

# 高速公路ETC设备故障检测与优化处置技术分析

徐学云

广东新粤交通投资有限公司 广东 广州 510000

**摘要：**ETC系统已成为高速公路收费运营的核心模式，其设备运行可靠性直接影响通行效率与公众出行体验。随着ETC普及率持续提升，设备故障频发导致的车道拥堵、交易失败等问题日益突出。本文系统分析了高速公路ETC系统设备的典型故障模式与成因，研究了基于数据驱动的故障检测方法 with 智能预警技术，提出了涵盖前端设备自诊断、后台数据交叉验证和人工快速确认的三级故障检测机制，并构建了分级响应、远程处置与现场修复相结合的优化处置流程。研究表明，建立系统化的故障检测与快速处置体系，可显著缩短故障发现与修复时间，有效提升ETC车道通行效率与系统可用性。

**关键词：**高速公路；ETC设备；故障检测；处置技术；智能运维

**引言：**ETC（电子不停车收费）系统是我国高速公路收费运营的主要方式。截至2025年底，全国ETC用户规模已超过2.5亿，ETC车道通行占比超过65%，在收费站拥堵治理和通行效率提升方面发挥了重要作用。然而，随着设备持续运行和老化，天线通信故障、栏杆机不抬杆、车牌识别错误、交易数据丢失等设备故障频发，导致车道拥堵、收费争议和通行体验下降。目前多数收费站的ETC设备维护仍以被动报修和人工巡检为主，故障发现滞后、排查效率低、处置时间长的问题突出，缺乏系统化的故障检测与快速处置体系。本文从ETC设备典型故障模式出发，研究系统化的故障检测方法 with 优化处置技术，旨在为提升ETC系统运维水平提供技术参考。

## 1 ETC系统构成与设备故障特征分析

### 1.1 ETC收费系统的基本构成

高速公路ETC收费系统由前端设备、网络传输和后台系统三大部分构成。前端设备主要包括路侧单元（RSU天线）、栏杆机、车辆检测器、车牌识别摄像机、费额

显示器、声光报警器及车道控制器等。RSU天线是ETC交易的核心设备，通过5.8GHz专用短程通信与车载OBU进行双向数据交换，完成车辆识别、电子钱包扣费及交易认证。栏杆机用于拦截和放行车辆，其动作响应速度直接影响车道通行能力。车牌识别摄像机用于辅助抓拍车辆图像，在ETC交易失败时作为人工复核依据。网络传输系统包括车道交换机、光纤收发器和站级汇聚设备，负责将车道交易数据和设备状态实时上传至收费站服务器。后台系统包括站级收费管理系统和省级联网结算中心，完成交易数据处理、黑名单管理、清分结算和设备状态监控。各子系统协同配合是ETC系统正常运行的基本保障，任一环节故障均可能导致车道功能异常或中断。

### 1.2 典型设备故障模式与成因

ETC设备故障按位置可分为前端设备故障、网络传输故障和后台系统故障三大类，各类故障的典型现象、成因及频率如表1所示。

表1 ETC系统典型设备故障模式与成因

| 设备类型    | 典型故障现象         | 主要成因                 | 频率      |
|---------|----------------|----------------------|---------|
| RSU天线   | 无法唤醒OBU、交易超时   | 射频模块老化、馈线接头氧化、天线角度偏移 | 高（约30%） |
| 栏杆机     | 不抬杆、抬杆延迟、落杆异常  | 电机驱动板损坏、限位开关失效、机械卡滞  | 高（约20%） |
| 车牌识别摄像机 | 漏拍、图像模糊、识别错误   | 补光灯损坏、镜头脏污、算法参数不适配   | 中（约15%） |
| 车辆检测器   | 无车信号、持续占用信号    | 线圈老化断裂、参数漂移          | 中（约10%） |
| 网络传输系统  | 通信中断           | 光纤断裂、交换机死机、IP地址冲突    | 低（约5%）  |
| 后台系统    | 数据无法上传、黑名单同步失败 | 服务器宕机、数据库锁死、接口服务异常   | 低（约5%）  |

前端设备中，RSU天线、栏杆机和车牌识别摄像机三类故障最为频发，合计占比超65%，是运维关注重点。网络传输故障多由光纤断裂、交换机死机或IP地址冲突引

起；后台系统故障则表现为交易数据无法上传、黑名单同步失败等。

### 1.3 当前故障检测与处置的不足

当前ETC设备故障检测与处置存在四方面不足。其一，故障发现滞后，多数收费站依赖人工巡查和司乘投诉发现故障，从发生到被发现通常在30分钟以上，隐蔽性故障可能数小时甚至数天未被察觉<sup>[1]</sup>。其二，检测手段单一，前端设备除少数具备自检功能外，大多无主动状态监测和异常上报能力，运维人员难以远程获取设备状态，排查只能“到现场才知道哪坏了”。其三，排查效率低下，故障涉及天线、控制器、网络、后台等多个环节，排查需逐个节点测试，缺乏系统化诊断流程和辅助工具，一线人员往往凭经验反复试错。其四，处置流程松散，报修、派工、到场、诊断、修复各环节缺少时限约束和协同机制，平均耗时较长，直接影响车道可用率。

## 2 ETC 设备故障检测方法

### 2.1 三级故障检测机制设计

针对故障发现滞后问题，本文设计“前端自诊断—后台数据验证—人工确认”三级检测机制，目标将MTTD从30分钟以上压缩至3分钟以内。第一级为前端设备自诊断，依托内置故障自检模块，对RSU天线RSSI、VSWR、栏杆机电机电流与转矩、限位开关IO状态、摄像机心跳信号等关键参数实时监测，超阈值时自动生成故障代码并上报。第二级为后台数据交叉验证，通过分析车道交易流水数据，捕捉交易成功率突变下降、交易时延异常延长等指标异常，结合相邻车道和门架数据交叉验证确认故障。第三级为人工快速确认，现场人员根据预警信息和初步诊断结论，5分钟内完成快速确认和二次排查，核实故障类型与严重程度<sup>[2]</sup>。三级机制层层递进，自诊断提供实时状态数据，后台分析发现规律性异常，人工确认保障判断准确性，三者协同实现故障“早发现、准定位、快确认”。

### 2.2 基于数据驱动的检测方法

数据驱动检测方法通过对车道交易数据和设备状态数据的实时采集与智能分析，实现隐性故障和早期异常的自动识别。交易流水异常分析法以正常交易成功率为基准设定动态基线（98%~99.5%），当车道成功率连续5分钟低于基线5个百分点时触发告警。交易时延异常分析法以正常交易平均耗时（200~400ms）为基准，当某车道平均时延较相邻车道延长50%以上时，提示RSU或DSRC通信链路可能存在性能下降。周期性状态检测法通过SNMP协议或自定义心跳机制，每5分钟发送状态查询指令，连续3次未响应则判定为离线故障。多维数据关联分析法将交易成功率、天线RSSI、线圈检测器状态、车牌识别置信度等多源数据综合关联，建立设备健康度评分模型，评分低于阈值时提前预警。上述方法均在站级

监控系统部署运行，无需额外硬件投入即可实现故障主动发现和自动预警。

### 2.3 智能预警与告警机制

基于三级检测和数据驱动分析结果，建立分级告警与智能推送机制。告警划分为三个级别。三级告警为性能预警，指设备指标偏离正常范围但未影响交易业务（如RSSI下降、补光灯照度衰减、误码率升高等），系统推送提示至当班班长，纳入日常关注。二级告警为设备异常，指设备部分功能失效但仍可通过冗余维持基本通行，系统自动生成工单推送至维护班组，要求2小时内到场处置。一级告警为车道中断，指设备完全失效导致车道无法通行，系统自动触发告警推送至值班站长和维护负责人，要求30分钟内到场、1小时内恢复或采取人工替代方案。告警信息通过移动终端APP实时推送，包含故障车道编号、故障代码、初步原因及处置建议，现场人员可提前准备工具和备件。

## 3 ETC 设备优化处置技术

### 3.1 分级响应与快速处置流程

建立“三级响应、分类处置”快速处置体系，响应等级与告警等级一一对应。一级响应针对车道中断类故障，由值班站长指挥，维护人员30分钟内到场，采取“先替换后维修”策略——使用备用RSU天线或备用车道控制器快速替换，恢复通行后再对故障件离线维修，目标MTTR控制在1小时以内。二级响应针对设备异常类故障，由维护班组按工单处置，到场后按标准化排查流程依次执行电源电压测量、通信链路通断测试、设备内嵌自检、RSSI与VSWR射频指标测试及配置参数核查，目标2小时内完成修复或明确方案。三级响应针对性能预警类故障，由当班班长记录并在当班结束后安排非高峰时段处理。流程执行层面，建立从故障确认、工单派发、到场处置、维修实施到恢复验证的标准化规范，各环节明确时限和责任人，使用移动终端实时填报进度，确保处置全过程可追踪、可追溯<sup>[3]</sup>。

### 3.2 远程诊断与在线处置技术

远程处置技术可在维护人员到场前完成初步诊断甚至直接恢复。远程日志调取使中心技术人员通过网络登录车道控制器或设备管理平台，提取故障时段系统日志和错误代码，初步判断故障原因（区分软件配置类、通信链路类或硬件失效类），指导现场携带正确工具和备件到场，避免“先到场后诊断”的时间浪费。对于RSU天线参数漂移、车牌识别算法适配、费率表版本不一致等软件或配置类故障，通过后台远程下发配置更新或重启指令即可恢复，无需到场。对于栏杆机控制逻辑异

常、费额显示器黑屏等复位后可能恢复的故障，通过远程供电控制实现设备断电重启。远程诊断与处置技术的应用，可使约30%~40%的软件和配置类故障实现“零到场”修复，大幅压缩故障持续时间。

### 3.3 现场快速修复与备件管理

现场修复是故障处置的最终环节，其效率直接影响车道恢复时间。应建立标准化维修工具包和备件管理体系。标准化维修工具包根据故障类型分类配置：RSU天线维修包配备手持式频谱仪、驻波比测试仪、馈线接头维修工具及备用天线；栏杆机维修包配备数字万用表、电机驱动板、限位开关及机械传动配件；车牌识别维修包配备摄像机测试仪、镜头清洁工具、补光灯及备用摄像机。每类工具包定点存放、专人管理、随时可调用。备件管理方面，建立站级备件库，按“关键设备1:1在线热备、易损件不低于月均消耗量”的原则储备核心备件。备件入库登记、出库审批、消耗预警和定期盘点形成闭环管理。每月统计分析备件消耗数据，动态调整备件储备策略。通过上述措施协同运行，将现场平均修复时间控制在30分钟以内。

## 4 故障检测与处置的优化实践

### 4.1 故障检测与处置体系的集成运行

三级故障检测机制与三级响应处置流程的集成运行，形成了“发现—预警—响应—处置—验证”的完整闭环。站级监控系统作为核心枢纽，通过SNMP轮询和私有协议接收前端设备上报的自检状态数据和交易流水分析结果，进行告警判定和分级推送。维护人员通过移动终端接收告警工单，按工单指引执行现场操作，处置完成后在系统中填报修复结果和耗时信息，系统自动完成工单闭环<sup>[4]</sup>。该集成运行模式已在某省试点收费站部署，实现了三个方面的改善：故障平均发现时间（MTTD）从原30分钟以上缩短至2分钟以内；平均修复时间（MTTR）从原2.5小时缩短至45分钟；车道可用率从原97.2%提升至99.4%。

### 4.2 典型故障场景的处置实例

以RSU天线故障为例：站级监控系统通过前端自诊

断发现某车道RSU天线RSSI值从-45dBm突降至-70dBm（低于-65dBm告警阈值），触发三级性能预警，同时该车道交易成功率在5分钟内从99%降至91%，后台数据交叉验证确认异常，系统自动生成二级故障工单推送至维护班组。维护人员在接单后10分钟内到达现场，按标准化诊断流程使用驻波比测试仪测量馈线VSWR（发现接头处VSWR达2.5，正常应小于1.5），重新处理后VSWR恢复至1.3，RSSI恢复至-48dBm，交易成功率恢复正常，从故障发生到恢复用时共计22分钟。传统模式下同类故障需待司机投诉或人工巡查发现（通常30分钟至数小时），人员到场后再排查诊断，全程耗时通常超过2小时。

### 结束语

ETC设备故障检测与优化处置是保障收费系统稳定运行的关键环节。本文系统分析了ETC设备典型故障模式，设计了三级故障检测机制，提出了基于数据驱动的智能预警方法，构建了分级响应与标准化处置相结合的优化处置体系。研究表明，“前端自诊断+后台数据验证+人工快速确认”三级机制可有效缩短故障发现时间，分级响应与远程处置技术的应用可显著降低平均修复时间，检测与处置的闭环运行为提升车道可用率提供可靠保障。随着智慧收费站建设与人工智能技术的深度应用，ETC设备运维将向预测性维护和全生命周期管理方向发展，为公众出行提供更加可靠、高效的服务。

### 参考文献

- [1]黄陈,吕能超.高速公路ETC门架数据关联与事件检测技术[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2026,50(1):36-42.
- [2]黄熠娜.基于大数据的高速公路ETC收费稽核打逃策略与实践[J].消费电子,2026(12):52-54.
- [3]孙建.智慧交通背景下高速公路ETC收费软件升级与多场景适配浅析[J].中国公路,2026(2):116-117.
- [4]蒋惠娟,汪向阳,贾小波.浅谈高速公路ETC门架系统故障对通行费计费的影响[J].中国交通信息化,2025,312(7):72-74.