

一种四轴联动机床转台运动误差的快速检测及分离方法

陈光胜¹, 梅雪松^{1,2}, 陶涛¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 提出了一种利用球杆仪对四轴联动机床转台误差检测及分离的快捷方法. 该方法分为轴向测试和锥形测试, 当轴向测试时, 在转台旋转的同时, 机床直线轴作同轴、同步的圆运动, 称为双环测试. 该测试能分离出转台的滚转误差、偏摆误差等 2 项转角误差, 以及 1 项沿直线轴的线性误差. 通过锥形测试, 能分离出另外 2 项沿直线轴的线性误差, 结合球杆仪的倒锥形安装及水平安装, 得到因线性轴联动而引入到双环测试的干扰量, 从而提高了被分离误差项结果的准确性. 实例对比结果表明, 提出的机床运动误差测量及分离方法能准确地得到转台的 5 项运动误差, 因此具有操作简单、耗时少等优点.

关键词: 四轴联动; 机床转台; 运动误差; 误差检测

中图分类号: TP271.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)09-0006-05

Convenient Strategy for Identifying Motion Errors from Rotary Table of 4-Axis Simultaneous Control Machine Tools

CHEN Guangsheng¹, MEI Xuesong^{1,2}, TAO Tao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A convenient strategy for identifying the motion errors from the tilting-rotary table of 4-axis simultaneous control machine tools with a ball-bar is proposed, including the axial testing and cone-shaped testing. In the axial testing the double-circle motion, in which two translational axes and one rotary axis are simultaneously controlled to keep the distance between the tool and the worktable constant, is designed to identify the deviations of the rotary axis, thus two angular deviations and one positional deviation are obtained, and the other two positional deviations are obtained by the cone-shaped testing. To achieve high-precision measurement results, the errors due to the circular motion of the two translational axes in the double-circle motion are removed by an additional test with corresponding arithmetic. The comparative results show that the strategy greatly simplifies the measurement device and accelerates the error quantification.

Keywords: four-axis simultaneous control; machine tool rotary table; motion-error; error detection

转台是多轴数控机床的重要部件, 其运动精度直接影响到机床的加工精度. 目前, 能直接对转台所

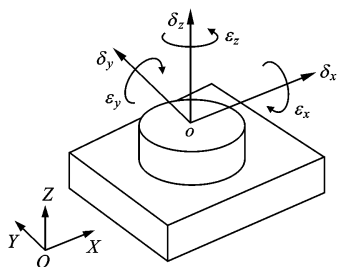
有几何误差进行测量的方法较少, 即使是机床业公认的几何误差测量仪器激光干涉仪也只能得到转台

的转角定位误差,激光跟踪仪虽能准确测量出包括转台在内的各项机床几何误差,但仍存在和干涉仪一样的缺点,如耗时长、对操作者素质要求高和设备价格高昂等。已有不少研究者对转台的误差测量展开了研究,如郭红旗等人^[1]采用辨识的方法运用激光干涉仪得到了转台的6项运动误差。因此,寻找出测量结果精确可信、操作简便且省时的转台测量方法,仍然是研究者不懈努力的方向。

球杆仪是运用圆测试原理对机床的几何误差进行评估的精密测量仪器,其测量方便、方法简单的特点倍受研究者推崇,被广泛应用于机床精度评估,并已形成多项国际通用标准^[2-3]。Khan 和 Chen^[4]提出一种利用球杆仪对转台运动误差进行分离的思路,并进行了有益的尝试。Tsutsumi 和 Saito^[5-6]利用球杆仪对五轴联动机床的多项误差进行了分离。周玉清等人^[7]提出一种旋转轴与平移轴联动误差的快速测量方法。本文对转台的测量方法及理论展开研究,提出一种能对四轴联动机床转台的6项误差中的5项误差进行快速分离的方法,不仅大大缩短了转台误差的测量时间,而且具有较高的测量精度。

1 机床转台的6项运动误差

机床转台如图1所示,视各运动体为刚体,转台的回转轴运动副做相对运动时,在6个自由度方向上产生运动误差^[4]。机床中常见的回转轴分别是A、B和C轴,本文的研究方法虽然是以C轴为例,但也适用于A轴和B轴。



$\delta_x, \delta_y, \delta_z$: 沿 X、Y、Z 方向的平移误差; $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$: 分别为绕 X、Y、Z 轴的偏摆误差、俯仰误差和滚转误差

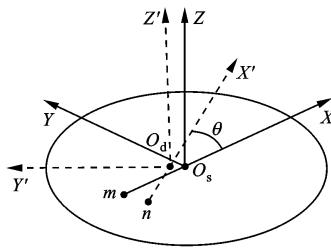
图1 转台的6项运动误差

2 利用球杆仪对转台进行误差测量及分离

2.1 基本原理

在转台上建立静止坐标系 $XYZO_s$, 以及随转台旋转的动坐标系 $X'Y'Z'O_d$, 两坐标系的原点 O_s, O_d

在初始位置重合, 且位于转台的回转中心, 如图2所示。



m : 转台上任一点的位置; n : m 点旋转角度 θ 后的位置

图2 C轴转台的坐标系

设 m 为转台上的一点, 坐标为 (x_m, y_m, z_m) , 假定转台无运动误差, 当转台旋转角度 θ 后, 则变为点 n , 其坐标为 (x_n, y_n, z_n) , n 可以看作是 m 点经过绕 Z 轴的旋转角度变换得到^[8], 设旋转矩阵

$$\mathbf{P}_m = [x_m \ y_m \ z_m \ 1]; \quad \mathbf{P}_n = [x_n \ y_n \ z_n \ 1]$$

$$\mathbf{P}_n = \mathbf{P}_m \mathbf{T}_s = \mathbf{P}_n \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{T}_s$ 为理想的旋转矩阵。

由于运动误差的存在, 实际点为 p , 坐标为 (x_p, y_p, z_p) , p 可看作是 n 绕 X 、 Y 、 Z 轴分别作 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 旋转, 以及沿坐标轴平移 $(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$ 的组合变换。设变换矩阵为

$$\mathbf{T}_e = \begin{bmatrix} \cos\epsilon_z & \sin\epsilon_z & 0 & 0 \\ -\sin\epsilon_z & \cos\epsilon_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\epsilon_x & \sin\epsilon_x & 0 \\ 0 & -\sin\epsilon_x & \cos\epsilon_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\epsilon_y & 0 & -\sin\epsilon_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\epsilon_y & 0 & \cos\epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \delta_x & \delta_y & \delta_z & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于实际机床, 由于转台的6项误差数值非常小, 即

$$\cos\epsilon_x \approx \cos\epsilon_y \approx \cos\epsilon_z \approx 1$$

因此

$$\sin\epsilon_x \approx \epsilon_x; \quad \sin\epsilon_y \approx \epsilon_y; \quad \sin\epsilon_z \approx \epsilon_z$$

将式(2)化为

$$T_e = \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_z & 0 & 0 \\ -\epsilon_z & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \epsilon_x & 0 \\ 0 & -\epsilon_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\epsilon_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \epsilon_y & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \delta_x & \delta_y & \delta_z & 1 \end{bmatrix}$$

忽略高次项及误差积项,得

$$T_e \approx \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_z & -\epsilon_y & \delta_x \\ -\epsilon_z & 1 & \epsilon_x & \delta_y \\ \epsilon_y & -\epsilon_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

则点 p 的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_p & y_p & z_p & 1 \end{bmatrix} = P_m T_s T_e =$$

$$P_m \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_z & -\epsilon_y & 0 \\ -\epsilon_z & 1 & \epsilon_x & 0 \\ \epsilon_y & -\epsilon_x & 1 & 0 \\ \delta_x & \delta_y & \delta_z & 1 \end{bmatrix}$$

得

$$\begin{bmatrix} x_p & y_p & z_p & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_\theta - \epsilon_z + \epsilon_y + \delta_x \\ x_\theta \epsilon_z + y_\theta - z_\theta \epsilon_x + \delta_y \\ -x_\theta \epsilon_y + y_\theta \epsilon_x - z_\theta + \delta_z \end{bmatrix}^T$$

令

$$M_e = \begin{bmatrix} x_p & y_p & z_p & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_n & y_n & z_n & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_e = \begin{bmatrix} x_m & y_m & z_m & 1 \end{bmatrix} T_s (T_e - E) \quad (4)$$

式中: E 为单位对角矩阵; M_e 为点 p 相对点 n 的矢量差,由转台的运动误差造成。

2.2 圆锥法测试

运用球杆仪进行转台误差测量时,将测量球杆的一端固定在点 $a(0,0,z_1)$ 上,点 a 位于转台回转轴线上,另一端固定在转台台面的点 $m(x_m, y_m, z_m)$ 上,当点 m 的回转半径为 R 时,测量球杆长度为 D ,如图3所示。转台旋转 θ 角度到达点 $n(x_n, y_n, z_n)$ 时,若转台无任何误差,则 D 保持不变。

由于6项运动误差的存在,点 n 沿 X 、 Y 、 Z 方向造成的误差分别为 Δx 、 Δy 、 Δz ,因此引起球杆长度发生变化,其变化值为 ΔD ,有

$$(D + \Delta D)^2 = (x_n + \Delta x)^2 + (y_n + \Delta y)^2 + (z_n - z_1 + \Delta z)^2$$

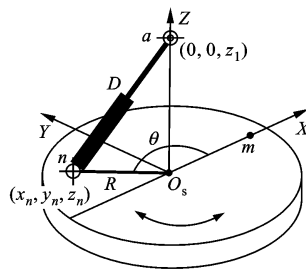
将上式两边展开,忽略误差的高次项,得到

$$D\Delta D = x_n \Delta x + y_n \Delta y + (z_n - z_1) \Delta z =$$

$$\begin{bmatrix} x_n & y_n & z_n - z_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$D\Delta D \approx x_n \delta_x + y_n \delta_y + (z_n - z_1) \delta_z - y_n z_1 \epsilon_x + x_n z_1 \epsilon_y \quad (5)$$

式(5)是由5个运动误差项组成的表达式,因为 ϵ_z 不会对球杆的伸长做出贡献,因此该方法不能对 ϵ_z 进行测量。然而,即使式(5)类似于五元一次线性方程式,可在转台取5个不同点进行测量后得到五元线性方程组,但却不能解出。因为在式(5)中, δ_x 、 ϵ_y 具有相关性,但若 ϵ_x 、 ϵ_y 已知,仍可以利用该式求解出 δ_x 、 δ_y 和 δ_z 。



R :点 m 、 n 的回转半径; D :测量球杆长度; θ :转台的回转角度

图3 转台运动误差的锥形法测试

2.3 ϵ_x 、 ϵ_y 和 δ_z 的双环法测试

如图4a所示,球杆仪一端的初始安装位置为点 m ,回转半径为 R ,另一端安装于点 $P_0(x_m, y_m, z_1)$ 处,测量杆与转台回转轴线平行。双环测试时,转台做整周转动的同时,点 P_0 随机床的 X 、 Y 轴绕 R 做圆运动,圆心 $O_1(0,0,z_1)$ 位于转台的回转轴线上,且转动方向与转台相同。当转台绕 θ 转动时,球杆的一端由点 m 转到点 n ,而球杆的另一端则随点 P_0 转到点 P_i 。

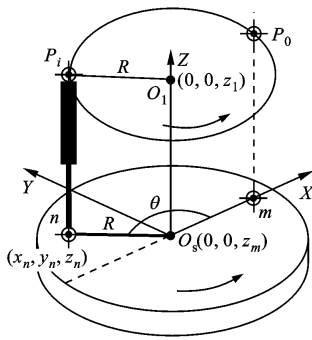
当不考虑 X 、 Y 轴的误差时,点 n 、 P_i 的齐次坐标变为 $(x_p, y_p, z_m, 1)$ 和 $(x_n, y_n, z_1, 1)$,此时有

$$(D + \Delta D)^2 = (x_p - x_n)^2 + (y_p - y_n)^2 + (z_p - z_1)^2$$

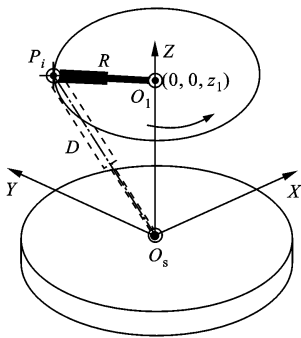
得

$$D\Delta D = (z_1 - z_m)(-y_n \epsilon_x + x_n \epsilon_y + \delta_z) \quad (6)$$

式(6)中有3个未知数,如果保持点 P_0 的位置不变,通过3次改变转台转动的初始角,可使点 m 的初始位置发生变化,依次实验后即可列出关于 δ_x 、 δ_y 和 δ_z 的方程组,求解得到转台在旋转角度处的 δ_x 、 δ_y 和 δ_z 。



(a)双环法测试



(b)去除轴向误差项的测试

图 4 转台运动误差的双环法测试

2.4 双环法测试的干扰项去除

在进行双环法测试时,假定 X 、 Y 轴的各项误差为 0。实际上, X 、 Y 轴的几何误差、伺服轴动态特性误差和间隙误差等与转台运动误差一样不可忽略,甚至会远大于转台的误差,因此必须考虑 X 、 Y 轴误差对 ΔD 的影响。假定在点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 处, X 、 Y 轴的误差使点 P_i 产生沿 X 、 Y 、 Z 方向的偏差 Δx_i 、 Δy_i 和 Δz_i ,而在双环法测量中, ΔD 对 Δx_i 和 Δy_i 并不敏感,但 Δz_i 会按 1 : 1 的比例映射到 ΔD , 因此双环法测试的干扰项主要是 Δz_i 。

如图 4b 所示,先将球杆仪的一端安装于转台 $O_1(0,0,z_1)$ 处,另一端安装于圆轨迹上,当机床在 X 、 Y 轴运动时,机床的转台处于静止状态,在圆轨迹的任一点上有

$$\begin{aligned} \Delta x_i x_i + \Delta y_i y_i + \Delta z_i (z_1 - z_i) &= \Delta D D \\ \text{当 } z = z_1 \text{ 和 } z = z_m \text{ 时,则} \\ \Delta x_i x_i + \Delta y_i y_i + \Delta z_i (z_1 - z_m) &= \Delta D D \\ \Delta x_i x_i + \Delta y_i y_i &= \Delta R_i R \\ \Delta z_i &= \frac{\Delta D [R^2 + (z_1 - z_m)^2]^{1/2} - \Delta R_i R}{z_1 - z_m} \end{aligned} \quad (7)$$

将球杆仪的安装位置从 O_1 改变到 O_s , 利用式

(7) 得到双环法测试时各点的干扰量,从而准确得到 ϵ_x 、 ϵ_y 。将 ϵ_x 、 ϵ_y 代入式(5)中,得到 δ_x 、 δ_y 和 δ_z 。

3 应用实例

研究的实例是大型圆柱齿轮成形磨齿机,磨齿机分为砂轮修整系统、磨削系统和在机测量系统,由 X 、 Y 、 Z 、 W 直线轴和 A 、 C 旋转轴组成,属于六轴四联动数控加工机床。在运用球杆仪进行转台运动误差测量时,由于 W 、 A 轴均不产生运动,因此可忽略 W 、 A 轴。将系统简化成如图 5 所示的四轴系统,测试条件如下。

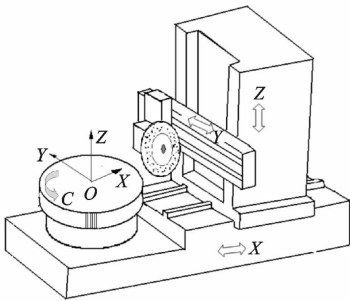


图 5 简化的磨齿机结构图

圆锥测试: $D=250\text{ mm}$, $R=100\text{ mm}$, 安装位置分别是 θ 为 0° 和 90° 处。

双环测试: $D=250\text{ mm}$, $R=100\text{ mm}$, 安装位置分别是 θ 为 0° 、 120° 、 240° 处。

平面去除干扰测试: $D=100\text{ mm}$, $R=100\text{ mm}$ 。

倒圆锥去除干扰测试: $D=250\text{ mm}$, $R=100\text{ mm}$ 。转台运动误差测试现场如图 6 所示,求解得到的转台运动误差如图 7 所示。



(a)圆锥测试 (b)双环测试

图 6 转台运动误差测试现场照片

工件齿向角度误差 $f_{H\beta}$ 是齿轮精度的重要指标,由于转台运动误差的存在,使工件和刀具(砂轮)之间产生偏移,因此影响到 $f_{H\beta}$ 。利用测得的误差可以对 $f_{H\beta}$ 进行预测,图 8 是预测值与实际值的对比

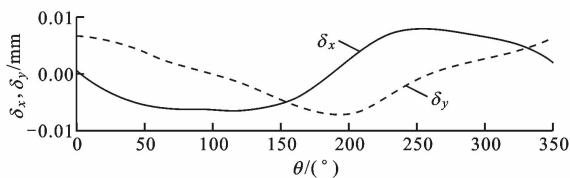
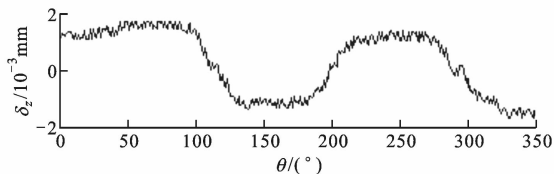
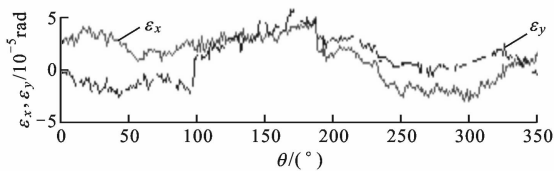
(a) 误差 δ_x 、 δ_y (b) 误差 δ_z (c) 误差 ϵ_x 、 ϵ_y

图7 转台运动误差的检测结果

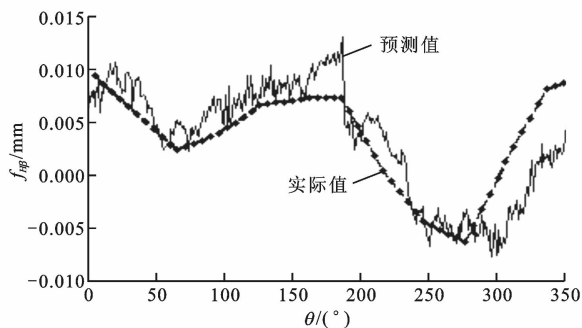


图8 预测误差与实测误差的对比

图,从图中可以看出,二者的幅值及趋势均一致,角度误差不超过 $5 \mu\text{m}$ 。

4 结 论

本文提出了一种对数控机床转台运动误差进行快速测量和误差分离的方法,除球杆仪外,不需要其他特殊仪器,并通过分析及实验得出以下结论。

(1)通过6次球杆仪的安装得到转台的5项运动误差。本文方法不能得到转台的定位误差,定位误差只能通过其他方法得到。

(2)利用球杆仪测得的数据能够准确预测机床的加工误差,整个测量过程约3 h,与传统测量方法相比,其操作简单、耗时少,因此适用于机床的生产实际。

参考文献:

- [1] 郭红旗,赵小松,刘又午. 四轴联动加工中心回转轴几何误差参数的辨识及测量 [J]. 天津大学学报, 2001, 34(4):463-466.
GUO Hongqi, ZHAO Xiaosong, LIU Youwu. Identification and inspection about geometric error parameters of rotation coordinate for 4-axis machining center [J]. Journal of Tianjin University, 2001, 34(4):463-466.
- [2] 全国金属切削机床标准化委员会. GB/T17421.1-2003 (ISO 230-1) 中华人民共和国国家标准 [S]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [3] 全国金属切削机床标准化委员会. GB/T17421.4-2003 (ISO 230-4) 中华人民共和国国家标准 [S]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [4] KHAN A W, CHEN Wuyi. A methodology for error characterization and quantification in rotary joints of multi-axis machine tools [J]. International Journal of Advanced Manufacture Technology, 2010, 51:1009-1022.
- [5] 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: 771-780.
- [6] 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 & Manufacture, 2004,44:1333-1342.
- [7] 周玉清,陶涛,梅雪松,等. 旋转轴与平移轴联动误差的快速测量及溯源 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(5):80-85.
ZHOU Yuqing, TAO Tao, MEI Xuesong, et al. Rapid error measurement and trace of simultaneous rotary-translational axes collaborative motion [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(5):80-85.
- [8] 张全伙,张剑达. 计算机图形学 [M]. 北京:机械工业出版社, 2003: 30-60.

(编辑 管咏梅)