

机械加工工艺对零件精度影响的分析与改进

高冲，徐东亚

摘要：在机械制造领域，零件精度直接决定机械设备的性能、可靠性及使用寿命，而机械加工工艺作为实现零件精度的核心环节，其各组成要素均会对零件最终精度产生显著影响。本文结合机械加工工艺实践，系统分析加工原理、机床系统、刀具夹具、工艺参数及环境因素对零件尺寸精度、形状精度和位置精度的影响机制，聚焦工艺环节与精度偏差的内在关联，提出针对性的工艺改进策略，旨在为机械加工工艺优化提供理论参考与实践指导。

关键词：机械加工工艺；零件精度；加工误差；工艺优化；精度控制

1 机械加工工艺对零件精度的影响分析

1.1 加工原理对零件精度的影响

加工原理误差是导致零件精度偏差的基础性因素，源于采用近似的刀刃轮廓或传动关系进行加工。在螺纹、齿轮及复杂曲面加工中，加工原理误差更为常见。例如加工渐开线齿轮时，为降低滚刀制造难度，常采用阿基米德基本蜗杆替代渐开线基本蜗杆，导致齿轮渐开线齿形产生偏差；车削模数蜗杆时，由于蜗杆螺距与蜗轮周节的匹配关系中包含无理数 π ，车床配换齿轮的齿数有限，只能采用近似分数值计算，引发刀具成形运动不准确，产生螺距误差。加工原理误差虽无法完全消除，但合理选择加工方式可将其控制在允许公差范围内，若选型不当，会直接影响零件的形状精度与配合精度。

1.2 机床系统对零件精度的影响

机床作为机械加工的核心设备，其自身精度直接决定零件加工的基准精度，主要影响因素包括机床几何误差、动态刚性及热变形。机床几何误差涵盖导轨导向误差、主轴回转误差及传动链传动误差。导轨导向误差会导致刀具与工件在误差敏感方向产生相对位移，车削加工中水平面内的导轨直线度误差会直接影响零件圆柱度，而刨削加工中垂直面内的导轨直线度误差会导致加工表面平面度偏差。主轴回转误差表现为实际回转轴线与理想轴线的漂移，包括径向跳动、端面圆跳动及几何轴线倾角摆动，其中径向跳动会导致镗孔加工出现椭圆形误差，端面圆跳动会影响工件端面与轴线的垂直度。

1.3 刀具与夹具对零件精度的影响

刀具是零件加工的直接执行部件，其制造精度、磨损程度及选型合理性均会影响零件精度。定尺寸刀具的尺寸精度直接决定工件尺寸精度，成型刀具的形状精度会影响工件表面形状，展成刀具的刀刃轮廓误差会导致加工表面形位偏差。刀具磨损是持续影响精度的关键因素，后刀面磨损量超过 0.3mm 时，尺寸误差会突增 0.02mm，同时导致表面光洁度下降。夹具的作用是定位与夹紧工件，其制造误差、装配误差及磨损会产生定位误差，夹紧力过大或着力点不当会导致工件变形，尤其对于薄壁件，传统径向夹紧方式易导致圆度误差从 5 μm 恶化至 50 μm ，严重影响零件精度。基准不统一也会引入系统误差，设计、加工、检测基准不一致会导致重复定位误差，降低零件位置精度。

1.4 工艺参数对零件精度的影响

工艺参数的合理设置是控制零件精度的关键，主要包括切削速度、进给量、切削深度及切削液使用等。切削速度过高会导致刀具磨损加快，产生积屑瘤，影响加工表面质量与尺寸精度；切削速度过低则会降低加工效率，且易产生切削振动，导致零件形状误差。进给量过大时，零件表面残留面积增大，表面粗糙度超标，且会增加切削力，引发工件变形；进给量过小则会导致切削力集中，加剧刀具磨损。切削深度过大易产生颤振，导致零件尺寸波动，切削深度过小则需多次走刀，增加加工误差的累积。切削液选择不当或使用不规范，会降低冷却润滑效果，导致切削温度升高，加剧刀具磨损与工件热变形，进一步扩大精度偏差。

1.5 环境因素对零件精度的影响

加工环境的温湿度、振动、粉尘等因素对零件精度的影响易被忽视，尤其在精密加工中更为突出。车间温度波动超过 2°C/h 时，1 米长钢件的尺寸变化可达 20 μm ，温度不均匀会导致工件与机床产生差异化热变形，引发精度偏差。加工过程中的振动主要来源于机床自身振动、切削振动及外界振动，会导致刀具与工件相对位置不稳定，产生表面波纹、尺寸波动等问题。车间粉尘及金属碎屑若附着在工件定位面或机床导轨上，会影响定位精度与导向精度，即使细小的金属碎屑也会导致高精度零件的精度偏差，对操作员的作业规范要求较高。

2 机械加工工艺的改进策略

2.1 优化加工原理与工艺规划

结合零件精度要求，合理选择加工原理与加工方式，减少加工原理误差。对于高精度齿轮、螺纹加工，优先采用精准度更高的展成加工方式，合理选择滚刀、丝锥等刀具的型号，降低近似加工带来的误差。优化工艺路线，推行基准统一原则，确保设计、加工、检测基准的一致性，减少基准转换带来的系统误差。采用粗加工与精加工分离的工艺模式，粗加工阶段去除大部分毛坯余量，减少精加工阶段的切削负荷与变形，精加工阶段重点控制精度，避免粗加工产生的误差累积到精加工环节。

2.2 提升机床系统精度

定期对机床进行校准与维护，采用激光干涉仪对机床导轨、主轴进行精度检测，及时调整导轨间隙、主轴跳动等参数，消除机床几何误差。提升机床动态刚性，采用高刚性床身结构，配备主动阻尼技术，降低切削振动幅度，将振动对精度的影响控制在最小范围。优化机床热稳定性，采用对称冷却系统与热对称结构设计，集成实时温度补偿技术，将主轴热漂移控制在 $\pm 1 \mu\text{m}/8\text{h}$ 内，减少热变形带来的精度偏差。建立机床精度档案，对机床的使用、维护、校准情况进行全程记录，确保机床始终处于受控状态。

2.3 改进刀具与夹具设计

合理选择刀具材料与型号，针对不同加工材料与精度要求，选用超细晶粒硬质合金或PCBN刀具，提升刀具耐用度3-5倍。集成在线刀具监测系统，通过声发射传感器实现刀具磨损预警与自动补偿，及时更换磨损刀具，避免精度偏差扩大。优化夹具设计，针对薄壁件等易变形工件，采用液压膨胀芯轴、真空吸附或扇形卡盘爪等低应力夹具，将径向夹紧改为轴向端面夹紧，增加受力面积，均匀分散夹持力，从源头上避免工件变形。推行零点定位系统，提升夹具定位精度与重复定位精度，减少定位误差。

2.4 优化工艺参数设置

通过切削仿真与试切实验，优化切削速度、进给量、切削深度等工艺参

数，实现参数的合理匹配。针对不同加工材料与零件精度要求，制定标准化的工艺参数表，避免参数设置的随意性。高速切削加工中，合理控制切削速度与进给量的比例，避免颤振产生；精密加工中，采用低速小进给量的加工方式，提升表面质量与尺寸精度。规范切削液的使用，根据加工材料与刀具类型，选择合适的切削液型号，确保冷却润滑效果，降低切削温度，减少刀具磨损与工件热变形。

2.5 改善加工环境条件

建立恒温加工车间，将环境温度控制在 $20 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，配合材料预调湿处理，减少温湿度波动对零件精度的影响。采取有效的振动隔离措施，在机床底部安装减震垫，远离振动源，减少外界振动与机床自身振动的影响。加强车间环境管理，定期清理粉尘与金属碎屑，规范操作员作业流程，避免碎屑附着在定位面与导轨上，确保定位精度与导向精度。

参考文献

[1] 张辉. 机械加工工艺对零件加工精度的影响分析[J]. 中国科技期刊数据库 工业A, 2025(7):159-161