

机电系统全生命周期节能关键技术研究

王勃

新疆农村商业银行股份有限公司，新疆 乌鲁木齐 830001

DOI:10.61369/ERA.2026100026

摘 要： 机电系统节能需突破传统碎片化干预局限，确立全生命周期系统性视角。本文首先阐释了机电系统全生命周期节能的重要性，然后聚焦规划设计、制造装配、运行维护及回收再生四大阶段的关键技术展开分析，最后机电系统全生命周期节能技术正呈现数智融合、柔性互济与闭环再生三大趋势，推动节能管理从经验驱动向 AI 原生演进，从单体优化向电网互动拓展，并从单生命周期向多周期价值循环延伸。全生命周期节能的本质是实现机电系统能效从源头管控到末端治理的系统性重构，为产业低碳转型提供核心支撑。

关 键 词： 机电系统；全生命周期；节能技术；AI

Research on Key Energy-Saving Technologies for Full-Life-Cycle of Electromechanical Systems

Wang Bo

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

Abstract： Energy saving of electromechanical systems needs to break through the limitations of traditional fragmented intervention and establish a systematic full-life-cycle perspective. This paper firstly illustrates the importance of full-life-cycle energy saving for electromechanical systems, and then analyzes the key technologies in four major stages: planning and design, manufacturing and assembly, operation and maintenance, as well as recycling and regeneration. Finally, the full-life-cycle energy-saving technologies of electromechanical systems are showing three major trends: digital-intelligent integration, flexible mutual compensation and closed-loop regeneration. They promote the evolution of energy-saving management from experience-driven to AI-native, expand from single-unit optimization to power grid interaction, and extend from a single life cycle to multi-cycle value circulation. The essence of full-life-cycle energy saving is to realize the systematic reconstruction of energy efficiency for electromechanical systems from source control to terminal governance, providing core support for industrial low-carbon transformation.

Keywords： electromechanical system; full-life-cycle; energy-saving technology; AI

引言

机电系统能耗在建筑与工业运营成本中占比突出，是实现碳达峰碳中和目标的关键着力点。长期以来，节能策略主要集中于设备选型或运行调节等单一环节，此类“碎片化”干预虽能产生局部改进，却难以解决因前期设计冗余、施工质量缺陷及回收环节缺位所导致的深层次能耗锁定问题^[1]。全生命周期理念的引入，将节能视野扩展至从规划、制造、运维直至报废回收的完整链条，其核心价值在于通过阶段间协同反馈，从源头重塑系统用能逻辑。这一系统性视角的转变，对于破解机电系统能效提升的瓶颈、推动产业可持续发展具有重要意义。

一、机电系统全生命周期节能的重要性

机电系统作为现代建筑与工业生产的核心能耗单元，其运行成本与能源消耗在整体运营支出中占据显著比重。然而，传统节能策略往往聚焦于设备选型或运行阶段，这种“碎片化”干预虽能产生局部效益，却难以触及能耗问题的根本。全生命周期视角

的介入，将节能考量从单一的使用环节拓展至规划、设计、制造、安装、运维直至报废回收的完整链条，其意义不仅在于挖掘各环节的潜在节能空间，更在于通过阶段间的协同反馈，避免因前期决策失误导致后期运行能耗的刚性锁定。可以说，全生命周期节能是对机电系统能效问题的系统性“诊断”与“治疗”，是从源头重塑系统用能逻辑的战略性转变。

作者简介：王勃（1992.02—），男，汉族，新疆乌鲁木齐，工学学士学位，工程师，研究方向：电气工程及其自动化、智能控制。

在全生命周期框架下，节能不再仅仅是技术参数的叠加，而是一种贯穿系统存续始终的价值导向。前期设计中，合理的系统架构与负荷匹配能从根本上降低能量传递过程中的无谓损耗；制造与安装阶段，精益化工艺与施工质量直接决定了设备初始能效水平及其长期衰减速率；而运维阶段的智能调控与定期优化，则是确保设计能效得以持续兑现的关键保障。更重要的是，报废回收环节的资源化利用与无害化处理，反映了节能理念向循环经济与生态环境责任的延伸^[2]。这种全维度、跨阶段的系统化节能实践，对于落实碳达峰碳中和目标、提升实体经济竞争力，以及推动机电产业向高质量、可持续方向转型升级，均具有不可替代的深远意义。

二、机电系统全生命周期节能关键技术分析

（一）规划设计阶段节能关键技术

1. 系统架构与负荷动态匹配设计

该技术聚焦于从源头化解机电系统“大马拉小车”的固有矛盾。传统设计常按极端工况叠加冗余，导致设备长期在低效区运行。关键技术包括：基于全年逐时动态负荷模拟的精确容量计算，取代粗放的指标估算法；采用分布式能源站与区域用能需求耦合的架构设计，如冷热电联供系统的容量优化配比；以及利用建筑信息模型进行管线综合排布，减少输配系统的局部阻力与压头浪费。其核心价值在于通过设计阶段的“精准定制”，使系统容量与真实负荷曲线高度吻合，避免因设计过度造成的全生命周期能耗刚性浪费。

2. 多目标协同优化与能效前置仿真

该技术强调将节能目标作为独立约束条件，与安全性、经济性并列纳入前期决策体系。具体路径包括：引入数字化孪生仿真平台，在虚拟环境中比选不同冷热源方案、水系统制式及控制策略的组合能效，提前预判运行能耗；采用全生命周期成本分析方法，综合权衡初投资与运行能耗，避免片面追求低价设备而牺牲长期能效；同时，通过被动式与主动式技术协同设计，如利用建筑热惰性进行蓄能调峰，将自然冷源、废热回收等免费能源纳入系统规划^[3]。该技术旨在将节能理念“固化”于设计图纸之中，使后续各阶段的节能措施有据可依。

（二）制造与装配阶段节能关键技术

1. 精益制造工艺与能效导向的物料选型

该技术着眼于设备本体制造环节的能耗与品质控制。关键技术包括：采用近净成形、低温焊接等低能耗加工工艺，减少制造过程中的热能散失与材料切削浪费；在电机、变压器等核心部件中，优先选用高导磁、低损耗的硅钢片及非晶合金材料，从材料层面降低铁损和铜损；同时，推广变频器内置化、永磁同步化等高效集成设计，减少中间传动环节的机械损耗。此外，建立制造过程的单位产品能耗限额管理体系，通过实时监测各工序能耗，倒逼工艺参数优化，确保出厂设备的基础能效水平达到或超越国家一级能效标准。

2. 模块化装配与高精度预调试技术

该技术旨在提升现场安装质量与效率，避免因施工不良导致的运行能效折损。关键技术包括：将大型机电系统拆分为标准化功能模块，在工厂内完成高精度组装与气密性检测，减少现场焊接、拼接带来的泄漏和阻力增加问题；采用激光对中、扭矩精确控制等装配工艺，保证转动设备的同轴度与动平衡，降低机械摩擦功耗；同时，引入出厂前带载模拟调试，提前校验控制逻辑与执行器响应，避免现场返工和无效试运行^[4]。此技术通过“工厂预制替代现场施工”，将不确定性人为误差降至最低，有效保障了系统投入运行时的初始能效状态。

（三）运行维护阶段节能关键技术

1. 自适应预测控制与全局能效寻优

该技术突破传统 PID 反馈控制的滞后性，转向基于模型预测和人工智能的前馈调控。核心技术包括：融合气象预报、生产排程、人流密度等多源异构数据，预测未来 15-30 分钟的冷热负荷变化，并提前调整机组启停组合、冷冻水出水温度及冷却塔风机转速；利用深度强化学习算法，在保证舒适度的前提下，动态搜索冷水机组、水泵、冷却塔三者联合运行的最优效率点；同时，建立设备性能衰减在线监测模型，自动修正控制参数以补偿老化影响。该技术的本质是让系统从“被动响应”转变为“主动预判”，使各子系统的能耗始终逼近当前工况下的理论最低值。

2. 系统性调适与动态能效健康诊断

该技术强调通过周期性的全局调适和持续性能监测，遏制运行能耗的逐年爬升。关键措施包括：建立基于 IoT 传感器网络的能效指标实时看板，实现能耗异常快速溯源；采用大数据聚类分析方法，识别同类型设备间的能耗偏差，定位低效运行设备；并据此实施在线清洗、制冷剂充注量优化、皮带张力调整等针对性维护作业。更为重要的是，开展季节性工况切换前后的系统性联合调适，重新平衡各支路流量与压差，确保系统在新气候周期下恢复最优水力平衡状态，从而延缓设备能效衰减曲线，延长高效运行寿命。

（四）回收再生阶段节能关键技术

1. 可拆解性设计评估与高价值部件分级回收

该技术将节能视野延伸至系统退役后的物质流管理，旨在打破“报废即浪费”的线性模式。核心内容包括：在规划设计阶段即预埋可拆解接口与材料标识，便于退役时快速分离不同材质的部件；建立机电设备关键部件的性能检测与再制造评估体系，对剩余寿命达标者进行翻新后梯级利用于低负荷场景，避免重熔再造的高能耗过程；同时，开发智能拆解机器人及专用工装，提高贵金属和稀土元素的回收纯度和回收率。该技术将节能从“使用能效”延伸至“物能协同”，最大化保留设备制造阶段已投入的隐含能源。

2. 材料再生闭环与废弃物能源化利用

该技术聚焦于无法直接再用的报废材料，通过绿色化学与热工转化技术实现能量和物质的双重回收。关键技术包括：针对塑料绝缘层、橡胶密封件等有机组分，采用无氧热解或气化技术制备可燃气体或热解油，替代部分化石燃料，实现化学能的回收；对于玻璃纤维增强复合材料、印刷电路板等难分离废弃物，利用

微波辅助热解或超临界流体处理，实现玻纤与树脂基体的高效分离，并分别作为建材掺料或化工原料重新进入供应链；同时，严格管控制冷剂的负压抽取与无害化销毁或再生提纯，防止破坏臭氧层且回收其高热值。此技术通过构建“制造－使用－再生－再制造”的闭环链条，大幅降低全生命周期的累计能耗与碳排放，真正实现机电系统的可持续循环。

三、机电系统全生命周期节能技术发展趋势

（一）数智融合：从经验驱动向 AI 原生型能效管理演进

机电系统节能正加速迈入“人工智能原生”时代，其核心特征不在于算法的简单引入，而在于能效知识生产方式的根本性变革。传统节能高度依赖领域专家的经验规则与机理模型，知识获取成本高、泛化能力弱。未来发展的关键趋势是构建融合物理机理与数据驱动的混合智能模型——通过物理信息神经网络将守恒定律与热力学约束嵌入深度学习框架，使预测与控制行为始终不违背基本物理规律，避免纯数据驱动带来的“反直觉”决策风险。同时，大语言模型与知识图谱技术的渗透将重塑节能决策的人机协作模式：运维人员无需理解复杂的优化算法，即可通过自然语言交互完成能效异常诊断、策略生成与方案推演^[9]。更深层的变革在于，数智化平台将逐步具备“自进化”能力——通过持续积累各阶段、各工况下的运行数据与维护记录，系统能够自主发现隐含的节能潜力规律，并反向输出至规划设计阶段，形成跨阶段的经验反馈闭环。这意味着，未来的机电系统不再是被动执行节能指令的物理实体，而是具备能效认知能力的“智能体”，其节能水平将伴随数据积累而持续成长，彻底打破传统节能优化“一次定型、难以迭代”的瓶颈。

（二）柔性互济：从单体优化向电网互动与多能协同跃升

机电系统的节能边界正在从单体设备或单一建筑尺度，向外拓展至区域能源网络与新型电力系统的交互界面。核心趋势在于：机电系统不再被视为刚性负荷，而是作为柔性可调资源参与电网需求响应与动态碳排调控。关键技术方向包括基于实时碳排放因子的“碳感知”运行策略——当电网碳强度较高时，系统自动切换至蓄冷/蓄热供能模式，将用电需求平移至低碳时段；而在可再生电力富余时，通过智能充电桩、热泵等设备主动增容消纳绿电，实现节能与降碳的双重目标协同。进一步地，机电系统将​与光伏建筑一体化、电化学储能、氢能燃料电池等分布式能源单元深度耦合，形成“源－网－荷－储”协同优化的微电网架构。

在此架构下，节能的关键矛盾从“如何减少用能”拓展为“如何智慧地用能”——即在时空维度上精准匹配能量供给的清洁性与用能需求的刚性，最大限度减少弃风弃光与能量转换损失。这一趋势将倒逼机电系统在规划设计阶段即须嵌入能源交互接口与控制协议，使其在全生命周期内具备与外部能源环境动态协同的“柔性基因”。

（三）闭环再生：从单生命周期向多生命周期价值循环延伸

未来机电系统节能的最具颠覆性趋势，在于其生命周期理念从“一次性的摇篮到坟墓”彻底转向“多轮次的摇篮到摇篮”。这一转型的核心驱动力并非单纯的政策约束，而是日益凸显的经济理性——当稀土、铜材、高牌号硅钢等关键原材料的开采成本与环境成本持续攀升时，部件级的再制造与材料级的闭环回收将具备显著的性价比优势。技术发展方向聚焦于两大突破口：其一，是面向多生命周期适配的“耐久－易换”双优设计准则——关键磨损部件采用标准化快换接口，易老化密封件预留二次压紧余量，使设备在首次寿命终结后可通过最小干预恢复至不低于原性能95%的能效水平；其二，是数字孪生驱动的“能效护照”体系——为每一台核心设备建立涵盖材料成分、制造能耗、维修记录、性能衰减曲线的数字档案，使退役评估从“经验判断”升级为“精准量化”，据此匹配合适的梯级利用场景。更深层地，这一趋势将推动机电制造业的商业模式变革——设备制造商从“卖产品”转向“卖能效服务”，通过保留设备所有权并负责全生命周期运维与回收，使制造商的内在利益与系统的长期节能表现深度绑定，从而从商业逻辑上根除“重销售、轻运维”的行业顽疾，真正构建起节能价值在时间维度和物质维度上的双重闭环。

四、结束语

综上所述，机电系统全生命周期节能并非各阶段技术的简单加总，而是一套以跨阶段协同与信息反馈为内核的系统性工程方法。规划设计阶段的决策质量决定了后续节能潜力的上限，制造安装阶段为能效兑现提供物理基础，运维阶段通过动态调适延缓性能衰减，而回收再生则完成物质与能量的价值闭环——各环节相互制约、彼此赋能，任一阶段的缺失或低效都将削弱整体成效。未来，随着数智化技术深度赋能、能源交互边界持续拓展以及循环经济逻辑的全面渗透，机电系统将逐步从“被动节能”走向“主动智能节能”，其全生命周期的能效表现有望实现质的跃升。

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] 唐林峰. 机电设备全生命周期维保服务运营模式[J]. 安装, 2026(5): 106-109.
- [3] 刘芳霞. 数字化技术在机电设备全生命周期管理中的应用研究[J]. 华东科技, 2026(3): 115-117.
- [4] 郑智涛. 机电工程施工中的节能环保技术研究[J]. 新发现, 2025(18): 121-123.
- [5] 杨青, 陈磊, 刘凤明. 机电设备节能技术在制造业中的应用研究[J]. 科技资讯, 2025, 23(18): 107-110.