QAM 降至 QPSK），若信道继续恶化则增强 FEC 编码强度（提高冗余度），并允许更多的重传次数，以牺牲一定频谱效率为代价确保可靠性。

### 2.2.3 执行

抗差错机制中执行应当是末端环节，但是也是影响通信可靠性的关键，依照决策环节的结果，对物理层和链路层加以参数调整，在实际应用中可以采取联合自适应 FEC 与混合 ARQ 的方案，首次传输时采用中等码率的 FEC，若接收端解码失败，并非简单地请求重传原始数据包，而是发送一个包含增量冗余信息的特定重传包；接收端将之前收到的有误信息与新收到的增量冗余信息组合，进行再次解码，这种“增量冗余 HARQ”方式能获得更高的编码增益，提高了重传效率。自适应机制会根据首次传输失败时的具体错误模式，智能选择下一次重传应发送的冗余信息类型。

## 2.3 设计动态资源优化调度技术

高速公路通信网络承载的业务具有异质性，事故应急响应、紧急车辆优先通行请求等安全类业务对时延和可靠性比较

敏感，一般应该设置成“最高优先级”；交通状态视频回传、收费数据等管理类业务对带宽要求高，但通常来说延迟容忍度较高，可以稍微次级优先；公众信息娱乐服务属于“增值”业务类型，可以放置在末级优先级。由此，在网络资源有限的情况下，必须有一个高效的调度器，根据业务优先级、动态网络状况进行资源分配。

在系统的上级维度，接纳对应的业务流之后，先进行分类、标记优先级，调度器维护多个虚拟队列，每个优先级类别对应一个，资源分配的基本周期为时隙，每个调度周期开始时，调度器执行一个两阶段决策过程。

一是“关键业务保障阶段”，调度器检查最高优先级队列，对于其中的实时安全消息，采用“绝对抢占+预留”策略，系统为这类业务预先静态分配一小部分专用资源池，确保其随时可接入；与此同时，基于对区域内车辆轨迹和事件触发概率的短期预测，动态调整不同地理片区预留资源的比例，如果预测某路段发生事件的概率升高，则临时增加该片区对应 RSU 的预留资源，以防万一。

二是“弹性业务调度阶段”，满足最高优先级的业务之后，剩余资源在所有中低优先级业务间进行分配，可以采取改进的加权赤字轮询算法，每个队列有一个权重，并维护一个“赤字”计数器，调度时，算法不仅考虑权重，还引入当前信道条件因子和队列等待时间因子。对于某个队列流，如果其目标接收端瞬时信道质量好，则增加本次被调度概率，提升整体频谱效率；如果某个数据包已在队列中等待过久，接近时延极限，临时提升其调度优先级，平衡公平性、效率和时间延迟。

## 2.4 设计全景感知与协同自愈技术

### 2.4.1 感知环节

可靠性较高的通信系统需要有强大自我监控、诊断、修复能力，可以结合数字孪生技术、大数据分析等，设计网络状态的全景感知以及协同自愈技术，其核心是构建一个“孪生体”，接受物理网络中的遥测数据，如设备运行状态（CPU/内存利用率、温度、接口利用率）、链路性能指标（吞吐量、时延、抖动、通断）、网络拓扑连接关系、流量矩阵以及外部环境信息（天气、交通流量），并借此实现网络实时可视化和追溯。

感知基础之上，在平台内置智能故障诊断引擎，某个性能指标发生异常时，诊断引擎会自动关联分析相关数据，如某 RSU 的丢包率指标，就可以分析“该 RSU 下所有链路的信噪比是否同时恶化？邻近 RSU 是否正常？上游光纤链路光功率是否有衰减？该区域是否有降雨或大型金属车辆通过？”等，通过基于因果图与关联规则的推理，引擎能够快速定位故障的根本原因，区分是设备硬件故障、传输链路中断、外部强干扰，还是仅仅是瞬时的业务拥塞。

#### 2.4.2 协同自愈环节

由感知和诊断触发协同自愈机制，自愈动作根据故障类型和影响范围，分为本地自愈、区域协同自愈和中心调度自愈三个层级，如对于单个 RSU 的无线接入模块软件僵死，可触发本地重启脚本（本地自愈）；对于因树木生长导致的两个 RSU 间视距链路间歇性中断，平台可指挥周边其他 RSU 调整天线方向或功率，建立一条替代的多跳中继路径，绕过障碍物（区域协同自愈）；对于光纤主干链路被施工挖断，平台则立即启动预先规划的流量切换方案，将受影响的业务引导至备用无线或迂回光路，并向运维人员派发紧急工单（中心调度自愈）。

#### 2.4.3 自我成长机制

如果平台足够成熟，还可以拥有一定的学习和进化能力，每次应对故障并予以处理的时候，从故障发生、诊断到恢复的完整数据链都可以纳入到案例库当中，借助大数据周期性的分析及大模型赋能，平台能够优化其诊断规则、调整自愈策略的

参数，甚至发现潜在的网络设计缺陷或配置错误，从而变被动响应为主动优化，这种闭环的自愈能力，使得通信网络能够在不断变化的内外部挑战中持续适应和维持稳定，是实现长期高可靠运行的终极保障。应用该平台和机制之后，能够有效延长系统无故障的工作时间、提升故障修复效率，有效提高通信系统整体可靠性。

### 3 结语

总体来说，当下高速公路工程飞速发展的大环境下，交通信息控制系统通信可靠性保障问题十分关键，通过分析影响因素，本文顺势阐述了对应的集成方案，可以较为有效地提高通信可靠性、降低延迟，为系统稳定运转提供技术支撑。但是系统来说，目前因为技术基础尚且还不是非常成熟，相关研究还存在一定局限，需要依照时代发展，尤其是人工智能技术在预测性维护中的有效应用发展，推进通信可靠性向主动性、智能化进步，另外经济性相关问题也需要深入研究，确保技术落地可行性，促进交通安全，实现高速公路数字化改造相关目标。

#### 参考文献：

- [1] 曹志伟.智慧高速公路电力供应与能源管理优化方法研究[J].智能建筑与智慧城市,2024(2):37-39.
- [2] 王超,孔德兰,李晨曦,等.考虑路网性能的交通事件影响下高速公路路径诱导策略[J].公路,2024,69(8):288-295.
- [3] 安家宏,张羽乾.基于大数据的高速公路机电设备智能运行监测技术研究[J].中国高新科技,2024(21):63-64.
- [4] 吕南航.高速公路路侧感知多源融合技术探析[J].中国交通信息化,2025(8):115-119.
- [5] 吕昆鸿.高速公路机电系统的信息化维护策略研究[J].信息产业报道,2024(10):0161-0163.
- [6] 白峰,王万良.现代通信技术在高速公路机电系统中的应用[J].信息与电脑,2025,37(8):99-101.
- [7] 唐莺萍,商强.基于 GPS 数据的高速公路行程时间估计与可靠性分析[J].山东理工大学学报（自然科学版）,2024(003):038.