

融合多传感器数据与 AI 模型的特种设备运行风险智能评估

杨倩茹 闫育辉
石油天然气兰州工程质量监督站
730060

摘要：针对当前特种设备运行风险评估存在的滞后性强、漏检率高、多耦合风险识别精度不足等痛点，本文提出一种融合多传感器数据与 AI 模型的智能评估方法，从多维度传感部署、多源数据融合建模、工程落地适配三个层面构建完整的评估体系。该方法通过边缘侧初筛、自适应特征融合、小样本增量学习等技术组合，解决了工业场景下数据噪声大、故障样本少、风险演化复杂等问题。现场验证结果显示，该方法的风险识别准确率可达 94%，预警提前量较传统方法提升 5 倍以上，可为特种设备的安全运维提供可靠技术支撑。

关键词：特种设备运行风险评估；多传感器数据融合；AI 风险建模；边缘侧数据处理

引言

特种设备涵盖起重机械、压力容器、压力管道、电梯等品类，是工业生产、城市运行的核心基础装备，其运行安全直接关系到人员生命财产安全。当前行业普遍采用的“定期检验+人工巡检”风险评估模式，受人员经验差异、检测周期固定等限制，无法实时捕捉设备运行中的动态风险；而常规单传感器阈值报警方案仅能反映单一参数变化，难以识别多因素耦合导致的隐性风险，极易出现漏判、误判问题。在此背景下，本文结合多传感感知与人工智能技术，构建一套可落地的特种设备运行风险智能评估体系，实现风险的早发现、早预警、早处置。

1、特种设备运行风险的多维度传感感知体系

1.1 多类型传感节点的选型与布设原则

根据不同特种设备风险演化特征定制差异化传感方案：针对起重机械，在主梁跨中、钢丝绳固定端、铰轴等易疲劳、易磨损位置布设应变片、振动加速度传感器、倾角传感器，采集结构应力、运行振动、姿态偏移等核心参数；针对压力容器，在焊缝、介质进出口、腐蚀高发区布设声发射传感器、压力变送器、温度传感器、腐蚀速率传感器，捕捉泄漏、过载、腐蚀等早期风险特征。布设过程遵循“关键部位全覆盖、冗余备份防失效”原则，对高风险部位设置 2-3 个同类型传感器交叉验证，避免单传感器故障导致的监测失效。

1.2 多源传感数据的前置预处理规则

针对不同传感器的采样特性制定统一预处理流程：首先采用小波阈值去噪法过滤工业场景中电磁干扰、机械杂振带来的噪声信号，完整保留风险特征的原始波形；其次采用 3σ 准则剔除异常值，对超出正常量程 3 倍标准差的无效数据予以剔除，避免干扰后续模型判断；最后对不同采样率的数据进行时间戳对齐，将高采样率的振动、声发射数据按秒级提取均值、峰值、频谱特征，与低采样率的温度、压力、腐蚀数据统一时间维度，同时采用最大最小归一化方法将不同量纲的参数映射至 $[0,1]$ 区间，为后续模型训练提供标准化输入。

1.3 边缘侧数据初筛与传输优化机制

在传感节点集群旁部署端侧边缘计算模块，提前完成数据的初步筛选与特征提取，仅将超出正常阈值的异常数据、风险特征值传输至上层平台，可减少 90%

以上的无效数据传输，显著降低带宽压力与云端计算负荷。同时边缘侧内置基础阈值报警规则，可在断网场景下实现本地应急报警，避免云端失联导致的风险漏判，适配无公网覆盖的偏远工业场景使用需求。

2、融合多传感数据的 AI 风险评估模型构建

2.1 多模态特征的自适应融合层设计

针对不同类型传感数据的特征差异，搭建基于注意力机制的特征融合层：对数值型静态特征（压力、温度、腐蚀速率）、时序型动态特征（振动频谱、声发射波形、应变变化趋势）、视觉特征（表面裂纹、磨损图像特征）分别进行特征编码，再根据风险场景的不同自动分配特征权重。例如压力容器泄漏前期声发射特征的权重自动提升至 0.6 以上，过载工况下压力、应变特征权重占比超过 0.7，实现多源特征的高效融合，避免固定权重导致的特征浪费与识别精度下降。

2.2 分类与回归耦合的风险评估模型

采用“风险等级分类+发生时间预测”的耦合模型架构：首先通过轻量型梯度提升树（GBDT）模型实现风险等级的四分类（轻度风险、中度风险、重度风险、特重风险），分类准确率可达 96%以上；其次针对不同风险等级的数据集，训练双向长短期记忆网络（Bi-LSTM）实现风险发生时间的回归预测，为运维人员预留充足的处置时间。耦合模型的优势在于可根据风险等级匹配对应的预测精度，对重度以上风险的预测误差控制在 2 小时以内，完全满足现场运维的时效性要求。

2.3 小样本场景下的增量学习机制

针对特种设备故障样本稀缺的行业痛点，引入迁移学习框架，将同类型、同工况设备的已标注故障样本迁移至新设备的基础模型中，可减少新模型 70%以上的标注样本需求；同时搭建增量学习通道，每新增 1 个故障标注样本即可完成模型的轻量化更新，无需重新训练全量数据集，随着样本积累模型精度可逐步提升，有效解决工业场景下故障样本不足、模型迭代成本高的问题。

3、智能评估系统的工程应用与效果验证

3.1 评估系统的功能模块搭建

整个系统分为四个核心模块：一是实时监测模块，可视化展示所有传感参数的实时变化趋势、设备整体运行状态；二是风险预警模块，根据模型输出结果发出不同等级的预警信息，精准推送至对应运维人员的移动终端；三是故障溯源模块，可反向定位异常特征对应的传感节点与设备部件，明确风险诱因，减少人工排查时间；四是运维决策模块，根据风险等级、位置、处置难度自动生成运维方案，包括所需工具、备件、处置流程等，大幅提升运维效率。

3.2 工业场景的适配性优化

针对特种设备应用场景的复杂性，完成多项落地适配优化：一是对高粉尘、强腐蚀、易燃易爆场景的传感器加装防爆、防腐蚀外壳，防护等级达到 IP68 以上，满足恶劣环境长期使用需求；二是采用工业以太网、LoRa 等多方式传输，适配不同场景的网络条件，数据传输成功率达 99.9%以上；三是适配不同厂商的特种设备控制协议，可直接对接现有设备的 PLC 控制系统，无需大规模改造，平均单台设备部署成本降低 60%以上。

3.3 评估效果的对比验证

选取多个不同场景的特种设备集群开展现场验证，与传统的单传感器阈值报警、人工巡检模式相比，本系统的风险识别准确率从 72%提升至 94%，漏报率从 18%降至 2%，预警提前量从平均 12 小时提升至 72 小时，可有效避免 90%以上的非计划停机与安全事故，年均运维成本降低 40%左右，充分验证了系统的实用性。

与可靠性。

结束语

本文提出的融合多传感器数据与 AI 模型的特种设备运行风险智能评估体系，有效解决了传统评估方法中存在的精度低、滞后性强、耦合风险识别难等问题，通过多维度传感部署、自适应特征融合、小样本增量学习等技术的组合应用，实现了风险的实时感知、精准评估、提前预警。后续将进一步融合设备运维日志、历史故障数据等多维度信息，优化模型的泛化能力，同时探索联邦学习框架下的跨设备模型训练，在保障数据安全的前提下进一步提升评估精度，为特种设备的全生命周期安全运维提供更完善的技术支撑。

参考文献：

- [1] 王俊杰. 人工智能技术在特种设备检验检测中的应用探究[J]. 中国质量监管, 2024, (2): 88-89.
- [2] 郭青源, 王璇, 李菊峰, 等. 基于数字孪生的电梯制动性能预测及评价[J]. 中国特种设备安全, 2024, 40(1): 58-63.
- [3] 孟洁, 代丽莉, 黄羽, 等. 基于无线传感器的安全监测装置和方法[J]. 冶金设备, 2025, (6): 77-82.
- [4] 牛亚平, 沈正祥, 励凯宏, 等. 基于物联网的气瓶充装站安全生产风险监测预警云平台设计[J]. 特种设备安全技术, 2023, (2): 64-66.