

基于激光跟踪仪的转台系统几何误差检测

张振久 胡 泓

(哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要 转台系统是多轴机床的基本组件,因此转台系统的几何误差检测对于多轴机床的误差补偿有重要意义。提出了一种基于激光跟踪仪的转台系统几何误差检测方法,利用齐次坐标变换建立转台系统的误差模型,并给出几何误差与空间误差之间的关系。利用激光跟踪仪检测转台上不共线的三个点的空间坐标并得到各点的空间误差,再逆用误差模型,建立了包含六项几何误差的方程组。求解方程组,获得了转台系统的六项几何误差的解析表达式。将检测方法应用于某转台系统的几何误差检测,并通过对比实验证明了该方法的有效性。

关键词 测量;转台系统;几何误差检测;误差模型;激光跟踪仪

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1108016

Measurement of Geometric Error of Rotary Stage System Based on Laser Tracker

Zhang Zhenjiu Hu Hong

(Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract Rotary stage system is a fundamental part of multi-axis machine tools. Therefore, measuring geometric error of rotary stage system is significantly important for geometric error calibration of multi-axis machine tools. A method for measuring geometric error of rotary stage system based on laser tracker is proposed. Homogeneous transformation is applied to establish the mathematical model of geometric error of the rotary stage system which can explicitly describe the relationship between geometric errors and volumetric errors. The coordinates of three noncollinear points on the stage are detected by laser tracker and the volumetric errors of each point can be obtained too. The mathematical model of geometric error is performed inversely to achieve a system of equations which can be solved to obtain the six geometric errors of rotary stage system. This method is used to measure the geometric errors of a rotary stage, and the effectiveness of this method is validated by a comparison experiment.

Key words measurement; rotary stage system; geometric error measurement; error model; laser tracker

OCIS codes 120.0120; 000.3110; 120.1880; 000.3860; 120.4640

1 引 言

由于空间物体拥有 6 个自由度,所以空间物体在运动时会产生 6 项几何误差。可以利用齐次坐标变换建立误差模型来系统地分析各项几何误差对空间误差的影响,再利用多体系统理论就可以实现多轴机床的误差建模和补偿^[1,2]。转台系统是多轴机床传动系统的基本组件之一,其精度对整个机床传

动系统的精度有重要影响。因此,对转台系统进行误差检测和补偿有重要意义^[3,4]。

已有研究人员将圆度测量中的传统方法——频域三点法误差分离用于检测主轴回转运动径跳误差^[5],但此方法中存在检测元件安装误差以及谐波加权函数的谐波抑制问题。针对这些问题,黄春霞等^[6]提出以标准心轴为检测元件,利用电涡流传感

收稿日期: 2012-05-02; 收到修改稿日期: 2012-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(60974069)和深圳市科技计划(JC200903120188A)资助课题。

作者简介: 张振久(1982—),男,博士研究生,主要从事精密加工与检测,计算机视觉和数字图像处理等方面的研究。

E-mail: ajiuhit@hotmail.com

导师简介: 胡 泓(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事传感器和精密仪器微机电系统等方面的研究。

E-mail: honghu@hit.edu.cn(通信联系人)

器,结合集合平均法和转台径跳特性的方法成功检测了转台系统的径跳误差,但此方法仅能够检测六项几何误差中的两项,即径跳误差;杨新刚等^[3]利用带有角度干涉组件的激光干涉仪和回转分度器实现了回转轴的旋转误差,此类方法也存在标准轴与被测轴线对准误差等问题,而且也仅能检测旋转误差。Castro^[7]利用激光器和标准球实现转轴系统的径向和轴向三项误差的检测,此方法精度高,但仅能检测径跳误差和端跳误差。由于以上方法均单纯地分析径跳误差、端跳误差或者回转误差,并不能充分地反映系统空间误差的大小。Park 等^[8]利用激光器和两个位置灵敏探测器实现了转台系统的所有6项几何误差的检测,不过此方法的系统布置和调整校正过程比较复杂。

激光跟踪仪是一种新型的大尺寸坐标测量仪器,精度高且操作方便,在精密检测领域拥有广阔的应用前景。研究人员基于激光跟踪仪开发出多种机床误差检测与补偿技术^[9~11],但这些方法主要是针对直线运动进行检测补偿。例如张振久等^[10]曾提出一种利用激光跟踪仪检测导轨系统六项原始误差的方法。本文将类似的方法用于检测转台系统误差,并且相对于文献^[10],更进一步地给出了各项原始误差的解析解,并依据解析解给出系统布局的限制条件。

2 转台系统的误差模型

将转台系统简化为一个圆柱模型,如图1所示。

在底座基准面(转台安装基准面和测量基准)上建立参数坐标系 $Oxyz$, 在转台上建立转台坐标系 $O_1x_1y_1z_1$, 转台可以实现绕 z_1 轴的旋转运动, 转台坐标系随同转台一起运动, 且初始时刻其坐标轴 x_1, y_1, z_1 分别与参考坐标系的坐标轴 x, y, z 的方向相同。空间物体具有6个自由度, 相应地, 绕 z 轴的转动也会产生6项误差, 分别是径向跳动误差 $\delta_r(\theta)$ 和 $\delta_y(\theta)$ 、端面跳动误差 $\delta_z(\theta)$ 、侧倾偏转误差 $\epsilon_x(\theta)$ 和 $\epsilon_y(\theta)$ 以及角定位误差 $\epsilon_z(\theta)$ 。

这6项误差随着角位移的变化而变化, 所以每项误差都可以看作角位移 θ 的函数, 且相对于角位移大小来说, 误差值都可以看成是微小量。

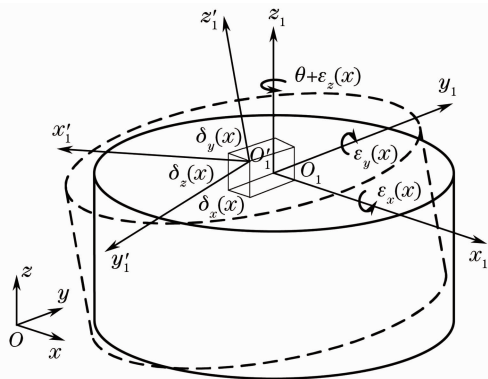


图1 转台系统的几何误差

Fig. 1 Geometric error components of rotary stage system

转台坐标系相对于参考坐标系的运动可以看作是刚体在三维空间的平移和旋转, 因此, 空间误差的数学模型可以通过齐次坐标变换得到^[8], 即

$$\begin{bmatrix} \Delta_x(\theta) \\ \Delta_y(\theta) \\ \Delta_z(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\epsilon_z(\theta) \sin \theta & -\epsilon_z(\theta) \cos \theta & \epsilon_y(\theta) & \delta_x(\theta) \\ +\epsilon_z(\theta) \cos \theta & -\epsilon_z(\theta) \sin \theta & -\epsilon_x(\theta) & \delta_y(\theta) \\ -\epsilon_y(\theta) \cos \theta + \epsilon_x(\theta) \sin \theta & \epsilon_y(\theta) \sin \theta + \epsilon_x(\theta) \cos \theta & 1 & \delta_z(\theta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 x_1, y_1, z_1 为被测点在转台坐标系下的坐标, $\Delta_x(\theta), \Delta_y(\theta), \Delta_z(\theta)$ 为此点的空间误差。(1)式可改写为

$$\begin{cases} \Delta_x(\theta) = -\epsilon_z(\theta)(x_1 \sin \theta + y_1 \cos \theta) + \epsilon_y(\theta)z_1 + \delta_x(\theta) \\ \Delta_y(\theta) = \epsilon_z(\theta)(x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta) - \epsilon_x(\theta)z_1 + \delta_y(\theta) \\ \Delta_z(\theta) = [-\epsilon_y(\theta) \cos \theta + \epsilon_x(\theta) \sin \theta]x_1 + [\epsilon_y(\theta) \sin \theta + \epsilon_x(\theta) \cos \theta]y_1 + \delta_z(\theta) \end{cases} \quad (2)$$

显然, 空间误差不仅与转台几何运动误差有关, 还与目标点在转台坐标系内的坐标和转台的角位移有关。

3 激光跟踪仪测量空间坐标的原理

激光干涉技术是公认的高精度位移检测方法^[12~15], 将激光干涉测距技术与测角技术结合起

来, 构建一套球坐标测量系统, 可以实现空间坐标的检测, 这就是激光跟踪仪。激光跟踪仪的球坐标测量系统如图2所示。光靶球心 $P(x, y, z)$ 方位角 α 和俯仰角 β 分别由跟踪仪的两个角度编码器测出, P 点与原点的距离 ρ 可通过激光跟踪仪内置的干涉仪测出, 即

$$\begin{cases} x = \rho \sin \beta \cos \alpha \\ y = \rho \sin \beta \sin \alpha \\ z = \rho \cos \beta \end{cases} \quad (3)$$

用激光跟踪仪测量空间坐标的方法有单站法和多站法两种^[9]。采用单站法时,由(3)式可知,坐标测量精度受测角精度影响非常大。不仅跟踪仪的测角精度有限,而且坐标测量精度随着测量距离的增大而降低。因此,单站法的测量精度与激光干涉测距精度相差甚远,不适合用于测量精度要求非常高的场合。多站法仅使用激光跟踪仪的跟踪效果和测距功能,而不使用测角功能,因此其测量精度较高,可以满足机床误差检测的要求^[11]。但多站法需要多台激光跟踪仪,成本非常高。限于实验条件(仅有一台激光跟踪仪),本文使用王金栋等^[9]提出的多站分时测量方法对空间坐标进行检测。

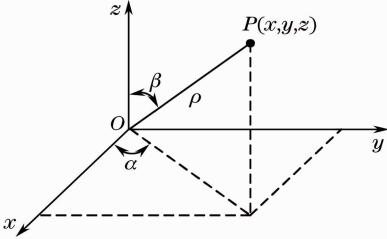


图2 激光跟踪仪的球坐标系

Fig. 2 Spherical coordinate system of laser tracker

4 转台系统几何误差检测方法

图3为转台几何误差检测原理图。在平台上选三个定点K、P、Q进行检测,它们在转台坐标系下的坐标分别为 (x_{1K}, y_{1K}, z_{1K}) 、 (x_{1P}, y_{1P}, z_{1P}) 和 (x_{1Q}, y_{1Q}, z_{1Q}) 。

以P点为例进行说明,设初始时刻,平台坐标系原点 O_1 在参考系中的齐次坐标为 $(x_0, y_0, z_0, 1)^T$,则初始时刻P点在参考坐标系下的齐次坐标为

$$\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1P} \\ y_{1P} \\ z_{1P} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

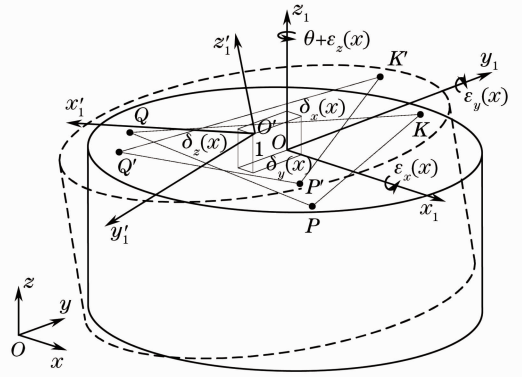


图3 转台几何误差检测

Fig. 3 Geometric error components measurement for rotary stage system

t 时刻,转台的角位移为 θ 。在理想状态下(不存在运动误差),转台坐标系原点 O_1 在参考坐标系下的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_{O_t} \\ y_{O_t} \\ z_{O_t} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

则容易得到理想状态下P点在参考坐标系下的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_{Pt} \\ y_{Pt} \\ z_{Pt} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & x_{O_t} \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & y_{O_t} \\ 0 & 0 & 1 & z_{O_t} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1P} \\ y_{1P} \\ z_{1P} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & x_0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1P} \\ y_{1P} \\ z_{1P} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

此时激光跟踪仪测得P点在参考体系下的精确坐标为 $(x'_{Pt}, y'_{Pt}, z'_{Pt})$,齐次坐标为 $(x'_{Pt}, y'_{Pt}, z'_{Pt}, 1)$ 。设转台系统的空间误差 $\Delta(\theta)$ 在P点处的三个分量分别为 $\Delta_x(P)$ 、 $\Delta_y(P)$ 和 $\Delta_z(P)$,则

$$\begin{bmatrix} \Delta_x(P) \\ \Delta_y(P) \\ \Delta_z(P) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_{Pt} \\ y'_{Pt} \\ z'_{Pt} \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{Pt} \\ y_{Pt} \\ z_{Pt} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_{Pt} \\ y'_{Pt} \\ z'_{Pt} \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & x_0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1P} \\ y_{1P} \\ z_{1P} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_{Pt} - x_{1P} \cos \theta + y_{1P} \sin \theta - x_0 \\ y'_{Pt} - x_{1P} \sin \theta - y_{1P} \cos \theta - y_0 \\ z'_{Pt} - z_{1P} - z_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

对P点的空间误差应用(2)式,可得

$$\begin{cases} \Delta_x(P) = x'_{P_t} - x_{1P} \cos \theta + y_{1P} \sin \theta - x_O = -\epsilon_z(\theta)(x_{1P} \sin \theta + y_{1P} \cos \theta) + \epsilon_y(\theta)z_{1P} + \delta_x(\theta) \\ \Delta_y(P) = y'_{P_t} - x_{1P} \sin \theta - y_{1P} \cos \theta - y_O = \epsilon_z(\theta)(x_{1P} \cos \theta - y_{1P} \sin \theta) - \epsilon_x(\theta)z_{1P} + \delta_y(\theta) \\ \Delta_z(P) = z'_{P_t} - z_{1P} - z_O = [-\epsilon_y(\theta) \cos \theta + \epsilon_x(\theta) \sin \theta]x_{1P} + [\epsilon_y(\theta) \sin \theta + \epsilon_x(\theta) \cos \theta]y_{1P} + \delta_z(\theta) \end{cases} \quad (8)$$

对 K 点和 Q 点采用同样的方法,能够得到类似的两个方程组。由此共得到包含 9 个方程的方程组,此方程组可以写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_{1P} & -\hat{y}_{1P} \\ 0 & 1 & 0 & -z_{1P} & 0 & \hat{x}_{1P} \\ 0 & 0 & 1 & \hat{y}_{1P} & -\hat{x}_{1P} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & z_{1Q} & -\hat{y}_{1Q} \\ 0 & 1 & 0 & -z_{1Q} & 0 & \hat{x}_{1Q} \\ 0 & 0 & 1 & \hat{y}_{1Q} & -\hat{x}_{1Q} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & z_{1K} & -\hat{y}_{1K} \\ 0 & 1 & 0 & -z_{1K} & 0 & \hat{x}_{1K} \\ 0 & 0 & 1 & \hat{y}_{1K} & -\hat{x}_{1K} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x(\theta) \\ \delta_y(\theta) \\ \delta_z(\theta) \\ \epsilon_x(\theta) \\ \epsilon_y(\theta) \\ \epsilon_z(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_{P_t} - \hat{x}_{1P} - x_O \\ y'_{P_t} - \hat{y}_{1P} - y_O \\ z'_{P_t} - z_{1P} - z_O \\ x'_{Q_t} - \hat{x}_{1Q} - x_O \\ y'_{Q_t} - \hat{y}_{1Q} - y_O \\ z'_{Q_t} - z_{1Q} - z_O \\ x'_{K_t} - \hat{x}_{1K} - x_O \\ y'_{K_t} - \hat{y}_{1K} - y_O \\ z'_{K_t} - z_{1K} - z_O \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 $\hat{y}_P = y_{1P} \cos \theta + x_{1P} \sin \theta$, $\hat{x}_P = x_{1P} \cos \theta y_{1P} \sin \theta$, $\hat{y}_Q = y_{1Q} \cos \theta + x_{1Q} \sin \theta$, $\hat{x}_Q = x_{1Q} \cos \theta y_{1Q} \sin \theta$, $\hat{y}_K = y_{1K} \cos \theta + x_{1K} \sin \theta$, $\hat{x}_K = x_{1K} \cos \theta y_{1K} \sin \theta$ 。

可以证明,只要 P、Q 和 K 三点不在同一条直线上,系数矩阵的秩为 6,因此,一定可以适当选取 6 个方程建立新的方程组且保证新方程组有唯一解。也就是说,实际操作中,P、Q 和 K 点不可以取在同一条直线上,以保证测量方法的有效性。

将(9)式中的 9 个方程式依次编号,由 P 点建立的三个方程为 P1 ~ P3 号,由 Q 点建立的三个方程为 Q1 ~ Q3 号,由 K 点建立的三个方程为 K1 ~ K3 号。可以证明,为保证选取得到的新方程组有唯一解,需要遵循以下原则:由 P、Q 和 K 点所建立的三个方程组,每组中至少选一个,且 P1P2Q1Q2K1K2、P1P3Q1Q3K1K3 和 P2P3Q2Q3K2K3 这三组不可选。这里选择 P1P2Q1Q3K2K3 建立新方程组

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_{1P} & -\hat{y}_{1P} \\ 0 & 1 & 0 & -z_{1P} & 0 & \hat{x}_{1P} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & z_{1Q} & -\hat{y}_{1Q} \\ 0 & 0 & 1 & \hat{y}_{1Q} & -\hat{x}_{1Q} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -z_{1K} & 0 & \hat{x}_{1K} \\ 0 & 0 & 1 & \hat{y}_{1K} & -\hat{x}_{1K} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x(\theta) \\ \delta_y(\theta) \\ \delta_z(\theta) \\ \epsilon_x(\theta) \\ \epsilon_y(\theta) \\ \epsilon_z(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_{P_t} - \hat{x}_{1P} - x_O \\ y'_{P_t} - \hat{y}_{1P} - y_O \\ x'_{Q_t} - \hat{x}_{1Q} - x_O \\ z'_{Q_t} - z_{1Q} - z_O \\ y'_{K_t} - \hat{y}_{1K} - y_O \\ z'_{K_t} - z_{1K} - z_O \end{bmatrix} \quad (10)$$

求解(10)式得到

$$\begin{aligned} \delta_x(\theta) &= d_{xP} + \frac{M}{N} \left[\hat{y}_{1P} - \frac{z_{1P}(\hat{y}_{1Q} - \hat{y}_{1P})}{z_{1Q} - z_{1P}} \right] - \frac{z_{1P}(d_{xQ} - d_{xP})}{z_{1Q} - z_{1P}}, \\ \delta_y(\theta) &= d_{yP} - \frac{M}{N} \left[\hat{x}_{1P} - \frac{z_{1P}(\hat{x}_{1P} - \hat{x}_{1K})}{z_{1P} - z_{1K}} \right] - \frac{z_{1P}(d_{yP} - d_{yK})}{z_{1P} - z_{1K}}, \\ \delta_z(\theta) &= d_{zQ} + \frac{M}{N} \left[\frac{\hat{y}_{1Q}(\hat{x}_{1K} - \hat{x}_{1P})}{z_{1P} - z_{1K}} - \frac{\hat{x}_{1Q}(\hat{y}_{1P} - \hat{y}_{1Q})}{z_{1Q} - z_{1P}} \right] - \frac{\hat{y}_{1Q}(d_{yK} - d_{yP})}{z_{1P} - z_{1K}} + \frac{\hat{x}_{1Q}(d_{xQ} - d_{xP})}{z_{1Q} - z_{1P}}, \\ \epsilon_x(\theta) &= \frac{d_{yK} - d_{yP}}{z_{1P} - z_{1K}} + \frac{\hat{x}_{1P} - \hat{x}_{1K}}{z_{1P} - z_{1K}} \cdot \frac{M}{N}, \\ \epsilon_y(\theta) &= \frac{d_{xQ} - d_{xP}}{z_{1Q} - z_{1P}} + \frac{\hat{y}_{1Q} - \hat{y}_{1P}}{z_{1Q} - z_{1P}} \cdot \frac{M}{N}, \\ \epsilon_z(\theta) &= \frac{M}{N}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中

$$\begin{aligned} M &= (d_{xQ} - d_{xP})(\hat{x}_{1K} - \hat{x}_{1Q})(z_{1P} - z_{1K}) + [(d_{yP} - d_{yK})(\hat{y}_{1K} - \hat{y}_{1Q}) + (d_{zK} - d_{zQ})(z_{1P} - z_{1K})](z_{1Q} - z_{1P}), \\ N &= (\hat{x}_{1K} - \hat{x}_{1Q})(\hat{y}_{1P} - \hat{y}_{1Q})(z_{1P} - z_{1K}) - (\hat{x}_{1K} - \hat{x}_{1P})(\hat{y}_{1K} - \hat{y}_{1Q})(z_{1Q} - z_{1P}), \\ d_{xP} &= x'_{P_t} - \hat{x}_{1P} - x_O, d_{yP} = y'_{P_t} - \hat{y}_{1P} - y_O, \end{aligned}$$

$$d_{xQ} = x'_Q - \hat{x}_{1Q} - x_O, d_{zQ} = z'_Q - \hat{z}_{1Q} - z_O, \\ d_{yK} = y'_{Kl} - \hat{y}_{1K} - y_O, d_{zK} = z'_{Kl} - \hat{z}_{1K} - z_O. \quad (12)$$

显然, N 出现在分母上, 不可以为零。因此, 需要合理排布三个点的位置。首先三个被测点的 z 坐标不能完全相同, 并且在转台运行每一步之后, 都要验证 N 是否等于零。假如 N 等于零, 可稍微变动角位移, 求解附近点的几何误差。

5 误差检测实验

针对某转台系统进行了误差检测实验, 测量系统图如图 4 所示。实验步骤如下:

1) 将三个球靶座固定在平台上表面, 成空间三角形。同时固定激光跟踪仪, 驱动转台以 20° 为步长旋转一周, 并在每个停止位分别检测三个球靶的坐标。然后变换跟踪仪位置, 重复如上操作。共需要进行四站跟踪仪检测。运用文献[9]中的方法, 获取被测量点的空间坐标。跟踪仪所测得的被测点初始坐标为 $P_0(1005.6648, -140.3849, -222.6797)$, $Q_0(1240.2676, -187.6319, -183.0147)$,

$K_0(1136.3720, -386.5078, -207.4099)$ 。

2) 利用最小二乘法获得三个被测点的平均回转轴线, 并将其设定为转台坐标系的 z 轴。设定 x 轴通过 Q 点的理想初始位置, 即 Q 点运动轨迹拟合圆上与 Q 对应的点 $Q_0(1240.2443, -187.6444, -182.6867)$, 转台坐标系就此确定。

3) 通过齐次坐标变换, 确定激光跟踪仪测量坐标系和转台坐标系的变换关系, 然后计算得到所有被测量点在转台坐标系下的坐标。

4) 利用本文给出的几何误差公式, 得到 6 项几何误差的检测结果, 如图 5 所示。

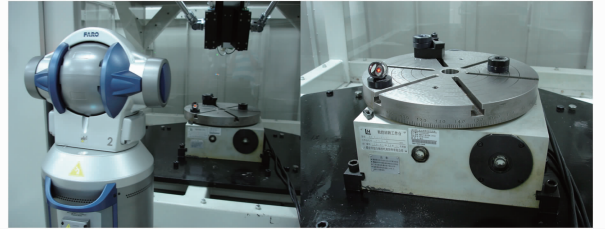


图 4 测量系统

Fig. 4 Setup of measurement system

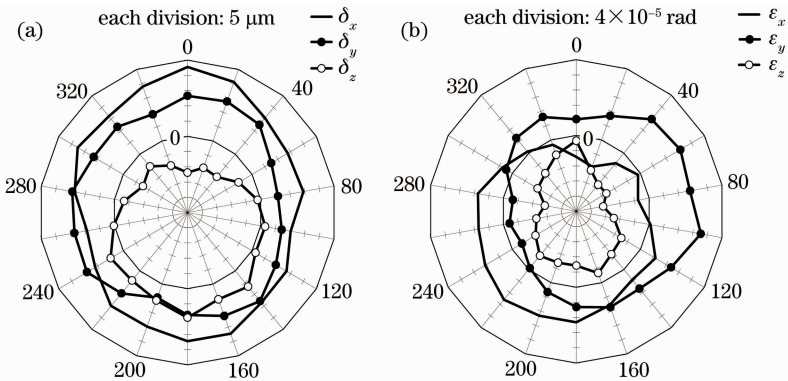


图 5 几何误差检测结果。(a)端跳误差和径跳误差; (b)角定位误差和偏转误差

Fig. 5 Measuring results of geometric error measurement. (a) Axial error and radial errors; (b) angular position error and tilt errors

下面通过对比实验来验证所提方法的有效性。球杆仪是公认的能够实现机床系统误差评估的有效工具。利用 QC10 球杆仪实现转台系统空间误差的评价, 具体原理如图 6 所示。将球杆仪底座固定在转台上, 球杆仪座上的小球中心点 C 的坐标为 $(121.7791, 87.5777, 59.2160)$; 另一端固定在转台旋转中心正上方的 O 点上。转台以 20° 为步长旋转一周, 并记录每一步球杆长度的变化量 ΔR 。

引起球杆长度变化量的主要因素是 C 点的空间误差向量 $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$ 和 O 点偏离转台中心的偏心量, 其中, 偏心量可以通过文献[16]中的最小二乘迭代加以修正。因此可认为引起球杆长度变化的

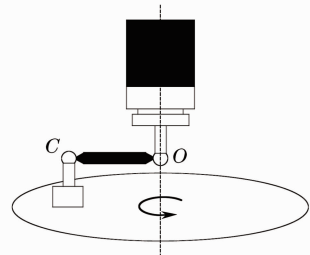


图 6 用球杆仪评估空间误差向量

Fig. 6 Testing volumetric error vector using DBB

主要因素就是 C 点的空间误差。由文献[17]可知, 空间误差与球杆长度为变化量之间的关系为

$$\Delta R = \frac{1}{R}(x\Delta x + y\Delta y + z\Delta z). \quad (13)$$

计算中所需要的误差向量 $[\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$ 可以通过(2)式计算得到,而(2)式中所需要的六项几何误差是通过图4中的激光跟踪仪检测系统检测得到的。图7为两种方法的实验结果对比,由球杆仪直接检测得到的球杆长度变化量(DBB)与通过空间误差计算得到的球杆长度变化量(LT)基本一致,在角位移为 60° 时偏差最大,为 $3.64 \mu\text{m}$ 。引起这些偏差的主要原因有:1)两种测量方法本身也都存在误差;2)转台本身的误差也存在重复性;3)(13)式是一个忽略了二阶以上高次项的近似公式,存在一定的误差。而且,相对于球杆几十微米的长度变化量, $3.64 \mu\text{m}$ 的偏差还是很小的,因此可以认为本文所提出的基本激光跟踪仪的转台系统几何误差检测方法是有有效的。

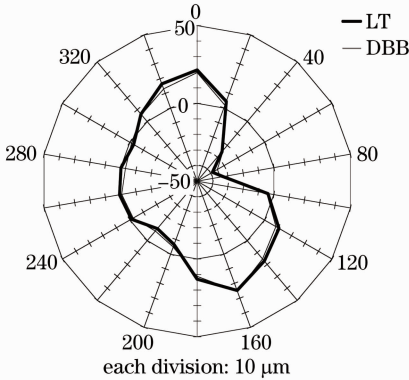


图7 两种方法的实验结果对比

Fig. 7 Comparison of the measuring results of the two methods

6 结 论

提出了一种基于激光跟踪仪的转台系统误差检测方法。在转台系统上选择不共线的三个测量点,驱动转台系统运动,利用基于激光跟踪仪的多站分时测量方法追踪并检测三个点的空间坐标。然后逆用转台系统误差模型,获得包含六项几何误差的方程组,最后给出各项几何误差的解析表达式,并依据表达式,给出测量系统布局的限制条件。此方法无需光路对准等复杂操作,操作简单、用时少,而且可以同时获得六项原始误差。此方法同样适用于导轨系统的几何误差检测,因此,能够适合于各种类型的多轴机床系统误差检测与补偿。

参 考 文 献

1 Zhang Hongtao, Yang Jianguo, Jiang Hui *et al.*. Real-time error compensation for the two turntable five-axis NC machine tools [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, **46**(21):

143~148

张宏韬,杨建国,姜辉等.双转台五轴数控机床误差实时补偿[J].*机械工程学报*,2010,**46**(21):143~148

2 W. T. Lei, Y. Y. Hsu. Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D probe-ball. Part I: design and modeling[J]. *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, 2002, **42**(10): 1153~1162

3 Yang Xingang, Huang Yumei, Liu Hongyan *et al.*. Research on high-precision compensation method of revolute joint with closed-loop feedback by circular grating [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, **19**(23): 2782~2786

杨新刚,黄玉美,刘鸿雁等.圆光栅闭环反馈回转关机高精度补偿方法研究[J].*机械工程学报*,2008,**19**(23):2782~2786

4 X. D. Lu, A. Jamalina. A new method for characterizing axis of rotation radial error motion: Part 1. Two-dimensional radial error motion theory[J]. *Precision Engineering*, 2011, **35**(1): 73~94

5 Lei Xianqing, Li Yan, Li Jishun *et al.*. Measurement techniques of cylindricity with three-point method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, **28**(5): 944~951

雷贤卿,李言,李济顺等.圆柱度的三点法测量技术[J].*仪器仪表学报*,2007,**28**(5):944~951

6 Huang Chunxia, Cao Qixin, Fu Zhuang *et al.*. Submicron radial runout error compensation method for the turntable in a wafer prealigner [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, **44**(9): 123~127

黄春霞,曹其新,付庄等.晶圆对心转台亚微米级径跳误差补偿方法[J].*机械工程学报*,2008,**44**(9):123~127

7 H. F. F. Castro. A method for evaluating spindle rotation errors of machine tools using a laser interferometer [J]. *Measurement*, 2008, **41**(5): 526~537

8 S. R. Park, T. K. Hoang, S. H. Yang. A new optical measurement system for determining the geometrical errors of rotary axis of a 5-axis miniaturized machine tool[J]. *J. Mech. Sci. & Technol.*, 2010, **24**(1): 175~179

9 Wang Jindong, Guo Junjie, Fei Zhigen *et al.*. Method of geometric error identification for numerical control machine tool based on laser tracker [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, **47**(14): 13~19

王金栋,郭俊杰,费致根等.基于激光跟踪仪的数控机床几何误差辨识方法[J].*机械工程学报*,2011,**47**(14):13~19

10 Zhang Zhenjiu, Hu Hong, Liu Xin. Measurement of geometric error of machine tool guideway system based on laser tracker[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0908002

张振久,胡泓,刘欣.基于激光跟踪仪的机床导轨系统误差检测[J].*中国激光*,2011,**38**(9):0908002

11 K. Umetsuk, R. Furutnair, S. Osawa *et al.*. Geometric calibration of a coordinate measuring machine using a laser tracking system [J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2005, **16**(2): 2466~2472

12 Li Zhidong, Jiang Yuesong, Sang Feng *et al.*. Movement error compensation in frequency scanning interferometry for absolute distance measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0314001

李志栋,江月松,桑峰等.频率扫描干涉法绝对测距中运动误差的补偿研究[J].*光学学报*,2011,**31**(3):0314001

13 Xia Wei, Hao Hui, Wang Feng *et al.*. Analysis and test for the dynamic performance of laser self-mixing interferometer based on phase modulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1208003

夏巍,郝辉,王峰等.相位调制型激光自混合干涉仪的动态特性分析及测试[J].*中国激光*,2011,**38**(12):1208003

14 Huang Lei, Ma Hong, Xu Wenhui. Application research of measuring the length of gauge blocks by laser interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100501

黄雷,马宏,徐文慧.用于测量量块尺寸的激光干涉测量方法研究[J].*光学学报*,2011,**31**(s1):s100501

15 Li Liyan, Wang Jian, Han Chunyang *et al.*. Integration single-

- frequency laser interferometer used to nanometer measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0408001
- 李立艳, 王 坚, 韩春阳等. 用于纳米测量的集成化单频激光干涉仪[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0408001
- 16 Shang Peng. The DBB-Based Errors Modling and Measurement Method for 5-Axis High Speed CNC Machine Tools[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. 26~28
- 商 鹏. 基于球杆仪的高速五轴数控机床综合误差建模与检测方法[D]. 天津: 天津大学, 2008. 26~28
- 17 Zhang Hu, Zhou Yunfei, Tang Xiaoqi *et al.*. Error identification and compensation of CNC machining centers using renishaw ball bar [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, **38**(10): 108~113
- 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, **38**(10): 108~113

栏目编辑:何卓铭