

基于多源数据融合的机电养护计量风险评估策略

杨 兰

云南省交通科学研究院有限公司 云南 昆明 650011

【摘 要】：随着机电系统在交通、工业等领域的深度应用，其养护计量的准确性直接影响设备运维效率与成本管控。传统机电养护计量风险评估存在数据来源分散、风险识别片面、评估模型单一等问题，难以适应复杂运维场景需求。本文引入多源数据融合技术，整合机电设备运行数据、养护记录数据、环境影响数据及人员操作数据，通过“数据预处理-分层融合-风险建模-动态管控”的全流程策略，构建科学的计量风险评估体系。实践表明，该策略可提升风险识别为机电养护计量风险管控提供有效支撑，具有较高的工程应用价值。

【关键词】：多源数据融合；机电养护；计量风险；评估模型；动态管控

DOI:10.12417/2705-0998.25.19.063

1 研究背景

近年来，机电系统朝着智能化、集成化方向发展，其结构复杂度与运维难度显著提升。机电养护计量作为运维管理的核心环节，涵盖设备参数校准、耗材用量核算、工时统计等内容，其计量结果的准确性直接关系到运维成本核算、设备寿命预测及安全风险防控。然而，当前机电养护计量过程中，数据多分散于不同管理系统，且数据类型差异大，导致计量风险评估时“数据孤岛”问题突出，无法全面捕捉潜在风险。多源数据融合技术可通过对不同来源、不同类型数据的整合与分析，实现“1+1>2”的信息增值效果。将其应用于机电养护计量风险评估，一方面能打破数据壁垒，全面挖掘影响计量准确性的风险因子；另一方面可提升风险评估的实时性与精准性，为运维单位提供“事前预警、事中管控、事后优化”的全周期风险解决方案，助力机电养护管理向智能化、精细化转型。

2 基于多源数据融合的机电养护计量相关理论基础

2.1 多源数据融合技术

多源数据融合是指将来自多个信息源的数据，通过一定的算法进行整合，消除数据冗余与冲突，提取更具价值的信息。根据融合层次不同，数据层融合对原始数据直接处理，适用于同类型结构化数据；特征层融合提取各数据源的关键特征，通过特征映射实现跨类型数据整合；决策层融合基于前两层融合结果，结合领域知识进行综合判断，输出最终风险评估结论。

2.2 机电养护计量风险类型

结合机电养护实践，数据质量风险数据采集不完整、失真，不同养护团队采用的计量标准不统一，如耗材用量核算公式差异；操作执行风险人员操作不规范。温湿度、振动等环境因素影响计量设备精度。

3 当前机电养护计量风险评估的痛点

3.1 数据来源分散，整合难度大

机电养护计量涉及的数据覆盖设备端、管理端、人员端三

大核心场景，但数据整合面临多重实际障碍。从系统建设层面看，不同部门在搭建数据管理系统时缺乏统一规划，各自采用独立的系统架构与存储模式，导致设备运行数据、养护工单数据、人员操作数据分别存储于互不联通的平台中，形成“数据孤岛”。从技术标准层面看，各系统建设时期不同，早期系统多采用本地数据库存储，后期系统则倾向于云平台架构，新旧系统间缺乏通用的数据接口，无法实现数据的自动流转与对接。

3.2 风险识别片面，依赖经验判断

传统机电养护计量风险评估过度依赖运维人员的个人经验，缺乏科学的数据分析支撑，导致风险识别存在明显局限性。从人员能力层面看，多数运维人员具备丰富的现场操作经验，但缺乏系统的数据分析与关联思维，在评估时往往只关注直观可见的单一数据，难以从全局视角挖掘数据间的潜在关联。

从工具支撑层面看，现有评估过程中缺乏能够实现跨维度数据关联分析的工具，无法将设备故障记录、养护操作流程、人员作业情况等多类数据串联起来，无法识别“某类故障频繁出现与养护操作不规范”“耗材用量异常与设备老化”等隐藏的风险关联关系。从信息共享层面看，部门间信息传递存在壁垒，设备管理部门掌握的设备健康状态数据、运维部门掌握的现场操作数据难以实时互通，导致评估人员只能获取单一部门的数据，无法形成完整的风险分析链条，最终出现“只见树木、不见森林”的局面，无法提前预判潜在的计量风险。

3.3 评估模型静态化，适应性差

现有机电养护计量风险评估模型多为静态设计，难以适配复杂多变的运维场景，导致评估结果偏差较大。从模型设计层面看，模型开发时多基于历史静态数据构建，未充分纳入动态影响因素，仅通过设定固定的判断阈值开展评估，未考虑设备使用过程中老化程度加深、性能逐渐衰减对计量结果的影响，也未兼顾不同环境条件对计量准确性的干扰。

从模型更新机制看，多数模型建成后缺乏定期迭代优化的

机制，一旦投入使用便长期保持固定参数，无法根据实际运维场景的变化更新模型逻辑与判断标准，导致模型逐渐脱离实际应用需求。从场景适配层面看，现有模型多为通用型设计，未针对不同行业、不同应用场景的机电系统特性进行差异化设计，将同一套评估标准套用在所有场景中，无法精准匹配不同场景下的计量风险特征，在复杂运维场景中评估结果的可靠性大幅降低。

4 基于多源数据融合的机电养护计量风险评估策略

4.1 机电养护多源数据采集与预处理策略

4.1.1 数据采集维度设计

构建“设备-养护-环境-人员”四维数据采集体系，实时采集电压、电流、振动频率等运行参数，结合设备台账获取型号、使用年限等静态数据；从工单系统提取养护项目、耗材用量、工时记录，从校准报告获取计量设备精度数据；环境数据部署温湿度传感器、粉尘监测仪，记录环境对机电设备及计量工具的影响；人员数据通过操作日志记录人员技能等级、培训次数、违规操作记录。

4.1.2 数据预处理方法

针对多源数据的异质性，采用三步预处理流程。数据清洗通过异常值检测剔除传感器故障导致的失真数据，采用插值法补充缺失数据；将不同量纲数据，如“设备温度（℃）”与“养护工时（h）”转换为[0,1]区间的标准化数据，消除量纲影响。对非结构化数据进行特征提取，转换为结构化特征向量，为后续融合奠定基础。

4.2 多源数据分层融合策略

4.2.1 基于加权平均法的同源数据整合

针对同类型、同维度的设备运行数据，采用加权平均法融合。根据精度权重（如高精度传感器权重0.7，普通传感器权重0.3）计算融合值，降低单一传感器故障导致的数据偏差风险。

4.2.2 基于卡尔曼滤波的跨源特征关联

针对不同来源的特征数据，采用卡尔曼滤波算法构建特征关联模型，核心目标为“设备计量健康度”。以昆磨高速元江段（高温高湿路段）为例，选取“设备月度故障次数”“月度养护工时”“月均环境温度”作为观测值，通过状态方程（ $X_k=AX_{k-1}+BU_{k-1}+W_{k-1}$ ）更新设备计量健康度特征。经融合分析，识别出“环境温度每升高5℃→设备故障次数增加1.2次→养护工时增加8.5h→计量偏差风险上升12%”的连锁关系，为风险预判提供核心依据。

4.2.3 基于BP神经网络的风险综合判断

构建BP神经网络决策模型，将特征层融合后的关键特征作为输入，以计量风险等级作为输出，通过大量历史数据训练

模型参数。模型训练过程中引入交叉验证，确保在不同运维场景下的评估稳定性，最终输出量化的风险评估结果。

4.3 计量风险动态评估与建模策略

4.3.1 风险指标体系构建

基于融合后的数据，从“数据质量、计量标准、操作执行、环境干扰”四个维度设计12项核心指标（如表1），形成分层指标体系。

表1 风险指标体系

一级指标	二级指标	指标说明
数据质量风险	数据完整性、数据准确率	衡量采集数据的可靠性
计量标准风险	标准统一率、校准频率	衡量计量标准的规范性
操作执行风险	操作台规率、培训达标率	衡量人员操作的规范性
环境干扰风险	环境超标频率、设备精度衰减率	衡量环境对计量的影响

4.3.2 模糊综合评价模型应用

结合风险指标体系，采用模糊综合评价法计算风险值。确定指标权重通过层次分析法邀请运维专家对各指标权重打分，确保权重的合理性；模糊隶属度计算根据历史数据建立各指标的模糊隶属函数；通过模糊矩阵运算，得到最终的计量风险等级与量化值，实现风险的精准定位。

4.4 基于评估结果的风险管控策略

4.4.1 分级管控措施

根据风险评估结果（低/中/高）制定差异化管控方案。低风险采用定期监测模式，每月更新数据并复核风险；中风险启动专项整改，如统一计量标准、开展人员培训；高风险实施紧急管控，暂停相关养护作业，排查数据采集设备故障、更换不合格计量工具，待风险降至中低水平后恢复作业。

4.4.2 动态监测与迭代优化

搭建多源数据融合监测平台，实时同步设备运行、养护操作等数据，每季度对风险评估模型进行迭代：结合新的运维案例优化指标权重与隶属函数，确保模型始终适配机电养护场景的变化；同时建立风险评估档案，记录管控措施效果，形成“评估-管控-反馈-优化”的闭环管理。

5 案例验证

5.1 案例背景

选取昆磨高速昆明-元江段为研究对象，该路段涵盖平原、丘陵、干热河谷（元江段，海拔1200m）三种典型地形，沿线设12个收费站、38个监控点位、15个通信基站，共237台核心机电设备。2023年该路段年均养护次数586次，采用传统评估模式时，计量偏差率达15%，年均因计量偏差导致养护成本

超支约 86 万元，其中元江段（高温高湿）计量偏差率高达 21%，是典型的高风险路段。

5.2 策略实施过程

5.2.1 多源数据整合

明确四大类数据的采集范围与责任主体，设备数据由省交通厅监控中心负责提取，每日上午 9 点导出前 24 小时数据；养护数据由运营公司运维部负责，养护工单完成后 2 小时内录入系统；环境数据从云南省气象局交通气象平台获取；人员数据由运营公司人力资源部负责，每月 5 日前更新上月数据。搭建临时数据中转文件夹，统一采用 Excel 格式存储数据，每日由专人核查数据完整性，异常数据剔除率 1.2%，缺失数据补充后完整性达 98.5%。

5.2.2 分层数据融合

对玉溪段 10 台监控摄像头帧率数据采用加权平均法融合，高清摄像头（7 台）权重 0.7，普通摄像头（3 台）权重 0.3，融合后帧率 19.8fps，较单一设备数据波动幅度降低 68%；采用卡尔曼滤波算法构建元江段“环境-故障-工时”关联模型，输入数据为“月均温度 36℃、月度故障次数 12 次、月度养护工时 186h”，通过状态方程动态修正后，输出“设备计量健康度 0.62”（满分 1.0），识别出“温度每升高 3℃，健康度下降 0.08”的关联规律；将融合后的 8 个关键特征输入训练好的 BP 神经网络模型，元江段输出风险得分为 9.2 分（高风险），玉溪段 6.5 分（中风险），昆明段 4.1 分，与实际运维情况高度契合。

5.2.3 高风险点管控

昆明段与元江段监控设备校准标准差异，昆明段以“帧率 $\geq 25\text{fps}$ ”为合格，元江段因高温设备性能下降，仍采用同一标准，导致校准不合格率达 32%，校准频次较昆明段高 42%；元江段隧道内高温（夏季平均 38℃）导致计量工具（如万用表）精度衰减率达 5%，远超正常的 3% 阈值，且未定期校验。

针对高风险点制定管控方案统一并差异化计量标准：由运

营公司牵头制定《昆磨高速机电设备校准区域化标准》，明确平原段（昆明）帧率合格阈值 $\geq 25\text{fps}$ ，干热河谷段（元江） $\geq 23\text{fps}$ ，组织 68 名养护人员开展 2 轮专项培训，考核合格率 100%；在元江段 8 个隧道内各增设 1 台工业空调，将隧道内温度控制在 18-25℃；建立“区域专用计量工具台账”，元江段工具每 2 周校验 1 次，其他路段每月 1 次，不合格工具立即更换（首轮更换 6 台精度超标的万用表）；安排 2 名专职监督员，每日抽查养护作业是否符合区域化标准，每周核查计量工具校验记录，每月召开管控效果复盘会。

5.3 实施效果

策略实施 6 个月后，通过对比实施前后数据，验证策略有效性。路段计量偏差率从 15% 降至 3.8%，其中高风险元江段从 21% 降至 5.2%，中风险玉溪段从 14% 降至 3.5%，低风险昆明段从 8% 降至 2.1%；风险识别准确率从传统模式的 68% 升至 93.5%，误判率从 27% 降至 4.8%；年均养护成本超支从 86 万元降至 19.3 万元，降幅达 77.6%，其中元江段因校准频次合理化，单路段年节约成本 32 万元；设备精度衰减率从 5% 降至 2.8%，校准不合格率从 32% 降至 7%。充分验证了基于多源数据融合的风险评估策略在云南复杂地形机电养护场景中的有效性与实用性。

6 结论

本文提出的基于多源数据融合的机电养护计量风险评估策略，通过整合多维度数据、分层融合技术与动态评估模型，有效解决了传统评估中“数据孤岛”“风险识别片面”等问题，实现了计量风险的精准识别与管控。案例表明，该策略可显著提升机电养护计量管理水平，为运维单位提供科学的决策依据。未来可引入 5G+边缘计算技术，提升多源数据采集与融合的实时性；结合数字孪生技术，构建机电设备虚拟运维场景，实现计量风险的可视化预警，推动机电养护计量管理向“智慧运维”升级。

参考文献：

- [1] 杨政军,钟标,邹三红,等.高速公路机电设备全生命周期精细化养护管理体系构建与试点应用[J].中国交通信息化,2025,(08):30-34.
- [2] 刘艳军.高速公路机电设备全生命周期养护施工技术研究[J].工程机械与维修,2025,(08):40-42.