

# 数控龙门锯床双夹紧机构协同控制策略与实现研究

汪丽剑

浙江中德利机床有限公司 浙江 丽水 321404

**【摘要】**：针对传统双夹紧机构协同性不足等问题，本文开展双夹紧机构协同控制策略研究。首先分析双夹紧机构结构与原理，明确核心痛点；接着提出基于PID闭环控制的协同控制策略，整合位移反馈等机制，实现精准协同与动态自适应控制；最后经硬件选型等完成工程化实现。试验表明，该策略将同步响应误差控制在5ms内，夹紧定位精度提至±0.01mm，工件锯切断面垂直度误差不超0.02mm/m，解决传统控制弊端，提升加工性能与稳定性，为同类机床优化及企业高端产品国产化研发提供支撑与保障。

**【关键词】**：数控龙门锯床；双夹紧机构；协同控制；PID闭环控制；加工精度

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.043

## 1 引言

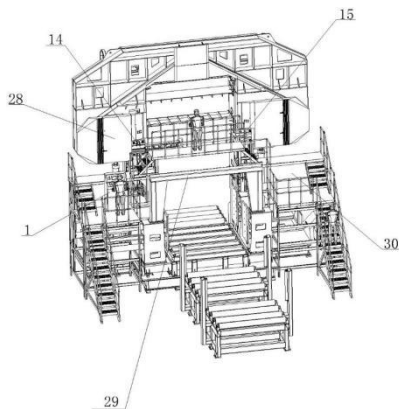
随着我国高端装备制造制造业发展，机械、冶金等行业对超大尺寸、重型金属构件加工需求增长，对加工精度等要求提升。数控龙门锯床因龙门式框架结构优势，成为超大直径、截面金属构件锯切首选，可精准锯切大尺寸工件，最大承重85t。

夹紧机构是数控龙门锯床核心部件，影响锯切精度与稳定性。当前主流数控龙门锯床多采用双夹紧机构设计，分前夹紧与送料夹紧模块协同工作。但传统双夹紧机构独立控制，存在技术痛点：同步响应滞后、夹紧力控制精度不足、送料与夹紧协同性差、缺乏动态自适应能力、位移检测反馈滞后。针对上述问题开展双夹紧机构协同控制技术研究，提升产品精度与稳定性，增强竞争力，助力高端机床自主可控发展。

## 2 数控龙门锯床双夹紧机构协同控制策略研究

### 2.1 协同控制总体设计思路

针对核心痛点，提出基于PID闭环控制的协同控制策略，核心目标“同步协同、精准控制、自适应调节、高效稳定”。构建协同控制模型，以两夹紧模块为整体控制对象，通过高精度传感器采集位移、夹紧力、送料位移等数据，反馈至PLC控制器；控制器结合预设参数与反馈数据，通过协同算法输出指令，控制驱动系统动作；设计自适应模块，自动调整参数适配工况变化；增加故障监测报警模块，保障系统安全稳定运行。



### 2.2 协同控制模型构建

协同控制模型由输入、控制核心、执行、反馈、自适应调节五大模块协同工作，实现闭环控制：（1）输入模块：采集工件预设参数及外部信号，转换为PLC可识别电信号；（2）控制核心模块：台达PLC控制器集成核心算法，协调各模块工作并输出指令；（3）执行模块：液压、伺服驱动系统及两夹紧模块，执行夹紧、送料动作；（4）反馈模块：位移、压力传感器及磁栅尺，采集数据反馈至控制器；（5）自适应调节模块：集成于PLC，根据反馈数据与预设规则，自动调整参数优化状态。工作流程：输入模块采集信号，然后控制器结合反馈数据运算，接着执行模块动作，随后反馈模块采集数据，最后控制器自适应调整，实现循环闭环控制。

### 2.3 核心协同控制算法设计

#### 2.3.1 同步控制算法

采用“主从同步控制+偏差补偿”算法，以送料夹紧模块为主模块、前夹紧模块为从模块。控制器发出指令后，优先启动主模块，位移传感器采集主模块运动参数，计算主从模块同步偏差（位移、速度），通过PID调节输出补偿指令，调整从模块运动节奏，同时加入预判调节机制，减小响应滞后。

#### 2.3.2 夹紧力PID闭环控制算法

以夹紧力设定值为输入、实际夹紧力为反馈，通过PID比例、积分、微分调节，控制液压系统供油压力与流量，实现夹紧力精准控制。加入液压系统非线性误差补偿项，动态调整PID参数（初始比例系数2.5、积分系数0.1、微分系数0.05），将夹紧力波动范围控制在±2%以内，确保夹紧力稳定。

#### 2.3.3 送料-夹紧协同控制算法

采用“位移同步+夹紧力自适应”算法，锯切完成后，前夹紧松开，送料夹紧模块带动工件移动，位移传感器与磁栅尺监测送料位移，压力传感器实时采集夹紧力，根据送料速度调整夹紧力防止工件滑动，加入摩擦误差补偿项，将单次送料误差≤0.01mm，10次送料累积误差≤0.05mm。

## 2.4 故障监测与报警机制设计

设计故障监测与报警机制保障系统安全运行，重点监测四类核心故障：（1）夹紧力异常：实际夹紧力超出 5 - 30MPa 范围，或波动超±3%持续 2s；（2）同步失效：同步偏差超 0.01mm 持续 3s，或响应误差超 8ms；（3）位移偏差过大：夹紧定位偏差超±0.02mm，或送料偏差超±0.01mm 持续 2s；（4）驱动系统故障：油压超 50MPa 或低于 10MPa、油温超 60℃，或电机转速偏差超 10%。

报警机制为：检测到故障后，立即停止整机运行、切断电源，同时触摸屏显示故障信息与处理建议，启动声光报警并存储故障记录，故障排除后可复位运行，避免故障扩大。

## 3 双夹紧机构协同控制方案的工程化实现

### 3.1 硬件选型与搭建

硬件选型遵循“高精度、高可靠、高兼容、高性价比”原则，搭建由控制核心、传感器、驱动、人机交互、辅助单元组成的硬件平台。

#### 3.1.1 控制核心单元选型

选用台达 DVP40ES200T PLC 控制器，运算速度 0.1 μs/步，40 个 I/O 接口（24 入 16 出），支持 Modbus、RS485 协议，工业级抗干扰设计，适配现场恶劣环境，搭配台达编程器与通信模块，保障编程、通信便捷稳定。

#### 3.1.2 传感器单元选型

（1）位移传感器：德国海德汉 LC183 光栅位移传感器（量程 0-500mm，精度±0.001mm，响应 1000Hz）；（2）压力传感器：瑞士 KELLER PA-21Y（量程 0-50MPa，精度±0.1MPa，响应 5ms）；（3）磁栅尺：浙江温州 MSR-5000（量程 0-5000mm，分辨率 1 μm，精度±0.002mm），抗切削液干扰，适配现场环境。

#### 3.1.3 驱动单元选型

（1）液压驱动系统：台湾三优 PV2R12 叶片泵（额定压力 31.5MPa，流量 25L/min）、4WE6Y-6X 电磁换向阀（响应 5ms）、DBEM10-3X 比例溢流阀、重型推力液压缸（额定推力 50kN，行程 200mm）、100L 液压油箱（带冷却器）；（2）伺服驱动系统：台达 ASD-B2-0721-B 伺服驱动器（7.5Kw）、ECMA-C20807RS 伺服电机（3000r/min，扭矩 23.9N·m），确保驱动精度与响应速度。

#### 3.1.4 人机交互与辅助单元选型

人机交互：北京昆仑通态 TPC1061Ti 触摸屏（10.2 英寸，1024×600 分辨率），防水防尘，支持参数设置、状态监测；辅助单元：台达 PM200D-24 开关电源（DC24V，8.3A）、LTE-1101J 声光报警器、菲尼克斯接线端子、冷轧钢板防护外壳，保障系统安全稳定。

### 3.1.5 硬件平台搭建

搭建流程：核心硬件安装于电气控制柜防护外壳内→传感器安装于预设位置，连接 PLC 输入接口→驱动系统连接 PLC 输出接口→触摸屏、编程器与 PLC 通信连接→安装辅助单元，整理线路并检测，确保连接牢固、无短路，硬件平台可正常运行。

### 3.2 软件编程与调试

采用台达 WPLSoft 编程软件，遵循“模块化、结构化”思路，编写主程序与四大子程序，完成离线与在线调试，确保软件功能正常。

#### 3.2.1 软件编程思路与核心子程序编程

软件分主程序与五大子程序，主程序协调各子程序工作以实现整体控制：（1）主程序：初始化系统参数，循环调用子程序，处理全局信号；（2）数据采集子程序：采集传感器模拟量信号，经滤波、转换后存储并传至人机交互界面；（3）协同控制子程序：集成三大核心算法，输出控制指令，实现同步夹紧、送料协同与自适应调节；（4）人机交互子程序：设参数设置、状态显示、故障查询界面，支持手动控制（夹紧、送料速度可调）；（5）故障监测与报警子程序：对比监测数据与故障阈值，触发报警、停设备、存故障记录。核心编程要点：数据采集用 SCALE 指令转换模拟量，协同控制调用 PID 调节指令，人机交互设参数范围限制，故障监测设延时判断逻辑，确保编程严谨、功能可靠。

#### 3.2.2 软件调试

调试分离线与在线两阶段：（1）离线调试：用软件仿真模拟硬件信号，单独与联调各子程序，优化 PID 参数（积分系数调至 0.15）、摩擦误差补偿算法、界面刷新频率（100ms/次），解决稳态偏差、补偿不足、刷新延迟问题，确保软件功能达标；（2）在线调试：将程序下载至 PLC 并连接硬件平台，调试传感器信号传输、驱动系统动作、协同控制性能、故障报警功能，经 20 次加工流程模拟与 15 次故障模拟均无异常，软件调试完成。

### 3.3 系统集成与调试

完成硬件搭建与软件调试后，进行控制系统与机床本体集成调试，分机械集成、电气集成、整机联调三阶段。

（1）机械集成：将双夹紧机构、传感器、液压元件与机床本体连接固定，调整安装精度（两模块中心线平行偏差≤±0.02mm，传感器安装偏差≤±0.005mm），检测机械精度达标。

（2）电气集成：连接 PLC 与机床电气系统，整理线路并做绝缘处理，检测线路连接正确、绝缘良好。

（3）整机联调：先空载调试 30 次，测试各部件协同性能与故障报警功能，无异常；再进行负载调试，对三种典型工件

各锯切 10 次，优化协同参数，加工顺利无故障，性能指标达标。

## 4 试验验证与结果分析

### 4.1 试验方案设计

采用对比试验方案，两种控制模式对三种工件各进行 10 次重复试验，同步开展 20 次故障模拟试验，试验流程：（1）试验准备：检查设备、校准仪器、工件定位；（2）参数设置：传统模式人工设置参数（夹紧力 20MPa，夹紧速度 3mm/s 等），协同模式仅输入工件基础参数，系统自动设置；（3）加工测试：实时记录性能指标，加工后测量精度、计算效率；（4）重复试验：记录数据、计算均值与标准差，确保可靠；（5）故障模拟：模拟四类核心故障，各 5 次，记录监测与报警响应时间。

### 4.2 试验结果与分析

#### 4.2.1 核心性能指标对比分析

核心指标包括同步响应误差、夹紧定位精度、夹紧力波动范围、送料误差、锯切断面垂直度误差，对比结果：

同步响应误差：传统模式均值 17.8-19.2ms（最大 22.3ms），协同模式 3.1-3.5ms（最大 4.8ms），降低 72.0%-78.7%；（2）夹紧定位精度：传统模式  $\pm 0.031 - \pm 0.035\text{mm}$ （最大  $\pm 0.041\text{mm}$ ），协同模式  $\pm 0.008\text{mm}$ （最大  $\pm 0.01\text{mm}$ ），提升 68.8%-77.1%；（3）夹紧力波动范围：传统模式  $\pm 7.3\% - \pm 7.8\%$ ，协同模式  $\pm 1.6\%$ （最大  $\pm 1.9\%$ ），减小 76.0%-79.5%；（4）送料误差：传统模式单次 0.027-0.031mm，累积 0.28-0.32mm，协同模式单次 0.007mm，累积 0.041-0.045mm，单次降低 71.4%-77.4%，累积降低 84.5%-87.5%；（5）锯切断面垂直度误差：传统模式 0.056-0.062mm/m，协同模式 0.015-0.018mm/m

（最大 0.02mm/m），降低 70.7%-75.8%。

分析表明，协同控制策略有效解决了传统模式的精度与同步性问题，达标设计要求。

#### 4.2.2 加工效率对比分析

以单次 500mm 锯切时间为指标：传统模式工件 1-3 分别为 8.6min、10.2min、12.5min，协同模式分别为 7.1min、8.3min、10.1min，效率提升 17.4%-19.2%，平均提升 18.4%。原因是同步等待时间减少、返工减少、参数设置省时、锯带磨损降低。

#### 4.2.3 振动幅度对比分析

传统模式振动幅度 0.017-0.021mm，协同模式 0.004-0.006mm，减小 72.2%-76.2%。原因是工件受力均匀、夹紧力稳定、送料与夹紧协同避免滑动振动。

#### 4.2.4 故障监测可靠性分析

故障模拟试验中，四类故障平均监测时间 0.3-0.4s，报警响应时间 0.5-0.7s，均  $\leq 1\text{s}$ ，无漏报、误报，设备可及时停机，触摸屏显示故障信息，故障排除后可正常复位，监测报警机制可靠。

## 5 结论

通过针对传统双夹紧机构痛点，通过理论分析、算法设计、工程化实现与试验验证，得出以下结论：

（1）明确了双夹紧机构结构、工作原理与五大核心痛点，为策略提出奠定基础；（2）提出基于 PID 闭环控制的协同控制策略，构建五大模块控制模型，设计三大核心算法与故障监测机制，解决传统弊端；（3）完成工程化实现，搭建硬件平台与软件系统，通过调试确保稳定运行；（4）试验验证，协同控制模式各项性能指标优于传统模式，满足实际加工需求。

## 参考文献：

- [1] 王亚龙,郝一舒. 基于实时力反馈的带锯床张紧装置设计与分析[J]. 工程机械,2026,57(1):85-88.
- [2] 么永强,弋景刚,王泽河,等. 立式轻型金属带锯床张紧力的研究[J]. 河北农业大学学报,2002,25(z1):289-291.
- [3] 邓方. 金属带锯床人机工程设计与应用研究[J]. 技术与市场,2020,27(1):150-151.
- [4] 江平,丁泽林,丁侠胜,等. 带锯床张紧装置结构设计[J]. 轻工机械,2017,35(1):82-85,90.