

智能制造背景下老旧机电设备一体化升级改造实践

刘冠彤

中国葛洲坝集团易普力股份有限公司禹州分公司 河南 许昌 452570

摘要：智能制造作为新一轮工业革命的核心驱动力，正在深刻重塑传统制造业的技术基础与生产范式。然而，大量存量老旧机电设备在精度、效率、互联互通等方面难以适配智能制造的要求，其升级改造成为实现制造转型的关键瓶颈。本文基于系统工程与机电一体化理论，系统分析了老旧机电设备升级改造的现实困境，提出了涵盖机械本体再造、电气控制系统重构、信息通信接口升级的一体化改造框架。研究认为，老旧设备改造并非简单的“修旧利废”，而应被理解为面向智能制造的“能力再造”过程，需要从技术适配、标准衔接、价值再造三个维度统筹推进。本文进一步探讨了改造过程的实施路径、质量保障机制及综合效益评估方法，旨在为制造企业的设备升级决策与实践提供理论参考。

关键词：智能制造；老旧机电设备；一体化升级改造；工业互联网

引言

智能制造已成为全球竞争战略制高点，物联网、大数据等前沿技术推动制造系统向自感知、自决策方向演进。然而，我国制造业存量庞大，大量 20 世纪末至 21 世纪初购置的机电设备虽物理寿命未终，但“信息寿命”已滞后，难以满足智能化需求。现有研究多聚焦数控升级、传感器加装等具体技术方案，缺乏对“如何一体化推进改造”的系统性把握。实践中，企业常采取零散改造策略，导致设备局部性能提升，但在系统协同、数据贯通及智能决策等方面仍存在显著短板。因此，亟需从系统层面统筹规划老旧设备的整体改造路径，以突破单一技术优化的局限，全面提升制造系统的核心竞争力与智能化水平。

1 老旧机电设备运行现状与改造困境

1.1 存量设备的技术特征与代际差距

我国制造企业现存的早期机电设备大多具有鲜明的时代技术特征。从机械结构看，这些设备普遍采用传统机械传动方式，丝杠、齿轮、导轨等关键运动副存在不同程度的磨损，几何精度和运动精度难以稳定保持。从控制系统看，多数设备配备的是基于单片机和 PLC 的简易数控系统，计算能力有限，不具备开放式的控制架构。从信息交互看，早期设备大多为“信息孤岛”，缺乏标准化的数据通信接口，无法实现与上层管理系统的信息互通。这些技术特征决定了老旧设备与智能制造要求之间存在多维度、结构性的代际差距。在感知层面，老旧设备缺乏必要的传感器配置，运行状态参数（如温

度、振动、扭矩、能耗等）无法实时采集和上传；在控制层面，控制系统的封闭性和有限算力使其难以运行复杂的智能控制算法；在执行层面，伺服驱动系统的响应速度和精度难以满足高柔性、高精度加工需求；在通信层面，缺乏符合工业以太网或 5G 标准的通信模块，无法接入工业互联网平台。

1.2 改造需求的多层次性分析

老旧机电设备的升级需求并非单一维度，而是呈现出多层次、多面向的结构特征。从纵向看，改造需求至少包括三个层次：基础功能恢复层、性能提升层和智能互联层。基础功能恢复针对设备精度劣化、可靠性下降等显性问题，通过翻新、修复使设备达到出厂精度标准；性能提升聚焦于加工效率、加工质量的改善，涉及主轴提速、进给优化、控制精度提升等内容；智能互联则是面向智能制造的要求，实现设备的数据采集、状态监测、远程运维和智能决策支持。从横向看，不同企业、不同工序对改造的诉求存在显著差异^[1]。对于航空航天、精密模具等高端制造领域，精度与稳定性是首要关切；对于大批量生产的零部件制造企业，效率提升和柔性切换能力更为关键；对于能源装备、重型机械等行业，设备的可靠性和可维护性则居于优先地位。这种需求的多层次性、异质性要求改造方案必须具备足够的灵活性和可配置性。

1.3 传统改造模式的局限与反思

长期以来，企业对老旧设备的改造多采用“问题导向”的修补模式：哪部分出了问题就修哪部分，哪个部件

落后了就换哪个部件。这种模式在特定历史条件下具有一定的合理性,但在智能制造语境下,其局限性日益凸显。首先是系统性缺失。零散改造往往关注局部而忽视整体,改造后的部件可能与未改造部件之间形成新的“匹配鸿沟”,设备整体效能难以实现最优。其次是标准性不足。不同改造阶段可能引入不同供应商的技术方案,造成接口不统一、协议不一致等问题,为后续的系统集成和数据贯通埋下隐患。再次是前瞻性欠缺。多数传统改造仅着眼于解决当前问题,未充分考虑未来技术演进和系统升级的空间,改造后的设备很快面临新一轮的技术落后。因此,有必要从理念层面实现转变:将老旧设备改造从“局部修缮”提升为“系统再造”,从被动应对转变为主动规划,从追求短期效果转向追求长期价值。这正是本文提出一体化升级改造框架的现实出发点。

2 一体化升级改造的理论框架与技术体系

2.1 一体化改造的内涵界定与核心理念

所谓“一体化升级改造”,是指以智能制造的系统要求为牵引,对老旧机电设备的机械本体、控制系统、信息交互能力进行统筹规划、协同实施的整体性改造工程。其核心理念可以概括为三个关键词:系统性、标准性、可演进性。系统性强调改造的各部分、各环节之间需形成有机配合,避免“木桶效应”导致的整体效能受限。标准性要求改造过程中采用的技术方案、通信协议、数据格式等均遵循主流国际标准或行业标准,确保改造后的设备能够顺畅接入更广泛的制造生态系统。可演进性意味着改造不仅着眼于当下需求的满足,更要预留技术升级的空间和接口,使设备能够持续适配智能制造技术的迭代发展。从本质上讲,一体化改造不是对旧设备的“延寿处理”,而是赋予其“数字新生”^[2]。改造后的设备应当成为智能制造网络中的一个智能节点,具备状态自感知、信息自上报、决策自协同的基本能力。

2.2 机械本体重构与精度恢复技术

机械本体是机电设备的基础载体,其精度状态直接决定了加工质量和系统稳定性。一体化改造框架中,机械本体的再造包括三个层级的工作。第一层级为精度检测与评估。采用激光干涉仪、球杆仪等精密测量仪器,对设备几何精度、定位精度、重复定位精度进行全面检测,建立精度劣化的量化图谱,明确各轴的误差来源与误差分布特征。第二层级为机械修复与调整。针对导轨、丝杠、主轴轴承等关键磨损部件,采用刮研修复、更换升级、预紧调整等工艺手段恢复其原始精度;对设备基础件进行应力释放和重新找正,消除地基变形等因素造成的精度损失。第三层级为精度补偿与优化。在机

械修复的基础上,利用数控系统的误差补偿功能,对残余的系统性误差进行软件层面的修正,实现“机械修复+软件补偿”的双重精度保障。需要指出的是,机械本体的改造并非简单恢复到出厂标准即可,而应根据智能制造对加工一致性和稳定性的更高要求,设定比原厂标准更为严格的精度控制指标。

2.3 控制系统置换与开放化改造

控制系统是设备智能化的“大脑”,也是老旧设备与智能装备之间差距最为悬殊的环节。控制系统的一体化改造主要包括两种路径。其一是整体置换方案。对于控制系统整体落后、不具备升级价值的设备,采用基于PC架构的开放式数控系统(如基于Windows或Linux平台的软数控系统)整体替换原有控制装置。开放式数控系统具有标准化硬件接口、模块化软件架构、支持多种总线协议等优势,能够为后续的功能扩展和系统集成奠定良好基础^[3]。其二是增量升级方案。对于控制系统架构尚可、仅需增强特定功能的设备,可采用“原有系统+智能前端”的改造模式,即保留原有NC系统,通过增加智能网关、边缘计算终端等前端设备,实现对设备运行数据的采集、处理和上传,在不改变原有控制逻辑的前提下赋予设备“感知-通信”能力。该方案投入相对较小,适用于对改造成本敏感、对实时控制要求不高的应用场景。无论采取何种方案,控制系统改造的核心原则是“开放”二字。只有开放式的控制架构,才能为设备接入工业互联网、实现远程运维和智能调度提供必要的前提条件。

2.4 信息通信接口与工业互联网接入

实现设备“上网”是智能制造对老旧设备改造提出的新要求,也是一体化改造区别于传统设备大修的关键特征。信息通信层面的改造需解决三个核心问题:数据的可采集性、通信的标准化和信息可理解性。在数据采集层面,需根据设备类型和生产管理需求,确定需要采集的参数清单(包括运行状态、加工过程、能耗信息、故障报警等),并加装相应的传感器和采集模块。在通信层面,应采用支持OPCUA、MTConnect等标准工业通信协议的智能网关设备,实现不同厂商、不同年代设备之间数据格式的统一转换。在信息可理解性层面,需建立设备信息模型,将采集到的原始数据映射为具有语义含义的生产信息,使上层管理系统能够“读懂”设备的状态和需求。通过上述改造,老旧设备得以突破“信息孤岛”的束缚,成为制造数据链条中具有贡献能力的节点。这对于实现生产排程优化、设备预测性维护、质量追溯等智能制造应用场景具有重要意义。

3 一体化改造的实施路径与关键策略

3.1 改造前的综合评估与方案规划

综合评估至少应包含三个维度：技术可行性评估、经济合理性评估和组织准备度评估。技术可行性评估关注设备是否具备改造的物理条件——机械本体是否具有足够的残余寿命、关键结构件是否存在不可修复的缺陷、改造所需的技术资源是否可得等。对于技术基础过于薄弱、改造难度过大的设备，应果断决策报废更新而非勉强改造。经济合理性评估需将改造投入与购置新设备进行全生命周期成本对比，综合考虑改造的直接费用、停机损失、改造后设备增值带来的收益等因素，确保改造方案在经济上具有比较优势^[4]。组织准备度评估则考察企业是否具备实施改造的技术力量和管理能力，是否需要借助外部技术资源。在评估基础上，应编制详尽的改造方案，明确改造目标、技术路线、实施步骤、时间节点、责任分工和验收标准。方案制定需坚持“目标导向”和“适度超前”原则，既要针对企业的实际生产需求，又要为未来 3-5 年的技术发展预留空间。

3.2 改造实施的过程管理与质量保障

一体化改造涉及机械、电气、软件、网络多个专业领域的协同作业，对实施过程的统筹管理提出了较高要求。改造实施应采取“分步实施、分段验收”的策略，将整体改造工程分解为若干相对独立的子工程，每个子工程完成后进行专项验收，确保问题早发现、早解决，避免后期返工造成的资源浪费。质量保障是改造成功的关键。应建立覆盖改造全过程的质量控制体系：在改造前，对设备原始状态进行完整的检测记录，作为改造效果的对比基准；在改造中，对关键工序设置质量控制点，严格执行工艺规范和检验标准；在改造后，开展全面的性能测试和精度验收，确保设备各项指标达到预定目标。特别值得强调的是，改造完成后的联调联试阶段不容忽视。机械、电气、信息各部分单独验收合格后，需进行系统性联调，验证各部分协同工作的匹配性和稳定性，并在实际加工条件下进行一定周期的试运行，确认设备在连续负载工况下的表现。

3.3 改造效果的综合效益评估

一体化改造的效果评估应当超越传统设备大修“修旧如旧”的评判标准，从更综合的视角衡量改造带来的价值增值。在直接效益层面，应评估改造后设备的精度稳定性、加工效率、产品合格率等生产指标的改善幅度，以及能耗降低、维护成本减少等运营成本的变化。在间接效益层面，应评估设备接入制造信息系统后带来的排产优化效益、停机时间减少、在制品库存降低等系统级收益。在战略效益层面，应评估改造对企业整体智能制造能力的贡献，包括是否打通了关键工序的数字化瓶颈、是否为后续的数字化工厂建设奠定了基础等。

综合效益评估不仅是对改造效果的事后检验，更应成为指导后续改造决策的知识积累。通过建立改造案例数据库，持续跟踪改造后设备的长期运行表现，不断优化改造方案的选择标准和实施方法。

4 结语

智能制造背景下，老旧机电设备的一体化升级改造是兼具技术与管理属性的战略工程。成功关键在于超越“局部修补”，确立“系统再造”理念。其核心在于整合机械修复、控制升级与信息接入，使设备具备对接智能制造系统的能力，这依赖于科学的评估决策、系统设计、过程管理及效果评价。未来，随着技术发展，数字孪生将实现虚拟验证，预测性维护推动模式向状态基转变，新商业模式或重塑资产管理方式。预计该改造将持续发挥桥梁作用，为制造业高质量发展提供坚实的存量装备支撑。

参考文献

- [1] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2021, 26(17): 2273-2284.
- [2] 刘大同, 郭凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望[J]. 仪器仪表学报, 2022, 39(11): 1-10.
- [3] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 24(1): 1-18.
- [4] 杨海成, 田雨. 面向智能制造的工业互联网关键技术[J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 56-64.