

机电一体化设备的节能控制策略研究

闫磊 110224198503022011

摘要：本文分析了机电一体化设备的能耗机理与关键影响因素，提出并比较了机械与电气两类节能技术路径，重点探讨基于模型预测、强化学习与数字孪生的智能节能控制策略及系统级协同优化方法，并就实施要点、成本与标准化挑战提出建议，为设备节能改造与能效管理提供工程实践参考。

关键词：机电一体化;能耗机理;轻量化;变频调速;模型预测控制;强化学习;数字孪生;系统级协同;能耗监测;节能改造

一、机电一体化设备能耗机理分析

（一）能耗组成与特征

机电一体化设备的能耗源于机械系统、电气系统及多能域耦合过程，呈现多维度损耗特征。机械系统中，传动机构的齿轮啮合摩擦、轴承滚动摩擦产生的能量损耗与转速、负载呈正相关，执行机构在启停、变速过程中的惯性力会导致动能转化为热能损耗，可通过多体动力学模型量化分析。电气系统的能耗主要包括驱动单元的逆变器开关损耗、IGBT 导通损耗，以及控制单元的芯片运算、传感器信号采集能耗，电流谐波还会进一步加剧铜损，需通过电路仿真分离各损耗成分。多能域耦合过程中，机械域的动能、势能与电气域的电能、热能存在复杂转换关系，能量传递过程中的效率衰减与损耗叠加，构成了设备能耗的重要组成部分。

（二）关键能耗影响因素

负载波动与工况变化是影响能耗的核心因素，负载突变会导致电机输出功率频繁调整，引发电流冲击，增加铜损和铁损；间歇工况下设备频繁启停产生的启动电流可达额定电流的 3-5 倍，显著提升平均能耗水平。控制策略的合理性直接影响动态响应能耗，传统 PID 控制易出现超调现象，先进控制算法虽能优化动态过程，但需平衡运算复杂度与能耗代价。设备老化与维护水平同样关键，机械部件老化会增大摩擦系数，电气部件老化导致绝缘性能下降、漏电流增加，维护缺失会使能耗年均上升 5%-10%，而定期润滑保养等维护措施可有效降低损耗。

（三）能效评价指标体系

传统能效指标存在明显局限性，效率仅反映稳态能量转换效率，无法体现动态能耗特征，功率因数对直流驱动设备适用性差，且两者均未涵盖启停、待机等非运行状态能耗。基于全生命周期的能效评估体系更具全面性，涵盖设计、制造、运行、维护、报废全阶段，通过量化各阶段能耗，构建全生命周期能效指数，实现对设备能效的动态、综合评价，为节能策略制定提供全阶段依据。

二、机电一体化设备节能控制策略

（一）机械系统节能优化

机械系统节能以降低损耗、提升能量传递效率为核心，主要通过轻量化设计、高效传动优化及能量回收技术实现。轻量化设计采用高强度铝合金、碳纤维等新型材料，在保证结构强度的前提下减少设备自重，降低惯性损耗，同时优化结构拓扑，减少冗余部件，进一步降低运行能耗。传动系统优化聚焦高效传动机构研发，采用低摩擦系数的齿轮材料与润滑技术，减少啮合损耗，推广同步带传动、谐波传动等高效传动形式，提升能量传递效率。能量回收技术通过回收设备制动过程中的动能、重力势能，经能量转换装置转化为电能储存或直接利用，实现能量循环利用，降低净能耗。

（二）电气系统节能优化

电气系统节能围绕电机能效提升、变频调速技术应用及电源管理优化展开。电机能效提升依赖高效电机研发与选型，采用永磁同步电机替代传统异步电机，利用永磁材料的高磁能积特性消除励磁损耗，搭配高磁感低损耗硅钢片、高效润滑油等关键材料，显著提升电机本体效率。变频调速技术通过改变供电频率实现电机转速无级调节，核心包括 V/F 恒压频比控制、磁场定向矢量控制（FOC）及直接转矩控制（DTC）三类方案，分别适配轻载稳态、重载高精度及极速响应场景，根据负载需求动态调整转速，避免“大马拉小车”现象，风机、水泵类设备节能率可达 20%-50%。电源管理优化通过改进逆变器拓扑结构、优化开关频率，降低开关损耗与导通损耗，同时采用功率因数校正技术，减少谐波污染，提升电能利用效率。

（三）智能控制策略创新

智能控制技术为精准节能提供核心支撑，通过融合模型预测控制、强化学习、数字孪生等技术，实现能耗的动态优化。模型预测控制基于系统动力学模型，预测未来工况变化，提前优化控制参数，在响应速度与能耗之间实现最优平衡。强化学习通过智能体与环境的交互学习，自主优化控制策略，适应复杂多变的负载工况，提升动态响应过程的能效。数字孪生技术构建设备虚拟镜像，实时映射运行状态，模拟不同控制策略的能耗效果，为优化决策提供数据支持。此外，多设备协同控制通过动态调度集群设备的启停与功率输出，结合峰谷电价响应机制，实现系统级能耗优化，微电网集成技术则为多能源互补利用提供解决方案。

（四）系统级节能协同优化

系统级节能强调“机—电—负载—工况”全链条协同，突破单一设备优化的局限。设计阶段注重动力匹配，根据负载特性与工况需求精准选型，避免功率冗余；运行阶段通过智能传感器与边缘计算终端，实现设备状态与负载工况的实时感知，基于节能降碳大模型动态优化运行参数。推广空压站、泵站等设备集群的群控技术，实现多设备协同调度，提升系统整体能效。同

时，将全生命周期理念融入系统设计，兼顾材料能耗、制造能耗与运行能耗，实现全流程节能。

三、节能控制策略实施要点与未来趋势

（一）实施要点

节能控制策略的有效实施需遵循能效优先、系统集成、动态调节、持续改进原则。应结合设备类型、负载特性与应用场景，科学选择节能技术方案，例如轻载稳态场景适配 V/F 变频控制，重载高精度场景采用矢量控制或直接转矩控制。建立完善的能耗监测系统，基于物联网技术实现能耗数据实时采集、分析与可视化，精准识别能耗异常与优化空间。加强设备全生命周期管理，通过定期维护延缓老化进程，结合政策激励与市场驱动，推动节能技术改造与推广应用。

（二）未来趋势

随着人工智能、5G、氢能等技术的发展，机电一体化设备节能控制将向智能化、融合化方向迈进。AI 与智能控制深度融合，将实现控制策略的自主学习与自适应优化，提升复杂工况下的节能精度；5G 技术赋能设备集群协同与远程调控，优化多设备能量分配；氢能驱动技术与高效电机结合，将为零碳运行提供新路径。同时，宽域高效电机、集成式控制器等核心部件的技术突破，将进一步夯实节能基础，推动机电一体化设备向更高能效、更低排放方向发展。

四、结论

机电一体化设备的节能控制是实现工业绿色转型的关键环节，需基于能耗机理分析，从机械系统、电气系统、智能控制及系统协同层面构建全方位节能策略。机械系统轻量化与高效传动、电气系统变频调速与电机能效提升、智能控制技术创新及系统级协同优化，共同构成了节能控制的核心路径。未来，随着新型材料、智能技术与节能理念的深度融合，机电一体化设备的能效水平将持续提升，为“双碳”目标实现与制造业高质量发展提供有力支撑。在实际应用中，需结合设备特性与工况需求科学选择策略方案，通过完善的监测与管理体系保障节能效果，推动节能技术从理论走向实践，实现经济效益与生态效益的统一。

参考文献

[1]韦荣李.造纸厂机电一体化设备的节能改造技术研究[J].造纸技术与应用,2025,53(02):19-21+24.

[2]蒲亿安.机电一体化技术在机械工程中的应用[J].中国机械,2025,(05):94-97.

[3]孙袁帅.机电一体化技术在工程机械中的应用与发展[J].造纸装备及材料,2022,51(04):144-146.