

面向电梯安全钳生产的自动折弯机器人关键技术研究

王 青

(中山职业技术学院, 广东 中山 528400)

摘 要 本文针对电梯安全钳厚板折弯易出现回弹、干涉等缺陷, 以及多品种中批量生产的柔性需求, 系统性开展自动折弯机器人关键技术研究。综合运用有限元分析、三维扫描、路径优化算法等多种技术方法, 重点围绕机械结构优化、折弯路径智能规划、折弯精度控制、系统集成与协同控制四大核心方向精准发力, 优化机器人机械参数与末端执行器结构, 构建路径动态调整机制与精度实时控制体系, 旨在对顺利完成多模块系统集成与调试工作有所裨益。

关键词 电梯安全钳; 自动折弯机器人; 机器人机械结构优化技术; 折弯路径智能规划技术; 精度控制

基金项目: 广东省普通高校特色创新项目(自然科学) “基于电梯安全钳本体自动折弯机器人的研究”(项目编号: 2023KTSCX366)。

中图分类号: TP242.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.011

0 引言

电梯安全钳作为电梯核心安全部件, 其钣金件折弯精度与运行稳定性直接决定电梯运行的安全系数, 但其加工过程存在诸多难点: 不仅采用高强度厚板进行加工, 且多弯角不规则结构极易引发折弯缺陷, 同时多品种、中批量的生产模式对加工柔性提出了更高要求。当前通用折弯机器人普遍存在结构适配性差、路径规划不够智能、精度控制能力不足等问题, 难以满足安全钳严格的加工标准。基于此, 本文聚焦电梯安全钳生产中的核心痛点, 针对性开展自动折弯机器人关键技术研究, 着力破解厚板折弯精度控制与柔性生产两大难题。

1 电梯安全钳折弯工艺特点

电梯安全钳钣金件的加工工艺具有鲜明特殊性, 其多采用 Q235、Q355 系列高强度钢板, 板材厚度介于 3 mm ~ 8 mm 之间, 属于典型的厚板折弯范畴, 与普通钣金件折弯工艺差异显著。一方面, 厚板折弯需克服较大的塑性变形阻力, 加工过程中极易出现回弹、褶皱等质量缺陷, 这就对机器人的负载能力与折弯力控制精度提出了较高要求; 另一方面, 钳体、制动块等核心零件均为不规则多弯角结构, 折弯作业时极易发生机器人与工件、模具之间的干涉现象。作为电梯核

心安全部件, 安全钳折弯精度要求极为严格, 折弯角度公差需控制在 $\leq \pm 0.2^\circ$ 范围内, 折弯半径则需严格把控在 0.4 t ~ 0.8 t 之间。

2 面向电梯安全钳生产的自动折弯机器人关键技术

2.1 机器人机械结构优化技术

2.1.1 机械结构参数优化

第一步, 技术人员应先完成机器人机械结构核心参数的测算, 确定关节臂尺寸、关节转动角度范围、末端执行器承载极限等关键参数的适宜取值区间。第二步, 借助有限元仿真分析手段, 针对机器人机身、关节臂及各类连接构件开展系统性力学模拟, 精准还原折弯作业过程中不同载荷作用下结构的应力分布规律与形变特征, 并依据仿真分析结果对结构参数进行定向优化。在该结构分析流程中, 可利用材料力学中的弯曲正应力计算公式, 求解关节臂受载后的应力分布情况, 具体公式如下:

$$\sigma = \frac{My}{I_z} \quad (1)$$

式(1)中, σ 为弯曲正应力, M 为关节臂所受弯矩, y 为所求应力点到中性轴的距离, I_z 为截面惯性矩, 通过该公式可精准判断应力集中位置。

作者简介: 王青(1976-), 男, 本科, 讲师, 研究方向: 机电一体化。

2.1.2 末端执行器与辅助机构优化

针对末端执行器,技术人员需首先依据安全钳板材的外形轮廓及折弯受力特性,明确适宜的夹持方式与夹持力度区间,对夹持爪的结构造型进行优化设计^[1]。与此同时,在执行器末端集成压力传感元件与位移传感元件,对夹持过程中的压力及位移数据进行实时采集,并将采集到的数据及时反馈至控制系统。对于辅助机构,需重点对板材抓取机构、板材分张及厚度检测机构、后挡块定位装置等核心组件进行优化:调整抓取机构的运动轨迹及抓取时序;提升分张与厚度检测机构的检测精度,实现板材厚度的实时监控与分张精准控制;优化后挡块定位装置的定位精度,采用机械限位与电子定位相融合的方式^[2]。折弯机器人末端执行器结构示意图如图1所示。

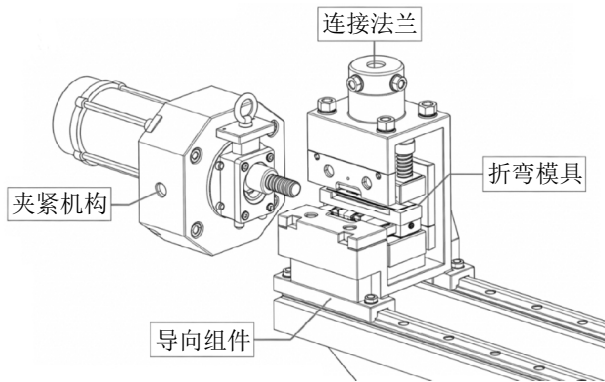


图1 折弯机器人末端执行器结构示意图

2.2 折弯路径智能规划技术

2.2.1 折弯路径前期规划

折弯路径前期规划需以精准化、合理化为目标,首先,通过三维扫描技术可获取电梯安全钳待折弯工件的精准三维模型,精准提取工件的折弯轮廓、折弯角度、折弯半径等核心特征参数,建立标准化的折弯特征数据库。其次,工作人员需结合电梯安全钳的加工工艺要求,明确折弯的先后顺序原则与工艺约束条件。再次,工作人员需采用专业路径规划算法对折弯轨迹进行初步规划,将三维模型中的折弯特征转化为机器人可识别的运动坐标,划分折弯路径的关键节点^[3]。最后,工作人员需结合板材的力学性能参数,精准计算不同折弯阶段的折弯力需求,将力参数融入路径规划过程中。折弯力的计算可采用材料力学中的折弯力计算公式:

$$F = \frac{2KBt^2\sigma_s}{W} \quad (2)$$

式(2)中, F 为折弯力, K 为安全系数(通常取1.2~

1.5), B 为板材宽度, t 为板材厚度, σ_s 为板材屈服强度, W 为折弯宽度,该公式可精准量化折弯过程中的力需求。

2.2.2 折弯路径动态调整

折弯路径动态调整旨在应对折弯过程中的动态变化。在前期路径规划的基础上,工作人员需搭建完善的实时反馈调整机制,通过机器人末端的传感器,实时采集折弯过程中的板材变形量、折弯角度偏差、运动轨迹偏差等关键数据^[4]。同时,将采集到的数据与预设的标准参数进行对比分析,精准计算偏差值并判断偏差类型,基于偏差分析结果,通过路径优化算法对折弯路径进行动态调整。

2.3 折弯精度控制技术

2.3.1 折弯前精度预设与校准

折弯前精度预设与校准是保障折弯精度的基础环节。折弯作业开始前,工作人员需首先对机器人折弯系统进行全面的精度校准,重点校准机器人关节运动精度、末端执行器定位精度、折弯模具安装精度,采用高精度测量仪器检测关节转角误差、定位误差与模具对中性偏差,根据检测结果及时调整机器人的运动参数与模具安装位置。其次,需根据电梯安全钳的折弯精度要求,预设折弯角度、折弯半径、板材定位精度等标准参数,将参数录入控制系统并进行严格的参数校验。

2.3.2 折弯过程精度实时控制

在正式折弯过程中,工作人员需启动实时精度监测系统,通过安装在折弯模具与末端执行器上的传感器,实时采集折弯角度、板材变形量、折弯力、模具温度等关键数据,将数据实时传输至控制系统进行快速分析处理,通过专业算法计算实时精度偏差^[5],精准判断偏差产生的原因并制定针对性的调整策略。在此过程中,精度偏差的量化分析可采用均方根误差公式,用于评估实时检测值与标准值的偏差程度:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (3)$$

式(3)中, $RMSE$ 为均方根误差, n 为检测样本数量, x_i 为第 i 次检测的实际值, $\hat{x}_i$ 为第 i 次检测的标准值,通过该公式可精准量化精度偏差。折弯精度实时控制闭环系统框图如图2所示。

2.4 系统集成与协同控制技术

2.4.1 系统集成与接口调试

首先,技术人员需明确电梯安全钳自动折弯生产的全流程作业需求,将机器人折弯系统、板材输送系统、

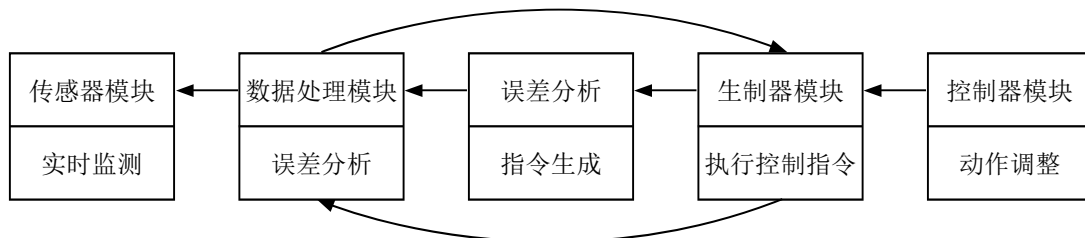


图 2 折弯精度实时控制闭环系统框图

定位系统、检测系统、控制系统等核心模块进行一体化整合集成，明确各模块的功能划分及数据交互标准，构建标准化的系统集成体系^[6]。其次，技术人员需推进全面的接口调试工作，重点对各模块间的数据传输接口、控制接口进行调试，并对数据传输协议进行优化完善。

2.4.2 多模块协同控制

系统集成调试工作全部完成后，技术人员需快速启用协同控制机制，通过主控制系统对各核心模块进行集中调度，明确各模块的运行时序规划与协同工作逻辑。在协同控制实施过程中，主控制系统实时采集并接收各模块的运行数据，根据实际运行情况动态调控各模块的运行参数：当板材输送系统将板材运送至预设位置时，定位系统迅速完成板材定位操作并反馈定位信号，主控制系统随即向机器人折弯系统下发启动折弯作业的指令。

3 实验验证

3.1 实验方案设计

实验以某型号电梯安全钳钳体钣金件为实验对象，该工件采用 Q355 材质，板材厚度 6 mm，折弯角度 90°，折弯半径 3 mm；搭建由优化后六轴自动折弯机器人、数控折弯机、自动上料机、在线检测设备及协同控制平台组成的实验平台。实验采用分组对比模式，对照组采用通用未优化折弯机器人，实验组采用本文优化后自动折弯机器人，每组均加工 100 件工件；设定统一实验参数，机器人重复定位精度 ± 0.01 mm、折弯速度 5 mm/s、夹持力 800 N~1 000 N、回弹补偿系数 0.4，重点对比两组实验的折弯精度、生产效率及产品合格率三项核心指标。

3.2 实验结果与分析

实验结果清晰显示，实验组较对照组各项性能指标均实现显著提升，优化效果十分明显。为直观展示对比效果，将核心性能指标整理如表 1 所示。

由表 1 可知：该实验结果充分证明，本文研究的机械结构优化、路径智能规划、精度控制、系统协同

控制四大关键技术，能够有效解决电梯安全钳折弯过程中的核心痛点，完全满足安全钳规模化、高精度的生产需求。

表 1 实验组与对照组性能指标对比

对比指标	对照组（通用机器人）	实验组（优化后机器人）	提升幅度
折弯角度偏差平均值	$\pm 0.32^\circ$	$\pm 0.15^\circ$	53.1%
单件加工周期	45 s	28 s	37.8%
产品合格率	88%	98.5%	10.5%

4 结束语

本文围绕电梯安全钳自动折弯生产的实际需求，系统研究并成功实现了自动折弯机器人的四大关键技术：通过机械结构优化，有效解决了厚板折弯稳定性不足的问题；借助路径智能规划技术，成功规避了加工过程中的干涉隐患；依托精度控制技术，全面保障了折弯精度达标；通过系统协同控制，实现了折弯生产全流程自动化。实验验证结果表明，本研究成果能够有效提升电梯安全钳折弯生产效率与产品质量，完美适配多品种、中批量的生产模式。

参考文献：

- [1] 冯经纬. 依托智慧监管升级电梯安全水平: 莆田市推动特种设备安全生产专项整治三年行动 [J]. 安全与健康, 2022 (12):36-37.
- [2] 温冬宝. 电梯安全钳楔块用 SiC/Al 复合材料的性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [3] 谈伟荣. 直驱电梯安全钳防坠装置的结构设计与仿真分析 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [4] 杨晟杰. 电梯安全钳本体自动折弯的研究 [D]. 上海: 上海大学, 2020.
- [5] 刘玮琪. 液压驱动电梯更新改造安全生产施工方案探究 [J]. 劳动保护, 2024(10):75-77.
- [6] 纪广东, 游有鹏, 王鹏宇, 等. 基于知识和改进 PRM 算法的钣金折弯机器人路径自动规划与优化 [J]. 机械与电子, 2024,42(06):38-44,49.