

遥感-物联网一体化技术在沙漠公路动态清沙运维中的实践探析

席磊

新疆公路建设(集团)有限责任公司, 中国·新疆 昌吉 831100

摘要: 沙漠公路作为连接我国西部资源富集区与内陆经济腹地的战略通道, 其安全畅通直接关系到区域经济发展、边疆稳定与国家能源安全。然而, 风沙流活动的突发性、时空异质性及强破坏力, 使得传统“定时巡查、被动响应、经验调度”的清沙运维模式面临时效滞后、资源错配、安全风险高及生态扰动大等系统性困境。随着对地观测技术与物联网的深度融合, 遥感-物联网一体化技术为沙漠公路动态清沙运维提供了全新范式。本文系统综述了该技术在沙漠公路清沙运维中的理论基础、实践进展与应用瓶颈, 涵盖多源感知体系构建、数据融合与智能决策机制、动态清沙作业协同及全生命周期运维管理等核心环节。文章指出, 当前实践已初步实现从“点状监测”向“面域感知”、从“事后处置”向“事前预判”、从“人工调度”向“数据驱动”的转变, 在提升清沙效率、降低运维成本、保障行车安全等方面展现出显著成效。但仍面临复杂地表环境下遥感反演精度不足、物联网设备在极端工况下可靠性差、多源异构数据融合时效性低、清沙装备智能化水平弱及标准化体系缺失等深层次挑战。

关键词: 遥感-物联网一体化; 沙漠公路; 动态清沙; 智能运维; 多源数据融合; 风沙流监测; 数字孪生

Practical Exploration of Remote Sensing-Internet of Things Integrated Technology in Dynamic Sand Removal Maintenance for Desert Highways

Xi Lei

Xinjiang Highway Construction (Group) Co., Ltd., China Xinjiang Changji 831100

Abstract: Desert highways serve as strategic corridors linking resource-rich regions in western China with inland economic zones, and their safe and unimpeded operation is vital to regional development, border stability, and national energy security. However, the suddenness, spatial-temporal heterogeneity, and high destructiveness of wind-blown sand flows have rendered traditional sand removal and maintenance models—relying on scheduled inspections, passive responses, and experience-based dispatching—ineffective due to delays, resource misallocation, high safety risks, and significant ecological disturbances. With the deep integration of Earth observation technologies and the Internet of Things, remote sensing-IoT integrated technology offers a novel paradigm for dynamic sand removal and maintenance in desert highways. This paper systematically reviews the theoretical foundations, practical progress, and application challenges of this technology in desert highway maintenance, covering core aspects such as multi-source perception system construction, data fusion and intelligent decision-making mechanisms, coordinated dynamic sand removal operations, and full-life cycle maintenance management. The study highlights that current practices have achieved initial transitions—from point-based monitoring to area-wide perception, from post-event response to pre-event prediction, and from manual dispatching to data-driven operations—demonstrating notable improvements in sand removal efficiency, reduced maintenance costs, and enhanced traffic safety. Nevertheless, profound challenges remain, including insufficient remote sensing inversion accuracy under complex surface conditions, poor reliability of IoT devices under extreme environments, low timeliness in fusing multi-source heterogeneous data, limited intelligence of sand removal equipment, and the absence of standardized frameworks.

Keywords: Remote sensing-internet of things integration; Desert highways; Dynamic sand removal; Intelligent maintenance; Multi-source data fusion; Wind-blown sand monitoring; Digital twin

0 引言

我国沙漠与戈壁面积广阔, 穿越其中的公路网是国

家综合立体交通网的重要组成部分, 承担着能源运输、民族团结、国防保障等多重战略功能。然而, 沙漠地区气候

极端、风沙活动频繁,路面掩埋、能见度骤降、设施损毁等沙害事件频发,严重威胁行车安全与路网韧性。长期以来,沙漠公路清沙运维主要依赖人工巡道、固定气象站观测及定期机械作业,这种模式不仅人力物力消耗巨大,且难以应对风沙流的突发性和空间变异性,常因响应不及时导致交通中断甚至安全事故^[1]。近年来,随着高分辨率遥感、低功耗物联网、人工智能及自动控制技术的快速发展,遥感-物联网一体化技术应运而生,为破解沙漠公路清沙运维难题提供了新路径。该技术通过卫星、无人机、地面传感器及路侧设备的协同感知,实现对风沙流参数、路面积沙状态、环境条件及装备状态的实时、定量、全覆盖监测;再通过数据融合与智能算法,生成精准的清沙预警与调度指令,引导装备高效、按需作业。这标志着沙漠公路运维正从“经验驱动”迈向“数据驱动”、从“被动响应”转向“主动防控”的新阶段。然而,该技术仍处于探索与试点阶段,在复杂环境适应性、系统集成度、决策可靠性及规模化应用等方面尚存诸多障碍。因此,亟需系统梳理遥感-物联网一体化技术在沙漠公路动态清沙运维中的实践脉络、现实痛点与创新方向,探索面向实战的系统性解决方案。这不仅是工程技术问题,更是关乎国家战略通道安全、区域协调发展与生态文明建设的重大命题。

1 现实审视:遥感-物联网一体化技术在动态清沙运维中的成效与瓶颈

要推动该技术从示范走向常态化应用,必须客观评估其在真实运维场景中的价值贡献与深层制约。

1.1 立体感知与智能决策显著提升清沙运维效能

多项工程实践表明,遥感-物联网一体化技术有效克服了传统运维模式的局限。在感知层面,通过融合风云气象卫星、高分光学影像、无人机 lidar 及路侧微气象站、积沙传感器、视频监控等多源数据,实现了对重点路段风沙流强度、积沙厚度、能见度及路面状态的分钟级、米级动态监测,较单一手段覆盖范围扩大数十倍,时效性提升 5-10 倍。在决策层面,基于机器学习与风沙动力学耦合模型,可将多源感知数据转化为风险等级、预计积沙速率、最佳清沙窗口期等结构化预警信息,并自动生成包含位置、优先级、作业量及装备调度的清沙指令。例如,在 g7 京新高速某沙害段部署该系统后,清沙作业响应时间由平均 3 小时缩短至 45 分钟,无效出勤率降低 60%,年均清沙成本下降 28%,交通事故率减少 35%。更重要的是,系统实现了运维过程的可视化与可追溯,为绩效评估与持续优化提供了数据基础。这些成果证明,遥感-物联网一体化能

够有效提升清沙运维的精准性、时效性与经济性,使有限资源发挥最大效益。这种从“盲人摸象”到“全局洞察”的认知跃迁,为沙漠公路智慧运维奠定了坚实基础^[2]。

1.2 环境适应性差与数据-行动断层制约实战可靠性

尽管成效显著,但技术在极端沙漠环境下的稳定性与实用性仍受多重制约。首要问题是复杂地表与极端工况下感知可靠性不足:沙尘暴期间光学遥感失效, sar 虽可穿透但分辨率低、解译难;物联网设备在高温、强紫外、细沙侵入环境下故障率高,传感器漂移、通信中断频发,导致数据缺失或失真;路侧设备供电依赖太阳能,连续阴天或沙尘覆盖光伏板时易断电。其次,多源异构数据融合时效性与一致性差:卫星、无人机、地面数据时空基准不一、更新频率各异,融合算法复杂、计算量大,难以满足分钟级决策需求;不同传感器对同一现象(如积沙)的表征存在偏差,缺乏统一标定与误差补偿机制。更深层的是,“感知-决策-执行”链条存在断层:预警系统输出的多为抽象风险值,未转化为清沙装备可直接执行的指令;现有清沙车多为传统机械,缺乏车载终端与自动控制接口,无法接收动态调度;操作员仍需人工解读信息、手动调整作业参数,人为误差大、响应慢。这种“有数据无指令、有指令难执行”的脱节,使得一体化技术的潜力未能充分释放。此外,决策模型多基于历史数据统计,缺乏对风沙-路面-车辆交互物理机制的深度嵌入,在极端或新型沙害场景下易失效^[3]。

1.3 标准缺失与运维体系滞后阻碍规模化推广

技术应用的广度与深度,最终取决于标准化水平与运维管理体系的配套程度。目前,遥感-物联网一体化在沙漠公路清沙领域尚无统一技术标准:数据格式、通信协议、接口规范、性能指标各行其是,系统间互操作性差,形成“信息孤岛”;设备安装、校准、维护无规范,质量参差不齐;预警阈值、清沙标准、效果评价缺乏行业共识,结果不可比。运维管理方面,基层养护单位普遍缺乏既懂遥感物联网、又通公路养护、还会操作智能系统的复合型人才;系统日常维护、数据质控、模型更新等专业工作依赖外部技术支持,自主运维能力弱;设备厂商服务响应慢、备件供应难,系统可用性难以保障。经济性评价亦显片面:多强调初期建设成本,忽视全生命周期运维费用与综合效益,导致“重建设、轻运维”现象普遍。部分地区虽建有示范项目,但因缺乏可复制的技术包、培训体系与政策支持,难以推广至其他路段。这种“有技术无标准、

有系统无运维、有示范无推广”的局面,使得该技术多停留在科研或试点层面。若不夯实标准基础、健全运维体系、强化能力建设,再先进的一体化方案也难逃“建而不用、用而不灵”的命运。

2 路径探索:面向实战的遥感-物联网一体化动态清沙创新策略

破解上述系统性难题,需以“可靠感知、精准决策、高效执行、可持续运维”为目标,重构技术体系与应用逻辑。

2.1 构建“星-空-地-路”立体协同、环境自适应感知网络

应超越单一技术依赖,建立多层次、冗余化、自修复的感知体系。首先,优化“星-空-地-路”协同架构:以静止气象卫星与商业小卫星星座提供小时级宏观风沙态势;以无人机集群在关键时段开展百米级精细巡检;以路侧物联网节点(含抗沙尘传感器、边缘计算单元、备用电源)实现秒级本地感知;以车载移动感知补充盲区。其次,提升设备环境适应性:研发耐高温、防沙尘、自清洁的专用传感器与通信模块;采用多模态传感融合(如光学+微波+声学),在单一模态失效时自动切换;部署智能电源管理系统,结合风光互补与储能,保障连续供电。特别要强化边缘智能:在路侧节点嵌入轻量化 ai 模型,实现数据预处理、异常检测与初级预警本地化,仅上传关键信息,降低带宽压力与中心延迟;建立设备健康自诊断与远程复位机制,减少人工干预。通过“立体覆盖+环境鲁棒+边缘智能”三位一体,使感知网络在极端沙漠环境下依然可靠、可用、可信^[4]。

2.2 发展物理-数据双驱动的动态决策与装备协同机制

必须重建决策科学性与执行连贯性,打通“数据到行动”最后一公里。在决策层面,构建“风沙力学+路面工程+装备动力学”耦合的智能决策模型:将遥感-物联网感知数据输入 cfd-dem 等物理模型,模拟特定路段积沙演化过程;结合路面抗滑、纵坡、曲率等工程属性,量化安全风险;再根据清沙装备作业特性(如清扫宽度、速度-效率曲线),生成包含精确位置、作业参数、优先级及路径规划的 executable 指令。在执行层面,推动清沙装备智能化升级:加装北斗高精度定位、作业状态传感器、5g/北斗短报文通信模块及自动驾驶辅助系统,实现指令自动接收、参数自适应调整、作业效果实时反馈;研发小型无人清沙机器人,适用于狭窄、高危或生态敏感路段。特别

要建立闭环学习机制:将清沙后路面状态恢复时间、二次积沙速率、能耗等作为反馈信号,持续优化决策模型与调度策略,形成“感知-决策-执行-评估-优化”自进化闭环。通过“机理可解释+数据自适应+装备可执行”的深度融合,使一体化系统真正成为运维人员的“智能中枢”^[5]。

2.3 健全技术标准、运维体系与绿色发展长效机制

技术落地需制度、人才与生态三重保障。应由交通运输部牵头,联合科研院所、企业与养护单位,制定《沙漠公路遥感-物联网感知系统技术规范》《动态清沙数据接口与指令标准》《智能运维效果评价指南》等系列标准,统一数据格式、通信协议、性能指标与验收要求,打破壁垒。推动建设区域性沙漠公路智能运维云平台,集成多源数据接入、融合引擎、决策模型、装备管控、效果评估与知识库模块,提供 saas 化服务;开放 api,鼓励生态共建。在运维体系上,设立专项培训与认证,培养复合型运维人才;建立“厂家+专业团队+基层”三级技术支持体系,保障系统稳定运行;推行“效果付费”合同模式,按清沙效率、安全改善、生态影响等综合指标结算,激励技术创新。特别要融入绿色发展理念:优化清沙作业路径与时机,减少对脆弱地表植被的扰动;推广电动或氢能清沙装备,降低碳排放;利用清沙收集的沙粒用于生态固沙或建材,实现资源化利用。唯有将技术嵌入标准、运维与生态框架之中,方能实现从项目式探索到可持续应用的跨越^[6]。

3 结语

遥感-物联网一体化技术在沙漠公路动态清沙运维中的应用,绝非简单的技术叠加,而是一场涉及地球科学、交通工程、信息技术与装备制造的跨界融合革命。它要求我们超越“技术万能”的幻想,重新定义其角色——不是替代人的工具,而是增强人对极端环境认知与响应能力的延伸。在这一漫长而艰巨的进程中,既要追求感知的广度与精度,也要敬畏沙漠环境的混沌本质与运维工作的平凡艰辛;既要相信算法的智能,也要珍视一线养护人员的风沙直觉与现场经验;既要打造炫目的数字平台,更要夯实设备可靠性、标准统一性与人才可持续性的朴素基石。真正的突破,诞生于对风沙运动规律的深刻理解,成型于对“感知-决策-执行”链条的无缝衔接,升华于对边疆公路守护者需求的真切回应与对脆弱生态的温柔呵护。我们应当以谦卑之心对待每一组遥感数据、每一个物联网节点,它们承载着风与沙的密语,也寄托着万千旅人的平安期盼与国家对边疆发展的坚定承诺。这不仅是科技的进步,更

是对“人民至上、生命至上、生态优先”理念在荒漠深处的无声践行。当卫星凝视大地，当传感器聆听风沙，当清沙车循令而动且不扰一草一木，那便是对人类智慧、工程伦理与自然力量和谐共处的最新注解。这条通往智能、绿色、可持续运维的道路注定充满未知与挑战，但每一步基于科学、实证与人文关怀的探索，都在为中国沙漠公路的安全、畅通与永续发展注入更加坚韧、更加温暖、更加负责任的力量。

参考文献：

[1] 李杰. 沙漠光伏板自动清沙机器人轨迹优化算法研究[J]. 自动化应用, 2026, 67(5): 167-169+174.DOI:10.19769/j.zdhy.2026.05.047.

[2] 李生字, 丁刚, 王世杰等. 库木托拜沙漠公路风沙-风雪复合灾害的形成机制及治理方案[J]. 中国沙漠, 2022, 42(6):14-24.

[3] 付金泉, 林兴国. 水清沙净总书记牵挂的腾格里沙漠变了样[J]. 中国纪检监察, 2021(6): 36-37.

[4] 何有华. 干旱风沙区水库边缘生态修复技术研究. 甘肃省, 甘肃省水土保持科学研究所, 2021-01-22.

[5] 刘瑞杰. 铁路轨道除沙车关键部件的设计与试验研究[D]. 石家庄铁道大学, 2020.

[6] 田禾, 屈建军, 杨根生等. 敦-格铁路途经库姆塔格沙漠东缘高大沙山区可行性研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(1): 1-8.