

化工企业生产设备预测性维护的数字化系统设计与实现

马骥

宁夏沃凯珑新材料有限公司，宁夏 银川 750400

DOI:10.61369/ER.2025060011

摘 要： 针对化工企业生产设备故障存在随机性、传统维护模式难以适配其复杂生产环境与设备管理需求的问题，本文设计并实现了一套化工企业生产设备预测性维护数字化系统。系统遵循可靠性与稳定性、实时性与时效性、扩展性与兼容性、安全性与保密性、易用性与实用性多维度核心原则，采用业务应用层、智能分析层、数据存储层、数据采集层的分层总体架构，配套安全保障与运维管理体系，设计了贯穿全链路的闭环数据流架构，并结合业务需求构建了规范化的七大核心数据表，实现多源数据的分类存储与管理。

关 键 词： 化工企业；生产设备；预测性维护；数字化系统

Design and Implementation of a Digital System for Predictive Maintenance of Production Equipment in Chemical Enterprises

Ma Ji

Ningxia Wokailong New Material Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia 7504000

Abstract： In response to the randomness of equipment failures in chemical enterprises and the challenges traditional maintenance models face in adapting to complex production environments and equipment management needs, this paper designs and implements a digital system for predictive maintenance of production equipment in chemical enterprises. The system adheres to multi-dimensional core principles, including reliability and stability, real-time performance and timeliness, scalability and compatibility, security and confidentiality, as well as ease of use and practicality. It adopts a hierarchical overall architecture consisting of a business application layer, an intelligent analysis layer, a data storage layer, and a data acquisition layer, complemented by a security assurance and operation and maintenance management system. A closed-loop data flow architecture spanning the entire chain is designed, and seven standardized core data tables are constructed based on business requirements to achieve classified storage and management of multi-source data.

Keywords： chemical enterprises; production equipment; predictive maintenance; digital system

引言

预测性维护作为一种基于数据驱动的先导维护模式，通过实时采集设备运行数据、精准分析设备状态、科学预测故障趋势与剩余使用寿命（RUL），可实现“按需维护”，有效弥补传统维护模式的短板。在此背景下，构建一套适配化工企业复杂生产环境、满足多场景设备管理需求的预测性维护数字化系统，成为解决当前设备维护痛点、推动企业数字化升级的关键课题。本文详细阐述了系统的总体架构、数据流设计、数据库构建等核心内容，重点研究了数据预处理、特征工程、故障诊断及趋势预测与 RUL 估算等关键算法与模型，并完成了数据采集、存储管理、智能分析等核心模块的开发与实现。

一、系统总体架构设计

（一）系统设计原则

设备在使用过程中的失效时间是随机的。同一类型设备，有的使用几年才出故障，有的使用几个月就出故障。但就一批设备而言，失效时间是遵循统计规律的^[1]。为适配化工企业复杂的生产环境与设备管理需求，系统设计遵循多维度核心原则^[2]。具备

7×24小时连续运行能力，各环节容错性强，可抵御车间高温、高湿、强电磁干扰等环境影响，保障运行的可靠性与稳定性；将设备运行数据采集延迟控制在毫秒级，快速推送故障诊断与预警信息，确保设备异常的及时响应，兼顾实时性与时效性；采用模块化架构设计，支持功能与算法的扩展及新设备类型的接入，同时兼容企业现有DCS、PLC、SCADA等系统，实现数据互联互通，强化扩展性与兼容性；通过数据加密、权限管控、日志审计等多

重机制，保护设备运行数据、故障信息等企业核心数据，坚守安全性与保密性；前端界面简洁直观、操作便捷，适配不同岗位人员的使用需求，功能贴合企业实际维护场景，剔除冗余设计，突出易用性与实用性。

（二）系统总体架构图

基于系统设计原则，化工企业生产设备预测性维护数字化系统采用分层架构模式，从上至下依次分为业务应用层、智能分析层、数据存储层、数据采集层，同时配备安全保障体系与运维管理体系，为系统稳定运行提供全方位支撑，各层级及保障体系功能紧密衔接、协同运转^[3]。数据采集层实时采集多源设备及业务数据并预处理传输；数据存储层采用混合存储架构分类管理各类数据；智能分析层通过智能算法实现状态评估、故障识别等核心功能；业务应用层面向多场景提供多元化功能与多终端展示；安全保障体系全方位保障系统与数据安全；运维管理体系确保系统长期稳定运行。

（三）数据流架构设计

系统数据流形成闭环管理，贯穿采集-传输-存储-处理-应用全链路^[4]。数据采集端通过传感器实时获取设备物理参数与业务数据，依据设备重要性灵活配置频率，并即时完成初步清洗与格式转换；随后数据经5G、以太网等网络传输至边缘网关进行汇聚、缓存与过滤，再上传至存储层；存储层依据数据类型分库存储（时序、关系型、文件数据库）并执行备份；智能分析层提取数据进行深度预处理与特征提取，利用模型进行故障诊断、趋势预测及RUL估算，将结果回传；业务应用层对结果进行可视化展示与业务推送，指导用户维护决策，并将操作记录反馈至系统，实现数据流的完整闭环。

（四）数据库设计

数据库设计遵循规范化原则，结合化工企业设备预测性维护需求，构建了七大核心数据表^[5]。采用关系型数据库存储设备基础信息（含设备ID、名称、额定参数等）、设备故障历史记录、设备维护记录、模型参数配置及用户信息（含角色权限）；采用时序数据库存储设备运行时序数据（含振动、温度等实时指标）及经特征工程提取的特征数据（含时域与频域特征）^[6]。同时，系统通过建立索引、设置数据生命周期管理策略（如时序数据保留1年）及定期归档清理，以保障数据库性能。

二、关键算法与预测模型设计

（一）数据预处理算法

化工设备运行数据因存在噪声、缺失值、异常值等问题会影响后续模型分析精度，需进行预处理，核心流程包括数据清洗、数据归一化与数据重采样^[7]。数据清洗通过db4小波等小波阈值去噪剔除高频噪声，按缺失比例分别采用线性插值、KNN插值或数据剔除处理缺失值，结合 3σ 准则与箱线图识别异常值并进行中位数替换或删除；数据归一化采用min-max算法将不同量纲的数据映射至[0,1]区间，公式为 $x_{\text{normalized}}=(x-x_{\text{min}})/(x_{\text{max}}-x_{\text{min}})$ ；数据重采样则通过高频降采样、低频升采样的方式，将所有数据统一为500ms/次的采集频率，解决不同设备、参

数采集频率不一致的问题。

（二）特征工程

特征工程是提升模型预测精度的关键，核心是从预处理数据中提取能反映化工设备运行与故障状态的有效信息。针对设备运行数据的时序特性，从时域、频域双维度构建多维度特征集。时域基于运行参数波形提取均值、方差、各类因子等12项统计类特征，直观体现数据分布与变化趋势；频域先将时域数据经傅里叶变换转换为频域数据，再提取主频、谐波分量、频谱特征、频带能量占比等10项反映故障频率特性的特征。为剔除初始特征集中的冗余与无效特征，采用皮尔逊相关系数结合随机森林特征重要性的方法进行筛选，先剔除相关系数绝对值 >0.85 的冗余特征，再选取随机森林重要性得分前15的特征组成最终特征集，以此降低模型计算复杂度，提升训练效率与预测精度。

（三）故障诊断模型实现

化工设备故障类型多样（如轴承磨损、密封泄漏等），故障特征呈非线性、耦合性特点，文章设计改进的CNN-LSTM融合故障诊断模型，实现设备故障精准识别与定位^[8]。模型包含输入层、CNN特征提取层（2卷积+2最大池化层，提取局部故障特征）、LSTM时序建模层（1层LSTM，通过门控机制捕捉时序依赖）、全连接层（融合特征并经ReLU激活）及输出层（Softmax输出故障类型概率）；模型以某反应釜10000条运行/故障数据（含正常及5类典型故障）为训练数据，按7:2:1划分训练/验证/测试集，采用交叉熵损失函数、Adam优化算法（学习率0.001）训练，设置迭代100次、批处理大小32，通过Dropout（系数0.5）防止过拟合，最终输出概率最大的故障/正常状态作为诊断结果，同步输出置信度，故障时额外输出故障类型、特征匹配度以支撑维护决策。

（四）趋势预测与RUL估算模型

趋势预测与RUL估算是预测性维护的核心目标，本文设计Attention-BiLSTM融合模型实现上述目标^[9]。趋势预测模型以设备预处理后的时序运行数据为输入，通过输入层、BiLSTM层（双向捕捉时序依赖）、Attention层（突出关键特征）、全连接层及输出层，输出未来1小时内设备运行参数预测值（预测步长12，每5分钟一个预测点），模型以均方误差（MSE）为损失函数，采用Adam优化算法更新参数以最小化预测偏差；RUL估算模型基于趋势预测结果、设备故障阈值（由额定参数与历史故障数据确定），结合线性与非线性融合的退化模型适配不同设备退化特性，同时引入考量运行环境、维护历史等因素的修正系数（基于历史数据拟合）提升估算精度，进而计算设备从当前状态到参数超阈值的剩余运行时间（即RUL）；模型最终输出包含未来1小时设备各运行参数预测曲线与具体数值、设备RUL（单位：小时/天）及95%置信区间（反映估算可靠性）。

三、系统详细设计与实现

（一）数据采集模块实现

数据采集模块是系统数据输入核心，负责多源数据实时采集

与初步预处理,采用传感器+边缘网关+采集终端硬件架构结合Python软件程序实现功能^[10]。振动、温度、压力及流量传感器实时采集关键设备参数,经RS485传输至工业级边缘网关。网关利用Python程序进行数据清洗、本地缓存及边缘计算,通过5G/以太网将数据上传至存储层,并支持断点续传。中控室采集终端实时监控状态,异常时即刻报警并记录,确保多源数据高效、可靠采集。

(二) 数据存储与管理模块实现

数据存储与管理模块基于InfluxDB(时序数据库)+MySQL(关系型数据库)+MinIO(文件数据库)混合存储架构,结合数据库管理系统与Spring Boot开发的软件程序,实现多源数据的分类存储、管理、访问控制及上层应用支撑,其中InfluxDB用于存储设备运行时序数据(保留1年,分片存储提升读写性能),MySQL用于存储设备基础信息、故障/维护记录、用户信息等结构化数据(主从复制保障数据冗余备份),MinIO用于存储故障诊断报告、模型文件等非结构化数据(分布式存储,高可靠可扩展);模块核心功能涵盖数据写入(按类型写入对应数据库)、多条件分页查询、定时备份与手动/自动恢复、按生命周期清理过期数据、基于RBAC模型的权限控制等,同时提供标准化RESTful API(JSON传输、Token认证,支持每秒1000+次请求的高并发处理),为智能分析层、业务应用层提供安全、高效的数据访问支持。

(三) 智能分析引擎实现

智能分析引擎是系统核心,基于Python及TensorFlow/PyTorch机器学习框架开发并部署于工业服务器,负责数据深度分析与智能决策。引擎采用模块化架构,包含数据预处理、特征

工程、故障诊断、趋势预测与RUL估算、模型管理五大核心模块,模块间通过RabbitMQ实现数据交互以解耦提效。其中:数据预处理模块(Pandas/NumPy)完成数据清洗、归一化等;特征工程模块(Scipy)提取时/频域特征并筛选;故障诊断模块(TensorFlow)基于CNN-LSTM模型输出诊断结果;趋势预测与RUL估算模块(PyTorch)基于Attention-BiLSTM模型输出预测结果与RUL值;模型管理模块负责模型加载、更新、版本管理、性能监控及优化。引擎每5分钟从数据存储层提取设备运行数据,经预处理、特征工程后,由故障诊断、趋势预测与RUL估算模块分析,结果存入数据存储层并推送至业务应用层;模型管理模块实时监控模型状态,指标不达标时触发优化流程。

四、结束语

本文围绕化工企业生产设备预测性维护的数字化需求,针对化工设备故障随机性强、工况复杂、传统维护模式滞后等核心痛点,完成了一套完整的预测性维护数字化系统的设计与实现工作,通过理论研究与技术落地相结合,有效解决了化工企业设备维护被动应对的难题,为企业设备管理数字化升级提供了可行的技术方案与实践参考。系统的应用的核心价值在于打破了传统事后维修与定期预防性维护的局限,推动化工企业设备管理模式从经验驱动向数据驱、从被动抢修向主动预判转变,不仅能够降低设备突发故障风险、减少生产中断损失、控制维护成本,还能提升设备运行稳定性与企业安全生产水平,为化工行业高质量发展注入技术动力。

参考文献

- [1]王洪亮.化工企业生产设备预防性维护策略研究[D].辽宁:大连理工大学,2009. DOI:10.7666/d.y1606537.
- [2]司少峰.石油化工企业生产设备的安全隐患[J].劳动保护,2024(1):62-63. DOI:10.3969/j.issn.1000-4335.2024.01.029.
- [3]喻学丰.设备技术管理在化工生产企业中的作用[J].中国化工贸易,2013(12):208-208. DOI:10.3969/j.issn.1674-5167.2013.12.198.
- [4]吴法明.浅谈化工企业生产特点及设备事故的预防[J].装备制造技术,2011(10):118-119. DOI:10.3969/j.issn.1672-545X.2011.10.040.
- [5]董鑫.企业生产过程中的化工设备常见腐蚀问题及应对措施[J].科技资讯,2014,12(22):91,93. DOI:10.3969/j.issn.1672-3791.2014.22.074.
- [6]张意,何小荣,董凌平,等.危化品生产企业安全生产标准化建设中化工机械设备安全运行的标准化研究[J].中国标准化,2020(13):105-107. DOI:10.3969/j.issn.1002-5944.2020.13.022.
- [7]雷鸿刚.石油化工企业安全生产与设备风险管控浅析[J].科技成果管理与研究,2020,15(7):59-61. DOI:10.3772/j.issn.1673-6516.2020.07.018.
- [8]赵时超,石福恩.探索建立适于化工企业生产的设备点检定修模式[J].河南化工,2012,29(22):42-43. DOI:10.3969/j.issn.1003-3467.2012.22.013.
- [9]高明.盐湖化工企业中生产设备与建构筑物的腐蚀状况和防护措施分析[J].中国化工贸易,2020,12(1):215,217.
- [10]尤建祥,马亮,于文强.化工企业生产工艺常见安全隐患及防范措施[J].化纤与纺织技术,2023,52(1):55-57. DOI:10.3969/j.issn.1672-500X.2023.01.019.