

数控车床加工细长轴零件的工艺优化研究

孟凡鹏

贵州航天林泉电机有限公司 贵州 贵阳 550087

【摘要】：细长轴零件在数控车床加工中易受长径比大、刚性不足、切削热集中和装夹受力不均等因素影响，产生弯曲变形、振动纹和尺寸误差。围绕细长轴加工稳定性与精度控制问题，可从工艺路线安排、装夹定位方式、刀具几何参数、切削用量匹配和辅助支承应用等方面开展优化。合理控制切削力、减小热变形、提升支承刚度，能够改善零件圆柱度、同轴度和表面粗糙度，为细长轴零件高质量加工提供工艺依据。

【关键词】：数控车床；细长轴零件；工艺优化；加工变形；切削参数

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.043

引言

细长轴零件广泛应用于机械传动、精密设备和轴类连接结构中，其加工质量直接影响装配精度和运行稳定性。由于零件长径比较大，车削过程中容易出现刚性不足、受力弯曲、热伸长和振动加剧等问题，导致尺寸精度和表面质量难以稳定控制。数控车床虽具备较高自动化和重复加工能力，但若工艺参数、装夹方式和支承措施选择不当，仍会放大加工误差。因此，研究细长轴零件数控车削工艺优化，对提升加工精度、降低废品率和保证生产效率具有现实意义。

1 细长轴数控车削加工要求

1.1 细长轴零件结构特征

细长轴零件通常具有长度大、直径小、长径比高的结构特点，在车削加工中整体刚性相对薄弱。该类零件受切削力、夹紧力和自重影响较为明显，轴向尺寸越长，径向抗弯能力越低，加工过程中越容易产生弹性变形和微量挠曲。细长轴外圆表面多承担传动、支承或配合功能，对圆柱度、同轴度、尺寸一致性和表面粗糙度要求较高。部分零件还可能带有台阶、螺纹、沟槽或过渡圆角等结构，使局部刚度发生变化，加工受力分布不均。结构特征决定了细长轴不能单纯按照普通轴类零件安排车削工艺，需要重点考虑支承刚度、变形控制和加工稳定性。见图1，细长轴类零件普遍呈现长度较大、直径较小、形状细长的结构特点，部分零件还带有螺纹、台阶或端部连接结构，说明其加工中需要重点控制刚性不足、装夹变形和尺寸精度问题。



图1 细长轴类零件结构形态示意

1.2 数控车床加工适配条件

数控车床用于细长轴加工时，能够依靠程序控制实现稳定走刀、连续切削和重复定位，适合完成外圆车削、端面加工、螺纹加工及台阶成形等工序。细长轴加工对设备主轴精度、导轨运动平稳性、刀架刚性和尾座顶尖同轴性要求较高，若机床精度不足或支承系统调整不当，容易放大零件跳动和加工误差^[1]。工艺适配还需结合零件材料、毛坯状态、加工余量和批量要求确定车削方式。对于刚性较差的工件，可采用一夹一顶、跟刀架、中心架等辅助支承方式，提高加工过程的稳定性。数控系统的恒线速度控制、进给参数设定和刀具补偿功能，也为细长轴加工精度调节提供了条件。

1.3 精度控制工艺需求

细长轴精度控制的重点在于减少弯曲变形、抑制切削振动、控制热伸长并保持尺寸稳定。加工过程中需要根据零件长径比合理分配粗加工、半精加工和精加工余量，避免单次切削量过大造成径向受力集中。刀具选择应兼顾锋利性、强度和排屑性能，使切削力保持平稳，减少表面振纹和局部让刀。装夹工艺需控制夹紧力大小，防止端部受压过大引起轴线偏移。冷却润滑方式也会影响温升和表面质量，连续稳定的冷却有助于降低热变形。尺寸检测应贯穿关键工序，对外径、圆柱度、同轴度和表面粗糙度进行控制，使加工结果符合装配与使用要求。

2 细长轴加工误差形成机理

2.1 装夹受力引起弯曲变形

细长轴在装夹过程中容易受到夹紧力、顶紧力和支承反力共同作用，若受力方向与工件轴线不一致，便会使轴心产生微量偏移。三爪卡盘夹持端刚性较强，而远离夹持端的位置约束不足，车削时工件受径向切削力作用后会形成挠曲，导致加工后的外圆呈现中间细、两端尺寸不均或轴线弯曲等现象。顶尖压力过大还可能引起轴向压缩，使零件在旋转状态下产生附加变形。装夹接触面若存在毛刺、偏心或定位不稳定，也会造成重复装夹误差。该类变形具有一定弹性恢复特征，测量时尺寸

可能出现波动，增加后续精度修正难度。

2.2 切削振动影响表面质量

细长轴车削时工件刚性较低，刀具切入材料后容易形成周期性受力变化，使工件与刀具之间产生相对振动。振动强度受主轴转速、进给量、背吃刀量、刀具伸出长度和工件支承状态影响明显，当切削参数匹配不合理时，刀尖会在表面留下规律性振纹，造成粗糙度升高^[2]。振动还会使切削厚度不断变化，导致刀具磨损加快、排屑不稳定和加工噪声增大。对于直径较小、长度较大的轴类零件，局部刚度差异会使振动沿轴向传递，台阶、沟槽等部位更容易出现表面撕裂或刀痕不均。表面质量下降后，零件配合性能、疲劳强度和传动平稳性都会受到影响。

2.3 热变形造成尺寸偏差

细长轴加工过程中，切削区会持续产生热量，热量通过刀具、切屑和工件传递，使轴类零件发生轴向伸长和径向尺寸变化。由于细长轴截面较小，散热能力有限，连续车削时温升更容易沿长度方向累积，造成加工尺寸与冷却后实际尺寸存在差异。若冷却液供给不均或切削速度过高，工件局部温度分布会出现不一致，导致外圆尺寸产生微小锥度或圆柱度误差。精加工阶段余量较小，热变形对最终尺寸的影响更加明显，尤其在高精度配合面加工中容易造成超差。刀具磨损引起的摩擦热增加，也会进一步改变切削状态，使尺寸控制从稳定加工转向被动修正。

3 细长轴车削工艺优化路径

3.1 装夹定位方式合理调整

细长轴装夹应围绕轴线稳定和受力均衡进行安排，避免单端悬伸过长造成加工挠曲。加工前需检查毛坯端面、中心孔和夹持表面状态，保证定位基准清洁、完整、无明显偏斜。对于长径比较大的零件，可采用一夹一项方式增强轴向支承，使工件旋转中心与机床主轴中心保持一致；加工长度较大或中部刚性不足时，应配合中心架、跟刀架形成辅助支撑，减小切削点附近的径向让刀。夹紧力和顶紧力需要适度控制，既要防止工件松动，又要避免端部受压过大引起弯曲。多工序加工中还应保持统一基准，减少重复装夹带来的同轴度偏差。

3.2 刀具参数与走刀路线匹配

细长轴车削刀具应根据材料硬度、加工余量和表面质量要求进行选择，刀尖圆弧半径、前角、后角和主偏角需要兼顾切削锋利性与刀具强度。精加工阶段宜选用切削轻快、排屑顺畅的刀具结构，降低径向切削分力，减少工件受力弯曲^[3]。走刀路线应避免频繁空切、急停和反向冲击，使切削过程保持连续平稳。台阶、沟槽、螺纹等结构部位可采取分段加工方式，按照由粗到精、由基准面向外延伸的顺序组织刀路，防止局部余量突然变化引起振动。刀具补偿参数也需结合试切结果及时修正，使外圆尺寸逐步接近设计要求。见图2，数控车床在细长

轴加工中需要通过刀具角度、走刀路线和切削参数的合理配合，减小振动与让刀现象，保证外圆表面质量和尺寸精度稳定。



图2 数控车床细长轴车削加工过程

3.3 切削用量与冷却方式优化

细长轴加工切削用量应以减小切削力、控制温升和保持加工稳定为核心。粗加工阶段可适当保留均匀余量，避免背吃刀量过大导致工件弹性变形；半精加工和精加工阶段应降低切削深度，配合合理进给量，使尺寸修正更加平稳。主轴转速不宜盲目提高，需避开易产生共振的速度区间，保证工件旋转过程稳定。冷却方式应保持连续、充分、定向供液，使切削区热量及时带走，并改善刀具与工件接触状态。对于加工时间较长的细长轴，热量会在工件轴向持续积累，导致零件产生热伸长和局部尺寸漂移。关键尺寸加工前可安排短暂停留，使工件温度趋于稳定后再进行精加工，避免高温状态下完成切削而在冷却后出现尺寸回缩。分段冷却则能够降低连续车削带来的温升差异，使不同加工区域保持较为一致的热状态。控制加工节奏和冷却条件，可减少热变形对外圆尺寸、圆柱度和表面粗糙度的影响，提高细长轴成品质量的稳定性。

4 典型细长轴加工应用呈现

4.1 零件加工工艺方案设计

零件加工工艺方案设计应以细长轴结构尺寸、材料性能和精度等级为依据，明确毛坯准备、基准选择、装夹方式、加工顺序和检测节点。工艺安排中可将端面加工、中心孔修整、粗车外圆、半精车校正、精车成形等环节有序衔接，使各阶段余量分布保持均衡。对于长径比较大的轴类零件，方案中需预设一夹一项、中心架或跟刀架等支承方式，减少悬伸长度对加工稳定性的影响。台阶、沟槽和配合面加工不宜集中在一次走刀中完成，应根据刚度变化分段处理，使刀具切入和退出过程保持平稳。工艺方案还需考虑刀具磨损、热变形和测量修正条件，为后续精度控制留下调整空间。

4.2 加工过程精度控制措施

加工过程精度控制需要贯穿装夹、试切、车削、冷却和检测等环节。装夹完成后应校正工件跳动，检查顶尖压力和支承位置，使工件旋转轴线保持稳定。粗加工阶段重点控制余量均

匀性,避免局部切削负荷过大;半精加工阶段可通过试切测量修正刀具补偿值,逐步消除前道工序产生的尺寸偏差^[4]。精加工时应保持刀具锋利、走刀连续和冷却充分,减少振纹、让刀和热伸长影响。对关键外圆、台阶端面和配合部位应设置过程检测点,将检测工作嵌入粗加工、半精加工和精加工之间,及时掌握尺寸变化趋势。外圆尺寸可采用千分尺进行多点测量,台阶端面可借助百分表检查端面跳动,圆柱度和同轴度则可通过圆度检测设备进行复核。检测结果不仅用于判断零件是否接近设计要求,还能反映装夹、支承和刀具状态是否稳定。若发现局部尺寸偏大、表面振纹或轴线偏移,应结合加工部位刚性变化、切削受力方向和支承位置,及时调整顶紧力、跟刀架位置或切削参数。

4.3 优化前后质量指标对比

优化前的细长轴加工容易出现外圆尺寸波动、表面振纹明显、圆柱度误差偏大和重复加工稳定性不足等问题,部分零件需要多次修磨或返工才能达到装配要求。工艺优化后,装夹支承更加稳定,切削力分布趋于均衡,刀具路线与加工余量配合更加合理,零件轴线偏移和局部让刀现象明显减少。质量评价可围绕外径尺寸偏差、圆柱度、同轴度、表面粗糙度和一次合格率展开,对比不同工艺条件下的检测结果。优化切削用量、冷却方式和过程检测节点,细长轴表面质量更加均匀,尺寸保持性得到提升,返修次数和加工波动随之降低。

5 细长轴加工技术深化方向

5.1 工艺参数数据库建设

工艺参数数据库建设应围绕细长轴材料类型、长径比范围、加工余量、刀具型号、装夹方式和质量检测结果进行分类整理,使经验参数转化为可调用的数据资源。数据库内容可记录主轴转速、进给量、背吃刀量、冷却方式、支承位置、刀具寿命以及加工后的圆柱度、同轴度和表面粗糙度等信息,便于不同零件加工前进行参数匹配。对于已验证稳定的工艺组合,应形成标准化参数模板,减少临时试切和人工判断带来的波

动。加工异常数据也需同步保留,分析变形、振动和尺寸超差出现的条件,为后续工艺修正提供依据。

5.2 在线监测与误差补偿融合

在线监测与误差补偿融合能够使细长轴加工由事后检测转向过程控制。加工过程中可利用振动传感、温度采集、主轴负载监测和位移检测等方式获取实时状态,判断工件是否出现异常振动、热伸长或切削阻力变化^[5]。监测数据与数控系统刀具补偿、进给修正和加工暂停功能结合后,可在尺寸偏移尚未扩大前进行调整。对于精加工阶段的关键外圆和配合面,可依据在线测量结果修正刀尖位置,降低人工反复测量造成的停机时间。误差补偿还需结合零件受热、受力和刀具磨损规律,避免单一数值修正导致新的加工偏差。

5.3 智能化车削控制水平提升

智能化车削控制水平提升需要将工艺知识、设备数据和质量反馈联系起来,使细长轴加工参数能够根据实际状态动态调整。数控系统可结合历史加工数据识别不同长径比零件的稳定切削区间,自动推荐装夹方案、刀具组合和进给策略。加工中若出现振动增强、负载异常或温度上升趋势,系统可降低进给、调整转速、提示支承校正等方式保持切削稳定。智能化控制还可与质量追溯系统衔接,对每批零件的加工参数和检测结果进行关联分析,逐步优化工艺模型。随着设备感知能力和算法应用深化,细长轴加工将更趋向精细化、稳定化和少人化。

6 结语

细长轴零件数控车削质量受结构刚性、装夹受力、切削振动和热变形等因素共同影响,工艺优化需要贯穿方案设计、过程控制和质量评价全过程。合理调整装夹定位方式、匹配刀具参数与走刀路线、优化切削用量和冷却方式,能够有效降低弯曲变形与尺寸偏差,改善表面质量和加工稳定性。后续加工技术可进一步依托工艺参数数据库、在线监测和误差补偿手段,推动细长轴车削由经验控制向数据化、智能化方向深化。

参考文献:

- [1] 王帅,徐宝军,张开学.超长细长轴零件的车削工艺技术探究[J].世界制造技术与装备市场,2024,(5):57-59.
- [2] 胡世杰.细长轴类零件切削质量在线监测技术研究[D].太原理工大学,2024.
- [3] 葛骏.细长轴类零件车削加工质量分析与研究[J].农机使用与维修,2024,(5):76-78.
- [4] 夏春和,赵纯颖.超细长拉紧杆车槽夹具的设计[J].机械工程与自动化,2024,(2):74-75+78.
- [5] 李莉平.细长轴车削加工动态变形研究[J].现代制造技术与装备,2023,59(9):104-106.