

# 锯床自适应压料机构的机电一体化设计与夹持力控制研究

汪丽剑

浙江中德利机床有限公司 浙江丽水 321404

**【摘要】**针对传统压料机构夹持力不可自适应调节等问题,本文开展锯床自适应压料机构机电一体化设计与夹持力控制研究。首先分析传统压料机构痛点及设计需求,接着完成自适应压料机构机械结构、电气控制系统及机电协同匹配设计,重点优化夹持力自适应控制策略,最后经硬件调试、软件编程和现场试验实现工程化应用。试验表明,该自适应压料机构可根据工件规格(直径 50mm - 800mm)、材质自动调节夹持力(5MPa - 25MPa),控制精度达 $\pm 0.3\text{MPa}$ ,锯切断面垂直度误差 $\leq 0.02\text{mm/m}$ ,锯带寿命延长 35%以上,加工效率提升 20%,解决了传统压料机构弊端,为锯床压料机构机电一体化升级提供参考。

**【关键词】**锯床; 自适应压料机构; 机电一体化设计; 夹持力控制

Research on Mechatronic Design and Clamping Force Control for Adaptive Pressing Mechanism in Saw Machines

Wang Dezhong

Zhejiang Zhongdeli Machine Tool Co., Ltd., Lishui City, Zhejiang Province 321404

**【Abstract】**To address issues such as non-adaptive clamping force adjustment in traditional pressing mechanisms, this study conducts research on mechatronic design and clamping force control for adaptive pressing mechanisms in saw machines. The research first analyzes the pain points and design requirements of conventional pressing mechanisms, followed by mechanical structure development, electrical control system design, and electromechanical coordination optimization. Special emphasis is placed on refining adaptive clamping force control strategies. The system was ultimately implemented through hardware debugging, software programming, and field testing. Experimental results demonstrate that the adaptive pressing mechanism can automatically adjust clamping force (5MPa-25MPa) based on workpiece specifications (diameter 50mm-800mm) and material properties, achieving control accuracy of  $\pm 0.3\text{MPa}$ , verticality error of saw cut surfaces  $\leq 0.02\text{mm/m}$ , over 35% extended saw belt lifespan, and 20% increased processing efficiency. This innovation resolves limitations of traditional pressing mechanisms and provides a reference for mechatronic system upgrades in saw machine pressing mechanisms.

**【Key words】**sawing machine; adaptive clamping mechanism; mechatronic design; clamping force control

## 一、引言

随着我国制造业向高端化、智能化转型,机械制造等行业对锯切加工的精度、效率及稳定性要求不断提升,锯床作为金属切断关键装备,其性能影响后续工序质量。压料机构承担工件定位等功能,其设计与控制精度是决定锯切质量的核心因素。

当前,主流锯床压料机构多采用传统机械或单一液压力压紧模式,缺乏机电协同设计,存在技术痛点:一是夹持力固定不可调,易导致工件变形、滑动,引发锯带跑偏等问题;二是机电协同性差,压料响应滞后,无法与锯切动作精准匹配;三是适配性不足,需人工更换压料组件,操作繁琐;四是夹持力控制精度低,缺乏实时监测反馈;五是结构刚性不足,加剧锯带磨损,缩短使用寿命。

针对这些问题,开展锯床自适应压料机构的机电一体化设计与夹持力控制研究,旨在解决传统压料机构瓶颈,提升产品竞争力,助力高端锯床国产化突破。

## 二、锯床自适应压料机构的机电一体化总体设计

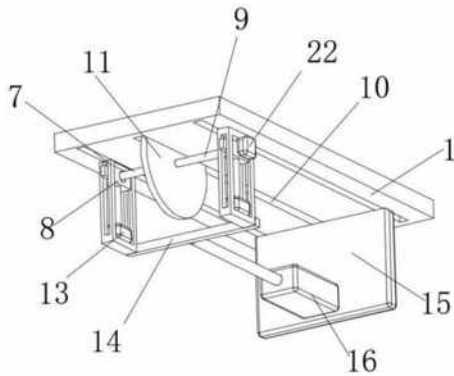
针对传统压料机构痛点提出:以 PLC 为控制核心,整

合高精度传感器与伺服液压驱动模块,实现“检测-反馈-调节-执行”闭环控制;机械结构采用可调节压料、刚性导向与伺服液压驱动组件,确保压料平稳精准;通过软件实现夹持力自适应调节、实时监测与故障报警,实现机电协同。

总体设计重点解决三大核心问题:机械结构刚性与导向精度、夹持力精准控制与自适应调节、机电协同同步性。

## 三、锯床自适应压料机构的机械结构设计





### 3.1 机械结构总体设计

机械结构由压料组件、驱动组件、导向组件、限位组件及安装底座组成,模块化设计便于安装调试维护。安装底座采用30mm厚Q235钢板焊接,底部设5mm厚减震垫;压料组件适配不同截面工件,驱动组件提供稳定动力,导向组件保证直线精度,限位组件防止压料过度。

### 3.2 核心机械组件设计

#### 3.2.1 压料组件设计

压料组件由压料板、调节支架、缓冲垫组成:压料板采用20mm厚45号钢调质淬火(HRC45-50),尺寸300mm×80mm;调节支架螺栓连接,高度可调(0mm-50mm,精度±0.01mm);缓冲垫为8mm厚聚氨酯(邵氏60°),表面设防滑纹路,粘接+螺栓固定,便于更换。

#### 3.2.2 驱动组件设计

采用伺服液压驱动模式,由伺服电机、液压泵、液压缸、比例溢流阀组成:伺服电机选用台达ECMA-C20807RS型(7.5kW,0-3000r/min,扭矩23.9N·m,响应≤5ms);液压泵选用台湾三优PV2R12型(额定压力31.5MPa,流量25L/min,噪音≤65dB);液压缸为重型推力型(额定推力50kN,行程100mm,缸径100mm,活塞杆63mm);比例溢流阀选用DBEM10-3X型(精度±0.1MPa,响应≤3ms)。

#### 3.2.3 导向组件设计

采用台湾上银HGH25CA型线性导轨与滑块配合,导轨长度500mm,H级精度,平行度≤±0.01mm/m,4个滑块对称分布,与压料组件刚性连接。导轨表面涂锂基润滑脂,配备防尘罩,润滑周期≥500小时,使用寿命≥8000小时,确保压料无偏移。

#### 3.2.4 限位组件设计

采用机械限位与位移传感器限位双重控制:机械限位块为20mm厚45号钢调质件,精度±0.01mm;位移传感器选用德国海德汉LC183型光栅传感器(量程0-100mm,精度±0.001mm,响应1000Hz),安装于导轨侧面,与滑块连接,防护等级IP67。

## 四、锯床自适应压料机构的电气控制系统设计

### 4.1 电气控制系统总体设计

电气控制系统采用模块化设计,分为控制核心、传感器、驱动、人机交互、故障报警、电源六大模块,协同工作,抗干扰能力强,适配工业现场环境。

工作流程:人机交互输入工件参数→PLC输出初始夹持

力指令→驱动模块控制伺服电机、液压阀动作→传感器实时采集数据反馈至PLC→PLC通过自适应策略调整指令→故障报警模块监测异常并保护设备→电源模块提供稳定供电。

### 4.2 核心模块设计与硬件选型

#### 4.2.1 控制核心模块

选用台达DVP40ES200T型PLC控制器,运算速度0.1μs/步,40个I/O接口,支持Modbus、RS485通信,工业级抗干扰,工作温度-10℃-60℃,内置DC24V/2A电源,支持在线编程调试,配备通信扩展接口,使用寿命≥50000小时,平均无故障时间≥20000小时。

#### 4.2.2 传感器模块

传感器模块负责采集夹持力、位移、油温数据,确保精准实时:(1)压力传感器(量程0-50MPa,精度±0.1MPa,响应5ms,4-20mA输出),安装于液压缸进油口,螺纹连接,防护优良;(2)位移传感器(量程0-100mm,精度±0.001mm,响应1000Hz,RS485输出),防护IP67;(3)温度传感器(量程0-100℃,精度±0.5℃,响应10ms,4-20mA输出),插入式安装于液压油箱。

#### 4.2.3 驱动模块

驱动模块分为伺服驱动与液压阀驱动:(1)伺服驱动器:台达ASD-B2-0721-B型(7.5kW,15A,响应≤5ms),与台达伺服电机配套,支持速度控制,具备多重保护,支持RS485通信;(2)液压阀驱动:菲尼克斯2866043型继电器模块(8路,DC24V,5A),驱动比例溢流阀、电磁换向阀,具备浪涌保护,便于维护。

#### 4.2.4 人机交互模块

选用北京昆仑通态TPC1061Ti型触摸屏(10.2英寸,1024×600分辨率,IP65防护),支持RS485通信,响应≤100ms。界面包含参数设置、状态监测、故障查询三大功能,设置参数范围限制,直观便捷,降低操作强度。

#### 4.2.5 故障报警模块与电源模块

(1)故障报警:LTE-1101J型声光报警器(DC24V,音量≥80dB,红色闪烁),安装于控制柜顶部,与触摸屏报警联动,故障时停机保护,排除后手动复位;(2)电源模块:台达PM200D-24型开关电源(AC220V输入,DC24V/8.3A输出,200W),具备多重保护,导轨式安装,使用寿命≥20000小时。

### 4.3 电气控制电路设计

电路分为主电路、控制电路、信号采集电路、通信电路,遵循“安全、可靠、简洁、易维护”原则。主电路为伺服电机、液压泵供电(AC380V),配备短路、过载保护;控制电路为低压元件供电(DC24V);信号采集电路采用屏蔽电缆,减少干扰;通信电路采用RS485总线(≤5m),确保通信稳定。

电气控制柜为2mm厚冷轧钢板焊接,IP54防护,内置200W散热风扇,线路槽整理、标识清晰,便于维护,确保柜内温度0℃-40℃。

## 五、锯床自适应压料机构的夹持力控制策略优化

### 5.1 夹持力控制优化策略

复合控制策略核心是PID闭环精准控制与模糊自适应

参数调整,形成完整闭环,具体原理如下:

(1) PID 闭环控制:以预设夹持力为输入、压力传感器反馈值为输出,计算偏差及偏差变化率,通过 PID 算法输出指令调整液压系统压力。初始参数为比例系数  $P=2.8$ 、积分系数  $I=0.12$ 、微分系数  $D=0.06$ ,协同减小偏差、消除稳态误差、抑制波动。

(2) 模糊自适应调节:以夹持力偏差及偏差变化率为输入,按 5 个模糊等级制定推理规则,动态调整 PID 参数。如偏差正大、变化率正大时,减小  $P$ 、 $I$ ,增大  $D$  以快速降压;偏差为零时,保持参数稳定。

(3) 自适应匹配:PLC 预设不同工件夹持力范围与 PID 初始值,操作人员输入工件参数后,系统自动调用参数启动复合控制;油温变化超  $5^{\circ}\text{C}$  或位移异常时,自动调整 PID 参数确保稳定。

(4) 故障保护:当夹持力超出  $5 - 25\text{MPa}$  或波动超  $\pm 0.5\text{MPa}$  持续 2s 时,PLC 停机、声光报警,触摸屏显示故障信息并记录数据,排除后手动复位。

## 5.2 控制策略的软件实现

采用台达 WPLSoft 编程软件模块化编写程序,含主程序、数据采集、模糊自适应 PID 控制、人机交互、故障监测报警五大子程序,协同实现自适应控制。

(1) 主程序:初始化参数,以 10ms 周期循环调用各子程序,协调模块工作;

(2) 数据采集子程序:以 5ms 周期采集传感器信号,滤波校准后存储传输,确保实时精准;

(3) 模糊自适应 PID 控制子程序:核心子程序,实现模糊推理、PID 参数调整与指令输出;

(4) 人机交互子程序:处理触摸屏输入输出,设置参数限制避免误操作;

(5) 故障监测报警子程序:对比数据与阈值,延时 2s 判断避免误报警,故障时停机报警并记录数据。程序经离线仿真与在线调试,确保性能达标。

## 六、试验验证与结果分析

### 6.1 试验方案设计

采用对比试验+稳定性试验+故障模拟试验:(1)对比试验:传统机构(固定  $15\text{MPa}$  夹持力)与自适应机构,各加工 10 件/种工件,重复 3 次,取平均值,记录加工时间、变形量、滑动量、断面垂直度、锯带磨损等;(2)稳定性试验:自适应机构连续加工 8 小时,每小时记录夹持力、振动、油温等参数;(3)故障模拟试验:模拟 4 种常见故障(夹持力超限、位移超限、油温过高、伺服故障),各 5 次,记录故障监测与报警数据。

### 参考文献

- [1]王文慧,巫邵波,史云霞.GB4230 带锯床送料机构的数控化改造[J]. 装备制造技术, 2020 (3): 184-186.
- [2] 机床工具行业的发展形势趋好[J]. 机械工程师, 2001 (5): 1, 9, 14, 19, 26, 28, 31, 44, 51, 53, 60.
- [3]李春友.一种锯床的自动上料机构设计[J]. 中国科技信息, 2014 (13): 143-144.
- [4]刘杰,王瑞.锯床进料装置的改进[J]. 铸造工程, 2016, 40 (5): 44-45.

## 6.2 试验结果与分析

### 6.2.1 性能指标对比分析

对比试验数据(三次平均值)表明,自适应压料机构优势显著:(1)夹持力:传统机构固定  $15\text{MPa}$ ,精度  $\pm 1.2\text{MPa}$ 、波动  $\pm 0.8\text{MPa}$ ;自适应机构可自适应调节(低碳钢  $8\text{MPa}$ 、合金钢  $15\text{MPa}$ 、不锈钢  $13\text{MPa}$ ),精度  $\pm 0.3\text{MPa}$ 、波动  $\pm 0.15\text{MPa}$ ,响应时间 8ms,精度提升 75%,波动减小 81.25%;(2)加工精度:传统机构变形量  $0.06\text{mm}$ 、滑动量  $0.04\text{mm}$ 、断面垂直度  $0.058\text{mm/m}$ ;自适应机构分别为  $0.015\text{mm}$ 、 $0.008\text{mm}$ 、 $0.017\text{mm}$ ,均显著优于传统机构;(3)加工效率:平均提升 20%,无需人工调整参数,减少返工;(4)锯带寿命:延长 35%,振动小 ( $0.006\text{mm}$ ),减少锯带磨损。

### 6.2.2 稳定性试验结果分析

自适应压料机构连续工作 8 小时无故障,运行参数稳定:夹持力稳定在  $15\text{MPa} \pm 0.15\text{MPa}$ ,波动  $\leq \pm 0.2\text{MPa}$ ;油温从  $32^{\circ}\text{C}$  升至  $46^{\circ}\text{C}$  ( $30^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$  范围内);振动平均  $0.006\text{mm}$ ,最大  $\leq 0.008\text{mm}$ ;位移精度  $\pm 0.01\text{mm}$ ,核心部件运行正常,通信无丢包。

结果表明,机构机电协同性良好,刚性、导向精度与抗干扰能力达标,满足工业现场连续运行需求,为工程化推广提供支撑。

### 6.2.3 故障模拟试验结果分析

4 种故障模拟试验(各 5 次)结果一致,故障监测报警可靠:(1)夹持力超限 ( $4\text{MPa}$ 、 $26\text{MPa}$ ): PLC0.3s 内检测,声光报警器 0.5s 内启动,停机保护,复位成功率 100%;(2)位移超限 ( $-2\text{mm}$ 、 $102\text{mm}$ ): PLC0.2s 检测,报警器 0.4s 启动,停机复位正常;(3)油温过高 ( $55^{\circ}\text{C}$ ): PLC0.4s 检测,调整伺服转速与冷却功率,超限停机,排除后自动恢复;(4)伺服故障: PLC0.3s 检测,停机报警,排除后复位正常。

结果表明,电气控制系统故障监测精度高、响应快(检测  $\leq 0.4\text{s}$ ,报警  $\leq 0.5\text{s}$ ),处理逻辑合理,维护便捷,验证了电气系统设计可靠性。

## 七、结论

本文针对传统压料机构痛点,开展锯床自适应压料机构机电一体化设计与夹持力控制研究,通过理论分析、设计优化与试验验证,完成工程化实现,主要结论:

(1)明确传统压料机构核心痛点,提出机电一体化总体设计思路与技术指标,为设计提供指导;(2)完成机械结构模块化设计,运行平稳、适配性强,满足设计要求;(3)完成电气控制系统模块化设计,可靠性、抗干扰能力强,故障监测可靠;(4)优化的模糊自适应 PID 控制策略,实现夹持力精准自适应控制,解决传统控制弊端。