

金属切削机床设计工艺与精度控制策略

尚春雷 魏 煜 张文强

齐重数控装备股份有限公司 黑龙江齐齐哈尔 161000

摘 要: 金属切削机床是现代制造业的核心装备, 其设计过程及精度控制策略直接关系到生产效率与产品质量。随着工业技术的不断发展, 切削加工设备的应用越来越广泛, 对加工精度、可靠性的要求也越来越高。金属切削机床设计工艺与精度控制策略的优化, 不仅能提升机床加工精度与寿命, 而且能显著提高企业的生产率与市场竞争力。因此, 对金属切削机床的设计工艺及精度控制策略进行深入研究, 不仅具有重要的理论意义, 而且具有重要的现实意义。

关键词: 金属切削机床; 设计工艺; 精度控制

在设计和使用金属切削机床时, 为保证加工质量, 必须保证加工精度, 机床精度对被加工工件的质量有很大的影响, 其中包括主轴回转误差、导轨直线度误差、传动链误差、工具夹具误差等。如主轴回转误差会引起工件加工面的不平度; 导轨直线度误差对刀具轨迹和工件外形精度有很大影响, 传动链误差则会造成机械尺寸偏差。另外, 刀具磨损、夹具装配精度等因素对加工精度也有很大影响, 因此, 优化设计工艺与精度控制策略, 是提升机床性能与质量的关键。

一、金属切削机床设计中精度控制的重要性

(一) 提升加工件质量的关键

金属切削机床精度控制对保证工件质量具有重要意义(金属切削机床如图1)。机床的精度对工件的尺寸精度、形位精度及表面质量有很大的影响。高精度机床可以降低加工误差, 保证被加工零件的形状、尺寸达到设计要求, 提高产品的总体质量。航空航天、医疗器械等高精密制造业对被加工零件的精度提出更高的要求, 只有依靠高精度机床和严格的控制才能满足这些行业的需要。同时, 精度控制也可以降低后续加工、返工成本, 提高生产率。



图1 金属切削机床

(二) 增强生产效率与成本效益

精度控制不仅可以提高工件的质量, 而且可以显著提高生产率和降低成本。利用精密控制系统及高效率的刀具, 可在较短的时间内完成复杂零件的加工, 缩短加工周期, 降低生产成本。高精度机床可降低因加工错误而造成的废品率, 减少返工及修整的需求, 节省原料及工时。此外, 精度控制还可以延长刀具使用寿命, 优化加工周期, 进一步提高生产率, 提高经济效益。

(三) 促进技术创新与产业升级

将精度控制技术应用金属切削机床的设计, 对于推动技术创新、产业升级具有重要意义^[1]。这些技术上的进步, 不但可提高机床的加工精度, 而且也可促进机床设计与制造工艺的革新。如采用高精度滚珠丝杠, 精密导轨等零件, 引入误差补偿算法及自适应控制技术, 可有效地提高加工精度。这一技术创新与产业升级, 将有助于我国企业在国际市场上保持竞争力, 满足对精密加工的要求。

(四) 保障安全生产与操作便捷性

将精度控制应用于金属切削机床的设计中, 也可保证生产的安全性及操作的便利性^[2]。高精度机床可以有效地降低加工时的振动、热变形, 提高加工稳定性。这样既可以提高加工精度, 又可以降低机床失稳引起的安全事故。同时, 采用现代化的CNC系统、自动控制技术, 可简化作业程序, 减少人工作业环节, 降低了作业难度。这种简便的作业方式, 在提高生产效率的同时, 也减少人为失误, 使生产更加安全。

二、金属切削机床设计工艺与精度控制策略

(一) 优化结构设计以提升稳定性

在机床设计阶段, 对机床整体结构进行优化是提高

机床加工精度的一个重要环节。主要包括：选用高强度低变形材料制造机床床身及主要支承件，如刚、热稳定性好的铸铁、花岗岩等^[3]。同时，可利用有限元技术，预测机床结构的应力分布及变形情况，识别并完善可能的薄弱环节。此外，在设计过程中还应充分考虑机床振动模式等动力学特性，在加工过程中加入减振元件、调整结构布置等措施减小振动，以保证加工的稳定性与精度。

例如，在设计新型卧式加工中心的过程中，应重点对结构设计进行优化，以提高其稳定性。机床床身选用抗拉强度高达350 MPa、热膨胀系数 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 的高强度铸铁，较常规铸铁有较大提高。主要支撑部件为花岗岩，具有高硬度和高耐磨特性，导热系数仅为 $2.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，有效降低热变形对机床精度的影响。用有限元软件模拟机床的整体结构。模拟时，采用等效切削力和重力等载荷来模拟实际加工条件。通过分析发现，机床床体与立柱的结合部存在着明显的应力集中，当受到较大的切削力时，会出现微小的变形。为此，应对节点结构进行优化，并在节点处增设了加劲肋，加劲肋厚度设置为20 mm，宽30 mm，数量增加到5根。通过优化设计，此部位的应力可减少30%左右，结构强度得到有效提高。

采用模态分析法，考虑机床的振动模式，确定机床的自振频率。如机床在一定转速时，主轴系统和床身发生了共振，振动幅度达0.15 mm，严重影响机床的加工精度。为此，可对主轴系统加装阻尼元件，选择阻尼系数0.3、刚度500 N/mm的橡胶减振垫。同时对床身内筋板布局进行调整，使筋板倾角由 45° 到 60° 从而改变机床结构的动力学特性。通过一系列的优化设计，使整个转速范围的振动振幅小于0.05 mm，从而有效地保证加工的稳定性和精度。通过实际加工试验，被加工零件的尺寸精度由 ± 0.05 毫米提高到 ± 0.03 毫米，圆度误差由0.04毫米减小到0.02毫米。

（二）高精度传动系统设计

机床的传动精度对机床的加工性能有很大的影响，为实现高精度控制，需使用高精度滚珠丝杠、直线导轨、伺服电机等精密传动元件，以保证运动部件的定位精度与重复定位精度^[4]。通过严格的预载荷控制、运动部件的平行度、垂直度调节、传动链误差补偿等方法，消除累积误差，确保长周期运行的高精度性能。

例如，为适应精密加工的需要，铣床可采用高精度滚珠丝杠，螺杆直径40毫米，导程10毫米，螺距误差

小于0.002毫米，定位精度 ± 0.005 毫米，重复定位精度 ± 0.003 毫米。采用高刚性、高精度的直线导轨，导轨滑块平行度误差不大于 ± 0.003 毫米，垂直度误差小于 ± 0.005 毫米。安装时，采用严格的预载控制滚珠丝杠。利用专用模具对螺杆螺母进行预紧力，根据螺杆规格和载荷条件计算确定预紧力，并将其设置在1500 N。同时，使用高精度的测量仪器对各运动部件的平行度和垂直度进行校正。采用激光干涉法对导轨的直线度、平行度进行测量，并对导轨安装垫铁的高度进行调节，使其直线度误差小于 ± 0.002 毫米/米。为对传动链误差进行补偿，在机床上可配置先进的误差补偿装置，该系统利用安装在丝杠末端的编码器对丝杠的转角进行实时监控，一旦发现传动链有误差，则自动调节伺服电动机的速度，实现误差补偿。经长期连续加工，传动链累计误差由 ± 0.02 毫米降到 ± 0.008 毫米。在实际加工中，50 mm直径圆腔的圆度误差由0.03 mm降低到0.015 mm，型面精度由 ± 0.02 mm提高到 ± 0.01 mm，有效地提高机床的加工性能和精度。

（三）智能温控与热误差补偿

金属切削时产生的热是造成机床热变形及加工误差的主要原因，因此，在设计过程中需要集成智能温控系统，如利用制冷循环系统实现关键零部件的恒温控制，并通过温度传感器实时监控机床各个部分的温度变化^[5]。还要建立热误差补偿算法，对刀具轨迹、进给速度等工艺参数进行动态调整，消除温度变化带来的误差，保证加工精度的一致性。

例如，航空铝合金加工中心切削温度高达300~400 $^{\circ}\text{C}$ ，切削过程中极易产生热变形，影响加工精度。为达到智能温控的目的，在主轴、丝杠和导轨等关键零部件上加装制冷循环系统。以主轴为例，可采用半导体致冷器，制冷功率300 W，使主轴温度稳定在 $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 。在机床的各个部位安装10台高精度的温度传感器，以10 Hz的频率进行实时的温度测量。在此基础上，利用温度传感器采集到的数据，采用多元线性回归算法对机床各坐标轴的热变形进行预测。如主轴温度每提高10 $^{\circ}\text{C}$ ，X轴和Y轴的热变形分别为0.02毫米和0.015毫米。同时，可开发一套热误差补偿软件，该软件可根据热变形预测结果实时调整刀具路径及进给速度。在航空发动机叶片的加工过程中，对叶片型面的加工精度有着非常高的要求。该补偿软件在机床温升引起刀位热变形的情况下，自动调整刀位轨迹，并根据热误差模型计算出补偿量。通过实际加工验证，经过5 h连续加工，叶

片型面轮廓误差由 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 降至 $\pm 0.02 \text{ mm}$ ，有效消除温变引起的误差，确保加工精度一致性，满足航空零件高精度加工要求。

（四）先进的控制系统与软件优化

采用高性能数控系统是实现高精密加工的前提，这就要求该系统具有处理速度快、插补精度高、误差补偿能力强等优点^[6]。可开发集成自适应控制、预测控制等先进加工策略的专用控制软件，根据工件材料特性、刀具状态、切削工况等因素，实现工艺参数的自动调整，实现最优加工路径规划与路径控制。另外，软件还需要支持实时监测和故障诊断，使加工过程中出现的偏差能够及时发现和纠正。

例如，企业可采用先进的控制系统和优化软件，系统采用高性能处理器，每秒可达十亿次浮点运算，对复杂加工程序具有较快的处理能力。插补精度可达 $\pm 0.001 \text{ mm}$ ，可实现对曲线的高精度插补。如在汽车发动机缸体加工过程中，可依据工件材质（铝合金，硬度 HB90-110）、刀具状态（刀具磨损监测系统实时监控）和切削状态（切削力传感器实时获取，切削力范围 500 N-1500 N），实现工艺参数的自动调节。在刀具磨损量为 0.1 mm 的情况下，为保证加工质量与效率，系统将自动降低 10% 的切削速度，提高 5% 的进给速度。该软件为实时监控提供了一种新的技术手段，可以根据机床各部分的传感器实时采集机床运行参数，如主轴转速，进给速度，刀位等。如刀具位置偏差大于 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 时，软件立即报警，并对数据进行分析，找出产生偏差的原因，并采取相应的纠正措施。在实际加工过程中，采用先进的控制系统和软件优化方法，将缸体的尺寸精度由 $\pm 0.03 \text{ mm}$ 提高到 $\pm 0.015 \text{ mm}$ ，圆柱度误差由 0.02 mm 降到 0.01 mm，从而有效地提升加工精度与生产效率。

（五）严格的检验与校准流程

通过严格的出厂检测及定期校准流程，可保证机床精度长期稳定。采用激光干涉仪和三坐标测量机等高精度测量设备，对机床的几何、定位、运动等多个维度进行全方位的检测。制定详细的维修计划及校验记录，定期对机床进行预防性维修及精度复查，对出现的偏差及时进行调整和纠正，保证机床一直处于最好的工作状态，满足高精度加工的需要。

例如，机床制造厂对机床的检测和校准可利用激光干涉技术，在机床出厂前检测机床的定位精度。通过对一个龙门加工中心的测量，其测量精度达到 $\pm 0.001 \text{ mm}$ ，具有良好的应用前景。在 X 轴的定位精度检测中，

在整个行程（X 轴冲程 5000 mm）内，每 500 mm 设一个检测点，共计 11 个检测点。经检测，该机床的 X 轴定位精度可达到 $\pm 0.005 \text{ mm}$ ，达到高精度加工的要求。利用三坐标测量机检测工作台平面度，主轴轴与工作台垂直度等几何精度。检测工作台的平整度达到 $\pm 0.003 \text{ mm}$ ，主轴轴线和工作台的垂直度误差小于 0.005 mm，制定详细的维护计划和检查记录。对每台机床，每 2000 小时做一次预防性维护和精密度检查。在标定时，若发现机床的定位精度偏差大于 $\pm 0.01 \text{ mm}$ ，则可采用调整丝杠螺母间隙、校正编码器等方法予以修正。如在发现 Y 轴定位精度有偏差的情况下，对螺杆螺母间隙进行检查，发现螺杆螺母间隙增加，调整螺母预紧力，将间隙由 0.03 mm 调节到 0.01 mm，从而使 Y 轴定位精度恢复到 $\pm 0.005 \text{ mm}$ 。严格的检测校准流程，确保机床长时间处于高精度运行状态。

结束语

综上所述，对机床设计工艺进行优化，可有效降低主轴回转误差、导轨直线度误差及传动链误差，提高机床加工精度与稳定性。同时，强化精度控制策略的应用，可进一步提高机床性能与寿命，满足现代制造对精密加工的要求。未来，随着技术水平的不断提高，金属切削机床在设计过程与精度控制方面也将向智能化、自动化方向发展，为我国制造业的发展提供强有力的支撑。

参考文献

- [1] 崔中，王文浩，耿继青，王婷，尹汉锋. 基于近似模型的机床铣削质量稳健性优化设计[J]. 湖南大学学报（自然科学版），2023，50（12）：194-202.
- [2] 易宗煜，丁国龙，王维，彭玲. 基于流固耦合的插齿机静压主轴结构优化设计[J]. 机床与液压，2023，51（13）：87-94.
- [3] 姜春泉. 激光焊铣复合加工中心的机械结构设计[J]. 机电技术，2023，（02）：64-67.
- [4] 周伯华，熊昌秀，丁玲，张玉叶. 汽车制动鼓钻孔、正反倒角专用数控机床设计[J]. 组合机床与自动化加工技术，2023，（03）：160-162.
- [5] 刘亚红. 基于精度控制的金属切削机床设计工艺[J]. 铸造，2023，72（02）：222.
- [6] 罗蓓. 智能制造环境下金属切削机床数控系统体系结构研究[J]. 现代工业经济和信息化，2022，12（12）：60-62.