

利用超弦技术在三轴机床上实现曲面的高效加工

袁保宁

江苏自动化研究所 江苏连云港 222000

摘要：利用超弦精加工技术，根据零件的曲面结构特点，设计定制大圆弧刀具，通过编制宏程序进行加工路径优化，在普通三轴加工中心上实现带圆弧过渡曲面的高效加工。

关键词：超弦精加工；三轴加工中心；大圆弧铣刀；宏程序

1 序言

某产品零件局部轮廓如图1所示，零件设计有两处斜度分别为3：9.75、3：10的带圆弧过渡的曲面，并且需要一次性加工完成。曲面最大有效高度为114.677mm，要求残脊高度 $<1.8\mu\text{m}$ 。

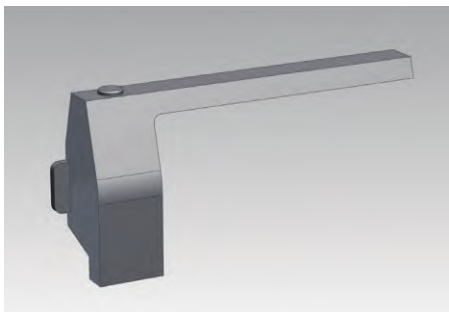


图1 零件局部轮廓示意

由于部门只具备普通三轴加工中心的生产品件，故原有的曲面加工工艺是精密组合虎钳夹持，选择标准规格的相关刀具，使用Mastercam编程软件，以流线仿形模式分为粗、精加工进行铣削，整体加工时间为116min，效率较低，难以满足零件批量生产需求。基于现有设备条件，需要探索出一套更加高效、合理的工艺方案。

2 工艺生产现状

粗加工方面，采用 $\phi 20\text{mm}$ 加长立铣刀，以相邻刀路0.522mm的间距、仿形加工的方式完成曲面铣削，曲面最大余量0.25mm，加工时间38min。

精加工时因曲面最大有效高度为114.677mm，现有数控加工刀具为R10mm、R6mm和R5mm标准

规格的球刀，其总长度分别为100mm、75mm和75mm，故无法实现刀具直接有效夹持。鉴于球头铣刀加工曲面容易获得较好的表面质量^[1]，为此，选择 $\phi 12\text{mm} \times R6\text{mm}$ 整体硬质合金球刀，以延长杆夹持的方式确定曲面精加工刀具。为保证残脊高度，相邻刀路确定为0.281mm的间距，以高密度仿形加工的方式完成曲面铣削，加工时间78min，这是造成加工效率较低的主要原因。

程序编制方面，编程软件是根据选定的曲面加工方式，以输入的相关切削参数为参考值（例如步距、整体误差等），软件基于自身固有的通用性算法而生成加工路径，不能针对具体曲面的实际特点生成最优化的加工路径。例如，粗加工时设计的步距为每次切削深度0.5mm，而实际程序中为0.467mm；精加工时设计的步距为每次切削深度0.269mm，而实际程序中为0.252mm，切削次数增加造成加工时间延长。

3 工艺改进措施

3.1 改变曲面精加工路径方向

原加工路径安排是刀具沿X轴（长度方向）作往复铣削运动，Y、Z轴进行步距移动。改变其路径方向，精加工使用 $\phi 20\text{mm}$ 加长立铣刀，Y、Z轴进行联动、作上下铣削运动，X轴以0.3mm的步距移动。在确保残脊高度的情况下，使用相同的进给速度，加工时间缩短至54min。由于路径方向改变后产生的竖直刀纹不符合客户要求，因此该工艺改进措施不可取。

3.2 选用大圆弧半径球刀

在确保残脊高度的前提下，使用仿形加工方式缩短曲面加工时间，需选择大圆弧半径球刀以加大相邻刀路的间距。考虑曲面有效高度，经广泛调研，无标准规格刀具可供选择，需要定制。因不同品牌刀具质量差别较大，以合作供应商提供的最大规格R12mm球刀计算，需要将相邻刀路间距设置在0.398mm，加工用时57min，加工效率没有得到显著提高，且刀具定制单价千余元，价格较贵，故放弃实施该工艺改进措施。

3.3 选用超弦刀具

超弦加工是一种革命性的曲面精加工技术，是近些年来又一个全新的技术突破，主要应用于五轴联动数控机床，目前该加工技术在国内应用并不广泛。其加工方式是使用超大圆弧半径的铣刀刀口轮廓，通过特殊编程方式，来实现高效率、高精度的曲面精加工。超弦刀具的刀口轮廓半径一般在300~1000mm。

相对而言，由于球刀和被加工曲面侧壁接触的长度较小，而使用超弦刀具加工，整个切削刃的轮廓和侧壁的接触长度变得非常大，因此相同残脊高度下可以实现数倍的步距增量，使得曲面精加工的效率有一个飞跃式的提升。超弦加工与常规曲面加工对比如图2所示。

为此引进超弦加工技术，借鉴常规超弦刀具的相关结构形式，根据曲面实际特点及三轴机床的加工现状，综合使用成本、通用性等各方面因素，



a) 球刀加工前视图

b) 超弦刀具加工前视图



c) 球刀加工轴测图

d) 超弦刀具加工轴测图

图2 超弦加工与常规曲面加工对比

确定刀具的材料、规格、轮廓尺寸和精度等一系列要求，设计了一款“水滴形”大圆弧刀具。经软件模拟，完全可以实现高效加工。经与刀具生产厂商技术人员从可加工性、制造精度和铣削效果等多方面进行沟通，确定了刀具的螺旋角、刃口处理工艺等，以合理的价格完成了刀具的定制加工。图3为刀具设计图，图4为刀具实物。

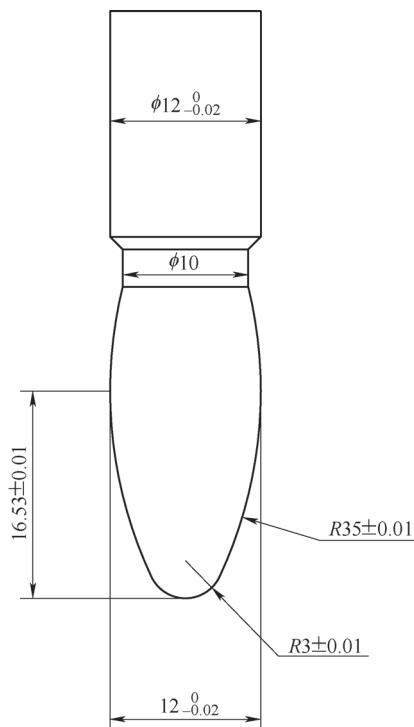


图3 刀具设计图



图4 刀具实物

鉴于硬质合金具有硬度高、耐磨、强度高和韧性较好等优良特性^[2]，刀具材料选用整体硬质合金，总长90mm，刀具直径12mm，4条主切削刃圆弧半径 (35 ± 0.01) mm，圆弧从最高象限点同步延长至刀具 $\phi 10$ mm颈部，螺旋角 36° ，顶部切削刃圆弧半径 (3 ± 0.01) mm，圆弧以相切方式连接，刀具体整体呈“水滴形”。双圆弧设计既可利用R35mm

圆弧刃口用于各种陡斜面（0° ~ 23° 斜面）的高效加工，也可使用R3mm圆弧刃口用于平缓曲面的铣削，具有一定的通用性。“水滴形”设计有效避免了加工中可能出现的干涉情况。

3.4 宏程序编制

Mastercam中的超弦精加工技术主要应用场景是五轴机床。在普通三轴加工中，因为机床轴运动简单，所以只能使用Mastercam 3D精加工中的等高策略或平行策略进行曲面超弦精加工。经模拟验证，这些策略对加工路径的优化没有显著的提升作用。

零件的曲面存在以下特点：①形状规则，表现为斜率固定，过渡曲面为标准圆弧，均可以通过数学表达式进行描述。②整体性较差，表现为曲面均存在集中与多区域分散共存的情况。③状态多，表现为不仅存在圆弧过渡，而且有R5mm、R10mm不同的曲面延伸。为此，根据曲面实际状态特点，充分发挥宏程序的多功能性、简练性与智能性等特长^[3]，完成程序编制工作，使刀具能够严格按照编程人员给定的路径数值进行加工，同时有效避免非切削路径的产生及保证区域间刀路的顺畅衔接，曲面加工

实现了加工路径的最优化。

4 工艺改进效果对比

在确保残脊高度的情况下，使用设计定制的超弦刀具将相邻刀路间距设置为0.679mm，同直径12mm球刀相比，间距增大到2.4倍以上，配合手工编制宏程序确保的最优化加工路径，在相同进给速度下，曲面精加工时间由78min缩短为29min，加工效率成倍提高。曲面精加工如图5所示，工艺改进前后效果对比见表1。



图5 曲面精加工实景

表1 工艺改进前后效果对比

项目	粗加工		精加工	
	原工艺方案	现工艺方案	原工艺方案	现工艺方案
刀具规格	φ20mm × 150L硬质合金立铣刀	φ20mm × 150L硬质合金立铣刀	φ12mm × R6mm × 75L整体硬质合金球刀	φ12mm × R35mm × R3mm × 90L整体硬质合金超弦刀具
切削参数	主轴转速 $n=5000\text{r/min}$ ，进给速度 $v_f=4000\text{mm/min}$ ，间距0.522mm	主轴转速 $n=5000\text{r/min}$ ，进给速度 $v_f=4000\text{mm/min}$ ，间距0.522mm	主轴转速 $n=8000\text{r/min}$ ，进给速度 $v_f=3000\text{mm/min}$ ，间距0.281mm	主轴转速 $n=8000\text{r/min}$ ，进给速度 $v_f=3000\text{mm/min}$ ，间距0.679mm
程序编制	Mastercam编程软件，曲面流线方式	手工编制宏程序	Mastercam编程软件，曲面流线方式	手工编制宏程序
加工时间	38min	32min	78min	29min

5 结束语

根据曲面结构的加工特点进行工艺创新，通过引入超弦精加工技术，设计定制大圆弧刀具，实现相邻刀路步距的成倍提高；通过编制宏程序，实现加工路径的优化。经软件模拟和工艺试验，在确保曲面质量的前提下，使用普通三轴加工中心实现了曲面的高效加工，为超弦精加工技术的合理应用提供了良好的工艺借鉴。

参考文献：

- [1] 赵国英. 高效铣削技术与应用[M]. 北京：机械工业出版社，2015.
- [2] 金属加工杂志社，哈尔滨理工大学. 数控刀具选用指南[M]. 2版. 北京：机械工业出版社，2018.
- [3] 杜军. 轻松掌握FANUC宏程序——编程技巧与实例精解[M]. 北京：化学工业出版社，2011.

MW 20240501