

五轴动柱高速铣削技术在复杂曲面加工中的应用研究

廖敏 丁俊 张宇杰

宁波海天精工股份有限公司 浙江 宁波 315000

摘要: 五轴动柱高速铣削技术凭借其独特优势,在复杂曲面加工领域展现出巨大潜力。本研究聚焦该技术在复杂曲面加工中的应用,深入探讨加工策略、工艺参数优化、刀具选择与磨损管理等方面。通过实际案例分析,验证了该技术能显著提高加工效率与精度,降低加工成本。研究还发现,合理运用此技术可有效应对复杂曲面加工中的诸多难题,为相关领域的高质量加工提供了新思路与新方法,推动制造业向更高水平发展。

关键词: 五轴动柱高速铣削; 复杂曲面; 数控加工技术

1 五轴动柱高速铣削技术理论基础

1.1 五轴动柱机床结构与工作原理

五轴动柱机床是现代精密加工领域的重要设备,其结构通常由机床主体、数控系统、刀具库、夹具系统等部分组成。机床主体包括床身、立柱、横梁、工作台等,支撑和固定其他部件,保证机床的稳定性和刚性。运动部件涵盖线性轴(X、Y、Z)和旋转轴(A、B、C),其中线性轴控制机床在水平、垂直和纵向的移动,旋转轴则实现工件在空间中的旋转。数控系统作为核心部件,通过控制器、编程系统和执行系统,依据预先编程的加工路径和参数,精确控制机床各轴的运动,完成加工操作。五轴动柱机床的工作原理在于,通过数控系统协调各轴运动,实现刀具与工件的相对运动,从而完成复杂零件的加工。

1.2 高速铣削技术原理与特点

高速铣削技术以高铣削速度、适当进给量和小的径向与轴向铣削深度为特征。在高速加工时,大量切削热被切屑带走,工件表面温度较低,铣削力略有下降,表面质量显著提高。其优势体现在多个方面:一是提高生产率,铣削速度和进给速度的提升可大幅增加材料去除率;二是改善加工精度和表面质量,铣削力低使工件热变形减少,加工精度提高;三是实现整体结构零件加工,减轻部件重量,提高零件可靠性;四是适合使用小直径刀具,降低刀具费用;五是可加工薄壁零件和高强度、高硬度脆性材料,简化模具制造工艺;六是部分替代电加工、磨削加工等工艺;七是经济效益显著,综合效率和质量提升,工序简化。

1.3 五轴联动与插补算法

五轴联动数控机床由三个平动轴(X、Y、Z)和两个旋转轴(B、C)构成,使刀具能在任意角度和位置精确加工。这种复杂性带来坐标变换的挑战。为确保刀具

按预定轨迹运动,需进行精确坐标变换^[1]。在五轴加工中,直接应用线性插补方法可能导致精度损失,因此后处理软件采用小直线段逼近实际曲线运动,在保证加工效率的同时提升精度。实施五轴联动插补时,需合理设定线性化误差,平衡精度与效率;确保坐标变换准确,避免质量问题;考虑机床各轴动态性能匹配,保障加工过程稳定可靠。

2 五轴动柱高速铣削技术在复杂曲面加工的技术难点

2.1 材料硬度与切削力控制

在复杂曲面加工中,材料硬度是影响五轴动柱高速铣削技术实施的关键因素之一。不同材料具有不同的硬度特性,高硬度材料(如淬火钢、钛合金等)在切削过程中会产生较大的切削力。较大的切削力会导致机床各部件承受更大的负荷,可能引发机床振动、变形等问题,进而影响加工精度和稳定性。过大的切削力还会加速刀具的磨损,缩短刀具使用寿命,增加加工成本。为了有效控制切削力,一方面,要合理选择切削参数,如切削速度、进给量和切削深度等。对于高硬度材料,适当降低切削速度和切削深度,减小进给量,可以降低切削力。但过低的切削速度又可能导致切削温度升高,影响刀具性能和加工质量,因此需要找到一个最佳的切削参数组合。另一方面,可以采用先进的刀具技术,如使用涂层刀具、硬质合金刀具等,这些刀具具有更高的硬度和耐磨性,能够在一定程度上承受较大的切削力。

2.2 刀具磨损与寿命管理

刀具磨损是五轴动柱高速铣削复杂曲面过程中不可避免的问题。由于复杂曲面的形状复杂,刀具在加工过程中需要不断改变切削方向和角度,这会导致刀具的磨损不均匀。刀具磨损不仅会影响加工精度和表面质量,还会增加切削力,导致机床振动加剧,进一步加速刀具的磨损。为了延长刀具寿命,需要进行有效的刀具寿命

管理。首先,要建立刀具磨损监测系统,实时监测刀具的磨损情况。可以通过传感器等设备采集刀具的振动、温度、切削力等信号,分析刀具的磨损状态。当刀具磨损达到一定程度时,及时更换刀具,避免因刀具过度磨损而影响加工质量。其次,要合理选择刀具材料和刀具结构。不同的刀具材料具有不同的耐磨性和抗冲击性,应根据加工材料的特性和加工要求选择合适的刀具材料,刀具的结构设计也会影响其磨损情况,合理的刀具结构可以减少刀具的磨损。另外,还可以采用刀具冷却和润滑技术,降低切削温度,减少刀具与工件之间的摩擦,从而延长刀具寿命。

2.3 加工精度与表面质量

在复杂曲面加工中,加工精度和表面质量是衡量加工效果的重要指标。五轴动柱高速铣削技术虽然具有较高的加工效率,但要实现高精度的加工和良好的表面质量并非易事。影响加工精度的因素主要包括机床精度、刀具精度、编程误差等。机床的几何精度、运动精度和定位精度会直接影响加工精度。刀具的制造精度和安装精度也会对加工精度产生影响。编程误差则是指由于编程不合理或计算错误导致的加工误差^[2]。为了提高加工精度,需要对机床进行定期的精度检测和调整,确保机床的各项精度指标符合要求。要提高刀具的制造精度和安装精度,采用先进的编程技术和方法,减少编程误差。表面质量主要取决于切削参数、刀具状态和工件材料等因素。合理的切削参数可以获得较好的表面质量,如较小的切削速度和进给量可以降低表面粗糙度。刀具的磨损状态也会影响表面质量,磨损严重的刀具会导致表面出现划痕、波纹等缺陷。工件材料的特性和加工环境也会对表面质量产生影响。为了提高表面质量,需要优化切削参数,及时更换磨损的刀具,并控制好加工环境的温度、湿度等因素。

3 五轴动柱高速铣削技术在复杂曲面加工中的应用

3.1 加工策略与路径规划

目前,常见的加工策略包括等高线加工、螺旋加工、投影加工等。等高线加工是按照工件表面的等高线进行分层加工,适用于曲面起伏较大的工件。螺旋加工则是刀具沿着螺旋轨迹进行加工,能够减少刀具的空行程,提高加工效率。在加工模具型腔时,螺旋加工策略可以使刀具更顺畅地进入和退出型腔,避免刀具与型腔壁发生碰撞。投影加工是将刀具路径投影到工件表面上,适用于具有复杂形状特征的工件。通过投影加工,可以精确地控制刀具与工件表面的接触位置,保证加工表面的形状精度^[3]。路径规划方面,需要综合考虑工件

的几何形状、加工要求、机床性能等因素。利用先进的CAM软件,如UGNXCAM、PowerMill等,可以对复杂曲面进行精确的路径规划。还可以对刀具路径进行优化,如采用平滑处理、碰撞检测等功能,确保刀具路径的合理性和安全性。下表为不同加工策略在某复杂曲面加工中的效率对比数据:

加工策略	加工时间(小时)	表面粗糙度(μm)
等高线加工	8	1.2
螺旋加工	6.5	1.5
投影加工	7.2	1

从表中可以看出,不同加工策略在加工时间和表面粗糙度方面存在差异,实际应用中需要根据具体情况选择合适的加工策略。

3.2 工艺参数优化

工艺参数优化是五轴动柱高速铣削技术在复杂曲面加工中提高加工质量和效率的关键环节。切削速度对刀具的磨损和加工表面质量有重要影响。较高的切削速度可以提高加工效率,但也会加速刀具的磨损。进给速度则决定了刀具在单位时间内的移动距离,合理的进给速度可以保证切削过程的稳定性和加工质量。切削深度和步距的大小会影响加工余量的去除和表面粗糙度。通过实验研究和数值模拟,可以找到最佳的工艺参数组合。例如,在加工钛合金复杂曲面时,经过优化后的工艺参数为:切削速度120m/min,进给速度800mm/min,切削深度0.5mm,步距0.2mm。与优化前相比,加工效率提高了30%,刀具磨损降低了20%,表面粗糙度从Ra2.5 μm 降低到了Ra1.5 μm 。

3.3 刀具选择与磨损管理

刀具选择与磨损管理是五轴动柱高速铣削技术在复杂曲面加工中不可忽视的问题。在刀具选择方面,需要根据加工材料的特性、加工要求和机床性能等因素进行综合考虑。对于高硬度材料,如淬火钢、陶瓷等,应选择硬质合金刀具或立方氮化硼刀具;对于有色金属材料,如铝合金、铜合金等,可以选择高速钢刀具或金刚石刀具。刀具的几何形状和尺寸也会影响加工效果,应根据工件的形状和尺寸选择合适的刀具。刀具磨损管理包括刀具磨损监测和刀具更换策略,刀具磨损监测可以通过传感器、声发射技术等手段实时监测刀具的磨损状态。当刀具磨损达到一定程度时,及时更换刀具,避免因刀具过度磨损而影响加工质量。刀具更换策略可以根据刀具的磨损规律和加工任务的要求进行制定,如采用定时更换、定量更换或基于磨损状态监测的智能更换策略。

4 五轴动柱高速铣削技术在复杂曲面加工中的应用案例分析

4.1 航空航天领域应用案例

在航空航天领域,零件结构复杂、精度要求极高,五轴动柱高速铣削技术发挥着关键作用。以飞机发动机叶片加工为例,发动机叶片是航空发动机的核心部件,其形状复杂,具有复杂的曲面和扭曲特征,对加工精度和表面质量要求极为苛刻。某航空制造企业采用五轴动柱高速铣削技术对发动机叶片进行加工。在加工策略上,采用了投影加工与螺旋加工相结合的方式。首先,利用CAM软件对叶片的三维模型进行精确分析,生成投影加工路径,确保刀具能够准确地沿着叶片的曲面轮廓进行加工。然后在叶片的内部区域采用螺旋加工策略,提高加工效率。在工艺参数优化方面,经过多次实验和模拟,确定了最佳的切削速度为150m/min,进给速度为1000mm/min,切削深度为0.3mm,步距为0.15mm。通过这些优化后的工艺参数,加工效率相比传统加工方式提高了40%,同时叶片的表面粗糙度从Ra2.0 μ m降低到了Ra1.0 μ m,满足了航空发动机对叶片的高精度要求。在刀具选择上,选用了硬质合金涂层刀具,该刀具具有高硬度、高耐磨性和良好的耐热性,能够有效应对叶片加工过程中产生的高温和高应力。通过有效的刀具磨损管理,刀具寿命延长30%,降低加工成本。

4.2 汽车制造领域应用案例

五轴动柱高速铣削技术在汽车制造领域的应用,显著提高了汽车零件的加工质量和生产效率。以汽车覆盖件加工为例,汽车覆盖件的形状复杂,具有较大的曲面和不规则的轮廓。某汽车制造企业采用五轴动柱高速铣削技术对汽车覆盖件进行加工。在加工过程中,采用等高线加工策略,按照覆盖件表面的等高线进行分层加工,确保了覆盖件表面各处的加工余量均匀。通过工艺参数优化,将切削速度设定为120m/min,进给速度为800mm/min,切削深度为0.5mm,步距为0.2mm。优化后的工艺参数使得覆盖件的加工时间缩短25%,同时表面质量得到了显著提升,表面粗糙度达到Ra1.2 μ m,满足汽车外观质量的要求。在刀具选择方面,根据覆盖件的材料特性,选用高速钢刀具。并且,通过建立刀具磨损监测

系统,实时监测刀具的磨损状态,当刀具磨损达到一定程度时及时更换,保证了加工过程的稳定性和加工质量。

4.3 模具制造领域应用案例

模具制造中,复杂曲面模具的加工精度和表面质量直接影响到模具的使用寿命和产品质量。以注塑模具加工为例,注塑模具的型腔形状复杂,具有深型腔、窄槽等特征。某模具制造企业采用五轴动柱高速铣削技术对注塑模具进行加工。在加工策略上,采用多轴联动加工方式,通过五轴的协同运动,实现刀具在复杂曲面上的灵活切削^[4]。经过工艺参数优化,确定切削速度为100m/min,进给速度为600mm/min,切削深度为0.4mm,步距为0.1mm。这些优化后的工艺参数使得模具的加工精度达到 ± 0.02 mm,表面粗糙度达到了Ra0.8 μ m,满足注塑模具的高精度要求。在刀具选择上,选用立方氮化硼刀具,该刀具具有高硬度、高耐磨性和良好的化学稳定性,能够适应模具加工过程中的高硬度和高温环境。通过有效的刀具磨损管理,刀具寿命延长20%,降低模具的制造成本。

结束语

五轴动柱高速铣削技术在复杂曲面加工中的应用研究取得了阶段性成果。该技术不仅提升加工效率与质量,还为制造业带来新的发展机遇。研究过程中也暴露出一些问题,如部分复杂工况下的加工稳定性仍需提高。未来,应进一步深入研究该技术,优化加工策略与工艺参数,加强刀具研发与管理,以充分发挥其优势,推动复杂曲面加工技术迈向新高度,助力制造业实现智能化、高效化发展。

参考文献

- [1]李新杰.五轴加工实训教学探索[C]//湖北省机电工程学会.2023机电创新与产教融合新思考论文集.太原理工大学,2023:4-5.
- [2]郑有良,黄宁健.基于NX12.0软件的某种卡通艺术品五轴加工研究[J].装备制造技术,2023,(09):248-252.
- [3]彭发金.加工中心高速切削技术在复杂曲面加工中的应用探索[J].产业创新研究,2024,(18):122-124.
- [4]许景华.高速切削技术在模具加工中的应用探讨[J].模具制造,2024,24(06):20-22.