

# 冲床滑块运动轨迹偏差对钣金件冲压质量的影响分析及补偿控制研究

潘祺钦, 蔡文忠, 郭洪昌, 刘晓欢, 杨凯, 郑炜嘉

浙江易锻精密机械有限公司, 浙江 宁波 315700

DOI:10.61369/ETQM.2026010025

**摘要 :** 冲床滑块是钣金冲压加工中传递动力与运动的核心部件, 其运动轨迹精度直接决定钣金件的最终质量。本文以曲柄式冲床为研究载体, 深入剖析轨迹偏差对钣金件尺寸精度、形状精度、表面质量及力学性能的作用机制, 从机械结构优化与电控系统升级两个方向提出综合补偿控制策略, 并通过对比实验验证策略有效性。研究结果显示, 采用“机械改进+实时电控补偿”方案后, 滑块运动轨迹偏差可控制在0.015mm以内, 钣金件尺寸超差率从28%降至3%, 为高精度钣金冲压生产提供理论支持与实践路径。

**关键词 :** 冲床滑块; 运动轨迹; 偏差; 钣金件; 冲压质量; 补偿机制

## Analysis of the Impact of Punch Slider Motion Trajectory Deviation on the Stamping Quality of Sheet Metal Parts and Research on Compensation Control

Pan Qiqin, Cai Wenzhong, Guo Hongchang, Liu Xiaohuan, Yang Kai, Zheng Weijia

Zhejiang Yiduan Precision Machinery Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315700

**Abstract :** The punch slider is the core component for transmitting power and motion in sheet metal stamping processes, and the accuracy of its motion trajectory directly determines the final quality of sheet metal parts. This paper takes a crank-type punch as the research subject to deeply analyze the mechanisms by which trajectory deviations affect the dimensional accuracy, shape accuracy, surface quality, and mechanical properties of sheet metal parts. Comprehensive compensation control strategies are proposed from two directions: mechanical structure optimization and electronic control system upgrades, and the effectiveness of these strategies is verified through comparative experiments. The research results indicate that after adopting the "mechanical improvement + real-time electronic control compensation" solution, the deviation in the slider's motion trajectory can be controlled within 0.015 mm, and the out-of-tolerance rate for the dimensions of sheet metal parts decreases from 28% to 3%. This provides theoretical support and practical pathways for high-precision sheet metal stamping production.

**Keywords :** punch slider; motion trajectory; deviation; sheet metal parts; stamping quality; compensation mechanism

## 引言

在汽车制造、电子设备、航空航天等领域, 钣金件凭借轻量化、高强度、易批量生产的优势, 成为关键结构与外观部件的核心选择<sup>[1,2]</sup>。冲压加工作为钣金件成型的主流工艺, 其质量稳定性直接影响终端产品的装配性能与使用寿命。冲床滑块作为连接传动系统与模具的关键部件, 需严格遵循“垂直往复、水平无偏”的理想运动轨迹——在垂直方向保持稳定的速度与行程, 在水平方向控制极小的径向跳动, 确保模具上下模精准对位。随着制造业对钣金件精度要求的不断提升, 滑块运动轨迹偏差引发的质量问题愈发突出。实际生产中, 受机械磨损、负载波动、温度变形等因素影响, 滑块常出现“水平偏移”“倾斜摆动”“行程波动”等轨迹异常, 导致钣金件出现孔位偏差、折弯角度超差、表面划痕等缺陷, 不仅增加废品率, 还会加速模具损耗, 提高生产成本<sup>[3]</sup>。因此, 系统研究滑块运动轨迹偏差的影响规律与补偿方法, 对推动冲压行业高质量发展具有重要现实意义。

## 一、滑块运动轨迹偏差对钣金件冲压质量的影响机制

### （一）对钣金件尺寸精度的影响

尺寸精度是钣金件装配性能的核心指标<sup>[4]</sup>，滑块轨迹偏差对尺寸精度的影响主要体现在“行程深度偏差”与“水平位置偏差”两个方面。

当滑块存在行程深度偏差时，会导致钣金件的高度、孔深、折弯高度等尺寸超差。例如，在钣金件冲孔加工中，若滑块下行深度不足（偏差 $-0.08\text{mm}$ ），会导致孔未完全穿透，形成“半冲孔”缺陷；若下行深度过大（偏差 $+0.08\text{mm}$ ），会使下模承受过大压力，孔边缘出现“翻边”，超出设计尺寸要求。在折弯加工中，行程深度偏差会直接改变折弯角度，如设计折弯角度为 $90^\circ$ ，滑块下行深度不足 $0.05\text{mm}$ 时，折弯角度会增大至 $91.5\text{--}92^\circ$ ，导致钣金件无法与其他部件装配；若深度过大 $0.05\text{mm}$ ，折弯角度会减小至 $88\text{--}88.5^\circ$ ，同样影响装配精度。

当滑块存在水平位置偏差时，会导致钣金件的孔位、轮廓尺寸出现偏差。例如，在连续冲孔加工中，若滑块每次下行时水平偏移 $0.03\text{mm}$ ，经过10次冲压后，最终孔位与设计位置的偏差会累积至 $0.3\text{mm}$ ，远超 $\pm 0.05\text{mm}$ 的公差要求；在汽车门板轮廓冲压中，滑块水平偏移会导致模具与工件对位偏差，使门板边缘出现“缺口”或“多余料”，贴合间隙增大，影响车身密封性。

### （二）对钣金件形状精度的影响

形状精度反映钣金件几何形态的完整性，滑块轨迹偏差引发的“倾斜”“卡顿”会直接导致钣金件形状畸变，常见缺陷包括“翘曲”“扭曲”“波浪形变形”<sup>[5]</sup>。当滑块运动存在倾斜偏差时，会使钣金件承受不均匀冲压力，进而出现翘曲。例如，在平板冲压加工中，若滑块左侧下行速度比右侧快 $0.02\text{m/s}$ ，左侧冲压力会大于右侧，导致钣金件左侧向下弯曲、右侧向上翘起，形成“单边翘曲”，翘曲量可达 $0.5\sim 1\text{mm}$ ；在圆柱面钣金件冲压中，滑块倾斜会导致工件圆柱度超差，如设计圆柱度为 $0.03\text{mm}$ ，倾斜偏差会使圆柱度增大至 $0.1\text{mm}$ 以上，影响工件旋转性能。

当滑块运动存在卡顿偏差时，会导致钣金件局部出现波浪形变形。例如，在拉伸加工中，钣金件需通过滑块持续下行实现塑性变形，若滑块在中间位置卡顿 $0.1\text{s}$ ，会导致该位置材料变形不充分，与周围区域形成高度差，出现“波浪纹”；在折弯加工中，卡顿会使折弯部位出现“台阶”，折弯边直线度从 $0.02\text{mm}$ 增大至 $0.08\text{mm}$ ，破坏形状完整性。

### （三）对钣金件表面质量的影响

钣金件表面质量直接影响外观与耐腐蚀性，滑块轨迹偏差会通过“摩擦加剧”“压力不均”导致表面缺陷，常见问题包括“划痕”“压痕”“凹陷”<sup>[6]</sup>。当滑块运动存在水平窜动偏差时，会使模具与钣金件产生额外摩擦，出现划痕。例如，在不锈钢钣金件冲压中，滑块水平窜动会使上模与工件表面相对滑动，若模具表面存在微小毛刺，会在工件表面划出长度 $2\sim 5\text{mm}$ 的划痕；在家电面板冲压中，即使 $0.1\text{mm}$ 的划痕也会导致产品报废，显著增加生产成本。

当滑块运动存在压力波动偏差（下行过程中冲压力不均匀）时，会导致钣金件表面出现压痕或凹陷。例如，在冲压带有凸点的钣金件时，若滑块压力突然增大 $10\%$ ，会使凸点周围材料过度挤压，形成“环形压痕”；若压力突然减小 $10\%$ ，会导致凸点高度不足，出现“凹陷”，这些缺陷不仅影响外观，还会降低结构

强度。

### （四）对钣金件力学性能的影响

钣金件的力学性能决定其使用可靠性，滑块轨迹偏差会通过“变形不均匀”“残余应力增大”改变材料性能，甚至导致工件开裂。

当滑块轨迹偏差导致材料变形不均匀时，会使钣金件局部出现“过度变形”或“变形不足”，改变力学性能。例如，在低碳钢钣金件拉伸加工中，若滑块倾斜导致工件一侧变形量是另一侧的2倍，变形量大的区域会出现“加工硬化”，抗拉强度从 $300\text{MPa}$ 增至 $400\text{MPa}$ ，延伸率从 $25\%$ 降至 $15\%$ ，而变形量小的区域性能未达标，整体性能不均；在折弯加工中，变形不均匀会降低折弯部位疲劳强度，长期使用易出现裂纹。

当滑块轨迹偏差导致残余应力增大时，会加剧钣金件时效变形。例如，在 $5\text{mm}$ 以上厚板冲压中，滑块卡顿会使材料内部产生 $100\text{--}150\text{MPa}$ 的附加残余应力，若未及时消除，工件存放或使用中会出现时效变形，平面度从 $0.05\text{mm}$ 增至 $0.2\text{mm}$ ；在高精度仪器钣金件中，残余应力过大会影响仪器测量精度，导致设备性能下降。

## 二、滑块运动轨迹偏差的补偿控制策略

### （一）基于机械结构优化的被动补偿

机械结构优化是减少轨迹偏差的基础，通过改进部件设计、提升装配精度、加强维护保养，从源头降低偏差产生的可能性。

在关键部件设计上，针对易磨损部件采用高强度、高耐磨性材料。例如，曲柄与连杆的连接轴承可选用陶瓷材料，其耐磨性是传统轴承钢的 $3\text{--}5$ 倍，使用寿命延长 $2$ 倍以上，能有效减缓间隙增大速度，将水平偏移量控制在 $0.01\text{mm}$ 以内；导轨表面采用等离子喷涂技术，形成厚度 $50\text{--}100\mu\text{m}$ 的硬质涂层（硬度 $\text{HV}800$ 以上），摩擦系数降低 $30\%$ ，磨损量减少 $50\%$ ，避免滑块“卡滞”。同时，在连杆与滑块连接部位增加“浮动接头”，允许连杆存在微小角度偏差，避免附加扭矩传递至滑块，减少倾斜偏差。

在装配工艺上，采用高精度测量工具严格控制误差。装配曲柄与连杆时，使用激光对中仪检测同轴度，确保误差不超过 $0.005\text{mm}$ ；装配导轨与滑块时，用塞尺检测配合间隙，确保间隙在 $0.01\sim 0.03\text{mm}$ 范围内，间隙过大时加装垫片调整，间隙过小时通过精密磨削修正。装配后还需进行空载试运行与负载测试，空载时通过光栅尺检测滑块水平偏移与垂直速度波动，确保偏移量不超过 $0.02\text{mm}$ 、速度波动不超过 $5\%$ ；负载时模拟实际工况检测轨迹偏差，不合格则重新调整。

在维护保养上，建立“定期检查-及时更换”制度。制定“每月检查、每季度保养、每年大修”计划，每月用百分表检测导轨磨损量，磨损量达 $0.03\text{mm}$ 时及时更换；每季度拆解曲柄连杆机构，清洗轴承并补充润滑脂，避免润滑不足加剧磨损；每年全面拆解设备，检测曲柄、滑块变形情况，变形量超过 $0.02\text{mm}$ 时通过校正或更换恢复精度。同时，在冲床上安装振动传感器与温度传感器，实时监测部件状态，当轴承振动幅度超过 $0.1\text{mm/s}$ 或温度超过 $80^\circ\text{C}$ 时，及时预警停机检查。

### （二）基于电控系统的主动补偿

电控系统主动补偿是控制轨迹偏差的核心，通过实时检测、

动态调整、预测优化,实现偏差的精准修正<sup>[7]</sup>。构建多传感器实时检测网络是基础,在滑块四个角部分别安装光栅尺,实时采集水平位置与垂直行程数据,计算水平偏移与倾斜偏差;在曲柄轴上安装扭矩传感器,检测负载变化;在模具上安装压力传感器,监测冲压力分布。传感器数据实时传输至数控系统,通过卡尔曼滤波算法消除噪声干扰,确保偏差数据可靠,滤波后光栅尺检测误差从0.001mm降至0.0005mm。

采用PID控制算法实现动态调整,根据检测到的轨迹偏差实时优化伺服电机输出。例如,光栅尺检测到滑块水平偏移0.02mm时,系统计算调整量,通过PID算法控制伺服电机驱动导轨微调,将滑块拉回预设位置,响应时间控制在5ms以内;针对负载波动导致的行程深度偏差,采用“负载自适应PID控制”,根据扭矩传感器数据动态调整PID参数,负载增大时提高输出扭矩,避免行程不足,负载减小时降低扭矩,防止“过冲”,可将行程深度偏差控制在0.01mm以内。

引入机器学习算法实现预测性补偿,通过BP神经网络建立偏差预测模型<sup>[8,9]</sup>。采集大量历史数据(不同负载、温度、材料厚度下的偏差数据)训练模型,使模型能根据当前工况参数(材料厚度、冲压速度、环境温度)预测即将出现的偏差,提前输出补偿指令。例如,检测到材料厚度增加0.1mm时,模型预测滑块行程

表1不同工况下的滑块轨迹偏差与钣金件质量差异

工况类型	滑块水平偏移量 (mm)	滑块倾斜偏差 (mm)	滑块行程深度偏差 (mm)	钣金件孔位超差率 (%)	钣金件折弯角度超差率 (%)	钣金件表面划痕缺陷率 (%)
无补偿	0.05-0.08	0.04-0.06	0.05-0.07	25	30	20
仅机械补偿	0.03-0.04	0.02-0.03	0.03-0.04	10	12	8
机械+电控补偿	0.008-0.015	0.005-0.008	0.005-0.01	3	4	1

从表中数据可见,无补偿工况下,滑块轨迹偏差最大,钣金件质量缺陷率最高;仅机械补偿工况下,滑块各项偏差显著降低,钣金件缺陷率大幅下降;机械+电控补偿工况下,滑块水平偏移量最小仅0.008mm,行程深度偏差最小仅0.005mm,钣金件孔位超差率降至3%,折弯角度超差率降至4%,表面划痕缺陷率降至1%,整体质量显著提升。

直观展现不同工况下滑块轨迹偏差的变化规律,绘制图1所示对比曲线。由图可知,随着补偿策略的升级,水平偏移量、倾斜偏差、行程深度偏差均呈显著下降趋势,其中“机械+电控补偿”方案对倾斜偏差的优化效果最为突出,降幅达87%,充分体现了机械结构优化与电控系统补偿的协同作用。

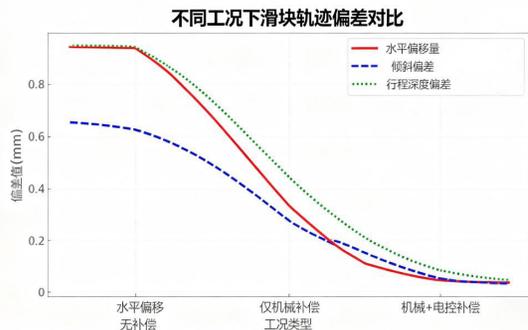


图1不同工况下滑块轨迹偏差对比

不同工况下钣金件质量缺陷率的变化趋势如图2所示。曲线清晰表明,无补偿工况下各类缺陷率均处于较高水平,仅机械补偿

深度需增加0.05mm,提前调整伺服参数;检测到环境温度升高10°C时,预测水平偏移会增加0.01mm,提前微调导轨位置,将偏差消除在萌芽状态。

### 三、补偿控制策略的实验验证

为验证补偿策略有效性,以J23-63型曲柄冲床为实验对象,1mm厚SPCC低碳钢薄板为冲压材料,开展“无补偿”“仅机械补偿”“机械+电控补偿”三种工况的对比实验,测试滑块轨迹偏差与钣金件质量。

#### (一) 实验设备与参数

实验设备包括J23-63型冲床(公称压力630kN,最大行程120mm)、光栅尺(精度0.001mm)、扭矩传感器(量程0-1000N·m)、压力传感器(量程0-1000kN)、三维坐标测量仪(精度0.001mm)。冲压工艺参数设置为:滑块行程速度0.25m/s,冲压间隙0.15mm,连续冲压100件带冲孔与折弯特征的钣金件。

#### (二) 实验结果与分析

实验结果显示,三种工况下的滑块轨迹偏差与钣金件质量存在显著差异,具体数据如下表1所示:

可使缺陷率大幅下降,而机械+电控补偿方案进一步将孔位超差率降至3%、折弯角度超差率降至4%、表面划痕缺陷率降至1%,各类缺陷率降幅均超过80%,直观印证了滑块轨迹偏差控制对钣金件质量的关键影响。

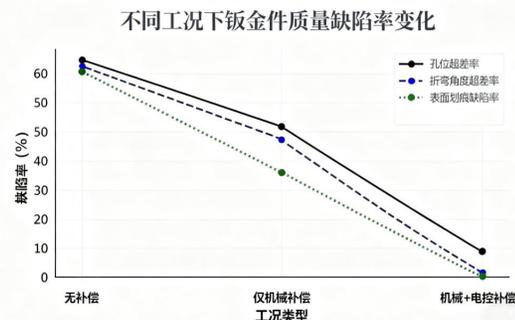


图2不同工况下钣金件质量缺陷率对比

实验结果表明,机械补偿能有效减少静态偏差,电控补偿可实时修正动态偏差,两者结合可实现滑块轨迹偏差的精准控制,大幅提升钣金件冲压质量。

### 四、结语

本文通过对滑块运动轨迹偏差的系统研究,得出以下结论:采用“机械结构优化+电控系统补偿”的综合策略,可将滑块轨迹偏差控制在0.015mm以内,钣金件缺陷率大幅降低,有效解决

冲压质量问题。未来研究可聚焦三个方向：一是开发基于工业互联网的智能补偿系统，实现多台冲床的协同补偿与远程监控<sup>[10]</sup>；二是深入研究多因素耦合偏差的作用机制，优化补偿算法，提升复杂工况下的控制精度；三是探索数字孪生技术在补偿控制中的应用，通过构建冲床数字模型，提前模拟偏差影响，优化补偿参数，为高精度冲压生产提供更高效的解决方案。

## 参考文献

- [1] 苾晓楠. 钣金件压筋加工方法改进与参数补偿机制 [J]. 金属加工 (冷加工), 2025, (10): 94-95+98.
- [2] 卢广华, 倪雁冰, 范胜波, 等. 钣金虚拟仿真实验平台建设与应用 [J]. 锻压技术, 2024, 49(01): 236-240.
- [3] 郑文雅, 宋安源. 复杂型面钛合金钣金零件高效数控加工工艺分析 [J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61(01): 162-164.
- [4] 王俊豪. 基于响应面与3DCS的车身钣金件定位布局优化设计 [J]. 汽车制造业, 2025, (05): 76-81.
- [5] 刘春晖. 汽车钣金修复从入门到精通 [M]. 化学工业出版社: 202007: 235.
- [6] 冯运, 郭聚东, 刘晓阳. 铆工 (钣金工) 实用手册 [M]. 化学工业出版社: 202205: 604.
- [7] 续永, 王瑛琪, 张武亮. 多端直流配电系统对负载变流器相位补偿控制的应用研究 [J]. 灯与照明, 2025, 49(05): 130-132.
- [8] 刘英, 夏强, 王伟彬, 等. 基于可解释机器学习模型的复合生物酶道路固化土类水稳结构强度评估研究 [J]. 四川环境, 2025, 44(05): 110-118.
- [9] 张思晨, 周善石, 郭睿, 等. 基于机器学习的 ERP 中长期预报方法研究 [J/OL]. 大地测量与地球动力学, 1-11[2025-10-31].
- [10] 陶冲. 基于智能监理技术的机械设备安装质量控制研究 [J]. 中国品牌与防伪, 2025, (09): 178-180.