

高速立式五轴联动雕铣中心的开发与应用

张健¹, 霍凤伟¹, 姜成伟²

(1. 营口理工学院 机械与动力工程学院, 辽宁 营口 115014;

2. 通用技术集团沈阳机床有限责任公司 中捷友谊厂, 辽宁 沈阳 110142)

[摘要] 详细阐述了一种高速立式五轴联动雕铣中心的开发与应用,包括机床总体布局、主要技术参数和技术特点、RTCP 精度检测技术、五轴机床后处理算法以及在机测量技术等五轴机床关键技术,最后以贵金属手镯样件为例进行实际在机测量及切削加工。高速立式五轴雕铣中心的成功开发,有效地解决了贵金属首饰的高精、高效、高稳定性加工难题。

[关键词] 五轴联动雕铣中心; RTCP; 后处理; 在机测量

[中图分类号] TG659 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1003-8884(2023)05-0044-05

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.05.008

0 引言

高速立式五轴联动雕铣中心是数控机床中难度最大的,主要应用于连续、平滑复杂曲面类零件的高效、精密、自动化加工。国际上通常把五轴联动数控技术作为一个国家制造装备自动化发展水平的标志之一。早期,由于其技术门槛和应用成本较高,仅仅用于航空、航天、军事工业等领域。近年来,随着航空航天高技术的转化应用,以及民用消费产品设计技术的提升,高速五轴雕铣中心逐步向民用领域进行推广应用^[1-2]。

国内贵金属加工行业技术水平不高,目前大部分以手工作业为主、半机械化操作为辅的生产方式,加工精度和效率较低,加工一致性很难保证。尤其是在贵金属首饰加工领域,为了保证首饰的美观性,其几何结构往往采用复杂的自由曲面,同时为了减少同体积贵金属材料的质量(克重)以节约成本,通常产品设计成薄壁结构,而由于目前毛坯电铸工艺

的局限性,其几何尺寸大小往往与设计模型有所偏差,且壁厚分布不均匀即有薄有厚。采用传统的数控加工技术,废品率较高,急需配置在机测量技术的高速五轴雕铣中心。

目前工业自动化技术和智能制造技术发展很快,贵金属首饰行业客户也逐渐意识到有些品类的产品完全可以采用先进的高速五轴雕铣中心进行加工。市场上针对贵金属首饰加工的高档数控机床主要由欧洲一些专用数控机床制造商提供,国内在该领域还处于发展的初期。因此,研制适用于贵金属首饰加工的高速雕铣中心产品尤其迫切。

1 五轴机床总体设计

1.1 机床总体布局

高速五轴雕铣中心系列产品采用多种配置型式的模块化结构设计,总体结构型式为立式主轴、三个直线轴在主轴侧、两个回转轴在零件侧的双转台式五轴机床。五个坐标轴的运动分配如下: X 轴为横向滑板及其上部件沿着门式立柱左右运动, Y 轴为纵向滑板及其上部件沿横向滑板前后运动, Z 轴为主轴滑枕沿纵向滑板上下运动, A 轴为类似摇篮式桥板绕 X 轴前后转动, C 轴为夹具体基座及工件毛坯绕 Z 轴连续回转。刀库设计在立柱中间的下方, 刀具自动交换采用主轴滑枕移动来进行。机床操作站镶嵌在机床正面右侧, 电控柜配置在机床后侧, 气动、冷却及切屑回收等辅助装置设计在机床下部。

[收稿日期] 2023-06-12

[第一作者] 张健(1979—),男,辽宁海城人,副教授,硕士,主要从事数控机床数字化设计与制造技术研究工作。

[基金项目] 辽宁省科学技术计划项目(2022-YKLH-14); 营口理工学院引进人才科研启动经费项目(YJRC202024)

[引用格式] 张健,霍凤伟,姜成伟. 高速立式五轴联动雕铣中心的开发与应用[J]. 有色设备,2023,37(5):44-48.

机床总体布局如图 1 所示。

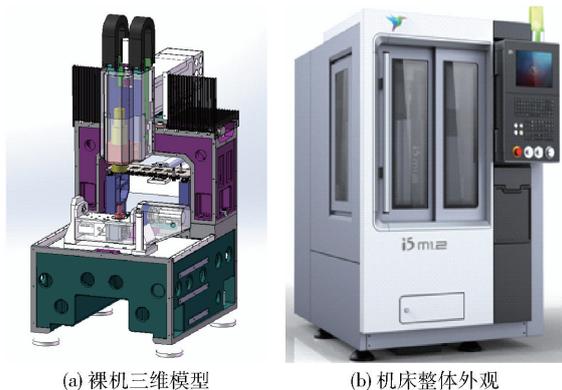


图 1 机床总体布局

1.2 机床主要技术参数

根据行业市场需求,确定该机床的主要技术指标。

工作台最大行程(X 轴): 360 mm

纵滑板最大行程(Y 轴): 220 mm

主轴箱最大行程(Z 轴): 210 mm

主轴最高转速: 40 000 r/min

主轴电机功率: 2.5 kW

$X/Y/Z$ 轴快移: 24 m/min

A/C 轴旋转角度: $\pm 135^\circ/360^\circ$

刀库型式: 直排

刀库驱动形式: 气动

刀库刀具数量: 12 把

机床数控系统: 国内 i5 数控系统

1.3 机床主要技术特点

机床结构采用主轴竖直、十字交叉滑板,三个直线轴设计在主轴侧,两个回转轴呈摇篮式且设计在零件侧的布局型式。这种方案,零件在切削过程中的重量变化不会对直线坐标轴的动态性能造成负面影响。机床床身中间倒锥漏斗形设计,可以保证贵金属切屑集中回收。

机床三个直线坐标轴采用交流伺服电机和高精度滚珠丝杠直接联结,结构紧凑,传动精度高;采用直线滚动式导轨,摩擦阻力小,可以实现高刚性,切削进给时无爬行现象。两个回转轴采用交流伺服电机和高精度减速传动机构,不仅定位精度高,而且稳定性和抗冲击性能好。

机床配置高速电主轴,最高转速可达 40 000 rpm,可以满足有色金属等硬度较低材料的高速切削加工需求,加工表面质量好。

机床具有刀具自动交换功能,刀库容量为 12 把,可以根据加工工艺需求配置不同种类的刀具。

该机床同时具有工件在机测量系统和刀具自动测量功能,一方面可以测量工件毛坯表面的几何坐标数据,另一方面也可以检测刀具磨损和破损情况。

2 五轴机床关键技术

2.1 RTCP 精度检测技术

2.1.1 RTCP 功能简介

RTCP 是“Rotational Tool Center Point”的缩写,即旋转刀具中心。该功能实现了以刀具中心进行编程^[3],通过该功能可以直接在机床上针对双转台管理刀具的空间长度补偿。一般情况下,五轴机床的 RTCP 补偿值是先通过检测工具或切削样件进行测量。

国内 i5 数控系统 RTCP 参数设置界面如图 2 所示。

参数名称	单位	X轴	Y轴	YG轴	Z轴	A轴	C轴
第一旋转轴角度误差1	°				0.0000		
第一旋转轴角度误差2	°				0.0000		
第一旋转轴角度误差3	°				0.0000		
第二旋转轴角度误差	°				0.0000		
第一旋转中心坐标	mm	0.0000	0.0000	--	0.0000	--	--
第二旋转中心坐标	mm	0.0000	0.0000	--	0.0000	--	--
分瓣弦高误差	mm				0.0010		
最小分段长度	--				0.1000		
初始分段长度	--				0.9000		
弦高误差计算精度	--				10		

图 2 RTCP 参数设置界面

2.1.2 RTCP 功能调试步骤

1) 测量 C 轴轴线机械坐标值,填入 RTCP_OFFSET1 X 和 RTCP_OFFSET2 Y 中。如 X 轴、 Y 轴零点在 C 轴轴线上,可以将 RTCP_OFFSET1 X 和 RTCP_OFFSET2 Y 设为 0。

2) 开启 RTCP 功能,测量 XY 轴联动回转中心与 C 轴轴线坐标的差值,将差值叠加到 RTCP_OFFSET1 X 和 RTCP_OFFSET2 Y 中。

3) 测量 A 轴轴线机械坐标值,填入 RTCP_OFFSET1 Y 和 RTCP_OFFSET1 Z 中,此时将 RTCP_OFFSET2 Y 改为 RTCP_OFFSET2 Y - RTCP_OFFSET1 Y 的值。

4) 开启 RTCP 功能,测量 YZ 轴联动回转中心与 A 轴轴线坐标的差值,将差值叠加 RTCP_OFFSET1 Y, RTCP_OFFSET1 Z 中,并同时修改 RTCP_OFF-

SET2 Y 的值。

2.2 五轴加工后处理技术

后处理是计算机辅助编程软件中基于零件 CAD 模型进行的一系列加工设置后生成的刀具中心和刀轴矢量数据文件,该文件不能为数控机床控制系统识别,需进行相应地处理,转换为数控机床能够识别的加工程序文件^[4]。

为讨论方便,在此做以下设定:工件坐标系为 $O_w X_w Y_w Z_w$;机床运动坐标系为 $O_R X_R Y_R Z_R$, $O_w O_R = h$;刀具中心 C_0 在工件坐标系中的坐标为 (x_{c0}, y_{c0}, z_{c0}) ;刀轴矢量 \mathbf{a} 在工件坐标系中为 (a_x, a_y, a_z) ,如图 3 所示;下面简要讨论机床运动坐标值 $X、Y、Z、A、C$ 的计算方法。

2.2.1 AC 转角的计算

对于该类五轴数控雕铣中心回转轴回转运动角度计算的思路是,回转轴的运动是工作台及夹具一方面绕着 Z 轴顺时针转动 C 角,另一方面绕 X 轴顺时针转动 A 角。 $A、C$ 角的数值可以通过基本的三角函数关系解算。 $A、C$ 轴转动关系如图 3 所示。

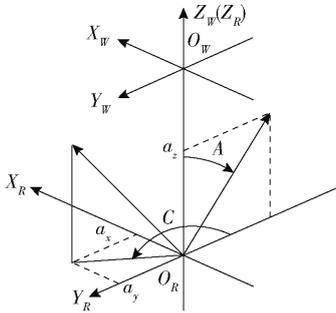


图 3 五轴加工刀轴矢量转动关系

2.2.2 X、Y、Z 位置坐标的计算

机床 $X、Y、Z$ 轴的运动位置坐标,即是求刀具中心 C_0 经工作台及夹具回转运动后在机床坐标系 $O_R X_R Y_R Z_R$ 中的位置。

先将工件坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 平移到机床坐标系 $O_R X_R Y_R Z_R$,接着工件绕 Z 轴回转 $-C$ 角,最后工件再绕 X 轴回转 $-A$ 角。通过基本的坐标变换矩阵计算可得各坐标计算式,见式(1)~(3)。

$$X = x_{c0} \cos C + y_{c0} \sin C \quad (1)$$

$$Y = -x_{c0} \sin C \cos A + y_{c0} \cos C \cos A + z_{c0} \sin A + d \sin A \quad (2)$$

$$Z = x_{c0} \sin C \sin A - y_{c0} \cos C \sin A + z_{c0} \cos A + d \cos A \quad (3)$$

另外,需要指出的是,机床数控系统在开启 RTCP 功能时,回转轴 $A、C$ 运动引起的直线轴 $X、Y、Z$ 位置坐标变化是由机床数控系统内部自动计算并进行实时补偿。后置处理过程不需要把机床 $A、C$ 回转轴中心的偏差值代入求解,并且刀具中心和刀轴矢量数据也不需要进行几何坐标的变换,只需计算出机床回转轴的转动坐标即可。

2.3 在机测量技术

2.3.1 在机测量简介

在机测量技术是一种零件在不停机的状态下进行的测量技术,可以实现零件在加工的过程前、过程中和过程后的自动化高精度的测量。此项技术不仅可以减少零件的周转过程,避免因夹具和毛坯变形引起的误差,而且可以显著减少工件找正和补充加工编程等时间^[5-6],保证了加工质量、降低废品率、提高了加工效率,充分发挥机床的加工潜能。

由于在机测量技术的独特优势,目前很多的数控加工机床都配备触发式测头实现高精度测量。但是,由于在机测量的应用环境复杂,被测量工件的形状不完全相同,在这些影响测量精度因素中,触发式测头系统自身的测量精度显得最为突出。因此,研究规范而有效的标定方法来减小测量误差,进而提高在机测量系统的测量精度显得尤为重要。

2.3.2 触发式测头的标定方法

(1)测头安装偏心的标定。初始安装前使测头中心线与主轴中心线重合。通常使用与测球头接触的低测力千分表来测量偏心,然后通过安装在刀柄上的几个螺钉进行调整。

(2)测头 Z 轴基准的标定。采用标准刀具或测试棒(长度量棒),以及标准块规和环规设定长度标定基准位置。将标准刀具或测试棒安装到机床上,然后缓慢移动标准刀具,使之与放置在环规面上的块规接触。通过标准刀具的长度和块规的厚度,进而确定环规顶面的 Z 轴位置,并在当前工件坐标系内进行设定。接下来,将测头安装到机床上,使用测头测量 Z 轴环规顶面(即基准),确定标准长度并将结果输入到机床系统相关刀补参数中。

(3)测头 $X、Y$ 轴基准的标定。采用环规、千分表来辅助进行此项的标定。首先在 XY 平面上准确确定环规的中心。将环规放在机床工作台上,千分表安装在主轴端面,表针与环规内径圆周表面接触,缓慢旋转直到在 360 度范围内表针显示在一个固定

读数位置。保持机床的 X 、 Y 坐标不动,然后将测头安装到主轴上。测头按照 $X+$ 、 $X-$ 、 $Y+$ 、 $Y-$ 四个基准方向运动并保持测头上同一点与环规接触,沿环规内径径向方向测量,测点坐标分别为 A 、 B 、 C 、 D ,因此测头 X 向偏置为 $(A+B)/2$, Y 向偏置为 $(C+D)/2$ 。然后将 X 向和 Y 向标定的偏置值输入到机床系统的对应参数中。

(4)测头 XY 矢量方向的标定。采用环规、千分表来辅助进行此项的标定。首先在 XY 平面上准确确定环规的中心,然后保持机床的 X 、 Y 坐标不动,将测头安装到主轴上。接下来按照圆周不同方向 n (n 为正整数,数值越大,标定精度越高)等分角度间隔方向运动并保持测头上同一点与环规接触,沿环规内径法向方向测量,得到测点分别为 A_1 、 A_2 、 \dots 、 A_n 。接着以环规半径为基准,计算不同矢量方向测点处半径误差值 R_1 、 R_2 、 \dots 、 R_n ,再将此误差值沿 X 、 Y 向进行分解,即可获得各矢量方向测点处的误差坐标分量,从而形成不同矢量方向的误差补偿标定参数。

3 五轴机床应用

3.1 在机测量测头标定

采用触发式测头,利用前述的标定方法,在开发的高速立式五轴雕铣中心上进行标定验证^[7],如图4所示。由于测头 Z 轴和 X 、 Y 轴等单向基准的标定方法比较常规,下面重点介绍在机测量系统中触发式测头 XY 矢量方向标定应用示例。



图4 触发式测头标定应用示例

采用内圆直径为 62 mm 的环规,在圆周 360 度上均匀布置 60 个测量点,即圆周方向上每 6 度布置一个测点。按照前述测头标定规范流程进行操作,分别经过测头偏心校正、环规中心确定等步骤,在测量软件上分别生成初始测量程序,然后在高速五轴

联动雕铣中心上进行实际测量。获得环规的测量数据和标定结果如下:环规各矢量方向测量的半径值,极大值为 31.0396 mm,极小值为 31.009 0 mm,极差为 0.030 6 mm。根据前文的标定方法计算不同矢量方向的误差补偿标定参数,进而生成带标定补偿的测量程序,然后再通过测量环规进行验证。此次获得的测量数据显示,半径极大值为 31.006 9 mm,半径极小值为 30.997 8 mm,极差为 0.009 1 mm。

由此可见,对测头进行 XY 矢量方向标定,可以显著提升测头的测量精度,满足贵金属首饰在机测量和加工需求。

3.2 五轴联动加工应用

在贵金属首饰加工领域,通常产品设计成厚度在 0.2~0.3 mm 之间,而由于毛坯制造工艺的局限性,其壁厚有薄有厚。传统的加工方法是根据理论设计模型编制数控加工程序,并且按照一定的切削深度来进行加工,这样一方面会由于毛坯壁厚的不均匀而导致局部欠切或过切现象,甚至局部切漏的情况也时有发生;另外,这种切削方式毛坯材料去除量较大,从而会在一定程度上增加贵金属材料的损耗率,造成生产成本上升。为了解决上述问题,就要求切削时必须按照毛坯的实际几何形状进行去除材料加工,即沿实际毛坯表面轮廓进行逐层均匀去除加工。基于此,五轴机床需要具有在机测量功能,实现毛坯先在机床上进行测量,获得毛坯的真实几何信息,然后再进行编程和铣削加工。

下面以复杂曲面类贵金属手镯样件为例,在高速五轴立式五轴雕铣中心上进行在机测量和实际切削加工。首先通过 CAD/CAM 软件进行理论设计模型测量路径规划和刀具路径规划、在机测量程序生成,然后进行机床在机测量标定和实际测量,进而生成毛坯真实曲面和补偿加工刀具路径,接下来运用后置处理算法生成补偿加工的 NC 程序。加工后的手镯样件经过检测,满足质量要求。

4 结语

本文以高速立式五轴联动雕铣中心为研究对象,从五轴机床总体设计、关键技术以及五轴机床应用等进行了较为全面的研究,得到如下几点结论:

1)该高速立式五轴雕铣中心总体采用模块化设计,床身采用独特漏斗型设计,以及优质不锈钢内

防护可以确保贵金属回收率高,回收方便。

2)该机床数控系统配置 RTCP 功能,针对该双转台结构五轴机床可有效管理刀具的空间长度补偿,同时阐述了 RTCP 功能应用的调试方法步骤。

3)推导出后置处理过程运动变换计算方法,同时指出该类机床应用过程中开启和关闭 RTCP 功能时,要注意后处理器的合理应用。为其他类似的五轴数控机床应用提供了借鉴。

4)提出了在机测量触发式测头安装偏心、X、Y、Z 单向以及 XY 矢量方向的完整标定方法;并在开发的高速立式五轴联动雕铣中心上进行了矢量方向标定的成功应用,提高了在机测量系统的测量精度。

5)以复杂曲面类贵金属手镯样件为例在高速五轴立式五轴雕铣中心上进行在机测量和实际切削加工。加工后的手镯样件经过检测,满足质量要求,达到了预期效果。该方法可以推广应用到其他类似

的薄壁复杂曲面类零件的高精度加工领域。

[参考文献]

- [1] 徐金亭,汪顺可,张向奎. 基于 ABF 的自由曲面上三维复杂图案的雕刻方法[J]. 机械工程学报,2013(3):137-144.
- [2] 张健,姜成伟. 微小型立式五轴雕铣中心关键技术[J]. 世界制造技术与装备市场,2019(4):50-52.
- [3] 高伟强,胡泽华,庄朱协. 五轴联动数控系统中 RTCP 技术的研究[J]. 制造技术与机床,2011(10):66-69.
- [4] 刘雄伟. 数控加工理论与编程技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [5] 张康智,刘凌. 加工中心在线检测技术的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2007(6):56-58.
- [6] 诸进才. 面向曲面零件的加工精度在线检测技术研究与系统开发[D]. 广州:广东工业大学,2008.
- [7] 姜成伟. 提高触发式测头测量精度的方法[J]. 机械制造,2020,58(9):78-80+86.

The Development and Application of a High Speed Vertical Five-axis Engraving and Milling Center

ZHANG Jian, HUO Fengwei, JIANG Chengwei

Abstract: The development and application processes of a high speed vertical five-axis engraving and milling center were discussed and introduced, including overall layout design, main technical parameter and technical features, RTCP calibration technology, post-processing algorithm and on-line measurement technology of five-axis machine tools, finally, the actual on-line measurement and cutting of precious metal bangle sample is taken as an example. During the successful development of Vertical Five-Axis Carving and Milling Center, it effectively can solve the problem of high precision, high efficiency and high stability machining.

Key words: five-axis engraving and milling center; RTCP; post-processing; on-line measurement; precious metal jewelry

