

化工自动化仪表的预防性维修管理系统研究

刘海涛

美吉星供应链管理（黑龙江）有限公司，黑龙江 大庆 166200

DOI:10.61369/ETQM.2026010016

摘 要： 本文基于设备全生命周期管理理论与故障模式影响分析（FMEA）方法，深入研究化工自动化仪表预防性维修管理系统的设计与实施。通过剖析当前化工企业仪表维修管理的现存问题，构建涵盖数据采集层、核心处理层与应用服务层的三级系统架构，实现维修计划智能生成、故障预警、备件管理及数据分析等功能。实际应用表明，该系统可使仪表故障停机时间缩短35%以上，维修成本降低20%，为化工企业实现精细化维修管理提供有效技术支撑。

关 键 词： 化工自动化仪表；预防性维修；管理系统；故障预警；全生命周期管理

Research on Preventive Maintenance Management System for Chemical Automation Instruments

Liu Haitao

Meijixing Supply Chain Management (Heilongjiang) Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 166200

Abstract： This study investigates the design and implementation of a preventive maintenance management system for chemical instrumentation through equipment lifecycle management theory and Fault Mode and Effect Analysis (FMEA). By analyzing current challenges in instrumentation maintenance management within chemical enterprises, the research establishes a three-tier system architecture comprising data acquisition, core processing, and application service layers. The system enables intelligent maintenance planning, fault prediction, spare parts management, and data analytics. Practical applications demonstrate that this solution reduces instrument downtime by over 35% and lowers maintenance costs by 20%, providing effective technical support for chemical enterprises to achieve refined maintenance management.

Keywords： chemical automation instrumentation; preventive maintenance; management system; fault warning; full life cycle management

引言

传统化工企业对自动化仪表多采用“故障后维修”或“定期大修”模式，前者易造成生产中断与安全隐患，后者存在过度维修现象，导致维修成本居高不下。随着工业4.0理念在化工行业的深度渗透，以及智能制造战略的推进，传统维修管理模式已难以满足精细化生产需求。因此，构建一套科学、高效的预防性维修管理系统，实现对仪表运行状态的实时监测、故障提前预警及维修计划精准制定，对于提升化工企业生产安全性、降低运营成本、增强市场竞争力具有重要的理论价值与实际意义^[1-3]。

一、化工企业自动化仪表维修管理现状及问题分析

（一）现存主要问题

1. 维修管理模式落后，预防性意识不足：多数中小型化工企业仍采用“故障后维修”模式，缺乏对仪表运行状态的实时监测，直到仪表出现明显故障才进行维修，导致非计划停机频繁。部分企业虽采用“定期维修”模式，但维修周期多基于经验制定，未结合仪表实际运行状态与工艺需求，存在“过度维修”或

“维修不足”现象。例如，某中型化工企业对所有流量仪表采用“半年一修”的固定周期，部分运行状态良好的仪表被频繁拆解，而部分高负荷运行的仪表因未及时维修导致故障。

2. 数据管理分散，信息整合能力弱：调研发现，多数企业的仪表数据分散存储于不同系统或纸质台账中，如仪表台账由设备管理部门记录，运行数据由生产部门监控，维修记录由维修部门存档，数据缺乏有效整合。这种“信息孤岛”现象导致维修人员无法全面获取仪表全生命周期数据，难以精准判断故障原因与

维修需求。例如，某企业反应釜温度仪表出现故障，维修人员仅能查阅维修记录，无法获取该仪表的历史运行数据与工艺参数变化，导致维修时间延长至8小时^[4-5]。

3. 故障预警精度低，缺乏智能化手段：现有系统多依赖人工巡检发现仪表故障，人工巡检效率低、主观性强，难以及时发现隐蔽性故障。部分企业虽配备简单的报警装置，但仅能在参数超标时发出报警，无法提前预测故障风险。例如，某大型石化企业的压力变送器出现零点漂移时，报警装置未及时响应，直至漂移量超过阈值才发出报警，此时已导致工艺参数波动，影响产品质量。

（二）问题成因分析

导致上述问题的原因主要包括：1. 企业管理层对预防性维修的重视程度不足，更关注短期生产效益，忽视长期设备管理投入；2. 缺乏专业的维修管理系统，传统管理手段无法满足智能化、精细化管理需求；3. 维修人员培训体系不完善，技术更新滞后于仪表发展；4. 各部门之间缺乏协同机制，导致数据共享与流程衔接不畅。因此，构建一套集成化、智能化的预防性维修管理系统，是解决上述问题的关键途径。

二、化工自动化仪表预防性维修管理系统设计

（一）系统设计目标与原则

1. 设计目标：针对化工自动化仪表维修管理的现存问题，本系统旨在实现以下目标：实现仪表运行状态的实时监测与数据整合，打破“信息孤岛”；通过智能算法实现故障提前预警，预警精度达到90%以上；基于仪表重要性及运行状态，自动生成优化的维修计划；实现备件库存的动态管理，提升库存周转率；通过数据分析为仪表采购、更新提供决策支持^[6]。

2. 设计原则：实用性原则，结合化工企业实际业务流程，设计简洁易用的操作界面，确保系统可快速落地应用；可靠性原则，采用分布式架构与数据备份技术，确保系统在工业环境下稳定运行，数据传输与存储安全；扩展性原则，预留接口便于与企业现有DCS、ERP等系统对接，支持新增仪表类型与功能模块；智能化原则，引入数据分析与机器学习算法，提升故障预警与维修计划制定的精准度。

（二）系统总体架构设计

基于分层架构思想，本系统构建“数据采集层-核心处理层-应用服务层”三级架构，各层功能相互衔接，实现从数据采集到决策支持的全流程管理，具体架构如下：

1. 数据采集层：作为系统的数据入口，负责采集仪表运行数据、工艺参数及维修相关数据。数据采集方式包括：通过工业以太网与智能仪表、DCS系统对接，实时采集仪表测量值、自诊断信息、运行时间等数据；通过无线传感器网络（WSN）采集偏远区域仪表数据，解决有线传输布线困难问题；通过人工录入模块采集维修记录、备件库存、仪表台账等非实时数据。采集的数据经标准化处理后，传输至核心处理层存储与分析。

2. 核心处理层：是系统的“大脑”，负责数据存储、故障

预警及维修计划优化。该层包含三大模块：数据存储模块，采用MySQL+MongoDB混合数据库架构，MySQL存储结构化数据（如仪表台账、维修记录），MongoDB存储非结构化数据（如仪表运行日志、故障图片），确保数据存储的高效性与安全性；故障预警模块，基于FMEA与机器学习算法，对采集的运行数据进行分析，识别故障特征，提前发出预警信息；计划优化模块，结合仪表重要性等级、故障风险评估结果及生产计划，生成最优维修计划与备件采购计划。

3. 应用服务层：面向不同用户提供个性化服务，主要包括五大功能模块：设备管理模块，实现仪表台账的数字化管理，包括仪表基本信息、安装位置、校准记录等；状态监测模块，以可视化界面展示仪表运行状态，支持异常数据追溯；维修管理模块，实现维修计划下发、维修过程跟踪、维修效果评估全流程管理；备件管理模块，实时监控备件库存，自动触发补货提醒，优化库存结构；数据分析模块，生成仪表可靠性报告、维修成本分析报告等，为管理决策提供支持。

（三）核心功能模块详细设计

1. 故障预警模块设计：该模块是预防性维修的核心，采用“FMEA风险评估+LSTM神经网络预测”的双层预警机制。首先，通过FMEA方法对仪表进行风险评估，确定各仪表的风险等级（高、中、低）及核心故障模式。例如，对于反应釜压力变送器，其故障模式包括零点漂移、量程偏差、线路故障等，通过FMEA分析确定零点漂移为高风险故障模式。其次，针对高风险故障模式，采用LSTM神经网络构建预测模型，以仪表历史运行数据（如测量值偏差、环境温度、运行时间）为输入，训练模型预测故障发生概率。当预测概率超过设定阈值时，系统自动发出预警，并推送故障原因分析与处理建议^[7]。

2. 维修计划优化模块设计：该模块的核心是实现维修计划与生产需求的精准匹配。首先，建立仪表重要性等级评价体系，从工艺关联性、故障影响范围、安全风险三个维度，采用层次分析法（AHP）确定各仪表的重要性权重，将仪表分为关键级（如反应釜控制仪表）、重要级（如储罐液位仪表）、普通级（如车间环境温度仪表）。其次，结合仪表重要性等级、故障预警结果及生产计划，采用遗传算法优化维修计划，目标是在满足生产连续性要求的前提下，最小化维修成本与故障风险。例如，对于关键级仪表的高风险预警，系统优先安排维修，且维修时间避开生产高峰期；对于普通级仪表的低风险预警，可合并至下次定期停机时维修。

（四）系统技术实现方案

系统采用B/S（浏览器/服务器）架构，便于企业各部门通过浏览器访问系统，无需安装客户端。前端开发采用Vue.js框架，结合ECharts可视化库实现数据图表展示，提升用户体验；后端采用Python的Django框架，实现业务逻辑处理与接口开发；数据采集采用Modbus、OPC UA等工业通信协议，确保与不同品牌的仪表、DCS系统兼容；算法实现方面，采用TensorFlow框架构建LSTM神经网络模型，结合Scikit-learn库实现FMEA风险评估与AHP权重计算。系统部署采用Docker容器化技术，提高

部署效率与环境一致性，同时配备数据备份与容灾恢复机制，确保系统稳定运行。

三、系统应用案例分析

（一）案例背景

选取某大型石化企业的催化裂化装置作为应用场景，该装置是石化生产的核心单元，涉及自动化仪表320台，包括压力变送器85台、温度仪表102台、流量仪表78台、液位仪表55台。应用前，该装置采用“定期维修+事后维修”模式，2023年仪表故障导致非计划停机6次，停机时间累计120小时，维修成本达180万元，备件库存周转率仅1.1次/年。为解决上述问题，该企业于2024年1月引入本文设计的预防性维修管理系统，进行为期6个月的试运行。

（二）系统实施过程

1. 前期准备阶段（1个月）：完成系统部署与数据对接，录入320台仪表的台账信息（包括型号、厂家、安装时间、校准周期等），通过工业以太网与装置DCS系统对接，实现运行数据实时采集；组织维修人员、生产人员及管理人员进行系统操作培训，确保各岗位人员掌握系统功能^[8]。

2. 试运行阶段（5个月）：系统正式投入运行，实时监测仪表运行状态，自动生成维修计划并下发至维修人员；每周召开系统运行分析会，收集用户反馈，优化系统参数（如预警阈值、维修周期系数）。例如，初期压力变送器的预警阈值设定为80%，运行1个月后发现误报率较高，结合实际故障数据调整为85%，误报率降至5%以下。

（三）应用效果评估

通过对比系统应用前后的关键指标，评估系统实施效果，具体数据如下表所示：

评估指标	应用前（2023年同期）	应用后（2024年试运行期）	改善幅度
非计划停机次数	6次	1次	83.3%
故障停机时间	120小时	38小时	68.3%
仪表故障率	8.5%	2.2%	74.1%
维修成本	180万元	142万元	21.1%
备件库存周转率	1.1次/年	1.8次/年	63.6%
故障预警准确率	—	92.3%	—

由上表可知，系统应用后取得显著效果：仪表故障率从8.5%降至2.2%，非计划停机次数减少83.3%，故障停机时间缩短68.3%，有效提升了生产连续性；维修成本降低21.1%，备件库存周转率提升63.6%，实现了维修资源的优化配置；故障预警准确率达到92.3%，可提前3-7天识别潜在故障，为维修准备争取了充足时间。此外，系统的数据分析功能为企业提供了仪表可靠性报告，识别出3台运行年限超过8年、故障频发的老旧仪表，建议进行更新换代，为设备升级提供了科学依据。

四、结论与展望

本文针对化工自动化仪表维修管理的现存问题，基于设备全生命周期管理、FMEA等理论，设计并实现了一套预防性维修管理系统。通过理论研究与案例验证，得出以下结论：1. 化工自动化仪表的故障具有隐蔽性、关联性、环境敏感性及可预测性等特性，传统维修模式已难以适应现代化工生产需求，预防性维修是提升仪表可靠性、降低故障风险的有效手段。2. 构建的“数据采集层-核心处理层-应用服务层”三级系统架构，实现了仪表运行数据的实时采集、智能分析与精准管理，打破了传统维修管理的数据壁垒，提升了管理效率。3. 系统集成的故障预警模块（FMEA+LSTM）与维修计划优化模块（AHP+遗传算法），实现了故障提前预警与维修计划的智能生成，预警准确率达到92.3%，可显著降低故障发生率与维修成本。4. 实际应用案例表明，该系统可使仪表故障停机时间缩短68.3%，维修成本降低21.1%，备件库存周转率提升63.6%，为化工企业实现精细化、智能化维修管理提供了有效支撑^[9-10]。

参考文献

- [1] 中国石油和化学工业联合会. 2023年中国化工行业运行报告[R]. 北京：中国石油和化学工业联合会，2024.
- [2] 张宏，李阳，王强. 基于FMEA的化工仪表故障风险评估模型研究[J]. 化工自动化及仪表，2022，49(3)：389-394.
- [3] 李娟，张伟，刘敏. 物联网技术在化工仪表状态监测中的应用[J]. 工业仪表与自动化装置，2023(2)：78-82.
- [4] 王建军. 设备全生命周期管理理论在化工企业中的应用[J]. 中国设备工程，2022(15)：28-30.
- [5] 刘辉，陈静. 基于RCM的化工自动化仪表维修策略优化[J]. 化工机械，2021，48(6)：891-895.
- [6] 西门子(中国)有限公司. Siemens Industrial Edge平台技术白皮书[Z]. 北京：西门子(中国)有限公司，2023.
- [7] 艾默生自动化解决方案. Plantweb Optics资产绩效管理系统应用案例[Z]. 上海：艾默生自动化解决方案，2022.
- [8] 赵亮，王小红. 基于LSTM神经网络的化工仪表故障预测研究[J]. 计算机测量与控制，2023，31(4)：45-49.
- [9] 陈明，李娜. 基于遗传算法的化工设备维修计划优化[J]. 控制工程，2022，29(7)：1321-1326.
- [10] 张浩. 化工企业自动化仪表维修管理现状及改进措施[J]. 化工技术与开发，2021，50(10)：65-68.