智慧监控技术在公路运输管理中的应用

宋　丰

新疆兵团水利水电工程集团有限公司　新疆　乌鲁木齐　830000

摘　要：公路运输是综合交通体系的基础，其管理效能关乎物流成本、安全与碳排放。针对传统监控手段存在的数据孤岛、响应滞后及智能缺失等痛点，智慧监控技术融合物联网、边缘计算、AI 视觉及数字孪生，构建了全要素感知—诊断—干预闭环。本文梳理了该技术体系架构，剖析安全管控、流量调度、养护决策及排放治理维度的现实难题，论述视频结构化解析、雷达融合检测、车路协同及大数据异常识别等关键技术在管理流程中的嵌入应用。在此基础上，提出面向主动预警、动态诱导、设施监测及应急指挥的集成框架，并探讨数据治理、算法可靠性、标准互通与隐私保护等制约因素及应对策略。研究表明，智慧监控正推动公路运输管理从被动响应向预测治理演进，但其效能释放依赖于管理范式与技术的协同重构。

关键词：智慧监控；公路运输管理；物联网感知；人工智能视觉；车路协同

引言

公路运输承担我国七成以上货运量，其管理效率与安全直接影响国民经济。面对路网扩张、车流攀升及极端天气等挑战，传统人工巡查与固定线圈计数模式已难以为继。智慧监控技术依托高分辨率摄像机、毫米波雷达、激光雷达及无线通信基站，结合深度学习与时空数据挖掘，实现了对交通状态、车辆行为、路面病害及环境参数的近实时精细化感知。这一技术跃迁提升了数据维度与置信度，推动监控从“看得见”向“看得懂”及“管得好”质变。然而，实践中技术引入常先于流程再造，导致数据利用率低、误报率高及协同不畅。因此，亟需系统审视技术全貌，基于安全、效率、绿色与韧性核心目标，构建技术与业务深度耦合的应用逻辑，探索赋能机理与落地路径，以期为行业数字化转型提供参考。

1 公路运输管理的现实困境与监控需求演变

1.1 管理目标的多重张力

公路运输管理在宏观上面临安全、效率、环境和资产保值四重目标的非同步优化。安全方面，重载货车疲劳驾驶、违规变道、超速及恶劣天气下的连环追尾仍是重大事故主要诱因，但传统视频监控仅能事后取证，无法预判风险。效率方面，节假日潮汐车流与物流枢纽集疏运高峰导致局部路段通行能力骤降，而静态配时信号和固定收费车道难以动态适配。环境方面，柴油货车排放及拥堵引发的怠速能耗已构成城市大气污染的重要来源，但现有监管缺乏单车级实时排放监测手段。资产方面，路面结构老化与桥梁损伤的巡检依赖人工目测或定期检测车，周期长、覆盖窄，难以实现预防性养护。

1.2 传统监控的固有短板

既往监控体系呈现“三低”特征：感知密度低，摄像机间距大且夜间/雾天成像质量差；信息维度低，仅有车流量、速度等粗略参数，缺乏车型、载重、驾驶行为及路面纹理等细粒度信息；决策智能低，监控中心大屏主要展示历史统计曲线，突发事件处置仍依赖电话调度和经验判断[1]。更为关键的是，各路段、收费站、服务区及治超站的监控子系统相互独立，形成数据孤岛，使路网级协同管控缺乏统一态势视图。这些短板倒逼监控技术向智能化升级，要求新型系统具备全天候穿透感知、多源数据实时融合、风险自主识别以及控制指令精准下发的能力。

1.3 技术驱动的管理范式转移

智慧监控的介入并非单纯工具替换，而是推动管理逻辑从“事件驱动”转向“数据驱动”和“预测驱动”。当路侧单元可提前 3 分钟预判某辆半挂车的制动衰减趋势，或通过轨迹聚类提前 20 分钟预警枢纽区溢出风险时，管理者的响应窗口被显著拉长，决策依据从历史统计转变为即时推演。这一转移要求管理架构同步调整，包括设立数据运营岗位、重构应急流程、建立算法迭代反馈机制等。因此，技术应用必须与管理需求形成双向映射，避免陷入“为智能而智能”的陷阱。

2 智慧监控技术的体系架构与核心感知层

2.1 三层技术结构

智慧监控体系在逻辑上分为感知层、分析层与执行

层。感知层涵盖固定式（门架雷达、高清球机、动态称重板）与移动式（车载 GPS/北斗、ADAS 摄像头、无人机巡检）两大类采集终端，以及气象传感器、振动光纤等辅助设备。分析层承担多源数据配准、目标检测追踪、行为语义提取及风险概率计算等任务，通常采用边缘计算节点进行初步过滤，云端完成全局优化训练。执行层则通过可变信息板、车路协同广播、信号机控制指令及移动端 App 推送，将决策结果传导至驾驶人或养护队伍。三层之间需保证毫秒级时延与高可用性连接。

2.2 关键感知技术及其突破

视频结构化解析是当前最成熟的技术方向，基于深度卷积神经网络（CNN）与 Transformer 架构，可在复杂光照下实时检测车辆类别、颜色、号牌及车窗内异常（如打电话、未系安全带），准确率超过 95%。但纯视觉方案易受雨雪遮挡，因此雷达—视频融合方案成为主流——毫米波雷达提供目标距离、速度和角度，视觉提供纹理分类，经卡尔曼滤波与关联匹配后形成稳定航迹，即使在夜间也能保持高召回率[2]。此外，激光雷达点云用于车道线级精定位和超限尺寸检测，动态称重传感器结合轴型识别，可估算单车载重并联动治超系统。路面状况感知则利用加速度计和红外热成像，间接判断平整度与结冰风险。

2.3 数据融合与边缘智能

海量感知数据若全部回传云端，将导致带宽拥塞和延迟增加，因此边缘计算节点部署于路侧机箱内，承担目标跟踪、异常事件初筛（如急减速、变道压线）及置信度标注。仅将高置信度异常片段和统计聚合数据上传至区域中心。同时，利用联邦学习框架，各边缘节点可共享模型梯度而不暴露原始视频，兼顾隐私保护和模型泛化能力。数据融合层面，采用时间戳同步和空间坐标统一（如 UTM 投影），并通过态势图引擎生成路网实时数字镜像，为后续分析奠定统一基底。

3 智慧监控赋能运输管理的多维应用场景

3.1 主动安全防控：从事故记录到风险预判

传统安全管理的核心是事后责任认定，而智慧监控将重心前移至驾驶行为预警。通过分析车辆轨迹的横向摆动频率、车头时距分布及制动踏板力变化，构建个体驾驶风险指数；当指数超过阈值时，路侧广播定向发送语音提醒，同时将信息同步至后方收费站和辖区交警。对于团雾、积水等环境风险，融合气象雷达与路面传感器后，生成动态限速建议并联动可变情报板逐车告知。长途客运和危化品运输企业可利用车载监控终端实时接收疲劳状态识别结果，强制安排休息停靠。这种预警机制能有效减少因人工忽略或反应不及造成的事故。

3.2 动态交通流调控：从固定配时到自适应诱导

在流量管理领域，智慧监控提供的断面流量、排队长度、转向比例等参数，可作为信号配时优化的输入变量。采用强化学习算法，以排队延误和停车次数最小化为奖励，实时调整交叉口绿灯相位。在高速公路场景，通过匝道汇入检测和主路速度预测，实施动态匝道控制算法，延缓主线拥堵形成。更进一步的，基于历史数据与实时状态的融合预测，可提前 1~2 小时发布替代路径建议，将部分流量均衡至并行国道或连接线，从而降低核心路段饱和负荷。此类策略已在部分智慧高速示范段实现，但推广中需解决不同等级道路管理主体的权责划分问题。

3.3 基础设施健康监测：从定期巡检到连续评估

路面和桥梁的隐蔽损伤往往在常规巡检中难以发现，直到恶化成坑槽或裂缝才处置。智慧监控可利用车载加速度计和陀螺仪数据，通过众包方式评估颠簸强度，并结合特定频率的振动特征辨识路面层脱空；桥梁方面，布设低功耗应变传感器和倾角仪，结合视频识别大货车过桥时的挠度变化，采用基线数据比对方法实时评判结构安全性[3]。当监测指标超过设计允许范围，系统自动生成养护工单并排序优先级，避免“盲修”或“失修”。该方法将养护决策从基于时间的计划模式转变为基于状态的预测模式，延长资产使用寿命。

3.4 排放与能耗管控：从抽检抽测到连续量化

借助雷达与视频识别车型和排量类别，结合瞬时速度、加速度和坡度，利用微观排放模型（如 MOVES 或 COPERT）估算单车二氧化碳和氮氧化物排放量，进而汇总路段排放热力图。对于排放超标的重点区域，可联动实施动态绿波或限速诱导以减少怠速。在治超站融合称重与排放数据，甄别高排放老旧车辆，为差异化收费或淘汰补贴提供数据支撑。尽管排放估算精度受模型参数影响，但连续监测的趋势性价值已远超传统每年一次的路检路查。

4 智慧监控系统实现的挑战与管理应对

4.1 数据质量与算法可靠性

监控系统的有效性高度依赖输入数据的准确性和完整性。摄像机脏污、标定漂移、雷达多径干扰等都会产生虚警或漏检，尤其在隧道或高遮挡区域。深度学习模型面对罕见场景（如动物闯入、货物散落）时泛化能力不足，可能产生误分类。为此，需要建立多模态校

验机制，如利用雷达速度验证视觉光流估计，或通过相邻节点交叉验证事件真实性。同时，建立算法持续学习闭环，即人工审核抽样标注回流至训练集，定期更新权重，降低模型退化风险。

4.2 标准互通与系统集成

当前各地采用的监控设备接口协议、数据格式和通信标准各异，导致省级或国家级平台难以汇聚统一视图。即便在相同路段，视频、雷达、称重系统也可能来自不同供应商，时间同步偏差可达数秒，严重削弱融合效果。应推动行业统一数据字典和 API 规范，采用 GB/T28181 和车路协同相关标准，并强制要求新建设备支持 MQTT 或 CoAP 轻量协议。存量设备可通过加装协议转换网关逐步纳入。集成层面，需构建中间件层实现数据清洗、归一化和缓存，降低耦合性。

4.3 隐私保护与数据安全

高清摄像机捕获的人脸、号牌及驾驶行为属于敏感个人信息，若不加脱敏直接上传或存储，存在泄露和滥用风险。技术上应采用端侧匿名化处理（如模糊化人脸、号牌部分字符），仅在授权业务系统解码；传输链路全程加密，使用国密 SM 系列算法[4]。同时，划分数据密级，对轨迹数据实行生命周期管理，超期自动删除。管理制度上明确数据访问权限和审计日志，严禁非业务目的查询。这需要在便捷性和隐私之间取得平衡，例如允许交警查询完整号牌用于违章处罚，但禁止长期存储无关人员的面部特征。

5 未来演进方向与集成管理框架

5.1 数字孪生驱动的全息管理

数字孪生将物理路网映射为虚拟镜像，并注入实时感知流和仿真模型，使管理者可以“穿越”至未来不同时间断面观察管控措施的效果。例如，模拟封路或临时限行后的车流再分布，提前预判次生拥堵点。智慧监控作为孪生体的数据燃料，需提供更精细的个体驾驶意图（如换道概率、转向灯信号）和路面摩擦系数。随着算力提升和模型简化，近实时推演有望在 5 分钟内完成，使管理从“回顾式”转向“沙盘式”。

5.2 车路云协同与泛在控制

未来的监控不再只是“看”，而是与车辆直接“对话”。基于 C-V2X 或 5G-V2X，路侧感知单元将融合后的风险矢量以最低时延广播至覆盖区域内的网联车辆，指导其速度建议或自动紧急制动。同时，云端负责宏观路径优化，将执行指令下发至路侧单元。这一架构需要可靠的网络切片和边缘应用迁移能力，并需要解决不同车企通信协议兼容问题。我国在车路云一体化方面已有多地试点，智慧监控将成为路侧感知的核心基座。

5.3 集成化治理框架

综合上述分析，智慧监控的成功应用不应局限于技术堆叠，而应构建包含数据治理、算法治理、业务治理和安全治理的四维框架。数据治理负责标准、质量和生命周期；算法治理负责模型验证、偏差审计和版本管理；业务治理负责预警响应流程、绩效考核和组织协同；安全治理负责网络防护、隐私合规和应急预案。四者相互嵌套，形成 PDCA 持续改进循环。最终，将智慧监控嵌入公路运输管理全生命周期，从规划阶段的交通量预测，到运营阶段的动态管控，再到养护阶段的精准作业，实现闭环价值创造。

结束语

智慧监控技术以泛在感知、智能解析和协同控制为核心能力，正在重塑公路运输管理的底层逻辑。本文从管理困境出发，梳理了技术体系与应用场景，并指出并非技术越复杂越好，而是要与管理目标形成精准适配。主动安全、动态调控、健康监测和排放量化等实践表明，智慧监控能够显著提升管理的预见性和精细化水平，但其成效受限于数据质量、标准互通、隐私安全等因素。未来，随着数字孪生和车路云协同步入成熟，监控将从辅助工具演变为运输网络的神经中枢。然而，管理者应清醒认识到，技术仅为手段，最终落脚点在于降低事故伤亡、减少拥堵损失、延长设施寿命和保护生态环境。唯有将技术逻辑与人文关怀、制度创新统筹考虑，方能真正实现公路运输管理的高质量跃升。

参考文献

[1] 王建华, 张立. 基于深度学习的交通视频异常行为检测研究进展 [J]. 交通运输系统工程与信息,2022,22(4):1-11.

[2] 李敏, 陈志辉, 刘晓东. 毫米波雷达与视觉融合的车辆感知技术综述 [J]. 中国公路学报,2023,36(2):45-58.

[3] 赵越, 周浩, 吴刚. 数字孪生在高速公路运营管理中的应用框架 [J]. 公路交通科技,2024,41(1):112-120.

[4] 孙丽丽, 郑凯, 何源. 车路协同环境下的动态速度引导算法研究 [J]. 交通运输工程学报,2022,22(6):78-89.