

新型节能型机电一体化传动系统设计与性能分析

朱军

贵州中矿工程技术有限公司，贵州省贵阳市观山湖区金阳街道麒龙BCD, 550081;

摘要：围绕节能型机电一体化传动系统的设计目标与性能边界，提出以能量流重构与多物理场协同为主线的方案。方法从对象分解、参数约束与控制律映射三方面展开，构建机械、传动、功率电子与控制软件的统一模型，用架构级优化连接效率、动态响应与可靠性。在部件层引入低损耗齿形、轻量转子与低涌浪磁链，在系统层实施能量路由、状态观测与自适应协调，使能耗在典型工况中保持低谷并避免峰值叠加。性能分析以多场耦合仿真与试验一致性校核为支撑，给出效率轨道、热稳态与鲁棒裕度的评价坐标，并配套面向量产的参数化配置与验证清单，为工程化落地提供可执行路径。并形成从设计到验证的连续闭环。提升方案迁移与复用效率。

关键词：机电一体化传动系统；节能设计；能量流优化；自适应控制；多场耦合

DOI: 10.69979/3060-8767.25.06.085

引言

机电一体化传动系统承担动力传递与运动控制双重任务，能效与动态品质常常相互牵引。传统优化多围绕单部件指标展开，容易在系统层出现局部最优与能量耗散的隐性通道。面对高频启停、变载波动与紧凑布局等现实约束，需要以全链路视角重构能量流路径，并将机械结构、功率电子与控制策略作为一个整体进行协同。为降低设计试错与维护成本，应建立统一的参数化模型与评价坐标，让关键指标在同一框架下权衡。本文在纯理论边界内提出节能导向的架构规划与控制协同方法，并给出性能分析与验证思路，目标是在安全与可靠约束内获得更低能耗与更稳的输出节拍，同时为跨平台迁移与后期维护提供可复用的技术栈。

1 节能导向的系统建模与部件协同设计

1.1 节能导向的系统分解与建模边界

系统分解以能量流与信息流为线索，将动力源、机械传动、功率变换、执行器与测量反馈建立模块化描述，界面以扭矩、转速、母线电压与热通量为统一变量。建模边界覆盖齿轮啮合损失、轴承摩擦、密封阻力、铜损与铁损、开关损与导通损，并把结构刚度、热路径与噪声源写入同一状态空间。为控制耦合度，引入等效阻抗与等效效率的层级表达，用少量可辨识参数逼近复杂机理，使早期即可完成架构比较与粗粒度优化^[1]。参数约束来自体积、质量、温升与声学舒适，任何单元的性能提升都需同步检查边界变化趋势，防止把局部改进转移成系统负担。

为了降低试验依赖，采用虚拟样机配合简化试验校

正，把未知量锁定在窄区间。模型应支持工况映射，将负荷谱、环境温度与启停节拍投影到参数空间，形成可更新的运行画像。制造离散与老化漂移通过随机场与区间参数表达，不确定传播采用样本法或线性化近似，输出用置信带标注可靠边界。模型粒度随阶段递进，方案比选阶段追求快速收敛，样机联调阶段提高分辨率并引入传感误差与执行延迟，使数字孪生与实体的响应在容差内贴合。为保证数据贯通，建立从需求到验证的参数主线，任何变更都在主线上留痕，以便回溯与复用。

在统一模型之上，设置跨域约束的映射器，将热限制、结构变形与电压裕度转化为控制可识别的软硬边界。映射器以可解释的形式输出安全区与高效区，控制侧据此进行轨道限幅与能量路由，设计侧据此进行几何与材料的微调。通过这一往复流程，形成从模型到控制再到模型的闭环，使节能目标在多目标权衡中稳定收敛。

1.2 关键部件协同设计策略

齿轮副追求高接触效率与低润滑损耗，齿形修缘与微观纹理缓解边界润滑并扩展高效区间。轴承在额定寿命与摩擦矩之间折中，预紧力与润滑通道布局决定滚动阻力基线，轻量转子与低风阻风道削减通风损失并提升冷却效率^[2]。功率电子通过软硬件协同降低导通与开关能耗，器件选择匹配频率与电流纹波，驱动栅极与散热版图成对优化，直流母线采用低等效电阻与低等效电感布线，缩短信号回路并控制寄生参数。

传感与执行链路关注分辨率与延时的平衡，分布式测量抑制估计漂移，执行器的额定区与弱磁区需要在能效与响应之间取得稳定关系，磁链轨道与扭矩轨道通过能量权衡器实时协商。部件目标不以单点最高效率为准，

而以工况加权的平均效率为约束，使系统在常见负荷谱下维持稳定低耗。面向可制造，关键零件采用公差分配与工艺窗口共设，敏感尺寸绑定过程控制点，确保样机与量产一致。

为缩短调试周期，建立部件到系统的试验基线，低功率台架给出相对比较，高功率台架给出热与振动边界，再与仿真一致性校核形成三角定位。对易老化材料设置寿命模型与替换窗口，把能效衰减映射到维护计划。对接口件给出标准化几何与电性定义，便于后续升级与跨平台复用，同时约束改动不破坏既有热与电磁通道。材料选择与表面处理协同提升耐磨与低摩擦表现，低粗糙度配合低黏度润滑剂在低温段减小启动损失，高黏附添加剂在高负载段维持油膜连续。冷却系统采用分区导风与定向导热，把热量从高损区引走并沿低热阻路径散出，温差缩小后机械间隙保持稳定，进一步减少摩擦增长。针对安装空间受限的场景，采用分体式壳体与嵌入式散热片，维持结构强度的同时释放流道体积。制造阶段通过刀具路径优化与热处理曲线控制减少内应力，装配阶段以扭矩矩阵与顺序表确保接触刚度达到目标。

2 能量流优化与控制协同策略

2.1 能量流优化与能量回收路径

能量流优化从源与汇的匹配入手，给出扭矩与转速的目标轨道，并通过多级缓冲抑制峰值叠加。机械侧使用弹性储能与惯性调配分担瞬态功率，电侧以母线储能与相电流限幅平抑波动，耦合策略依据实时等效效率在不同通道间切换。回收路径在减速与负载回落阶段开放，使动能与位能经功率变换回注母线或储能单元，阈值与上限由温升与电压裕度共同决定，避免高压尖峰与热累积。能量路由遵循最短损耗原则，避免能量在低效支路往返^[3]。

为了适配不同时间尺度，引入快慢两级调度。快级针对扰动与短周期变化执行限幅与分配，慢级根据能效地图与热地图做趋势性调整。为减少测量噪声引发的频繁切换，引入滞回与最小驻留时间，保证控制动作稳定。热管理与能量管理同步进行，热点附近的通道在短时间内降低占比，温升缓解后再回到最优分配。对周期负荷预置节拍，提前充能到安全区间，再在负峰时段释放。可在缓冲器上叠加小幅前馈，使能量射流指向需求区域；对长期波动采用慢变量调度，在效率谷底维持更长停留，提升加权效率。

能量回收需要与安全边界同向，制动或反驱时的电压抬升以母线电容与储能状态共同约束，控制侧根据裕

度自动降级到保守通道。为避免能量围绕低效路径循环，设置方向性判据与旁路开关，必要时把能量引入惰性负载进行消纳。在复杂工况下，能量调度还需要考虑多负载之间的耦合。当多个执行支路存在先后约束时，通过节拍编排把高耗时段错开，让缓冲在不同支路之间轮换。对瞬间极值给出预判轨道，提前降低源端输出并提升回收通道的接纳能力，使峰值在可承受范围内被削顶。若储能接近上限，控制侧把回收转入惰性消纳，避免超压风险。对高湿与低温环境，缓冲效率会下降，可在系统层引入预热微循环，提升能量回收的有效性。

2.2 深度融合的控制策略与执行配合

控制策略以观测与预测为基础，构建扭矩指令与电流轨道的双闭环结构，外环关注能量与动态品质，内环确保快速与低纹波。广义状态估计将转速、负载扰动、磁链饱和、温升与饱和裕度纳入统一估计器，结合模型误差校正与数据驱动微调提升鲁棒性^[4]。对时变与非线性因素采用增益自调与约束投影，保证在饱和临界附近保持平滑输出。开关策略与载波协调决定开关损与谐波损的分布，低载度区降低频率减少能耗，动态区提高带宽抑制扰动，以平滑函数实现区间过渡。

在预测层加入滚动优化，把能量路由与热边界纳入代价函数，通过短时域内的轨道规划避免未来的饱和与过热。执行器配合强调限幅与防抖，通过死区补偿与小信号抑制避免无效振荡，并在物理边界前设置软限位避免碰撞。为处理未知扰动，设置能量缓冲主动管理，优先保证安全与连续输出，在缓冲恢复后再回到高效模式。针对参数不确定与外界变化，部署自适应定标与在线辨识，约束其更新速率并附带置信度过滤，避免误估引起震荡。在人机界面层提供能耗与性能的对偶显示，让调参与诊断直观。

在软件工程侧实行版本留痕与回滚，任何控制逻辑改动都经过仿真沙箱与台架复核，通过风险分级决定上线节奏。对极端工况预置降级表，异常出现时切换到保守模式，保持安全与基本可用。在轨道规划中加入软硬约束并区分优先级，能量约束与安全约束保持刚性，舒适与噪声保持柔性，优化器在可行域内寻找代价更小的轨道。为保证在线计算的确定性，预先离散化可行集合以插值生成候选，再用快速评估挑选最优候选，计算负担可控且稳定。对传感迟滞与丢包设置鲁棒滤波，在时序不一致时启用最近可信窗口进行推断，防止错判引起的无效动作。对执行器老化建立补偿表，把效率衰减映射到驱动参数，延缓性能下滑。

3 多场耦合仿真与工程化评价

3.1 多场耦合仿真与参数敏感性分析

多场耦合仿真把电磁、结构、热与润滑放入统一框架，采用分区耦合方式在时域与频域交换边界量，关键在于能量守恒与边界一致。电磁模块给出铜损与铁损的时变分布，热模块更新温度场并计算散热通道的热阻网络，结构模块计算变形后反馈气隙与啮合刚度变化，润滑模块评估黏度与膜厚对摩擦的影响。为控制计算量，采用降阶与代理模型，对低敏感变量以表格化曲面替代细致求解，并以自适应网格把计算集中在热点区域。

参数敏感性揭示节能潜力的主导因子，可用全局与局部相结合识别关键参数，再在这些参数上进行精细化设计与制造控制。仿真与试验之间建立一致性检验流程，温升、效率与振动的曲线形态在容差内重叠，若出现系统性偏差，优先检查边界条件与材料参数的标定。为评估鲁棒性，构造扰动场景集，包含负荷波动、环境温度漂移与制造散差，计算效率分位数与热裕度分位数，用分布而非单值表达稳定范围。

为提升可信度，试验设计采用对照与复现并行的策略，同一方案在不同装夹与不同环境下重复测量，给出统计区间。对热稳态以升温与降温双向验证，确认热阻模型的可逆性。对能量回收以台架制动实现可控输入，核对电压轨迹与回收曲线的形态。对结构与噪声以扫频与驻波相结合，检视潜在的共振带，避免在运行区间内跨越危险区域。性能指标以效率轨道、热稳态、响应超调与能量回收率为核心，辅以噪声、振动与可靠性裕度的约束。指标之间存在拉扯，需要在多目标前沿上选点，并将结果回写到设计与控制的权重配置，从而形成可解释的权衡。

3.2 工程化约束下的可靠性与可维护性评价

工程化场景对节能方案提出制造、公差、装配与环境的综合约束。可靠性评价关注长期热循环、载荷谱波动与电压冲击对关键部件的影响，常见失效为绝缘老化、轴承磨损、齿面点蚀与焊点疲劳。为减小停机损失，在设计阶段引入模块化与可更换结构，敏感部位采用可顶装与快拆接口，维护动作时间限制在短窗口。可维护性与诊断能力相互促进，必要状态量在运行中保持可观测，阈值与趋势映射到维护计划，避免过度维护与延迟维护并存。

对外部环境如粉尘、湿气与盐雾给出防护等级与涂覆方案，使效率在寿命周期内保持稳定区间。质量控制以关键特性件为抓手，结合过程能力指数与在线检测守

住能效下限。工程评价将能效、可靠性与全寿命成本置于同一坐标，维持收益与复杂度的动态平衡。为保障扩展性，构建参数化配置表与验证清单，使不同功率等级与不同安装空间在同一技术栈内快速派生并保持一致体验。

在运行阶段建立数据回流渠道，对能耗、温升与故障的记录进行脱敏汇聚，形成跨项目的经验曲线。依据曲线对易失效部位实施材料与工艺微调，对控制权重实施小步更新，维持节能与可靠的长期均衡。评价方法可引入诊断可达度与维护可及度两项量化指标，前者衡量状态量的可观察强度与可分辨水平，后者衡量关键部件在有限时间窗内被更换或修复的便利。可靠性分析结合失效模式与影响分析与故障树两种路径，前者用于穷举与优先级排序，后者用于连锁关系与薄弱环节识别。对关键材料与焊接节点配套无损检测与在线监测，避免细小裂纹在热循环中扩展为致命缺陷。运行管理侧建立备件分级与共享池，结合寿命预测安排补货与更换，把停机损失降到合理水平。

4 结语

节能型机电一体化传动系统的设计不应割裂为部件优化与控制优化的两条路线，而应以能量流与信息流的统一描述为基础，借助可辨识的参数化模型完成跨层级协同。通过部件级低损耗设计、系统级能量路由与回收、控制级自适应协调，可以在常见负荷谱下稳定降低能耗并维持响应品质。多场耦合仿真与一致性检验为方案优选与参数收敛提供可靠依据，可靠性与可维护性评价则保证在工程化边界内长期输出。沿着这一路径，体系能够在安全约束内形成可复用的设计模板，并在不同行业的工况差异中保持稳健表现。

参考文献

- [1] 张生剑. 变频控制技术在矿山机电设备节能改造中的应用[J]. 当代化工研究, 2025, (12): 108-110. DOI: 10.20087/j.cnki.1672-8114.2025.12.035.
- [2] 张炼. 机电工程中节能控制技术的应用研究[J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(06): 65-67.
- [3] 张国栋, 孙乔辉. BIM 技术支持下的建筑机电节能运维系统构架与功能需求探究[J]. 机电产品开发与创新, 2025, 38(03): 195-197+203.
- [4] 李咸涛. 新型节能技术在煤矿机电运输系统中的应用分析[J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(05): 210-212. DOI: 10.19449/j.cnki.2095-6282.2025.05.068.