

基于激光跟踪仪的机床导轨系统误差检测

张振久¹ 胡 泓¹ 刘 欣²

(¹哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)
²九江学院信息学院, 江西 九江 332005)

摘要 针对机床导轨系统的误差补偿问题, 提出一种基于激光跟踪仪的机床导轨误差检测方法。利用齐次坐标变换的方法建立导轨系统的误差模型, 给出 6 项原始误差与空间误差的关系。在导轨系统的运动平台上选取不共线的 3 点, 并利用激光跟踪仪检测出 3 点的空间坐标, 然后逆用导轨系统误差模型, 建立包含所有机床导轨系统原始误差的方程组, 进而求得所有空间误差。实验中, 分别利用误差检测方法和传统九线法检测导轨系统的偏摆误差, 二者的检测结果一致性非常好, 且最大差异只有 0.74", 证明了该方法的有效性。相对于传统方法, 基于激光跟踪仪的机床导轨误差检测方法操作简单、易于实现。

关键词 测量; 导轨系统; 误差模型; 齐次变换; 误差检测; 激光跟踪仪

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0908002

Measurement of Geometric Error of Machine Tool Guideway System Based on Laser Tracker

Zhang Zhenjiu¹ Hu Hong¹ Liu Xin²

(¹Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China)
²School of Information Science and Technology, Jiujiang University,
Jiujiang, Jiangxi 332005, China)

Abstract A method for measuring geometric error components based on laser tracker is proposed for error compensation of machine tool guideway system. Homogeneous transformation is used to establish the mathematical error model of the guideway system which can comprehensively describe the relationship between the geometric error components and the volumetric errors. Three noncollinear points are selected from the stage of guideway system, and the spatial coordinates of these points are collected by laser tracker. Then the mathematical error model is applied inversely to establish a system of equations including all the geometric error components of guideway system, and finally the error components can be obtained by solving this system of equations. The measuring results achieved by the proposed method are in coincidence with those achieved by traditional nine-line method, and the difference is smaller than 0.74", which validates the effectiveness of this method. Compared with the traditional methods, the laser-tracker-based geometric error components measuring method for guideway system is easy to implement.

Key words measurement; guideway system; error model; homogeneous transformation; error measurement; laser tracker

OCIS codes 120.0120; 120.1880; 120.4640

收稿日期: 2011-03-21; 收到修改稿日期: 2011-04-26

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, 博士, 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)

1 引 言

误差补偿是提高机床系统运动精度的有效方法^[1,2]。作为机床传动系统的基本组件和关键组件,导轨系统的运动精度对整个机床传动系统的精度有重要影响,因此,对导轨系统进行误差建模和误差检测,进而实现精度补偿有重要意义^[3]。

由于空间物体拥有 6 个自由度,因此导轨系统的平台运动时会产生 6 项原始误差。研究人员基于齐次坐标变换和多体系统理论建立了误差模型^[3~5],可以系统地分析各项原始误差对总的空间误差的影响。因而,原始误差的检测是进行误差补偿的前提。激光干涉技术是公认的高精度位移检测方法^[6,7],研究人员开发了二十二线法、十五线法、十四线法、九线法和体对角线法等多种基于激光干涉仪的位移测量法来实现 6 项原始误差的检测^[8~13]。但在实际测量中,激光干涉仪的调试和对准需要操作人员具有丰富的经验和技巧,较繁琐费时,而且九线法需要使用带沃拉斯顿棱镜等特殊器件的多功能激光干涉仪。

激光跟踪仪是一种新型坐标测量仪器,基于球坐标测量系统,它可以对空间坐标进行检测,且具有精度高、操作简单等特点,在工业检测领域的应用越来越广泛^[14]。有研究人员将其用于机器人和关节式坐标测量机的误差检测,结合运动学模型,实现误差补偿^[15,16]。也有研究人员将激光跟踪仪用于机床系统的误差检测^[17],但其作用与激光干涉仪相当,仅用于进行长度测量,且只实现了轴向定位误差的检测,并未完全发挥激光跟踪仪的全部功能。本文提出一种基于激光跟踪仪的误差检测方法,可以方便地检测导轨系统的 6 项原始误差。此方法简单有效,而且很容易推广到多轴运动平台。

2 导轨系统误差的数学模型

在导轨系统的底座基准面上建立参考坐标系 $Oxyz$,在移动平台上建立平台坐标系 $O_x x_x y_x z_x$,如图 1 所示。平台坐标系随同平台一起运动,且其坐标轴 x_x, y_x, z_x 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,平台在 x 方向的平移运动会产生 6 项误差,并且这 6 项误差随着位移的变化而变化,所以每项误差都可以看作位移 x 的函数,它们分别是定位误差 $\delta_x(x)$ 、水平直线度误差 $\delta_y(x)$ 、竖直直线度误差 $\delta_z(x)$ 、滚转误

差 $\epsilon_x(x)$ 、俯仰误差 $\epsilon_y(x)$ 和偏摆误差 $\epsilon_z(x)$ 。

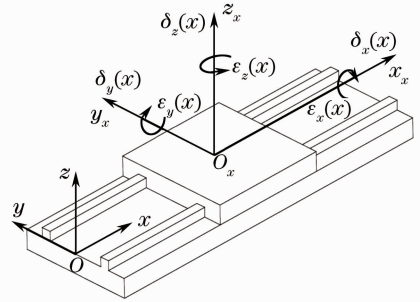


图 1 导轨系统中存在的误差项

Fig. 1 Geometric error components of guideway system

由于平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变换,因此,误差向量的数学模型可以通过齐次坐标变换得到^[3]。

三维空间的刚体运动可以用 4×4 维的齐次坐标变换矩阵来表示

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = TX' = T \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & P \\ f & \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 R 为 3×3 旋转变换矩阵, P 为 3×1 平移向量, f 为 1×3 透视变换向量, ω 是齐次坐标变换表达式的比例系数。 $[x, y, z, 1]^T$ 是某点在参考坐标系下的坐标, $[x', y', z', 1]^T$ 是此点在刚体坐标系下的坐标。在本文的运动平台误差分析中, $f = [0, 0, 0]$, $\omega = 1$ 。齐次坐标变换矩阵需要考虑误差运动。

假设平台位于初始位置时,平台坐标系的原点 O_x 在参考坐标系中的齐次坐标为 $[x_0, y_0, z_0, 1]^T$ 。当平台运动位移为 x 时,平台坐标系在 x 轴方向的坐标为 $x_0 + x + \delta_x(x)$,在 y 轴方向的坐标为 $y_0 + \delta_y(x)$,在 z 轴方向的坐标为 $z_0 + \delta_z(x)$ 。所以平移变换矩阵为

$$T_x(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 + x + \delta_x(x) \\ 0 & 1 & 0 & y_0 + \delta_y(x) \\ 0 & 0 & 1 & z_0 + \delta_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

同时,平台坐标系还分别绕其本身 3 个坐标轴 x_x, y_x, z_x 转动 $\epsilon_x(x), \epsilon_y(x), \epsilon_z(x)$ 角度。由于 3 个角度都是微小量,转动的次序对变换结果影响很小,随意选择一个转动次序即可。总的空间变换顺序为:平台坐标系先平移,然后分别绕 3 个轴进行转动。所以平台坐标系绕 x, y, z 轴转动的齐次变换矩阵分别为

$$\begin{cases} \mathbf{R}_x(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon_x(x) & -\sin \varepsilon_x(x) & 0 \\ 0 & \sin \varepsilon_x(x) & \cos \varepsilon_x(x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_y(x) = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_y(x) & 0 & \sin \varepsilon_y(x) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \varepsilon_y(x) & 0 & \cos \varepsilon_y(x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_z(x) = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_z(x) & -\sin \varepsilon_z(x) & 0 & 0 \\ \sin \varepsilon_z(x) & \cos \varepsilon_z(x) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

总变换矩阵为

$${}^r\mathbf{T}_x(x) = \mathbf{T}_x(x) \times \mathbf{R}_z(x)\mathbf{R}_y(x)\mathbf{R}_x(x). \quad (4)$$

在计算过程中, $\varepsilon_x(x)$ 、 $\varepsilon_y(x)$ 、 $\varepsilon_z(x)$ 的单位为弧度, 可以认为是微小量, 近似处理为 $\sin \varepsilon_x(x) \approx \varepsilon_x(x)$, $\sin \varepsilon_y(x) \approx \varepsilon_y(x)$, $\sin \varepsilon_z(x) \approx \varepsilon_z(x)$, $\cos \varepsilon_x(x) \approx \cos \varepsilon_y(x) \approx \cos \varepsilon_z(x) \approx 1$ 。而且所有高阶小量可忽略。

最后, 总变换矩阵为

$${}^r\mathbf{T}_x = \mathbf{T}_x(x) \times \mathbf{R}_z(x)\mathbf{R}_y(x)\mathbf{R}_x(x) = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(x) & \varepsilon_y(x) & x_0 + x + \delta_x(x) \\ \varepsilon_z(x) & 1 & -\varepsilon_x(x) & y_0 + \delta_y(x) \\ -\varepsilon_y(x) & \varepsilon_x(x) & 1 & z_0 + \delta_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

因此, 参考坐标系与平台坐标系之间的坐标转换关系为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = {}^r\mathbf{T}_x(x)\mathbf{X}_x = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(x) & \varepsilon_y(x) & x_0 + x + \delta_x(x) \\ \varepsilon_z(x) & 1 & -\varepsilon_x(x) & y_0 + \delta_y(x) \\ -\varepsilon_y(x) & \varepsilon_x(x) & 1 & z_0 + \delta_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_x \\ y_x \\ z_x \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

理想情况下, 即各项原始误差为 0 的情况下, 坐标转换关系式为

$$\begin{bmatrix} x_{\text{ideal}} \\ y_{\text{ideal}} \\ z_{\text{ideal}} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 + x \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_x \\ y_x \\ z_x \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

则空间误差可以由(6)式减去(7)式得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta_x(x) \\ \Delta_y(x) \\ \Delta_z(x) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\varepsilon_z(x) & \varepsilon_y(x) & \delta_x(x) \\ \varepsilon_z(x) & 0 & -\varepsilon_x(x) & \delta_y(x) \\ -\varepsilon_y(x) & \varepsilon_x(x) & 0 & \delta_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_x \\ y_x \\ z_x \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

即

$$\begin{cases} \Delta_x(x) = -y_x\varepsilon_z(x) + z_x\varepsilon_y(x) + \delta_x(x) \\ \Delta_y(x) = x_x\varepsilon_z(x) - z_x\varepsilon_x(x) + \delta_y(x) \\ \Delta_z(x) = -x_x\varepsilon_y(x) + y_x\varepsilon_x(x) + \delta_z(x) \end{cases} \quad (9)$$

空间误差不仅与平台运动误差有关, 还与目标点在刚体坐标系内的坐标有关。

3 激光跟踪仪测量空间坐标的原理

激光跟踪仪是一种基于球坐标系统的新型坐标测量系统, 它的工作原理如图 2 所示^[18]。激光跟踪仪内置激光发射器发出的激光束, 通过分光镜后照射到双轴跟踪转镜上, 经由跟踪转镜反射后进入带有角锥棱镜的光靶球内。角锥棱镜将入射光平行反射回来, 经双轴跟踪转镜反射后进入分光镜: 一部分光束直接进入平面位置敏感探测器(PSD), 它将出射光与入射光的偏移量转换成跟踪误差信号, 驱动两个电动机分别驱动跟踪转镜, 调整激光束的发射角, 实现对光靶球的跟踪, 同时用编码器实现光靶球的空间方位角的检测; 另一部分激光束进入干涉分光镜并且通过光电元件和计数器完成光靶球与跟踪仪之间距离的精确测量。

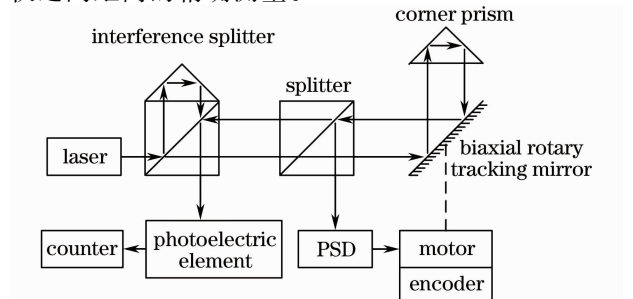


图 2 激光跟踪仪原理

Fig. 2 Principle of laser tracker

激光跟踪仪的球坐标系如图 3 所示。光靶球心 $P(x, y, z)$ 方位角 α 和俯仰角 β 由两个角度编码器分别测出, P 点与原点的距离 l 通过激光干涉仪测量, 有

$$\begin{cases} x = l \sin \beta \cos \alpha \\ y = l \sin \beta \sin \alpha \\ z = l \cos \beta \end{cases} \quad (10)$$

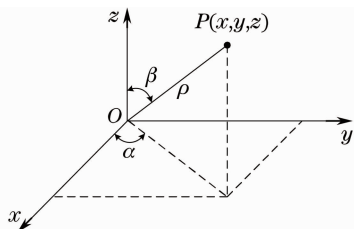


图 3 激光跟踪仪的球坐标系

Fig. 3 Spheric coordinate system of laser tracker

激光跟踪仪测量速度快、精度高、测量范围大, 被称为移动的三坐标测量机。可以用它来测量静止目标, 例如自由曲面的面型描绘、零件的形位误差检测, 也可以跟踪坐标轨迹, 例如跟踪检测机械系统某点的运动、检测运动误差。

4 导轨系统误差检测方法

利用一种基于激光跟踪仪的简单方法, 实现运动平台的 6 项原始误差检测。由激光跟踪仪的功能知道, 它可以检测静止目标的尺寸, 也可以跟踪点的运动, 测量定位精度。如果将二者结合, 就可以实现在任何时刻的平台位姿检测, 同样也可以检测平台的位姿误差, 即 6 项原始精度检测。

如图 4 所示, 在平台上选 3 个定点 P, Q, K , 它们在平台坐标系下的坐标分别为 (x_{xP}, y_{yP}, z_{zP}) 、 (x_{xQ}, y_{yQ}, z_{zQ}) 和 (x_{xK}, y_{yK}, z_{zK}) 。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 $[x_0, y_0, z_0, 1]^T$ 。

首先以 P 点为例进行说明。

在 t 时刻, 平台运动到图 4 所示位置, 设运动距离为 x 。在理想状态下, 即不存在运动误差, 此时平台体系原点 O_1 在参考坐标系下的坐标为 $[x_{0t}, y_{0t}, z_{0t}, 1]^T$,

$$\begin{bmatrix} x_{0t} \\ y_{0t} \\ z_{0t} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

容易得到理想状态下 P 点在参考坐标系下的坐标

$$\begin{bmatrix} x_{Pt} \\ y_{Pt} \\ z_{Pt} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{0t} \\ 0 & 1 & 0 & y_{0t} \\ 0 & 0 & 1 & z_{0t} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{xP} \\ y_{yP} \\ z_{zP} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 + x \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{xP} \\ y_{yP} \\ z_{zP} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

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 $[x'_{Pt}, y'_{Pt}, z'_{Pt}, 1]^T$ 。

设导轨系统的空间误差 $\Delta(x)$ 在 P 点处的 3 个分量为 $\Delta_x(P)$ 、 $\Delta_y(P)$ 和 $\Delta_z(P)$, 则

$$\begin{bmatrix} \Delta_x(P) \\ \Delta_y(P) \\ \Delta_z(P) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_{Pt} \\ y'_{Pt} \\ z'_{Pt} \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{Pt} \\ y_{Pt} \\ z_{Pt} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_{Pt} \\ y'_{Pt} \\ z'_{Pt} \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 + x \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{xP} \\ y_{yP} \\ z_{zP} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_{Pt} - x_{xP} - x_0 - x \\ y'_{Pt} - y_{yP} - y_0 \\ z'_{Pt} - z_{zP} - z_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

对 P 点的空间误差应用(9)式, 可得方程组

$$\begin{cases} \Delta_x(P) = x'_{Pt} - x_{xP} - x_0 - x = \\ \quad - y_{yP} \epsilon_z(x) + z_{zP} \epsilon_y(x) + \delta_x(x) \\ \Delta_y(P) = y'_{Pt} - y_{yP} - y_0 = \\ \quad x_{xP} \epsilon_z(x) - z_{zP} \epsilon_x(x) + \delta_y(x) \\ \Delta_z(P) = z'_{Pt} - z_{zP} - z_0 = \\ \quad - x_{xP} \epsilon_y(x) + y_{yP} \epsilon_x(x) + \delta_z(x) \end{cases} \quad (14)$$

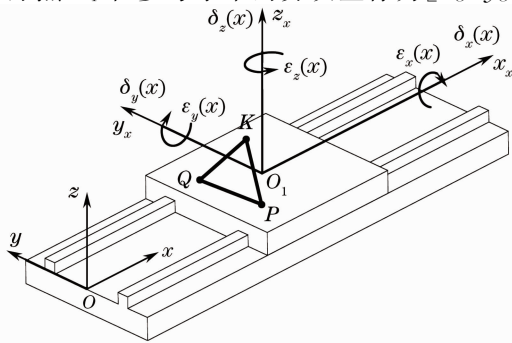


图 4 平台运动精度检测

Fig. 4 Geometric error components measurement of platform

对 Q 点和 K 点应用上述方法,可得到方程组

$$\begin{cases} \Delta_x(Q) = x'_{Qt} - x_{xQ} - x_O - x = \\ \quad - y_{xQ}\epsilon_z(x) + z_{xQ}\epsilon_y(x) + \delta_x(x) \\ \Delta_y(Q) = y'_{Qt} - y_{xQ} - y_O = \\ \quad x_{xQ}\epsilon_z(x) - z_{xQ}\epsilon_x(x) + \delta_y(x) \\ \Delta_z(Q) = z'_{Qt} - z_{xQ} - z_O = \\ \quad - x_{xQ}\epsilon_y(x) + y_{xQ}\epsilon_x(x) + \delta_z(x) \\ \Delta_x(K) = x'_{Kt} - x_{xK} - x_O - x = \\ \quad - y_{xK}\epsilon_z(x) + z_{xK}\epsilon_y(x) + \delta_x(x) \\ \Delta_y(K) = y'_{Kt} - y_{xK} - y_O = \\ \quad x_{xK}\epsilon_z(x) - z_{xK}\epsilon_x(x) + \delta_y(x) \\ \Delta_z(K) = z'_{Kt} - z_{xK} - z_O = \\ \quad - x_{xK}\epsilon_y(x) + y_{xK}\epsilon_x(x) + \delta_z(x) \end{cases}$$

将上述所有方程写成矩阵形式,

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_{xP} & -y_{xP} \\ 0 & 1 & 0 & -z_{xP} & 0 & x_{xP} \\ 0 & 0 & 1 & y_{xP} & -x_{xP} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & z_{xQ} & -y_{xQ} \\ 0 & 1 & 0 & -z_{xQ} & 0 & x_{xQ} \\ 0 & 0 & 1 & y_{xQ} & -x_{xQ} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & z_{xK} & -y_{xK} \\ 0 & 1 & 0 & -z_{xK} & 0 & x_{xK} \\ 0 & 0 & 1 & y_{xK} & -x_{xK} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x(x) \\ \delta_y(x) \\ \delta_z(x) \\ \epsilon_x(x) \\ \epsilon_y(x) \\ \epsilon_z(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_{Pt} - x_{xP} - x_O - x \\ y'_{Pt} - y_{xP} - y_O \\ z'_{Pt} - z_{xP} - z_O \\ x'_{Qt} - x_{xQ} - x_O - x \\ y'_{Qt} - y_{xQ} - y_O \\ z'_{Qt} - z_{xQ} - z_O \\ x'_{Kt} - x_{xK} - x_O - x \\ y'_{Kt} - y_{xK} - y_O \\ z'_{Kt} - z_{xK} - z_O \end{bmatrix} \quad (15)$$

可以证明,只要 P、Q 和 K 点不在同一条直线上,系数矩阵的秩为 6。因此,可适当选取此方程组中的 6 个方程,组成新方程组,而且新方程组有唯一解,此解即是运动位移为 x 时的导轨系统空间误差。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。

5 实验及数据分析

为检验上述方法的可行性,以性能较好的商用 Faro ION™ 型激光跟踪仪对某运动平台的单轴运动进行检测,6 项原始误差的检测结果如图 5 所示。

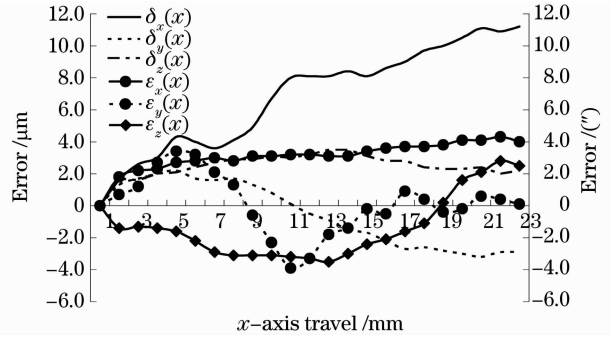


图 5 原始误差检测结果

Fig. 5 Measuring results of Geometric error components measurement

为验证该方法的有效性,采用激光干涉仪再次对单轴运动平台进行检测。检测原理借鉴九线法中的偏摆误差检测^[11]。将两种方法所获取的偏摆误差进行对比,如图 6 所示。两者具有相同的趋势,且检测结果最大的差别只有 0.74",说明偏摆误差的检测是有效的。由于本文是利用综合误差模型同时检测 6 项原始误差,故偏摆误差检测的有效性可以间接说明这一基于激光跟踪仪的原始误差检测方法的有效性。

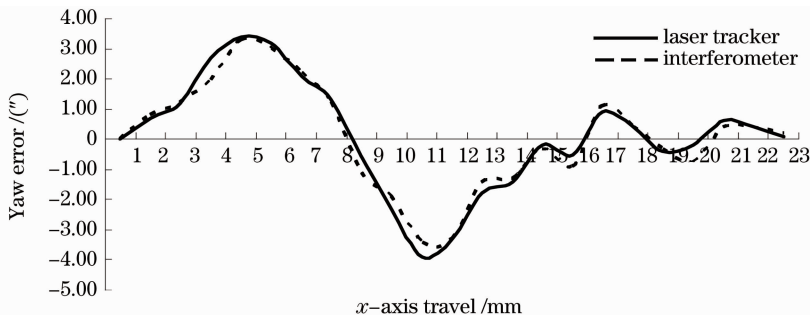


图 6 两种方法检测得到的偏摆误差

Fig. 6 Comparison of the measuring results of yaw error obtained by the two methods

6 结 论

原始误差检测是机床导轨系统误差补偿的基础。提出一种可检测出机床导轨系统 6 项原始误差的三线法。首先利用齐次坐标变换给出导轨系统的误差模型,分析了原始误差与空间误差的关系。然后利用激光跟踪仪可精确检测空间三坐标这一特点,检测出运动平台的位姿数据。最后逆用误差模型,计算出导轨系统的 6 项原始误差。实验中所检测的偏摆误差与九线法所检测的结果一致性非常好,最大偏差只有 $0.74''$,证明本文所提出的基于激光跟踪仪的机床导轨系统的误差检测方法的有效性。此方法简单有效,而且很容易推广到多轴运动平台和多轴机床的误差检测。

参 考 文 献

- Cao Rui, Zhang Bin, Feng Qibo *et al.*. A method for roll-angle measurement in multi-degree-of-freedom measuring system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2344~2348
曹睿,张斌,冯其波等.多自由度误差同时测量中的滚转角测量方法[J].*光学学报*, 2008, **28**(12): 2344~2348
- Zhu Jia, Li Xingfei, Tan Wenbin *et al.*. Method of geometric error detection for measuring machine based on laser interferometer[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, **46**(10): 25~30
朱嘉,李醒飞,谭文斌等.基于激光干涉仪的测量机几何误差检定技术[J].*机械工程学报*, 2010, **46**(10): 25~30
- Tong Hengchao, Yang Jianguo, Liu Guoliang *et al.*. Homogeneous transformation modeling for volumetric errors of a machine tool guidedway system and its application[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2005, **39**(9): 1400~1403
童恒超,杨建国,刘国良等.机床导轨系统空间误差的齐次变换建模及应用[J].*上海交通大学学报*, 2005, **39**(9): 1400~1403
- Jae Ha Lee, Yu Liu, Seung-Han Yang. Accuracy improvement of miniaturized machine tool: geometric error modeling and compensation[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, **46**(12): 1508~1516
- Ren Yongqiang, Yang Jianguo. Study on decoupling of synthesis error compensation for a 5-axis CNC machine tool[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2004, **40**(2): 55~59
任永强,杨建国.五轴数控机床综合误差补偿解耦研究[J].*机械工程学报*, 2004, **40**(2): 55~59
- Liang Jing, Long Xingwu, Zhang Bin *et al.*. Absolute distance measurement by using $117\ \mu\text{m}$ synthetic wavelength[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2947~2951
梁晶,龙兴武,张斌等.用 $117\ \mu\text{m}$ 合成波长实现绝对距离干涉测量[J].*光学学报*, 2010, **30**(10): 2947~2951
- Liu Ke, Li Yanqiu. High precision alignment of phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1845~1849
刘克,李艳秋.相移点衍射干涉仪的高精度对准[J].*中国激光*, 2010, **37**(7): 1845~1849
- G. Zhang, R. Ouyang, B. Lu *et al.*. A displacement method for machine geometry calibration[J]. *Ann. CIRP*, 1988, **37**(1): 515~518
- Guiquan Chen, Jingxia Yuan, Jun Ni. A displacement measurement approach for machine geometric error assessment[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011, **41**(1): 149~161
- Fan Jinwei, Tian Yue, Song Guorong *et al.*. Technology of NC machine error parameter identification based on fourteen displacement measurement line[J]. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 2000, **26**(2): 11~15
范晋伟,田越,宋国荣等.基于 14 条位移线测量法的数控机床误差参数辨识技术[J].*北京工业大学学报*, 2000, **26**(2): 11~15
- Liu Youwu, Liu Libing, Zhao Xiaosong *et al.*. Investigation of error compensation technology for NC machine tool[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 1998, **9**(12): 48~52
刘又午,刘丽冰,赵小松等.数控机床误差补偿技术研究[J].*中国机械工程*, 1998, **9**(12): 48~52
- Charles Wang. Laser vector measurement technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors. Part I: basic theory[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71**(10): 3933~3937
- John Janeczko, Bob Griffin, Charles Wang. Laser vector measurement technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors. Part II: experimental verification[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71**(10): 3938~3941
- Zhang Fumin, Qu Xinghua, Dai Jianfang *et al.*. A method of precision evaluation for field large-scale measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2159~2163
张福民,曲兴华,戴建芳等.一种现场大尺寸测量精度的评价方法[J].*光学学报*, 2008, **28**(11): 2159~2163
- Ren Yongjie, Zhu Jigui, Yang Xueyou *et al.*. Method of robot calibration based on laser tracker[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, **43**(9): 195~200
任永杰,郝继贵,杨学友等.利用激光跟踪仪对机器人进行标定的方法[J].*机械工程学报*, 2007, **43**(9): 195~200
- Yu Liandong, Cheng Wentao, Fei Yetai. Parameter calibration method for an articulated coordinate measuring machine with laser tracker[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2009, **39**(12): 1329~1332
于连栋,程文涛,费业泰.基于激光跟踪仪的关节式坐标测量机参数标定[J].*中国科学技术大学学报*, 2009, **39**(12): 1329~1332
- Yan Yonggang, Ouyang Jianfei, Yang Hongguo *et al.*. Calibration of laser tracker and its application in detection of machine tool[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(S1): 158~161
闫勇刚,欧阳健飞,杨红果等.激光跟踪仪校准技术及在机床检测中的应用[J].*红外与激光工程*, 2008, **37**(S1): 158~161
- Zhang Chunfu. Study on the Measuring Technique of Thrust Line of Solid Rocket Motor with Laser Tracker[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. 13~15
张春富.基于激光跟踪仪的固体火箭发动机推力线测量技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007. 13~15