

基于物联网的道路桥梁施工泥浆处置智能化系统

刘 砾

中铁建城建交通发展有限公司 江苏苏州 215000

摘要: 传统的道路桥梁建设泥浆处理方式面临着感知精度不高, 数据链不连续性以及控制滞后性的问题, 从而影响了建设安全以及环境治理。文章提出基于物联网技术的智能泥浆处置系统, 通过精准部署多源感知节点, 实现泥浆状态(如黏度、密度、含水率)和环境变量的实时监测。该系统将低功耗广域通信技术和高频带宽协议结合在一起, 保证数据的平稳传输和决策的迅速反馈。使用深度学习算法后, 该系统能够根据泥浆状态的改变动态地调整处置策略以减少人工干预和提高响应效率。通过智能决策与层级联动机制解决传统施工对泥浆处置的失控、滞后与不易控制。该体系通过自适应运维保障体系提高施工现场泥浆管理智能化水平, 对工程安全与生态治理具有强大支撑。

关键词: 物联网; 道路桥梁施工; 泥浆处置; 智能感知; 系统架构

引言

现代基础设施建设体系下, 道路桥梁施工泥浆高效管理已经成为工程安全和生态治理双维度的重要课题, 而传统手段囿于低密度感知节点、不连续的数据链和指令执行断层使处置过程表现出失控和滞后两种特征。伴随着物联网技术不断进化, 在施工现场部署密度、通信效率和边缘决策能力等方面已经具有工业级拓展潜力, 这使泥浆处置由线性操作走向动态闭环成为技术逻辑发展的必然取向。系统性解决路径需要着眼于信息通达结构、响应优化机制和运维协同策略等方面的高耦合问题, 并基于多源数据建构具有时序理解和结构学习的决策模型, 提出感知与处置无缝链式连接, 进而确保项目的连续性, 管控安全边界, 提高整体管理效能。

1 基于物联网的系统架构设计

1.1 多源感知节点布局与数据采集层构建

在复杂多样的路桥建设环境下, 泥浆处置作业的数字化管理需要通过精准部署感知节点, 构建高效协同的数据采集层。数据采集既关系着基础信息获取的广度及深度, 又为之后的智能决策提供了基础数据支撑, 保证了实时反馈及决策精度。节点布局需综合考虑施工流程各个环节物理空间以及泥浆状态改变时间序列等特征, 采用多类型传感器对泥浆黏度、密度进行检测、对含水率等关键参数以及作业区域内温度、湿度、振动和沉降等环境变量进行同步监测, 生成多维度参数链完整的原始数据集。

采集层技术架构要支持分布式布设与集中式回传动态

协同、具有边缘数据筛选能力、事件驱动型触发机制等, 在确保数据完备的同时减少冗余负载。其运行逻辑要针对具体泥浆状态对采样频率进行自适应调节, 从而增强非平稳工况时系统感知鲁棒性和决策响应能力。通过多源数据采集, 综合运用数据融合和智能分析技术对多维数据进行深度分析, 增强了系统预测和决策支持能力, 保证系统能够在复杂环境中提供精准实时反馈和优化建议。设计思路见图 1。

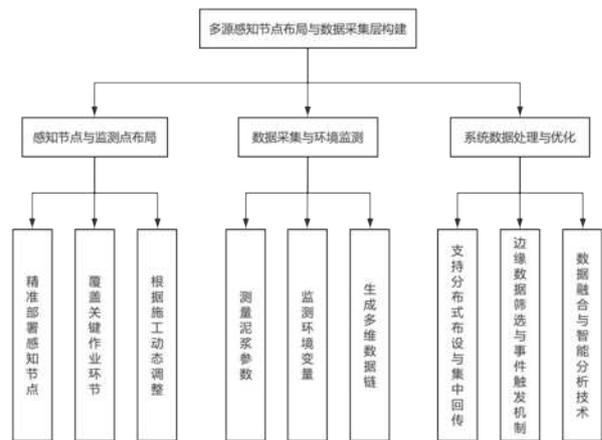


图 1 多源感知节点布局与数据采集层构建

1.2 网络通信层的多协议融合与数据通路优化

物联网架构下发挥枢纽作用的通信层是采集终端向决策中枢进行数据流动的关键通道, 性能表现好坏直接决定了整个系统工作时效性和稳定性。在实际部署中, 需根据施工环境的复杂度、节点密度及数据流特征, 构建异构融合的多

协议通信架构,应优先集成低功耗广域通信技术(如NB-IoT与LoRa)与高频高带宽协议(如5G与Wi-Fi 6)形成互补互备机制,支持各种数据粒度下分层传输和优先级调度。规划通信路径需根据边缘节点和云端控制中心对数据的敏感性和容错容时要求,构建动态可调节通路优化模型,引入多跳路由和短周期链路重建算法,有效增强节点之间通信鲁棒性和系统链路自恢复能力。为保证高频交换时信息保持语义完整和结构有序,通信层要具有传输内容的协议层校验、格式标准化和传输压缩等内嵌能力,在数据入链之前完成预处理和身份验证工作,以防可能出现的数据污染和链路劫持风险,为确保通信层的高效运作,应加强通信协议的适配与优化,及时根据实际部署环境进行调整,以提升系统的实时响应能力和数据安全性,设计思路见图2。

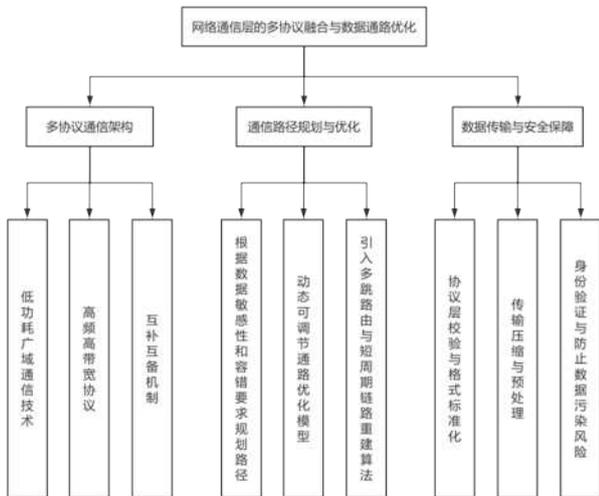


图2 网络通信层的多协议融合与数据通路优化

1.3 系统控制中心的智能决策逻辑与层级联动机制

物联网系统的智能化属性最终在控制中心集中体现,承担着数据汇聚、模型解析与策略制定的职能,并在多层次反馈链中高效下发指令与快速更新状态。系统设计要以异构数据集成为基础,建立决策逻辑框架以支持泥浆成分、流动趋势与外部环境之间多变量关联判断并在深度学习模型基础上实现风险识别、趋势预测与资源调度。核心任务在于多任务并行处理和异常识别。

控制中心要分为局部决策层与全局调度层。上层主要负责全场域数据的抽象和控制规则的优化,而下层则负责区域节点的实时联动和边缘响应。泥浆处理完成后,如果含水率未达到标准,则智能决策模块告知作业层重新加工;当泥

饼装车时,如果条件已经满足,则系统会告知中层严禁泥饼脱离现场;在弃土场被发现不达标的情况下系统会通知上层并调整处理策略。利用中间件架构实现了低延迟的信号交换以保证在局部异常情况下能够迅速反应并上报到全局层,保证分布式自治和全局统筹的有机融合。为确保决策的灵活性与精确性,该系统需要具有自适应调整的功能,根据实时数据对调度策略进行优化,以增强对复杂运行条件的处理能力,加强系统容错和动态调整机制以保证突发事件发生时迅速恢复系统的平稳运行。设计思路见图3。

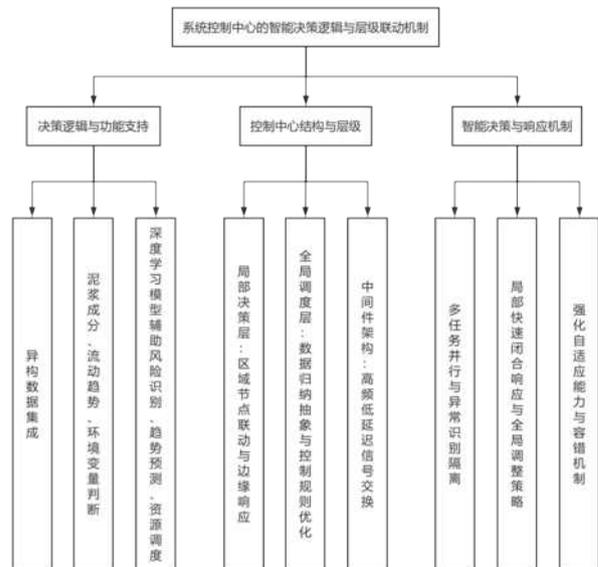


图3 系统控制中心的智能决策逻辑与层级联动机制

2 数据驱动的智能泥浆管理模型

2.1 多维数据融合下的泥浆状态识别算法建模

道路桥梁施工过程中泥浆作为关键工艺副产物的物理性质、化学组成及流变状态会随着地质条件、施工强度及工序节奏的不同而发生变化。泥浆状态存在高维和非线性等动态特征,常规基于阈值规则或者静态模型辨识方法很难对泥浆状态演化进行有效刻画,特别是非标工况、频繁扰动以及混合工序交叉等场景中识别误差率较大,造成预警系统及处置逻辑的故障。有必要构建一个基于多源异构数据动态适应性算法模型。系统通过传感器采集的泥浆黏度(0.1 - 5 Pa·s)、密度(1.2 - 1.8 g/cm³)、温度(10 - 50℃)、含水率(30% - 70%)等数据作为输入,通过卷积神经网络(ResNet)提取空间特征,结合门控循环单元(GRU)模型追踪泥浆状态的时间变化趋势。该模型处理多维、时序数据,

具有较强的泛化能力。通过监督和半监督学习机制，迭代优化模型，在少样本和异常工况下提高模型稳定性与准确性，为后续决策提供精准的泥浆状态识别结果。

2.2 实时监测与风险预警模型的耦合设计

在施工期，泥浆状态波动大、风险因素叠加等特点决定着预警机制设计需求。预警机制需根据高频监测数据进行动态阈值判断及信号触发以应对突发风险。该系统需要建立结合时序分析与风险识别功能的耦合模型，核心思想是对连续的数据流进行时间序列的深入分析，并利用长短期记忆网络 (LSTM) 或门控循环单元 (GRU) 来预测其状态趋势，利用多维参数交互矩阵建立风险等级判断机制以维持数据扰动时对异常状态高敏感度响应。系统通过监测泥浆的流动性、温度变化、含水率波动等多维数据与 LSTM 或 GRU 模型预测泥浆状态变化趋势。在风险响应逻辑中，系统不依赖静态门限，而是使用自适应算法识别泥浆外泄、堆积阻滞、流速异常等潜在风险，并通过状态迁移建模实现突发态势的预判。为确保高效响应，系统引入冗余信号通道和多路径触发机制，保证主通路故障时仍能保持系统的预警链条不间断。

2.3 自动化处置流程中的反馈闭环与自学习机制

要对泥浆处置过程进行全程闭环控制，不仅要系统识别与预警环节进行实时结果反馈，还要借助数据驱动反馈链条与策略优化机制，使系统能提取历史运行中的规律，对行为进行调整和决策模型的持续重构。该反馈机制实现了数据反馈路径的双向耦合，保证了局部操作状态与全局运行参数的同步性更新，实现了泥浆处置过程的最优化。具体实践时，该系统采用强化学习算法与在线优化模型相结合的方式对反馈结果进行处理，依据实时数据对处置策略进行动态调整。比如在泥浆分流、过滤、固化作业结束时，反馈的结果会对系统的行为进行动态修正，利用滞后性控制机制及短期预测模型来降低作业过度与资源冗余的程度，保证系统在最佳状态下工作。整个系统采用自学习机制对泥浆处置过程进行持续优化，提高了资源利用效率及操作精度。整体框架见图 4。

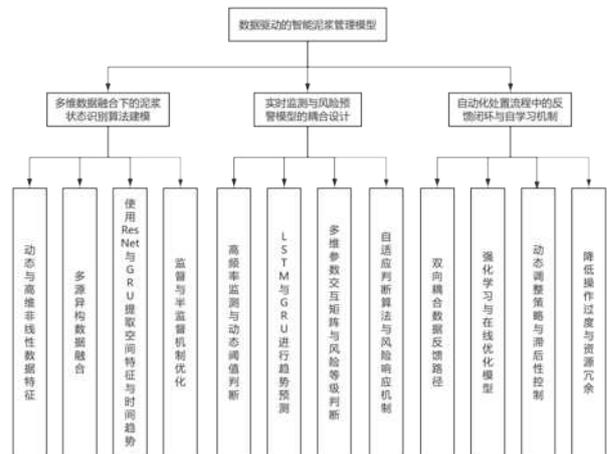


图 4 数据驱动的智能泥浆管理模型

3 系统集成与运维安全保障机制

3.1 模块化集成架构与柔性部署技术策略

物联网赋能路桥施工泥浆处置系统整体运行效能及环境适应性，高度依赖于系统集成架构弹性及部署策略技术包容性。为实现高效系统集成，通过模块化设计使得各异构组件能够解耦配置和逻辑协调，增强系统灵活性和可扩展性。系统集成由物理架构层和逻辑控制层组成。在物理架构层中，通过整合 APP 端,Web 端，该系统提供了用户界面互动功能并对系统操作流程进行了监测与调节。所有感知设备、执行终端和通信模块均采用标准化接口协议进行访问，确保各模块之间的兼容性。该系统支持热插拔机制可以在设备故障或者环境变化等情况下迅速进行调节，保证局部组件故障不影响整个系统功能。逻辑控制层通过分布式调度中心的建设，实现了系统对资源的动态分配和对系统需求变化的快速反应。通过将智能设备接入云平台实现了数据的实时传输和分析以及控制指令的及时发送。柔性部署策略使系统能够根据场景异质性灵活调整节点配置并依靠虚拟容器与边缘计算框架前置部署智能决策以降低远程传输压力并提升响应速度。

3.2 数据安全与传输完整性控制体系

在数据驱动泥浆处置智能化体系中，数据安全与传输完整性作为体系稳定工作的基石直接关系到决策模型有效性与指令执行可靠性。为保障端侧感知、网络传输及云端处理中的数据安全，该系统设计多层级安全防护及精细化数据校验机制。数据安全通过将芯片级加密模块以及数字签名功能整合到端侧设备中，避免了数据的篡改和伪造。在网络传

输层建立端到端加密通道以保证数据传输安全,基于自适应加密协议对密钥等级及会话时效进行调整以避免链路监听和协议劫持。在云端的处理流程中,使用可信执行环境(TEE)和分布式身份验证系统来确保数据处理的安全以及访问权限的可追溯性。传输完整性方面,该系统使用CRC校验、Merkle树哈希验证和数据包冗余交错机制等技术,保证传输数据时不丢失和不篡改。在节点之间的通信出现失衡或者链路中断的情况下,系统会自动启用多路径补偿及数据重传策略以最大程度的保证数据的一致性和可靠性。通过对反馈模块进行实时数据校验,保证反馈路径中数据真实有效。

3.3 运维智能化与系统稳定性协同机制

在物联网环境下,人工巡检与周期性维护的传统模式已经不能适应泥浆处置系统有效、稳定工作的要求。该系统需借助智能感知、预测诊断及自动调节等技术建设智能运维体系来提升故障预防能力,性能自监控及系统的稳定性。从运维结构上看,该系统整合于APP端与Web端之间,用户可以实时看到设备的状态、节点的响应速度以及通信链路的延迟情况。通过融合多源运行日志分析和状态残差建模算法使系统可以对设备的运行状态进行长期趋势跟踪,通过贝叶斯推理和聚类分析实现对潜在风险的提前辨识。该系统根据历史失效样本及工况扰动模型可预测出故障演化路径并产生备用策略以提高极端工况下自稳能力及恢复速度。在调节机制上,该系统基于实时负载压力,通过运行权重的动态调整以及资源分配优化算法对节点功耗、带宽分配以及任务优先级的排序进行自动调整。该系统采用嵌套式诊断链条实现

了局部故障前自纠闭环控制,增强了系统自修复能力并保证了长期运行中保持系统稳定和优化能力。

4 结论

基于物联网的路桥建设泥浆处理系统,通过综合重构传统线性流程显著提高泥浆状态感知精度及覆盖范围,加强复杂环境中通信路径稳定性和高频变化时决策链响应优化。该体系通过对各子模块进行深度融合,保证处置过程可观测性、可判别性与可控性,构成高效智能控制的基础框架。数据驱动全链路联动机制使施工现场泥浆管理形成闭环治理,对施工安全和生态治理的实现提供强大支撑。系统的使用可促进工程管理效能的发挥,保障工程连续性和安全边界,对今后同类工程智能化管理具有有价值的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 商志成. 道路桥梁钻孔灌注桩施工技术研究[J]. 交通世界, 2016(7):2.
- [2] 梁海员. 道路桥梁工程中旋挖灌注桩施工技术的应用研究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2024(001):000.
- [3] 罗爱军. 钻孔灌注桩在高速公路桥梁施工中的应用[J]. 商品与质量, 2020, 000(046):274.
- [4] 朱大志. 试论道路桥梁灌注桩施工技术[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术 :00264-00264.
- [5] 刘志成. 道路桥梁桩基础钻孔灌注桩的施工技术研究[J]. 交通科技与管理, 2022(8):0108-0110.