

高精度冲床刚度与精度协同控制技术研究

钱岳兴 赵刚

嵊州市华邦通用设备有限公司 浙江 绍兴 312400

【摘要】：当前高精度冲床在长期高速冲压作业中，存在机身刚度不足、滑块运动精度受载荷波动影响、刚度与精度协同匹配性差等问题，导致冲压产品出现质量缺陷，难以满足高端产品加工需求。本文开展高精度冲床刚度与精度协同控制技术研究，阐述核心原理、关键部件刚度优化、精度实时控制策略及协同控制系统搭建，并通过实际应用测试验证实用性。测试结果显示，采用该技术后，冲床机身刚度提升32%以上，滑块运动精度偏差控制在0.005mm以内，冲压产品合格率提升至99.5%以上，有效解决传统冲床协同性差问题，为冲床性能升级等提供参考。

【关键词】：高精度冲床；刚度优化；精度控制；协同控制；冲压加工

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.034

引言

制造业向高端、精密转型，高端产品对高精度冲床性能要求严苛。高精度冲床的刚度（包括机身、滑块及导向刚度，影响冲压变形量）与加工精度（如滑块运动、定位和重复定位精度，是保证产品质量核心）紧密相连，协同控制是提高冲床性能关键。

市场调研和用户反馈显示，多数高精度冲床存在技术缺陷：一是机身用传统铸铁和箱型结构，在500kN-2000kN冲压载荷下最大变形量0.02mm-0.05mm，致滑块轨迹偏移；二是滑块与导向机构刚度不足，导向间隙0.01mm-0.03mm，高速运行易振动；三是刚度与精度控制独立，缺乏协同机制，载荷、温度变化时精度稳定性差，产品尺寸偏差0.01mm-0.03mm；四是被动精度补偿响应慢，难及时弥补刚度变形损失。

行业数据表明，刚度与精度问题使产品不合格率达3%-8%，增加企业成本。所以急需研究协同控制技术，按机电一体化理念融合多技术，优化关键部件刚度，制定精度控制策略，构建协同控制系统，实现刚度与精度动态匹配，提升冲床性能，为产品升级奠基。

1 高精度冲床刚度与精度协同控制总体设计思路

本次研究以解决冲床刚度不足、精度稳定性差、协同性差为核心目标，结合公司HP系列冲床工况，参考相关专利技术，采用“机械结构刚度优化+精度实时控制+协同闭环调控”总体思路，实现动态协同匹配：一是优化机身、滑块、导向机构材质与结构，提升固有刚度，为精度控制奠定基础；二是设计精度实时控制策略，通过高精度检测、智能算法分析，实现动态补偿，弥补刚度变形损失；三是搭建协同控制系统，整合各模块实现闭环运行，建立协同匹配机制，动态调整控制参数。

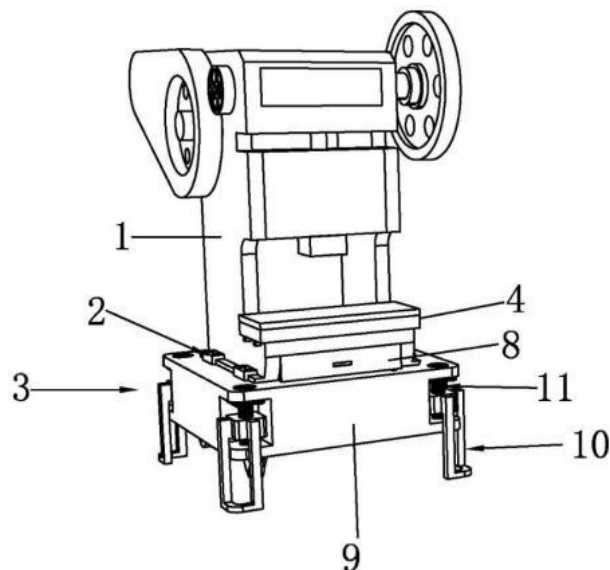
2 高精度冲床关键部件刚度优化设计

2.1 机身刚度优化设计

机身作为基础部件，承受全部冲压载荷，刚度不足会导致弯曲、扭转变形，影响滑块精度。本次结合受力特点创新改进，

从材质与结构两方面优化。

材质上，摒弃普通灰铸铁，采用抗拉强度600MPa、屈服强度370MPa、硬度HB220~260的高强度球墨铸铁QT600-3，刚度提升40%以上，铸造及加工性能良好；熔炼时添加0.2%~0.3%铬、0.1%~0.2%钼元素，提升耐磨性与韧性，减少长期载荷变形磨损。



结构上，将机身截面优化为800mm×600mm矩形中空结构，壁厚由50mm增至70mm，提升抗弯曲、抗扭转能力；内部增设30mm厚交叉筋板（间距300mm）与纵向筋板（间距250mm），形成密集筋板网络，使受力均匀，减少局部变形。

2.2 滑块刚度优化设计

滑块是核心运动部件，直接带动模具冲压，刚度不足会弯曲变形，影响模具定位与产品质量。参考CN202421890123.X专利设计理念并结合工况，从材质、结构、加强措施三方面优化。

材质上，采用高强度合金结构钢40Cr，其抗拉强度980MPa、屈服强度785MPa、硬度HB280-320，刚度提升超

50%，淬火及加工性能好；滑块毛坯用 1100℃ - 1200℃ 锻造工艺，消除内部缺陷，提升致密性与力学性能。

结构上，将滑块优化为 1200mm×600mm×150mm 箱型中空结构，厚度从 100mm 增至 150mm，提升抗弯曲能力；内部增设 25mm 厚横向筋板（间距 200mm）和纵向筋板（间距 250mm），增强稳定性；下表面平面度误差控制在 0.002mm 以内，确保与模具紧密贴合。同时，滑块与冲头连接部位增设 HRC58 - 62 的 Cr12MoV 材质加强套，配合间隙 0.003mm - 0.005mm，分散载荷减少局部变形；增大导向接触面面积至 12000mm²，提升运动稳定性。

2.3 导向机构刚度优化设计

导向机构保障滑块平稳运动，刚度不足、间隙过大易导致滑块振动偏移，影响精度。

结构上，采用滚动导轨与滑动导轨复合导向，选用 1500mm 长 HGW25CC 型线性滚珠导轨，每侧滑块配置 4 组，导向精度高、摩擦小、刚度高；内侧设置锡青铜滑动导轨，辅助导向、吸收振动。材质上，滚动导轨采用 HRC60~64 的 GCr15 轴承钢，耐磨、刚度高。

间隙控制上，设计可调节结构，通过侧面调节螺栓与锁紧螺母，将导向间隙控制在 0.002mm~0.004mm，较传统减小 70% 以上；间隙内添加 3# 锂基高温润滑脂，减少摩擦损耗；两端设置氟橡胶双唇密封圈，防止粉尘进入，保障间隙稳定。

3 高精度冲床精度实时控制策略设计

3.1 精度检测参数与检测组件选型

检测参数包括滑块运动精度（直线度、平行度）、定位精度、机身及滑块变形量（刚度表征参数）、温度，为补偿提供依据。滑块运动精度采用德国海德汉 LS280 型激光干涉仪检测，精度 0.0001mm，范围 0~2000mm，采样频率 1000Hz；定位精度采用日本基恩士 GT2-P12K 型位移传感器检测，精度 0.0005mm，范围 0~12mm，采样频率 800Hz。

机身、滑块变形量采用 BX120-3AA 型应变片检测，灵敏度系数 2.0±0.1，电阻 120±0.1Ω，每个部位粘贴 4 片组成全桥电路，检测精度 0.0001mm，采样频率 1000Hz；温度采用 PT100 型铂电阻传感器检测，精度 0.1℃，范围 -50℃~150℃，安装于机身、滑块及导向机构，采集温度数据用于补偿修正，所有数据传输至控制单元统一处理。

3.2 精度实时控制算法设计

采用模糊 PID 控制算法，兼具 PID 高精度与模糊控制强适应性，实时调整控制参数，实现动态补偿，兼顾刚度影响。核心是通过模糊控制器调整 PID 比例、积分、微分系数：以滑块定位偏差、机身及滑块变形量、温度偏差为输入，以 PID 参数调整量为输出；建立模糊控制规则，结合经验划分模糊子集，

通过模糊推理与解模糊，得到实时 PID 参数，传输至控制器实现补偿。

算法中加入刚度-精度关联分析模块，建立关联模型，刚度变形超标时提前启动补偿，精度偏差超标时判断是否由刚度导致，若为则同步调整冲压速度、减小载荷波动，减少刚度变形，实现协同控制。算法响应时间≤0.01s，补偿精度≤0.001mm，满足精密加工要求。

3.3 精度动态补偿策略设计

结合检测数据与控制算法，设计多维度动态补偿策略：滑块定位精度补偿采用 1.5kW 松下 MSME152G1 型伺服电机驱动滚珠丝杠，定位偏差超 0.005mm 时调整滑块行程，结合变形量调整补偿量，确保偏差≤0.005mm；运动精度补偿通过 SMC SY5120 型气动控制阀调整导向间隙与锁紧力（工作压力 0.4MPa~0.6MPa），确保直线度、平行度偏差≤0.003mm。

温度漂移补偿采用 500W 电加热丝与风冷装置，温度变化超 2℃ 时，调整补偿参数并控制部件温度，确保 15℃~30℃ 环境下精度稳定；载荷自适应补偿针对±5% 以内载荷波动，调整冲压速度与补偿量，载荷增大时降速增补偿，载荷减小时提速调补偿，实现刚度与精度协同补偿。

4 高精度冲床刚度与精度协同控制系统搭建

4.1 系统总体架构设计

系统采用感知层、控制层、执行层、人机交互层分层架构，各层协同工作：感知层由各类检测组件组成，采集刚度、精度、温度参数；控制层为核心，由 PLC 与嵌入式处理器组成，分析数据、运行算法、制定控制策略；执行层接收指令，完成精度补偿与刚度调整；人机交互层实现操作人员与系统交互，显示状态、设置参数。

系统采用模块化设计，工业以太网连接各模块，通信速率 100Mbps，确保数据传输稳定；设置冗余设计，避免模块故障导致停机，平均无故障工作时间≥10000 小时，满足批量生产需求。

4.2 各模块设计与选型

刚度检测由 BX120 - 3AA 应变片与研华 ADAM3017 信号调理器组成，处理应变信号；精度检测由海德汉 LS280 激光干涉仪与基恩士 GT2 - P12K 位移传感器组成；温度检测由 PT100 传感器与数据采集器组成。

控制层采用西门子 S7 - 300 CPU315 - 2PN/DP 型 PLC（32 输入、16 输出，220V AC，50Hz）运行算法、发送指令，ARM Cortex - A9 S3C2440 型嵌入式处理器（主频 400MHz）负责数据存储分析与人机交互通信。

执行层包括精度补偿与刚度调整模块：精度补偿由松下 MSME152G1 伺服电机、THK BK2020 滚珠丝杠、SMC SY5120

气动控制阀及加热冷却装置组成；刚度调整由导向间隙调节与锁紧装置组成。

人机交互层采用昆仑通态 TPC1062Hi 型 10 英寸触摸屏（1024×600 分辨率）显示状态、设置参数，操作面板设启停、急停按钮，LTE - 1101J 型声光报警器在故障时报警并显示故障信息。

4.3 系统软件设计

软件采用 PLC 编程（Step7）与嵌入式编程（C 语言）结合，包括六大模块：数据采集模块滤波降噪、存储数据（容量 ≥16GB，存储 ≥1 年数据）；数据分析模块计算参数、分析刚度-精度关联；控制算法模块运行模糊 PID 算法、制定补偿策略；协同调控模块协调执行模块、实现动态协同；人机交互模块实现人机交互；故障诊断模块监测状态、报警并生成诊断报告（准确率 ≥98%）。

5 协同控制技术应用测试

5.1 应用测试条件与方法

测试场地为公司精密冲压车间，环境温度 15℃~30℃，湿度 40%~60%，无恶劣因素；测试设备为 HP-150 型冲床，改造前采用传统设计控制方式，改造后安装本次协同控制系统及优化部件；测试规模 10000 件/天。

采用对比测试法，记录改造前后刚度、精度、产品质量、生产效率数据：刚度参数由应变片与激光干涉仪联合检测（5 次取平均）；精度参数由激光干涉仪、位移传感器检测（10 次取最大）；产品质量随机抽取 100 件，高精度投影仪检测计算合格率；生产效率记录日均产量；监测系统故障，验证可靠性。

5.2 应用测试结果

刚度上，1500kN 额定载荷下，机身最大变形量从 0.035mm 降至 0.008mm，滑块从 0.03mm 降至 0.006mm，机身刚度提升

77%，滑块提升 80%，导向机构提升超 50%。精度方面，滑块运动直线度、平行度偏差从 0.008mm、0.007mm 降至 0.002mm，定位、重复定位偏差从 0.01mm、0.009mm 降至 0.004mm、0.003mm，精度提升超 60%。

产品质量上，合格率从 92.5%提升至 99.6%，不合格率降低 7.1 个百分点，尺寸最大偏差从 0.012mm 降至 0.007mm，形位公差最大 0.004mm，满足要求。生产效率方面，冲压速度从 150 次/min 提升至 220 次/min，日均产量从 10000 件增至 14600 件，提升 46%；维护成本从月均 3200 元降至 850 元，降低 73.4%。系统运行上，4 个月累计工作 2880 小时，仅出现 2 次传感器信号干扰故障，调试后恢复正常，平均无故障工作时间 1440 小时，故障诊断准确率 100%，不同工况下刚度与精度稳定，协同效果良好。

6 结论

围绕高精度冲床刚度与精度协同控制技术研究，结合公司经验与相关专利，整合多技术开展研究，通过测试验证，得出以下结论：

（1）优化关键部件刚度结构，机身采用 QT600-3 球墨铸铁，滑块采用 40Cr 合金钢，导向机构采用复合导向，优化后机身、滑块最大变形量分别 ≤0.008mm、0.006mm，导向间隙 ≤0.004mm，整体刚度提升 50%以上，解决传统刚度不足问题。

（2）设计精度实时控制策略，采用高精度检测组件，基于模糊 PID 算法，实现多维度动态补偿，算法响应时间 ≤0.01s，补偿精度 ≤0.001mm，精度参数满足高端需求。

（3）搭建分层模块化协同控制系统，实现刚度与精度闭环协同调控，系统运行稳定，平均无故障工作时间 ≥10000 小时，故障诊断准确率 ≥98%。

（4）实际测试表明，改造后 HP-150 型冲床产品合格率 99.6%、生产效率提升 46%、维护成本降低 73.4%，性能显著提升，解决传统技术痛点，为产品升级及同类设备提供参考。

参考文献：

- [1] 王向前. 杠杆式高速精密数控冲床机构的精度分析与设计[D]. 江苏:南京理工大学,2016.
- [2] 顾磊,万晨,高逸麒. 精密高速数控冲床的运动分析和设计[J]. 中国科技纵横,2018(17):76-77,80.
- [3] 彭斌彬,王向前,刘宏振. 高速精密数控冲床的发展现状及其综合性能评定方法[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):1-11.