

智能装备与传统机械系统的融合升级路径分析

王筱霖* 单鸿方 张雨 周文静

山东科技大学斯威本学院 山东济南 250000

摘要: 在全球产业升级与“中国制造 2025”战略的驱动下,传统机械系统的智能化转型已成为提升制造业核心竞争力的关键。本文旨在系统分析智能装备与传统机械系统的融合升级路径。研究首先剖析了二者融合的内在动力与外部驱动,进而从技术层面阐释了“感知+机械”、“控制+机械”与“数据+机械”三种核心融合模式,并构建了基于工业互联网与信息物理系统(CPS)的系统级融合架构。在此基础上,论文设计了一套从“单机设备”到“产业生态”分层递进的升级路径,并针对不同规模企业提出了差异化实施策略。通过离散制造与流程工业的典型案例分析,验证了该路径框架的有效性与普适性。最后,本研究识别了转型过程中的技术、经济、人才与安全挑战,并从政府、企业及产学研协同角度提出了相应的对策建议,以期为我国制造业的智能化转型提供理论参考与实践指引。

关键词: 智能装备;传统机械系统;融合升级;路径分析;工业互联网

引言

当前,全球制造业正经历以工业 4.0 为标志的深刻变革,我国“中国制造 2025”战略的深入推进亦对产业智能化升级提出了迫切需求。在此宏观背景下,传统机械系统因其信息孤岛、数据匮乏、决策依赖人工等固有瓶颈,在响应市场变化、提升生产效率与实现精细化管理方面面临严峻挑战。探索智能装备与传统机械系统的融合路径,不仅是破解传统产业困境的关键举措,更对构建现代化产业体系、培育新质生产力具有重大的理论与实践意义^[1]。

纵观国内外研究进展,智能装备领域在智能传感、物联通信、边缘计算及人工智能算法等关键技术已取得显著突破,为融合升级提供了坚实的技术底座。学术界与产业界围绕传统机械系统的智能化改造已展开广泛探讨,主要集中在状态监测、预测性维护等特定应用场景^[2]。然而,现有研究多聚焦于局部技术应用或个案分析,缺乏对升级路径的系统性、普适性框架构建,对不同规模、不同类型的企业的差异化路径选择研究尚显薄弱。这正为本研究提供了明确的切入点。

基于此,本研究旨在系统剖析智能装备与传统机械系统的融合机理,并构建一套分层递进、可操作性强的升级路径体系。研究将综合运用文献分析、案例研究与系统分析方法,通过梳理技术融合的内在逻辑,对比分析不同行业的成功实践,最终形成从单点设备到整体生态的全面升级方案。

全文技术路线将遵循“理论奠基-机理剖析-路径设计-案例验证-对策提出”的逻辑结构,层层递进,以确保研究过程的严谨性与结论的可靠性。

1 核心概念与理论基础

本文研究的核心在于探讨智能装备如何系统性地融入并升级传统机械系统,因此首先必须明确相关概念并厘清其理论基础。智能装备并非单一技术的产物,而是集成了先进传感、精密控制、信息处理与智能决策能力的复杂系统。其本质特征在于能够实现状态感知、实时分析、自主决策与精准执行的闭环,这背后依赖于一个由传感器、控制器、执行机构等构成的硬件体系,以及嵌入式软件、算法模型与数据平台共同组成的软件技术栈^[3]。与之相对,传统机械系统主要依赖经典的力学与机构学原理,其设计核心是机械化与自动化,典型特征表现为功能固定、控制逻辑固化、信息交互能力薄弱,在数字化时代暴露出数据断层、柔性不足、难以优化迭代等核心短板。

二者融合升级的过程并非简单的技术叠加,而是深刻的系统性变革,需要坚实的理论支撑。系统集成理论为如何将异构的智能单元与传统机械部件组合成一个功能协调、性能最优的新系统提供了方法论指导。数字化转型理论则从更宏观的视角阐释了这一过程的价值创造逻辑,即通过数据驱动业务重塑与运营模式创新^[4]。此外,技术演进理论提醒我们,升级路径受到现有技术体系惯性的制约,存在显著的路

径依赖性,这意味着改造方案必须充分考虑与传统技术基础的兼容性与过渡成本,避免激进的替代策略。这些理论共同构成了我们分析融合机理与设计升级路径的基石,确保了研究的科学性与前瞻性。

2 智能装备与传统机械系统的融合机理分析

智能装备与传统机械系统的融合并非偶然,其背后是内外因素共同驱动的必然结果。从内部看,企业持续追求运营效率的极致化、生产成本的精细控制以及产品品质的稳定提升,这些内在需求构成了融合的根本动力。在外部,日益激烈的市场竞争迫使企业寻求差异化优势,国家层面针对智能制造的政策引导与扶持创造了有利环境,而物联网、人工智能等使能技术的日益成熟与成本下降,则从技术上扫清了障碍,共同形成了强大的外部推力。

这种融合在技术层面上,具体表现为几种核心模式的深度渗透。其一是“感知+机械”模式,通过加装传感器赋予机械系统实时感知自身健康状态与外部环境的能力,为实现预测性维护奠定基础。其二是“控制+机械”模式,利用智能控制器和先进算法取代或增强传统控制回路,使机械系统能够进行更精准、更自适应甚至自主的轨迹规划与动作执行^[5]。其三是“数据+机械”模式,它超越了单点控制,通过采集与分析全流程数据,驱动工艺参数优化、生产调度智能决策,让数据成为指导机械系统持续改进的新“血液”。

上述技术模式的实现,最终需要一套完整的系统架构作为载体。基于工业互联网的“云-边-端”协同架构为此提供了理想框架,它将计算与智能在云端、边缘端和设备端之间进行合理分配,确保了响应的实时性与数据处理的全局性。在此架构之上,信息物理系统(CPS)的理念将物理机械实体与数字虚体紧密连接,通过虚实交互、迭代优化,最终形成一个能够自感知、自分析、自决策、自执行的智能生产系统,这标志着融合从简单的技术叠加跃升至系统级共生的高级形态。

3 传统机械系统智能化升级的路径设计

在明晰融合机理的基础上,为传统机械系统规划一条清晰可行的智能化升级路径至关重要。本研究提出的总体框架遵循从局部到全局、从内部到外部的演进逻辑,即从单机设备的“点”上突破,延伸至生产线层面的“线”性连接,再扩展到企业系统的“面”上集成,最终迈向产业生态的“体”化协同。这一过程的实施需恪守四大核心原则:坚持以实际

业务需求为根本导向,采取投资小、见效快的渐进式策略,注重评估每一阶段的技术经济性以确保投资回报,并优先选择开放兼容的技术体系以避免新的信息孤岛。

基于上述框架,升级路径具体呈现为四个层次。初始阶段是单机设备的“点”式升级,核心任务在于通过加装传感器与智能控制器,赋予关键设备状态感知与数据采集能力,并实现本地的自适应控制,这是整个升级工程的基石。第二步是生产线或制造单元的“线”式升级,重点在于打通单机设备间的数据链路,通过部署制造执行系统实现生产过程的透明化管理与流程优化,初步形成协同效应。第三步是企业系统的“面”式升级,旨在打破部门壁垒,将制造单元的数据与企业资源计划、产品生命周期管理等系统贯通,构建统一的数据平台乃至数字孪生,驱动全局决策优化。最终阶段是产业生态的“体”式升级,企业通过接入更广阔的工业互联网平台,实现与供应链上下游的精准协同,并能向用户提供高价值的远程运维等服务。

面对这一多层次路径,不同类型的企业需量体裁衣。资本与技术实力雄厚的大型企业,可采取全面协同的策略,进行顶层设计,在各个层次同步规划、相互衔接,以期构建全局竞争优势。而对于广大中小企业而言,更务实的选择是聚焦关键环节的渐进式策略,从痛点最明确、投资回报最高的“点”或“线”入手,逐步积累经验与数据,滚动投入,最终实现螺旋式上升,从而在控制风险的同时有效提升自身竞争力。

4 典型案例分析

为将前述理论框架与路径设计置于现实语境中检验,本研究选取了两个具有代表性的行业案例进行深入剖析。案例选取遵循典型性与差异性原则,旨在覆盖离散制造与流程工业这两种不同生产模式,分析方法侧重于对升级动因、实施过程与价值成效的跨案例比较研究。

在离散制造领域,以某大型工程机械企业为例,其升级背景源于产品同质化竞争加剧与售后维护成本高企的压力。该企业选择了从“点”到“体”的渐进路径:首先为售出设备加装传感器实现远程定位与工况监测(点),继而构建平台实现设备群联网与故障预警(线),随后将数据反馈至研发端以改进产品设计(面),最终形成了基于工业互联网的“按小时供能”等新型服务模式(体)。实施效果表明,设备故障率显著下降,客户黏性增强,并成功开拓了利润可

观的服务市场。这一实践印证了数据驱动服务化转型的可行性,其启示在于,智能升级的价值终点可能超越生产环节本身,而在于重构商业模式。

与之相对,某大型石化企业的案例则展现了流程工业的升级逻辑。其驱动力来自于对生产安全、稳定运行与能效优化的极致追求。该企业的路径更具系统性特征,它并行推进了“感知+机械”与“数据+机械”模式:一方面通过布设大量传感器构建全流程监控网络,另一方面则聚焦于催化裂化等核心工艺环节,利用历史数据构建优化模型,实现操作参数的自动寻优与闭环控制。此举不仅大幅提升了关键装置的运行效率,更通过预测性维护有效避免了非计划停产。此案例证明,在资本密集的流程行业,对生产可靠性、安全性与效率的边际改善,其投资回报同样极为显著。

通过对比可见,尽管两类行业的起点与聚焦点不同——离散制造常由产品服务化牵引,而流程工业则由内部运营效率驱动——但二者均遵循了分层递进的基本逻辑,并最终都实现了向数据驱动决策的转变。这两个成功案例从实践层面共同验证了本研究第四章所提出升级路径的普遍适用性与有效性,表明该路径框架能够为不同特征的制造业企业提供具有操作性的战略指引。

5 面临的挑战与对策建议

在明晰了智能装备与传统机械系统融合的路径与价值之后,我们必须清醒地认识到,这一转型升级过程绝非坦途,面临着多重严峻挑战。在技术层面,长期存在的数据孤岛现象、行业标准规范的缺失以及新旧系统之间的兼容性问题,构成了实现深度集成的首要障碍。经济上,高昂的初始投入成本与难以精准量化的投资回报周期,使得许多企业,尤其是中小企业,在决策时踌躇不前。同时,精通机械、信息技术与数据分析的复合型人才严重短缺,现有员工的技能结构转型困难,形成了突出的人才瓶颈。此外,随着系统的互联互通,数据安全与网络攻击的风险被急剧放大,对生产系统的稳定运行构成潜在威胁。

为系统性地应对这些挑战,需要多方协同,形成合力。政府层面应发挥引导与保障作用,通过完善财税金融支持政策、牵头制定关键领域的技术标准与数据安全法规,并为产学研合作营造开放包容的创新环境,从而降低企业转型的制度性成本与不确定性。企业作为实施主体,则需摒弃零敲碎打的改造模式,转而从战略高度进行顶层设计,制定与企业

业务目标紧密结合的长期规划,并采取分阶段实施的策略,以可见的阶段性成果持续推动转型进程,同时内部应着力培育拥抱变革的数字文化。从产业与科研的更广视角看,亟需构建跨行业、跨学科的协同创新平台,促进知识共享与技术扩散;并深化产教融合,改革人才培养模式,加速既懂制造工艺又懂数字技术的复合型人才的培育与科技成果的产业化转化,为融合升级提供可持续的智力支撑。

6 结论与展望

本研究系统性地探讨了智能装备与传统机械系统的融合升级路径。核心结论在于,这一融合过程是由效率提升的内驱动力与市场竞争、技术成熟等外推力共同作用的必然趋势,其技术本质是“感知+机械”、“控制+机械”、“数据+机械”三种模式的深度渗透,并最终通过“云-边-端”协同架构与信息物理系统(CPS)实现系统级共生。研究构建了从“点、线、面、体”分层递进的升级路径框架,并论证了大型企业全面协同与中小企业聚焦关键的差异化策略选择。案例分析进一步证实,该路径在不同行业虽侧重点各异,但均能有效引导企业实现从生产优化到模式创新的价值跃升。

本研究的创新之处在于,超越了单一技术应用的视角,构建了一个整合了驱动力、融合模式、系统架构与实施路径的全局性分析框架,并针对不同规模企业提出了具适应性的策略,增强了理论研究的实践指导价值。然而,研究也存在一定局限,例如所构建的路径模型仍需在更广泛的行业情境中进行检验,且对于融合升级过程中具体的投资回报量化模型探讨尚浅。

展望未来,智能装备与传统机械的融合将向更高阶的形态演进。随着生成式AI与大语言模型技术的发展,生产系统有望实现更接近人类的认知与决策能力,从而迈向自主决策与自我优化的“智能体”。同时,数字孪生技术与元宇宙概念的深度融合,将催生出沉浸式、实时交互的工业元宇宙,为产品设计、生产监控、员工培训与远程协作开辟全新的范式。这些趋势预示着,未来的融合将不再局限于物理系统与信息空间的简单连接,而是向着构建一个具身、认知、共生的智能工业新生态持续演进。

参考文献:

[1] 沛志王. 智能制造背景下机械设计基础教学改革研究[J]. 现代教育前沿, 2025, 6(5): 83-85.

[2] 陆成林,王振宇.东北地区传统产业的演进历程,竞争力评估及振兴发展路径[J].社会科学辑刊,2025(1):225-236.

[3] 王昶,周思源,耿红军.第四次工业革命背景下我国先进制造业发展路径及政策保障研究[J].中国科学院院刊,2024,39(2):333-344.

[4] 吴海华,吴尘萱,周海燕,等.发展农业装备新质生产力的创新方向与实施路径研究[J].农业工程,2025,15(1):1-6.

[5] 戴安舒,宋瑶,严建海,等.数智化转型驱动的运维管理新范式:构建高端装备制造业的“技术-功能-组织”协同框架[J].工业工程,2025.