

引文格式: 邱文旺, 杨继平, 王永飞, 等. 闭式叶盘加工过程接刀误差控制方法研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(7): 95-102.

QIU Wenwang, YANG Jiping, WANG Yongfei, et al. Research on control method of blade adjoining error in machining operation of closed blisk[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(7): 95-102.

闭式叶盘加工过程接刀误差控制方法研究*

邱文旺, 杨继平, 王永飞, 孙 晶, 罗远锋

(北京动力机械研究所, 北京 100074)

[摘要] 采用五轴数控机床实现闭式叶盘的加工是一个高度复杂的过程, 所获得的叶型接刀误差受到机床、工装、零件、装夹过程、切削参数以及操作人员等多种因素的综合影响。在深入分析接刀误差产生原因的基础上, 设计了一种闭式叶盘叶型加工流程, 并给出了基于机床测头的零件精确定位方法和数控机床零点快速标定方法, 验证试验结果显示所给出的方法能够很好地控制闭式叶盘加工过程的接刀误差。

关键词: 闭式叶盘; 五轴数控加工; 接刀误差; 机床测头; 机床零点

Research on Control Method of Blade Adjoining Error in Machining Operation of Closed Blisk

QIU Wenwang, YANG Jiping, WANG Yongfei, SUN Jing, LUO Yuanfeng

(Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074, China)

[ABSTRACT] As the machining operation of closed blisk in 5-axis machine tool is a highly comprehensive process, the blade adjoining error is influenced by many factors such as machine tool, fixture, workpiece, clamping process, cutting parameters, workers and so on. Based on analyzing the formation mechanism of blade adjoining error, this paper presents a machining process flow for closed blisk and proposes a high-accuracy positioning method of workpiece as well as a quick calibration procedure of machine tool zero point by using machine tool probe. The verification experiment demonstrates that the presented strategy could control the blade adjoining error in machining operation of closed blisk effectively.

Keywords: Closed blisk; 5-axis NC machining; Blade adjoining error; Machine tool probe; Machine tool zero point

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2021.07.095

闭式叶盘是指所有叶片的叶根、叶尖部位分别由内环和外环连接在一起的一类叶盘零件, 因其具有工作效率高、可靠性高、重量轻等优点, 在航空、航天、水力机械、能源、家电等行业均有广泛用途。尽管有分体制造再连接、精密铸造、3D 打印、电火花等多种加工方式能够实现闭式叶盘的制造, 但对于高精度、高效率、多尺寸规格的制造需求而言, 数控铣削加工仍然是优势最为明显的加工方式^[1]。

相比于开式叶盘, 闭式叶盘的加工对工艺人员、操作人员、机床以及编程工具等都提出了更高的要求。由于结构的限制, 进行闭式叶盘加工时经常需要从前、尾缘两个方向进刀才能完成整个叶型的加工, 两部分叶型

的对接部位不可避免的会留下一条接刀痕迹, 当接刀误差超过设计要求时, 就需要再通过打磨等其他工序来进一步处理。目前, 从已知文献看, 针对闭式叶盘加工的研究侧重点大多数集中在零件造型、刀具方案、加工区域划分以及刀位轨迹规划等方面^[2-6], 而针对接刀误差源及其控制方法的研究主要集中在其他结构件加工过程。李和平^[7]从切削参数、系统热变形、机床结构等方面分析了散热器表面加工过程接刀痕产生的原因, 并给出了具体的解决方法。秦卫伟等^[8]针对铝合金薄壁件凹槽部位加工接刀痕形成原因进行了分析, 并提出通过改变装夹方式、装夹顺序以及优化刀具路径的方式来提升加工质量。钱杨林等^[9]研究了通过调整编程刀路

* 基金项目: 国家科技重大专项(2015ZX04002201)。

改善平面与平面、平面与曲面、曲面与曲面等3种情况下的接刀质量。董金伟^[10]对数控加工中工艺系统几何误差、受力变形误差、受热变形误差、工件内应力引起误差、测量误差等多方面误差源进行了分析与总结。郑财等^[11]从装配误差、运行误差、换刀误差以及热误差4个方面对三轴数控机床的加工误差进行了分析。

相比于文献[7-8]的平面加工特征对象,闭式叶盘叶型曲面加工误差控制难度更大,除了文献[7-11]提到的各误差来源外,还需要克服零件二次装夹以及机床零点漂移等因素带来的挑战。本文以提高闭式叶盘叶型加工精度为目标,同时结合在机测头的应用,研究了闭式叶盘叶片加工难点、影响因素和加工接刀误差控制方法,并通过实际零件加工过程进行了验证。

1 闭式叶盘加工流程及难点

本文研究对象喷嘴环为闭式轴流叶盘,材料采用钛合金,叶片与内环、外环整体加工成形,以其为基础制造的组件为涡轮泵重要组成部分,其叶型轮廓加工精度高将对整个涡轮泵工作性能产生重要影响,闭式叶盘零件如图1所示。

1.1 叶型加工难点分析

喷嘴环产品的加工难点主要集中在叶型加工过程。由于采用的材料钛合金为难加工材料,加工时切削力大,刀具易磨损,影响叶型轮廓精度。

其次,由于结构特点限制,在进行闭式轴流叶盘加工时,刀具空间可达性非常差,需要采用分别从正反两面进刀的方式来完成加工,由于二次装夹引入了新的误差因素以及加工过程各种其他误差的综合作用,导致叶型型面上不可避免的存在一条接刀痕迹。根据设计性能要求,为了保证较好的压气效果,要求沿着气流流动方向不存在逆向台阶,对于加工而言,这无疑进一步增大了叶型型面加工难度。

最后,由于喷嘴环叶型曲面形状复杂,流道空间狭小,正反进刀需要将程序分成多段,如何在兼顾效率的前提下合理选择刀具方案、划分加工区域、避免碰撞干涉的发生、实现该零件叶型加工五轴编程具有较大的难度。

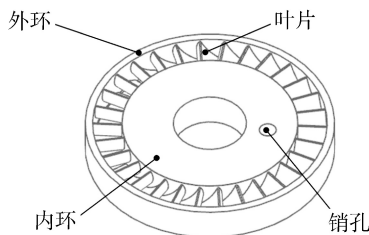


图1 闭式叶盘零件示意图
Fig.1 Schematic of closed blisk

1.2 闭式叶盘加工工艺流程

根据设计图纸要求,结合类似产品研制经验,合理制定喷嘴环零件的加工方案,形成的产品工艺流程如图2所示。其中叶片型面在第8道工序数控铣完成加工。

1.3 闭式叶盘铣叶型工序流程

闭式叶盘数控铣叶型工序,工步安排如图3所示。在原工艺中,在安装好工装后,每次重新装夹零件,均需要找正零件的圆周跳动,通常这一过程十分耗时、费力(图3中红色实线标出的环节),且找正效果受到操作者水平的影响,并不稳定。在数控编程方面,国内多数厂家进行整体叶盘加工时,采用针对其中一个流道和叶片进行编程生成子程序,之后在主程序中通过旋转回转工作台逐个将每个叶片调整到编程坐标系中固定位置,再调用子程序进行加工的方式来完成流道以及叶片的加工,其中,子程序中启用RTCP功能,这样做的好处是使得数控程序能够直接移植到同型号机床上使用,而不用根据机床结构参数的细微差异再去重新对程序进行后处理^[12]。

2 闭式叶盘加工接刀误差控制方法

2.1 接刀误差产生原因分析

通常在加工过程中导致产生加工误差的因素主要包括零件、工装、刀具、机床、装夹环节、切削过程因素以

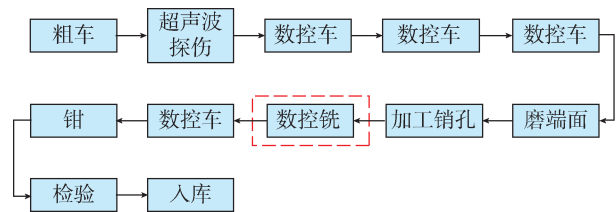


图2 闭式叶盘零件工艺流程图
Fig.2 Technology flowchart of closed blisk manufacturing process

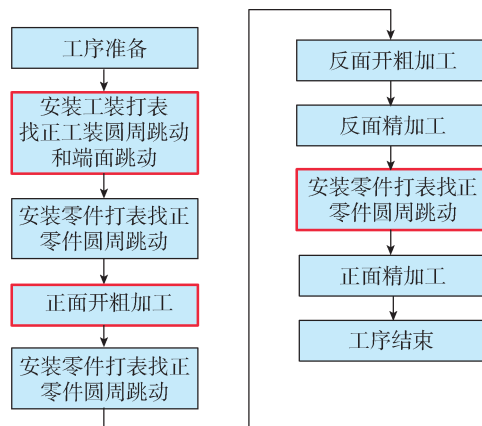


图3 闭式叶盘铣叶型工序基本流程
Fig.3 Flowchart of blade-milling procedure for closed blisk

及其他因素等^[10-11,13-15],加工过程误差影响因素分布如图4所示。

对于本文的闭式叶盘加工过程,所用刀具经过严格挑选,刀具直径尺寸误差在0.01mm以内,且加工过程及时检查磨损、更换新刀;车间为空调控温车间;精加工采取小切深、小切宽的思路确保加工过程平稳。因而刀具、环境温度变化以及切削参数等因素对误差的影响已得到较好的控制。经过前期试加工发现,当前仍然对叶型接刀误差影响比较大的因素主要包括工装安装环节、零件装夹环节、本工序零件入口状态、机床零点漂移等几个方面,具体分析如下。

(1) 工装安装环节。加工闭式叶盘时,需要将工装

固定在机床回转工作台上,工装定位面与机床坐标系之间存在一定误差,具体表现为工装定位面圆周跳动和端面跳动不为零。以工装绕Y轴存在偏转角度 α 为例,如图5(a)所示,正反面两次进刀得到的两部分叶片型面之间将存在一定的偏转接刀误差。类似的,当工装存在圆周跳动时(假设零件与工装同心),若正反翻面加工程序坐标系原点均仍然设在工作台回转中心的话,加工后,两部分叶型之间将出现偏移接刀误差,如图5(b)所示。

(2) 零件装夹环节。工装定位面找正精度较高,而零件正反两次装夹过程中,零件装夹过程存在偏心时(通过检测零件装夹后的圆周跳动来检查)同样将影响到叶型接刀误差,具体原理与图5(b)类似。在加工过

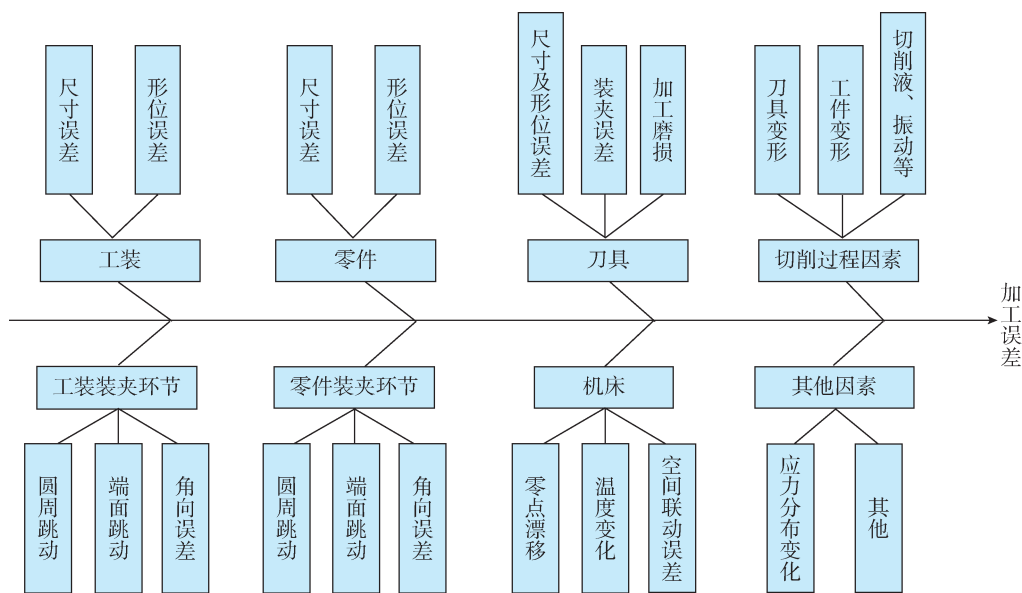


图4 加工过程误差影响因素分布图

Fig.4 Distribution of factors affecting the machining error

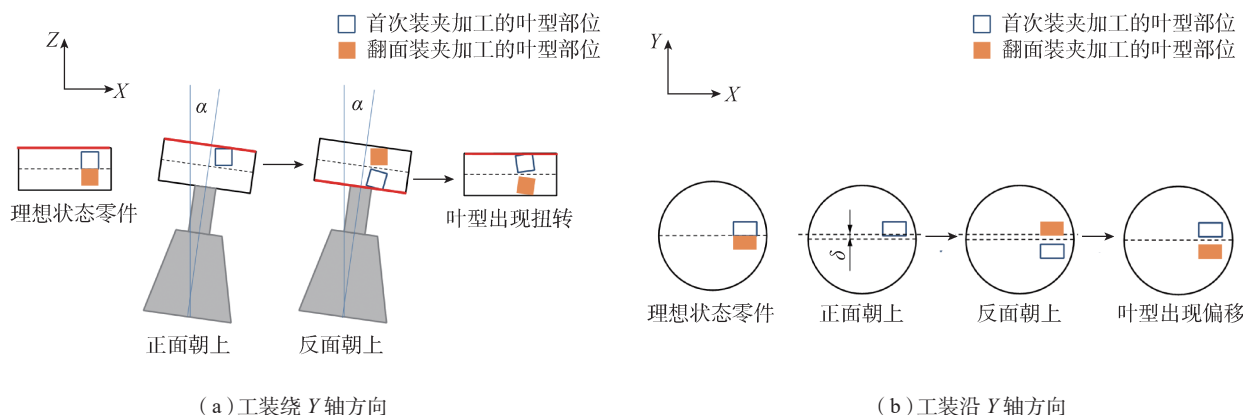


图5 工装绕Y轴方向出现偏转和工装沿Y轴方向出现偏移对叶型影响示意图

Fig.5 Effect of fixture deflection around Y axis and offsets along Y axis on blade profile

程中,零件正反面,两次装夹状态之间角向相对误差也会对叶型产生影响,原理如图6(a)所示。

(3) 本工序零件入口状态。正反面加工过程零件两个端面分别与工装定位面贴合。零件两端面平行度误差也会对叶型接刀产生影响,具体原理如图6(b)所示。类似的,当上下端面平面度较差时同样会导致接刀误差。

(4) 机床零点漂移。随着时间增长,五轴数控机床零点不可避免的存在一定的偏移现象,这同样将影响到叶型轮廓度,当正反两次加工的两部分叶型接刀处的误差不一致时,将会使得闭式叶盘的接刀误差增大。

2.2 接刀误差控制方法

基于前文对导致闭式叶盘加工接刀误差主要因素的分析,本文通过增加前置的磨削工序提高上下两端面的平面度及平行度,控制多工序误差耦合因素带来的影响;通过应用基于在线测量的误差补偿技术来控制零件装夹后圆周跳动以及翻面过程角向错位的影响,并给出了基于零件进行数控机床零点在线标定的简便方法,以尽可能地消除机床零点漂移带来的影响。

(1) 工艺流程。按照对闭式叶盘加工接刀误差进行控制的思路,设计该零件叶型的加工工艺流程如图7

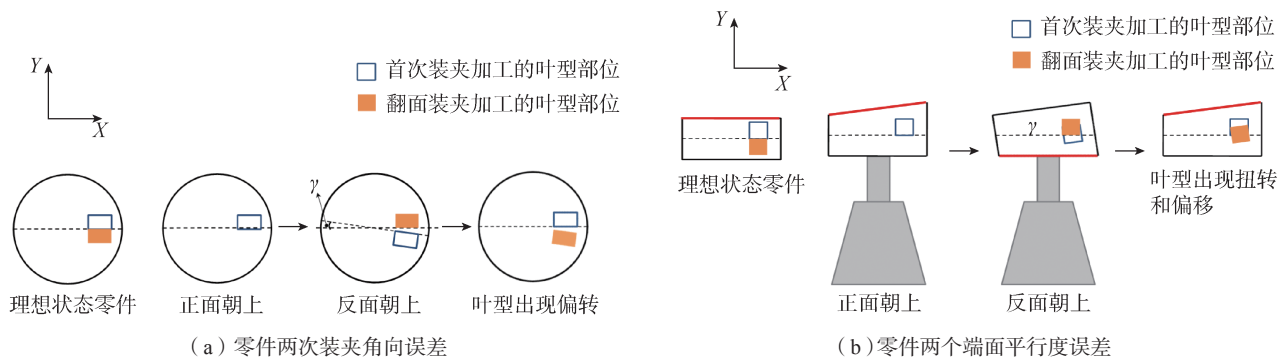


图6 零件两次装夹角向误差和零件两个端面平行度误差对叶型影响示意图

Fig.6 Effect of angular error derived from second clamping and parallelism error on workpiece end faces

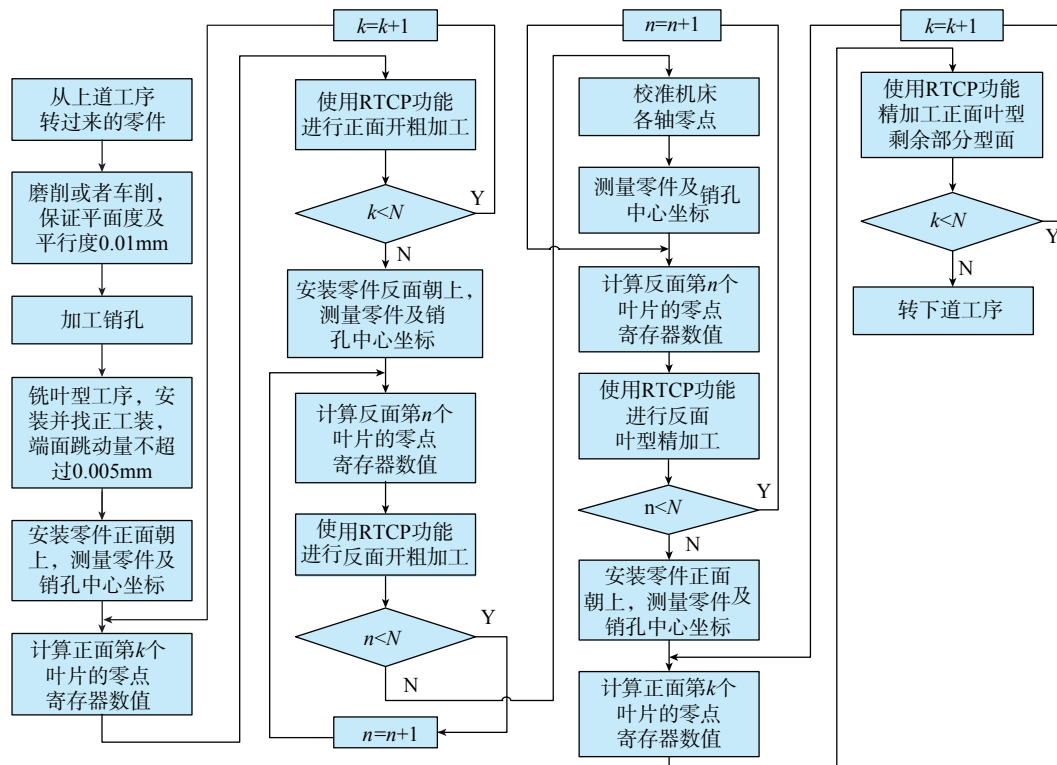


图7 闭式叶盘叶型接刀误差控制流程图

Fig.7 Control flowchart for blade adjoining error of closed blisk

所示,其中 N 为叶片总数。

(2) 基于在机测量的补偿算法。如前文所述,零件装夹后圆周跳动以及翻面过程相对角向误差均会对接刀误差产生明显影响,现代数控机床在机测量功能为解决这一问题提供了有效的途径^[15]。本文提出一种基于数控机床在机测量功能确定加工坐标系原点偏置以及零件角向的方法。

在机床 A 轴和 C 轴均处于 0° 状态下,利用测头和机床自带测量模块分别测量零件中心位置坐标和销孔中心位置坐标,记为 (X_1, Y_1) 和 (X_2, Y_2) ,如图 8 所示。

利用式(1)和式(2)确定零件角向 θ 及零件中心的初始位置角 α 。

$$\theta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}\right) & (X_2 \neq X_1, Y_2 \neq Y_1) \\ 0 & (X_2 > X_1, Y_2 = Y_1) \\ \pi & (X_2 < X_1, Y_2 = Y_1) \\ \frac{\pi}{2} & (X_2 = X_1, Y_2 > Y_1) \\ \frac{3\pi}{2} & (X_2 = X_1, Y_2 < Y_1) \end{cases} \quad (1)$$

$$\alpha = \begin{cases} \arctan\left(\frac{Y_1}{X_1}\right) & (X_1 > 0) \\ \arctan\left(\frac{Y_1}{X_1}\right) + \pi & (X_1 < 0) \\ \frac{\pi}{2} & (X_1 = 0, Y_1 > 0) \\ \frac{3\pi}{2} & (X_1 = 0, Y_1 < 0) \end{cases} \quad (2)$$

假设叶片总数为 N ,按照图 9 所示顺序对叶片进行编号 1,2,3,4, ..., N 。加工任意一片叶片前,需要旋转工作台使该叶片处于 X 轴正向方向。此外,还需要重新计算工作台转动后零件中心在机床坐标系中的位置坐标 $X_{1,n}, Y_{1,n}$,计算公式如式(3)所示。

$$\begin{aligned} X_{1,n} &= \sqrt{X_1^2 + Y_1^2} \cdot \cos\left(\alpha - \theta - \frac{2\pi \cdot (n-1)}{N}\right) \\ Y_{1,n} &= \sqrt{X_1^2 + Y_1^2} \cdot \sin\left(\alpha - \theta - \frac{2\pi \cdot (n-1)}{N}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, n 为待加工叶片序号。将数值 $X_{1,n}, Y_{1,n}$ 分别设置到机床坐标系寄存器(如 G54) X 轴、 Y 轴数值中,并将相应的角度值设置到寄存器的 C 轴数值中,再以新设置的寄存器数值作为程序坐标原点,调用子程序,进行第 n 个叶片的加工。

3 数控机床零点快速标定

通常随着生产车间里的数控机床安装调试完成,各坐标轴零点便被设置在特定位置。但随着时间增

长,在实际加工中振动、温度及其他原因的影响下,数控机床的零点会逐渐出现漂移现象,当这种漂移达到 $0.02\sim 0.03\text{mm}$ 甚至更大时,将会对叶型轮廓度及接刀误差产生不可忽略的影响。图 10 给出了机床零点漂移的示意,理想情况下机床零点 O 与工作台物理回转中心 O_1 重合(以本文所用五轴摇篮式数控机床为例),运行一段时间后,机床零点 O 与工作台物理回转中心 O_1 出现

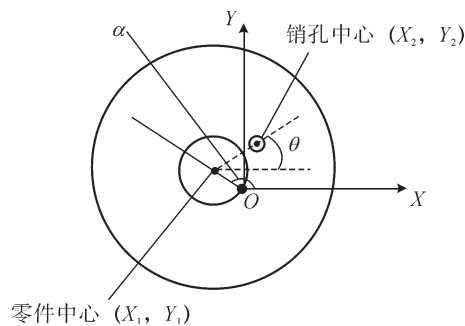


图8 零件中心、销孔中心以及零件角向位置角 θ 示意图
Fig.8 Part center, pinhole center and position angle θ of workpiece

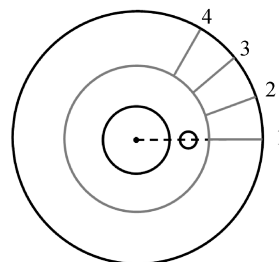


图9 叶片序号表示方法
Fig.9 Description method of blade number

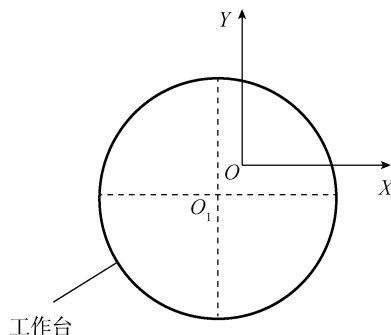


图10 机床零点漂移示意图
Fig.10 Schematic diagram of machine tool zero point shifting

了一定偏差。为了尽量消除零点漂移对产品质量的影响,需要采取措施对数控机床零点进行及时的标定及校准,以满足闭式叶片的加工需求。

目前,机床行业内通常采用基于标准球或者标准杆^[16]的方法对机床零点进行标定,但是实现这种方法需要配备专用标准球或标准杆,且工装或者零件易与标定装置产生干涉,操作不方便,本文给出一种零件在线状态下的数控机床零点快速标定方法。

3.1 采用千分表方案

首先,将机床A轴调整到0°状态,并在整个标定过程中保持不变。将千分表吸附在主轴端面上(保证千分表能够随着主轴自由旋转),确保表针能够压到零件外圆。

以标定机床Y轴零点为例,将表针转到Y轴方向,分别读出C轴在0°和180°时的千分表示数,记为 D_1 和 D_2 ,如图11(a)和(b)所示。那么此时 D_1 与 D_2 的差值即为零件H点与B点的跳动量差值。

接下来,工作台保持不动,如图11(b)和(c)所示,通过转动主轴,分别读出表针在零件H点与B点的示数,记为 D_3 和 D_2' 。计算 $(D_3 - D_2')$,并与 $(D_1 - D_2)$ 进行比较,若二者相等(小于 $1\mu\text{m}$ 即可视为相等),则此时的Y轴坐标值即为机床Y轴零点漂移值 Y_p ;若二者不相等,通过手轮调整机床主轴Y坐标值,直至二者相等,得到Y轴零点漂移值 Y_p 。按照相似的方法标定机床X轴零点漂移值,记为 X_p 。根据标定出来的机床X、Y轴漂移数值 X_p 、 Y_p 进行补偿校准。

当使用这种基于千分表的方法进行机床零点标定时,需要注意零件与工作台的偏心值在与被测轴垂直方向上的投影将对标定结果产生影响。以对机床Y轴零点进行标定为例,零件在X轴方向的偏心值对千分表测量的影响原理如图12所示。这时应该首先通过工装与零件之间的定位面配合,确保零件与工作台的偏心值在与被测轴垂直方向上的投影远远小于零件直径(对于直径 $<500\text{mm}$ 的零件,当零件偏心值在与被测轴垂直方向上的投影小于直径的1‰时,对零点标定造成的影响可以忽略不计)。

3.2 采用高精度在机测头方案

当数控机床所配置的探针式测头能够实现较高的测量精度,且数控系统内置圆心自动测量功能模块时,可以采用基于测头的简便方法标定数控机床X、Y轴零点。

在机床A轴保持为0°的状态下,通过机床测头分别测量C轴为0°和180°时的零件中心坐标,分别记为 (X_1, Y_1) 和 (X_1', Y_1') ,如图13所示。按照式(4)计算机床X、Y轴零点漂移值 X_p 、 Y_p ,最后,根据标定出来的机床X、Y轴零点漂移数值 X_p 、 Y_p 进行补偿校准。

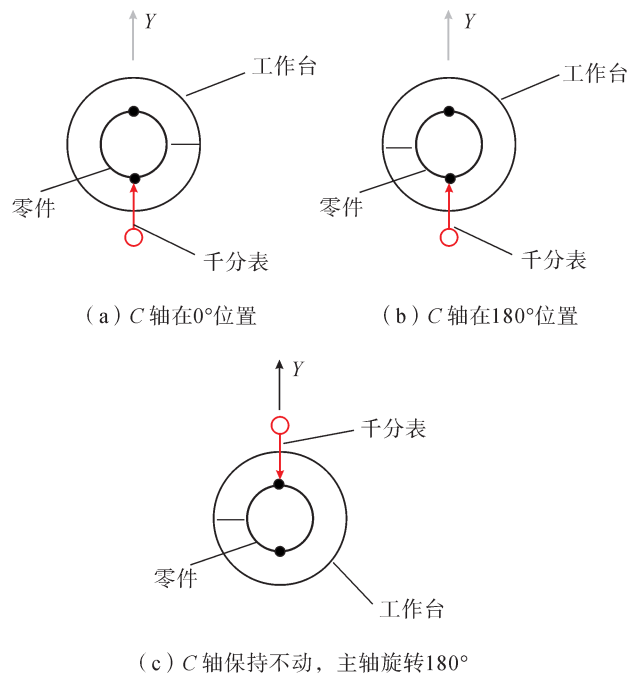


图11 基于千分表标定机床零点方法示意图
Fig.11 Calibration method of machine tool zero point by dial gauge

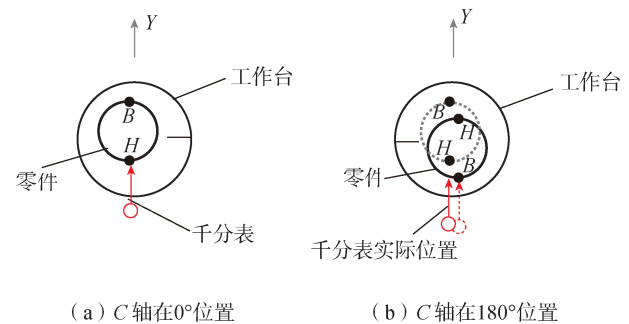


图12 偏心值对千分表测量的影响
Fig.12 Effect of workpiece eccentricity on calibration process by dial gauge

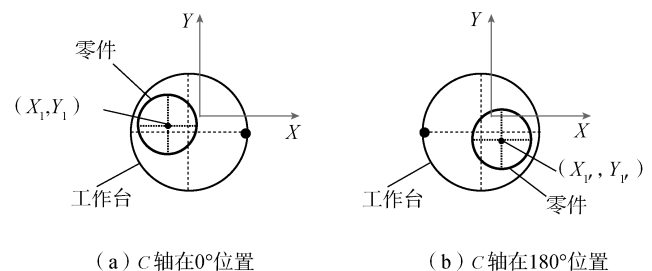


图13 基于测头标定机床零点方法示意图
Fig.13 Calibration method of machine tool zero point by probe

$$X_p = \frac{(X_1 + X_r)}{2} \quad (4)$$

$$Y_p = \frac{(Y_1 + Y_r)}{2}$$

本文通过采用标准球的通用方法对上面给出的两种机床零点快速标定方法进行了多次验证,结果显示能够起到很好的零点标定作用。此外,当采用基于测头的零点标定时,即使零件存在偏心,本文给出的方法仍然能够很好地发挥作用,且易于实现自动化标定,能够用于无人工干预的生产线上,因而,具有较强的推广应用价值。

需要说明的是,无论是基于千分表还是基于机床测头,都需要零件外圆表面有较好的圆柱度及粗糙度。

4 试验验证

4.1 试验方案

本文验证试验在科德 KMC400UMT 数控机床上进行,粗加工刀具采用锥度球头铣刀,精加工采用棒棒糖铣刀。通过自制工装装夹零件,按照前文所述工艺流程及接刀误差控制方法对叶片进行切削加工。试验现场如图 14 (a) 所示。图 14 (b) 为粗加工工步 1 所用刀具类型,图 14 (c) 为粗加工工步 2 以及精加工所用刀具类型(实际加工过程,精加工后的刀具可以用于粗加工工步 2)。所用刀具加工过程全程开启冷却液。

4.2 试验结果分析

加工后检查,叶片表面光洁度满足设计图样规定的粗糙度 $R_a 1.6\mu\text{m}$ 要求,采用三坐标测量机检测叶型轮廓数据,图 15 和图 16 给出了两组叶片的叶型检测结果,其中正面两部分轮廓是在共同基准下进行测量的。数据显示,正反两面加工的叶型轮廓对接的比较好,整个叶型偏差全部分布在 $\pm 0.07\text{mm}$ 以内,其中绝大部分数据点(图 15 对应比例为 99.35%,图 16 对应比例为 98.68%)的偏差分布在 $\pm 0.06\text{mm}$ 以内。且进行多次试验,均能得到稳定的叶片加工质量;而采用原方案加工时,零件加工质量并不稳定,叶型偏差可能达到 $\pm 0.11\text{mm}$ 甚至更大。试验证明,本文所给出的方法实现了对叶型接刀误差的精确控制,满足零件制造要求。

5 结论

从本文的分析过程可以看到,闭式叶盘叶型的接刀误差受到多个因素的共同影响,需要设计科学合理的工艺方案和操作方法来控制。本文设计了一种闭式叶盘铣叶型工序加工方案和流程,通过综合利用机床测头功能和机床 RTCP 功能实现了对零件位置的

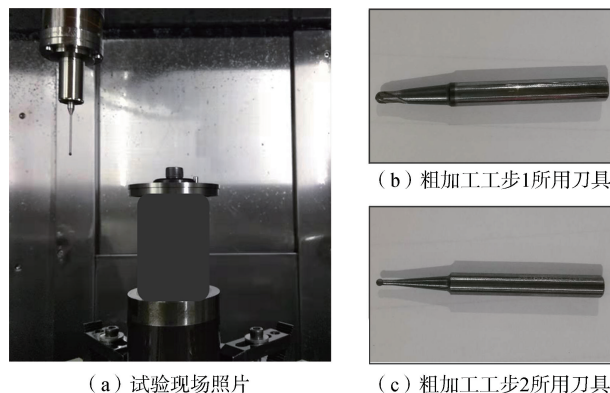


图14 试验现场及刀具照片

Fig.14 Experimental setup and tools

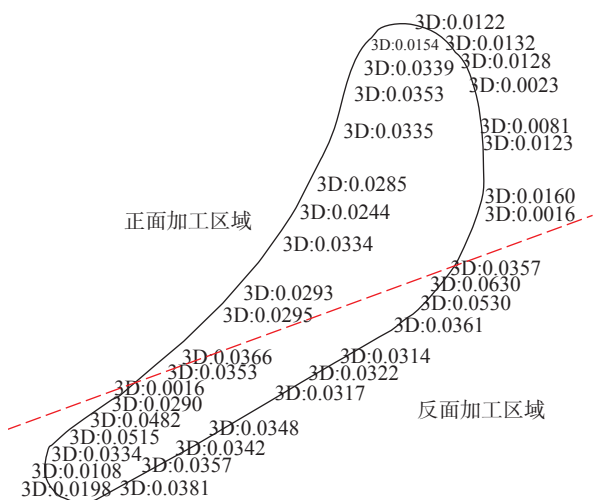


图15 叶片1叶型轮廓偏差检测结果(截面轮廓线为示意图, mm)

Fig.15 Checking results of errors for blade No.1 (profile lines are schematic, mm)

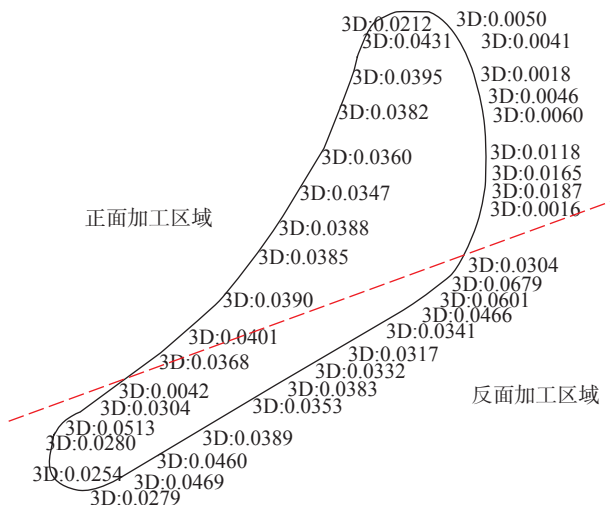


图16 叶片2叶型轮廓偏差检测结果(截面轮廓线为示意图, mm)

Fig.16 Checking results of errors for blade No.2 (profile lines are schematic, mm)

精确定位和偏心补偿。最后,在国产五轴数控机床上开展了加工试验,三坐标检测结果证明了本文所给出的方法能够有效控制叶型接刀误差。另外,所给出的零件定位及偏心补偿方法、机床零点快速标定方法是基于机床在机测头功能而实现,易于实现自动化,同时降低了对零件装夹后圆周跳动量的要求,能够显著节省装夹找正时间,在叶盘自动生产线上具有广阔应用前景。

参考文献

- [1] 段昌德, 吴中竞, 吴伟. 闭式叶轮整体加工技术[J]. 东方电机, 2014, 42(2): 31-38.
- DUAN Changde, WU Zhongjing, WU Wei. The integral machining technology of closed blisk[J]. Dongfang Electrical Machine, 2014, 42(2): 31-38.
- [2] 匡荣, 尹洋, 蒋君荣. 钛合金整体闭式叶轮五轴高速加工工艺试验研究[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2015, 34(3): 21-25.
- KUANG Rong, YIN Yang, JIANG Junrong. An experimental study on five-axis high speed processing technology of titanium alloy integral shrouded impeller[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2015, 34(3): 21-25.
- [3] 任军学, 谢志丰, 梁永收, 等. 闭式整体叶盘五坐标插铣刀位轨迹规划[J]. 航空学报, 2010, 31(1): 210-216.
- REN Junxue, XIE Zhifeng, LIANG Yongshou, et al. 5-axis plunge milling path planning of closed blisk[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(1): 210-216.
- [4] 李彬. 小型闭式整体泵叶轮五轴数控加工技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- LI Bin. Research on 5-axis CNC machining techniques of small closed integral pump impeller[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [5] 曹利新, 薛亚峰. 闭式叶轮通道五轴数控粗加工刀具路径规划[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(4): 514-520.
- CAO Lixin, XUE Yafeng. Tool-path planning for 5-axis NC rough machining of closed impeller channel[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53(4): 514-520.
- [6] 李湑, 陈五一, 陈彩红. 整体叶轮插铣粗加工算法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(8): 1696-1701.
- LI Tian, CHEN Wuyi, CHEN Caihong. Rough machining method for blisk plunge milling[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(8): 1696-1701.
- [7] 李和平. 散热器加工刀具痕迹形成与消除研究[J]. 机床与液压, 2007, 35(2): 241, 207.
- LI Heping. Research on the formation and elimination of adjoining error in radiator machining. Machine tool & Hydraulics. 2007, 35(2): 241, 207.
- [8] 秦卫伟, 石斌, 刘波, 等. 薄壁件接刀痕的分析及解决方案[J]. 山西冶金, 2019, 42(3): 1-3.
- QIN Weiwei, SHI Bin, LIU Bo, et al. Analysis and solution of joint mark of thin-walled parts[J]. Shanxi Metallurgy, 2019, 42(3): 1-3.
- [9] 钱杨林, 钱春华. 数控铣削加工接刀光顺的技术研究[J]. 制造业自动化, 2011, 33(13): 75-76, 128.
- QIAN Yanglin, QIAN Chunhua. CNC milling technologies of access adjoining error surface[J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(13): 75-76, 128.
- [10] 董金伟. 数控铣削加工精度与加工误差分析[J]. 装备制造技术, 2013(6): 81-83.
- DONG Jinwei. Analysis on the NC milling machining precision and the error[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2013(6): 81-83.
- [11] 郑财, 黄贤振. 三轴数控机床加工误差分析[J]. 制造技术与机床, 2016(8): 87-90.
- ZHENG Cai, HUANG Xianzhen. 3-axis NC machine tool machining error analysis[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(8): 87-90.
- [12] 孙维堂, 刘伟军, 于东, 等. 五轴联动数控系统 RTCP 技术的研究与实现[J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(12): 2515-2518.
- SUN Weitang, LIU Weijun, YU Dong, et al. Design and implementation of rotation around tool center point algorithm for 5-axis CNC[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2011, 32(12): 2515-2518.
- [13] OKAFOR A C, ERTEKIN Y M. Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(8): 1199-1213.
- [14] PARKINSON S, LONGSTAFF A P. Multi-objective optimisation of machine tool error mapping using automated planning[J]. Expert Systems With Applications, 2015, 42(6): 3005-3015.
- [15] HE G Y, YANG B L, DING B H, et al. Modeling and compensation technology for the comprehensive errors of fixture system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(2): 385-391.
- [16] 李亚东, 王波, 曾小明, 等. 摇篮式五轴加工中心机床精度标定方法[J]. 机械, 2016, 43(S1): 87-89.
- LI Yadong, WANG Bo, ZENG Xiaoming, et al. Accuracy calibration method of cradle 5-axis machining center[J]. Machinery. 2016(S1): 87-89.

通讯作者: 邱文旺, 工程师、博士, 研究方向为高效数控加工仿真与智能制造技术, E-mail: wenwang_qiu7105@163.com。

(责编 古京)