

面向绿色制造的机电控制节能技术体系构建研究

骆龙

新疆农村商业银行股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830001

DOI:10.61369/ME.2026070023

摘 要： 在“双碳”目标驱动下，绿色制造正迈向全生命周期系统变革，机电控制节能技术成为贯通制造工艺、装备运行与能源管理的关键纽带。当前，变频调速、伺服优化及数字孪生等技术推动节能从单机最优向产线协同跃升，但仍面临跨层级协同控制、工况自适应能力不足、标准体系碎片化及产业生态不健全等挑战。有鉴于此，本文系统剖析技术、标准、管理与产业四维度瓶颈，提出涵盖弹性协同架构、物理-数据融合算法、全尺度标准矩阵、组织重塑与阶梯式激励、系统集成生态培育等系统性构建策略，旨在为制造业绿色转型提供可落地的技术体系框架。

关 键 词： 绿色制造；机电控制；节能技术；产业生态

Research on the Construction of Electromechanical Control Energy Saving Technology System for Green Manufacturing

Luo Long

Xinjiang Rural Commercial Bank Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830001

Abstract： Driven by the "dual carbon" goal, green manufacturing is moving towards a full lifecycle system transformation, and electromechanical control energy-saving technology has become a key link connecting manufacturing processes, equipment operation, and energy management. Currently, technologies such as variable frequency speed regulation, servo optimization, and digital twins are driving energy conservation from single machine optimization to production line collaboration. However, there are still challenges such as cross level collaborative control, insufficient adaptability to working conditions, fragmented standard systems, and an unhealthy industrial ecosystem. In view of this, this article systematically analyzes the four-dimensional bottlenecks of technology, standards, management, and industry, and proposes systematic construction strategies including elastic collaborative architecture, physical data fusion algorithms, full-scale standard matrix, organizational restructuring and tiered incentives, and system integration ecological cultivation, aiming to provide a practical technical system framework for the green transformation of the manufacturing industry.

Keywords： green manufacturing; mechanical and electrical control; energy saving technology; industrial ecosystem

当前，变频调速、伺服优化及数字孪生等技术虽已在单机控制与产线制造层面取得显著节能进展，但技术体系构建仍面临跨层级协同困难、工况自适应不足、标准碎片化及产业生态不健全等系统性瓶颈，制约了规模化落地。有鉴于此，因此，分析面向绿色制造的机电控制节能技术体系发展现状，结合其中存在的问题提出针对性的措施，对于推动制造业绿色转型具有重要意义。

一、面向绿色制造的机电控制节能技术发展现状

在“双碳”目标与制造业深度转型的双重驱动下，绿色制造已从末端治理走向全流程、全生命周期的系统变革，机电控制节能技术由此成为贯通制造工艺、装备运行与能源管理的关键纽带^[1]。当前，变频调速、伺服优化、能量回馈等单点节能控制技术已在机床、注塑机、工业机器人等典型装备中得到较广泛验证，部分先进企业依托模型预测控制和自适应算法实现了运行工况与

能耗的实时匹配，使设备级节能率达10%~30%。与此同时，工业互联网与数字孪生技术的渗透，正推动节能控制从“单机最优”向“产线协同最优”跃升——通过采集多源传感数据构建能耗数字镜像，进而对启停时序、负载分配、待机功耗等进行全局寻优，初步形成了“感知-分析-决策-执行”的闭环节能范式。

然而，技术成果的规模化落地仍面临显著落差。一方面，高端节能控制系统高度依赖高精度传感器、高速通信模块和专用算法库，国产化替代能力不足，导致中小制造企业陷入“想改改不

作者简介：骆龙（1977.05-），男，汉族，新疆乌鲁木齐人，学历：大学，职称：工程师，研究方向：电气工程。

起、改后难维护”的困境；另一方面，现有节能改造多聚焦于新建产线或高耗能环节，存量设备的海量基数与异构控制系统使得技术复用的边际成本陡增。更关键的是，当前节能效益的评估往往以设备级节电率为单一指标，忽视了制造质量、加工效率、设备寿命等关联维度的综合损益，这种“节能本位”的评估惯性制约了技术体系的系统性建构。

二、机电控制节能技术体系构建存在的问题分析

（一）技术层面问题

技术体系的构建首先遭遇的是多层级协同控制的复杂性问题。从单机控制器到产线调度系统，再到车间级能源管理平台，各层级的时间尺度、控制目标和信息粒度存在本质差异——设备级要求毫秒级动态响应，产线级侧重秒级生产节拍协调，而能源管理则以分钟或小时为单位的统计优化，如何建立跨层级的一致性模型与协同决策机制尚缺乏成熟的理论框架。此外，节能控制算法普遍对工况变化的适应性不足，传统 PID 参数整定和规则库在变负载、变速度、变环境条件下容易偏离最优运行点，而数据驱动的机器学习方法又面临样本稀缺、模型泛化能力弱以及在线学习实时性难以保证等现实瓶颈^[9]。更为棘手的是，多源异构设备间的通信协议与数据接口互不兼容，导致能耗数据的全息感知与互联互通在工程实施中大打折扣，严重削弱了上层优化算法的实际调控效能。

（二）标准层面问题

标准体系的滞后与碎片化是制约技术体系规范发展的另一关键瓶颈。当前，机电控制节能领域尚未形成覆盖“元件—设备—系统—车间”全尺度的标准矩阵：在测试评价方面，不同厂商的变频器、伺服驱动器和控制器在节能性能测试中采用的工况条件、负载谱和测试周期差异显著，致使横向对比数据缺乏公信力；在能效指标方面，设备级和系统级的能效基准（基准线）设定缺乏统一的统计学方法和动态更新机制，有的以额定工况为基准，有的以历史平均值为基准，导致节能核算结果无法互认。此外，面向绿色制造的机电控制涉及机械、电气、自动化和环境等多学科交叉，现有标准大多沿袭单一专业领域的惯习，对多能互补、能量回馈质量、待机功耗阈值等交叉性议题缺乏明确的界定和量化要求，标准化技术委员会之间的协调机制也亟待理顺。

（三）管理与制度层面问题

技术体系的落地效果在很大程度上取决于企业内部管理架构与外部制度激励的匹配程度。从企业内部看，节能改造的投资回报周期与制造企业追求的短期财务绩效之间存在天然张力，而节能效益在财务核算中又难以与产量提升、质量改进等传统 KPI 形成并轨评价，导致机电控制节能项目在年度预算竞争中往往处于劣势。更为深层的是，多数制造企业的能源管理职能归属动力车间或设备部门，与生产工艺部门、自动化控制部门之间存在明显的组织壁垒——工艺人员关心加工质量和节拍，控制人员关心系统稳定性，能源人员关心能耗数值，三者目标函数的分离使得“工艺—控制—能耗”协同优化在管理流程上难以实现。从外部制

度看，现行节能补贴和绿色制造激励政策多采用“项目申报制”，侧重单项技术的示范推广，而对系统性节能技术体系构建所需的前期咨询、人才培养和持续改善机制缺乏常态化支持^[9]。

（四）产业生态层面问题

跳出单一企业视角，机电控制节能技术体系的健康演进还需要一个功能完整的产业生态支撑，而这一生态目前仍处于发育不全的状态。在供给端，系统集成商普遍规模偏小，缺乏同时精通机械设计、自动控制、能源管理和数据分析的复合型工程团队，导致“交钥匙”工程的质量参差不齐；而大型自动化龙头企业则更倾向于销售标准化通用产品，对定制化的节能系统集成方案缺乏足够的服务意愿和技术储备。在需求端，大量制造企业对机电控制节能的认知仍停留在“换变频器、装节电器”的初级层面，缺乏从系统级进行控制策略重构和运行模式优化的专业判断能力，这种信息不对称使得劣质低价节能方案容易通过短期演示数据获得市场，而真正具备长期效益的系统性方案反而因报价较高而被挤出。此外，节能效益分享型合同能源管理模式在机电控制领域的应用还面临能量核定争议大、改造风险分担机制不健全、融资渠道狭窄等问题，制约了专业化节能服务公司的介入深度和市场活力。

三、面向绿色制造的机电控制节能关键技术体系构建策略

（一）突破多层级协同与工况自适应控制的技术瓶颈

针对技术层面存在的跨层级协同控制难题与工况适应性不足问题，应从控制架构与算法体系两个维度协同突破。在架构层面，摒弃传统的垂直刚性分层模式，构建“边缘实时优化+云端全局协调”的弹性协同框架：设备级边缘控制器保留毫秒级闭环调节的自主性，同时以标准化信息接口向上层输出包含能耗特征、负载状态和运行裕度的紧凑语义信息；产线与车间级则基于这些语义信息，以秒级至分钟级的周期下发调度指令与能耗目标设定值，形成“快慢解耦、目标一致”的分布式协同机制。核心在于定义层间交互的标准化信息契约而非共享全部细粒度数据，从而在保证实时性的同时降低通信与计算负担^[10]。

在算法层面，推动物理机理与数据驱动的深度融合，以解决纯数据驱动方法在变工况条件下的泛化难题。具体路径是：以机电装备的机理模型提供工况变化下的先验约束与基准映射，再在线学习算法对模型偏差进行局部修正与参数自适应调节，使控制策略在不同负载谱和速度条件下保持对最优运行点的有效追踪。对于样本稀缺问题，可采用迁移学习策略，将仿真环境或相似工况下预训练的模型参数迁移至目标装备，辅以小样本在线微调，大幅降低对实际运行数据的依赖。同时，针对异构设备互联互通障碍，应推动基于 OPC UA、MQTT 等开放通信协议的信息模型标准化建设，使不同厂商设备能够以统一的语义格式输出能耗相关数据，为上层优化算法提供可靠的“数据底座”。

（二）构建全尺度、跨学科的标准规范体系

针对标准体系滞后与碎片化问题，需从顶层设计入手，建立

覆盖“元件－设备－系统－车间”全尺度的标准矩阵，并理顺跨学科标准的协调机制。统一规定各类节能控制装置和系统的测试工况条件、负载谱编制方法、测试周期及数据采集规范，确保不同厂商产品在同等条件下具有可比性。在此基础上，建立动态能效基准设定方法——摒弃固定参照系的做法，采用基于统计过程控制的动态基线模型，根据装备运行数据实时更新能效基准值，使节能量核算摆脱对“额定工况”或“历史均值”等静态参照的依赖，提升核算结果的可信度与互认性。

对于多学科交叉议题，建议由全国能源基础与管理标准化技术委员会牵头，联合全国工业机械电气系统标准化技术委员会等机构，成立面向绿色制造机电控制的联合标准工作组，针对能量回馈质量、多能互补系统的能效计量方法、待机功耗阈值分级等空白领域进行专项研究与标准制定^[5]。此外，应引入标准验证与动态迭代机制，在重点行业设立标准验证示范点，通过实际运行数据检验标准的合理性与可操作性，形成“研制－验证－修订”的闭环迭代流程，避免标准出台后与实践脱节。

（三）重塑企业内部组织协同与外部制度激励机制

针对管理层面的组织壁垒和激励错配问题，对策的核心在于重构企业内部的绩效评价体系和跨部门协作机制，同时优化外部政策工具的设计逻辑。在企业内部，应将“能效产出”纳入生产运营的核心考核维度，建立“产量－质量－能效”三元并轨的评价框架。具体可引入等效综合成本函数，将电能消耗、加工效率、废品率及设备维护成本纳入统一核算体系，使节能改造的综合收益在财务层面可视化。更为关键的是，推动工艺部门、自动化控制部门和能源管理部门的目标对齐——可在组织架构上设立跨职能的“绿色制造工程小组”，赋予其统筹工艺参数优化、控制策略调整与能源调度的权限，并建立以“单位产品综合能耗”为核心的联合考核指标，打破部门间的目标函数分裂。

在外部制度层面，将节能补贴政策从“单项技术示范申报制”转向“系统性能力建设支持制”，重点支持企业开展能耗诊断与系统评估、复合型人才培训、节能控制体系认证等基础性工作，而非仅对设备更换给予补贴。建议探索“节能绩效阶梯式奖励”机制——根据企业连续多年度的单位产值能耗下降幅度给予梯度式政策优惠，激励企业建立持续改善的长效机制，而非追求一次性改造的短期达标。

（四）培育系统集成能力与良性竞争的产业生态

针对产业生态层面系统集成商能力不足、需求端认知偏差和合同能源管理模式适用性差等问题，对策应着眼于供给端能力建设、需求端认知提升和商业模式创新三端协同发力。在供给端，支持大型自动化企业与专业节能技术公司建立战略联盟或联合实验室，将通用控制平台能力与节能工艺专长相结合，形成可复制的系统性解决方案而非零散的设备替换服务。同时，依托行业龙头企业和科研院所，建设机电控制节能技术中试验证平台，为中小系统集成商提供真实工况环境下的方案测试与优化服务，降低其技术验证成本，提升“交钥匙”工程的整体质量水平。

在需求端，通过行业协会和公共服务中心组织开展面向制造企业高管和工程技术人员系统性培训，核心目标是提升其对“控制策略重构”而非“设备简单替换”的认知层次，帮助需求方建立从系统级评估节能潜力、核算全生命周期成本的专业判断能力。在商业模式方面，针对机电控制领域的特点，改良传统合同能源管理模式——引入“节能量保险＋第三方核定”的风险分担机制，由保险公司承保节能量达不到预期时的差额损失，第三方核定机构提供中立公正的节能量测量与验证服务，从而降低供需双方在节能量认定上的分歧风险。此外，探索“节能能力建设即服务”的订阅制模式，由专业服务商为企业提供持续的能耗监测、控制策略优化建议和运维支持，以服务费替代一次性改造成本，降低中小制造企业的资金门槛，同时为服务商创造稳定的收入流，形成激励相容的长期合作关系。

四、结语

面向绿色制造的机电控制节能技术体系构建是一项涉及控制理论、标准规范、组织管理与产业生态的系统工程。本文从四维度系统剖析了制约瓶颈，并提出了覆盖架构创新、算法融合、标准统一、机制优化与生态培育的整体策略，强调技术突破需与管理变革、制度设计同步推进方能实现规模化落地。未来，可聚焦于构建融合机理与数据驱动的数字孪生仿真平台，以验证跨层级协同控制策略在典型离散制造场景中的工程实效，并探索基于大语言模型的人机协同决策机制，为动态工况下的自适应节能优化提供新路径。

参考文献

- [1] 胡兆帅. 电气自动化技术在机电一体化生产线节能改造中的应用[J]. 造纸装备及材料, 2026, 55(6): 150-152.
- [2] 张敏峰. 节能理念下冶金机电设备运行优化与能耗控制[J]. 中国金属通报, 2026(6): 1-3.
- [3] 周国松, 胡伟波, 吴梦杰, 等. 面向绿色制造的机电加工工艺参数优化方法[J]. 产城, 2026(4): 180-182.
- [4] 周鹏玉, 顾浩宇, 徐鸿伟, 等. 基于DEMATEL-ISM的公路机电安装绿色施工成本影响因素研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2025, 55(4): 496-504.
- [5] 翟卫波, 顾浩宇, 邹俊杰, 等. 高速公路机电安装绿色施工评价体系及工程应用研究[J]. 工程管理学报, 2024, 38(3): 88-93.