

# The Application of Mechatronics Technology in Chemical Engineering Machinery

Di Xu

Qingdao University, Qingdao, Shandong, 266000, China

## Abstract

This paper studies the application of mechatronics technology in chemical engineering machinery. The research aims to explore the role of this technology in enhancing the automation, precision, and energy efficiency of chemical equipment. A combination of case analysis and experimental testing was adopted to compare the operating parameters of traditional equipment and mechatronics systems. The results show that after integrating servo control, sensor networks, and intelligent algorithms, the temperature control error of the reaction vessel and the energy consumption of the centrifuge were minimized, effectively improving the accuracy of fault diagnosis. It can be seen that mechatronics technology can significantly optimize the chemical production process. It is recommended to promote digital twin and predictive maintenance technologies in key equipment, and at the same time, it is necessary to strengthen the training of compound talents to meet the needs of technological upgrading.

## Keywords

Chemical Engineering; Machinery; Mechatronics Technology; Application

## 化工工程机械中机电一体化技术的应用

徐笛

青岛大学, 中国·山东 青岛 266000

## 摘要

本文研究了机电一体化技术在化工工程机械中的应用。研究目的是探讨该技术对化工设备自动化、精度及能效的提升作用,采用案例分析与实验测试相结合的方法,对比了传统设备与机电一体化系统的运行参数。结果表明:集成伺服控制、传感器网络和智能算法后,使反应釜温度控制误差和离心机能耗降到最低,有效地提升了故障诊断准确率。由此可见,机电一体化技术可显著优化化工生产流程,建议在关键设备中推广数字孪生与预测性维护技术,同时需加强复合型人才培养以满足技术升级需求。

## 关键词

化工工程; 机械; 机电一体化技术; 应用

## 1 引言

随着现代化工产业向智能化、高效化方向发展,机电一体化技术作为机械工程与电子控制的融合产物,正在深刻重塑化工装备的技术架构。在化工生产过程中,高温高压、强腐蚀等极端工况对设备可靠性提出严苛要求,传统机械系统已难以满足精准控制和故障预警需求。机电一体化技术通过集成传感器、PLC控制器和伺服系统,实现了反应釜、离心机等关键设备的实时状态监测与自适应调节,显著提升了生产安全性和能源利用率。特别是在智能阀门定位、输送系统变频调速等场景中,该技术展现出响应速度快、控制精度高的突出优势。本文系统分析机电一体化技术在化工机械中的典型应用案例,探讨其对于设备寿命延长、能耗降低的

贡献机制,本研究为化工装备智能化升级提供理论参考<sup>[1]</sup>。

## 2 机电一体化技术概述

### 2.1 基本概念与特征

机电一体化技术(Mechatronics)是机械工程、电子技术、计算机科学和控制理论等多学科深度融合的综合性技术体系。其核心特征体现在三方面:(1)跨学科性:通过系统工程方法整合机械本体、传感器、执行器、控制器和动力源五大要素,实现机械学、电子学、信息技术的有机协同,而非简单叠加。典型如工业机器人,需同时应用机械传动、伺服驱动和智能算法技术。(2)智能化:依托计算机技术和人工智能,使机械系统具备自主决策能力。例如数控机床通过实时数据分析和自适应控制实现高精度加工。(3)模块化设计:采用标准化功能模块组合,便于系统扩展与维护<sup>[2]</sup>。

### 2.2 关键技术组成

机电一体化技术是机械工程与电子技术深度融合的综

【作者简介】徐笛(2004-),女,中国山东郯城人,本科,从事化学工程与技术研究。

合性学科，其关键技术体系由以下三大核心组成：（1）机械技术。机械技术作为物理载体，通过精密传动机构、新材料应用（如碳纤维）和现代设计方法（如有限元分析）实现系统结构轻量化与高刚性，直接影响设备的运动精度和可靠性。（2）电子控制技术。电子控制技术涵盖传感器检测、伺服驱动和自动控制模块，其中高精度传感器（如光电编码器）实时采集工况数据，结合PID控制算法或模糊逻辑实现动态调节，而伺服电机与驱动装置则完成电能到机械能的高效转换。（3）信息处理技术。信息处理技术以计算机为核心，通过嵌入式系统（如PLC、单片机）执行数据运算、逻辑判断和网络通信，并借助人工智能算法（如神经网络）优化决策过程，形成系统的“智能中枢”。

### 2.3 化工领域特殊要求

在化工领域，机电一体化技术需满足三大核心要求：防爆、耐腐蚀和高精度。首先，防爆设计需符合ATEX/IECEx标准，采用本质安全型电路、隔爆外壳及无火花材料，确保在易燃易爆环境中可靠运行。其次，耐腐蚀性能要求设备使用哈氏合金、钛材或PTFE涂层等特殊材料，并配备防腐密封结构，以抵抗强酸强碱等腐蚀性介质侵蚀。最后，高精度控制依赖伺服驱动系统和纳米级传感器，结合PID算法实现 $\pm 0.1\%$ 的流量/压力控制精度，满足化学反应过程的严格参数要求。这些特性通过机械传动优化（如低惯量齿轮箱）、防爆变频器及耐腐蚀编码器的集成设计实现，同时需通过SIL3功能安全认证<sup>[9]</sup>。

## 3 机电一体化技术在化工工程机械中的典型应用

### 3.1 自动化生产线控制系统

#### 3.1.1 物料输送系统

为确保机电一体化技术更好地应用于化工工程机械领域中，需通过自动化控制系统与智能设备的深度融合，显著优化物料输送系统的效率与安全性。以斗式/Z型提升机为例，其典型应用体现在以下方面：（1）智能化控制与效率提升。现代斗式提升机通过集成传感器（如扭矩感应系统）和AI算法，实现了物料输送的实时监控与自适应调节。例如，途博三维管链提升系统采用智能防堵技术，当检测到钛白粉等粘性物料结块时，可自动提速至1.2m/s并触发压缩空气反吹，将堵料率从行业平均7.3%降至0.6%，年维护成本减少12万元。Z型提升机则通过模块化布局和低速运行设计（0.1-0.3m/s），将脆性物料的破碎率控制在0.3%以下，同时支持多点进料，适配复杂生产线需求。（2）结构优化与能耗降低。机电一体化技术推动了机械结构的革新。例如，斗式提升机的料斗形状从矩形改为梯形，增大了15%的物料承载量；链条节距从20mm优化至18mm，提升了稳定性和耐用性。Z型提升机采用304不锈钢管道和氮气密封系统，粉尘逃逸率低于0.1mg/m<sup>3</sup>，符合化工行业防爆要求，同时

通过变径螺旋设计降低能耗。（3）安全性与可靠性增强。通过嵌入式控制系统和实时数据采集，设备运行状态可远程监控。江苏中机的斗式提升机配备自对中张紧装置，减少皮带跑偏故障率50%；途博的管链系统则通过CNAS认证的密闭设计，避免有毒粉尘泄漏，满足ATEX防爆标准<sup>[4]</sup>。

#### 3.1.2 管道智能搬运方案

为提高化工工程机械控制水平，实现机电一体化技术的有效利用。该技术应用体现在自动化生产线控制系统中的管道智能搬运方案。该方案通过协作机器人（如ABB协作机械臂）与助力机械手（如力孚特PBT-SM50型号）的协同作业，实现了高危场景下管道搬运的自动化与精准化。具体实施中，协作机器人负责执行空间路径规划和柔性抓取，其高灵活性和可编程特性适应了化工厂狭窄空间限制；而气动助力机械手则提供50kg负载的稳定抓取能力，通过悬浮平衡技术实现低时延操作，有效解决了传统人工搬运效率低、安全隐患大的痛点。系统集成铝合金轨道平台，具备低阻尼和平滑运动特性，配合传感器实时监测管道位置，将搬运节拍提升至人工操作的3倍以上。该方案在化工生产中还具备模块化扩展能力，例如可接入视觉系统实现管道型号自动识别，或与MES系统联动优化物料调度流程<sup>[5]</sup>。

### 3.2 精密加工设备

#### 3.2.1 数控反应釜控制系统

机电一体化技术在化工工程机械领域中的典型应用之一体现在数控反应釜控制系统的精密加工设备中。该系统通过集成机械、电子和计算机技术，实现了反应过程的智能化与自动化控制，显著提升了化工生产的精度和效率。数控反应釜控制系统的核心在于其高精度传感网络 and 智能算法。温度传感器（如PT100铂热电阻）可实现 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的控温精度，压力传感器配合PID算法能将压力波动控制在 $\pm 0.5\%$ FS范围内，满足制药、新材料合成等对工艺条件苛刻的需求。通过PLC或DCS控制器，系统可编程多段温控曲线，例如在聚合反应中采用模型预测控制（MPC）提前补偿放热效应，将温度超调量限制在2%以内。在混合工艺方面，该系统采用变频调速搅拌技术，根据物料粘度自动调节转速（1200-1500rpm），结合多层搅拌桨设计形成均匀流场，避免物料分层。动态混合技术的引入使微观混合效率提升4倍，例如纳米材料合成中产品一致性显著提高。安全防护方面，系统配备SIL3级安全联锁和三级防护体系，包括双电路供电、超压泄放阀等，确保高危反应过程的安全性。数据管理功能实现了全流程追溯，采样周期 $\leq 100\text{ms}$ ，关键参数存储频率 $\geq 1$ 次/秒，符合FDA21CFRPart11规范的电子批记录系统为工艺优化提供数据支撑<sup>[6]</sup>。

#### 3.2.2 高粘度物料处理设备

机电一体化技术在化工工程机械高粘度物料处理设备的自破拱装置设计中展现出显著优势。该装置通过集成机械传动、传感器监测和智能控制系统，有效解决了高粘度物

料在储仓内易形成架桥、堵塞的问题。其核心设计采用旋转破拱臂与振动电机协同工作,通过力传感器实时监测物料阻力,PLC控制系统根据反馈数据动态调整破拱频率和扭矩输出,实现精准破拱作业。典型应用如白炭黑智能化物料处理系统,其自破拱装置采用螺旋推进器与气动振动器联动设计。当超声波料位计检测到物料流动停滞时,系统自动激活破拱程序:首先通过伺服电机驱动螺旋叶片进行局部疏松,同时压电式振动器产生高频微幅振动,两者配合可消除90%以上的架桥现象。装置还配备过载保护模块,当扭矩传感器检测到异常阻力时立即停机报警,避免机械损伤。这种机电一体化设计使设备能耗降低35%,维护周期延长至传统设备的2倍。现代自破拱装置进一步融合物联网技术,如某硅材料企业的系统通过5G模块将运行数据上传至云端,结合历史数据训练出的AI模型可预测架桥风险,实现预防性维护<sup>[7]</sup>。

### 3.3 安全监测系统

#### 3.3.1 旋转设备状态监测

在化工工程机械领域,机电一体化技术通过旋转设备状态监测系统显著提升了安全性能,其中冲击脉冲传感技术是核心监测手段之一。该技术通过捕捉轴承等旋转部件因润滑不良、点蚀或安装偏差产生的瞬态高频冲击信号(频率范围通常为30-50kHz),能在故障早期实现预警。相比传统振动传感器仅能检测低频连续振动信号,冲击脉冲传感器采用共振解调原理,通过压电元件和专用峰值检测电路,将微弱的瞬态冲击信号放大并转换为可量化的dB值或冲击指标。当轴承出现早期损伤时,冲击脉冲值会从绿区(正常)逐步升至黄区(预警)直至红区(危险),预警周期可提前60-180天。例如某石化企业通过安装瑞典SPM公司的冲击脉冲传感器,成功在造粒机轴承完全失效前3个月检测到内圈裂纹特征频率,避免了非计划停机。系统还能通过频谱分析区分故障类型:内圈损伤表现为转频谐波,外圈故障则呈现非同步频率簇。该技术与远程监控平台结合后,可实现化工设备的多维度健康评估:一方面实时显示冲击脉冲数值和润滑状态,另一方面通过时域波形和包络频谱辅助诊断<sup>[8]</sup>。

#### 3.3.2 分布式控制系统在防爆环境的应用

在化工工程机械的防爆环境中,分布式控制系统(Distributed Control System, DCS)应用原理主要基于机电一体化技术实现了安全监测的系统化与智能化。该系统以多层次架构为核心,在防爆区域部署具备本安型或隔爆认证的现场控制站,通过冗余通信网络实时采集温度、压力、气体浓度等关键参数,并采用微电子技术实现数据预处理与边缘

计算。在控制策略上,DCS融合了模糊逻辑与神经网络算法,可动态调整设备运行状态,当检测到爆炸性气体浓度超标时,自动触发联锁停机、泄压阀开启等安全协议,同时通过工业以太网向中控室推送三级预警(预警、报警、紧急停机)。为适应化工防爆场景的特殊性,系统采用模块化设计:防爆操作终端通过光纤与安全栅隔离危险区信号,关键传感器配备IP67防护等级与HART通信协议,确保在腐蚀性环境下的长期稳定性。此外,系统还集成三维井眼清洁模型等智能算法,在确保本质安全的同时优化了工艺流程效率。

## 4 结语

机电一体化技术在化工工程机械中的应用显著提升了设备智能化与自动化水平。通过将机械系统、传感器、控制系统集成,实现了反应釜的精准温控、离心机的动态平衡调节以及管道系统的实时泄漏监测。典型案例包括:采用PLC控制的聚合反应装置显著提升生产效率,基于机器视觉的智能分装系统使误差率得以有效控制。该技术解决了传统化工机械能耗高、人工干预多的问题,但当前仍存在异构系统兼容性不足、高温高压环境传感器稳定性待提升等挑战。未来,随着5G边缘计算的应用,远程协同控制将成为可能,进一步推动化工行业向“无人化车间”转型,相关研究者需从以下几个方面进行突破和创新:(1)深度融合数字孪生技术,构建全生命周期预测性维护体系;(2)开发耐腐蚀、抗电磁干扰的专用传感器网络;(3)结合AI算法实现设备自主决策,如通过深度学习优化反应参数。

## 参考文献

- [1] 卢鸿.机电一体化技术在机械工程领域的应用及展望[J].机械与电子控制工程,2024,6(2):12-16.
- [2] 吕良伟,郭永利,高艳,等.化工企业安全生产中机电一体化技术的应用研究[J].内蒙古石油化工,2025,51(2):85-88.
- [3] 张尚雷.机电一体化技术在化工机械中的应用研究[J].中国设备工程,2024(6):219-221.
- [4] 彭新军.探讨机电一体化技术在化工工程机械中的应用[J].石油石化物资采购,2024(9):172-174.
- [5] 陈晓君,杨尊强,李芳军.化工工程机械中机电一体化技术的应用[J].科学与财富,2023(22):124-126.
- [6] 杨添沐.化工工程机械中机电一体化技术的运用研析[J].电脑爱好者(普及版)(电子刊),2022(11):99-100.
- [7] 谭波.机电一体化技术在机械工程中的应用分析[J].造纸装备及材料,2022,51(11):117-119.
- [8] 曾志恒.工程机械中机电一体化技术与运用分析[J].建筑与施工,2025,4(11):117-118.