

基于HNC-8型五轴联动的数控机床RTCP标定算法研究

赵 茜^{1,2}, 孙海龙^{1,2}, 曾 超^{1,2}

(1. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610091;

2. 四川省航空智能制造装备工程技术研究中心, 成都 610092)

[摘要] 五轴 RTCP 功能机床可通过计算刀尖点产生的旋转位移偏差, 利用线性轴做相应平动来进行补偿修正控制, 保证在工件坐标系下刀具中心点坐标固定。因此相对于不具备 RTCP 功能机床, 其可避免程控复杂性, 同时提高控制精度。而 RTCP 控制技术关键在于选用机床的模型固定参数——即 RTCP 参数是否精准, RTCP 参数测量精度直接影响机床控制性能。本文基于华中数控系统 HNC-8 型双摆头结构的五轴机床对通用 RTCP 算法及 RTCP 标定技术进行了研究。提出了 RTCP 双摆头的标定方法, 测试验证了五轴机床的控制精度, 与传统测量技术相比, 所提标定算法在提高测量效率的同时大幅提升了测量精度。

关键词: 五轴数控机床; HNC-8 型双摆头; RTCP; 标定; 算法

Research on RTCP Calibration Algorithms for CNC Machine Tools Based on HNC-8 Five-Axis Linkage

ZHAO Xi^{1,2}, SUN Hailong^{1,2}, ZENG Chao^{1,2}

(1. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610091, China;

2. Sichuan Aviation Intelligent Manufacturing Equipment Engineering Technology Research Center, Chengdu 610092, China)

[ABSTRACT] Five-axis RTCP functional machine tool can calculate the deviation of rotary displacement caused by the tool point, translating the linear axis to ensure that the coordinates of tool center point are fixed in workpiece coordinate system. Therefore, compared with machine tools without RTCP function, it can avoid the complexity of program control and improve the control accuracy. The key of RTCP control technology is to select the fixed parameters of machine tool model, that is, whether the RTCP parameters are accurate or not, and the measurement accuracy of RTCP parameters directly affects the control performance of machine tools. In this paper, the universal RTCP algorithm and RTCP calibration technology are studied based on the five-axis machine tool with HNC-8 double pendulum head structure of HNC system. The calibration method of RTCP double pendulum head is proposed, and the control accuracy of five-axis machine tool is tested and verified. Compared with traditional measurement technology, the proposed calibration algorithm improves the measurement efficiency while greatly improving the measurement accuracy.

Keywords: Five-axis CNC machine tool; HNC-8 double pendulum head; RTCP; Calibration; Algorithm

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.23/24.097

在智能制造和工业 4.0 的大环境背景下, 作为机械加工制造重要的一环, 五轴联动数控机床有着不可替代的作用, 在大力推动机械制造智能生产的同时, 也对机械设备加工工艺有着严格的要求, 尤其是对于国防和航空工业产品来说, 其加工精度极为严苛, 而五轴联动数控机床的控制技术能够很好地满足高端精密产品的加工, 由于存在一定的技术壁垒, 因此对于国家而言, 该类型的机床属于国家战略装备^[1-2]。RTCP 机床较传统机

床额外增加两个选择控制轴, 通过将机床坐标参数和工件坐标参数相互转换, 实现空间控制刀轴方向, 弥补选择轴不规则运动带来的偏差, 让刀具处于工件理想切割点, 进而可进行精确的曲面线加工, 由于其优异的加工性能, 成为高精度机械制造技术的新宠^[3]。

国外五轴联动数控机床技术发展较早, 已经有商业化的技术产品, 目前市面上比较主流的产品生产技术由日本、美国和欧洲等发达国家控制。国外对五轴控制

技术投入了较长的时间研究,在文献 [4] 和文献 [5] 中研究人员提出了多轴机床不同的运动控制模型,分别为工件坐标系下齐次变换矩阵解法和广义误差模型。为了解决为适应不同加工工件要求机床 RTCP 技术控制策略不通用问题,在西门子 840D 中,TRAORI 激活第 1 个设定的方向转换 RTCP,TRAFOOF 取消转换 RTCP; FIDIA C20 数控系统中, G96 激活 RTCP, G97 禁止 RTCP。

随着加工工艺要求不断严苛,亟需研发高端精密加工设备,在国内研究学者和企业不断努力下,陆续研制出了一些适合生产工艺要求的五轴数控机床^[6-7],通过机床加工时刀具与控制轴相对位置变换,理论上分析得出 RTCP 参数化控制原理。Uddin 等^[6]在机床控制中,使用刀具与控制轴移动相对位置信息插补技术,间接达到对刀具中心点旋转偏差控制^[8]。华中科技大学对不同机床模型例如双摆头等进行了研究,得出了 3 种模型下的 RTCP 参数以及控制策略^[9]。国内在使用五轴数控机床时,由 RTCP 参数标定策略带来的精度问题^[10],将直接导致加工失败,本文提出一种适用范围更广的标定手段,能够大幅提升 RTCP 参数测量精度。

1 刀具中心点控制(RTCP)

RTCP 控制技术依赖于两个坐标系的空间位置变换,分别为主动旋转轴与从动轴^[11]。比如在不具备 RTCP 功能的时候,刀具摆动一个角度 B ,为了保证刀尖点位于给定的角度,刀具中心的 XYZ 值需要进行补偿,这样得到的 XYZ 和刀尖点的实际位置是不一样的。

在使用五轴机床加工工件的过程中,由于机床结构本身的误差与增加两个旋转轴,使得刀具中心的轨迹发生了改变。RTCP 刀具中心位置自动校准模式开启后,即在 G 代码中添加控制,机床刀具控制能够将刀具切削点沿着固定轨迹进行精准加工,避免刀具旋转导致中心位置偏移带来切削的偏差,不需要后期再处理过程(图 1)。

不使用 RTCP 功能时,刀具围绕着旋转轴中心旋转,刀尖点移出固定点(图 2)。

在工件坐标系下,刀具中心点无法固定,容易摆动,若机台没有 RTCP 控制系统,则加工路线设计复杂,也容易出现精密加工失败。

在程序段开启中心点控制功能后,刀具切削点维持在工件坐标系位置不变,在加工过程中,机床控制将控制直线轴,稳定刀具切削,从而实现精密加工(图 3)。

RTCP 本质控制的是主、从旋转轴轴线向量,RTCP

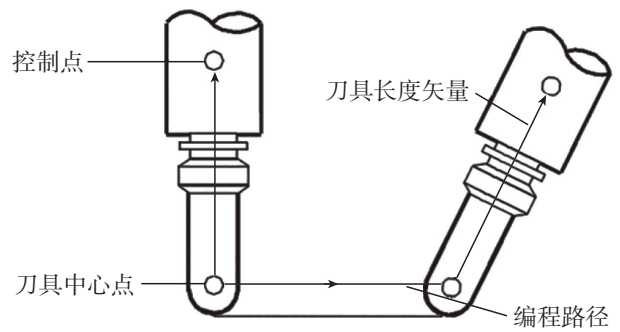


图1 刀具中心编程
Fig.1 Tool center programming

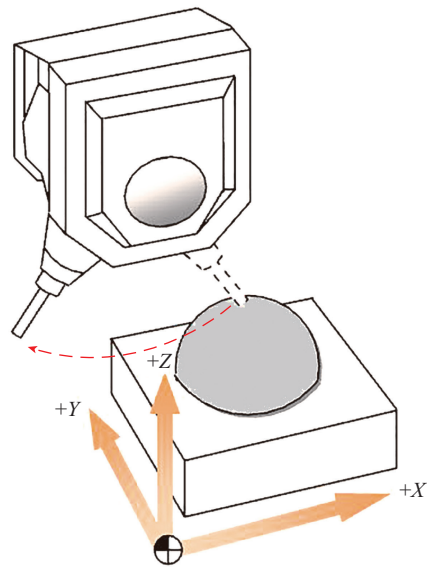


图2 不使用RTCP功能
Fig.2 Not using RTCP functionality

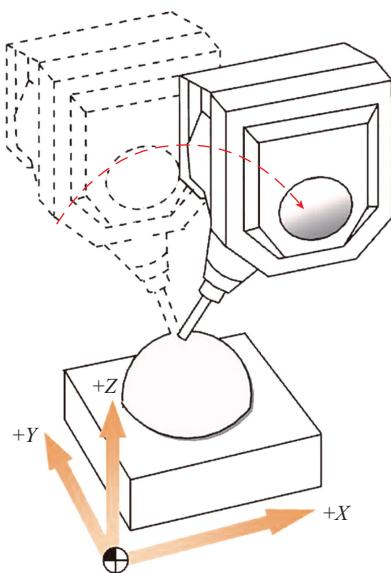


图3 使用RTCP功能
Fig.3 Using RTCP functionality

参数描述的就是机床两旋转轴轴线角度偏移。假五轴控制技术依赖手动校准、后期处理,且无法时刻保持刀具中心点在工件位置切削,给精细加工带来一定的困难,同时假五轴控制系统对刀具类型与加工工件平台适应度差。

编程格式

G43.4 (G43.5)H_ ; 开启 RTCP 功能

G43.4: 旋转轴角度编程

G43.5: 刀具矢量编程

G49 ; 取消 RTCP 功能

其中 G43.4 (G43.5) 开启 RTCP 功能; 在刀具轴线方向上, 朝着控制点偏移位置, 需要补偿选择加工刀具的长度大小, 其补偿号在编程格式中用 H 表示。

G49 取消 RTCP 功能。RTCP 功能; H 指定刀具长度补偿号, 使刀具中心点沿着刀轴线往控制点方向偏移一个刀具长度补偿(由于 RTCP 带刀补功能, 设置工件坐标系时应该考虑刀具)^[12]。

2 基于华中 8 型数控机床 AB 双摆头五轴的标定方法说明

2.1 AB 双摆头五轴结构参数对应华中 8 型参数说明

(A/B 轴行程范围 $\pm 30^{\circ} \sim 90^{\circ}$)

AB 双摆头五轴机床的标定工作基本可以理解为对 A 轴、B 轴、主轴 3 条轴线之间的空间方向矢量关系的标定(轴线间的直线距离及方向)。

(1) 刀具初始方向(X/Y/Z)。

因机床实际刀具初始方向为 Z 轴轴向, 所以此处刀具初始方向(Z)填 1, 另外刀具初始方向(X/Y)填 0。

(2) 摆头结构类型: 以 BA 为例。

图 4 展示的双摆头机床采用五轴控制技术, 其轴线坐标关系, B 轴为主动轴(摆头第 1 旋转轴), A 轴为从

动轴(摆头第 2 旋转轴)。

(3) 摆头第 1 旋转轴方向矢量(X/Y/Z)。

旋转轴方向矢量是指此旋转轴所绕轴线方向。第 1 摆头 B 轴在此机械机构中是绕 Y 轴轴向摆动, 所以在摆头第 1 旋转轴方向矢量(Y)后填 1, 另外第 1 旋转轴方向矢量(X/Z)后填 0。

· 摆头第 1 旋转轴偏移矢量(Y)。

无(填 0)。

· 摆头第 1 旋转轴偏移矢量(X), 需标定。

B 轴摆动轴轴线(Y 轴向)与主轴轴线在 X 方向上的偏移量(两条轴线间的直线距离, 理论上为零, 所以此处可为 0)。

· 摆头第 1 旋转轴偏移矢量(Z), 需标定。

· B 轴摆动轴轴线(Y 轴向)与 A 轴轴线在 Z 方向上的偏移量(两条轴线间的直线距离, 理论上为零, 所以此处可为 0)。

(4) 摆头第 2 旋转轴方向矢量(X/Y/Z)。

定义同上, 摆头第 2 旋转轴(A 轴)方向矢量为 X 轴轴向。所以只在摆头第 2 旋转轴方向矢量(X)后填 1, 另外摆头第 2 旋转轴方向矢量(Y/Z)填 0。

· 摆头第 2 旋转轴偏移矢量(X)。

无(填 0)。

· 摆头第 2 旋转轴偏移矢量(Y), 需标定。

A 轴摆动轴轴线(X 轴向)与主轴轴线在 Y 方向上的偏移量。

· 摆头第 2 旋转轴偏移矢量(Z), 需标定。

主轴端面到 A 轴摆动轴轴线(X 轴向)的距离(Z 方向), 即可称为 A 轴摆长。

2.2 AB 双摆头五轴结构参数标定方法(以 BA 结构类型为例)

根据 AB 双摆头五轴机床中 B 为主动轴, A 为从动

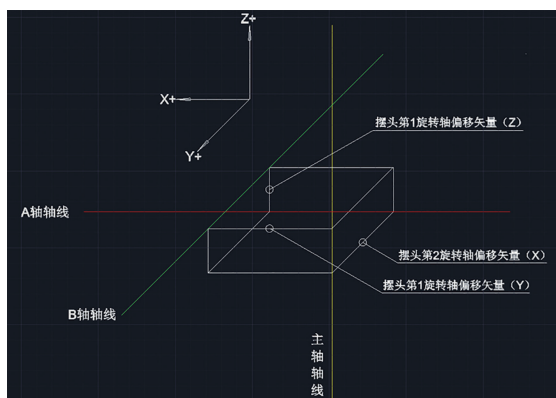


图4 A轴、B轴、主轴3条轴线之间的空间方向矢量关系

Fig.4 Space direction vector relationship among three axes of A, B and spindle

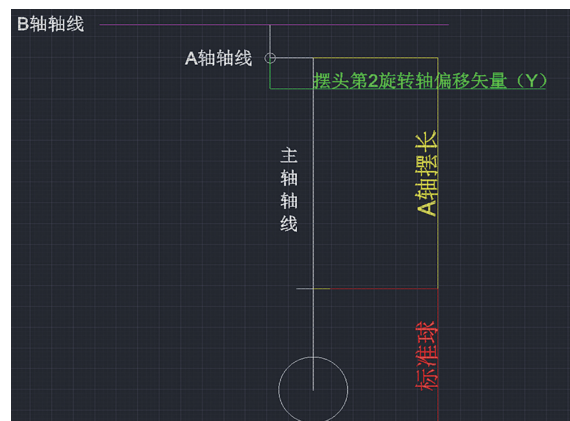


图5 A轴结构示意图

Fig.5 A shaft structural diagram

轴的特点,可判断 A 轴的结构参数对 B 轴运动控制有影响(图 5)。先从从动轴 A 开始反向标定,采用验证方法时也需从 A 轴开始验证。

A 轴标定方法分为以下 4 步(图 6):

(1) 将 A 轴摆动到 +30°, 移动 X/Y/Z 轴采用百分表找出标准球最低点, 并记录此时机床坐标系 Y 轴(Y1) 和 Z 轴(Z1) 坐标, 同时记录下此刻百分表的读数;

(2) 将 A 轴摆动到 -30°, 移动 X/Y/Z 轴采用百分表找出标准球最低点, 并记录此时机床坐标系 Y 轴(Y2) 和 Z 轴(Z2) 坐标;

(3) 摆头第 2 旋转轴偏移矢量(Y) = Z1 - Z2;

(4) 摆头第 2 旋转轴偏移矢量(Z) = |Y1 - Y2| - 标准球长度(到球心)。

Y 方向差值: 摆头第 2 旋转轴偏移矢量(Z) + 标准球长度(到球心)。

Z 方向差值: 摆头第 2 旋转轴偏移矢量(Y)。

B 轴标定方法(B 轴标定方式与 A 轴类似) 见图 7 和 8。

(1) 将 B 轴摆动到 +30°, 移动 X/Y/Z 轴用百分表找出标准球最低点, 并记录此时机床坐标系 X 轴(X1) 和 Z 轴(Z1) 坐标, 同时记录下此时百分表的读数;

(2) 同理, 将 B 轴摆动到 -30°, 移动 X/Y/Z 轴用百分表找出标准球最低点, 并记录此时机床坐标系 X 轴(X2) 和 Z 轴(Z2) 坐标;

(3) 摆头第 1 旋转轴偏移矢量(X) = Z1 - Z2;

(4) 摆头第 1 旋转轴偏移矢量(Z) = |X1 - X2| - 标准球长度(到球心)。

X 方向差值: 摆头第 1 旋转轴偏移矢量(Z) + 摆头第 2 旋转轴偏移矢量(Z) + 标准球长度(到球心)。

Z 方向差值: 摆头第 1 旋转轴偏移矢量(X)。

2.3 AB 双摆头五轴结构参数验证程序

(1) 摆动轴 A 轴单轴验证程序(保证 A、B 轴在 0 度)。

%1234

G90G54 ; G54 坐标设当前位置

G43.H1 ; 开启 RTCP 功能, H1 指标准球长度

(到球心)

G01A-30 F200

G4X3 ; 暂停 3s, 以便读数

A0

G4X3

A30

G4X3

A0

G49 ; 关闭 RTCP 功能

M30

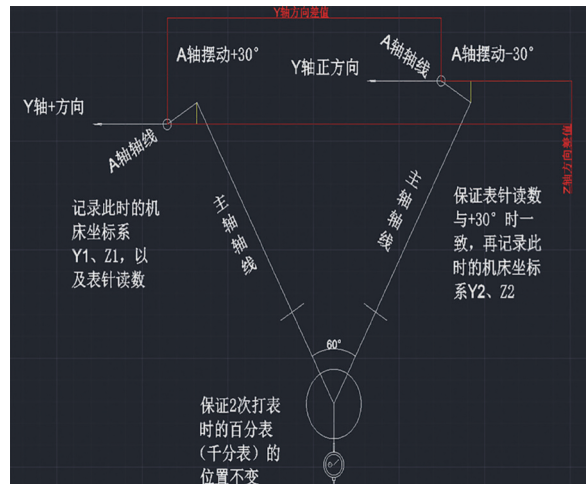


图6 A轴测试标定图

Fig.6 A axis test calibration diagram

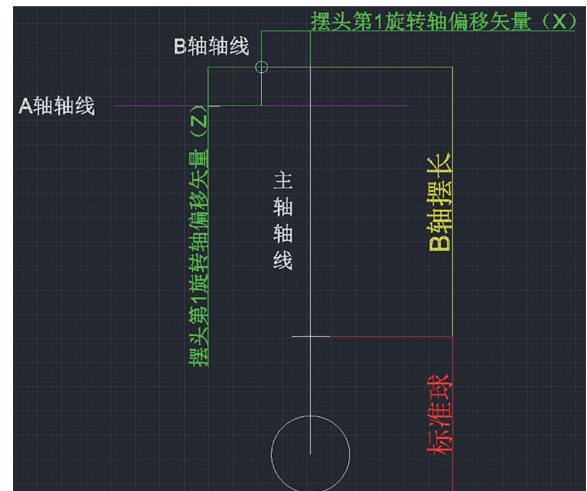


图7 B轴结构示意图

Fig.7 B axis structural diagram

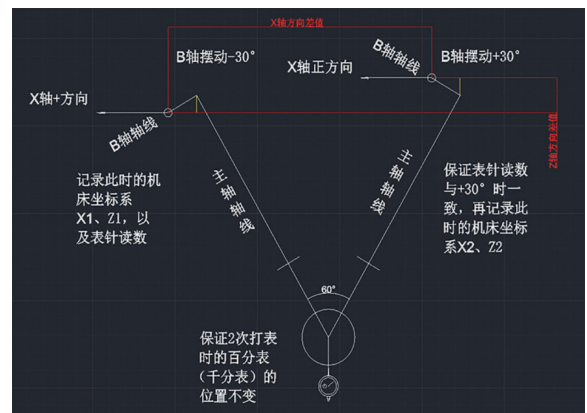


图8 B轴测试标定图

Fig.8 B axis test calibration diagram

(2) 摆动轴 B 轴单轴验证程序(保证 A、B 轴在 0 度), 与 A 轴单轴验证程序类似。

(3) 五轴联动验证程序(保证 A、B 轴在 0 度)。

%1234

G90G54

G43.4H1

G01A-30B-30 F200

G4X3

A0B0

G4X3

A30B30

G4X3

A0B0

G49

M30

3 结论

本文基于 HNC-8 型双摆头结构五轴机床中心点控制参数标定,根据实测结果显示,RTCP 参数测量精准,满足精准加工的控制要求。

(1) 选用易安装以及操作简单测量仪器——标准球和百分表进行 RTCP 参数测量,所设计的方法弱化两轴线严格正交条件,有良好的测量效果。

(2) 选用华中数控平台作为基础设计平台,为降低操作难度,设计了简洁的测量界面,只需在控制流程中输入测量参数后即可。

(3) 测量控制过程中,可自动计算第 1、2 旋转轴轴空间方向和偏移量,弥补手动测量缺陷。

本文实现了双摆头结构五轴机床参数标定以及给出了参数验证程序,在 HNC-8 型数控平台上对工件进行加工,加工过程中精确控制刀具切削点位置,加工运行平稳,实现了对某航空标准工件的高精度加工。

参考文献

[1] 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): 2315-2518.

SUN Weitang, LIU Weijun, YU Dong, et al. Research and implementation of RTCP technology for five-axis linkage CNC system[J]. Minicomputer System, 2011, 32(12): 2315-2518.

[2] 邓梦. 基于 RTCP 的五轴联动数控机床动态误差溯源方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.

DENG Meng. Research on traceability method of dynamic error of five-axis CNC machine tool based on RTCP[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2014.

[3] 林胜. 五轴数控机床发展及应用[J]. 航空精密制造技术,

2005, 41(4): 1-6.

LIN Sheng. Development and application of five-axis CNC machine tools[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2005, 41(4): 1-6.

[4] SUN D M. The direct programme technology for NC milling[M]. Beijing: The Publishing Company of Machinery Industry, 2004.

[5] UTSUMI K, KOSUGI T, SAITO A, et al. Measurement method of geometric accuracy of five-axis controlled machining centers[J]. Japan Society of Mechanical Engineering, 2006, 73: 2293-2298.

[6] UDDIN S M, IBARAKI S, MATSUBARA A, et al. Prediction and compensation of machining geometric errors of five-axis machining centers with kinematic errors[J]. Precision Engineering, 2009, 33(4): 194-201.

[7] TSUTSUMI M, SAITO A. Identification of angular and positional deviations inherent to 5-axis machining centers with a tilting-rotary table by simultaneous four-axis control movements[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(12): 1333-1342.

[8] DASSANAYAKE K M M, TSUTSUMI M, SATO R, et al. Motion characteristics of high performance rotary tables for CNC machines[C]//ASME 2008 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2008.

[9] 冷洪滨. 高性能数控系统若干关键技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

LENG Hongbin. Research on key technologies of high performance CNC system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

[10] 潘芳煜. 五轴机床几何误差补偿与验证关键技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2014.

PAN Fangyu. Key technologies for geometric error compensation and verification of five-axis machine tools[D]. Shanghai: Shanghai University, 2014.

[11] 黄干斌. 数控铣加工复杂曲面零件后置处理的研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2015.

HUANG Ganbin. Research on post-processing of NC milling complex surface parts[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2015.

[12] 龙令. 五轴短电弧加工专用数控系统开发[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.

LONG ling. Development of special numerical control system for five-axis short arc machining[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.

通讯作者: 赵茜, 硕士, 助理工程师, 研究方向为智能制造技术, E-mail: 157451123@qq.com.

(责编 阳光)