

基于深度学习的高速公路收费系统运行状态实时监控与故障智能诊断方法研究

杨文源

杭州恒生芸擎网络科技有限公司 310051

【摘要】随着高速公路收费系统智能化需求的提升,以往传统基于人工巡检与阈值报警的运维模式难以满足高可靠性、低延时的运行要求。本文结合基于深度学习的高速公路收费系统运行状态实时监控与故障智能诊断方法,通过多源数据融合与动态特征提取,实现系统异常的精准感知与故障根因的快速定位。经过探究表明,该方法在收费站实际场景中误报率逐渐降低,故障定位时间缩短,为高速公路收费系统的智能化运维提供了可行方案。

【关键词】深度学习;高速公路收费系统;运行状态;实时监控;故障智能诊断方法

Research on real-time monitoring and intelligent fault diagnosis of highway toll system based on deep learning

Yang Wenyuan

Hangzhou Hangsheng Yunqing Network Technology Co., LTD 310051

【Abstract】As the demand for intelligent highway toll systems grows, the traditional operation and maintenance model based on manual inspections and threshold alarms can no longer meet the requirements of high reliability and low latency. This paper introduces a method for real-time monitoring and intelligent fault diagnosis of highway toll systems using deep learning. By integrating multi-source data fusion and dynamic feature extraction, this method enables precise detection of system anomalies and rapid identification of fault causes. Research shows that this approach reduces false alarms in actual toll station scenarios and shortens fault location time, providing a viable solution for the intelligent operation and maintenance of highway toll systems.

【Key words】deep learning; highway toll system; operation status; real-time monitoring; intelligent fault diagnosis method

高速公路收费系统作为交通基础设施的核心环节,其稳定性直接影响路网通行效率与用户服务体验。最近几年来,ETC的普及与自由流收费技术的推广,使得系统复杂度逐渐增加,设备故障、通信中断、交易异常等问题的耦合性日益明显。传统运维方式依赖人工经验与规则库匹配,存在着响应滞后、误判率高、隐性故障难追溯等缺陷,难以适应全天候、高并发的业务场景需求。而深度学习技术因其强大的特征学习与非线性映射能力,为复杂系统的状态监控与故障诊断提供了新范式。目前阶段,大部分将重点放在了单一设备或数据模态的分析,例如基于振动信号的机电设备故障预测或基于日志的交易异常检测,可是未能充分挖掘多源异构数据间的时空关联性。基于此,就需要引进合理的故障智能检测方法。

1、研究背景与目标

1.1 背景

随着高速公路路网的快速扩张和智能化交通需求的提升,收费系统作为高速公路运营的核心环节,其稳定性与效率直接影响交通流畅度、用户满意度及运营成本。传统收费

系统主要依赖人工巡检、规则化阈值报警和定期维护,存在着诸多难点。比如实时性不足,人工巡检效率低,故障响应滞后,容易引发车道拥堵或数据丢失,故障诊断过于粗放,依赖经验判断,难以精准定位复杂故障,数据处理能力有限,收费系统产生的多源异构数据难以被传统算法高效挖掘。智能化程度低,缺乏主动预测能力,无法提前预警潜在风险^[1]。

近年来,深度学习技术在图像识别、时序数据分析、异常检测等领域取得突破,为高速公路收费系统的智能化升级提供了新思路。例如视频监控,结合卷积神经网络实时识别车道车辆异常行为,预测时序,利用长短时记忆网络分析设备传感器数据,预测设备故障趋势,结合结构化数据与非结构化数据,提升故障诊断的全面性。因此,研究基于深度学习的高速公路收费系统实时监控与故障诊断方法,是提升高速公路运营效率、保障用户服务质量的必然需求。

1.2 基本目标

本文主要是利用深度学习技术,构建一套高速公路收费系统运行状态实时监控与智能故障诊断框架。

(1) 实现高精度实时监控。重点开发轻量化深度学习模型,支持多源数据的并行处理,满足毫秒级实时响应需求,构建动态阈值自适应机制,减少误报率,建立智能故障诊断

模型,设计多模态融合网络,实现故障特征的多维度提取与关联分析,分类典型故障,提升定位准确率。基于设备历史数据与 LSTM 时序模型,预测关键部件的剩余寿命,实现维护周期优化。

(2)开发可解释性支持系统,验证系统实用性与泛化性。结合注意力机制与可视化工具,生成故障诊断的可解释性报告,辅助运维人员决策。在典型高速公路收费站部署原型系统,对比传统方法,验证故障检测效率提升 $\geq 30\%$,运维成本降低 $\geq 20\%$,设计跨场景迁移学习策略,确保模型适应不同地域、设备型号的收费系统^[2]。利用深度学习技术赋能高速公路收费系统,可以全面提升运维智能化水平,社会效益、经济效益、技术价值得到了全面提升,推动多模态数据融合与边缘计算在交通领域的应用落地,为智慧交通提供技术范式。

2、系统架构设计

基于深度学习的高速公路收费系统实时监控与故障智能诊断架构设计,需遵循分层协同、数据驱动、动态反馈的核心原则,构建具备自感知、自诊断、自适应的智能体系。

(1)多模态数据感知层。构建异构传感器融合网络,集成视频流、交易日志、设备状态信号、网络流量数据等多源异构数据流,结合边缘计算节点实现数据时空对齐与轻量化预处理,采用自适应采样策略平衡实时性与数据完整性,建立基于多维度时间戳的全局数据同步机制,结合实际情况设计面向时序-空间混合特征的深度特征提取框架,对于视频数据采用 3D-CNN 捕捉时空特征,交易日志通过编码器捕获长程依赖关系,设备传感器数据应用多尺度 LSTM 网络提取动态演化特征。建立在线特征漂移检测模块,对抗生成网络实现特征空间自适应映射,解决设备老化带来的特征分布偏移问题。

(2)层次化诊断推理层。构建三级故障诊断模型体系,单设备级异常检测采用深度单类分类算法,通过记忆增强型自编码器建立设备健康基准。系统级故障定位采用图神经网络建模设备间功能拓扑关系,结合注意力机制实现关键路径异常传播分析。根因推理层集成知识图谱与深度推理网络,通过符号规则约束下的神经逻辑网络实现故障链溯源。

(3)在线学习优化层。需要建立双通道模型更新机制,常规模式采用滑动窗口增量学习,通过弹性权重固化算法实现模型参数连续优化,紧急模式触发基于故障事件的强化学习机制,利用数字孪生系统生成对抗样本来增强模型鲁棒性。设计模型漂移监测模块,基于动态阈值策略实现模型性能退化预警。

(4)决策反馈控制层。需要构建闭环决策支持系统,具体包括动态优先级调度模块,基于故障严重度预测值实现告警信息分级处理,可视化诊断图谱生成器,结合可解释性智

能化技术输出故障传播路径的可视化推理链条。采取主动防御模块,通过在线仿真预测不同处置方案的系统响应,制定最优恢复策略并自动触发预设应急预案。该架构需要全面遵循以下设计准则,比如构建微服务化的弹性计算框架,支持 GPU/FPGA 异构资源动态调度,采用事件驱动架构实现毫秒级响应,通过流批一体处理引擎保证状态感知的连续性^[3]。建立安全冗余机制,通过模型并行冗余校验和通道热备切换确保诊断可靠性。理论验证需关注时空特征耦合建模、在线学习稳定性、多粒度诊断一致性等核心问题,通过虚拟化测试环境进行架构鲁棒性验证。

3、关键技术实现

3.1 多模态数据融合处理技术

(1)异构数据表征学习。通过自编码器网络对收费设备传感器数据、视频流、日志文本等多源异构数据进行统一特征空间映射,建立跨模态关联关系。采用多头注意力机制实现时间序列数据与空间拓扑数据的动态权重分配,解决收费站设备间物理位置与信号传播的时空耦合问题,采取时空特征联合建模技术,构建三维卷积层提取视频监控中的空间特征与时序运动特征,耦合双向 LSTM 网络捕获设备运行参数的长短期依赖关系,结合门控机制动态融合视频特征与传感器特征,建立设备运行状态的时空联合表征模型。

(2)记忆增强型对抗生成网络。采用条件生成对抗网络构建设备正常运行的动态基准模型,引入记忆模块存储典型运行模式,通过潜在空间对比学习计算实时数据与记忆原型的偏离度,结合判别器输出的异常置信度构建双重检测机制,实现运行状态漂移的早期预警。

3.2 知识引导的故障诊断技术

(1)层级化图神经网络架构。构建设备拓扑知识图谱,将故障传播路径编码为图结构。采用图注意力网络建模设备节点间的故障关联关系,通过消息传递机制实现故障根源的层级推理。结合设备维修知识库构建语义约束层,提升诊断结果的可解释性,制定动态参数冻结机制,设计弹性参数更新策略,冻结基础特征提取层的网络参数,仅对上层诊断模块进行在线微调^[4]。引入典型样本回放缓冲区,通过重要性采样保持模型对新老故障模式的平衡学习,防止灾难性遗忘问题。

(2)神经架构自适应搜索。采用可微分架构搜索方法,根据收费站硬件资源约束自动优化网络深度、通道数等结构参数。结合动态通道剪枝与混合精度量化技术,实现诊断模型的计算-存储协同压缩,满足边缘设备的实时性要求。该技术体系通过将多方面有机融合,在理论上实现了收费系统运行状态的全维度感知、异常事件的早期预警以及故障根源的精准定位。模型持续进化机制保障了系统对设备老化、环境变迁等动态因素的适应性,为智能交通基础设施的自主运

维提供了理论支撑。

4、基于深度学习的高速公路收费系统运行状态实时监控与故障智能诊断方法

4.1 多模态数据融合与特征工程方法

系统通过异构传感器网络整合多源动态数据流,包括交通流量时序信号、设备运行参数、视频图像流及交易日志等非结构化数据。采用自适应滤波算法与时空对齐技术消除多源数据的时间异步性与空间异构性,构建统一特征空间。深度特征提取模块引入跨模态注意力机制,通过多头自注意力网络捕捉不同数据模态间的潜在关联性,例如将视频帧中的车辆行为特征与对应时间窗的交易记录进行动态关联,形成高维联合表征。

4.2 动态时空建模与异常检测方法

针对收费系统运行状态的时空依赖性,设计混合神经网络架构:采用三维卷积网络提取视频监控中的空间拓扑特征,结合门控循环单元构建时空记忆单元,捕获设备状态参数的动态演化规律。异常检测模块引入变分自编码器与生成对抗网络的混合模型,通过重构误差分布建模系统正常状态边界,采用流形学习算法动态更新状态空间拓扑结构,实现设备亚健康状态的早期预警。

4.3 故障知识蒸馏与迁移诊断

构建层次化故障知识图谱,将设备故障模式抽象为多粒度语义节点,涵盖机械故障、通信异常、软件逻辑错误等层级。基于深度度量学习设计故障特征嵌入空间,通过对比学习优化故障模式间的可区分性。开发轻量化残差网络作为在线诊断引擎,采用渐进式知识蒸馏策略将复杂诊断模型的能力迁移至边缘计算节点,实现故障类型的实时细粒度分类。同时引入元学习框架增强模型对未知故障模式的零样本推理能力。

4.4 自主进化与可信决策机制

设计双环路模型进化架构,内环路由在线增量学习模块构成,通过滑动窗口机制动态更新模型参数,采用弹性权重固化算法防止灾难性遗忘;外环路集成数字孪生仿真环境,利用强化学习策略在虚拟空间中预训练模型应对极端工况的能力。决策可信度评估模块引入证据深度网络,结合理论量化诊断结果的不确定性,结合可解释性映射技术生成决策依据的可视化溯源路径。该理论体系通过深度表征学习突破

传统阈值检测的局限性,利用动态模型架构实现系统状态的全息感知,借助知识迁移机制平衡计算效率与诊断精度,最终形成具备自主进化能力的智能监控闭环系统^[1]。关键技术突破点在于时空特征的联合建模、多模态信息的语义对齐以及诊断模型的可信度量,为复杂交通基础设施的智能化运维提供新的方法论范式。

5、应用案例

某省高速公路 ETC 车道频繁出现异常情况,表现为交易失败、栏杆机不抬杆、车牌识别错误,传统人工排查耗时长且效率低。部署基于深度学习的实时监控系统后,故障识别准确率提升至 98%,平均修复时间缩短至 5 分钟以内。针对该情况,需要进行多模态数据融合,基于 LSTM 的时序异常检测,识别车道拥堵,深度强化学习优化诊断路径,自动触发车道状态切换,推送维修工单至运维 APP。

表 1 故障诊断准确率对比

故障类型	传统规则引擎	深度学习模型
车牌识别失效	76%	97%
栏杆机卡死	68%	93%
RSU 通信中断	81%	99%

该技术可以多模态融合,分析视频流、设备信号、交易日志等多维度数据,在完全故障发生前 15-30 分钟检测到性能劣化趋势,故障处理经验自动沉淀到诊断知识库。通过该案例可以看出,深度学习技术全面提升了高速公路收费系统的可靠性和运维智能化水平,实际部署时需要注意边缘计算节点的算力分配和模型轻量化。

6、结语

综上,随着智能交通系统的快速发展,基于深度学习的高速公路收费系统实时监控与故障智能诊断技术成为了提升交通管理效率、保障系统可靠运行的关键手段。本文通过构建深度学习驱动的多模态数据融合模型,实现了对收费系统运行状态的动态感知与异常行为的精准识别,同时在故障诊断中引入迁移学习与自适应优化机制,进一步提高了诊断效率与准确率。

参考文献

- [1]杨黎.高速公路机电系统运行状态自动监测系统[J].中国交通信息化, 2023 (3): 34-35.
- [2]郭晓澎, 杨莹, 张佳鹏, 等.基于互联网+的高速公路机电设备运维管理系统[J].电子技术与软件工程, 2023 (14): 195-196.
- [3]杨辉.高速公路机电设备智慧运维探索与实践[J].交通工程, 2023 (6): 146-151.
- [4]邱亮亮.基于 Prometheus 的高速公路机电运维平台设计[J].中国交通信息化, 2023 (10): 135-137.