

# 机电自动化装配线技术集成与工艺技术研究

吕正斌<sup>1</sup> 胡翔<sup>2</sup>

1. 浙江联宜电机有限公司 浙江东阳 322118

2. 浙江英洛华康复器材有限公司 浙江东阳 322118

**摘要:** 随着制造业智能化改造升级方面的需求越来越大, 机电自动化装配线的技术整合成为提高精密设备生产效率的关键途径。研究把目光放在直流电机和电动轮椅车等有代表性的机电产品的装配情况上, 对生产线的结构设计准则和工艺优化思路进行全面分析, 目的是建立具有高适应能力的技术整合方案, 来应对生产品种多样、批量变化的生产难题。通过对硬件协同控制和软件数据闭环的深度融合机制进行研究, 结合本公司多款电动代步车(如W5907、W5913A、W5526、WS521等型号)及其驱动电机(如80ZY/81JC、86/88JC、105JD、126JD等系列)的实际生产与集成经验, 为行动辅助设备制造领域提供可重复使用的技术实施框架。

**关键词:** 机电自动化装配线; 系统集成; 工艺优化; 直流电机

## 引言

目前, 机电产品制造过程中面临着装配精准度和生产灵活性两方面的限制, 特别是对于包含精密传动部件的直流电机和由多个模块组成的电动轮椅车, 传统生产线存在工艺适应能力不够的明显问题。本文从自动化装配线系统结构出发, 深入融合传感控制和数据分析技术, 探寻机器人协同工作以及动态工艺优化的实现方式。这种技术整合模式致力于解决动力装置和承载结构的装配关联问题, 并以本公司碳纤维(如W5913A)、铝合金(如WS521)等材质车架与不同功率直流电机(250W双电机、24V/180-350W系列减速电机)的集成装配为具体研究对象, 推动机电制造向自主做出决策的方向发展。

## 一、机电自动化装配线的系统架构

### (一) 总体设计原则与集成思路

机电自动化装配线的设计核心在于协调硬件功能与软件逻辑的深度融合, 尤其需适配直流电机精密元件装配与电动轮椅车多模块集成的差异化需求。微型直流电机的换向器组装要求微米级定位精度, 电动轮椅车车架

总成则需应对大尺寸工件的柔性定位, 这要求系统架构采用分层递进式集成策略。底层硬件配置优先保障关键工艺点的执行可靠性, 例如针对电机转子动平衡校正开发专用夹具, 为轮椅车减震器安装设计主动柔顺机构。中间层控制网络需打通PLC逻辑与机器人轨迹规划的实时交互, 确保电刷缠绕工序的张力控制信号与车架螺栓拧紧的扭矩反馈形成闭环。上层数据系统通过MES接口整合生产指令与质量参数, 使电机绕线匝数偏差和轮椅车驱动轮对中度数据可追溯可干预, 最终构建覆盖从零件上料到成品测试的全流程自主决策能力, 并成功应用于载重136-150kg、续航20-30km的系列电动代步车总装线中<sup>[1]</sup>。

### (二) 硬件系统构成

#### 1. 机械结构

鉴于直流电机换向器组装对微米级精度的严苛要求, 传送系统采用气浮导轨与伺服定位模组复合架构消除机械振动影响, 同时针对电动轮椅车焊接框架的异形结构开发自适应随行托盘夹具。装配机器人单元依据产品差异灵活配置, 微型谐波减速机型机器人负责电机碳刷的精准嵌入, 而大负载关节机器人则完成轮椅车底盘动力总成的举升对位, 这种模块化设计使得产线切换电机型号或适配轮椅车新款骨架时只需局部重构工装。

#### 2. 传感与检测系统

视觉定位系统通过亚像素边缘提取技术捕捉电机换向片间距偏差, 同步利用3D激光扫描生成轮椅车架焊接接缝的拓扑数据。力觉反馈单元在电机轴承压装过程中实时监测轴向应力变化曲线, 并在轮椅车减震器螺栓锁

## 作者简介:

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。

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。

附阶段自动补偿工件形变导致的力矩衰减。多源传感数据经边缘计算网关融合处理后，既能触发电机绕线张力的动态调节，又可预警轮椅车驱动轮装配的同轴度偏移风险。此系统有效保障了采用免充气轮胎（6.5”-11.8”）的不同型号车辆其驱动轮组的装配一致性。

### 3. 控制与驱动系统

PLC主站通过EtherCAT总线同步32轴伺服运动控制，对于电机转子动平衡工序的极坐标插补运动生成 $0.1^\circ$ 角度分辨率指令，而轮椅车转向机构测试工位的多缸联动则依赖运动控制器轨迹规划算法消除机械干涉。伺服驱动器的自适应增益调谐功能应对电机磁钢粘贴工艺的变负载特性，其电流环带宽动态匹配轮椅车齿轮箱装配的冲击负载谱，由此建立的闭环控制系统使微型电机绕组的匝间绝缘检测与轮椅车整机振动测试共享同一套诊断协议。

### （三）软件系统设计

#### 1. 控制逻辑与编程

PLC程序采用状态机模型管理直流电机绕线工序的启停时序，当检测到漆包线张力超出阈值时自动切入补偿算法，而电动轮椅车底盘合装流程则通过机器人动态路径规划避开线束干涉区域<sup>[2]</sup>。机器人控制系统依据电机磁钢粘接面的点云数据生成三维堆叠轨迹，同步为轮椅车扶手管件折弯工序计算最小应变路径，这使得微型电机的叠片间隙控制与车架焊接变形量抑制共享同一套优化逻辑。

#### 2. 数据采集与监控系统

SCADA系统通过OPC-UA协议采集电机转子动平衡机的振动频谱，同时整合轮椅车耐久测试台的负载循环数据。MES层的工艺看板将电刷弹簧压力曲线与轮椅车刹车扭矩波形并行动态显示，当电机绕组匝数统计值偏离标准序列时触发预警，轮椅车驱动轮跑偏数据则自动关联螺栓锁紧工位的参数修正，构建从部件装配到整机测试的质量联控机制。该系统实现了对80ZY/81JC、105JD等系列电机负载电流（ $\leq 11.5\text{A} - \leq 30\text{A}$ ）、扭矩（ $9.7\text{N}\cdot\text{m} - 28\text{N}\cdot\text{m}$ ）关键参数的全程监控与追溯。

#### 3. 人机交互界面设计

操作终端为电机换向器抛光工序设计力控参数滑动条，其背景色随抛光电流的谐波畸变率梯度变化，电动轮椅车总装界面则用三维模型高亮显示待安装电池仓的定位标识。故障诊断页面整合电机过流保护历史记录与轮椅车胎压异常图谱，维护人员既可直接调取磁钢粘贴的温湿度时序曲线，又能回溯车架校正工位的液压压力波动特征，形成跨产品类别的知识沉淀体系。

## 二、关键技术集成研究

### （一）多机器人协同控制技术

直流电机转子绕线与换向器压装工序要求两台机器人精确传递漆包线端头，其运动轨迹通过李雅普诺夫算法实现毫秒级同步，电动轮椅车底盘合装线则采用吊装机器人与定位机器人形成力位混合控制闭环。当主机器人抓取电机壳体旋转时，从动机械臂依据电流反馈动态调整送丝张力，轮椅车电池仓安装过程通过空间位姿解耦算法避免机械臂与车架干涉，由此建立的协同机制可适应电机多规格绕线模具切换和轮椅车变型支架装配需求。该技术在本公司K350（WS521）等车型的“八重避震方案”复杂底盘装配中发挥了关键作用。

### （二）高精度定位与柔顺装配技术

微型直流电机换向片的 $0.01\text{mm}$ 定位公差依赖激光跟踪仪闭环校正，其反馈信号触发压装头的纳米级微位移补偿，电动轮椅车减震弹簧装配则通过六维力传感器识别工件形变特征。主动柔顺机构在电机碳刷嵌入阶段自动削弱触点冲击载荷，轮椅车坐垫锁扣安装过程根据压力分布梯度调节插入角度，这种复合控制策略既保障微型电机组件的脆弱结构安全，又满足大尺寸车身部件的弹性装配要求。

### （三）机器视觉在质量检测与引导中的应用

电机磁钢极性检测采用多光谱成像识别烧结色差，其亚表面缺陷识别率显著优于传统涡流探伤，电动轮椅车焊缝质量则通过条纹投影三维重构技术量化熔深参数<sup>[3]</sup>。视觉引导系统在电机壳体打标工位自动补偿工件热变形偏移，轮椅车轮胎装配线借助深度学习分割轮毂螺栓的螺纹状态，同步实现的在线质检功能可拦截电机绝缘漆气泡和轮椅车喷涂层橘皮缺陷。

### （四）物联网（IoT）与实时数据融合技术

电机绕线车间部署振动传感器网络捕捉设备异常频谱，其数据流通过MQTT协议上传至边缘计算节点，轮椅车测试跑道采集的电机温升曲线则与装配工艺库动态关联。数据融合引擎将电机空载电流谐波与轮椅车续航里程建立预测模型，使得电刷磨损状态能提前匹配轮椅车用户使用习惯，最终形成从零部件生产到终端产品的全链路参数优化能力。此技术支撑了对不同电池配置（ $9\text{Ah}\times 2$ ， $12/20\text{Ah}$ ）车辆行驶距离的精准预测与工艺反馈。

### （五）故障诊断与预测性维护技术

电机轴承异常温升通过热像图时序分析预判润滑失效周期，轮椅车齿轮箱则采用声发射传感器捕捉早期点蚀信号。基于贝叶斯网络的诊断模型整合电机短路历史数据和轮椅车控制器报错日志，当检测到电机换向火花

频率突变时自动延长轮椅车动力总成耐久测试时长，这种交叉验证机制使微型电机的绝缘老化预警与轮椅车整机可靠性评估形成技术闭环。该模型集成了86/88JC系列电机在负载扭矩18~28N.m工况下的典型故障特征数据。

### 三、工艺技术研究

#### (一) 装配工艺规划与优化

机电产品装配规划的核心在于平衡效率与柔性，特别是涉及精密驱动单元的生产场景。例如电动轮椅车总装线需统筹直流电机动力单元、控制系统及车体结构的并行装配路径，因此基于约束理论的逻辑建模成为关键，其能够动态协调不同节拍的子装配线以避免电机制动器工位成为瓶颈。这种规划方法通过实时采集传感器数据持续优化物料流转序列，使得轮椅车这类多型号混产场景的换型时间显著压缩。在同时排产净重16.8kg的碳纤维车型与23kg的铝合金车型时，系统能自动优化物料配送与装配节拍。

#### (二) 工艺参数优化与质量控制

工艺窗口的稳定性决定最终产品可靠性，直流电机换向器焊接温度曲线优化便是典型案例。通过响应面分析法建立焊接电流与绝缘材料热变形的映射关系，从而在避免漆包线熔损的前提下将焊点强度提升至设计值的1.5倍。轮椅车总装完成后，基于多轴振动台的模拟路谱测试同步采集电机电流谐波与车体加速度谱，其数据相关性分析可精准追溯转向机构异响等隐性缺陷的工艺根源。

### 四、系统集成与仿真验证

#### (一) 数字化孪生技术建模与仿真

直流电机转子绕线工序的数字化孪生体集成多体动力学与电磁场模型，其虚拟调试模块提前验证漆包线张紧力对绕组形变的影响规律，电动轮椅车总装线则通过时域有限元仿真预测车架共振频率分布。物理实体与虚拟模型的实时数据交互使电机换向器抛光参数能动态优化，轮椅车电池仓装配过程的公差链分析同步在孪生系统中完成迭代计算，这种虚实融合环境显著缩短电机磁钢粘接工艺固化周期，同时规避轮椅车转向机构在物理试错阶段的材料损耗。模型迭代过程中捕捉到电机轴承热膨胀对动平衡精度的非线性干扰，轮椅车减震器预紧力的松弛特性也通过参数辨识反向优化仿真边界条件<sup>[4]</sup>。

#### (二) 集成测试与调试方法

电机控制器硬件在环测试平台注入模拟负载谱序列，其故障注入单元可复现电刷火花导致的控制逻辑失效场景，电动轮椅车耐久性测试台架则通过六自由度振动台重构实际路谱激励。跨系统联调阶段发现电机编码器信号延迟影响轮椅车助力曲线平滑性，调试人员据此调整运动控制器的滤波时间常数，集成诊断协议同时解析电

机温升报警与轮椅车胎压异常数据流，最终建立电枢绕组绝缘检测和车架焊缝强度试验的协同触发机制。调试过程中针对电机换向片磨损特征开发专用诊断脚本，轮椅车齿轮箱啸叫噪声的频谱特征也被嵌入实时监控规则库。

### 五、智能化发展趋势

机电自动化装配线的智能化发展正深刻改变生产模式，其核心在于构建更柔性、更自主且数据驱动的生产系统。这种趋势促使产线能够实时感知环境变化并自主决策调整工艺参数，例如在需要高精度定位与速度控制的场合，采用具备实时反馈和动态响应的直流伺服电机正成为提升装配精度的关键要素。因此，设备健康管理及预测性维护借助物联网技术和大数据分析得以实现，通过对驱动核心——各类直流电机的运行电流、温度、振动等多维度状态信息的持续监控与分析，系统能够提前预判潜在故障并精准安排维护窗口，极大提升了整条装配线的综合运行效率与稳定性，为电动轮椅车等产品的连续可靠生产提供了坚实保障。未来，结合本公司“天工”系列等产品的轻量化、长续航发展趋势，装配线将进一步集成AI工艺优化算法，以适应更复杂的材料（如碳纤维）与更高能量密度电池的装配挑战。

### 结语

机电自动化组装技术的发展正加快产生虚拟和现实共同存在的制造环境，其发展方向会更注重数字孪生模型和物理系统之间双向实时互动能力的加强。面对直流电机独有的电磁谐波干扰以及轮椅车轻量化结构造成的组装应力分布问题，迫切需要搭建跨协议的设备通信架构，来实现运动控制命令和工艺参数的毫秒级同步。这种技术上的改进能够明显提高高精度转子动平衡校正等关键工序的平稳性，同时为行动辅助设备的个性化定制提供灵活生产线重新构建的基础。未来的研究需要着重开发能自我适应的工艺知识体系，通过深度学习不断优化直流电机碳刷压力控制等微观组装参数，并建立涵盖产品整个生命周期的质量数据追踪链条。

### 参考文献

- [1] 段来明, 闫晓东, 刘永刚, 等. 某产品自动化装配线技术集成与工艺技术研究[J]. 新技术新工艺, 2022, (12): 22-27.
- [2] 李卫社, 王新伟. 机电自动化在工程机械制造中的应用[J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(02): 52-54.
- [3] 郑耀廷. 机电自动化技术在工程机械制造中的应用研究[J]. 中国机械, 2024, (22): 77-80.