

# 基于球杆仪的五轴机床 RTCP 误差检测及补偿

虞敏,赵建华

(沈机(上海)智能系统研发设计有限公司,上海 200433)

**摘要:**针对五轴机床 RTCP 误差检测存在检测时间长、测量精度低的情况,提出用球杆仪检测 RTCP 误差的方法,分析可知 AC 双转台 RTCP 误差不仅有 4 项位置误差,而且存在 4 项角度误差和初始安装误差。根据机床运动链建立 AC 双转台 RTCP 误差模型,采用基于球杆仪的检测方法,并推导 RTCP 误差元素求解方法。通过误差补偿试验验证了误差模型和误差求解方法的准确性和有效性。

**关键词:**数控机床;AC 双转台;球杆仪;RTCP 误差模型;RTCP 误差补偿

**中图分类号:**TH161 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)04-0016-04

## Five-axis Machine Tool RTCP Error Measurement and Compensation by Ball Bar Tests

YU Min, ZHAO Jianhua

(Shenyang(Shanghai) Intelligent System R&D Design Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

**Abstract:** Long detection time and low measurement accuracy exist in RTCP error measuring, so this paper proposes to use ball bar test to measure the RTCP Error, and analyzes the RTCP errors of five-axis control machine tool with AC tilting rotary table, including not only four linear errors, but also four angle errors and install errors. On this basis, according to the machine tool motion chain, the RTCP error model is established. Then the solution of the RTCP errors is deduced based on ball bar measurement. Through the RTCP error measurement and compensation on VMC0656e, the accuracy and effectiveness of the error model and error deduction method are validated.

**Keywords:** CNC machine tool; AC tilting rotary table; ball bar test; RTCP error model; RTCP error compensation

## 0 引言

RTCP(rotational tool center point)功能是五轴机床的一个重要功能,字面意思是“旋转刀具中心”,业内往往会稍加转义为“围绕刀具中心转”,也有一些人直译为“旋转刀具中心编程”。其实质为保持刀具中心点不变实现刀具的转动。RTCP 功能的加入有效地提高了数控机床的加工效率,因此,RTCP 精度是五轴联动数控机床的重要精度指标。

目前 RTCP 误差检测大多采用标准棒(球头检棒或直棒等)配合千分表(百分表等)的方式测量<sup>[1-2]</sup>。这种方法会引入标准棒的轮廓误差以及千分表的读数偏差,降低 RTCP 误差补偿效果,并且需要人工读取千分表读数,通常需要半天时间,其过程耗时耗力;而且由于检测方法的局限性,只能补偿 4 项线性误差。雷尼绍公司提出了 XR20-W 无线型回转轴校准装置和 Axiset Check-Up 回转轴心线检查工具,虽然这些设备检测精度高,但价格昂贵,并且 Axiset Check-Up 的使用必须配合宏程序才能运行,受到数控系统类型的限制,目前只支持 Siemens、Fanuc 等高档数控系统。

利用球杆仪检测五轴机床旋转轴误差是一种廉价、高效的误差检测方法<sup>[3-5]</sup>。本文采用球杆仪作为 RTCP 误

差检测的工具。只需让球杆仪分别在  $xy$  平面运行  $360^\circ$ ,  $yz$  平面运行  $180^\circ$ ,即可快速得到 RTCP 的 4 项线性误差和 4 项角度误差,整个检测及补偿过程不超过半小时,并且在 RTCP 误差模型中考虑了球杆仪的安装误差,降低对球杆仪的安装要求,提高了 RTCP 误差补偿的精度。

## 1 基于球杆仪检测的 RTCP 误差模型

### 1.1 AC 双转台 RTCP 误差

理论上来说,回转轴的轴线应该与其对应的直线轴平行,同时两个回转轴的轴线应该正交于一点,但是实际上双转台在安装过程中不可避免地会产生偏差。AC 双转台的结构如图 1 所示。RTCP 误差共包含 4 个线性误差和 4 个角度误差(图 2),分别为 A 轴旋转中心  $O_A$  相对机械坐标原点  $O_M$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的位置误差  $\delta_{xA}$ 、 $\delta_{yA}$ 、 $\delta_{zA}$  以及 A 轴旋转时的 3 项角度误差  $\alpha_A$ 、 $\beta_A$ 、 $\gamma_A$ 。除此之外,C 轴旋转中心应该与 A 轴旋转中心在  $y$  向交于一点,并且旋转中心线与  $z$  轴重合,但实际在安装时不能保证,这样就产生 C 轴相对 A 轴在  $y$  向的位置误差  $\delta_{yCA}$  和绕  $z$  轴方向的角度误差  $\beta_{AC}$ 。

**基金项目:**上海市科委项目(17511107600);政府间国际科技创新合作重点专项(2017YFE0101400)

**第一作者简介:**虞敏(1981—),女,江苏常州人,博士,研究方向为机床精度检测及机床误差补偿。

此外,如图 3 所示,在安装球杆仪时,由于主轴中心线与 C 轴旋转中心线不重合,刀柄的中心线与主轴中心线也不重合,两者共同造成安装在主轴端的小球相对于 C 轴旋转中心在  $x$  和  $y$  向存在初始安装误差  $e_{cx}$ 、 $e_{cy}$ 。

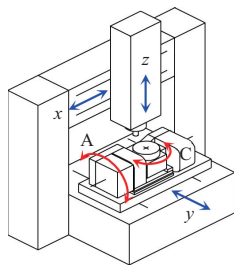


图 1 AC 双转台机床结构

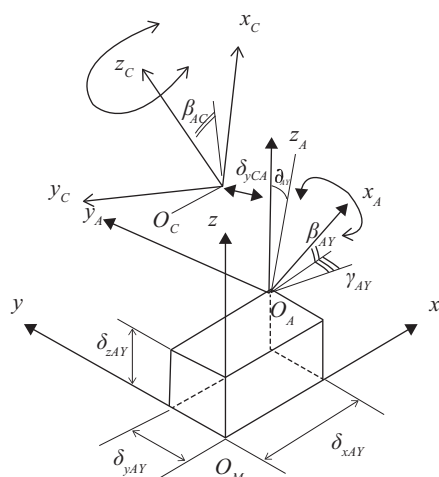
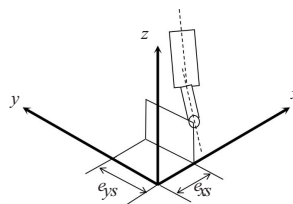
图2 AC 双转台 RTCP 误差<sup>[6]</sup>

图3 球杆仪初始安装误差

## 1.2 AC 双转台 RTCP 误差模型

球杆仪检测 RTCP 误差的原理是由于五轴机床旋转轴轴心线的位置偏差,造成球杆仪杆长的变化。从 RTCP 功能来看,RTCP 误差补偿实际上补的也是旋转轴运动时产生的误差,区别在于:

1) RTCP 误差是常数,补偿的是旋转中心相对于机床坐标系在  $x, y$  方向的偏差,不随旋转轴旋转而变化,而旋转轴误差在每个旋转角度位置处对应一误差:

2) 对于双转台五轴机床来说,球杆仪检测 RTCP 误差时,杆长变化值是由主轴端小球的误差引起的,而用球杆仪检测旋转轴误差,杆长变化值是由主轴端和工作台端小球中心点的偏移共同引起的。因此,球杆仪检测 RTCP 误差只需针对主轴端小球中线点轨迹进行分析。

主轴端小球轨迹中心点偏移是由 RTCP 误差和球杆仪安装误差共同引起的。对于双转台五轴机床来说, RTCP 参数包含 4 个,  $R_i$ 、 $R_j$ 、 $R_k$  分别表示 C 轴旋转中心相对机床坐标原点在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的偏移;  $J_j$  表示 A 轴旋转中心相对 C 轴旋转中心在  $y$  向的偏移。

理想情况下,在进行 RTCP 计算时,需要把 1.1 节提到的 8 项 RTCP 误差代入到模型中,并且包含球杆仪安装误差,根据 AC 双转台机床运动链,主轴端小球的运动轨迹为:

$$T_{si} = \begin{bmatrix} x_{si} \\ y_{si} \\ z_{si} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & R_i \\ 0 & 1 & 0 & R_j \\ 0 & 0 & 1 & R_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_{AY} & \beta_{AY} & \delta_{xAY} \\ \gamma_{AY} & 1 & -\alpha_{AY} & \delta_{xAY} \\ -\beta_{AY} & \alpha_{AY} & 1 & \delta_{xAY} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(A) & \sin(A) & 0 \\ 0 & -\sin(A) & \cos(A) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & J_j \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

其中:  $x_i$ 、 $y_i$  和  $z_i$  是小球中心相对于 C 轴旋转中心的坐标位置。

实际情况下代入 RTCP 算法计算不包含在运动过程

$$\mathbf{T}_{se} = \begin{bmatrix} x_{se} \\ y_{se} \\ z_{se} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & R_i \\ 0 & 1 & 0 & R_j \\ 0 & 0 & 1 & R_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(A) & \sin(A) & 0 \\ 0 & -\sin(A) & \cos(A) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & J_i \\ 0 & 1 & 0 & J_j \\ 0 & 0 & 1 & J_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(C) & \sin(C) & 0 & 0 \\ -\sin(C) & \cos(C) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中  $x_e$ 、 $y_e$  和  $z_e$  是实际情况下代入 RTCP 算法的编程坐标,即小球中心相对于 C 轴旋转中心的坐标位置。主轴端小球的误差为

$$E = T_{se} - T_{si} \quad (1)$$

中的 RTCP 8 项误差,代入 RTCP 运算的初始位置坐标值也不包括球杆仪安装误差,因此主轴端小球的轨迹为:

式(1)即为 RTCP 误差模型。

为了求解  $x_i$  和  $x_e$ 、 $y_i$  和  $y_e$ 、 $z_i$  和  $z_e$ , 设在不运动的情况下, 且在  $A=0, C=0$  处, 理想情况下, 在机床坐标系下小球中心点坐标为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & R_i \\ 0 & 1 & 0 & R_j \\ 0 & 0 & 1 & R_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_{AY} & \beta_{AY} & \delta_{xAY} \\ \gamma_{AY} & 1 & -\alpha_{AY} & \delta_{yAY} \\ -\beta_{AY} & \alpha_{AY} & 1 & \delta_{zAY} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & J_i \\ 0 & 1 & 0 & J_j \\ 0 & 0 & 1 & J_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \beta_{AC} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \delta_{yCA} \\ -\beta_{AC} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{xs} \\ e_{ys} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

实际情况下,小球初始安装位置在机床坐标系下中心点坐标为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & R_i \\ 0 & 1 & 0 & R_j \\ 0 & 0 & 1 & R_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & J_i \\ 0 & 1 & 0 & J_j \\ 0 & 0 & 1 & J_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

在不运动情况下,  $E=0$ , 则实际坐标和理想坐标之间的关系为:

$$\begin{aligned} x_i &= x_e - \delta_{yAC} + (\gamma_e + J_j + e_{ys}) \gamma_{AY} - (\beta_{AY} + \beta_{AC}) z_e + e_{xs} \\ y_i &= -\delta_{xAY} - \delta_{yAC} + \gamma_e + e_{ys} + z_e \alpha_{AY} - (x_e + e_{xs}) \gamma_{AY} \\ z_i &= z_e - \delta_{zAY} + (\beta_{AC} + \beta_{AY}) (x_e + e_{xs}) - \alpha_{AY} (\gamma_e + e_{ys} + J_j) \end{aligned} \quad (4)$$

当 A 轴旋转时, RTCP 误差模型中的  $C=0$ , 根据式(1)和式(4)得到小球中心点在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  向的位置偏差为:

$$\begin{aligned} \Delta x &= [z_e - \cos A z_e + \sin A (e_{ys} + \gamma_e + J_j)] \beta_{AY} + \\ &[\cos A (e_{ys} + \gamma_e + J_j) - e_{ys} - \gamma_e - J_j + \sin A z_e] \gamma_{AY} \\ \Delta y &= e_{ys} - \delta_{yAY} + \delta_{zAY} \sin A + \cos A (\delta_{xAY} - e_{ys}) - \\ &\beta_{AY} \sin A (e_{xs} + x_e) + [-e_{xs} - x_e + \cos A (e_{xs} + x_e)] \gamma_{AY} \\ \Delta z &= -\delta_{zAY} + \cos A \delta_{yk} - \sin A (\delta_{xAY} - e_{ys}) + \\ &\beta_{AY} [e_{xs} + x_e - \cos A (e_{xs} + x_e)] - \gamma_{AY} \sin A (e_{xs} + x_e) \end{aligned} \quad (5)$$

当 C 轴旋转时, RTCP 误差模型中的  $A=0$ , 根据式(1)和式(4)得到小球中心点在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  向的位置偏差为:

$$\begin{aligned} \Delta x &= -\delta_{xAY} + (\delta_{yAC} - e_{xs}) \cos C + e_{xs} + (\delta_{yAC} + \delta_{yAY} - e_{ys}) \sin C - \\ &z_e \alpha_{AY} \sin C + (-z_e + z_e \cos C) (\beta_{AY} + \beta_{AC}) + (J_j - J_j \cos C) \gamma_{AY} \\ \Delta y &= e_{ys} - \delta_{yAY} - \delta_{yAC} + \cos C (\delta_{yAC} + \delta_{xAY} - e_{ys}) + \sin C (e_{xs} - \delta_{xAY}) + \\ &(z_e - z_e \cos C) \alpha_{AY} - z_e \sin C (\beta_{AY} + \beta_{AC}) + J_j \sin C \gamma_{AY} \\ \Delta z &= \alpha_{AY} [e_{ys} + \gamma_e + \sin C (e_{xs} + x_e) - \cos C (e_{ys} + \gamma_e)] + \\ &(\beta_{AY} + \beta_{AC}) [-e_{xs} - x_e + \cos C (e_{xs} + x_e) + \sin C (e_{ys} + \gamma_e)] \end{aligned} \quad (6)$$

式(5)和式(6)即为基于球杆仪的 AC 双转台 RTCP 误差模型。

## 2 RTCP 误差元素求解

### 2.1 A 轴旋转

将球杆仪分别安装在轴向( $x$ 向)、径向( $y$ 向)和切向( $z$ 向)测得球杆仪的杆长变化记为:  $\Delta Axial$ ,  $\Delta Radial$ ,  $\Delta Tang$ , 则根据图 4、图 5 得出 A 轴旋转, 小球中心点在  $z$  轴、 $x$  轴和  $y$  轴向上的误差为:

$$\begin{aligned} \Delta y &= \Delta Radial \cos A + \Delta Tang \sin A \\ \Delta z &= \Delta Tang \cos A - \Delta Radial \sin A \\ \Delta x &= \Delta Axial \end{aligned}$$

A 轴旋转时, 分别将球杆仪在  $yz$  平面内轴向和径向运动代入到公式(2)中, 分别得到  $A=0^\circ$ 、 $A=90^\circ$ 、 $A=180^\circ$ 、 $A=-90^\circ$  时的小球中心点偏移量。

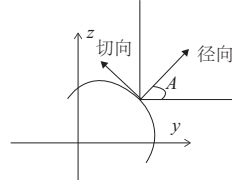


图 4 A 轴旋转球杆仪杆长坐标转换

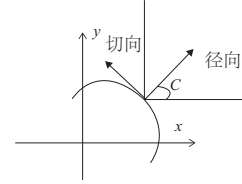


图 5 球杆仪杆长坐标转换

1)  $A=0^\circ$

$$Axis_0 = 0$$

$$Radial_0 = 0$$

2)  $A=180^\circ$

$$Axis_{180} = 2z_e \beta_{AY} - 2(e_{ys} + \gamma_e + J_j) \gamma_{AY}$$

$$Radial_{180} = 2\delta_{zAY} - 2\beta_{AY} (e_{xs} + x_e)$$

3)  $A=90^\circ$

$$Axis_{90} = (z_e + e_{ys} + \gamma_e + J_j) \beta_{AY} - (e_{ys} + \gamma_e + J_j - z_e) \gamma_{AY}$$

$$Radial_{90} = e_{ys} - \delta_{xAY} + \delta_{zAY} - (\beta_{AY} + \gamma_{AY}) (e_{xs} + x_e)$$

4)  $A=-90^\circ$

$$Axis_{-90} = [z_e - (e_{ys} + \gamma_e + J_j)] \beta_{AY} - (e_{ys} + \gamma_e + J_j + z_e) \gamma_{AY}$$

$$Radial_{-90} = -e_{ys} + \delta_{yAY} + \delta_{zAY} + (e_{xs} + x_e) (\gamma_{AY} - \beta_{AY})$$

由上面可以得到 A 轴旋转时, 在  $yz$  平面内小球中心点圆轨迹在  $y$  和  $z$  向的偏心量, 该值可以在球杆仪分析软件中直接获得。

$$\Delta y = (Radial_{90} - Radial_{-90}) / 2 = -\delta_{xAY} - \gamma_{AY} (x_e + e_{xs}) + e_{ys}$$

$$\Delta z = (Radial_0 - Radial_{180}) / 2 = -\delta_{zAY} + \beta_{AY} (e_{xs} + x_e)$$

由于  $x_e \gg e_{xs}$ ,  $\gamma_{AY}$ ,  $\beta_{AY}$  也是微小量, 因此球杆仪径向放置时, 误差公式可以简化为:

$$\Delta y = (Radial_{90} - Radial_{-90}) / 2 = -\delta_{xAY} - \gamma_{AY} x_e + e_{ys}$$

$$\Delta z = (Radial_0 - Radial_{180}) / 2 = -\delta_{zAY} + \beta_{AY} x_e$$

球杆仪轴向放置时, 误差公式可以简化为:

$$\Delta y = (Axis_{90} - Axis_{-90}) / 2 = \beta_{AY} (e_{ys} + J_j) + \gamma_{AY} z_e$$

$$\Delta z = (Axis_0 - Axis_{180}) / 2 = -\beta_{AY} z_e + \gamma_{AY} (J_j + \gamma_e + e_{ys})$$

设  $\gamma_e = 0$ , 上式可简化为:

$$\Delta y = (Axis_{90} - Axis_{-90}) / 2 = \gamma_{AY} z_e$$

$$\Delta z = (Axis_0 - Axis_{180}) / 2 = -\beta_{AY} z_e$$

通过求解以上 4 个公式, 可得到如下 4 项误差:

$$\begin{aligned} \gamma_{AY} &= \frac{\Delta y}{z} \\ \beta_{AY} &= -\frac{\Delta z}{z} \\ \delta_{yAY} &= -\Delta y - \gamma_{AY} x_e + e_{ys} \\ \delta_{yCA} &= -\Delta z + \beta_{AY} x \end{aligned} \quad (7)$$

### 2.2 C 轴旋转

将球杆仪分别安装在轴向( $z$ 向)、径向( $x$ 向)和切向( $y$ 向)测得球杆仪的杆长变化记为:  $\Delta Axial$ ,  $\Delta Radial$ ,  $\Delta Tang$ , 则根据图 3 得出 C 轴旋转, 小球中心点在  $z$  轴、 $x$  轴和  $y$  轴向上的误差为:

$$\Delta x = \Delta \text{Radial} \cos C + \Delta \text{Tang} \sin C$$

$$\Delta y = \Delta \text{Tang} \cos C - \Delta \text{Radial} \sin C$$

$$\Delta z = \Delta \text{Axial}$$

同 A 轴旋转, C 轴旋转时, 分别将球杆仪在  $xy$  平面内轴向和径向运动, 根据式(3) 分别得到  $C=0^\circ$ 、 $C=90^\circ$ 、 $C=180^\circ$ 、 $C=270^\circ$  时的小球中心点偏移量。

$$1) C=0^\circ$$

$$\text{Radial}_0 = 0$$

$$\text{Axis}_0 = 0$$

$$2) C=180^\circ$$

$$\text{Radial}_{180} = 2\delta_{xAY} - 2e_{xs} + 2z_e(\beta_{AY} + \beta_{AC}) - 2J_{yAC}\gamma_{AY}$$

$$\text{Axis}_{180} = 2\alpha_{AY}(e_{ys} + y_e) - 2(\beta_{AY} + \beta_{AC})(e_{xs} + x_e)$$

$$\text{Tang}_{270} = \delta_{xAY} - e_{xs} + \delta_{yAC} + \delta_{yAY} - e_{ys} - z_e\alpha_{AY} + z_e(\beta_{AY} + \beta_{AC}) - J_{yAY}$$

$$3) C=90^\circ$$

$$\text{Tang}_{90} = -\delta_{xAY} + e_{xs} + (\delta_{yAY} + \delta_{xAY} - e_{ys}) - z_e\alpha_{AY} - z_e(\beta_{AY} + \beta_{AC}) + J_{yAY}$$

$$\text{Axis}_{90} = \alpha_{AY}(e_{ys} + y_e + e_{xs} + x_e) + (\beta_{AY} + \beta_{AC})(-e_{xs} - x_e + e_{ys} + y_e)$$

$$4) C=270^\circ$$

$$\text{Axis}_{270} = \alpha_{AY}(e_{ys} + y_e - e_{xs} - x_e) - (\beta_{AC} + \beta_{AY})(e_{xs} + x_e + e_{ys} + y_e)$$

得到 C 轴径向和轴向放置时, 在  $x$  和  $y$  向的偏心量:

$$\Delta x = (\text{Radial}_0 - \text{Radial}_{180})/2 = e_{xs} - \delta_{xAY} - z_e(\beta_{AC} + \beta_{AY}) +$$

$$J_{yAY}$$

$$\Delta y = (\text{Radial}_{270} - \text{Radial}_{90})/2 = -\delta_{yAY} - \delta_{yAC} + z_e\alpha_{AY} + e_{ys}$$

$$\Delta x = (\text{Axis}_0 - \text{Axis}_{180})/2 = (\beta_{AC} + \beta_{AY})(x_e + e_{xs}) -$$

$$\alpha_{AY}(e_{ys} + y_e)$$

$$\Delta y = (\text{Axis}_{270} - \text{Axis}_{90})/2 = -\alpha_{AY}(x_e + e_{xs}) - (\beta_{AY} + \beta_{AC})(y_e + e_{ys})$$

上式可简化为:

$$\Delta x = (\text{Axis}_0 - \text{Axis}_{180})/2 = (\beta_{AC} + \beta_{AY})x_e$$

$$\Delta y = (\text{Axis}_{270} - \text{Axis}_{90})/2 = -\alpha_{AY}x_e$$

进而可求出可得到如下 4 项误差:

$$\begin{aligned} \alpha_{AY} &= -\frac{\Delta y}{x} \\ \beta_{AY} &= \frac{\Delta x}{x} - \beta_r \\ \delta_{xAY} &= \Delta x + e_{xs} - z_e(\beta_{AC} + \beta_{AY}) \\ \delta_{yAC} &= -\Delta y - \delta_{yAY} + z_e\alpha_{AY} + e_{ys} \end{aligned} \quad (8)$$

### 3 实验验证

为了验证本文提出的误差模型及相关算法的正确性, 对某机床厂 VMC0656e 五轴机床做了 RTCP 误差补偿实验。

首先安装球杆仪, 根据 RTCP 参数, 设置当前坐标系(如 G58)的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  值为 C 轴回转中心在机床坐标下的值。然后在当前坐标系下, 移动  $x$  轴到  $L$  的位置, 调整磁力球座的位置, 保证磁力球座球头坐标在当前坐标系下的  $x$  坐标为  $L$ , 即式(7)中的  $x=L$ 。式(8)中的  $z$  值可直接在 WMS 坐标系下读出, 用于误差量的计算。将 A、C 轴运动到 0 的位置, 分别记录  $SP=0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $270^\circ$  时, 球杆仪的杆长值, 求出安装误差  $e_{xs}$  和  $e_{ys}$ , 最后让球杆仪分别在  $xy$  平面和  $yz$  平面轴向和径向放置, 运行球杆仪检测程序, 根据球杆仪分析软件得出的偏心量以及上文推导的误差公

式, 计算 8 个误差量。

补偿方法分为两种: 一种是只补偿 4 项线性误差, 另外一种补偿线性和角度误差。补偿前和补偿后的偏心量见表 1。从表中可以看出, 如果只补偿 RTCP 4 项线性误差, 球杆仪在  $xy$  平面和  $yz$  平面径向运动时的精度提高了, 但是球杆仪轴向放置时, 偏心量变化很小。通过角度误差补偿之后, 该轴向放置时的偏心量明显减小, 旋转中心偏移量基本在  $3 \mu\text{m}$  左右。

表 1 RTCP 误差补偿前后比较 单位:  $\mu\text{m}$

| 检测项目       | xy 面    |      |         |      | yz 面    |       |         |      |
|------------|---------|------|---------|------|---------|-------|---------|------|
|            | C 轴径向旋转 |      | C 轴轴向旋转 |      | A 轴径向旋转 |       | A 轴轴向旋转 |      |
|            | $x$     | $y$  | $x$     | $y$  | $y$     | $z$   | $y$     | $z$  |
| 补偿前        | 6.7     | 16.4 | -2      | 2.6  | 9.9     | -69.1 | 4.5     | 14   |
| 补偿线性误差后    | 0.4     | 4.2  | -1.9    | 2.5  | -0.5    | -3.3  | 4.4     | 13.5 |
| 补偿角度和线性误差后 | 0.4     | 3.8  | 0.4     | -0.3 | -0.6    | -2.8  | 0.1     | 1.1  |

### 4 结语

分析了 AC 双转台机床结构, 指出 RTCP 误差包含 4 项线性误差、4 项角度误差和初始安装误差。在此基础上根据 AC 双转台运动链, 建立包含安装误差在内的 RTCP 误差模型, 并根据球杆仪检测原理, 分离出 8 项误差。最后通过对 VMC0656e 五轴机床的误差补偿, 验证了相关模型和算法的正确性及有效性。该方法可应用于其他类型的五轴机床 RTCP 误差检测和补偿。

#### 参考文献:

- [1] 林超青. 五坐标加工中心 RTCP 精度检测与校正方法[J]. 设备管理与维修, 2019(4): 46-47.
- [2] 刘新山, 周宝庆. 一种双摆工作台式五轴联动机床动态精度的标定方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013, 5(5): 1-4.
- [3] TIAN Wenjie, YANG Guang, WANG Lina. The application of a regularization method to the estimation of geometric errors of a three-axis machine tool using a double ball bar[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018(10): 4871-4881.
- [4] XIANG Sitong, LI Huimin. Geometric error identification and compensation for non-orthogonal five-axis machine tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018(6): 2915-2929.
- [5] 郭世杰, 姜歌东, 梅雪松. 摆头转台型五轴机床旋转轴运动误差测量与辨识[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 402-410, 426.
- [6] M. Tsutsumi, A. Saito. Identification and compensation of systematic deviations particular to 5-axis machining centers[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(8): 771-780.
- [7] MASAOMI Tsutsumi, AKINORI Saito. 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 & Manufacture, 2004, 44(4): 1333-1342.

收稿日期: 2019-05-08