

# 双摆台五轴机床 RPCP 结构参数的标定与功能测试

李艳华, 王 军

(武汉职业技术学院 机电工程学院, 湖北 武汉 430073)

**摘 要:** RPCP 是现代双摆台五轴机床加工应用中常用的技术, 它可简化 CAM 编程和机床操作者之间的相互依赖关系。RPCP 技术实现的关键需要前期对机床结构特征参数进行标定和测试校准, 理解其实现原理和方法, 能帮助使用者进一步加深对 RPCP 技术应用的掌控。

**关键词:** RPCP; 双摆台五轴机床; 结构特征; 参数标定

中图分类号: TG659

文献标识码: A

文章编号: 1671-931X (2016) 03-0083-04

## 一、引言

早期五轴机床因不支持旋转轴刀长自动补偿技术, 在 CAM 输出 NC 程序之前, 操作人员必须先 will 工件装夹对刀后的结构特征数据提供给编程人员, 由其进行相关后置参数设置后生成 NC 程序<sup>[1]</sup>, 才可实现期望的五轴加工。随着现代五轴机床对旋转轴刀长自动补偿技术的支持, 这一状况得到了很大改善, 依然可以如三轴编程那样, 在前期生成与机床结构参数无关的 NC 程序供加工使用。但要实现机床系统的旋转轴刀长的自动补偿, 对不同结构类型的五轴机床而言, 其固有的结构特征参数都需要前期进行标定以告知机床系统, 并预先对其进行功能测试, 确保其功能正确方可放心使用。

## 二、五轴机床 RTCP 与 RPCP 功能的含义解析

五轴机床加工时, 程序控制的旋转轴运动通常是绕其旋转轴心旋转。要铣削一条不含旋转轴角度变化的直线(传统三轴方式), 整个枢轴保持主轴刀具与 Z 轴方向一致, 以刚性整体形式做平行于轨迹

直线的运动即可, 但若同时含有旋转轴角度的改变, 在控制枢轴仍做平行于轨迹直线运动的状态下, 由于刀轴有绕旋转轴心的偏摆, 刀尖会随之出现高低起落的弧形运动, 则刀尖轨迹将不再是一直线而是一条曲线, 如图 1 中不使用 RTCP 的轨迹所示。为了确保刀尖轨迹为一条直线, 就必须对该曲线进行补偿。需根据刀尖点到旋转轴心的枢轴中心距(pivot),

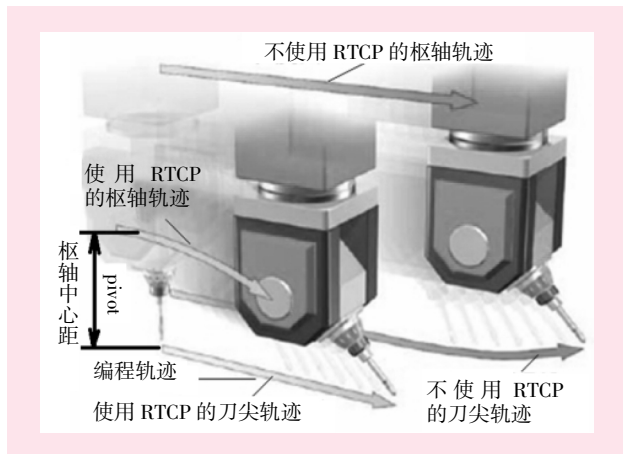


图 1 RTCP 功能的含义

收稿日期: 2016-03-02

作者简介: 李艳华(1975-), 女, 湖北仙桃人, 武汉职业技术学院机电工程学院副教授, 研究方向: 机电工程、数控技术。

对所有插补点进行旋转轴角度和旋转轴心点三轴坐标位置的计算,得出枢轴控制点(旋转轴心)的插补轨迹(曲线),然后按此计算结果调整控制枢轴的运动,方可保证刀尖轨迹为指定的直线,这就是通常意义上的刀具中心点 RTCP 控制功能。对于以工件旋转实现五轴加工的双摆台五轴机床,这种补偿功能则称之为 RPCP,即基于工件旋转中心的编程<sup>[2]</sup>。其意义与上述 RTCP 功能类似,不同的是该功能是补偿工件旋转所造成的平动坐标的变化。不同结构模式的机床,其转换控制的算法不同。RTCP 或 RPCP 补偿功能的实现,既可由 CAM 软件输出非 RTCP 的程序(已由软件进行了预补偿计算)控制,也可由带 RTCP 功能的机床控制系统进行实时补偿控制。

对具有 RTCP 或 RPCP 功能的机床,其控制系统能根据被加工曲线在空间的轨迹,以保持刀具中心始终在被编程的 X、Y、Z 坐标位置上,由旋转角度变化可能导致刀具中心相对工件的 X、Y、Z 直线位移将被转换成刀轴旋转中心或工作台旋转中心的 X、Y、Z 位移变化,即自动对旋转轴进行补偿。这一方式使得 CAM 编制的程序具有一定的通用性,其程序如同三轴编程加工一样,不需预先考虑机床的结构模式及结构特征参数,不仅让预编程工作变得相对简单,且使得工件在机床上的安装位置也可以更灵活。但当其程序在机床上实施加工之前,必须对相应计算所需的机床结构特征参数进行标定<sup>[3]</sup>,提供给系统进行实时计算所需采用的补偿数据,否则将无法获得所期望的加工结果。

### 三、双摆台五轴机床 RPCP 结构参数的标定

机床结构参数的标定是先设定所用机床的结构类型,并对其相应的特征参数(如摆台式机床的枢轴中心距、摆台式机床旋转轴线间的偏置等)进行测定,然后填入机床通道参数中。

如图 2 所示,对具 AC 结构的双摆台五轴机床而言,为实现 RPCP 功能而需要标定的内容包括:测量出 C 转台上表面中心在机床坐标系中的坐标( $X_0, Y_0, Z_0$ )、A 轴回转轴线和 C 轴回转轴线在 Y 轴方向的偏置距离  $y_f$  及 Z 方向的偏置距离  $z_f$ ,然后将这些数据输入到机床系统参数中,供系统实施 RTCP 功能时作补偿换算用。

#### (一)C 转台中心位置的测定

##### 1. C 轴中心 X、Y 坐标的测定

将电子寻边器和普通刀具一样装夹在主轴上,移动机床使测头与工件表面接触至灯亮,然后逐步降低步进增量,使其处于极限接触(进一步即点亮,退一步则熄灭),即认为定位到工件表面的位置处。具体操作如下:

如图 3 所示,先进行机床回零,并确定 A、C 轴在  $0^\circ$  时 C 转台位于水平。然后移动 X、Y 轴使寻边器

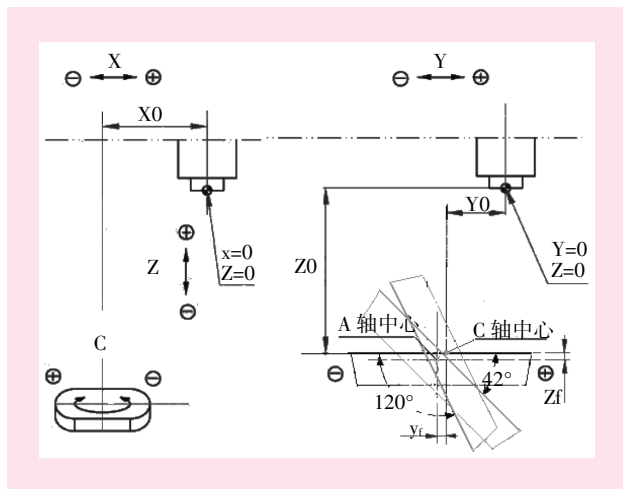


图 2 AC 摆台 RTCP 标定的结构参数

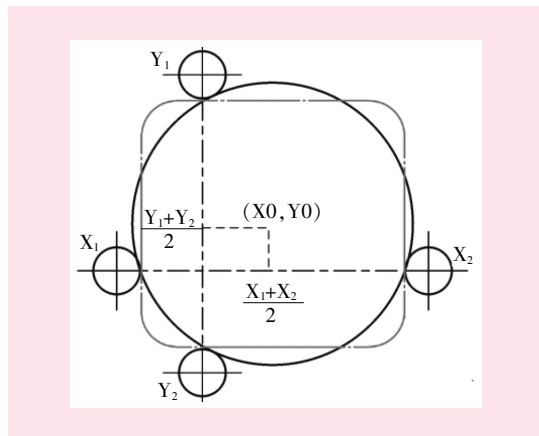


图 3 C 轴中心 XY 坐标的找正

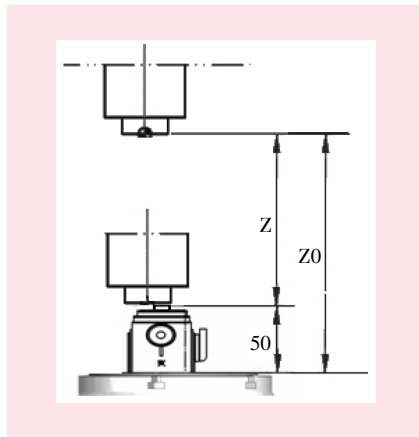


图 4 C 轴中心的 Z 测定

先后定位到 C 轴转台正对的两侧表面,记录下对应的  $X_1, X_2, Y_1, Y_2$  机床坐标值,则对称中心在机床坐标系中的坐标应是  $X_0 = (X_1 + X_2) / 2, Y_0 = (Y_1 + Y_2) / 2$ 。测定 X 过程中应保持 Y 不变,测定 Y 过程中应保持 X 不变。

##### 2. C 转台上表面 Z 坐标的测定

C 转台上表面的 Z 坐标测定是用于测量其与主轴下端端面接触时,C 转台上表面在机床坐标系中的坐标值数据  $Z_0$ 。可直接用 Z 轴电子对刀设定器进行

测定,具体操作如下:

如图4所示,确定A轴在 $0^\circ$ 且C转台处于水平位置。置标准高度为50的Z轴对刀设定器于C转台上表面,手轮移动Z轴至主轴下端面接触Z轴对刀设定器的测头,微调手轮移动单位为 $\times 1$ 挡后,使测头与主轴下端面处于极限接触状态,记录此时的机床坐标Z值(负值),则C转台中心Z坐标应为 $Z_0 = Z - 50$ 。

## (二)AC轴线间偏移矢量的测定

对于AC轴线的Y向偏移矢量 $y_f$ 和Z向偏移矢量 $z_f$ ,可通过一已知高度为H的测试块来进行相关测定后换算得出。如图5所示,根据测试块由A轴从 $0^\circ$ 到 $90^\circ$ 的旋转变换,图示应存在如下计算关系。

$$|Y| = H + z_f + y_f \quad (1)$$

$$|Z| = H + z_f - (y_f + L) \quad (2)$$

由上式(1)、(2)求解计算即可得出:

$$y_f = (|Y| - |Z| - L) / 2 \quad (3)$$

$$z_f = (|Y| + |Z| + L) / 2 - H \quad (4)$$

上式中L、H为不带符号的正数,若由上式计算得出 $y_f$ 、 $z_f$ 为负值,表示其偏置方向与图中指示方向相反。相关测定操作如下:

如图5所示,先调整A、C轴至 $0^\circ$ 方位,使C转台处于水平位置,装夹固定好已知高度H的测试块,并通过打表找正使其右侧面(图中右侧边)与X轴平行。在主轴上装夹一把已知标准直径d的寻边器,然后移动机床至C轴转台中心正对主轴中心的位置,即前述(X0,Y0)位置,并将当前Y轴坐标相对清零。调整移动机床使寻边器测头与其右侧面处于极限接触,记录此时的Y轴相对坐标Y1,则从中心到右侧边的距离 $L = (|Y1| - d/2)$ 。再转动A轴至 $-90^\circ$ 方位,使测试块顶面处于垂直、后侧表面处于水平位置,调整移动机床使寻边器测头与垂直后的顶面(图中左侧边)处于极限接触,记录此时的Y轴相对坐标Y2,则图中数据 $Y = (|Y2| - d/2)$ 。

使用千分表先找正转台处于 $0^\circ$ 方位时测试块上表面的位置,并将当前Z坐标相对清零,移开千分表后再转动A轴至 $-90^\circ$ 方位,找正测试块呈水平方位的后侧表面位置,记录此时的Z轴相对坐标Z1,即为图中数据 $Z = |Z1|$ 。

根据实测的L、Y、Z及已知测试块高度H,即可按前式(3)、(4)计算出 $y_f$ 、 $z_f$ 。此处 $y_f$ 是指A轴回转轴线和C轴轴线在Y方向上的偏移距离, $z_f$ 是指A轴回转轴线和C轴转台上表面之间的偏移距离,它仅是RPCP补偿换算的基础数据,是与使用夹具及工件结构类型无关的原始数据。该测试方法对测试块结构及其在C转台上的装夹位置并无严格要求。

## 四、RPCP功能的手动测试

### (一)手动测试的操作方法

当完成机床RPCP结构参数的标定后,即可手动进行RPCP功能测试,以验证参数测定的准确性及RPCP功能的实施效果。测试时,需要先在MDI模式下输入执行启用RTCP功能的指令(如Fanuc系统的G43.5),然后点动旋转轴,使刀具中心点保持在开启RTCP功能时的刀位点位置。具体测试可参考如下操作:

如图6所示,在主轴刀柄上夹持一个标准球,再在工作台上架好磁力千分表,然后移动机床直线轴沿-X(或-Y、-Z)方向使表头接触标准球,找准球头最大点位置后将表头调零,同时设置刀长H值=球头杆实际长度-球头半径;在MDI模式下输入并先后执行[G54;G43.5H1]以启用系统RTCP功能,接着在手轮模式下实施A、C轴的旋转,观察千分表指针的变化应在允许范围内,同时观察各轴是否联动,查看机床坐标的变化。

### (二)RPCP功能测试的原理解析

双摆台机床RPCP功能测试的原理就是无论千分表(工件)放置在工作台面上什么位置,当表头调整到与标准球面法向垂直指向球心(球刀球心)时,无论怎样改变旋转轴角度,都能保证表头相对球心的距离不变,即刀位点相对工件位置不改变,因旋转

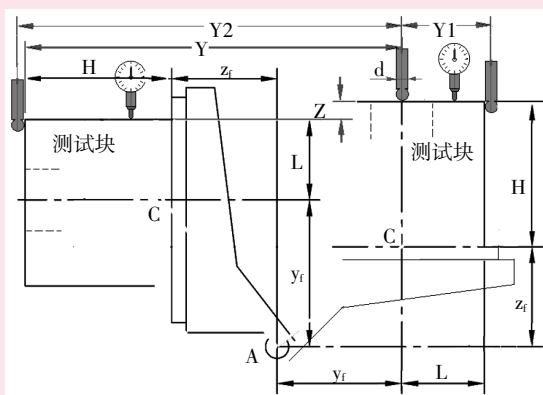


图5 AC轴间偏移 $y_f$ 、 $z_f$ 的相关测定

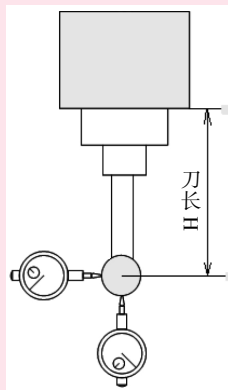


图6 RPCP标准球测试

角度变化导致刀具相对工件可能产生的直线位移将由系统按 RPCP 补偿算法自动转换为工作台旋转中心的 XY 平动及刀轴的 Z 向升降调整。若机床精度较高,当旋转轴摆转时,表头不会是固定在球面上某点,而是在球面上滑动,但不会脱离球面,因此千分表指针只会在精度允许范围内作微小摆动,但工作台(旋转中心)及刀具主轴的 X/Y/Z 会有自动补偿调整的坐标变化。每一点上都能按此计算控制,即可实现五轴的 RTCP 插补加工。

### 五、结语

随着现代五轴机床系统对旋转轴刀长自动补偿 RTCP 或 RPCP 技术的支持,简化了 CAM 编程和机床操作者之间的相互依赖关系。但要想获得理想的 RTCP 控制效果,对机床结构特征参数的标定及其标定后的测试校准是不可或缺的,它将直接影响到加工精度。这不仅仅只是在机床装调的初期才需实施

的操作,当机床使用中各种可能引发变形因素导致加工精度出现下降时,都必须重新进行标定和测试,它将是机床定期维护的项目之一。对非 RTCP 程序模式控制的加工而言,机床结构特征参数的测定更是加工前期必做的日常工作,因此,理解掌握五轴机床结构特征参数标定与测试的方法,可以说是五轴加工应用的关键技术之一。

### 参考文献:

- [1] 张绪祥.双摆头五轴加工后处理修改及编程验证[J].机床与液压,2014,(20):166-168.
- [2] 樊曙天,杨伟平.双转台五坐标机床 RTCP 功能的研究[J].制造技术与机床,2009,(12):74-77.
- [3] 张云.一种基于 RTCP 功能的五坐标动态精度检测工具[J].制造技术与机床,2012,(11):92-94.

[责任编辑:詹华西]

## Calibration and Function Test of RPCP Structure Parameters of Double Pendulum Station of Five Axis Machine Tool

LI Yan-hua WANG Jun

(Wuhan Polytechnic, Wuhan 430073, China)

**Abstract:** RPCP is a common technology used in the machining of double pendulum station of five axis machine tools nowadays, which can simplify the relationship between the CAM programming and the operator. The key to the realization of RPCP technology needs to calibrate the parameters of machine tool structure, and to understand the principle and method of its implementation, which can help users further master the RPCP technology.

**Key words:** RPCP; double pendulum station of five axis machine tool; structure characteristics parameters; calibration