

# 机械加工精度提升的关键技术研究与应用

金彦霖 王伊涛 张家文

一拖(洛阳)柴油机有限公司 河南 洛阳 471000

**摘要:** 本文从机械加工误差产生的原因入手,系统分析了影响加工精度的关键因素,包括机床精度、刀具性能、工艺系统刚度、热变形等。通过深入研究误差补偿技术、超精密加工技术、智能控制技术等关键技术,结合实际应用案例并融入详细技术细节与数据,探讨了提升机械加工精度的有效途径。研究表明,综合运用先进加工技术、智能控制方法和精密测量手段,可显著提高机械加工精度,推动制造业高质量发展。

**关键词:** 机械加工精度; 误差补偿; 超精密加工; 智能控制; 制造业

## 1 引言

机械加工是制造业根基,其精度关乎产品质量性能。航空航天等领域对零部件加工精度要求极高,如航空发动机涡轮叶片,微小偏差都会影响发动机效能。但实际加工中,受机床等多种因素影响,会产生误差致精度不达标。研究机械加工精度提升技术,对提高质量、降低成本、增强竞争力意义重大。近年来,数控等技术发展,使误差补偿、超精密加工、智能控制等精度提升技术取得进展。本文将分析误差成因,研究关键技术,结合案例探讨应用效果并融入技术细节与数据。

## 2 机械加工误差产生的原因分析

### 2.1 机床精度误差

机床精度影响加工质量,含几何、传动和运动误差。几何误差由部件制造和装配误差致,如主轴回转误差影响加工精度,普通数控铣床主轴径向跳动误差可能达5-10 $\mu\text{m}$ ;导轨直线度误差影响工件运动精度,普通机床导轨直线度误差约0.02-0.05mm/1000mm。传动误差因传动元件制造、装配误差及间隙引起,如一级齿轮传动,齿距累积误差0.02mm,传动比5:1时,输出轴转动误差可能达0.1mm。运动误差由运动部件振动和变形导致,如高速铣削铝合金,主轴转速超10000r/min,机床振动加速度5-10m/s<sup>2</sup>,表面粗糙度Ra值增0.5-1 $\mu\text{m}$ 。

### 2.2 刀具误差

刀具误差直接影响加工表面精度。制造误差指刀具制造时的尺寸、形状和位置误差,如标准直径20mm铣刀,直径误差 $\pm 0.01\pm 0.02\text{mm}$ ;车刀刃口形状误差会使圆柱面出现波纹。安装误差由安装不正确产生,如车刀主偏角偏差1°,加工外圆工件直径误差约0.01-0.02mm;高低偏差影响切削位置和工件尺寸<sup>[1]</sup>。磨损指切削中刀具磨损,尺寸形状改变,如车削钢件1-2小时,硬质合金车刀后刀面磨损量VB值达0.1-0.2mm,工件直径增大。

### 2.3 工艺系统刚度误差

工艺系统由机床、刀具、夹具和工件组成,切削力下弹性变形致误差,刚度不足是主因,加工细长轴、薄壁件等弹性变形显著,如车削长径比大于20的细长轴,切削力100-200N时,弯曲变形量0.1-0.3mm,呈腰鼓形。

### 2.4 热变形误差

切削热、摩擦热使机床、刀具和工件热变形致误差,与加工条件等因素有关,如中型数控铣床连续高速切削2-3小时,主轴热伸长量0.05-0.1mm;长度100mm立铣刀切削1小时,因热膨胀长度增0.02-0.05mm。

### 2.5 工件内应力引起的误差

加工中切削力、切削热使工件产生残余应力,致加工后变形,影响精度,如长宽比3:1的矩形薄板加工后可能翘曲0.5-1mm,影响装配。

## 3 机械加工精度提升的关键技术研究

### 3.1 误差补偿技术

#### 3.1.1 硬件补偿

光栅尺补偿:光栅尺是高精度位移测量装置,精度达 $\pm 1\mu\text{m}$ 甚至更高。在数控机床进给轴安装,可实时测工作台位移,与指令位移比较算误差,再用微位移驱动器(如压电陶瓷驱动器,响应快、分辨率高)补偿刀具位置。

激光干涉仪补偿:激光干涉仪是利用激光干涉原理的高精度长度测量仪器,精度约0.1 $\mu\text{m}$ 。在机床热变形补偿中,可实时测主轴、导轨等热伸长量。在关键部位装温度传感器,结合测量结果建热变形误差模型,依模型算补偿量,通过数控系统补偿刀具位置。

#### 3.1.2 软件补偿

基于模型的补偿方法:建机床几何、热误差等模型预测补偿误差。如建主轴热变形模型(非线性函数),采实验数据用最小二乘法、神经网络等拟合参数。实际

加工依温度变化算热变形量，数控系统补偿刀具位置。

基于神经网络的补偿方法：利用神经网络非线性映射能力建模补偿误差。采机床运动、温度参数和误差测量值等作训练样本，常用BP、RBF神经网络等。以BP神经网络为例，有输入、隐藏、输出层，节点数依参数和经验确定，训练后可准确预测并实时补偿误差。

### 3.2 超精密加工技术

#### 3.2.1 单点金刚石切削

单点金刚石切削（SPDT）是利用天然单晶金刚石刀具对有色金属、光学玻璃等材料进行超精密加工的技术。金刚石刀具具有极高的硬度和耐磨性，其硬度可达10000HV以上，能够切削出表面粗糙度极低、形状精度极高的工件。单点金刚石刀具的制备是关键环节。通常采用化学气相沉积（CVD）或物理气相沉积（PVD）等方法在刀具基体上生长金刚石薄膜，然后通过精密磨削和抛光工艺制备出具有锋利刃口和高精度的刀具。刀具的刃口半径可达到20-50nm，能够实现纳米级切削。在单点金刚石切削过程中，加工参数如切削速度、进给量、切削深度等对加工精度和表面质量有重要影响<sup>[2]</sup>。一般来说，切削速度越高，表面粗糙度越低，但过高的切削速度会导致刀具磨损加剧。例如，在切削铝合金时，切削速度在1000-3000m/min范围内，表面粗糙度Ra可达到0.01-0.05 $\mu\text{m}$ 。进给量越小，表面粗糙度越低，但会降低加工效率。切削深度的选择也需要综合考虑刀具强度和加工质量，一般切削深度在0.1-5 $\mu\text{m}$ 之间。通过优化加工参数，可以实现高精度、高效率的加工。

#### 3.2.2 磁流变抛光

磁流变抛光（MRF）是一种利用磁流变液在磁场作用下的流变特性对工件表面进行抛光的技术。磁流变液由磁性颗粒、载液和稳定剂组成，在磁场作用下，磁性颗粒沿磁场方向排列，形成链状结构，使磁流变液的黏度发生显著变化。通过控制磁场的强度和分布，可以精确控制磁流变液的抛光力，实现对工件表面的高精度抛光。磁流变液的性能直接影响抛光效果。通过优化磁性颗粒的种类、粒径、含量以及载液和稳定剂的配方，可以提高磁流变液的抛光性能。例如，采用碳化铁磁性颗粒，其粒径分布在1-5 $\mu\text{m}$ ，含量为30%-40%，以硅油为载液，并添加适量的稳定剂，制备出的磁流变液具有良好的流变特性和抛光稳定性。在抛光过程中，这种磁流变液能够形成均匀、稳定的抛光区域，使工件表面获得较好的粗糙度和面形精度。精确控制磁场是磁流变抛光的关键。通常采用电磁铁或永磁体产生磁场，通过调节电流或磁体位置来控制磁场强度和分布。抛光头的设计也

至关重要，其形状和尺寸应根据工件的形状和加工要求进行优化。例如，对于平面工件的抛光，可采用圆形抛光头；对于曲面工件，如光学镜片，抛光头的形状应与曲面相匹配，以保证抛光过程中抛光液与工件表面均匀接触。

#### 3.2.3 离子束加工

离子束加工是利用离子束对材料进行轰击，实现材料的去除、沉积或改性等加工过程。离子束加工具有加工精度高、加工应力小、可加工复杂形状等优点。离子源是离子束加工的核心部件，其性能直接影响离子束的质量和加工效果。常用的离子源有考夫曼离子源、射频离子源等。考夫曼离子源能够产生高能量、高密度的离子束，其离子能量可在100-1000eV范围内调节，离子束流密度可达1-10mA/cm<sup>2</sup>。射频离子源则具有结构简单、工作稳定等优点，适用于一些对离子束能量和密度要求不是特别高的加工场合<sup>[3]</sup>。离子束加工的工艺参数包括离子能量、离子束流、加工时间等。离子能量越高，材料的去除速率越快，但过高的离子能量会导致加工表面产生热损伤和晶格损伤。例如，在硅材料的离子束刻蚀中，当离子能量为500eV时，刻蚀速率约为100nm/min，表面粗糙度Ra可控制在0.1nm以内；当离子能量增加到1000eV时，刻蚀速率提高到200nm/min左右，但表面粗糙度Ra会增大到0.5nm左右。离子束流的大小也会影响加工效果，较大的离子束流可以提高加工效率，但可能会降低加工精度。加工时间则需要根据加工深度和加工要求进行精确控制。

### 3.3 智能控制技术

#### 3.3.1 基于传感器网络的加工状态监测

在机床关键部位装加速度（测量范围 $\pm 10\text{g}$ ，分辨率0.001g）、温度（精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ）、力（精度 $\pm 0.1\text{N}$ ）等传感器构建网络，实时采集加工中的振动、温度、切削力等信息并传至上位机分析。若振动加速度超阈值，系统报警提示调整参数或检查机床；主轴升温过快，系统依热变形模型预测量并调整刀具补偿。

#### 3.3.2 基于人工智能的加工参数优化

借助遗传算法等人工智能算法优化机械加工参数。以遗传算法为例，模拟生物进化机制，将切削速度等作为变量，加工精度等作为目标函数。先随机生成初始参数种群，计算个体适应度值，经选择、交叉、变异等操作迭代，最终得出最优参数组合。

#### 3.3.3 自适应控制技术

自适应切削力控制实时监测切削力，依变化自动调整参数保稳定。如铣削时切削力增大，系统降进给速度

或切削深度防刀具损坏；减小则提高效率<sup>[4]</sup>。自适应进给速度控制根据加工余量和刀具磨损实时调整速度，加工复杂曲面时，依余量信息使刀具在不同部位快慢进给，保证精度与质量。

#### 4 应用案例分析

##### 4.1 案例一：航空发动机叶片加工

航空发动机叶片是发动机的关键部件，其加工精度直接影响发动机的性能和可靠性。叶片的形状复杂，精度要求极高，一般要求叶片型面的加工精度达到 $\pm 0.02\text{mm}$ ，表面粗糙度Ra达到 $0.4\mu\text{m}$ 以下。在传统的加工方法中，主要采用多轴数控铣削和手工抛光相结合的方式，但存在加工效率低、精度一致性差等问题。为了提高叶片的加工精度和效率，某企业引入了超精密加工技术和智能控制技术。首先，采用五轴联动数控铣床进行叶片的粗加工和半精加工，通过优化加工工艺参数和刀具路径，提高了加工效率和表面质量。然后，利用磁流变抛光技术对叶片型面进行精抛光，通过精确控制磁场强度和抛光时间，使叶片型面的表面粗糙度Ra达到了 $0.2\mu\text{m}$ ，形状精度误差（PV值）小于 $0.015\text{mm}$ 。同时，在加工过程中，构建了基于传感器网络的加工状态监测系统，实时监测机床的振动、温度和切削力等参数。根据监测数据，利用基于神经网络的误差补偿模型对加工过程中的误差进行实时补偿。通过智能控制技术的应用，叶片的加工精度稳定性得到了显著提高，加工合格率从原来的80%提高到了95%以上，加工周期缩短了30%。

##### 4.2 案例二：光学镜片加工

光学镜片广泛应用于相机、望远镜、显微镜等领域，其加工精度直接影响光学系统的成像质量。光学镜片的加工精度要求极高，一般要求表面粗糙度Ra达到 $0.01\mu\text{m}$ 以下，面形精度误差（PV值）小于 $\lambda/10$ （ $\lambda$ 为光波波长）。某光学加工企业采用单点金刚石切削和离子束加工相结合的超精密加工技术，以及基于人工智能的加工参数优化和自适应控制技术，实现了高精度光学镜片

的加工。在单点金刚石切削阶段，通过优化刀具制备工艺和切削参数，使镜片的表面粗糙度Ra达到了 $0.008\mu\text{m}$ ，形状精度误差小于 $0.1\mu\text{m}$ 。然后，利用离子束加工对镜片表面进行进一步修整，去除单点金刚石切削过程中产生的表面缺陷和亚表面损伤。通过精确控制离子能量、离子束流和加工时间，使镜片的表面粗糙度Ra降低到了 $0.003\mu\text{m}$ ，面形精度误差（PV值）减小到了 $\lambda/20$ （ $\lambda = 632.8\text{nm}$ ）。在加工过程中，利用人工智能算法对切削参数和离子束加工参数进行优化，根据不同的镜片材料和加工要求，自动生成最优的加工参数组合。同时，采用自适应控制技术，根据加工过程中的实时状态自动调整加工参数，保证了加工过程的稳定性和一致性。通过这些技术的应用，该企业生产的光学镜片质量达到了国际先进水平，产品市场竞争力显著增强。

#### 结语

机械加工精度是制造业核心竞争力，提升它对制造业高端化、智能化、精密化发展意义重大。本文剖析了机械加工误差成因，如机床、刀具等多方面误差，深入研究了误差补偿等关键技术，并通过航空发动机叶片和光学镜片加工案例，验证了技术有效性与可行性。未来，机械加工精度提升技术将向更高精度、效率与智能化迈进，超精密加工将创新，智能控制将融合新技术，且绿色制造理念会贯穿全程，推动制造业可持续发展。

#### 参考文献

- [1]刘友江.提升机械零件数控加工精度的措施[J].模具制造,2023,23(10):154-156.
- [2]何振伟.精密加工技术在机械零件精度提升中的应用[J].自动化应用,2025,66(06):219-221.
- [3]吴小凤.机械加工精度的影响因素及提升策略[J].科技创新与应用,2022,12(26):145-148+152.
- [4]刘俊辉.提升机械零件加工精度的方法研究[J].新型工业化,2022,12(01):184-185+190.