

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904874

基于球杆仪的直线轴位置相关误差辨识研究*

徐凯¹, 李国龙¹, 何坤², 陶小会¹

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室 重庆 400044;

2. 重庆工商大学 制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室 重庆 400067)

摘要:针对多轴机床空间误差检测及辨识方法成本高、时间长等问题,提出一种新的基于球杆仪测试的直线轴位置相关几何误差辨识方法。分别建立各平面内轴运动误差模型,并采用多项式对误差元素预拟合,以常规的三平面圆弧轨迹测量获取误差数据,并基于最小二乘法求解拟合系数,替代直接对误差元素具体数值求解的传统方法,实现对各直线轴位置相关误差元素的辨识。通过实验验证了辨识结果的正确性和有效性,该方法对机床直线轴误差辨识、补偿具有参考价值。

关键词: 误差辨识;球杆仪;位置相关几何误差;预拟合

中图分类号: TH161 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

Research on position dependent error identification of linear axes based on double ball-bar

Xu Kai¹, Li Guolong¹, He Kun², Tao Xiaohui¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: Aiming at the problems of high cost and time-consuming in volumetric error detection and identification of multi-axis machine tools, a novel identification method for linear axis position-dependent geometric error based on double ball-bar test is proposed. Firstly, the error models of the axis motion in various planes are established, respectively; and the error element of each axis is pre-fitted with respect to its position using polynomial. Then, the comprehensive error in each plane is obtained with conventional three-plane circular arc trajectory measurement. Finally, the fitting coefficients are solved based on the least square method, which replaces the traditional method that directly solves the specific value of error element; and the position-dependent geometric error element identification of linear axes is realized. The experiment results verify the correctness and efficiency of the proposed method. The method has reference significance for the linear axis error identification and compensation of CNC machine tools.

Keywords: error identification; double ball-bar; position dependent geometric error; pre-fitting

0 引言

精度是评价数控机床性能的重要指标,最终反映为工件的加工质量。钻攻中心、铣削中心等机床加工过程往往需要多轴协同,单个轴的误差测量难以反映机床整体误差,对此,国内外学者提出面向整体综合误差评价的

空间误差测量^[1]。目前,空间误差的测量主要采用激光干涉仪,该方法检测精度高,测量范围大,但是操作复杂,对操作人员专业技能要求较高,机床厂家的测量一般局限于线性测量,针对综合误差的测量需要基于综合误差辨识模型进行直线度、角度等误差测量,测量时间较长,设备、人力成本也较高。球杆仪是一种用于检测机床综合误差的精密仪器^[2],也常被用于旋转轴的误差辨识^[3]。

Hong 等^[4]基于球杆仪对旋转轴的位置相关误差进行测量,通过实验分析了各项误差对工件误差的敏感性。林述温等^[5]和 Chen 等^[6]通过球杆仪在旋转轴的 3 种安装模式,对旋转轴 6 项几何误差进行辨识。Tsutsumi 等^[7-8]通过三轴联动规划了球杆仪测试的运动轨迹,确定了旋转轴的位置无关几何误差。Xiang 等^[9]和 Fu 等^[10]设计了多种测量模式,基于球杆仪对五轴机床的两旋转轴位置相关误差进行了测量及辨识。Zargarbashi 等^[11]提出了一种通过 5 次球杆仪测试来识别和评估机床几何误差的方法,所有测试只需进行一次安装,简化了测试,降低了安装误差。相比球杆仪在旋转轴误差辨识的应用,基于球杆仪的直线轴误差辨识研究相对较少。Zhong 等^[12]基于球杆仪测试提出一种球面偏差测量方法用于评估五轴机床直线轴和旋转轴运动的综合误差,但没有对误差元素进行辨识。Florussen 等^[13]通过 19 次改变球杆中心座安装位置,对直线轴的 21 项几何误差元素测量及辨识。张虎等^[14]利用球杆仪在 3 个垂直平面进行圆弧测量,结合建立的综合误差模型及对误差元素构建的多项式模型,对直线轴的各项误差进行了辨识,该方法角度误差的多项式模型的构建依托于与直线度误差的关联性。Ali 等^[15]对直线轴 18 项位置相关几何误差进行了敏感性分析与数值仿真,通过舍去敏感性较小的误差简化辨识过程。田文杰等^[16]通过相关性分析舍去部分多项式系数,并基于优化后的最小二乘法求解误差元素多项式系数。综合来看,目前对直线轴误差的测量方法还主要依赖于激光干涉仪,而球杆仪主要用于旋转轴的误差辨识,究其原因,一方面由于激光测量技术的成熟与普及,尤其是线性测量;另一方面,球杆仪对直线轴的测量无法满足机床轴的全行程要求。

针对以上问题,本文提出一种基于球杆仪三平面测量的误差辨识方法,通过直接在 XY 、 XZ 、 YZ 平面进行常规的圆弧测试,结合建立的综合误差辨识模型,分别对三轴机床的 18 项位置相关误差进行辨识,其方法可应用于短行程加工中心的位置相关几何误差辨识。

1 三轴立式加工中心综合误差建模

三轴立式加工中心组成包括 X 、 Y 、 Z 共 3 个直线轴和安装于 Z 轴上高速电主轴。受丝杠副、导轨等部件制造、安装、伺服系统控制等影响,各轴在进给过程中会存在运动误差,最终造成加工误差。直线轴的几何误差是机床综合误差的主要来源之一。在机床实际运行中,每个轴均可认为是空间的刚体运动,存在 3 个平移和 3 个转动自由度,并形成 6 个自由度方向上的误差;同时,考虑 X 、 Y 、 Z 轴安装时引起的 3 个垂直度误差,三轴加工中心中共存在 21 项几何误差,如表 1 所示。很多学者在研究三轴机床的综合误差模型中将 3 项垂直度误差作为冗

余误差项,建立包含 18 项误差元素的综合误差模型,亦可用于综合误差的补偿^[17]。本文辨识方法针对 18 项位置相关几何误差,对位置无关误差不予讨论。

表 1 三轴加工中心的 21 项几何误差

Table 1 21 geometric errors of 3-axis machining center

运动轴	位置相关几何误差						位置无关几何误差
	位置误差			转角误差			
X	δ_{xx}	δ_{yx}	δ_{zx}	ε_{xx}	ε_{yx}	ε_{zx}	
Y	δ_{xy}	δ_{yy}	δ_{zy}	ε_{xy}	ε_{yy}	ε_{zy}	φ_{xy}
Z	δ_{xz}	δ_{yz}	δ_{zz}	ε_{xz}	ε_{yz}	ε_{zz}	φ_{xz} φ_{yz}

球杆仪常规的圆弧测试通常在数控机床三正交平面进行,标准检测报告难以直观地反应上述 18 项位置相关几何误差的实际情况,需要对球杆仪的检测数据进行再处理。在球杆仪的检测中,固定在机床工作台一端的小球称为工件球,与机床主轴相连的一端的小球称为刀具球,如图 1(a)所示。球杆仪安装测量时工作球的坐标为原点 O ,刀具球初始位置为 P_0 。如果不考虑机床误差,当球杆仪旋转 θ_i 角度时,刀具球的理论位置为 P_i 。但由于机床误差的存在,球杆仪的实际旋转角度为 θ ,刀具球的实际位置为 P ,如图 1(b)所示。

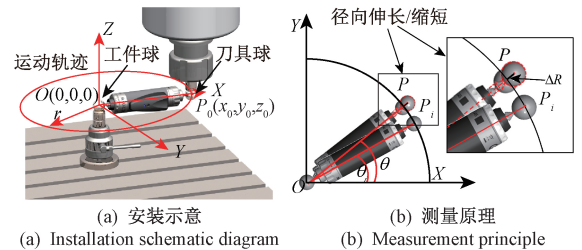


图 1 XY 平面的球杆仪测试

Fig.1 Test in XY plane with double ball bar

在 XY 平面进行圆测量时,通常对球杆仪进行图 1(a)所示水平安装,使 $y_0 = z_0 = 0$ 。球杆仪在误差存在下的实际长度可以表示为 $r_p = T \cdot r_{p_0}$, T 表示刀具球中心位置变换矩阵, r_{p_0} 、 r_p 分别表示刀具球中心的初始位置矢量和运动后的位置矢量,球杆仪杆长变化量 $\Delta r = r_p - r_{p_0}$ 。 X 、 Y 轴在 XY 平面联动走圆轨迹,刀具球中心点位置的综合误差 Δ_{XY} 可以表示为式(1),其中, T_x 、 T_y 、 T_{xi} 、 T_{yi} 分别表示 X 、 Y 轴实际运动变换矩阵和理论变化矩阵。

$$\Delta_{XY} = [\Delta x_{XY} \quad \Delta y_{XY} \quad \Delta z_{XY} \quad 1]^T = T_x T_y r_{p_0} - T_{xi} T_{yi} r_{p_0} \quad (1)$$

$$T_x = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zx} & \varepsilon_{yx} & x + \delta_{xx} \\ \varepsilon_{zx} & 1 & -\varepsilon_{xx} & \delta_{yx} \\ -\varepsilon_{yx} & \varepsilon_{xx} & 1 & \delta_{zx} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_{xi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_y = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zy} & \varepsilon_{yy} & \delta_{xy} \\ \varepsilon_{zy} & 1 & -\varepsilon_{xz} & y + \delta_{yy} \\ -\varepsilon_{yy} & \varepsilon_{xy} & 1 & \delta_{zy} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_{yi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Δx_{XY} 、 Δy_{XY} 、 Δz_{XY} 分别表示刀具球中心位置综合误差在 X 、 Y 、 Z 轴方向的误差分量。对 X 、 Y 轴误差分量忽略高阶小量,结果如式(2)所示。

$$\begin{cases} \Delta x_{XY} = \delta_{xx} + \delta_{xy} - y\varepsilon_{zx} \\ \Delta y_{XY} = \delta_{yx} + \delta_{yy} + r\varepsilon_{zx} + r\varepsilon_{zy} \end{cases} \quad (2)$$

同理,在 XZ 平面、 YZ 平面进行圆弧测试,安装位置分别为 $(r,0,0)$ 、 $(0,r,0)$,可分别求得各个误差分量,如式(3)、(4)所示。

$$\begin{cases} \Delta x_{XZ} = \delta_{xx} + \delta_{xz} + z\varepsilon_{yx} \\ \Delta z_{XZ} = \delta_{zx} + \delta_{zz} - r\varepsilon_{yx} - r\varepsilon_{zy} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta z_{YZ} = \delta_{zy} + \delta_{zz} + r\varepsilon_{xy} + r\varepsilon_{xz} \\ \Delta y_{YZ} = \delta_{yz} + \delta_{yy} - z\varepsilon_{xy} \end{cases} \quad (4)$$

2 模型简化与求解

2.1 杆长变化量的简化

在球杆仪图1(b)所示的 XY 平面圆弧测量中,得到的是其径向的杆长变化量 Δr , Δr 投影在 X 、 Y 轴上的分量,记为 Δr_x 、 Δr_y ,如式(5)所示。

$$\begin{cases} \Delta r_x = \Delta r \cdot \cos\theta \\ \Delta r_y = \Delta r \cdot \sin\theta \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ 为球杆仪运动过程中的实际转角; Δr_x 、 Δr_y 是 X 、 Y 轴理论运动量与误差量的综合结果。严格意义上 Δr_x 、 Δr_y 和球杆仪实际转角 θ 的确定需要结合第1节 X 、 Y 轴包含各项误差运动的实际位置变换矩阵 T_x 、 T_y ,这无疑是较为繁琐的。

实际上,由于球杆仪实际转过的角度 θ 与理论角度 θ_i 的差值很小,可认为重合。同时球杆仪杆长变化量在 X 、 Y 轴的投影在模型中可直接认为是刀具球中心位置综合误差在 X 、 Y 方向上的分量 Δx_{XY} 、 Δy_{XY} ,如图2所示。根据球杆仪测量结果,杆长变化量在 X 、 Y 轴上的分量 Δr_x 、 Δr_y 可以表示为式(6)。

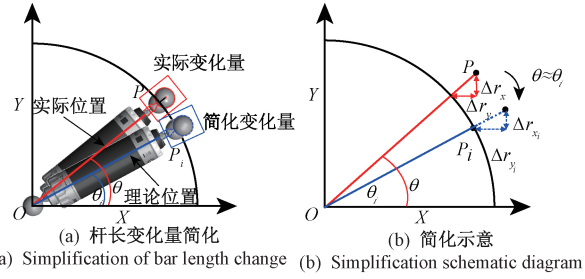


图2 杆长变化量在轴上分量简化
Fig.2 Simplification of the components of bar length change in the axes

$$\begin{cases} \Delta r_x = \Delta r_{xi} = \Delta r \cdot \cos\theta_i = \Delta x_{XY} \\ \Delta r_y = \Delta r_{yi} = \Delta r \cdot \sin\theta_i = \Delta y_{XY} \end{cases} \quad (6)$$

2.2 位置相关几何误差的预拟合

与位置相关的几何误差元素可以拟合为与位置有关的多项式函数^[1,18],如式(7)所示。

$$E(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n \quad (7)$$

式中: $E(x)$ 表示与机床运动轴位置 x 相关的误差元素值; $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ 为系数。

以 XY 平面测量为例,球杆仪初始位置作为零误差参考点,分别对 X 、 Y 轴的12项位置相关几何误差进行多项式预拟合,以 x 、 y 表示绝对位置与初始点的相对距离,如式(8)、(9)所示。

$$\begin{cases} \delta_{xx} = a_{x1}x + a_{x2}x^2 + a_{x3}x^3 \\ \delta_{yx} = b_{x1}x + b_{x2}x^2 + b_{x3}x^3 \\ \vdots \\ \varepsilon_{zx} = f_{x1}x + f_{x2}x^2 + f_{x3}x^3 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \delta_{xy} = a_{y1}y + a_{y2}y^2 + a_{y3}y^3 \\ \delta_{yy} = b_{y1}y + b_{y2}y^2 + b_{y3}y^3 \\ \vdots \\ \varepsilon_{zy} = f_{y1}y + f_{y2}y^2 + f_{y3}y^3 \end{cases} \quad (9)$$

在 XY 平面测量中,由式(2)可知综合误差在 X 、 Y 方向的误差分量 Δx_{XY} 、 Δy_{XY} 组成包含了 δ_{xx} 、 δ_{xy} 、 ε_{zx} 、 δ_{yx} 、 δ_{yy} 、 ε_{zy} 等6项误差元素。理论上,误差元素的多项式拟合模型的项数越多,对误差元素的拟合就越精确,但同时会增大计算量,在 XY 平面共需计算18项系数。而在球杆仪较短的测量行程内,可以以较低的多项式阶数对误差元素进行拟合,对误差元素的多项式拟合模型进行如下简化,定位误差一般随位置呈线性变化,直线度、转角误差较定位误差变化稍复杂,在定位误差多项式拟合基础上加一阶多项式;同时考虑球杆仪的越程运动导致的测量起始点误差非0,误差元素中需包含一定的常数项,将常数项分别加进 X 、 Y 轴的定位误差的拟合多项式中,对待求误差元素多项式拟合模型进行简化,如式(10)、

(11) 所示。

$$\begin{cases} \delta_{xx} = a_{x0} + a_{x1}x \\ \delta_{yx} = b_{x1}x + b_{x2}x^2 \\ \varepsilon_{zx} = f_{x1}x + f_{x2}x^2 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \delta_{xy} = a_{y1}y + a_{y2}y^2 \\ \delta_{yy} = b_{y0} + b_{y1}y \\ \varepsilon_{zy} = f_{y1}y + f_{y2}y^2 \end{cases} \quad (11)$$

2.3 位置相关几何误差辨识

将简化后的误差元素代入式(2),得到 X 、 Y 轴的误差分量 Δx_{XY} 、 Δy_{XY} 与运动量 x 、 y 的关系如式(12)所示。

$$\begin{cases} \Delta x_{XY} = a_{x0} + a_{x1}x + a_{y1}y + a_{y2}y^2 - f_{x1}xy - f_{x2}x^2y \\ \Delta y_{XY} = b_{x1}x + b_{x2}x^2 + b_{y0} + b_{y1}y + rf_{x1}x + rf_{x2}x^2 + rf_{y1}y + rf_{y2}y^2 \end{cases} \quad (12)$$

观察 Δx_{XY} 与 Δy_{XY} 组成, Δx_{XY} 中存在 3 次项组成部分 $f_{x2}x^2y$, 求解过程应尽量避免出现高阶项, 先对 Δy_{XY} 进行求解。将式(12)中 Δy_{XY} 转换成矩阵形式, 如式(13)所示。

$$\Delta y_{XY} = \mathbf{X}_y \mathbf{B} = [1 \quad y \quad x \quad x^2 \quad rx \quad rx^2 \quad ry \quad ry^2] \cdot [b_{y0} \quad b_{y1} \quad b_{x1} \quad b_{x2} \quad f_{x1} \quad f_{x2} \quad f_{y1} \quad f_{y2}]^T \quad (13)$$

由式(13)可以发现, 矩阵 \mathbf{X}_y 中存在线性相关项, 造成展开后的矩阵非满秩, 采用初等变换将 \mathbf{X}_y 化成最简形式即 Hermite 标准形, 进行满秩分解, $\mathbf{X}_y = \mathbf{M} \cdot \mathbf{N}$, 其中各矩阵的秩相等, 即 $R(\mathbf{X}_y) = R(\mathbf{M}) = R(\mathbf{N})$ 。则 \mathbf{X}_y 的伪逆矩阵, 即 Moore-Penrose 逆矩阵可以表示如式(14)所示。

$$\mathbf{X}_y^+ = \mathbf{N}_R^{-1} \cdot \mathbf{M}_L^{-1} = \mathbf{N}^T (\mathbf{N}\mathbf{N}^T)^{-1} \cdot (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M} \quad (14)$$

根据球杆仪测量数据及理论运动值, 可求得式(13)的最小范数最小二乘解, 如式(15)所示。

$$\mathbf{B} = \mathbf{X}_y^+ \cdot \Delta y_{XY} = \mathbf{N}^T (\mathbf{N}\mathbf{N}^T)^{-1} \cdot (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M} \cdot \Delta y_{XY} \quad (15)$$

获得各项系数后, 再对 Δx_{XY} 组成误差元素的多项式系数进行求解。将所有系数代入式(10)、(11), 即可得到 XY 平面中 δ_{xx} 、 δ_{yx} 、 ε_{zx} 、 δ_{yy} 、 δ_{xy} 、 ε_{zy} 等 6 项误差元素。同理, 在 XZ 平面进行测量并求解, 分别得到 δ_{xx} 、 δ_{zx} 、 ε_{yx} 、 δ_{zz} 、 δ_{xz} 、 ε_{yz} ; 在 YZ 平面进行测量并求解, 分别得到 δ_{yy} 、 δ_{zy} 、 ε_{xy} 、 δ_{zz} 、 δ_{yz} 、 ε_{xz} 。

在每个平面中分别可以得到 6 项误差元素, 但其中存在重复项 δ_{xx} 、 δ_{yy} 、 δ_{zz} , 计算时可以通过代入已求解误差元素减少计算量。综合 3 次测量与计算, 共得到 15 项误差元素, 还剩下 ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{zz} 3 项转角误差待求。

球杆仪在 XY 平面测量时, 初始安装位置水平, Z 轴不参与运动, Z 轴误差分量方向垂直于理论杆长变化方向, 对 X 、 Y 轴的线性运动不敏感, 认为在 XY 平面运动时 X 、 Y 轴的 Z 向直线度误差 δ_{zx} 、 δ_{zy} 不参与 Z 轴误差分量构

成; 同时, Z 轴的误差分量相对于 X 、 Y 轴误差分量可近似为 0, 即 $\Delta z_{XY} = 0$ 。 XZ 、 YZ 平面测量同理。根据球杆仪运动的坐标变换分别在在 XY 平面可得 Z 轴方向的误差分量, 在 XZ 平面得到 Y 轴方向的误差分量, 在 YZ 平面得到 X 轴方向的误差分量, 如式(16)所示, 联立可得 ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{zz} 3 项转角误差。

$$\begin{cases} \Delta z_{XY} = -r\varepsilon_{yx} - r\varepsilon_{yy} + y\varepsilon_{xx} \\ \Delta y_{XZ} = r\varepsilon_{zx} + r\varepsilon_{zz} - z\varepsilon_{xx} \\ \Delta x_{YZ} = -r\varepsilon_{zy} - r\varepsilon_{zz} + z\varepsilon_{yy} \end{cases} \quad (16)$$

XY 、 XZ 、 YZ 三个平面测量及辨识误差对应关系如图 3 所示。首先进行 XY 平面误差辨识, 获得 6 项误差元素, 同理并结合式(3)、(4), 在 XZ 、 YZ 平面进行误差辨识, 三平面共解得 15 项误差元素; 最后综合三平面的误差辨识结果, 解得剩余的 3 项转角误差。

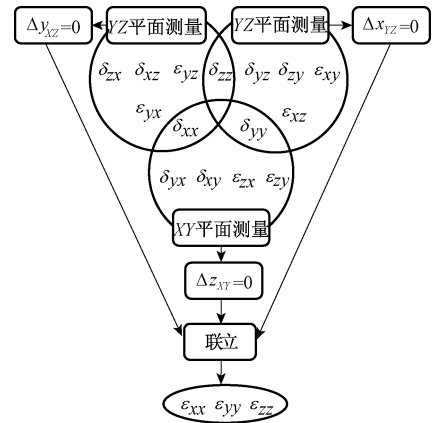


图3 三正交平面及辨识误差对应关系

Fig.3 Corresponding relationship between the 3 orthogonal planes and identified errors

3 实验实例及分析

使用 Renishaw 品牌的 QC-20 W 无线球杆仪系统, 在一台采用华中 8 型数控系统的三轴立式加工中心 V850 L 上进行实验, 部分参数如表 2 所示。

3.1 三平面测试及误差辨识

如图 4 所示, XY 轴联动进行圆轨迹运动, X 、 Y 轴的相对运动量在各象限增减趋势不完全统一, 故取其中一象限内 X 、 Y 轴的运动量以及相应的球杆仪测试误差进行辨识。

依照所提辨识方法, 由式(12)、(15)计算得到 XY 平面中 δ_{xx} 、 δ_{yx} 、 ε_{zx} 、 δ_{yy} 、 δ_{xy} 、 ε_{zy} 等 6 项误差元素多项式拟合模型的各项系数, 即可得到 XY 平面内 6 项误差, 如式(17)、(18)所示, 绘图如图 5 所示。

表 2 实验参数

Table 2 Experiment parameters

项目	数值	单位
球杆仪		
型号	Renishaw QC20-W	
标称长度	100	mm
分辨率	0.1	μm
加长杆	50、150、300	mm
测量范围	-1~+1	mm
采样率(最大)	1 000	s^{-1}
测试机床		
型号	V850 L 立式加工中心	
X 轴行程	800	mm
Y 轴行程	500	mm
Z 轴行程	650	mm
数控系统	华中 8 型 HNC-818B	

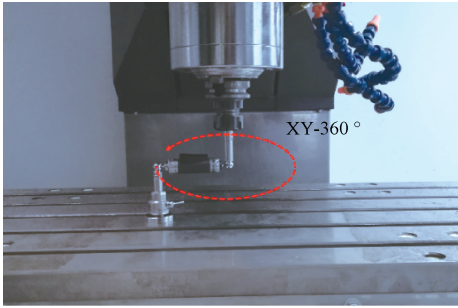


图 4 XY 平面圆弧测试

Fig.4 Circular arc test in XY plane

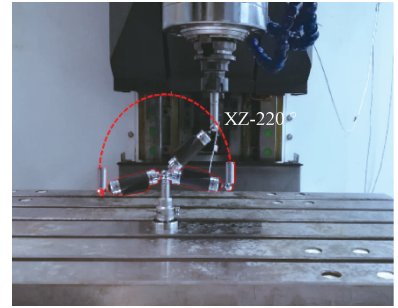


图 7 XZ 平面 220°圆弧测试

Fig.7 220° circular arc test in XZ plane

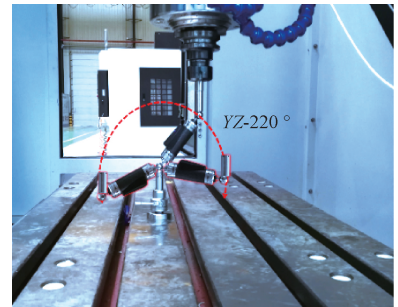


图 8 YZ 平面 220°圆弧测试

Fig.8 220° circular arc test in YZ plane

将辨识的 6 项误差元素代回式(2),根据综合误差模型可得到综合误差在 X、Y 方向的分量 Δx_{XY} 、 Δy_{XY} ,与实际测得误差在 X、Y 方向分量 Δr_x 、 Δr_y 比较如图 6 所示。

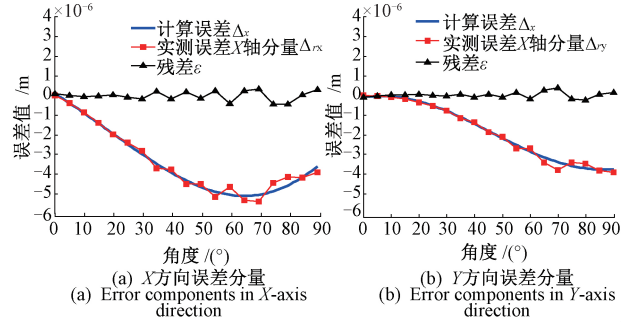


图 6 XY 平面测试 X、Y 方向误差分量

Fig.6 Error components in X, Y axis directions in XY plane

参照 XY 平面误差辨识方法,对 XZ、YZ 平面其余 9 项误差进行测量和辨识,为充分使用球杆仪测量特性,在 XZ、YZ 平面进行 220°测量,如图 7、8 所示。

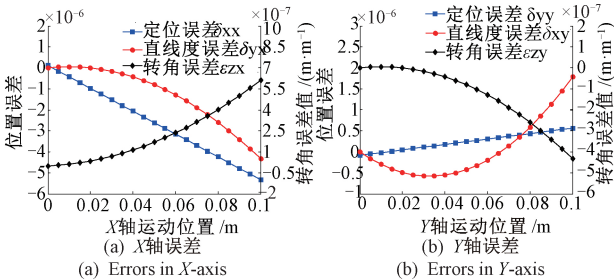


图 5 XY 平面误差辨识结果

Fig.5 Identification results of the errors in XY-plane

$$\begin{cases} \delta_{xx} = 1.124\ 877 \times 10^{-7} - 5.441\ 976 \times 10^{-5}x \\ \delta_{yx} = 1.121\ 122 \times 10^{-5}x - 5.458\ 576 \times 10^{-4}x^2 \\ \varepsilon_{zx} = 6.482\ 141 \times 10^{-7}x + 5.471\ 540 \times 10^{-5}x^2 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \delta_{xy} = -3.499\ 391 \times 10^{-5}y + 5.292\ 350 \times 10^{-4}y^2 \\ \delta_{yy} = -8.300\ 279 \times 10^{-8} + 6.482\ 141 \times 10^{-6}y \\ \varepsilon_{zy} = 1.121\ 122 \times 10^{-6}y - 5.458\ 576 \times 10^{-5}y^2 \end{cases} \quad (18)$$

XZ、YZ 平面误差辨识可根据上一平面部分已辨识结果进一步简化运算,同时,因 δ_{xx} 、 δ_{yy} 已知,可在其他误差元素如的多项式拟合模型中增加常数项,进而辨识出 XZ 平面、YZ 平面其余 9 项误差元素,如图 9、10 所示。由于各平面误差模型中均采用绝对增量作为各轴运动变换

量,各轴在不同平面的各象限的运动趋势不完全一致,以致重复误差项如 δ_{xx} 在图 5(a) 及图 9(a) 中关于中线对称。

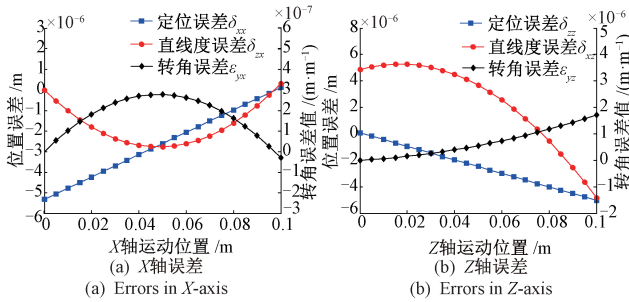


图9 XZ平面误差辨识结果

Fig.9 Identification results of the errors in XZ-plane

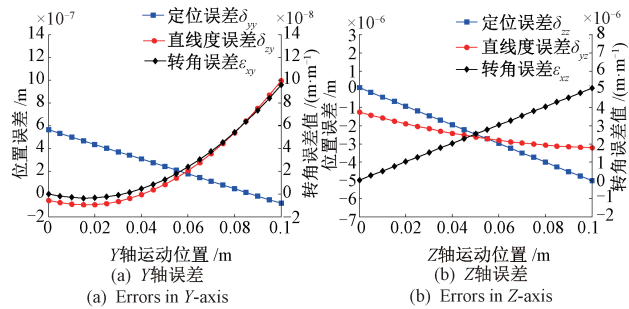


图10 YZ平面误差辨识结果

Fig.10 Identification results of the errors in YZ-plane

根据3个平面辨识的15项误差元素,根据式(16)即可解得剩余的3项转角误差 ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{zz} ,误差辨识结果如图11所示。

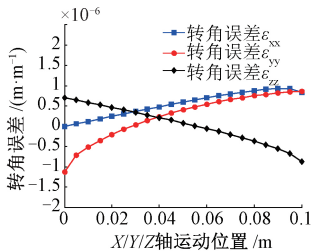


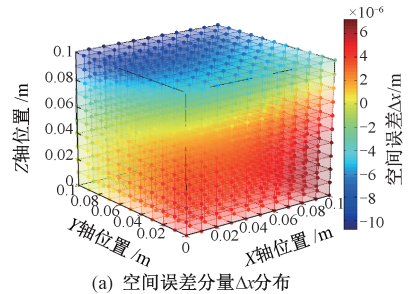
图11 各轴转角误差辨识结果

Fig.11 Identification results of the angular errors of the axes

根据三轴位置几何误差辨识结果,可在式(1)的基础上扩展得到机床X、Y、Z轴三轴联动下空间误差,相应地,空间误差在各轴分量如图12所示。

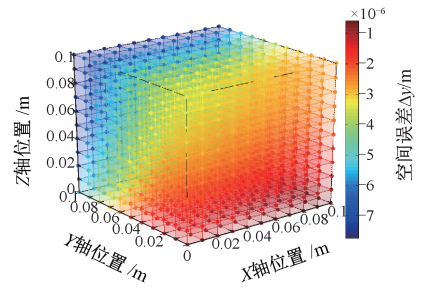
值得注意的是,空间误差各轴分量数值上并不仅与其对应轴位置相关,如图12(a)表示的空间误差分量 Δx ,在垂直X轴的截面各点数值差异可能较大,这也将在各轴运动量均处于较小值时,相应区域的空间误

差分量数值上并不完全处于较低水平,空间误差分量接近0的区域甚至可能出现在立方空间内部而不是边缘。相比而言,分量 Δy 、 Δz 变化趋势相对简单,其数值上大体上随对应轴位置的增加呈单调变化,但截面上各点误差值依旧差异明显。这也是在评价机床工作空间误差时,不能只考虑各轴定位误差的原因。



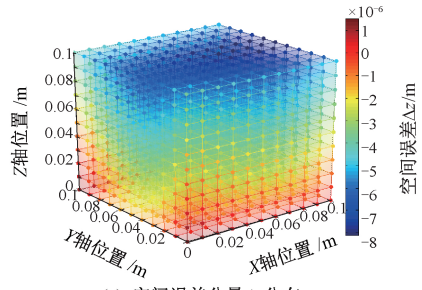
(a) 空间误差分量 Δx 分布

(a) Distribution diagram of volumetric error component Δx



(b) 空间误差分量 Δy 分布

(b) Distribution diagram of volumetric error component Δy



(c) 空间误差分量 Δz 分布

(c) Distribution diagram of volumetric error component Δz

图12 空间误差分布

Fig.12 Distribution diagrams of volumetric errors

3.2 改变圆弧半径的误差预测及结果分析

为进一步验证基于球杆仪辨识直线轴误差正确性,不改变安装位置,将标准球杆长度改为150 mm,进行半径为150 mm的圆弧测试,如图13所示。同时,将 $r=150$ mm代入误差综合模型及辨识后的误差元素多项式模型中,根据式(12)进行半径延长后圆轨迹误差预测,对比测试结果与预测结果,以理论X、Y轴运动量为基准,预测误差与实测误差值放大1000倍后,三者相对位置关系如图14所示。图14中预测误差与实测误差均被放大后与理论X、Y轴运动量叠加量,只反应三者的相对

位置关系,不表示绝对误差量。通过预测结果可以发现,根据 $r=100\text{ mm}$ 时的 XY 平面圆弧测试的误差辨识结果总体上能够较好地预测出 $r=150\text{ mm}$ 时的 X 、 Y 轴运动轨迹。在 $120\text{ mm}\times 120\text{ mm}$ 范围内,预测 X 、 Y 轴运动轨迹与实测的 X 、 Y 轴运动轨迹吻合度较高, $120\sim 150\text{ mm}$ 段吻合度下降,预测轨迹与实测轨迹偏离程度增大,说明辨识方法能够较好地应用于测量半径区域,对测量半径外的区域,辨识结果存在局限性。若要获得更大范围内的精确误差,需增大球杆仪测量半径,进一步测量及辨识。理论上最高可以进行 $600\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 600\text{ mm}$ 行程范围内的机床各直线轴位置相关几何误差辨识。

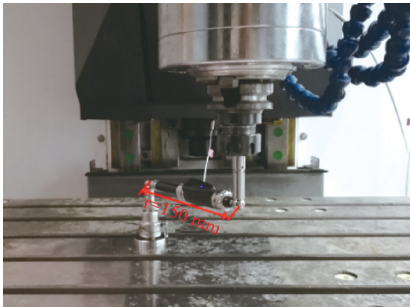


图 13 $r=150\text{ mm}$ 的 XY 平面圆弧测试

Fig.13 Circular arc test in XY plane with $r=150\text{ mm}$

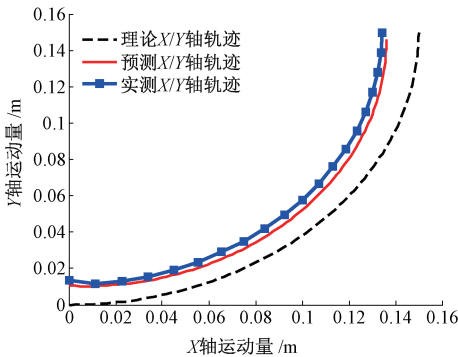


图 14 $r=150\text{ mm}$ 的预测轨迹与实际轨迹

Fig.14 Predicted and actual trajectories with $r=150\text{ mm}$

在进行两直线轴联动的平面圆弧测试及误差辨识时,原则上应尽量使球杆平行于测试平面安装,减小正交轴方向上的误差敏感性。但由于球杆仪配置延长杆的限制,难以获得足够数量的测试半径,故对 100 mm 球杆设置安装角度 53.13° 、 47.57° 、 36.87° 、 25.84° 获得 60 、 70 、 80 、 90 mm 的测试半径;对 150 mm 球杆设置安装角度 42.83° 、 36.87° 、 29.93° 、 21.04° 获得 110 、 120 、 130 、 140 mm 的测试半径,进行多组辅助验证试验。采用测试半径 100 mm 的误差辨识结果对各组测试半径的运行轨迹进行预测,结果如图 15、16 所示。各个半径下的预测轨迹与实测轨迹对比结果总体上与图 14 类似,在 110 、

120 、 130 、 140 mm 半径的轨迹预测中, $0\sim 100\text{ mm}$ 段预测精度相对较高,在 $100\sim 110$ 、 $100\sim 120$ 、 $100\sim 130$ 、 $100\sim 140\text{ mm}$ 等未覆盖区域预测轨迹与实测轨迹偏离程度变大,总体上,预测精度随着 x 、 y 位置增大而降低;在 60 、 70 、 80 、 90 mm 的圆测试中,预测模型能大致地预测实际误差轨迹的变化趋势,而绝对的预测精度相对较低。

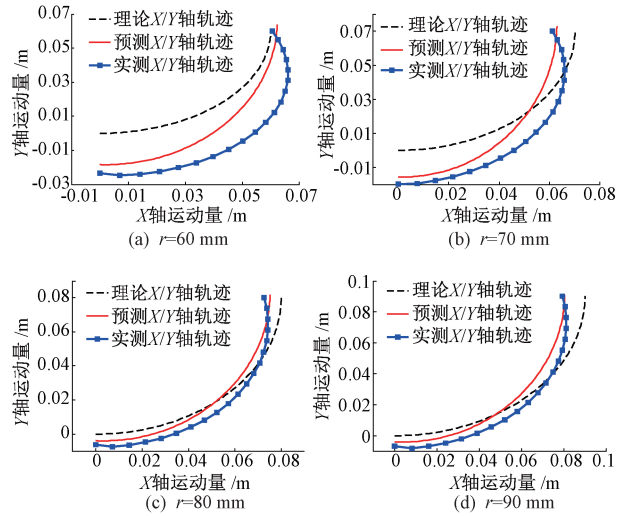


图 15 不同测试半径的预测与实际轨迹(球杆长度 100 mm)

Fig.15 Predicted and actual trajectories with different test radius (bar length 100 mm)

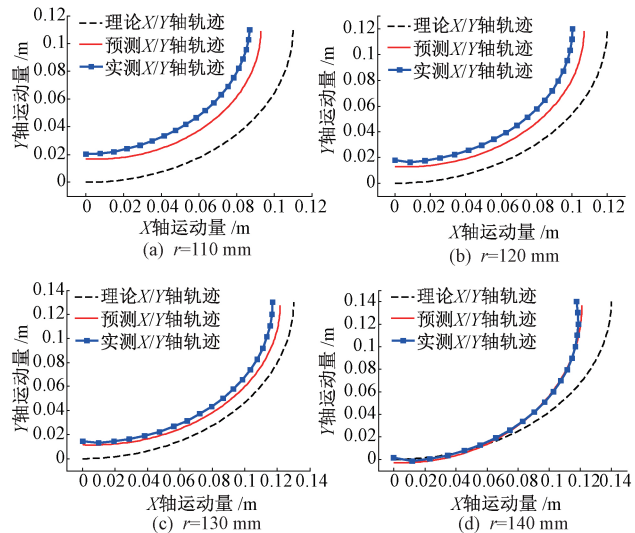


图 16 不同测试半径的预测与实际轨迹(球杆长度 150 mm)

Fig.16 Predicted and actual trajectories for different test radius (bar length 150 mm)

此外,球杆安装角度越大,预测轨迹与实际轨迹的偏离程度越大,预测精度越低。究其原因,一方面,球杆的非水平安装会增大正交轴方向的误差分量的敏感性,以 XY 平面为例,当球杆与 XY 平面夹角增大, X 、 Y 轴的 Z 向

直线度误差将参与 Z 轴误差分量的构成,而文中辨识方法设定球杆水平安装, Z 轴误差分量近似取 0,当存在安装角度时,辨识模型适用性降低;另一方面,倾斜安装易引入较大的安装误差,影响测量精度。综合考虑所有半径下的预测结果可知,基于半径 100 mm 的圆弧测试的辨识结果在预测半径改变的其他圆弧轨迹时,其预测精度与测试半径及安装角度均有如下关系,测试半径越接近 100 mm(辨识模型中使用半径长度),安装角度越小,预测精度越高。

4 结 论

直线轴位置相关误差的辨识一直是机床综合误差补偿的重要工作之一,本文针对三轴加工中心三直线轴的 18 项位置相关几何误差提出了基于球杆仪测试的误差辨识方法。该方法球杆仪只需进行 XY 、 XZ 、 YZ 三平面共 3 次的常规测试,无需多次安装及球杆仪运动轨迹规划,对于短工作行程机床可直接应用本方法对直线轴位置相关几何误差进行辨识,且设备成本低,操作简单易实现。

1) 本文结合基于齐次坐标变换构建的球杆仪实际运动的误差模型,对球杆仪实际杆长变化量在轴上分量进行简化,建立了三平面内杆长变化量与综合误差模型的对应关系。

2) 对 15 项位置相关几何误差元素进行多项式拟拟合,基于 Moore-Penrose 逆矩阵分别求解各轴误差元素的多项式系数;结合测试平面正交方向误差不敏感特性,求解 X 、 Y 、 Z 轴绕自身 3 项翻转角度误差 ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{zz} , 实现三轴加工中心共 18 项位置相关误差的辨识。

3) 基于半径 100 mm 圆弧测试的辨识结果预测半径 60~90、110~150 mm 的圆弧轨迹,并进行不同半径条件下的实际测量,分析了测量半径与预测精度的规律,为辨识方法的正确性提供了参考。

基于球杆仪的直线轴误差辨识受到杆长及安装限制,很难进行大行程的测量。同时,辨识精度会随着未测量行程的增大而降低,仅对短行程的误差辨识结果不能直接应用在大行程的误差预测和补偿中。此外,通过对比半径改变后的预测轨迹与实测轨迹,至多可以说明 15 项误差辨识结果的有效性,对于未参与测量平面中运动轴方向上误差分量组成的的 3 项滚转误差辨识(ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{zz})的正确性,采用常规的平面圆弧测试方法尚不能完全证明。

参考文献

[1] 杨建国,范开国,杜正春,等.数控机床误差实时补偿技术[M].北京:机械工业出版社,2013.

YANG J G, FAN K G, DU Z C. CNC Machine Tool

Error Real-Time Compensation Technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2013.

[2] 余永维,杜柳青.深度学习框架下数控机床运动误差溯源因方法[J].仪器仪表学报,2019,40(1):28-34.

YU Y W, DU L Q. Motion error tracing of NC machine tools based on deep learning framework [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(1):28-34.

[3] 杨婧,冯其波.数控机床空间几何误差测量研究进展[J].仪器仪表学报,2017,38(8):1901-1911.

YANG J, FENG Q B. Research progress on volumetric geometric error measurement of numerical control (NC) machine tools [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(8):1901-1911.

[4] HONG C, IBARAKI S, MATSUBARA A. Influence of position-dependent geometric errors of rotary axes on a machining test of cone frustum by five-axis machine tool [J]. Precision Engineering, 2011, 35(1):1-11.

[5] 林述温,吴城汀,林清锋.数控机床旋转轴误差的快速测量与辨识新方法[J].中国机械工程,2014,25(9):1169-1174.

LIN SH W, WU CH T, LIN Q F. Research on new fast measurement method and identification of rotation axis movement errors for CNC [J]. China Mechanical Engineering, 2014,25(9):1169-1174.

[6] CHEN J, LIN S, ZHOU X, et al. A ballbar test for measurement and identification the comprehensive error of tilt table [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016(103):1-12.

[7] TSUTSUMI M, SAITO A. Identification and compensation of systematic deviations particular to 5-axis machining centers[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(8):771-780.

[8] TSUTSUMI M, TONE S, KATO N, et al. Enhancement of geometric accuracy of five-axis machining centers based on identification and compensation of geometric deviations[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013(68):11-20.

[9] XIANG S, YANG J. Using a double ball bar to measure 10 position-dependent geometric errors for rotary axes on five-axis machine tools [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(1-4):559-572.

[10] FU G, FU J, XU Y, et al. Accuracy enhancement of five-axis machine tool based on differential motion matrix: Geometric error modeling, identification and compensation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015(89):170-181.

[11] ZARGARBASHI S H H, MAYER J R R. Assessment of

- machine tool trunnion axis motion error, using magnetic double ball bar [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46(14):1823-1834.
- [12] ZHONG L, BI Q, WANG Y. Volumetric accuracy evaluation for five-axis machine tools by modeling spherical deviation based on double ball-bar kinematic test [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017(122):106-119.
- [13] FLORUSSEN G H J, DELBRESSINE F L M, VAN DE MOLENGRAFT M J G, et al. Assessing geometrical errors of multi-axis machines by three-dimensional length measurements [J]. *Measurement*, 2001, 30(4):241-255.
- [14] 张虎,周云飞,唐小琦,等.数控机床空间误差球杆仪识别和补偿[J].*机械工程学报*,2002(10):108-113.
ZHANG H, ZHOU Y F, TANG X Q, et al. Volumetric error identification and compensation based on ball bar for CNC machine tool [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2002(10):108-113.
- [15] ALI L, XUE D, GU P. Accurate identification and compensation of geometric errors of 5-axis CNC machine tools using double ball bar[J]. *Measurement Science & Technology*, 2016, 27(5):055004.
- [16] 田文杰,郭龙真,刘海涛.数控机床几何误差源的快速辨识方法[J].*天津大学学报(自然科学与工程技术版)*,2016,49(2):171-177.
TIAN W J, GUO L ZH, LIU H T. Rapid identification method for geometric errors of CNC machine tools [J] *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2016,49(2):171-17.
- [17] 董泽园,李杰,刘辛军,等.数控机床两种几何误差建模方法有效性试验研究[J].*机械工程学报*,2019,55(5):137-147.

DONG Z Y, LI J, LIU X J, et al. Experimental study on the effectiveness of two different geometric error modeling methods for machine tools [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019,55(5):137-147.

- [18] SCHWENKE H, KNAPP W, HAITJEMA H, et al. Geometric error measurement and compensation of machines: An update [J]. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, 2008, 57(2):660-675.

作者简介



徐凯,2016年于重庆大学获得学士学位,现为重庆大学博士研究生,主要研究方向为机床误差测量、辨识。

E-mail:1655341185@qq.com

Xu Kai received B.Sc. degree from Chongqing University in 2016. Now, he is a Ph. D. candidate in Chongqing University. His main research interests include error measurement and identification of machine tools.



李国龙(通信作者),分别在1990年于武汉科技大学获得学士学位,1997年和2001年于重庆大学获得硕士学位和博士学位,现为重庆大学教授、博士生导师,主要研究方向为精密加工与装备。

E-mail:glli@cqu.edu.cn

Li Guolong (corresponding author) received his B.Sc. degree from Wuhan University of Science and Technology in 1990, M. Sc. and Ph. D. degrees both from Chongqing University in 1997 and 2001, respectively. Now, he is a professor and Ph. D. supervisor in Chongqing University. His main research interests include precision machining and equipment.