边缘计算在高速公路机电智能化管控中的应用

马泽斌

中咨泰克交通工程集团有限公司　北京　100000

摘　要：随着交通行业智能化发展，高速公路机电智能化管控需求迫切。边缘计算凭借实时数据处理、提升系统可靠性与保障数据安全等优势，在高速公路机电管控中价值凸显。其关键技术涵盖数据压缩与蒸馏、异常检测与预警、多模态数据融合等方面。在交通信号控制优化、设备状态监测与维护、应急事件响应与管理、能源管理与优化以及车路协同与智能驾驶支持等场景中，边缘计算均发挥着重要作用，有力推动了高速公路机电管控的智能化发展。

关键词：边缘计算；高速公路；机电智能化管控

引言

在交通行业智能化发展浪潮下，高速公路机电智能化管控成为提升交通运行效率与安全性的关键。传统管控模式在数据处理、系统可靠性及数据安全等方面面临挑战。边缘计算作为一种新兴技术，凭借其独特的优势，为高速公路机电管控带来新的解决方案。它通过将计算资源下沉至网络边缘，有效应对了传统模式的不足，正逐渐在高速公路机电管控领域发挥重要作用，成为推动交通行业智能化升级的重要力量。

1 边缘计算赋能高速公路机电管控的核心价值

边缘计算赋能高速公路机电管控具有多方面核心价值，在实时数据处理、系统可靠性与稳定性以及数据安全与隐私保护上表现尤为突出[1]。高速公路机电系统每日产生涵盖交通流量、设备状态、环境参数等多元信息的海量数据，传统云计算模式下，数据传输至云端处理受网络带宽和延迟限制，难以满足实时性要求，而边缘计算将计算资源下沉至网络边缘，在本地完成数据预处理和初步分析，大幅降低数据传输量，像在交通流量监测场景中，边缘节点能实时分析车辆通过数据，快速识别拥堵趋势，为交通调度提供即时决策依据，显著提升了实时数据处理能力。高速公路机电系统对可靠性要求极高，设备故障或数据中断都可能影响交通运行安全，边缘计算采用的分布式架构，使数据在本地处理和存储，即便云端连接中断，系统仍可维持基本功能运行，例如在隧道照明控制场景中，边缘节点能独立执行照明调节策略，根据车流量和光照强度自动调整亮度，有效增强了系统可靠性与稳定性。此外，高速公路机电系统涉及车辆轨迹、设备状态等大量敏感数据，数据安全至关重要，边缘计算将数据处理限制在本地网络范围内，减少数据在公共网络中的传输，降低了数据泄露风险，同时本地存储和加密技术可进一步保障数据隐私，满足了交通行业对数据安全的高标准要求，全方位优化了数据安全与隐私保护。

2 边缘计算在高速公路机电管控中的关键技术

2.1 数据压缩与蒸馏技术

高速公路机电系统运行中，各类设备持续产生海量数据。像 ETC 系统，每辆车通行都会生成交易日志；交通监控摄像头则不断录制视频。若将这些数据全部直接传输至云端或中心服务器处理，会面临网络带宽瓶颈与计算资源紧张问题。数据压缩技术是解决这一难题的有效手段。对于 ETC 交易日志这类数据，采用无损压缩算法，在确保数据完整性和准确性的前提下，去除数据中的冗余信息，大幅减少存储空间占用。例如，一些先进的无损压缩算法可让 ETC 交易日志的存储空间减少数倍，同时保证后续数据查询和分析不受影响。对于交通监控视频，由于其数据量极大，采用有损压缩技术进行降帧处理。在不影响关键信息识别的情况下，降低视频的帧率，从而减少数据传输量。如将原本每秒 30 帧的视频降为每秒 10 帧，能显著降低对网络带宽的需求，使视频数据更顺畅地传输。数据蒸馏技术则是对压缩后数据的进一步处理。它从压缩数据中筛选出与业务目标高度相关的信息，去除无关或低价值的数据。以交通流量分析为例，经过压缩的视频数据中包含大量背景信息，数据蒸馏技术可提取出车辆的位置、速度等关键信息，形成高质量的数据集，为后续的交通流量统计、拥堵分析等提供精准的数据支持。

2.2 异常检测与预警技术

高速公路机电系统运行环境复杂，设备故障、交通

事件等异常情况频繁发生。边缘计算利用机器学习算法对实时数据进行异常检测，能够快速发现潜在风险。在设备状态监测方面，边缘节点连接着各类传感器，实时采集设备的温度、振动、电流等参数。通过机器学习模型对这些数据进行分析，当设备参数出现异常变化时，如温度突然升高、振动幅度增大，系统可迅速判断设备可能存在故障，并提前发出预警[2]。例如，对通风系统的风机进行监测，当检测到风机振动频率超出正常范围时，及时通知维护人员进行检查，避免风机故障导致通风系统瘫痪。在交通事件检测中，边缘计算分析车辆轨迹和速度数据。当车辆行驶轨迹出现异常偏移或速度急剧下降时，系统可识别出可能发生了拥堵或事故，立即触发应急响应机制。时空特征优化技术进一步提升了异常检测的准确性。它融入路网结构知识和周期性规律，使检测模型更贴合交通实际场景。例如，考虑不同时间段、不同路段的交通流量特点，对异常检测模型进行优化，减少误报和漏报情况。

2.3 多模态数据融合技术

高速公路机电系统涉及多种类型的数据源，摄像头、雷达、气象站等设备采集的数据格式和语义各不相同。多模态数据融合技术将这些来自不同源的数据进行统一处理和分析。在交通流量监测场景中，摄像头采集的车辆图像数据可提供车辆的外观、位置等信息，雷达采集的速度数据能反映车辆的行驶速度。将这两种数据进行融合，可更准确地计算车流量和车速。例如，通过图像识别技术确定车辆数量，结合雷达测量的速度，得出更精确的交通流量数据。在恶劣天气监测场景中，气象站采集的气象数据如温度、湿度、风速等，与摄像头采集的路面状况图像相结合，可更全面地评估天气对交通的影响。如根据气象数据判断是否可能下雨，再结合路面图像观察是否已经出现积水，为交通管理部门采取限速、封闭等措施提供更准确的依据。

3 边缘计算在高速公路机电管控中的具体应用场景

3.1 交通信号控制优化

交通信号控制作为高速公路机电管控的关键构成部分，对交通流畅度与安全性起着直接且至关重要的影响。传统交通信号控制多依赖预设的固定配时方案，难以应对实时变化的交通状况。而边缘计算技术的引入，为交通信号控制带来了智能化变革。边缘计算凭借其强大的实时数据处理能力，能够迅速分析交通流量数据。在交叉路口场景中，部署在路口的边缘节点可实时收集各方向车辆的到达信息，包括车辆数量、行驶速度等。基于这些实时数据，边缘计算系统能精准判断当前各方向的交通需求，动态调整信号灯时长。例如，当某一方向车流量突然增大时，系统会适当延长该方向的绿灯时间，减少车辆等待时间，避免路口拥堵。在拥堵路段，边缘计算通过协调上下游信号灯配时，形成绿波带。它根据各路段的车流量和行驶速度，计算出最佳的信号灯切换时间序列，使车辆在行驶过程中能够连续遇到绿灯，减少停车次数和等待时间，从而提高路段整体通行效率。此外，边缘计算还可与车路协同技术深度结合。通过与车辆进行实时交互，信号灯能够根据自动驾驶车辆的位置、行驶速度和目的地等信息，为其提供优先通行权，进一步提升交通运行效率，为智能交通的发展奠定基础。

3.2 设备状态监测与维护

高速公路机电设备种类繁多，涵盖照明、通风、消防等多个系统，这些设备的稳定运行直接关系到交通运行安全。传统的设备维护方式多为定期巡检和事后维修，存在维护不及时、成本高等问题。边缘计算技术的应用，实现了设备状态的实时监测与预测性维护。在照明系统监测场景中，部署在灯具上的传感器可实时采集电流、电压等参数，并将数据传输至边缘节点。边缘节点对这些数据进行分析处理，能够及时检测灯具的故障和老化情况。例如，当灯具的电流出现异常波动时，边缘节点可判断灯具可能存在短路或接触不良等问题，提前安排维护计划，避免因灯具故障导致的照明不足，保障行车安全[3]。通风系统的监测同样依赖边缘计算。通过分析风机转速和风量数据，边缘节点可以评估风机的运行效率。当风机转速异常或风量不足时，系统会及时发出警报，提醒维护人员进行检查和维修。此外，边缘计算还可与设备管理系统集成，实现设备全生命周期管理。从设备的采购、安装、运行到维护、报废，系统都能记录设备的各项信息，为设备维护提供全面的数据支持，提高设备维护效率和可靠性，降低设备故障率。

3.3 应急事件响应与管理

高速公路应急事件响应与管理是保障交通运行安全的关键环节。快速、准确地识别应急事件并采取有效的响应措施，能够最大程度减少事故损失和影响。边缘计算通过实时分析交通数据和环境信息，为应急事件响应与管理提供了有力支持。在交通事故检测场景中，部署在道路沿线的摄像头采集的图像数据会实时传输至边缘节点。边缘节点利用图像识别技术，能够快速识别事故车辆和受伤人员。一旦检测到事故，系统会立即通知救援部门，并根据事故位置和交通状况调整附近的交通信号，引导车辆绕行，避免二次事故的发生。在恶劣天气

预警场景中，边缘计算通过分析气象站采集的气象数据和路面状况图像，评估天气对交通的影响。例如，当检测到暴雨、大雪等恶劣天气时，系统会根据路面湿滑程度、能见度等因素，及时发布预警信息，并采取限速、封闭等措施，保障行车安全。此外，边缘计算还可与应急指挥系统集成，实现应急资源的动态调度和协同管理。在应急事件发生时，系统能够根据事件类型和严重程度，合理调配救援车辆、人员和物资，提高应急事件处理效率。

3.4 能源管理与优化

高速公路机电系统能耗较高，能源管理与优化对于降低运营成本、实现绿色可持续发展具有重要意义。边缘计算通过实时监测设备能耗数据，分析能源使用规律，为能源分配策略的优化提供了科学依据。在照明系统能源管理场景中，边缘节点可根据车流量和光照强度自动调整灯具亮度。在夜间车流量较小的时段，适当降低灯具亮度，避免过度照明；当有车辆经过时，提高相应区域的灯具亮度，确保行车安全[4]。这种动态调整方式能够有效降低照明系统的能耗。通风系统的能源管理同样借助边缘计算实现。通过分析室内外温差和空气质量数据，边缘节点可以优化风机运行模式。当室内外温差较小时，降低风机转速；当空气质量较差时，增加风机运行时间，加快空气流通。此外，边缘计算还可与能源管理系统集成，实现能源数据的实时监控和分析。能源管理系统可以对边缘计算采集到的数据进行进一步处理和存储，生成各种能源报表和统计图表，为能源管理决策提供数据支持，帮助管理人员制定更加科学合理的能源管理方案。

3.5 车路协同与智能驾驶支持

车路协同是未来高速公路发展的重要方向，边缘计算在车路协同中发挥着关键作用。通过部署在路侧的边缘节点，实时采集和处理交通数据，为车辆提供实时路况信息和决策支持。在自动驾驶场景中，边缘节点可向车辆发送前方道路状况、交通信号、障碍物等信息。车辆接收到这些信息后，能够更全面地了解周围环境，规划更加安全、高效的行驶路径，并及时避障。在协同式自适应巡航场景中，通过车与车、车与路之间的实时通信，实现车辆编队行驶和速度协同。边缘计算协调各车辆之间的行驶速度和间距，使车辆形成稳定的编队，减少空气阻力，降低能耗，同时提高道路通行效率和安全性[5]。此外，边缘计算还可与智能驾驶平台集成，为智能驾驶车辆提供更全面的环境感知和决策支持，推动智能驾驶技术的商业化应用，开启智能交通新时代。

结语

边缘计算在高速公路机电智能化管控中展现出巨大的应用潜力与价值。通过提升实时数据处理能力、增强系统可靠性和保障数据安全，以及在多个具体场景中的有效应用，为高速公路的安全、高效运行提供了有力支撑。随着技术的不断进步，边缘计算将与更多先进技术深度融合，持续优化高速公路机电管控体系，推动交通行业向更加智能化、绿色化的方向迈进，为人们的出行带来更多便利与保障。

参考文献

[1] 黄湘雄. 高速公路隧道机电系统的安全运行保障与智能管控策略 [J]. 现代工业工程,2026(5):44-47.

[2] 杨玉涛. 基于物联网技术的高速公路机电智能化管控系统研究 [J]. 湖南邮电职业技术学院学报,2022,21(2):19-22.

[3] 黎观容. 高速公路收费机电系统无人化运维模式与效能评估 [J]. 现代工业工程,2026(5):48-51.

[4] 童星. 基于物联网的高速公路机电设施监控与管理系统 [J]. 交通世界,2025(28):168-170.

[5] 韦开敏, 唐彩芸, 陈书玮. 基于 5G 的高速公路机电设备远程监控与预警 [J]. 交通世界,2025(35):25-27.