

# Energy efficiency optimization and carbon emission modeling analysis of mechatronic equipment

Guanhua Zhou

Qinhuangdao Water Supply Co., Ltd., Qinhuangdao, Hebei, 066000, China

## Abstract

As a critical energy-consuming component in manufacturing systems, mechatronic equipment directly impacts energy efficiency and carbon emissions through performance variations. Under the dual carbon goals, the importance of energy-saving and low-carbon operations has grown significantly. However, challenges such as mismatched power matching, crude control strategies, frequent load fluctuations, and inadequate condition assessment make energy consumption and emission quantification difficult. This study analyzes energy consumption mechanisms from drive systems, actuators, control logic, and operational characteristics. A carbon emission model integrating electrical energy consumption, mechanical efficiency degradation, load coupling, and lifecycle data is developed to dynamically evaluate emission intensity across different operating conditions. Results demonstrate that this model effectively identifies potential energy efficiency improvements, providing actionable pathways for enterprises to reduce energy costs and advance green manufacturing.

## Keywords

mechatronic equipment; energy efficiency optimization; carbon emission modeling

# 机电一体化装备的能效优化与碳排放建模分析

周冠华

秦皇岛排水有限责任公司, 中国·河北 秦皇岛 066000

## 摘要

机电一体化装备是制造系统中的关键能耗单元,其性能变化直接影响能源利用率与碳排放水平。在“双碳”目标推动下,装备节能与低碳运行的重要性不断提升。然而,动力匹配不当、控制策略粗放、负荷波动频繁及状态评估不足等问题,使能耗偏高与排放难以量化。研究从驱动系统、执行机构、控制逻辑与工况特性等方面分析能耗形成机理,构建融合电能消耗、机械效率衰减、负荷耦合及寿命周期信息的碳排放模型,实现不同工况下排放强度的动态评估。结果显示,该模型能够有效识别能效提升空间,为企业降低能耗成本与推进绿色制造提供可行路径。

## 关键词

机电一体化装备; 能效优化; 碳排放建模

## 1 引言

随着制造业数字化与智能化进程不断加快,机电一体化装备在加工、搬运与装配中的应用规模持续扩大,促使生产系统能源需求显著上升,电能消耗占比不断提高。研究表明,装备环节的效率损失已成为车间能耗的主要来源,而现有能耗核算与碳排放评估体系仍不够完善,精细化管理能力不足,使大量节能潜力未被有效利用。在“双碳”政策背景下,企业亟须构建可量化、可预测、可优化的装备能效管理体系。通过将运行状态、工艺参数、负荷特性与环境因素纳入碳排放模型,可实现对能耗敏感区间与排放异常的准确识别,为节能决策提供依据。本研究围绕能效机理、碳排放建模与优

化路径展开分析,为提升装备能效与推动绿色制造提供理论支持。

## 2 机电一体化装备能效特征与影响机理

### 2.1 动力系统能效损失及其成因

机电一体化装备动力系统主要包括电机、传动机构及执行装置,系统能效受机械摩擦、传动误差、电机负载率、磁阻损耗等因素共同作用。在加工类装备中,高速主轴的转速波动及冷却系统长期运行往往导致额外能耗;在自动化输送装备中,驱动电机低负载运行较为普遍,电机效率长期处于非最优区间。部分装备因设计阶段未充分考虑工作循环特征,导致电机选型偏大,额定功率远高于实际需求,使电能浪费持续累积。此外,传动部件磨损与润滑状态衰减会降低机械效率,设备服役周期越长,能耗上升趋势越明显。

【作者简介】周冠华(1983-),男,中国河北秦皇岛人,本科,助理工程师,从事机电研究。

## 2.2 控制策略与运行状态的不匹配性

装备能效除硬件因素外,还受到控制策略的直接影响。部分企业仍采用定值控制或周期性调节,未能根据实时负载变化进行动态调控,导致执行机构输入能量与实际需求存在偏差。以气动元件辅助的机电装备为例,若流量控制阀长期处于高开度,压缩空气消耗将明显增加。另一些装备因缺乏运行数据反馈机制,无法根据设备疲劳程度和响应特性自动调整参数,使能效状态与生产节奏难以保持一致。此外,环境温度变化、工件属性差异及操作节拍波动均会导致能耗偏离预期,进一步增加碳排放模型构建难度。

## 2.3 工艺负荷波动对能耗的叠加效应

在制造系统中,工艺过程具有显著的时序性与动态性,负荷波动频繁且幅度较大。装备在高峰负荷阶段易出现电流冲击,造成瞬时能量浪费;在低负荷阶段,设备仍需维持基本运行状态,导致固定能耗占比增加。部分加工工艺因切削阻力不稳定,使主轴功率呈周期性跳变,能效曲线难以保持平滑。装备群协同生产时,节拍差异会形成负荷不均衡,使车间供能系统必须保持高裕量设计,间接提升整体能耗水平。

# 3 机电一体化装备碳排放建模原则与核心方法

## 3.1 碳排放边界及排放源识别

构建机电一体化装备的碳排放模型,需要明确排放边界并识别全部相关排放源,这是建立科学核算体系的前提条件。对于以电力驱动为主的装备,其碳排放主要来自运行过程中消耗的电能,通过当地电网平均碳排放因子可将电量转换为等量碳排放值。对于搭载液压系统、气动系统或其他辅助动力装置的装备,还应将液压泵、电磁阀、压缩空气站等外围设备的能耗纳入计算,因为这些系统虽然不直接参与加工,但与主机协同运行,其耗能也间接构成装备整体碳排放的一部分。此外,装备在维修保养、换刀、润滑、夹具更换等环节中可能会产生间接排放,例如润滑油生产和消耗过程中的碳排放、维修用电的额外能耗等,需通过生命周期评价的方法进行补充计量。

## 3.2 基于多源数据融合的能效参数建模框架

机电装备运行过程中产生大量多维度数据,包括电流、电压、扭矩、转速、压力、流量、振动、温度以及工艺参数等,这些数据之间具有明显的非线性耦合关系,使能效建模无法依赖单一参数描述。为实现对能耗行为的精确刻画,需要构建以多源数据融合为核心的建模框架,将设备的动力学特性、工艺负荷变化与健康状态纳入统一表达体系。模型可采用机理模型与数据驱动模型结合的方式:机理模型可描述电机效率、传动链损耗、执行机构运动特性等物理过程,为能耗预测提供结构化约束;数据驱动模型则擅长在复杂工况下捕捉非线性关系,例如主轴振动与切削阻力之间的隐含相关、温度变化对摩擦损失的影响等。在具体实现中,可采用神经网络、梯度提升树、多任务学习网络及融合注意力机制

的深度模型,通过对多维数据的权重分配,提高对能耗关键因素的识别能力。通过数据融合框架,可实现运行状态、工艺负荷及设备健康指标的协同表达,为碳排放量化与能效预测提供精确基础。

## 3.3 装备生命周期维度的碳排放动态分析模型

装备在生命周期内的能效表现并非静态,其效率会随着磨损、老化、维护质量与工艺调整而变化。因此,碳排放建模需引入时间维度,通过状态转移函数描述效率衰减路径。生命周期模型可划分为调试期、稳定运行期、衰退期三个阶段,在不同阶段设定差异化能效参数。对于关键部件,如轴承、丝杠、齿轮等,可根据健康状态指标建立衰减函数,使模型能动态反映装备的真实运行状态。通过与维修记录、工艺日志等信息的联合计算,可对未来排放趋势进行预测,支撑碳资产管理与节能改造决策。

# 4 装备能效优化的关键策略与实现路径

## 4.1 动力系统优化与执行机构节能改造

动力系统优化是提升能效的核心环节。电机选型需要依据工艺需求进行匹配,通过分析负载曲线获得最优额定功率区间,避免过度设计。部分场景可采用永磁同步电机以提升能效水平,并通过矢量控制策略降低电磁损耗。在传动环节,可选用低摩擦轴承、高性能润滑剂及高精度齿轮,以改善传动效率。在执行机构方面,通过升级伺服驱动器、更新高效丝杠与滑台、优化制动能量回馈结构等手段,可显著提升机械效率。对于具备频繁启停特征的装备,可引入能量回收模块,将制动能量转化为电能供系统使用,降低外部供能需求。

## 4.2 数据驱动的自适应智能控制策略

智能控制策略的引入使装备能根据负载变化自动调整运行参数,实现能量按需供应。通过构建工况识别模型,可实时判断设备当前处于空载、轻载或重载状态,并根据分类结果调节转速、供气量、冷却强度及泵阀开度等关键参数。对于加工类装备,可采用基于预测模型的前馈控制策略,根据切削阻力趋势提前调整主轴负载,减少能耗峰值。在自动化装备中,可通过路径规划优化和任务节奏协调降低空载运行比例。控制策略还可与设备健康监测系统联动,根据磨损程度自动修正能效参数,使控制指令更贴近实际运行需求。

## 4.3 工艺路径重构与生产系统协同优化

装备能效不仅由设备本身决定,还与工艺路径与生产节奏密切相关。工艺优化可通过调整刀具参数、选择合理加工顺序、优化夹具布局等方式降低负荷波动。生产系统层面,可通过多装备协同调度降低高峰时段负荷集中问题,使能源供给系统更趋稳定。通过建立工艺能源数据库与排放指标库,可对不同路径的能耗与排放表现进行比对,选择表现更优的生产方案。在柔性生产线中,可通过任务分配算法使高能耗装备在低谷时段运行,减少对外部能源系统的冲击,提高系统整体效率。

## 5 碳排放建模在能效管理中的应用与案例分析

### 5.1 装备运行能效的实时监控与优化决策支持

在工业生产过程中，机电一体化装备的运行状态呈现高频波动与多维耦合特征，使能效水平易受到负荷变化、部件磨损及工艺扰动等因素影响。将碳排放模型嵌入能源管理系统，可实现从设备层到系统层的全链路监控。通过采集电流、电压、转速、扭矩、振动、温度等多源数据，系统能够构建设备能效画像，实时呈现能耗变化轨迹与排放强度曲线。监控界面可对关键指标进行动态比对，如单位能耗、碳排放因子、效率衰减率等，使管理人员及时掌握设备运行趋势。当模型识别到能效偏离正常区间，例如负载率下降、功率峰值异常增加或传动效率衰减时，系统会自动给出诊断提示，指出可能涉及的部件、工艺环节或控制参数，并推送相应调优建议。基于预测模型的前瞻性判断能力，还可提前识别潜在的高能耗风险，支持生产管理者按需调整生产节拍、计划性保养与任务调度，实现从被动节能向主动优化的转变。依托这一机制，可在不影响生产连续性的前提下，使装备保持高效运行状态，提高能源利用质量。

### 5.2 碳排放评估在装备选型与更新改造中的作用

装备生命周期内的碳排放水平不仅源于运行能耗，还受到设计方案、驱动方式、制造工艺及维护策略的影响。在新装备选型或旧装备改造过程中，依托碳排放模型可量化不同技术路线的长期能源成本与环保效益，为企业提供决策依据。通过对比不同电机类型的负载效率曲线、传动结构的能量损失特征以及控制系统的调节精度，可从碳排放视角筛选能效表现更优的装备方案。在具备液压、气动与电驱综合系统的装备中，模型可计算不同系统组合下的碳排放强度，为装备配置提供数据支持。对于服役周期较长的设备，模型可基于状态衰减函数预测后续运行阶段的排放趋势，估算继续使用的能耗成本和可能带来的排放压力。当预测结果显示设备能效下降明显且维护成本增高时，企业可据此判断是否进行技术升级，如更换高效电机、优化传动模组、更新伺服系统等。由于模型能够量化改造前后节能量与减排量，因此能够帮助企业评估改造投资回收期，提高设备更新的经济合理性与决策科学性。

### 5.3 典型装备应用案例的模型验证与效果分析

以自动化工厂中常见的搬运装备为例，为验证碳排放模型的有效性，对其长期运行数据进行采集与分析。数据包

括整机电流波形、负载扭矩变化、加速度响应、制动次数及运动路径信息。在模型构建阶段，通过物理机理与数据驱动方法结合的方式，建立负载率—功率—排放因子之间的动态对应关系。应用模型对不同任务周期进行预测后发现，该装备在多数搬运环节存在较长时段的轻载运行区间，负载率低于额定值的 25%，导致固定能耗占比较高，整体能效偏低。针对这一问题，研究团队对装备的运行路径进行重构，通过减少无效位移、优化速度曲线并调整加速与制动策略，使系统能量分配更加平稳。与此同时，对控制参数进行修订，使伺服系统能够根据负载变化进行动态调节。经过优化后，设备的平均能耗降幅约为 18%，碳排放强度降低了约 16%，模型预测曲线与实际测量值的拟合度较高，说明模型在不同工况下均能准确反映能效变化趋势。该案例验证了碳排放模型在装备节能分析与运行优化中的适用性，为后续推广提供可参考的实践依据。

## 6 结语

机电一体化装备作为制造业的重要组成部分，其能效水平与碳排放表现不仅影响企业能源成本，也关系到产业绿色发展的宏观布局。本研究从能效机理、碳排放建模与优化策略三个维度展开系统阐述，构建了多源数据驱动的能效分析框架与生命周期模型，提出了动力系统优化、智能控制、工艺重构与系统协同的综合节能路径。研究内容可为制造企业开展装备节能诊断、碳排放评估、技术改造与绿色管理提供理论依据和技术方法。随着工业互联网与 AI 技术进一步普及，未来装备能效管理将向更高精度、更强智能化方向发展，实现制造系统的持续低碳运行与能源利用优化。

### 参考文献

- [1] 任健,侯尹.机电一体化技术在智能机械装备上的应用及趋势思考[J].全面腐蚀控制,2025,39(05):78-80.
- [2] 陈英.考虑碳减排约束的感应炉机电一体化节能变频控制方法[J].工业加热,2025,54(02):70-74.
- [3] 杨前会.机械及机电一体化技术在垃圾焚烧发电过程中的节能减排研究[C]//中国智慧工程研究会.2024工程技术应用与施工管理交流会论文集(下).浙江伟明环保股份有限公司,2024:65-67.
- [4] 张吉福.机电一体化在可再生能源设备中的创新应用[J].产业科技创新,2024,6(04):8-11.