

# 机电一体化技术在智能制造生产线中的集成应用

胡翔<sup>1</sup> 吕正斌<sup>2</sup>

1. 浙江英洛华康复器材有限公司 浙江东阳 322118

2. 浙江联宜电机有限公司 浙江东阳 322118

**摘要:** 机电一体化技术作为支持智能制造的关键核心技术,其多领域交叉的特点正对现代工业体系进行深刻的新构建。制造业朝着灵活化、智能化转变的急切需求,促使机电系统的集成程度不断加深,传统生产方式在反应速度、资源利用效率和定制生产能力方面面临着多重阻碍。将重点放在智能制造生产线的实际情况上,机电一体化技术通过把机械动力学、实时控制以及信息物理系统相融合,来实现生产要素的协同优化。本文的目的是系统地分析该技术在智能生产线中的集成方式,探寻高适应性生产系统的构建思路,为制造企业的技术升级提供理论方面的参考。

**关键词:** 机电一体化集成; 智能制造生产线; 直流电机电动轮椅; 柔性制造系统

## 引言

全球制造业的竞争模式正快速向整个生产流程智能化的方向发展,机电一体化技术依靠其跨领域融合的能力,成为智能制造得以实施的关键载体。机械系统、传感检测、控制算法和信息通信的深入集成,让生产线具备了动态调整和自主决策的特点。例如在电动轮椅车(如W5907、W5913A等型号)的制造中,直流电机作为核心驱动部件所具有的高精度转矩控制特性,极大地提高了执行机构的反应质量;其小型化、轻量化(净重可达16.8–23kg)与高载重(136–150kg)的设计需求,进一步推动生产线向灵活配置与模块化方向发展。深入研究技术集成的原理,对于解决多品种、变批量生产的难题具有关键作用。

## 一、机电一体化技术的基础理论

### (一) 关键技术组成

#### 1. 机械系统

机械系统构成机电一体化的物理骨架,其结构刚度与动态特性直接决定设备负载能力与运动精度。直流电机作为核心驱动源嵌入机械传动链时,转子惯量与负载扭矩的匹配设计消除谐振风险,例如在电动轮椅车(如

WS521型号)的轻量化合金底盘设计中,机械拓扑优化显著提升了复杂路况下的结构适应性。精密轴承与减震组件的协同布局抑制多轴联动产生的谐波干扰,这种刚性柔性融合设计保障了长期运行中微米级重复定位稳定性<sup>[1]</sup>。

#### 2. 传感与检测技术

传感与检测技术构建系统的神经末梢,实时捕获物理信号转化为可处理数据流。鉴于反馈精度直接决定闭环控制效能,高分辨率编码器与电流传感器嵌套在直流电机后端,持续监测转子相位与绕组温升。在如K350等轮椅车型号中,霍尔元件阵列分布于关节与驱动轮毂处,实现多维力矩的毫秒级采样与状态反馈。多源异构传感器的时空同步机制,让钢铝构件的应力形变与电气参数形成耦合映射。

#### 3. 控制技术

控制技术承担决策中枢职能,算法模型将传感数据转化为执行指令。直流电机特有的反电动势特性要求控制器具备非线性补偿能力,空间矢量调制技术通过动态调整PWM占空比维持转矩平稳。例如在电动轮椅车的斜坡防倒退功能中,采用模糊PID控制算法,根据实时倾角动态调整电机电流限幅,在确保安全的同时优化动力响应。

#### 4. 信息处理与通信技术

信息处理与通信技术实现数据价值萃取与系统互联。工业以太网协议穿透机械控制层与信息层的传统壁垒,直流电机运行日志中的电流纹波特征经边缘计算节点提取后,成为预测碳刷磨损的关键指标。在电动轮椅车生产线中,采用OPC UA架构实现拧紧扭矩数据与云端质量管理系统的双向同步,确保如W5526等高配置车型的装配一致性。

## 作者简介:

胡翔(1984.02-- )男,汉族,安徽省安庆市人,本科,工程师,主要研究方向:机电制造一体化。

吕正斌(1989.02-- )男,汉族,浙江东阳人,本科,工程师,主要研究方向:机电制造一体化生产线规划与工艺集成。

## 5. 执行机构与驱动技术

执行机构与驱动技术最终完成能量转换使命，机电耦合效率直接影响系统能耗水平。永磁直流电机（如80ZY/81JC、86/88JC等系列）凭借高功率密度与可定制化转矩输出（扭矩范围9.7–28 N.m），在电动轮椅车驱动系统中实现高效能量转换与堵转保护。智能功率模块集成栅极驱动与过热保护功能，让MOSFET开关损耗降低的同时确保紧急制动工况下的能量回馈安全。热管理设计使铜损铁损转化的热量被导流至壳体散热鳍片，这种能量路径优化大幅延长电枢绕组寿命。

### （二）系统集成原理与方法

#### 1. 硬件集成

直流电机作为执行终端必须实现物理接口的无缝兼容，其功率端子与编码器接头的标准化设计构成设备互联基础。在电动轮椅车生产线中，不同工位的伺服驱动器需匹配多种型号电机绕组参数，这要求机械安装基座预留模块化卡槽，电气接口则采用可配置引脚定义。硬件集成的本质在于建立物理层通用对话规则，使得来自不同供应商的直流减速电机或直线模组能够脱离专用转换器直接接入控制网络。

#### 2. 软件集成

多台直流电机在轮椅车装配线上协同运动时，其控制指令需穿透设备品牌壁垒。软件层通过封装动态链接库实现核心算法共享，例如将永磁直流电机的换向补偿算法抽象为标准功能块。考虑到轮椅车后桥总成装配工序需要三台电机同步定位，运动控制器必须解析不同厂商设备的通信协议差异，将CANopen与Modbus报文转换为统一时序指令。这种跨平台交互能力依赖中间件对底层驱动的虚拟化处理，最终在HMI界面形成直观的电机扭矩波形监控视图，避免工程师为每种设备编写独立控制逻辑。

#### 3. 信息集成

电动轮椅车制造过程产生的电机性能数据与装配参数具有强关联性，信息集成架构需打通从传感器到ERP系统的垂直通道。每条轮椅车架通过RFID携带的工艺参数，实时触发对应工位直流电机的转速曲线调整，这种数据驱动模式取代了传统的机械限位控制<sup>[2]</sup>。当质量系统检测到轮毂电机空载电流异常时，MES将自动冻结该批次装配流程并追溯前道工序的轴承压装数据。构建此类信息流的关键在于定义电机振动频谱与车架焊接参数等异构数据的语义映射关系，确保温度传感器读数与电机绝缘寿命预测模型能共享同一时钟基准。

### （三）机电一体化与传统自动化生产的区别

传统产线依赖纯机械连锁实现固定工序流转，需要

预设大量物理限位器与凸轮机构，这种刚性结构在多规格电动轮椅车（如轻便型W5913A与加强型WS521）生产中频繁引发产线停工改造。机电结合的系统借助直流电机的伺服控制给设备带来灵活调整的能力，因为驱动器能在线修改运动轨迹，所以同一条装配线可以满足儿童轮椅车轻便底盘和成人款加强车架不同的扭矩要求。两者的关键不同在于信息流的闭环建立，传统系统只传送简单的启动和停止信号，而机电系统能让每台电机实时反馈绕组温度和振动频谱。当轮椅车检测工位发现轮毂阻力出现异常情况时，这些数据会马上促使上游拧紧工序修改参数，而不是被动地等待质检报告，所以实现自适应优化成为了可能。它的价值在直流电机从单纯的动力输出部件变成智能执行节点的过程中体现出来，设备状态数据直接参与决策，让生产线拥有了应对突然订单变更的适应能力。

## 二、智能制造生产线的关键需求

### （一）高柔性化与可重构性

电动轮椅车订单常包含数十种定制配置，传统产线因设备布局固化难以应对频繁的型号切换。机电一体化系统凭借模块化设计理念，允许直流电机驱动单元通过快换接口实现物理重构，例如将标准型轮毂电机工位替换为大扭矩爬坡型号仅需调整定位销位置。这种柔性能力延伸至控制层面，当产线切换至儿童轮椅车生产时，伺服驱动器自动载入对应的转速曲线参数，避免重新烧录PLC程序。其核心价值在于减少工装切换导致的停产损失，使得小批量定制订单具备经济可行性。

### （二）实时数据采集与监控

直流电机绕组温度与振动频谱的持续监测关乎轮椅车长期可靠性，但传统点检方式存在数据滞后缺陷。集成霍尔传感器与电流环的智能驱动器构成数据源基础，每台装配中的轮椅车架携带RFID标签记录电机空载测试数据。当总装线拧紧工序进行时，力矩扳手读数与对应轮毂电机的序列号即时绑定，任何超出公差范围的数值会触发声光报警。这种全流程数据透明化使质量工程师能够追溯散热风扇异响问题至三天前的磁钢装配工序，大幅压缩故障诊断周期。

### （三）自适应控制与优化

轮椅车路试环节发现电机过热问题往往源于生产阶段的过电流工况，自适应系统通过动态调整PID参数避免该风险。当检测到某批次永磁直流电机转子电阻偏高时，控制系统自动降低堵转保护阈值并延长加速斜坡时间。更复杂的优化体现在多电机协同场景，前轮转向电机与后轮驱动电机的扭矩分配比依据车架重量实时计算，这种即时响应能力使产线能处理特制运动型轮椅的加强

底盘而不需额外调试。

#### (四) 人机协作与安全

装配工人手动安装轮椅电池组时，协作机器人的力反馈系统确保直流电机的供电线缆不被意外拉扯。安全光幕与电机使能信号的联锁设计构成双重保障，一旦操作者手臂进入机械臂工作半径，24V控制回路立即切断电机驱动电源。人机交互界面则用图形化显示各工位电机负载率，当连续三台轮椅的左轮毂电机呈现异常波动时，系统自动弹出轴承安装指导视频，这种智能辅助显著降低新员工操作失误率<sup>[9]</sup>。

#### (五) 能源效率与可持续性

永磁直流电机在轮椅车产线的密集启停导致电能浪费突出，再生制动技术的应用将减速过程动能转化为电容储能。通过分析不同车架配重的惯量参数，伺服系统动态优化电机制动曲线，使能量回收效率提升至理论最大值。夜间维保时段的待机能耗管理同样关键，所有非生产状态的电机驱动器自动切换至微安级休眠模式，其唤醒响应时间仍满足突发加班订单的应急启动需求，这种精细化管理使单台轮椅车制造的综合能耗下降明显。

### 三、机电一体化技术在智能制造生产线中的集成应用

#### (一) 智能加工单元

直流电机定子绕线工序的精度直接影响轮椅车驱动性能，传统人工操作难以保证漆包线张力一致性。集成机器视觉的自动绕线机通过实时分析线槽填充率，动态调整伺服电机的旋转速度与送线机构位移量。当处理高强度越野轮椅车型时，系统自动切换至增强型绕线模式，增加绝缘漆涂层厚度并延长烘烤时间。这种自适应加工能力使同一设备可处理电动车窗电机与轮椅驱动电机两类差异显著的电磁组件，显著降低专用设备的资金投入。

#### (二) 自动化物料输送系统

轮椅车装配线上的电机与控制器存在重量差异，气动搬运机械手需动态调整抓取参数。基于RFID的智能料架自动识别待转运物料类别，若扫描到重型轮毂电机标签则激活双气缸增压模式。AGV小车路径规划系统关联生产节拍数据，在直流电机测试工位出现排队时自动开辟临时物流通道。物料状态看板同步显示各型号轮椅车架的定位坐标，仓库人员据此提前备料避免总装线因缺件停滞，这种动态响应机制使日均产能波动幅度压缩近半。

#### (三) 在线检测与质量控制

轮椅车后桥总成的同轴度误差会导致电机轴承早期磨损，激光测量站每三十秒采集一次传动组件装配数据。当检测到差速器法兰偏摆量超标时，系统立即锁定当前工位并调取前道工序的压装曲线。质量数据中心建立车

架焊接变形量与电机振动频谱的关联模型，在新订单启动时自动生成关键控制点清单，预防性质量管控使售后故障率持续走低。

#### (四) 生产线控制系统

多型号轮椅车混产要求控制系统动态配置电机驱动参数，OPC UA协议打通了PLC与伺服驱动器间的数据壁垒。当切换至爬坡增强型轮椅装配时，系统自动载入大扭矩电机的电流环增益系数与过热保护阈值。数字孪生平台实时模拟不同生产节拍下的设备负载状态，预测到电机冷却系统瓶颈便提前调整风扇转速。这种虚实联动使突发性订单增量不再导致设备过载跳闸，生产线吞吐量弹性提升至全新维度。

#### (五) 预测性维护与健康管理

轮毂电机轴承的早期失效严重影响轮椅车产品口碑，振动传感器采集的时域波形经傅里叶变换生成特征频谱。当识别出保持架损伤特征频率分量时，系统自动预约维护窗口并调取同型号轴承库存。直流电机碳刷磨损监测采用电流纹波分析法，其预测精度超越传统计时保养模式三个数量级。维护工单与生产计划的智能协同确保更换电刷作业在夜班物料补给时段完成，意外停机时长因此缩减至可忽略范围。

### 结语

机电一体化技术在智能生产线中的深入应用，已经展现出其对制造模式进行重构的变革性价值。通过将具体的产品工程参数（如多样化的轮椅车型号、电机系列规格及其性能指标）深度融入机电系统的设计、控制与运维全流程，实现了生产线在柔性、效率与可靠性方面的显著提升。本文以电动轮椅车智能制造为例，系统阐述了机电一体化技术在硬件接口标准化、软件功能模块化、信息流垂直集成等方面的实践路径，揭示了其在应对多品种、变批量生产挑战中的核心作用。尤其在柔性可重构产线、实时监控与自适应控制、以及预测性维护等环节，机电一体化不仅解决了传统自动化系统中的刚性瓶颈，更通过数据驱动与智能决策，赋予了制造系统感知、分析与优化的能力。

### 参考文献

- [1] 鲁鑫, 陈哲凯. 机电一体化技术在智能制造中的应用[J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(11): 106-108.
- [2] 陈建华. 机电一体化技术在汽车智能制造中的应用[J]. 汽车知识, 2025, 25(10): 157-159.
- [3] 王旭, 佟晟. 机电一体化技术在智能制造中的应用[J]. 呼伦贝尔学院学报, 2025, 33(04): 89-93.