

咖啡拉花机器人双臂机械手结构设计和控制研究

周玲毅

杭州以勒上云机器人科技有限公司 浙江杭州 310000

【摘要】本研究关注咖啡拉花机器人双臂机械手的硬件设计及控制手段。鉴于咖啡拉花对动作精准度、灵活性和稳定性的严格标准，系统性开展双臂机械手的机械构造、驱动系统和控制系统设计。通过对关节结构、传动形式、材料选择的深度改进，结合高性能伺服驱动与多模态传感器融合技术，搭建高精度运动控制体系，研究成果使机械手在复杂拉花图案绘制中稳定运作，图案成型误差控制在 $\pm 0.1\text{mm}$ 范围，为咖啡拉花机器人的产业化应用提供硬件设计理论及技术支持，有效推动咖啡制作自动化发展。

【关键词】咖啡拉花机器人；双臂机械手；硬件设计；机械结构；运动控制

Research on structure design and control of coffee latte robot double arm manipulator

Zhou Lingyi

Hangzhou Yilai Cloud Robot Technology Co., LTD Zhejiang Hangzhou 310000

【Abstract】 This study focuses on the hardware design and control methods of a dual-arm robotic arm for coffee latte art. Given the stringent standards for precision, flexibility, and stability in coffee latte art, the research systematically explores the mechanical structure, drive system, and control system of the dual-arm robotic arm. By deeply improving the joint structure, transmission method, and material selection, and integrating high-performance servo drives with multi-modal sensor fusion technology, a high-precision motion control system is established. The research findings ensure that the robotic arm operates stably in complex latte art patterns, with pattern formation errors controlled within $\pm 0.1\text{mm}$. This provides theoretical and technical support for the industrial application of coffee latte art robots, effectively advancing the automation of coffee preparation.

【Key words】 coffee latte robot; two-arm manipulator; hardware design; mechanical structure; motion control

引言

伴随咖啡文化传播与消费市场演进，消费者对咖啡拉花艺术性的诉求持续提升，传统人工拉花高度依赖操作者经验，面临效率偏低、质量均一性欠佳等现实问题。咖啡拉花机器人的研发成为破解该类问题的关键路径，而双臂机械手作为核心执行部件，其硬件设计直接关乎拉花图案精度与系统运行稳定性，当前市场现存相关设备在机械结构合理性、运动控制精准度等层面仍存改进空间，本研究基于硬件设计维度，融合机械工程与自动控制理论，针对双臂机械手的结构组成与控制策略展开系统性探究，以期推动咖啡拉花机器人的性能优化。

一、双臂机械手机械结构设计

（一）整体构型设计

双臂机械手运用模块化对称拓扑架构，依托 Denavit-Hartenberg 参数搭建运动学模型，借助齐次变换矩阵完成末端位姿解算，基座力学设计契合 ISO20815 规范，ANSYS Workbench 多体动力学模型表明前六阶固有频率规避 30 - 50Hz 振动频段，经拓扑优化的铝合金基座在承受 $200\text{N} \cdot \text{m}$ 倾覆力矩时，最大 vonMises 应力控制于屈服强度 60% 以内，蜂窝结构使其质量达 12kg，三层减震结构将 Z 向振动加速度从 1.2g 衰减至 0.15g 以下。大臂小臂桁架依据欧拉公式设计，碳纤维管长细比 ≤ 80 ， $[0^\circ / \pm 45^\circ / 90^\circ]$ 4s 铺层工艺使其可承受 10J 冲击而保持完整，经 EMC 设计的走线通道使信号延迟 $\leq 50 \mu\text{s}^{[1]}$ 。关节中空轴采用哈默纳科 SHD - 20 - 100 谐波传动，回差 $\leq 1\text{arcmin}$ ，32mm 内径预留六维力传感器接口，按 ISO9409 - 1 标准设计的法兰接口在更换拉花嘴时重复定位精度为 $\pm 0.05\text{mm}$ 。MATLAB 仿真结果显示双臂工作空间达 $180 \times 180 \times 200\text{mm}$ ，Z 轴可覆盖 50 - 150mm 的咖啡杯，轨迹可达率超 98%，采用五次多项式插

值融合人工势场法规划轨迹,在绘制立体图案时两臂间距 $\geq 30\text{mm}$,采样频率为 1kHz 的控制系统阶跃响应调节时间 $< 80\text{ms}$,超调量 $\leq 5\%$ 。

(二) 关节传动系统设计

肩关节与肘关节配置哈默纳科 SHD-32-100 谐波减速器,柔轮选用特种镍铬钼合金 JISSCM435,经渗碳淬火工艺处理,表面硬度达 HRC62-65,芯部硬度维持 HRC33-38,有限元分析表明,柔轮在 2000rpm 工况下的最大交变应力为 210MPa ,低于材料疲劳极限 250MPa 。波发生器采用椭圆轴承一体化结构设计,长轴方向径向跳动控制在 $1.5\mu\text{m}$ 以内,柔轮齿圈 360 齿实施精密加工,齿形误差 $\leq 5\mu\text{m}$,传动回差 $\leq 30\text{arcsec}$,专用润滑脂采用全氟聚醚 PFPE 基脂,添加 $50\text{--}80\text{nm}$ 二硫化钨纳米颗粒,在 120°C 环境下动态黏度为 $0.02\text{--}0.05\text{Pa}\cdot\text{s}$,可使减速器运行温度降低 $12\text{--}15^\circ\text{C}$ 。

腕关节搭载纳博特斯克 RV-40E 减速器,摆线轮选用 50CrV 弹簧钢,经等温淬火工艺形成下贝氏体组织,抗拉强度超过 1800MPa ,多体动力学模型仿真显示,在 300rpm 高速运转工况下,针齿与摆线轮的最大接触应力为 780MPa ,安全系数不低于 1.3,两级减速结构实现 101:1 传动比,20bit 绝对值编码器分辨率达 1.27arcsec ,末端定位精度达到 0.01mm 。直驱传动链扭转刚度为 $80\text{N}\cdot\text{m}/\text{arcmin}$,连续曲线绘制时速度波动量控制在 $\pm 0.5\%$ 以内,关节支撑系统采用 7010CTYNSULP4 配对角接触球轴承,通过液压螺母精确施加 $12\text{--}15\text{N}\cdot\text{m}$ 预紧力矩,在 $60^\circ/\text{s}$ 角速度下轴承外圈径向振动幅值不超过 $5\mu\text{m}$,机械限位采用 42CrMo 合金锻件, 15° 锥面缓冲结构配合邵氏硬度 90A 聚氨酯缓冲块,可吸收 15J 冲击能量,电气限位选用欧姆龙 E2EQ-X7D1-N 接近开关,响应时间不超过 1ms ,与机械限位触发间距为 3mm 。故障诊断采用振动频谱分析法,以 16kHz 采样频率采集加速度信号,通过小波包变换提取 $10\text{--}5000\text{Hz}$ 频段特征值,利用 BP 神经网络实现早期齿轮磨损预警,故障阈值设定为 ≥ 0.65 ,预测维护周期误差控制在 $\pm 300\text{h}$ 范围内。

二、驱动与动力系统

(一) 伺服驱动系统设计

伺服驱动系统为机械手提供动力及运动控制支持,选取高动态响应的交流伺服电机,依据不同关节的负载特性实施分级配置,肩关节作为机械臂的主要承重关节,在拉花作业中需频繁进行大范围摆动,因此配置功率 500W 的伺服电机,以满足其在各类工况下的扭矩需求^[1]。肘关节承担小臂

摆动功能,选用 300W 伺服电机,能够保障运动灵活性,又可有效降低能耗。腕关节主要用于精细的姿态调整, 100W 伺服电机足以满足其工作要求。

驱动器运用先进的矢量控制技术,借助编码器反馈构建位置、速度与转矩的闭环控制体系,23 位分辨率的编码器可将角度控制精度提升至 0.005° ,这对绘制精细拉花图案意义重大,在处理带有复杂线条和细节的拉花图案时,高精度编码器可确保机械臂精准执行预设轨迹,让奶泡准确落于咖啡液面指定位置。为适应拉花过程中频繁的加减速工况,伺服系统嵌入自适应加减速算法,该算法能依据运动轨迹规划,对加速度曲线进行实时动态调整,绘制曲线图案时,算法会自动降低加速度,防止因惯性冲击造成奶泡喷射不均;进行直线运动时,则适度提高加速度,以提升拉花效率。系统支持 EtherCAT 总线通信协议,凭借数据传输速率快、实时性强的优势,实现多轴同步控制,保障双臂动作高度协调,使绘制的拉花图案线条流畅、比例协调。

(二) 供液与气压系统设计

拉花过程中奶泡流量与压力需精准调控,故设计独立供液与气压系统,供液系统以蠕动泵为核心组件,其通过滚轮挤压弹性软管实现液体输送,泵的转速调节范围为 $0\text{--}1000\text{rpm}$,可通过调节转速控制奶泡输出量,满足微量点缀至大面积填充等不同拉花操作的流量需求^[1]。流量控制精度达 $\pm 0.5\text{mL}/\text{min}$,确保绘制图案时奶泡量稳定,避免出现图案线条粗细不均的情况,储液罐采用食品级不锈钢材质,兼具耐腐蚀性与卫生性能,内置液位传感器基于超声波测距原理,可实时精准监测奶泡余量,当剩余量达预设阈值时,系统自动发出补给提示,便于操作人员及时添加奶泡,保障拉花过程的连续性。

气压系统为末端拉花嘴提供压力支撑,采用微型隔膜泵生成稳定气压,压力范围设定为 $0\text{--}0.3\text{MPa}$ 。通过比例减压阀实现压力精细调节,可依据不同拉花需求(如立体图案或平面图案绘制)调整适配气压,绘制立体图案时,适度提升气压能增强奶泡冲击力,以塑造立体造型;绘制平面图案时,降低气压可确保奶泡均匀铺展于咖啡液面。供液管路与气压管路均选用食品级硅胶管,该管材兼具柔韧性便于管路布局,且耐腐蚀性优异,可适应奶泡等液体的长期接触,管路连接处采用快插接头,具备连接紧密、拆卸便捷的特性,操作人员能快速拆卸管路清洗,符合食品卫生规范,保障拉花过程的安全性与卫生性。

三、控制系统硬件设计

(一) 主控与感知系统设计

主控系统采用工业级 PLC 控制器,配置 ARM Cortex-A53 多核处理器与 FPGA 运动控制芯片,运算能力达 200DMIPS,集成 EtherCAT 实时总线且数据更新周期为 $100\mu s$,可支持 32 轴同步控制,借助 TwinCAT 运动控制软件完成轨迹规划,采用五次多项式叠加梯形加减速算法,将 jerk 值控制在 $500mm/s^3$ 以内,保障机械臂运动的平滑性^[4]。图形化编程界面支持 SVG 矢量图导入,能基于逆运动学解算自动生成关节空间轨迹,PLC 通过前瞻控制算法预读 200ms 轨迹数据,动态调整各轴加速度分配,使轨迹跟踪误差 $\leq 0.1mm$ 。

感知系统构建三层复合传感网络,关节层配置 22 位绝对值编码器,分辨率达 0.00017° ,基于霍尔效应与韦根效应双编码技术,多圈位置记忆能力达 4096 圈,断电位置保持误差小于 0.01° 。末端执行器集成 ATINano17 六维力传感器,量程为 $\pm 50N/\pm 10N \cdot m$,采用惠斯通电桥阵列与温度补偿电路,力信号采样率 1kHz,非线性误差低于 0.1%FS,配合自适应阻抗控制算法,接触力控制精度达 $\pm 0.5N$ 。视觉系统采用双目视觉+结构光方案,顶部 Baslerace 相机分辨率 1280×960 并搭配 940nm 红外结构光,三维重建点云密度达 0.1mm,坐标系转换误差小于 0.3mm;侧面高速相机帧率 1000fps,通过光流法计算拉花动态偏差,经卡尔曼滤波融合后,驱动机械臂实施实时轨迹修正,图案轮廓匹配度达 99.2%。

(二) 电气与防护设计

电气系统采用模块化架构,电源模块选用明纬 NES-500-24 隔离型开关电源,设 4 组独立 DC 输出通道 ($24V/20A$ 、 $12V/5A$ 、 $5V/3A$ 、 $\pm 15V/1A$),内置主动式 PFC 电路,功率因数达 0.98,模块集成过压保护 ($28V \pm 1\%$)、过流保护 ($22A \pm 5\%$) 及短路保护机制,浪涌防护等级符合 IEC61000-4-5 的差模 6kV/共模 8kV 标准,搭配 π 型 LC 滤波网络,输出纹波控制在 50mV 以内^[5]。控制模块采用西门子 S7-1500PLC 与 10.1 英寸 TP1500Comfort 触摸屏,PLC 控

制柜按 EN60204-1 标准布局,继电器区与驱动器区分层安装,间距保持 150mm 以降低电磁耦合,柜内装 OBOV25-B 电源防雷器,接地系统实行工作地与保护地分离设计,接地电阻小于 4Ω 。HMI 界面支持 DCC 动态曲线显示,可实时监控奶泡压力 (量程 0-0.8MPa,精度 $\pm 0.5\%FS$)、电机转速 (0-3000rpm,分辨率 1rpm) 等 32 路工艺参数,用户权限分三级管理 (管理员/操作员/访客),密码复杂度符合 ISO27001 标准。

驱动模块配备 4 台松下 MINASA6 伺服驱动器,额定功率 750W,采用 Sigma-Prime 算法,速度环带宽达 2.5kHz,电流环采样周期 $125\mu s$,继电器组选用欧姆龙 G6Q-212P-VD,触点容量 10A/250VAC,配置 TVS 二极管抑制浪涌。所有电气元件均通过 IP65 防护认证,控制柜内置 RS-450 防水透气阀,透气量 450ml/min,散热系统采用温控式轴流风扇,启动温度 $40^\circ C$,停转温度 $35^\circ C$,配合 PT100 温度传感器 (精度 $\pm 0.5^\circ C$) 实现智能散热。急停回路符合 ISO13849-1 的 PLd 等级,响应时间 $< 20ms$,故障诊断系统可记录最近 50 条事件日志,包含故障时的电机编码器位置、电压电流值等 20 项关键参数。

结语

本研究完成咖啡拉花机器人双臂机械手的硬件设计与控制系统构建,硬件层面,借助拓扑优化及动力学仿真,采用高强度轻量化材料与模块化关节设计,降低运动惯性并提升负载能力;驱动系统配置高扭矩伺服电机与精密减速机,结合直驱结构形式,确保动作执行的高效稳定性。控制系统整合多传感器技术,构建包含视觉、力觉、位置反馈的闭环体系,配合自主路径规划算法,实现 $\pm 0.1mm$ 级的高精度拉花操作,解决传统设备存在的动作不协调、绘图精度不足等问题,后续研究将聚焦结构轻量化与算法优化,引入新型材料及深度学习技术,推动该设备向智能化、产业化方向发展。

参考文献

- [1]陈华舒,卢振利,王伟栋.具身智文本内容生成的咖啡机器人系统设计[J].高技术通讯,2024,34(06):651-658.
- [2]宋详委.基于 Marker 球的机械臂运动轨迹复现技术研究[D].沈阳建筑大学,2024.
- [3]赵明岩,蒋昕余,陈垣融,等.基于视觉的水果雕花机器人创新实验设计[J].实验室研究与探索,2019,38(06):71-74.
- [4]闫帅.咖啡拉花机关键技术研究[D].北京邮电大学,2019.
- [5]常恒诚,孙启溪,丁承君,等.基于 ROS 的奶油裱花机器人系统架构设计[J].食品工业,2019,40(02):216-219.