

基于大数据的高速公路运行监测与管理系统研究

王学强

浙江中控信息产业股份有限公司 浙江 杭州 310053

摘要：高速公路通车里程与交通量持续攀升，传统运营管理模式在信息处理、事件感知及决策实时性上遭遇挑战。大数据技术的蓬勃发展，为高速公路运行监测与管理带来了新思路。本文深入阐述大数据与高速公路运行管理的理论根基，设计多源异构数据采集整合方案，构建交通流量监测、事件检测及运行状态评估模型，开发管理决策支撑系统。结果表明，大数据技术可大幅提升运行监测的实时准确度，强化应急处置能力，助力智能化管理。

关键词：大数据；高速公路；运行监测；管理系统

引言：高速公路是国家交通运输网络的关键部分，承担着繁重的客货运输任务。伴随路网规模拓展与车流量增加，高速公路运营管理面临交通拥堵、事故频发、应急处置压力增大等难题。传统管理模式依赖断面检测器与人工巡查，存在监测手段少、信息处理慢、决策缺数据支撑等局限。大数据技术兴起，为解决这些问题提供新路径，可实现交通状态精准感知、态势科学研判和决策智能优化。

1 高速公路大数据监测管理的理论技术框架

1.1 大数据理论特性与处理架构

大数据指传统工具难以在合理时间内捕捉、管理和处理的数据集合，具有海量、多源、高速、低价值密度等特征。在高速公路场景中，其行业特性显著：日均产生亿级交易记录与车辆轨迹数据，单路段年数据量达PB级；数据类型涵盖结构化收费记录、半结构化轨迹数据及非结构化视频图像；车辆检测器数据以秒级频率更新，对实时处理能力要求极高。核心技术体系包括分布式存储（如分布式文件系统、列式数据库）解决海量数据可靠存储问题，批处理与流处理框架分别支撑离线分析与实时计算，数据挖掘与机器学习算法实现异常模式识别与规律发现。数据价值转化需通过采集、预处理、存储、分析、可视化等环节形成闭环，最终输出决策支持信息。

1.2 交通工程理论与运行监测机理

高速公路运行监测以交通工程学为理论基础，核心指标包括流量（单位时间断面车辆数）、速度（运行效率）、密度（空间占用率），三者通过动态关系模型描述交通状态演变。交通流可划分为自由流、稳定流、不稳定流及强制流等阶段，交通波理论揭示拥堵形成与传播机制，为疏导策略提供依据。通行能力分析通过计算基本、可能及设计通行能力，指导车道配置与限速设计。交通事件影响研究表明，事件会引发通行能力骤降与排

队蔓延，其影响范围与事件持续时间、交通需求强度正相关。运行监测需精准识别事件并评估影响，为主动管控提供依据。管理理论方面，主动交通管理通过可变限速、匝道控制等措施预防拥堵，实现路网效率最大化^[1]。

1.3 多技术融合的监测管理体系

基于大数据的高速公路运行监测依赖多技术协同：数据采集层整合固定式检测器（地磁线圈、雷达）、移动式设备（浮动车）及视频监控系统，实现交通参数、行程时间及事件信息的全要素采集；传输层依托光纤骨干网与5G无线技术保障数据实时回传；存储层采用分布式文件系统归档原始数据，列式数据库支撑结构化数据查询，时序数据库优化监测数据存储；处理层通过批处理分析历史数据训练模型，流处理实现实时监测预警；分析层运用统计回归预测交通参数、分类算法识别事件、聚类方法挖掘运行模式；可视化层集成地理信息系统与仪表盘技术，将分析结果转化为空间化、一站式的决策支持界面。

2 高速公路运行大数据采集与整合

2.1 数据来源与分类

高速公路运行监测数据来源多样，可按采集方式、形态及应用方向分类。按采集方式分三类：固定检测数据来自路侧传感器，如线圈检测器记录的流量与占有率、微波雷达检测的车速与车型、视频监控设备采集的画面与事件信息、气象站获取的能见度与路面状态等；移动检测数据源于行驶车辆，如ETC门架记录的轨迹与行程时间、浮动车GPS回传的位置与速度、手机信令反映的出行路径等；外部关联数据包括导航地图实时路况、气象预报、节假日信息及社交媒体事件播报等。按数据形态分结构化（如收费流水）、半结构化（如车辆轨迹）和非结构化数据（如视频图像），后者需人工智能技术解析。按应用方向分状态监测、事件检测、预测预警及评估分析

四类,不同应用对数据实时性、精度和粒度要求各异。

2.2 数据采集方案设计

科学的数据采集方案需遵循完整性、可靠性、经济性和可扩展性原则。完整性要求覆盖主要数据源,满足各类应用需求;可靠性需确保设备稳定运行与数据质量可控;经济性需控制建设与运维成本;可扩展性需适应未来技术升级与业务拓展。断面检测点按500-1000米间距布设,关键节点加密;检测器类型选择需综合精度、环境适应性及成本,如毫米波雷达适应恶劣天气,雷视融合设备可同步获取轨迹与图像。ETC门架已全覆盖,需明确数据上传频率与汇聚方式。视频监控点按2公里间距布设,重点区域加密至500米。移动采集可整合自有巡查车、导航平台浮动车数据及通信运营商脱敏信令数据。采集频率需平衡实时性与数据量,如断面流量秒级采集,视频关键帧秒级提取,气象数据分钟级更新^[2]。

2.3 数据整合策略

多源异构数据整合面临标准不统一、时空基准不一致、质量参差不齐及实时性差异等挑战。建立统一数据标准是基础,包括数据元标准(定义、格式、单位等)、接口标准(传输协议、格式、频率)及交换标准(共享规则与流程)。时空基准统一需精确同步时间至毫秒级(采用网络时间协议),统一空间坐标至国家大地坐标系。数据清洗是保障质量的关键,包括异常值检测(阈值、统计、模型法)、重复数据去重及缺失值插补(基于历史趋势、相邻数据或相关变量)。多源数据融合分三个层次:数据级融合(原始数据直接合并,适用于同质数据源)、特征级融合(提取特征后合并,适用于异质数据源)及决策级融合(综合独立分析结果,适用于多模型集成)。数据治理体系需建立质量管理闭环,明确责任主体,制定更新维护机制,确保数据资产持续发挥价值。

3 基于大数据的高速公路运行监测模型构建

3.1 交通流量监测模型

交通流量监测是高速公路运行管理的基础,传统方法依赖断面检测器,存在覆盖不足、成本高等问题。大数据模型整合ETC门架流水、浮动车轨迹、手机信令及断面检测数据,经清洗对齐后形成统一输入。模型采用时空融合算法,结合卡尔曼滤波或粒子滤波,将稀疏浮动车数据与连续断面数据融合,估计全断面交通参数。ETC门架数据通过匹配相邻车辆信息计算路段行程时间与速度;浮动车轨迹经地图匹配提取路段速度;手机信令通过切换序列分析获取出行路径。融合算法考虑数据精度差异,采用加权平均或贝叶斯推断优化结果。对缺失路段,利用上下游数据和历史同期值时空插值。深度学习

模型如图神经网络和长短期记忆网络进一步提升精度,分别捕捉路网拓扑关系和时间序列特征。模型输出经后处理校验,以每5分钟或1分钟频次更新,形成连续路网交通视图,为决策提供数据支撑。

3.2 交通事件检测模型

交通事件快速检测是保障安全的核心能力。大数据模型融合视频智能分析、轨迹异常识别和多源数据验证,提升事件发现率与响应速度。视频分析采用深度学习目标检测和行为识别算法,实时识别车辆、行人、抛洒物等目标,分析轨迹判断异常停车、逆行、变道等事件。模型结合卷积神经网络提取图像特征,循环神经网络分析时序变化,注意力机制聚焦关键区域。轨迹异常检测利用ETC门架和浮动车数据,分析行程时间偏离、速度差过大、车辆异常消失等特征,识别潜在事件。多源数据验证通过上下游检测器、相邻摄像机及历史数据确认事件真实性,排除误报^[3]。系统自动判定事件等级、评估影响范围并生成信息。模型持续学习新样本,优化算法,适应复杂场景与长尾事件,提升检测鲁棒性。

3.3 运行状态评估模型

运行状态评估综合评价路网质量,为管理决策提供宏观视角。模型从畅通性、安全性、可靠性三维度构建指标体系:畅通性包括拥堵里程占比、平均速度、行程时间指数等;安全性涵盖事故率、事件影响时长、二次事故风险等;可靠性涉及行程时间可靠性、拥堵概率、极端天气影响等。指标计算综合多源数据,如拥堵里程基于速度阈值判断,行程时间基于ETC门架与浮动车轨迹。评估采用多指标综合方法,如层次分析法确定权重,模糊综合评价处理边界模糊问题,主成分分析降维提取核心成分。评估结果以路网运行指数(0-100)呈现,包括全网、路段、时段指数,支持逐级钻取分析。模型具备预测能力,结合实时数据与历史规律,预测未来15分钟至1小时状态,为主动管控提供前瞻信息。预测方法灵活选择时序模型、机器学习或深度学习模型。评估结果定期生成报告,分析趋势、识别常发拥堵点段、评估管控效果,形成管理闭环。

4 基于大数据的高速公路管理决策支持系统开发

4.1 系统需求分析

系统需求分析是决策支持系统开发的首要步骤,需明确用户类型、业务场景与功能需求。用户涵盖路段监控、区域调度、应急指挥、运维管理及决策领导层,不同用户对数据粒度、响应速度及交互方式要求各异。业务场景包括日常监测、事件处置、指挥调度、信息发布及分析评估。日常监测需实时展示路网状态并预警异常;

事件处置需快速定位事件、评估影响并推送预案；指挥调度需支持多部门协同、资源动态调度及指令闭环管理；信息发布需根据事件等级自动生成内容并多渠道推送；分析评估需支持历史数据查询、指标统计及报表生成。功能需求分为数据接入、运行监测、事件管理等模块，非功能性需求包括性能、可靠性、安全性及可扩展性，如数据接入延迟小于秒级，系统年可用率不低于99.9%，数据传输加密，系统架构支持模块化扩展。

4.2 系统架构设计

基于大数据的决策支持系统采用分层架构，自下而上依次为数据采集、存储、服务、业务应用及用户交互层。数据采集层对接多种前端感知设备与外部系统，如断面检测器、视频流、ETC门架、气象及导航平台等接口。它适配多种通信协议，能完成数据格式转换与初步清洗，还具备断点续传和流量控制功能，确保数据稳定采集。数据存储层运用混合存储架构，分布式文件系统HDFS用于归档原始视频和海量轨迹文件；列式数据库HBase存储结构化收费与检测器数据；时序数据库InfluxDB针对监测数据优化，支持高并发写入与快速查询；关系数据库管理业务数据、设备台账和用户信息；搜索引擎则实现日志与文本数据的快速检索。数据服务层封装数据访问接口，提供数据订阅、查询和计算服务。数据订阅支持实时数据流推送；数据查询有标准化API，可按时空条件过滤；数据计算封装常用算法模型，以服务形式对外提供。业务应用层实现运行监测、事件管理等各类功能模块，各模块基于微服务架构独立开发部署，通过服务注册与发现机制互联调用。用户交互层为不同终端提供适配界面，指挥大屏展示宏观态势与关键指标，桌面端支持复杂操作与详细查询，移动端满足现场处置与移动办公需求。此外，系统架构部署统一技术支撑组件，保障可运维、可观测，且采用云原生设计，支持容器化部署与弹性伸缩，以适应业务高峰和数据增长^[4]。

4.3 系统详细设计与实现

系统详细设计将架构转化为具体模块与接口。运行监测模块以GIS为底图，叠加路网、设备、交通流、事件及气象信息，支持缩放与图层控制，交通流状态每5分钟更新，设备状态通过图标颜色区分。事件检测模块集成视频分析算法，检测结果经业务规则过滤后生成预警，支持人工核实与误报标记，核实后事件自动匹配预案并生成任务工单。指挥调度模块实现基于实时路况的最优路径规划，支持多目标点与动态调整，任务指令通过融合通信平台下发，处置人员可回传现场情况。信息服务模块与可变情报板及导航平台对接，自动生成发布内容并同步诱导信息。统计分析模块预置报表模板，支持自动生成与导出。系统采用前后端分离架构，前端基于Vue或React，后端采用SpringCloud，数据库根据模块特点选型，部署采用容器化方式，通过Kubernetes管理，安全设计包括身份认证、权限控制及数据加密等。

结束语

基于大数据的高速公路运行监测与管理系统研究，是推动高速公路智能化运营的重要探索。本文结合大数据与运行管理理论，设计了多源数据采集、整合、存储及处理方案，构建了交通流量监测、事件检测、状态评估等核心模型，并开发了管理决策应用系统。未来，随着新技术发展，系统将更智能高效。建议进一步研究跨区域数据共享、多模式交通融合及主动管控优化，助力交通运输高质量发展。

参考文献

- [1]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):63-64,73.
- [2]赵根,孙沐琪,白皓,等.高速公路供配电能耗与供电品质监测及数据分析管理系统[J].电工技术,2025(17):108-113.
- [3]张佳鹏.高速公路隧道联网运行监测平台研究[J].无线互联科技,2025,22(5):24-27,40.
- [4]戴剑军,李天豪,李苗华,等.基于收费数据的高速公路路网运行状态评估方法研究[J].公路工程,2023,48(4):158-166.