第 35 卷第 4 期 兵 工 学 报 Vol. 35 No. 4
2014 年 4 月 ACTA ARMAMENTARII Apr. 2014

基于多体系统理论的精密检测平台空间误差建模与补偿

张东旭，杨平，杨峰，王詹帅，谢银辉，郭隐彪
(厦门大学 机电工程系，福建 厦门 361005)

摘要：针对大口径光学元件精密检测平台的工作特点及影响其空间误差的各项几何误差因素，运用多体系统理论，用低序体阵列描述多体系统拓扑结构，建立一种空间误差数学模型。综合应用激光干涉仪、球杆仪和激光位移传感器等仪器设备，提出大口径光学元件精密检测平台各项几何误差和空间误差的测量方法，并对模型中所涉及的各项几何误差进行了系统分析和全面测量，对空间误差进行补偿。误差补偿实验证明所提模型正确有效，将空间误差从补偿前 −70.01 ~ 22.14 μm 降低到补偿后 −4.22 ~ 5.8 μm，大大提高了精密检测平台的测量精度。

关键词：仪器仪表技术；精密检测平台；多体系统理论；空间误差；模型；测量方法；补偿
中图分类号：TG743 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-1093(2014)04-0501-08
DOI：10.3969/j.issn.1000-1093.2014.04.011

Volumetric Error Modeling and Compensation of Precision Measuring Platform Based on Multi-system Theory

ZHANG Dong-xu, YANG Ping, YANG Feng, WANG Zhan-shuai, XIE Yin-hui, GUO Yin-biao
(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract: A volumetric error model is proposed according to the working characteristics and the geometric errors of a large-size optical element precision measuring platform. The volumetric error model is based on multi-system theory, and the topological structures of the multi-system theory are described by the number arrays of low-order body. To testify the volumetric error model, a new combined measurement experiment by the application of laser interferometer, double-ball bar, laser displacement sensor and other relative instruments is conducted for measuring the geometric and volumetric errors of the measuring platform before and after error compensation. The error compensation experiments show that the volumetric error is reduced from −70.01 ~ 22.14 μm to −4.22 ~ 5.8 μm, which also reflects the validity of the volumetric error model.

Key words: apparatus and intruments technology; precision measuring platform; multi-system theory; volumetric error; model; measuring method; compensation

0 引言

大口径高精度光学元件，特别是非球面元件，已经广泛用于航空航天、天文及惯性约束聚变(ICF)的巨型激光装置，与此同时，对光学元件的面形精度和表面粗糙度等都提出了很高的要求[1-3]。在制造

收稿日期：2013-06-18
基金项目：国家自然科学基金项目(51075343)；福建省自然科学基金项目(2012J05098)
作者简介：张东旭(1986—)，男，博士研究生。E-mail：470643802@qq.com；
杨平(1981—)，男，讲师。E-mail：yangp@xmu.edu.cn；
郭隐彪(1962—)，男，教授，博士生导师。E-mail：guoyb@xmu.edu.cn

过程中,为了达到各项技术参数的要求,必须经过反复检测、反馈面形精度,从而指导修正和补偿加工过程。

目前在大口径高精度光学元件检测领域,尤其在粗磨、精磨成形阶段,三坐标检测平台应用广泛并发挥着重要作用。为了使检测结果能够准确地指导补偿加工,对检测平台自身的空间误差提出了更高要求,很多学者对误差建模进行了深入研究。粟时平[4]运用多体系统运动学理论建立了数控机床的综合空间误差数学模型,具有一定的通用性;李岩等[5]在对三轴转台的各方面误差因素分析的基础上,对其几何误差进行建模,探讨了误差的运动规律;刘延斌等[6]在多体系统理论基础上,提出了杆、副坐标变换矩阵和杆、副误差变换矩阵的概念及描述方法,为误差建模提供了方便;洪振宇等[7]提出一种基于球杆仪检测信息的运动学标定方法,侧重研究了其中三自由度并联机构的误差建模和参数辨识问题,取得较好效果;贺甲等[8]应用休斯敦方法对四自由度机械手建立了误差模型,并分析了机械手的各项误差源。对比各种误差建模方法,多体系统理论得到了成功应用,在该方面有着独特的理论优势。但是,目前研究主要集中在数控机床和机械手的误差建模领域,对精密检测平台的研究较少,虽然对检测平台空间误差建模有一定的借鉴和指导意义,但是检测平台毕竟有着与数控机床和机械手不同的特点和要求。另外,文献中对如何测量得到各项几何误差值和空间误差值的研究较少,不易于直接进行工程借鉴。

本文基于多体系统理论,结合大口径光学元件精密检测平台的特点,对其空间误差进行建模,并提出了各项几何误差的测量方案以及空间误差的测量方法,误差补偿实验证明所提模型的有效性。

1 空间误差模型建立

大口径光学元件精密检测平台主要由检测系统、传动系统、工作台和控制系统等组成。如图1所示,传动系统由X轴、Y轴、Z轴组成,由直线电机驱动,其中X轴、Y轴最大行程均为400 mm,Z轴最大行程150 mm. 检测过程中,通过控制系统控制各轴联动以完成规划的检测轨迹,本文主要对三轴联动运行时空间定位精度进行研究。

1.1 多体系统理论误差建模基本原理

1.1.1 拓扑结构及其低序体阵列描述

基于多体系统理论的误差建模方法,将精密检

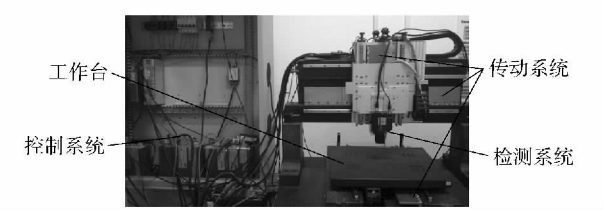


图1 大口径光学元件精密检测平台

Fig. 1 Precision measuring platform for large-size optical elements

测平台看作是多体系统[9],用拓扑结构对该多体系统进行高度概括和提炼。目前常用的描述多体系统拓扑结构的方法有2种:1)基于图论的描述方法;2)用低序体阵列进行描述的方法[4]。本文采用后者。

如图2所示多体系统。

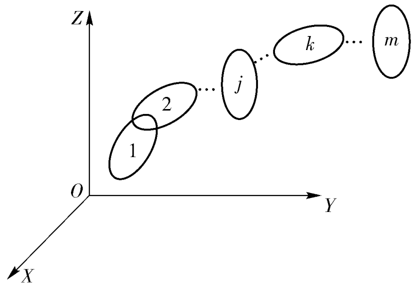


图2 多体系统拓扑结构

Fig. 2 Topological structures based on multi-system theory

图2中惯性参考系$OXYZ$为B_0体,选取一个体为B_1体,然后沿远离B_1体方向按照自然数增长序列,从一个分支到另一个分支依次进行编号。用来描述多体系统拓扑结构的低序体阵列可通过(1)式[10]表示:

$$L^n(k)=j, \tag{1}$$

式中:L为低序体算子;k,j为体的代号,并称B_k体为B_j体的n阶高序体。其满足

$$L^n(k)=L[L^{n-1}(k)],L^0(k)=k. \tag{2}$$

根据上述定义,可以计算出图2多体系统的各阶低序体阵列,进而可以将多体系统的任何一个体通过低序体序列追溯到惯性参考系中。

1.1.2 运动变换矩阵

多体系统中各体之间存在相对静止和相对运动2种状态,考虑精密检测平台实际工作特点,文中重点讨论平动和转动2种基本运动形式。

任意平动可以分解为沿X轴、Y轴、Z轴的基本平移运动,B_k体固连坐标系$O_kx_ky_kz_k$可以由B_j体固

连坐标系 $O_j x_j y_j z_j$ 沿矢量 $\boldsymbol{P} = x_{kj} + y_{kj} + z_{kj}$ 平动得到，则 $O_k x_k y_k z_k$ 至 $O_j x_j y_j z_j$ 的变换矩阵为

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{T}}(x,y,z) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{kj} \\ 0 & 1 & 0 & y_{kj} \\ 0 & 0 & 1 & z_{kj} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{3}$$

B_k 体相对于其相邻低序 B_l 体的理想转动等价于 B_k 体固连坐标系 $O_k x_k y_k z_k$ 相对于 B_l 体固连坐标系 $O_l x_l y_l z_l$ 的转动。任何复杂的转动都可以分解成绕 X 轴、Y 轴、Z 轴的转动。此处以坐标系 $O_k x_k y_k z_k$ 绕坐标系 $O_l x_l y_l z_l$ 的 x 轴转动为例，其坐标变换矩阵为

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{R}}(x,\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{4}$$

式中：α 为坐标系 $O_k x_k y_k z_k$ 相对于坐标系 $O_l x_l y_l z_l$ 的欧拉角。

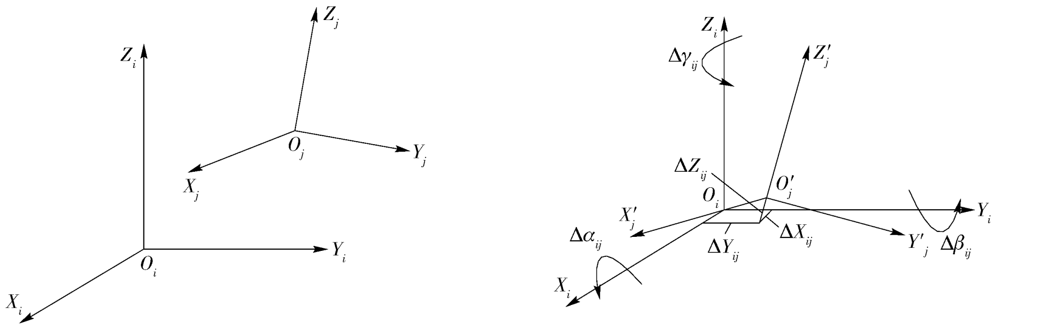
当相邻体之间既有平动又有转动时，用合成运动特征矩阵表示如下：

$$\boldsymbol{T}_{ij} = \boldsymbol{T}_{ij}(R)\boldsymbol{T}_{ij}(M) = \begin{pmatrix} \cos\beta_{ij}\cos\gamma_{ij} & -\cos\beta_{ij}\sin\gamma_{ij} & \sin\beta_{ij} & x_{ij} \\ \cos\beta_{ij}\sin\gamma_{ij} + \sin\alpha_{ij}\sin\beta_{ij}\cos\gamma_{ij} & \cos\alpha_{ij}\cos\gamma_{ij} - \sin\alpha_{ij}\sin\beta_{ij}\sin\gamma_{ij} & -\sin\alpha_{ij}\cos\beta_{ij} & y_{ij} \\ \sin\beta_{ij}\sin\gamma_{ij} - \cos\alpha_{ij}\sin\beta_{ij}\cos\gamma_{ij} & \sin\alpha_{ij}\cos\gamma_{ij} + \cos\alpha_{ij}\sin\beta_{ij}\sin\gamma_{ij} & \cos\alpha_{ij}\cos\beta_{ij} & z_{ij} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{5}$$

式中：α、β、γ 分别为绕 X 轴、Y 轴、Z 轴旋转的欧拉角；$\boldsymbol{T}_{ij}$ 为体间理想运动特征矩阵；$\boldsymbol{T}_{ij}(R)$ 称为体间旋转运动矩阵；$\boldsymbol{T}_{ij}(M)$ 为体间平动运动矩阵。

(5) 式为理想情况下得到的，但对于实际工作中的检测平台，当检测系统随 X 轴、Z 轴运动时，待测光学元件随着 Y 轴运动时，由于受到温度、湿度、气压、电器系统发热、振动等因素的影响，会使检测系统在 3 个轴方向发生移动和微小的转动误差，从而导致实际的检测轨迹与理想的发生偏差。

由于任意 2 个物体之间存在 6 个自由度，所以每个运动轴上都存在有 6 个误差，以 X 轴为例进行说明，如图 3 所示。其中 Δx_{ij}、Δy_{ij}、Δz_{ij} 为 X 轴沿 X 轴、Y 轴、Z 轴的平动误差，$\Delta\alpha_{ij}$、$\Delta\beta_{ij}$、$\Delta\gamma_{ij}$ 为 X 轴绕 X 轴、Y 轴、Z 轴的转动误差。



(a) 两坐标系原始位置
(a) Original positions of two coordinate systems

(b) 沿X轴平动转动后的误差示意
(b) Schematic diagram of error after translation and rotation along X axis

图 3　以 X 轴为例的平动和转动产生的 6 项基本误差

Fig. 3　Six intrinsic error resulting from translation and rotation along X axis

根据以上分析，可以得到运动误差特征矩阵为

$$\Delta\boldsymbol{T}_{ij} = \Delta\boldsymbol{T}_{ij}(R)\Delta\boldsymbol{T}_{ij}(M) =$$

$$\begin{pmatrix} \cos\Delta\beta_{ij}\cos\Delta\gamma_{ij} & -\cos\Delta\beta_{ij}\sin\Delta\gamma_{ij} & \sin\Delta\beta_{ij} & \Delta x_{ij} \\ \cos\Delta\beta_{ij}\sin\Delta\gamma_{ij} + \sin\Delta\alpha_{ij}\sin\Delta\beta_{ij}\cos\Delta\gamma_{ij} & \cos\Delta\alpha_{ij}\cos\Delta\gamma_{ij} - \sin\Delta\alpha_{ij}\sin\Delta\beta_{ij}\sin\Delta\gamma_{ij} & -\sin\Delta\alpha_{ij}\cos\Delta\beta_{ij} & \Delta y_{ij} \\ \sin\Delta\beta_{ij}\sin\Delta\gamma_{ij} - \cos\Delta\alpha_{ij}\sin\Delta\beta_{ij}\cos\Delta\gamma_{ij} & \sin\Delta\alpha_{ij}\cos\Delta\gamma_{ij} + \cos\Delta\alpha_{ij}\sin\Delta\beta_{ij}\sin\Delta\gamma_{ij} & \cos\Delta\alpha_{ij}\cos\Delta\beta_{ij} & \Delta z_{ij} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{6}$$

式中: $\Delta T_{ij}(R)$ 为体间旋转误差运动矩阵; $\Delta T_{ij}(M)$ 为体间平动误差运动矩阵。

相邻体间的实际运动过程虽然是理想运动和误差运动同时进行的,但在分析时,可以看成是先进行理想运动,再进行误差运动,因此,多体系统间的体间实际特征矩阵为

$$\boldsymbol{T}_{ijr} = \boldsymbol{T}_{ij}\Delta \boldsymbol{T}_{ij}. \tag{7}$$

1.2 检测平台系统拓扑结构及坐标系的建立

精密检测平台由3个运动轴组成,如图4所示为其结构示意图,拓扑结构及广义坐标系的建立如图5所示。图4与图5中用于标记体的自然数序号为相互对应,其自由度码如表1所示,其中:0为不能自由运动;1为能自由运动。

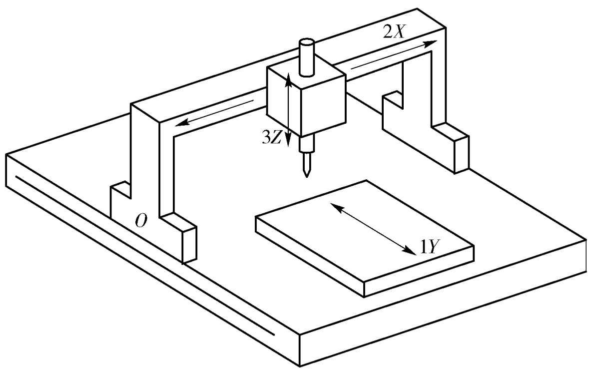


图4 精密检测平台运动机构原理图

Fig.4 Schematic diagram of movement mechanism in precision measuring platform

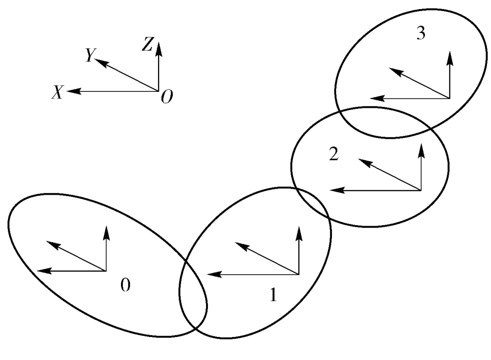


图5 拓扑结构及广义坐标

Fig.5 Topological structures and generalized coordinates

表1 自由度码

Tab.1 Code of degrees of freedom

相邻体	X	Y	Z	α	β	γ
0-1	0	1	0	0	0	0
1-2	1	0	0	0	0	0
2-3	0	0	1	0	0	0

1.3 检测平台实际运动误差建模

1.3.1 典型体0与典型体1之间运动特征矩阵

如图4所示,典型体0为检测平台本体,典型体1为沿 Y 轴方向运动工作台。根据(5)式,可以得到相邻典型体0和典型体1之间的体间理想运动特征矩阵为

$$\boldsymbol{T}_Y^{\mathrm{b}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{8}$$

但是,在检测平台工作过程中,Y 轴不可避免地产生6个自由度的误差,根据(7)式可以得到实际运动特征矩阵为

$$\boldsymbol{T}_Y^{\mathrm{b}}(r) = \begin{pmatrix} 1 & -\varepsilon_Z(Y) & \varepsilon_Y(Y) & \delta_X(Y) \\ \varepsilon_Z(Y) & 1 & -\varepsilon_X(Y) & \delta_Y(Y)+Y \\ -\varepsilon_Y(Y) & \varepsilon_X(Y) & 1 & \delta_Z(Y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{9}$$

为了更好地表征检测平台实际工作中的各项自由度误差,用 $\delta_Y(Y)$ 为 Y 轴定位误差,$\delta_X(Y)$、$\delta_Z(Y)$ 分别为 Y 轴沿 X 轴、Z 轴方向的直线度误差,$\varepsilon_X(Y)$、$\varepsilon_Y(Y)$ 和 $\varepsilon_Z(Y)$ 分别为 Y 轴沿 X 轴、Y 轴、Z 轴方向的转角误差。

1.3.2 典型体1与典型体2之间运动特征矩阵

如图4所示,典型体2为沿 X 轴方向运动滑块。根据(5)式,可以得到相邻体1和体2之间的体间理想运动特征矩阵为

$$\boldsymbol{T}_X^{\mathrm{b}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{10}$$

同理,在检测平台工作过程中,X 轴不可避免地产生6个自由度的误差,且其行程为400 mm,与 Y 轴之间的垂直度误差 ε_{YX} 也会对运动精度产生较大影响,根据(7)式可以得到实际运动特征矩阵为

$$\boldsymbol{T}_X^{\mathrm{b}}(r) = \begin{pmatrix} 1 & -\varepsilon_Z(X) & \varepsilon_Y(X) & X+\delta_X(X) \\ \varepsilon_Z(X) & 1 & -\varepsilon_X(X) & \delta_Y(X)-X\varepsilon_{YX} \\ -\varepsilon_Y(X) & \varepsilon_X(X) & 1 & \delta_Z(X) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{11}$$

1.3.3　典型体 2 与典型体 3 之间运动特征矩阵

如图 4 所示，典型体 3 为沿 Z 轴方向运动测量系统。根据(5)式，可以得到相邻体 2 和体 3 之间的体间理想运动特征矩阵为

$$T_Z^{\mathrm{b}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{12}$$

同理，在检测平台工作过程中，Z 轴不可避免地产生 6 个自由度的误差，且其行程为 150 mm，与 X 轴、Y 轴之间的垂直度误差 ε_{XZ}、ε_{YZ} 也会对运动精度产生较大影响，根据(7)式可以得到实际运动特征矩阵为

$$T_Z^{\mathrm{b}}(r) = \begin{pmatrix} 1 & -\varepsilon_Z(Z) & \varepsilon_Y(Z) & \delta_X(Z) - Z\varepsilon_{XZ} \\ \varepsilon_Z(Z) & 1 & -\varepsilon_X(Z) & \delta_Y(Z) - Z\varepsilon_{YZ} \\ -\varepsilon_Y(Z) & \varepsilon_X(Z) & 1 & Z + \delta_Z(Z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \tag{13}$$

1.4　检测平台空间误差建模

检测平台的实际工作特点为：测量系统安装在 Z 轴上，可以进行 X 轴、Z 轴方向的运动，待测光学元件安放在工作台上，可以进行 Y 轴方向的运动，通过测量系统和工作台的配合运动，进而按照规划的测量轨迹完成对待测光学元件的测量。

根据其工作特点，设测量系统在体 3 坐标系 3 中初始位置矢量为

$$T^{\mathrm{T}} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^{\mathrm{T}}, \tag{14}$$

经过体 2、体 3 运动后，其在 0 体中的实际运动方程为

$$T^{\mathrm{b}} = T_X^{\mathrm{b}}(r) \cdot T_Z^{\mathrm{b}}(r) \cdot T^{\mathrm{T}}. \tag{15}$$

同时，设待测光学元件各待测轨迹点在体 1 坐标系 1 中的初始位置矢量为

$$W^{\mathrm{w}} = [X \quad Y \quad Z \quad 1]^{\mathrm{T}}, \tag{16}$$

经过体 1 运动后，其在体 0 中的实际运动方程为

$$W^{\mathrm{b}} = T_Y^{\mathrm{b}}(r)\, W^{\mathrm{w}}, \tag{17}$$

因此，大口径光学元件精密检测平台空间误差模型为

$$E = W^{\mathrm{b}} - T^{\mathrm{b}}. \tag{18}$$

2　实验

2.1　各自由度误差的测量及辨识

准确测量上述空间误差模型中的各自由度误差是应用该模型进行检测平台空间误差补偿的前提与基础。本文综合应用雷尼绍激光干涉仪、球杆仪和基恩士激光位移传感器等仪器设备对涉及到的各项自由度误差进行了有效测量。

2.1.1　各轴定位误差的测量

采用雷尼绍 XC-80 激光干涉仪及其光学组件，对各轴定位误差进行 3 次测量取平均值为最终误差值，如图 6 所示。由于篇幅所限，仅以 Y 轴测量为例，其他轴测量同理。测量结果如图 7 所示，X 轴在满行程内定位误差为 −38.2 ~ 1.6 μm，Y 轴在满行程内定位误差为 0.8 ~ 69.9 μm，Z 轴在满行程内定位误差为 −64.5 ~ −1.1 μm.

图 6　定位误差测量

Fig. 6　Measurement of positioning error

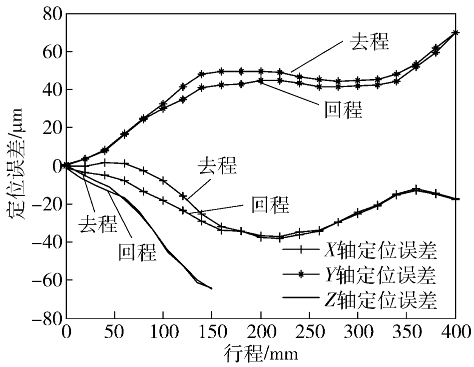


图 7　各轴定位误差测量结果

Fig. 7　Measurement results of positioning errors

2.1.2　各轴直线度误差的测量

根据精密检测平台的工作特点，由于测量系统安装在 Z 轴上，待测光学元件的轮廓由 Z 轴的起伏来分辨，所以在直线度误差的测量中，重点研究

X 轴、Y 轴沿 Z 轴方向的直线度误差。

本文直线度误差的测量以泰勒霍普森提供的平面度 0.1 μm 标准平面为基准，采用基恩士 LKG10 激光位移传感器，如图 8 所示。同理以 X 轴测量为例，测量出基准平面在行程内各点的坐标值，仍然进行 3 次测量取平均值为最终值。测量完成后，以最小二乘法拟合各点，以拟合曲线上点的坐标为基准，减去对应点测量所得坐标，以其差值作为该轴直线度误差。测量结果如图 9 所示，X 轴在满行程内直线度误差为 −1.23 ~2.85 μm，Y 轴在满行程内直线度误差为 0.51 ~0.93 μm.

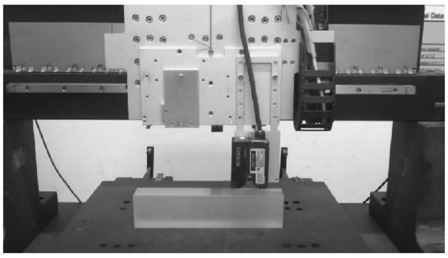


图 8　直线度误差测量

Fig. 8　Measurement of straightness error

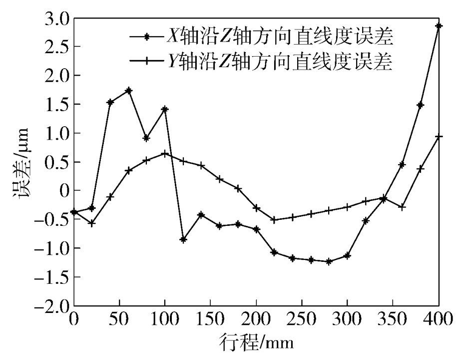


图 9　各轴直线度误差测量结果

Fig. 9　Measurement results of straightness errors

2.1.3　轴间垂直度误差的测量

根据精密检测平台检测系统安装在 Z 轴上和待测光学元件放置在 Y 轴上的结构特点，由于测头自身对光路或位移反馈的需要，已对其与光学元件表面的位置关系有着严格的要求，所以在垂直度误差测量中，重点研究 X 轴、Y 轴间和 Z 轴、X 轴间的垂直度误差。

本文采用雷尼绍 QC10 球杆仪，在直径 300 mm 范围内测得二轴间的垂直度误差，如图 10 所示，同理以 X 轴、Y 轴间测量为例。测量结果：X 轴、Y 轴间垂直度误差为 0.22 μm/mm；Z 轴、X 轴间垂直度误差为 0.18 μm/mm.

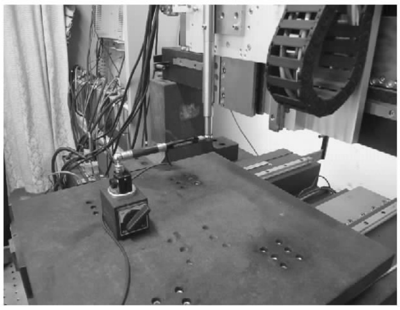


图 10　垂直度误差测量

Fig. 10　Measurement of verticality error

2.1.4　各轴旋转误差的测量

根据精密检测平台的结构特点，在旋转误差中，本文重点研究各轴沿其他二轴方向的旋转误差，即各轴的俯仰及偏摆误差。

本文采用雷尼绍 XC-80 激光干涉仪及其光学组件，对各轴俯仰及偏摆误差进行 3 次测量取平均值为最终误差值，如图 11 所示。由于篇幅所限，仅以 Y 轴测量为例，其他轴测量同理。测量结果如图 12 所示。X 轴在满行程内俯仰误差为 −0.086 ~0.16 μm/mm，偏摆误差为 −0.2 ~0.033 μm/mm，Y 轴在满行程内俯仰误差为 −0.012 ~0.013 μm/mm，偏摆误差为 −0.5 ~0.044 μm/mm，Z 轴在满行程内俯仰误差为 −0.026 ~0.07 μm/mm，偏摆误差为 −0.035 ~0.06 μm/mm.

2.2　空间误差计算方法

为了定量描述和研究精密检测平台的空间误差，基于激光干涉仪和球杆仪，本文提出一种空间误差计算方法，其原理如图 13 所示。利用球杆仪测量出 X 轴、Y 轴二轴联动误差，即计算出 A 点在该平面内的定位误差；然后，利用 Z 轴、X 轴二轴垂直度误差和 Z 轴定位误差等误差值计算出当上述平面上升 O_1O_1' 距离时，A 点在 Z 轴、X 轴方向的误差；最后，利用上述 2 个误差即可求出 A 点的空间误差 AA_1.

2.3　空间误差补偿结果

将各自由度误差应用上述模型进行计算，并利用本文所提空间误差计算方法计算补偿前后的空间误差值。其中，X 轴、Y 轴联动误差测量及补偿结果如图 14 所示(为体现误差，将测量半径缩小 150 倍)。联动误差补偿前为 −27.23 ~22.11 μm，补偿后为 −3.9 ~5.6 μm. Z 轴运动误差补偿结果如图 15 所

(a) Y 轴沿 X 轴旋转误差(俯仰误差)的测量
(a) Measurement of rotation error(pitch error) for Y axis along Z axis

(b) Y 轴沿 Z 轴旋转误差(偏摆误差)的测量
(b) Measurement of rotation error(deflection error) for Y axis along Z axis

图 11　旋转误差测量

Fig. 11　Measurement of rotation error

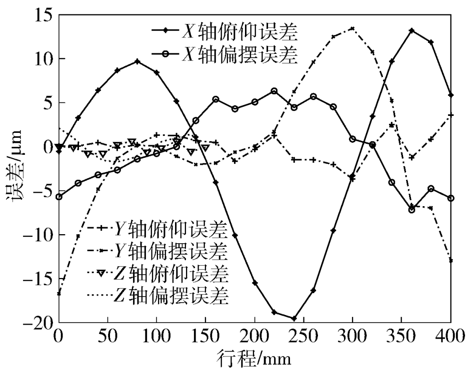


图 12　各轴旋转误差测量结果

Fig. 12　Measurement results of rotation errors

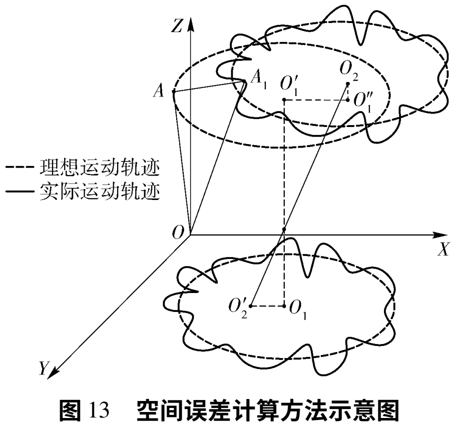
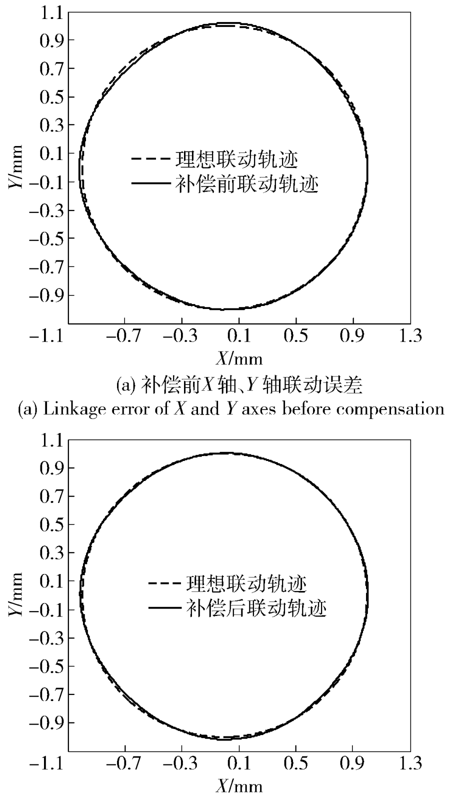


图 13　空间误差计算方法示意图

Fig. 13　Schematic diagram of calculation method of volumetric error

示，其误差补偿后为 −1.6 ~ 1.5 μm. 由此得到空间误差值由 − 70.01 ~ 22.14 μm 降至 − 4.22 ~ 5.80 μm.



(a) 补偿前 X 轴、Y 轴联动误差
(a) Linkage error of X and Y axes before compensation

(b) 补偿后 X 轴、Y 轴联动误差
(b) Linkage error of X and Y axes after compensation

图 14　X 轴和 Y 轴联动误差测量及补偿结果

Fig. 14　Measured and compensation results of linkage error of X and Y axes

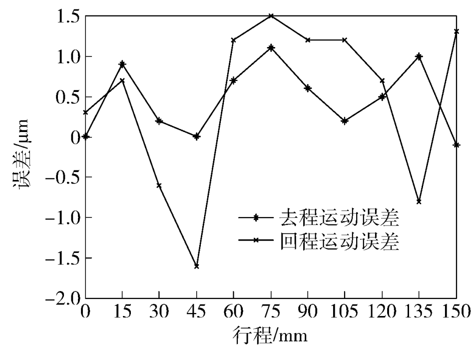


图 15　Z 轴运动误差补偿结果

Fig. 15　Compensation results of Z axis motion error

3　结论

1）对大口径光学元件精密检测平台的空间误差建模进行了深入研究，在分析影响其空间误差的

各类几何误差因素基础上，运用多体系统理论，用低序体阵列描述多体系统拓扑结构，建立一种空间误差数学模型。

2）提出大口径光学元件精密检测平台各类几何误差的测量方案和空间误差的测量方法，并应用激光干涉仪、球杆仪和激光位移传感器等仪器设备，进行了具体的测量实验。

3）误差补偿实验证明本文建立的空间误差模型正确有效，将空间误差从补偿前 −70.01 ~ 22.14 μm 降低到补偿后 −4.22 ~ 5.8 μm，有效提高了精密检测平台的测量精度。

参考文献(References)

[1] Cheung C F, Lee W B. A theoretical and experimental investigation of surface roughness formation in ultra-precision diamond turning [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(7): 979 − 1002.

[2] Chen M J, Li D, Dong S. Research on a large depth-to-diameter ratio ultra-precision aspheric grinding system [J]. Journal of materials processing technology, 2002, 129(1): 91 − 95.

[3] TAN Ying, ZHENG Zhong-yang. Research advance in swarm robotics [J]. Defence Technology, 2013, 9(1): 40 − 47.

[4] 粟时平. 多轴数控机床精度建模与误差补偿方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2002.
SU Shi-ping. Study on the methods ofprecision modeling and error compensation for multi-axis CNC machine tool [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002. (in Chinese)

[5] 李岩，范大鹏. 基于多体系统运动学理论的三轴转台装配误差建模分析 [J]. 兵工学报, 2007, 28(8): 981 − 987.
LI Yan, FAN Da-peng. Error analysis of three-axis turntable aimed at assembling based on multi-system kinematics theory [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(8): 981 − 987. (in Chinese)

[6] 刘延斌，金光，钟平，等. 机载成像仿真系统的误差建模 [J]. 兵工学报, 2003, 24(4): 490 − 494.
LIU Yan-bin, JIN Guang, ZHONG Ping, et al. Error modeling of simulation system for airborne imaging [J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(4): 490 − 494. (in Chinese)

[7] 洪振宇，梅江平，赵学满，等. 基于球杆仪检测信息的并联机构运动学标定 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(7): 16 − 22.
HONG Zhen-yu, MEI Jiang-ping, ZHAO Xue-man, et al. Kinematic calibration of the parallel mechanism using double-ball-bar system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(7): 16 − 22. (in Chinese)

[8] 贺甲，田学光，张德龙，等. 基于休斯敦方法的机械手误差建模与分析 [J]. 工程设计学报, 2010, 17(6): 439 − 443.
HE Jia, TIAN Xue-guang, ZHANG De-long, et al. Error analysis and error modeling of manipulator based on Huston method [J]. Journal of Engineering Design, 2010, 17(6): 439 − 443. (in Chinese)

[9] 齐朝辉. 多体系统动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
QI Chao-hui. Multi-body dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)

[10] 田学光. 测绘相机标定转台结构系统关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.
TIAN Xue-guang. Study of key techniques on mapping camera calibration turntable structure system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2010. (in Chinese)