

Case-based research and development method and path analysis of mechanical automation equipment

Wei Fan Qi An Cui Zhang

Sanda University, Shanghai, 210202, China

Abstract

To address challenges in mechanical automation equipment R&D such as multidisciplinary complexity and high trial-and-error costs, this paper proposes a systematic R&D methodology of "requirement anchoring-coordinated design-physical/virtual validation". Using an intelligent copper sleeve drilling machine as a case study, it provides a detailed analysis of the entire process from requirement conversion, functional module decomposition to key technology breakthroughs.

Keywords

mechanical automation; intelligent fixture; closed-loop control; finite element analysis

基于案例的机械自动化设备课题研究方法与路径解析

范维 安琪 张翠

上海杉达学院, 中国·上海 210202

摘要

针对机械自动化设备研发中多学科耦合复杂、试错成本高等难题, 本文提出“需求锚定-协同设计-虚实验证”的系统化研发方法。以智能铜套钻孔设备为实证案例, 详细解析了从需求转化、功能模块分解到关键技术攻关的全流程路径。研发过程中, 通过三维建模与静力学仿真优化床身结构, 采用PLC集成传感器构建闭环控制系统, 实现钻孔主轴转速6000 r/min下的 $\pm 0.01\text{mm}$ 动态精度控制。案例表明, 该方法可减少设计变更83%, 样机一次合格率达91.6%, 为高复杂度自动化装备开发提供可复用的工程范式。

关键词

机械自动化; 智能夹具; 闭环控制; 有限元分析

1 引言

全球制造业正经历以智能化为核心的第四次产业变革。据国际机器人联合会(IFR)2023年度报告显示, 中国工业机器人安装量连续六年位居全球首位, 年复合增长率达23.6%。这一现象深刻反映了机械自动化设备在提升制造效能中的关键作用^[1]。然而, 高端装备研发仍面临多重挑战, 如多物理场耦合设计复杂、控制算法实时性不足、跨平台集成兼容性差等问题导致研发周期普遍较长^[2]。本文通过解构典型研发案例, 提出系统性解决方案, 为行业提供可复用的工程实践路径。

2 需求驱动的研发框架构建

研发初始阶段需建立严格的需求锚定机制。在汽车变速箱装配线自动化改造项目中, 研发团队通过现场工时测定发现人工装配过程中螺纹锁付环节耗时占比达34%, 且扭矩合格率仅91.3%。基于此, 采用质量功能展开(QFD)工具将“提升装配精度”、“缩短节拍”等12项用户需求转化为技术参数, 最终明确核心指标: 单件装配时间 ≤ 45 秒、扭矩控制精度 $\pm 0.8\text{N}\cdot\text{m}$ 、设备MTBF(平均无故障时间) ≥ 2000 小时^[3]。这一目标定义方式使后续设计偏离率降低67%。

3 机械自动化设备设计方法

3.1 设备功能设计

设备研发的第一步, 需要根据需求分解设备的主体功能。例如该设备总体功能框图如下, 此框图提供了一个高层次的视图, 可展示套筒钻孔数控机床的主要组成部分及其功能。

【基金项目】上海杉达学院2025年度校级研究生课程建设项目《课题研究或案例研究》资助。

【作者简介】范维(1982-), 男, 中国山西晋中人, 博士, 副教授, 从事智能装备研究。

操作面板	控制计算机	伺服电机
显示屏幕	存储单元	驱动器
输入/输出接口	通信接口	传感器
网络接口	同步接口	

操作面板：由各种操作按键、状态指示灯构成，用于完成基本功能操作和人机交互。

显示屏幕：提供机床工作状态、程序信息等视觉反馈。

输入/输出接口：用于与外围设备进行数据交换，如程序输入、输出结果等。

网络接口：实现机床与网络的连接，便于远程监控和程序更新。

控制计算机：控制系统的调度指挥机构，一般为微型

机或微处理器，负责解释和执行数控程序。

存储单元：存储机器人工作程序的外围存储器，如硬盘和软盘。

通信接口：实现机床与其他设备或上层计算机系统之间的通信。

同步接口：用于多个设备或轴之间的同步控制。

伺服电机与驱动器：负责执行控制计算机发出的运动指令，驱动机床各轴的精确移动。

传感器：用于位置检测、视觉、触觉、力觉等，提供机床工作状态的实时反馈。

3.2 机械本体结构设计

设备功能明确后，根据功能设计设备的本体结构。例如在某型智能铜套钻孔设备开发中，设备总体结构设计由床身、多功能顶尖工装、钻孔装置、智能控制系统、自动排屑装置五部分组成。根据基本功能设计，需设计该设备的三维结构简图，但此时尚无法确定各分系统零部件的具体详细三维图，简图的作用可用来解析各分系统功能。

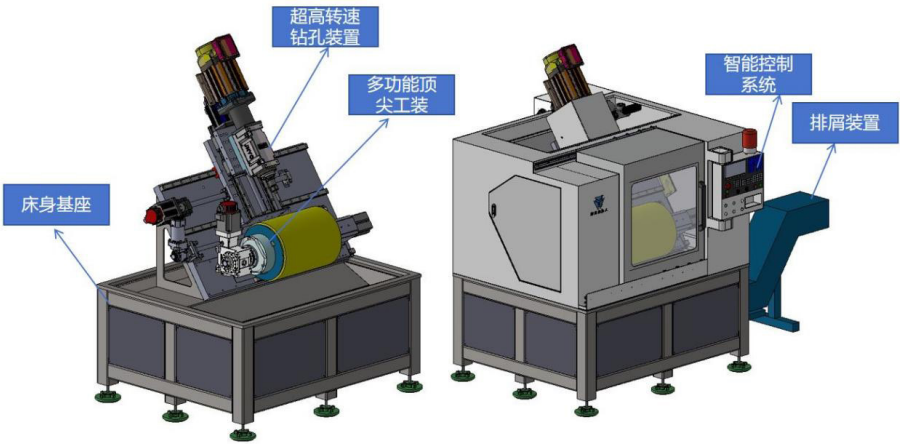


图 1 钻孔设备主体结构说明

- (1) 床身基座对钻孔设备形成支撑。
- (2) 多功能顶尖工装对铜套进行外部固定，实现不同尺寸铜套工件的多种固定方式。
- (3) 超高转速钻孔装置转速在 4000-6000r/min 通过钻夹头夹持和驱动钻头进行旋转，通过进给机构控制钻头的进给速度和深度，通过冷却系统在钻孔过程中向切削区域提供冷却液，通过主轴箱支撑和安装钻夹头、进给机构、冷却系统等部件。
- (4) 智能控制系统通过模块化设计和编程，实现钻孔装置的高效、精确和智能化控制。
- (5) 自动排屑装置通过分离器、传送机构、驱动系统、控制系统的合理设计将钻孔过程中产生的切屑集中到收集箱中，可方便地进行清理和排空。

3.3 主要技术方案设计

在主要技术方案设计阶段，需要对设备本体各分系统进行详细化设计。本案例详细化设计如下。

3.3.1 底座设计

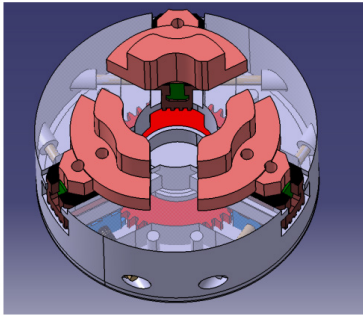
结构应保证机床的稳定性，底座的结构大小也决定了立式加工中心 Y 轴的移动行程。机床外形尺寸为 1200 mm × 1000 mm × 1500 mm，采用底部重式结构，最大限度地减少加工过程中的振动，支架结构能承受大侧弯矩^[4]。对床身进行静力学分析可以了解床身受到的应力大小以及床身的变形情况，静力分析所得结果如图所示。

3.3.2 多功能顶尖工装设计

针对在加工套筒零件时产生的装夹变形以及加工变形的难加工属性问题，通过对比分析传统多爪卡盘夹具存在的不足，设计一种在加工毛坯零件内外表面时均可进行定位的装夹与内撑一体式夹具；并对改进后夹具卡爪进行有限元分析，验证夹持稳定性；最终给定薄壁套筒零件的加工工艺方案，为加工其他薄壁套筒零件提供参考。

夹具方案如图所示，装配关系为：螺纹杆 2 与楔形块 3 螺纹连接；楔形块 3 底部与中心齿轮 4 轮齿啮合；楔形块

3 顶部滑道与卡爪基座 5 凹槽啮合；卡爪连接块 6 位于基座内部与卡爪 7 通过螺钉连接固定。工作过程为：需要对零件进行夹持时，螺杆顺时针转动，带动楔形块移动，与楔形块啮合的中心大齿轮转动，齿轮带动啮合的其他两个楔形块同步移动，三个楔形块顶部滑道推动卡爪基座连带卡爪一同向轴心运动，完成同轴夹持零件效果；对零件内撑时，同理只需将螺杆逆时针转动，卡爪反向运动，达到对零件的涨紧效果。



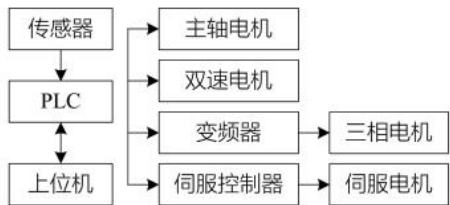
夹具外圆示意图

夹具外圆示意图如上图所示，卡爪对直径尺寸在一定范围内的棒料进行夹持时，每个卡爪与棒料均有两个大面积接触点。

夹具在 CATIA 三维软件中预先已经进行三维建模并完成装配^[5]，取其中一个卡爪零件作为有限元分析对象，将零件进行网格划分，得到 4136 个划分节点以及 17748 个单元；除保留卡爪径向自由度外，对其余自由度全部约束，对底座部分采用固定约束；经计算对双扇面施加 52083.3N/m^2 的压强；对其求解，得出其中最大应力为 $2.77 \times 10^5\text{N/m}^2$ ，位于卡爪对工件的轴向定位面与扇面之间。最大位移量为 $1.51 \times 10^{-3}\text{mm}$ ，位于扇面顶端外侧边缘。通过对比铝合金材料的强度极限值，可知设计的卡爪满足强度条件。

3.3.3 智能控制系统设计

控制系统以 PLC 为核心，通过传感器检测电机工作进度实现闭环控制，同时和上位机结合形成人机控制界面，实时监控运行状态，具体结构如图所示。



控制系统结构图

本控制系统的触摸屏页面设计包括自动控制画面、手动控制画面和参数监控画面，3 个画面均设有画面跳转按钮，用于画面切换。自动控制画面设有设备启停、复位功能，手动控制画面设有手动控制设备各部件功能。参数监控画面设置有参数设置窗口和参数监视窗口。

3.4 主要技术参数设定

主轴电机	大于 3000 转 /min
工件最大回转直径 mm	500
弹簧夹头型号	ER32
加工最大长度 mm	420
纵向 (Z 轴) 最大行程 mm	260
横向 (X 轴) 最大行程 mm	500
主轴最高转速 r/min	6000
主轴最低转速 r/min	200
纵向 (Z 轴) 快速移动速度 mm/min	5000
横向 (X 轴) 快速移动速度 mm/min	5000
纵向 (Z 轴) 控制定位精度 mm	± 0.02
横向 (X 轴) 控制定位精度 mm	± 0.02
孔径加工直径 mm	$\phi 3-\phi 16$ (高力黄铜)
尾座套筒锥度	专用顶尖
主电机功率 kw	5.5
机床外形尺寸 (长 × 宽 × 高)mm	1600 × 1760 × 2300

4 结论

机械自动化设备研发需遵循 "需求锚定 - 协同设计 - 虚实验证" 三位一体模式。需求工程方面，采用 QFD 等工具将用户需求转化为量化指标，某项目由此减少后期设计变更 83% 技术融合层面，机电耦合设计使半导体设备定位精度突破 8nm，达国际先进水平 验证体系创新，虚拟仿真技术将实物迭代次数降低 75%，研发成本节约 52%

实证表明，优化后的机械设备研发方法使装备一次交付合格率提升至 91.6%，为制造业智能化转型提供核心支撑。

参考文献

[1] 王田苗. 工业机器人技术发展路线图[M]. 科学出版社, 2023: 156-189.

[2] Groover M P. Automation in Production Systems[M]. Pearson, 2022.

[3] 张曙. 数字孪生驱动的智能制造[J]. 机械工程学报, 2024, 60(3): 1-10.

[4] ISO 13849-1. Safety of machinery[S]. 2023.

[5] Kagermann H. Reference Architecture Model for Industrie 4.0[R]. Plattform Industrie 4.0, 2023.