

电动执行机构的工作原理及动态特性深度剖析

李华元

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

摘要: 电动执行机构作为工业自动化控制系统的关键执行单元,其运行性能直接决定生产过程的稳定性与精度。本文聚焦电动执行机构的工作机制与动态特性展开系统研究,先阐述其基本组成、分类及核心工作原理,明确各部件的功能协同关系。进而界定动态特性的内涵与评价指标,探讨常用动态建模方法及主要影响因素。在此基础上,分析传统控制方法的不足,重点介绍自适应控制、模糊控制等先进策略及硬件优化路径。最后总结当前技术挑战,展望智能化、集成化及新材料应用的发展方向,为相关技术研发与工程应用提供参考。

关键词: 电动执行机构; 工作原理; 动态特性

引言: 在工业4.0浪潮推动下,自动化控制系统对执行单元的响应速度、控制精度及可靠性提出更高要求。电动执行机构凭借能量转换效率高、控制便捷及环境适应性强等优势,广泛应用于石油化工、电力冶金等领域,承担着阀门开关、设备调节等核心任务。然而,复杂工况下,其动态特性易受负载波动、参数漂移等因素影响,导致控制偏差增大。因此,深入剖析电动执行机构的工作原理与动态特性,优化控制策略,对提升工业自动化水平具有重要现实意义。

1 电动执行机构的工作原理

1.1 基本组成与分类

电动执行机构主要由动力驱动单元、控制单元、机械传动单元及反馈检测单元四部分组成。动力驱动单元以伺服电机为核心,提供执行动作所需动力;控制单元含控制器与功率放大器,负责接收指令并调控电机运行;机械传动单元通过减速器、丝杠等部件将电机旋转运动转化为直线或转角输出;反馈检测单元由编码器、电位器等构成,实时采集位置与速度信号实现闭环控制。按输出形式可分为角行程、直行程和多转式三类,角行程适用于阀门转角控制,直行程用于直线调节场景,多转式则可实现多圈连续动作,满足大行程控制需求。按控制方式又可分为模拟量控制与数字量控制,后者因控制精度高更适配现代自动化系统。

1.2 核心工作原理

电动执行机构的核心工作逻辑基于“指令-反馈-调节”的闭环控制机制。当控制系统发出目标指令信号后,控制单元首先将指令信号与反馈检测单元传输的实际位置、速度信号进行对比,计算偏差值。随后控制器依据偏差特性,通过PID调节等算法生成控制信号,经功率放大器放大后驱动伺服电机运转^[1]。电机动力经机械传

动单元减速增扭并转换运动形式,推动执行机构输出轴抵达目标位置。在此过程中,反馈检测单元持续采集运行参数并回传至控制单元,形成动态闭环调节。若出现负载变化等干扰,系统能及时感知偏差并调整控制信号,确保输出精准跟踪指令,实现稳定可靠的执行动作。

2 电动执行机构的动态特性分析

2.1 动态特性的定义与评价指标

电动执行机构的动态特性指其输出量随输入指令信号变化的响应特性,反映系统在动态过程中的稳定性、快速性与准确性,是衡量其性能的核心指标。常用评价指标包括阶跃响应特性与频率响应特性相关参数。阶跃响应指标中,上升时间、调节时间反映响应快速性,超调量体现系统稳定性,稳态误差则表征控制精度。频率响应指标中的幅频特性与相频特性,可评估系统在不同频率指令下的响应能力,避免高频指令下出现共振或响应滞后问题。这些指标从不同维度全面反映动态性能,为系统优化提供量化依据。

2.2 动态建模方法

电动执行机构动态建模是分析与优化其特性的基础,常用方法包括机理建模法、系统辨识法及混合建模法。机理建模法基于物理定律,通过分析电机电磁特性、机械传动惯性及阻尼等机理,建立微分方程形式的数学模型,该方法物理意义明确,但对复杂结构建模难度大。系统辨识法通过采集输入输出数据,利用最小二乘法、神经网络等算法拟合系统模型,无需深入了解内部机理,适用于复杂工况,但依赖大量高质量数据。混合建模法结合两者优势,对明确机理部分采用机理建模,对复杂不确定部分采用辨识建模,兼顾精度与实用性,是当前主流建模方式。

2.3 动态特性影响因素

电动执行机构动态特性受多方面因素综合影响，主要包括机械与控制两大维度。机械方面，传动机构的间隙与摩擦会导致死区特性，增大控制滞后；电机与负载的惯性不匹配易引发超调或振荡；部件磨损则会使动态特性随运行时间劣化。控制方面，控制器参数整定不合理会直接影响响应速度与稳定性，如PID参数过大易导致超调，过小则响应迟缓；反馈检测单元的精度与采样频率不足，会使系统无法及时准确获取运行状态，降低调节精度^[2]。另外，供电电压波动、环境温度变化等外部因素，也会通过影响电机性能间接改变动态特性。

3 动态特性优化与控制策略

3.1 传统控制方法的局限性

电动执行机构传统控制方法以PID控制为主，其结构简单、调试便捷，在常规工况下能满足基本控制需求，但在复杂场景中存在明显局限性。首先，PID控制基于线性系统假设，而执行机构存在死区、饱和等非线性特性，易导致控制精度下降。其次，其参数多为固定值，当负载、工况发生变化时，难以实现自适应调节，鲁棒性不足。再者，对于多变量耦合、大惯性系统，传统PID控制无法有效平衡快速性与稳定性，易出现超调量大、调节时间长等问题，难以适配现代工业对高精度、高动态性能的需求。

3.2 先进控制策略

3.2.1 自适应控制

自适应控制是一种高度智能化的控制策略，它通过实时监测系统运行状态与工况变化，动态调整控制参数或结构，以适应系统特性的动态变化，有效弥补了传统固定参数控制的不足。其核心在于两大模块：参数辨识模块与控制律更新模块。参数辨识模块如同系统的“感知器官”，持续采集系统运行数据，实时估算系统动态参数（如电机惯量、减速器传动效率等）；控制律更新模块则依据辨识结果，自动调整控制策略（如PID参数、反馈增益等），确保系统始终处于最优控制状态。针对电动执行机构，当负载波动（如阀门开度变化导致负载扭矩突变）或部件老化（如齿轮磨损导致传动间隙增大）引发特性变化时，自适应控制能快速响应并优化参数，避免系统性能下降，其无需人工重新整定参数的特性使其鲁棒性显著增强，特别适用于工况复杂、参数时变的工业场景（如化工反应釜温度控制、电力锅炉风门调节等）。

3.2.2 模糊控制

模糊控制是一种基于模糊数学理论的智能控制方法，它将专家经验转化为模糊规则，通过模糊推理实现

对非线性、不确定性系统的有效控制，与电动执行机构的特性高度契合。该方法无需建立精确数学模型，对系统中的死区（如阀门启动时的静摩擦区）、摩擦（如齿轮传动中的滑动摩擦）等非线性因素具有天然的适应性。在实际应用中，模糊控制首先将指令与反馈的偏差（如目标开度与实际开度的差值）及偏差变化率（如开度变化速度）模糊化，划分为“大”“中”“小”等模糊集；再依据预设的模糊规则（如“若偏差大且变化率大，则增大控制量”）进行推理，得到模糊控制量；最后经解模糊处理（如重心法、最大隶属度法）将模糊量转换为精确控制信号，输出至执行机构^[3]。模糊控制能快速响应动态变化，有效抑制超调（如避免阀门开度超过目标值），尤其在复杂工况（如高温、强振动环境）下，其控制效果优于传统PID控制，可显著提升执行机构的动态调节精度（如将定位误差从 $\pm 0.5^\circ$ 降低至 $\pm 0.1^\circ$ ）。

3.2.3 模型预测控制（MPC）

模型预测控制（MPC）是一种基于滚动优化与反馈校正机制的先进控制策略，通过预测未来系统行为并优化当前控制量，实现对系统的精准控制，特别适用于存在约束条件的电动执行机构控制场景（如电机转速上限、输出行程限制等）。其核心流程可分为三步：首先，利用系统模型（如机理模型或实验拟合模型）预测未来一段时间内的输出响应（如阀门开度变化曲线）；其次，结合控制目标（如最小化调节时间、超调量）与约束条件（如电机扭矩限制、机械限位保护），通过优化算法（如二次规划、动态规划）求解最优控制序列；最后，仅执行当前时刻的控制量（如电机电压或电流），下一时刻基于新的测量值（如实际开度反馈）校正模型并重复优化过程。MPC的优势在于能有效处理多变量耦合（如同时控制多个执行机构）与约束问题，提前规避超调风险（如通过预测避免阀门开度过冲），使执行机构在快速响应（调节时间缩短30%以上）的同时保持稳定（超调量降低50%以上），满足高精度控制需求（如半导体制造中的阀门定位精度达0.01mm）。

3.3 硬件优化设计

硬件优化设计是提升电动执行机构动态特性的基础保障，主要围绕动力单元、传动单元及检测单元展开。动力单元方面，采用高性能永磁同步伺服电机替代传统异步电机，其具有转动惯量小、torque密度高的特点，可提升响应速度；配置宽范围自适应电源模块，增强电压波动适应性。传动单元通过采用精密滚珠丝杠、谐波减速器减少传动间隙与摩擦，选用轻质高强度材料降低惯性负载。检测单元升级为高精度绝对值编码器，提升

位置检测精度与采样频率；增设温度、振动传感器，实现多参数监测。另外，优化散热结构设计，避免高温导致的性能衰减，全方位提升硬件性能。

4 挑战与未来发展趋势

4.1 当前技术挑战

4.1.1 高精度与高速度的矛盾

当前电动执行机构发展面临高精度与高速度的核心矛盾，两者在物理特性上存在相互制约。追求高速度时，电机转速与传动速度提升，易导致系统惯性增大，加上机械振动、负载扰动等因素，难以精准控制输出位置，降低控制精度。若侧重高精度控制，需通过减小控制步长、增强阻尼等方式实现，但会牺牲响应速度，导致调节时间延长。这一矛盾在精密制造、半导体等对速度与精度均有严苛要求的领域尤为突出，如何突破物理限制实现两者平衡，成为当前技术攻关的重点。

4.1.2 复杂工况下的鲁棒性不足

工业现场的复杂工况对电动执行机构的鲁棒性提出严峻考验，现有技术在极端条件下仍存在明显不足。在高温、高湿、多粉尘环境中，部件易出现绝缘老化、机械卡滞等问题，导致动态特性劣化；强电磁干扰会干扰控制信号与反馈信号，引发控制偏差^[4]。此外，负载的突变、冲击振动等突发情况，易使系统偏离稳定状态，而现有控制策略的自适应速度与调节能力有限，难以快速恢复稳定。复杂工况下的性能稳定性与可靠性，成为限制电动执行机构应用范围的关键瓶颈。

4.2 未来发展方向

4.2.1 智能化：集成AI算法（如深度学习故障预测）

智能化是电动执行机构未来核心发展方向，核心在于集成AI算法实现自主感知、决策与优化。通过嵌入深度学习模型，利用传感器采集的多维度数据，实现故障的早期预测与诊断，提前预警部件磨损、性能衰减等潜在问题，将被动维修转为主动维护。结合强化学习算法，系统可通过自主学习不同工况下的最优控制策略，实时优化控制参数，提升自适应能力。AI视觉技术与执行机构结合，可实现对目标的视觉定位与精准执行，进一步拓展其应用场景，推动智能化升级。

4.2.2 集成化：与物联网（IoT）结合实现远程监控

与物联网（IoT）深度融合实现集成化发展，将大幅

提升电动执行机构的管理效率与运维水平。通过内置物联网模块，执行机构可实时将运行参数、故障信息等数据上传至云端平台，实现远程监控与集中管理，便于运维人员实时掌握设备状态。基于云端大数据分析，可实现设备运行状态的趋势预测与批量参数优化，提升管理的精细化程度。同时，远程控制功能支持运维人员在云端完成参数配置、故障复位等操作，减少现场运维工作量，降低运维成本，尤其适用于偏远或高危环境中的设备管理。

4.2.3 新材料应用：碳纤维传动部件、新型磁性材料

新材料的研发与应用为电动执行机构性能突破提供重要支撑，其中碳纤维传动部件与新型磁性材料应用前景广阔。碳纤维材料具有密度低、强度高、摩擦系数小的特点，替代传统金属制造传动丝杠、齿轮等部件，可大幅降低惯性负载与传动损耗，提升响应速度与耐磨性。新型稀土永磁材料与纳米磁性材料，能增强电机的磁能积与矫顽力，提升电机功率密度与效率，减少能耗与发热。新材料的应用将推动执行机构向轻量化、高效化、长寿命方向发展。

结束语

电动执行机构作为工业自动化的核心执行部件，其工作原理的明晰与动态特性的优化对工业生产效能提升至关重要。本文系统梳理了其组成、工作机制及动态特性影响因素，对比分析了传统与先进控制策略的优劣，指出硬件优化与新技术融合的重要性。未来，通过多学科技术融合与持续创新，电动执行机构将实现性能的全面升级，为工业自动化发展提供更坚实的支撑。

参考文献

- [1]史爱惠,王伟兵,李永华. 川仪RHA-M系列智能电动执行机构在煤气加压中的应用[J]. 山西冶金,2025,48(5): 258-260.
- [2]乔磊. 基于智能型嵌入式电动执行机构控制器设计[J]. 电工技术, 2023(2): 107-108,122.
- [3]吴吉峰,柴大江,等. 电动执行机构自主调试系统的设计[J]. 机械制造, 2022, 60(7):91-93,99.
- [4]孟昊,田亮. 电动执行机构定位精度实时补偿策略[J]. 南方能源建设, 2021, 8(1):80-86.