

化工企业机械设备全生命周期管理的实施路径探析

杨 博

内蒙古伊泰化工有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017400

摘要: 在“双碳”目标与高质量发展的时代背景下,化工企业的安全生产、成本控制与可持续运营面临着前所未有的挑战。作为化工生产的核心载体,机械设备的可靠性、安全性和经济性直接决定了企业的核心竞争力。传统的“事后维修”或“计划维修”模式已难以满足现代化工生产的精细化、智能化需求。本文以全生命周期管理(Total Life Cycle Management, TLCM)理论为指导,系统阐述了其在化工企业机械设备管理中的内涵与价值,并深入剖析了当前实施过程中存在的主要障碍。在此基础上,构建了一个涵盖规划决策、采购安装、运行维护、更新改造及报废处置五大阶段的闭环式TLCM实施框架。最后,从组织保障、技术赋能、数据驱动和文化培育四个维度,提出了具体的实施路径与策略,旨在为化工企业提升设备管理水平、实现本质安全与降本增效提供理论参考与实践指南。

关键词: 化工企业; 机械设备; 全生命周期管理; 实施路径; 数字化转型

引言

化工行业是国民经济支柱,但生产过程风险高。机械设备作为化工装置的关键,其健康状态关乎生产安全稳定运行。数据显示,化工行业超70%的非计划停车事故由设备故障引发,科学高效管理设备资产是化工企业的核心命题。长期以来,多数企业采用“修”为主的被动管理模式,设备坏了才修或按固定周期维护,导致维修成本高、备件库存积压,且无法杜绝突发性故障带来的安全与环保风险。随着工业4.0、智能制造等兴起,以及物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术成熟,全生命周期管理(TLCM)应运而生。TLCM强调从设备规划选型到报废回收的全过程、全方位、全员参与集成化管理,追求综合效益最大化。但将其落地于化工生产环境,需打破部门壁垒、重构业务流程并深度融合先进技术,并非易事。

1 化工企业机械设备全生命周期管理的内涵与价值

1.1 内涵

全生命周期管理(TLCM)是系统性管理思想,它将化工设备看作动态演化的有机体,而非孤立物理资产。其核心在于打破化工企业传统管理中“设计-采购-使用-维修-报废”各环节割裂状态,借助统一数据平台与协同工作机制,实现信息、物流、资金和价值流无缝衔接。化工机械设备全生命周期通常分五个关键阶段:规划与决策阶段(Cradle)始于项目前期,涵盖工艺需求分析等,是决定设备性能与成本的关键起点;采购与安装阶段(Birth)包括供应商选择等,质量决定设备初始健康状态;运行与维护阶段(Life)成本占比最高,含日常操作等;更新与改造阶段(Rejuvenation)对性能下降

或技术落后设备升级改造;报废与处置阶段(Grave)对设备安全合规拆除回收并反馈经验。

1.2 价值

实施TLCM对化工企业具有多重战略价值:(1)提升本质安全水平:通过早期的风险识别(如HAZOP分析融入选型)和持续的状态监测,能够有效预防重大设备事故,保障人员生命与环境安全。(2)降低综合运营成本:LCC分析有助于在源头做出最优决策,避免“低价低质”的陷阱;精准的预测性维护能大幅减少非计划停车损失和过度维修成本。(3)保障生产连续性与稳定性:可靠的设备是实现“安稳长满优”运行的基础,直接提升企业的产能利用率和市场交付能力^[1]。(4)支撑绿色低碳发展:通过对设备能效的全周期监控与优化,以及报废阶段的资源回收,助力企业实现节能减排和循环经济目标。

2 当前化工企业实施TLCM面临的主要障碍

尽管TLCM的理念已被广泛认可,但在实际推行中,化工企业仍面临诸多现实挑战:(1)组织与认知壁垒:企业内部普遍存在“部门墙”现象。设计部门关注一次性投资成本,采购部门追求合同价格最低,而生产与设备部门则承担着高昂的后期运维成本。各方目标不一致,缺乏统一的LCC评价体系和协同机制,导致前端决策与后端运维脱节。(2)数据孤岛与信息断层:设备在不同阶段产生的数据(如设计参数、采购合同、维修记录、运行状态、能耗数据等)分散在ERP、EAM、DCS、SCADA等多个异构系统中,格式不一,标准各异,难以形成完整、连续、可用的设备数字画像。(3)技术与工具滞后:许多企业仍依赖Excel表格或老旧的CMMS(计

算机化维护管理系统)进行设备管理,缺乏对物联网传感器、边缘计算、大数据分析等先进技术的有效应用,无法实现设备状态的实时感知与智能预警。(4)人才与技能缺口:TLCM的实施需要既懂化工工艺、又精通设备管理,还具备数据分析和IT系统知识的复合型人才。这类人才的匮乏成为制约企业数字化转型的关键瓶颈。(5)管理体系不健全:缺乏一套覆盖全生命周期的标准作业程序(SOP)、绩效指标(KPI)和持续改进机制,使得TLCM容易沦为口号,难以形成PDCA(计划-执行-检查-改进)的良性循环。

3 化工企业机械设备TLCM的实施框架构建

针对上述障碍,本文提出一个“五阶闭环、四维驱动”的TLCM实施框架。

3.1 五阶闭环:覆盖全生命周期的管理流程

3.1.1 规划与决策阶段:以LCC为导向的科学选型

在规划与决策阶段,企业必须转变思维,以全生命周期成本(LCC)为导向进行科学选型。这意味着要超越单纯的采购价格,构建一个包含购置成本、安装调试成本、运行能耗成本、维护维修成本、故障损失成本及残值回收成本在内的综合LCC模型。同时,应将HAZOP、SIL(安全完整性等级)等风险评估方法前置到设备选型阶段,优先选择本质安全度高、可靠性强的设备。此外,推动设备选型的标准化与模块化,减少非标设备数量,不仅能降低采购复杂度,更能为后期的备件管理和维修策略制定奠定坚实基础。

3.1.2 采购与安装阶段:打造高质量的“出生证明”

进入采购与安装阶段,核心任务是为设备打造一份高质量的“出生证明”。企业应与核心供应商建立战略合作关系,要求其不仅提供设备本身,更要提供完整的设备技术档案、FMECA(故障模式、影响及危害性分析)报告和推荐的维护策略,实现供应商的全生命周期协同。在此基础上,大力推行数字化交付(Digital Delivery),要求供应商以结构化的数据格式(如ISO 15926标准)交付所有信息,确保这些宝贵的数据能无缝接入企业的EAM/Asset系统,成为构建设备“数字孪生”的基石^[2]。同时,必须强化制造监造和安装调试过程的质量管控,确保设备以最佳的初始健康状态投入运行。

3.1.3 运行与维护阶段:迈向预测性与智能化

运行与维护阶段是TLCM价值体现的核心战场。企业需要构建设备健康档案,整合来自DCS的实时数据、在线/离线监测数据、维修工单、巡检记录等多源信息,为每台关键设备建立动态更新的健康画像。在此基础上,大力推行基于状态的维护(CBM),利用振动、温度、油

液分析、声发射等先进监测技术,结合机器学习算法,对设备劣化趋势进行精准预测,从而将传统的“定期修”转变为高效的“按需修”。与此同时,基于设备可靠性数据和维修历史,运用ABC分类法和安全库存模型,对备件库存进行精准优化,既能保障维修需求,又能有效降低库存资金占用。

3.1.4 更新与改造阶段:价值最大化的延寿策略

当设备步入老化期,更新与改造阶段便显得尤为重要。企业应建立一套科学的设备健康评估体系,定期对老旧设备进行剩余寿命评估(RUL)和技术经济性分析,以此为依据,理性决策是进行大修、技术改造还是提前报废,以实现资产价值的最大化。尤为关键的是,要将改造过程中积累的经验、图纸、程序等知识进行结构化沉淀,并反馈至前端的设计与选型数据库,形成知识的闭环复用。

3.1.5 报废与处置阶段:闭环的终点亦是起点

最后,在报废与处置阶段,TLCM的闭环得以最终完成。企业必须严格按照国家环保法规,对含有危险物质的设备进行无害化、合规化的处理^[3]。更重要的是,要建立一个完善的故障报告、分析和纠正措施系统(FRACAS),将设备在整个生命周期中暴露出的设计缺陷、材料问题、维护难点等信息,系统性地收集、分析并反馈至规划与采购阶段,从而驱动产品和流程的持续改进,使闭环的终点真正成为新一轮优化的起点。

3.2 四维驱动:保障TLCM落地的核心支柱

3.2.1 组织保障:打破壁垒,构建协同生态

强有力的组织保障是TLCM成功的前提。企业应成立由公司高层领导牵头的跨职能TLCM委员会,成员涵盖规划、采购、生产、设备、安全、财务等关键部门负责人,负责制定TLCM战略、协调资源、解决跨部门冲突。同时,必须重塑KPI考核体系,将LCC、设备可靠性(MTBF)、维修效率(MTTR)、非计划停车率等全生命周期指标纳入相关部门的绩效考核,从根本上引导各部门从全局视角思考问题。此外,明确设备“主人”(Owner)制度,赋予其对设备全生命周期管理的责任,是落实责任到人的关键举措。

3.2.2 技术赋能:构建一体化的数字平台

先进的技术赋能是TLCM落地的引擎。企业需要部署一个一体化的资产管理平台(EAM/CMMS),作为TLCM的中枢神经系统,该平台必须能够有效集成ERP的财务与物料数据、DCS/SCADA的实时运行数据以及移动终端的现场作业数据。在此基础上,深化物联网与AI的应用,在关键设备上部署智能传感器,利用边缘计算进行初步数据处理,并通过云端AI平台进行深度分析与智

能诊断^[4]。长远来看,探索构建关键设备或装置的数字孪生(Digital Twin),将其作为虚拟试验场用于模拟、预测和优化设备性能,将为企业带来颠覆性的管理变革。

3.2.3 数据驱动:让数据成为核心资产

数据驱动是TLCM的核心灵魂。企业必须首先统一数据标准与治理,制定企业级的设备主数据标准(如编码规则、属性集),并建立严格的数据质量管理规范,确保数据的准确性、完整性和一致性。进而,可以构建设备知识图谱,将设备、部件、故障、原因、解决方案、专家经验等实体及其复杂关系进行结构化建模,形成一个可推理、可查询的知识网络,从而赋能一线工程师实现快速、精准的故障排除。最终,通过BI(商业智能)工具,将复杂的设备数据转化为直观的仪表盘和智能预警信息,辅助各级管理者进行科学、高效的决策。

3.2.4 文化培育:塑造全员参与的精益文化

最后,精益文化的培育是TLCM可持续发展的土壤。企业需要通过系统的培训、生动的案例分享和标杆示范,持续加强TLCM理念的宣贯,让全体员工深刻理解其价值和自身在其中的角色。积极推行TPM(全员生产维护)理念,鼓励操作工参与到设备的日常点检和基础保养中,使其成为设备状态感知的第一道防线。同时,营造一个开放、包容的持续改进氛围,建立机制鼓励员工提出设备管理改进建议,并确保这些建议能得到快速响应和有效激励,从而激发全员参与的热情与创造力。

4 结语

化工企业机械设备的全生命周期管理,不仅是技术

升级,更是一场深刻的管理变革。它要求企业从战略高度出发,以系统思维打破部门藩篱,以数据为核心驱动力,以先进技术为支撑,构建一个覆盖设备“生老病死”全过程的闭环管理体系。本文提出的“五阶闭环、四维驱动”实施框架,为化工企业提供了从理念到实践的清晰路径。未来的竞争,将是供应链乃至价值链的竞争。谁能率先建立起高效、智能、绿色的设备全生命周期管理体系,谁就能在保障本质安全的前提下,实现运营成本的最优化和资产价值的最大化,从而在激烈的市场竞争中赢得先机。这不仅是化工企业迈向高质量发展的必由之路,更是其履行社会责任、实现可持续发展的内在要求。TLCM的征途虽远,但行则将至;其事虽难,但做则必成。

参考文献

- [1]吴昊.浅析化工企业机械设备管理与维护[J].内燃机与配件,2020,(07):204-205.
- [2]孙娜娜,刘洁.化工企业设备全生命周期管理系统[J].化工管理,2025,(33):117-121.
- [3]蔺鹏飞.浅谈化工企业特种设备管理出现的问题及建议[C]//中国国土经济学会,河北地质大学.2025中国国土经济学会学术年会暨太行论坛城市规划与工程技术管理分论坛论文集(一).内蒙古自治区市场监督管理审评查验中心;,2025:62-64.
- [4]张喆.大型石油化工企业设备健康管理应用实践[J].石化技术,2025,32(08):402-403+395.