

六轴运动平台几何误差与阵列光纤对准精度的映射关系

唐 皓 唐果宁

湖南科技大学机电工程学院,湘潭,411201

摘要:针对光缆中阵列光纤与波导芯片精准对接问题,运用光电子封装系统六轴精密运动平台,研究了控制阵列光纤的位姿及对准精度。依据齐次坐标矩阵的几何误差模型,采用方差敏感性分析方法,辨识得出影响对准精度的重要误差项;分析了运动平台的搭建结构,探讨了运动平台几何误差与光纤对准精度的映射规律。实验结果表明,该方法可靠、有效,可为提高光纤封装效率与对准效率提供参考。

关键词:多轴运动平台;光纤对准精度;几何误差;映射规律;封装系统

中图分类号:TH161

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2019.014.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Mapping Rules between Geometric Errors in Six-axis Stages and Alignment Accuracy of Fiber Array

TANG Hao TANG Guoning

College of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan, 411201

Abstract: Aiming at positions and poses of fiber array which was fixed on six-axis stage, geometric error model was established by homogeneous transformation matrix. A variance sensitivity analysis was adopted to identify important error terms on alignment accuracy according to stage configuration. Based on the results, mapping rules between geometric errors in multi-axis motion stage and alignment accuracy of fiber array were established. This analyzing procedure is reliable from the simulation results, and also may develop the mapping rules easily and conveniently, which will be as the theoretical basis for increasing packaging efficiency and alignment efficiency.

Key words: multi-axis motion stage; fiber alignment accuracy; geometric error; mapping rule; package system

0 引言

多自由度精密运动平台具有精度高、安装结构灵活、响应快等特点,被广泛应用于航空航天、机器人以及精密加工等领域^[1]。多自由度精密运动平台的作用在于小/微误差条件下精确控制关键物件的空间位姿,如在光电子封装系统中,阵列光纤和波导芯片分别安装在六轴运动平台和机架之上,通过人为控制平台各自由度的运动,使得阵列光纤与波导芯片各光路通道一一对准,辅之后续的点胶、固化等,以实现光子器件的制造^[2]。通常,对运动平台的控制主要是通过误差建模来实现的,因此,探索运动平台几何误差与光电子封装系统对准精度的映射规律对于合理的误差建模尤为关键。

关于多自由度运动系统对准精度问题,国内外许多学者已进行了大量研究。SUH等^[3]针对

五轴旋转工作平台提出了包括对控制器的误差补偿、新的误差测量方法等系列误差分析方法,该方法对大多数多自由度数控机床具有一定的指导意义;ERIK等^[4]针对五轴钻床提出了系统性几何误差参数辨识方法;刘又午^[5]采用多体动力学方法与拓扑学知识对多自由度系统进行误差建模;张栋等^[6]运用神经网络方法对压电工作台进行建模与控制,提高了平台的定位精度;栗时平等^[7]、王秀山等^[8]、杨建国等^[9]分别对不同的三轴或五轴数控机床进行了误差建模;田延岭等^[10]在对磨削加工的微定位工作台进行动力学建模的基础上,从其动力学特性方面进行了精度补偿分析,并将其与大型设备的精度控制问题进行了延伸对接。综上所述,大多数学者研究的对象为多自由度机床,而针对其他具有普遍性的多自由度精密运动系统,如光电子封装系统多自由度(六轴)精密运动平台的误差与精度映射规律研究却鲜见报道。笔者曾针对光电子封装系统六轴精密运动平台控制阵列光纤位姿问题,采用齐次坐标矩阵建立了多

收稿日期:2019-04-15

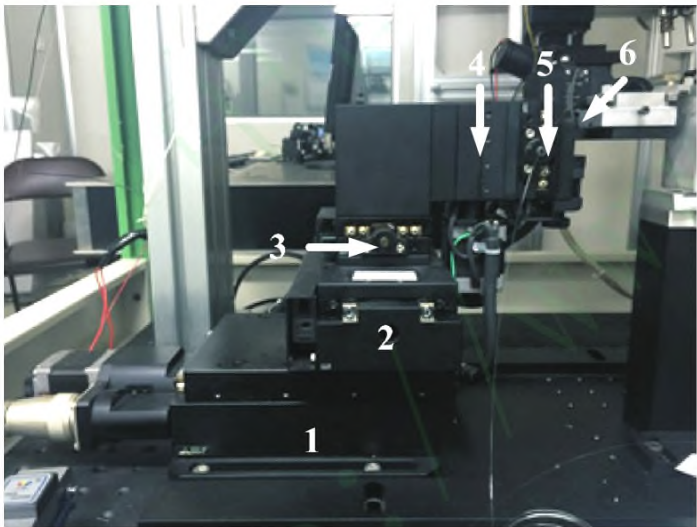
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51705149);湖南省自然科学基金青年基金资助项目(2018JJ3168)

自由度运动平台误差模型^[11-14]。

本文针对六轴运动平台几何误差与光纤对准精度的映射规律开展研究,即考察精确运动的芯片各个通道的对准关系,分析因几何误差导致的横向位错和对准偏差,运用方差敏感性分析,找出影响这两个因素的重要误差项及产生原因,最后通过实验进行验证。考虑到对准精度主要受到横向位错与对准偏差的影响^[15],本文只考虑运动平台几何误差对准精度的影响,而波导芯片的安装误差等暂不考虑。

1 六轴运动平台误差建模

六轴运动平台如图 1 所示。由于光纤的芯径只有 4~8 mm,光波导的导光区域宽度仅为 3~7 mm,故六轴运动平台精度必须是亚微米级。本文重点是研究对准,至于载荷与速度则较少考虑。通常,阵列光纤固定于六轴运动平台,芯片固定于机架上,6 个运动单元可分别控制, x 、 y 、 z 为 3 个平动单元, a 、 b 、 c 为 3 个转动单元(绕 x 、 y 、 z 三自由度转动),从而实现 6 维阵列光纤与芯片对准过程的全空间、高精度位置控制。



1. z 自由度 2. y 自由度 3. c 自由度 4. y 自由度
5. b 自由度 6. a 自由度

图 1 六轴精密运动平台结构

Fig.1 Configuration of six-axis precise stage

1.1 对准过程坐标系

为了方便建立误差模型,将坐标系原点与转动自由度旋转中心建立在同一平面,则坐标系原点 x 坐标随之确定;由于安装误差存在于各运动单元的接触面,故 z 坐标与 y 坐标也可设定在不同运动单元的接触面上,如图 2 所示。所建的误差模型包括以下 3 个部分:

(1)各坐标系的坐标差矩阵

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(1)

式中, x 、 y 、 z 分别为相邻坐标系原点的位置差,与运动单元的尺寸有关。

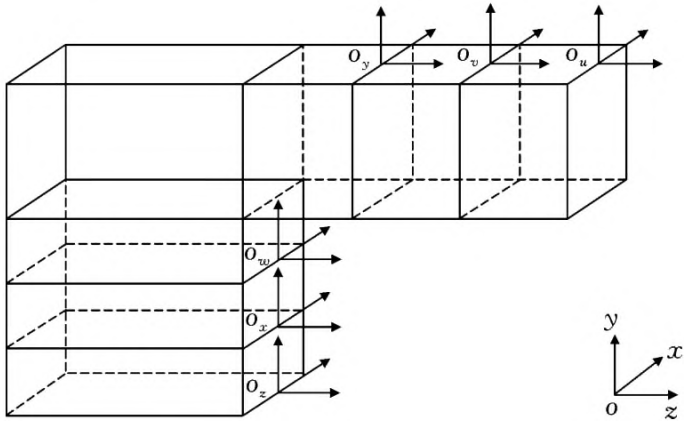


图 2 运动平台对准坐标系

Fig.2 Coordinate systems of motion stage

(2)各运动单元的移动量与相应的齐次变换矩阵见表 1。

表 1 各运动单元物理意义与相应齐次变换矩阵
Tab.1 Physical meaning for each motion unit and corresponding HTM

自由度	物理意义	齐次变换矩阵
x	沿 x 轴平动	$T_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
y	沿 y 轴平动	$T_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
z	沿 z 轴平动	$T_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
a	绕 x 轴转动	$R_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos u & -\sin u & 0 \\ 0 & \sin u & \cos u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
b	绕 y 轴转动	$R_b = \begin{bmatrix} \cos v & 0 & \sin v & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin v & 0 & \cos v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
c	绕 z 轴转动	$R_c = \begin{bmatrix} \cos w & -\sin w & 0 & 0 \\ \sin w & \cos w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

(3)运动平台的误差项。几何误差包括运动误差与安装误差。运动单元运动过程中存在 6 项运动误差(定位误差、两项直线度误差、俯仰、偏转与滚摆误差),即

$$\mathbf{K}(x,y,w,u,v,w)=\begin{bmatrix} 1 & -w & v & x \\ w & 1 & -u & y \\ -v & u & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

x,y,z,u,v,w 分别为 3 项平动误差与 3 项转动误差。安装过程中的非正交性误差主要体现为角度偏差,即包括 3 平动轴之间的 3 项非正交误差、3 转动轴之间的 3 项非正交误差,以及平动轴与转动轴之间的误差共 6 项误差:

$$\mathbf{S}(u,v,w)=\begin{bmatrix} 1 & -w & v & 0 \\ w & 1 & -u & 0 \\ -v & u & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.2 运动平台误差建模

在不考虑误差的理想情况下,平台位姿只与坐标系之差和各运动单元运动量有关。理想情况下,安装于平台的阵列光纤的理想位姿可通过下式求得:

$$\begin{aligned} E_i = & \mathbf{T}_z \mathbf{P}_{zx}(0,0,z_{zx},0,0,0) \mathbf{T}_x \mathbf{P}_{xc}(0,0,z_{xc},0,0,0) \cdot \\ & \mathbf{R}_c \mathbf{P}_{cy}(0,y_{cy},z_{cy},0,0,0) \mathbf{T}_y \mathbf{P}_{yb}(0,y_{yb},0,0,0,0) \cdot \\ & \mathbf{R}_b \mathbf{P}_{ba}(0,y_{ba},0,0,0,0) \mathbf{R}_a \end{aligned} \quad (4)$$

当考虑几何误差时,阵列光纤的实际位姿通过下式求得:

$$\begin{aligned} E_a = & \mathbf{S}_z(0,0,\gamma_z) \mathbf{M}_z \mathbf{K}_z(x_z,y_z,z_z,u_z,v_z,w_z) \cdot \\ & \mathbf{P}_{zx}(0,0,z_{zx},0,0,0) \mathbf{S}_x(\alpha_x,0,0) \cdot \\ & \mathbf{M}_x \mathbf{K}_x(x_x,y_x,z_x,u_x,v_x,w_x) \mathbf{P}_{xc}(0,0,z_{xc},0,0,0) \cdot \\ & \mathbf{S}_c(\alpha_{zc},\beta_{zc},\gamma_c) \mathbf{R}_c \mathbf{K}_c(x_c,y_c,z_c,u_c,v_c,w_c) \cdot \\ & \mathbf{P}_{cy}(0,y_{cy},z_{cy},0,0,0) \mathbf{S}_y(0,\beta_y,0) \cdot \\ & \mathbf{M}_y \mathbf{K}_y(x_y,y_y,z_y,u_y,v_y,w_y) \mathbf{P}_{yb}(0,y_{yb},0,0,0,0) \cdot \\ & \mathbf{S}_b(\alpha_{yb},\beta_b,\gamma_{yb}) \mathbf{R}_b \mathbf{K}_b(x_b,y_b,z_b,u_b,v_b,w_b) \cdot \\ & \mathbf{P}_{ba}(0,y_{ba},0,0,0,0) \mathbf{S}_a(\alpha_a,\beta_{xa},\gamma_{xa}) \cdot \\ & \mathbf{R}_a \mathbf{K}_a(x_a,y_a,z_a,u_a,v_a,w_a) \end{aligned} \quad (5)$$

其中,矩阵 \mathbf{K} 表示运动误差矩阵,矩阵 \mathbf{S} 为静止误差矩阵, \mathbf{P} 表示各运动单元之间的尺寸, \mathbf{M} 为平移运动矩阵, \mathbf{R} 为旋转运动矩阵。下标为其所在的运动单元和相邻运动单元, x,y,z,a,b,c 分别表示 3 个平动单元与 3 个转动单元。运动误差 x_z 为 z 运动单元 x 方向的运动误差, γ_z 为 z 运动单元绕 z 方向的转动误差, α_{zc} 为 z 运动单元与 c 运动单元绕 x 方向的转动误差。余同。

将式(5)减去式(4),可得实际情况下阵列光纤与波导芯片的位姿偏差。对准过程的误差模型公式为

$$E = E_a - E_i \quad (6)$$

2 运动平台几何误差辨识与误差敏感性分析

阵列光纤的位置与姿态需要严格控制。在光纤与芯片的对准过程中,若光损耗小于 0.15 dB(意味着整体对准耦合效率大于 96.6%),则各方向的偏差阈值如下: x,y 向偏差需小于 1 mm, z 向偏差小于 16 mm, a,b 向角度偏差小于 0.65°。根据旋转中心的位置,可判断得出 0.65°造成的损耗量约为 1.1 mm。文献[2]通过下式印证了这一结论:

$$\eta = \frac{\left| \iint \phi_{ld}(x,y,z) \phi_f(x,y)^* dx dy \right|^2}{\iint |\phi_{ld}(x,y,z)|^2 dx dy \iint |\phi_f(x,y)|^2 dx dy} \quad (7)$$

其中, $\phi_{ld}(x,y,z)$ 为 x,y,z 方向上的偏差, $\phi_f(x,y)$ 为 a,b 方向上的角度偏差, η 为耦合效率。考虑到光纤和芯片在对准过程上是绕 c 方向上的中心对称,因此,理论上 c 方向不存在损耗。

根据上述分析结果, x,y 向的偏差以及 a,b 方向的偏差对对准过程的影响较为显著。具体说来,主要误差分为横向位错、纵向间距与对准偏差,其中,横向位错(即 x,y 方向偏差)影响程度最大。考虑到对准过程中 x,y 方向偏差是对称的,基于上述误差模型,下文以 x 方向偏差为例来建立映射关系。其余两方向的研究结论可按照相同步骤得出。

2.1 误差源分析

虽然不同的误差项对对准偏差的影响存在差异(这取决于不同条件),但通过误差辨识可以找出哪些误差项对对准偏差存在影响,即建立几何误差与对准偏差的映射关系,得出各误差项对对准偏差的影响关系。具体步骤如下:①求解得出各误差项的分布范围。一般可通过查询产品型号或通过实验测量得出。②模拟分析得出各误差项对对准偏差的影响,建立映射关系。③将具体数值代入模型,得到仿真结果并进行分析。

本文采用的运动平台为骏河 Suruga Seiki ES6201。48 项几何误差分布范围可通过产品型号与安装准则得出,见表 2。

表 2 48 项几何误差项的分布范围

Tab.2 Distributions for 48 geometric error terms μm

平动单元		转动单元	
类型	误差分布	类型	误差分布
定位误差	(-2.0,2.0)	定位误差	(-3.0,3.0)
直线度误差	(-1.0,1.0)	径向误差	(-1.0,1.0)
俯仰	(-0.1,0.1)	轴向误差	(-1.5,1.5)
偏转、滚摆	(-0.1,0.1)	角度偏差	(-0.2,0.2)
安装误差(安装精度)			(-0.5,0.5)

2.2 重要误差项分析

由于各误差项对横向位错的影响不同,故需对 48 项误差的敏感性进行分析。通过基于各误差项分布范围的大量随机取值,运用基于方差的方法将 48 项几何误差按照“非常重要”、“较重要”、“不重要”进行归类。具体步骤如下:①待研究误差项设为变量,其余误差项设为常量。②在待研究误差项中随机取值,代入式(6)的误差模型,观察阵列光纤 x 方向偏差。③重复步骤①、②多次,记录这两组数值。④比较该组待研究误差项随机值的方差与对应的阵列光纤 x 方向偏差的方差。若数值较大,则说明该误差项对阵列光纤 x 方向偏差影响较大,归类于非常重要;若数值相近,则说明该误差项较为重要;若只对 x 方向偏差产生微小波动或没有波动,则说明该误差项对此方向偏差不重要。其他误差项的重要程度归类可依据同样步骤得到。

上述敏感性分析过程不仅考虑了各误差项的分布范围,而且考虑了误差项取值的波动对阵列光纤的影响,结果见表 3。

表 3 针对横向位错的误差影响分类
Tab.3 Error impact classification for transverse dislocation

影响程度	误差项
非常重要	$u_x^k, u_y^k, u_z^k, u_v^k, u_u^k, u_w^k, \alpha_x^s, \alpha_u^s, \alpha_{yv}^s, \alpha_{zw}^s$
较重要	$y_x^k, y_y^k, y_z^k, y_u^k, y_v^k, y_w^k$
不重要	$x_x^k, x_y^k, x_z^k, x_u^k, x_v^k, x_w^k, x_z^k, z_x^k, z_y^k, z_z^k, z_u^k, z_v^k, z_w^k, v_x^k, v_y^k, v_z^k, v_u^k, v_v^k, v_w^k, w_x^k, w_y^k, w_z^k, w_u^k, w_v^k, w_w^k, \beta_y^s, \beta_u^s, \beta_{xu}^s, \beta_{zw}^s, \gamma_w^s, \gamma_z^s, \gamma_{xu}^s, \gamma_{yv}^s$

注:上标 k 表示运动误差;上标 s 表示静止误差。

由于误差参数敏感性界定比较严格,故只能通过比较目标误差参数与偏差变化的方差比来进行判断。由表 2 的结果可以发现:① x 、 z 方向的误差项对横向位错几乎不产生影响,归类于“不重要”;② y 方向的平动误差对横向位错是线性反映,归类于“较重要”;③绕 z 方向的转动误差对横向位错没有影响,归类于“不重要”;③ a 方向(绕 x 方向)的误差项非常敏感,这主要源于平台内部运动单元搭建结构造成的影响。如图 1 所示,六轴平台前 3 个运动单元 z 、 x 、 w 是沿着 y 方向垂直安装的,而后 3 个运动单元 y 、 v 、 a 是沿着 z 方向水平安装的。对于前 3 个运动单元,若在绕 x 方向上有一个角度误差 q ,那么在横向位错上的投影为 $L_1 \sin q$ (L_1 为 y 方向运动单元高

度)。而后 3 个运动单元绕 x 方向上的误差的横向位错的投影为 $L_2(1-\cos q)$ (L_2 为 z 方向运动单元长度),如图 3 所示。由于角度误差 q 的值很小,故将上述 $L_1 \sin q, L_2(1-\cos q)$ 通过泰勒公式展开并忽略高阶项,可以得到:

$c_1:L_1 \sin q=L_1 q$ (8)

$c_2:L_2(1-\cos q)=0$ (9)

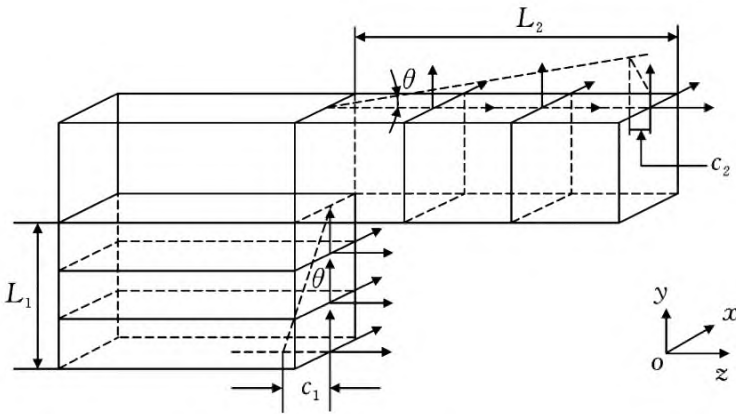


图 3 绕 x 方向误差项分析示意图

Fig.3 Schematic of error analysis for x -axis

对于 z 方向偏差,沿着 y 轴安装的前 3 个 z 、 x 、 c 子运动单元, a 方向的误差项非常敏感,呈近似线性关系,而沿着 z 轴安装的后 3 个 y 、 b 、 a 子运动单元, a 方向的误差项则不敏感,可忽略不计。

3 运动平台几何误差与对准精度映射关系

根据上述误差模型以及误差敏感性分析,可建立运动平台的几何误差与对准精度中 x 方向偏差的映射关系。

首先对各运动单元运动量及相邻运动单元的坐标系原点差值等参数赋值。安装好阵列光纤与芯片后,其相对位置差是随机的,可按照最基本的情况为各运动单元的运动量赋值。坐标系差与运动单元外部尺寸有关,可通过平台参数查询得到。各运动单元运动量与坐标系差参数见表 4。

表 4 各运动单元运动量与坐标系差参数

Tab.4 Parameter for movements and offsets

参数	具体数值
运动单元	x 单元: 1 mm; y 单元: 1 mm; z 单元: 1 mm
运动量	a 单元: 0; b 单元: 0; c 单元: 0
相邻运动	z - x : z 轴 20 mm; x - c : z 轴 20 mm
单元坐标	w - y : z 轴 20 mm, y 轴 20 mm
系差	y - b : y 轴 20 mm; b - a : y 轴 20 mm

考虑“非常重要”与“较重要”两组误差项的影响。根据其物理意义,结合表 5,该两组误差项可分为平动单元运动角度误差 u_x 、 u_z ,转动单元运动角度误差 u_c ,定位误差 z_z ,平动单元直线度误

差 z_x, z_y , 转动单元角度偏差 z_u, z_v, z_c 和安装误差 α_{zc}, α_x 。

为了得到横向位错的最大偏差,在各误差项的分布范围内取最大值,其余误差项的值均为零,得出映射关系见表 5。

表 5 敏感误差项与对准精度横向位错的映射关系
Tab.5 Mapping rules between sensitive error and aligning accuracy for transverse dislocation

误差源	对准精度横向位错(μm)
平动单元运动角度误差 $u_x = 0.1 \mu\text{m}, u_z = 0.1 \mu\text{m}$	0.41, 0.61
转动单元运动角度误差 $u_c = 0.2 \mu\text{m}$	1.22
定位误差 $z_z = 2.0 \mu\text{m}$	2
平动单元直线度误差 $z_x = 1.0 \mu\text{m}, z_y = 1.0 \mu\text{m}$	1
转动单元角度偏差 $z_a = 0.2 \mu\text{m}, z_b = 0.2 \mu\text{m}, z_c = 0.2 \mu\text{m}$	0.2
安装误差 $\alpha_{zc} = 0.5 \text{ mm}, \alpha_x = 0.5 \text{ mm}$	10.5, 20.5

根据其影响程度高低,得出这两组误差项对准精度中横向位错的敏感性分布图,见图 4。从仿真结果可知,对于横向位错,需要严格控制的误差项主要为绕 x 轴旋转的角度误差,包括运动误差(如俯仰、滚摆、倾斜角度误差)以及安装误差等。鉴于安装误差分布范围较广,安装过程难以准确把控,且对横向位错的影响较大,故在平台精度提高、平台结构优化等方面需注意。

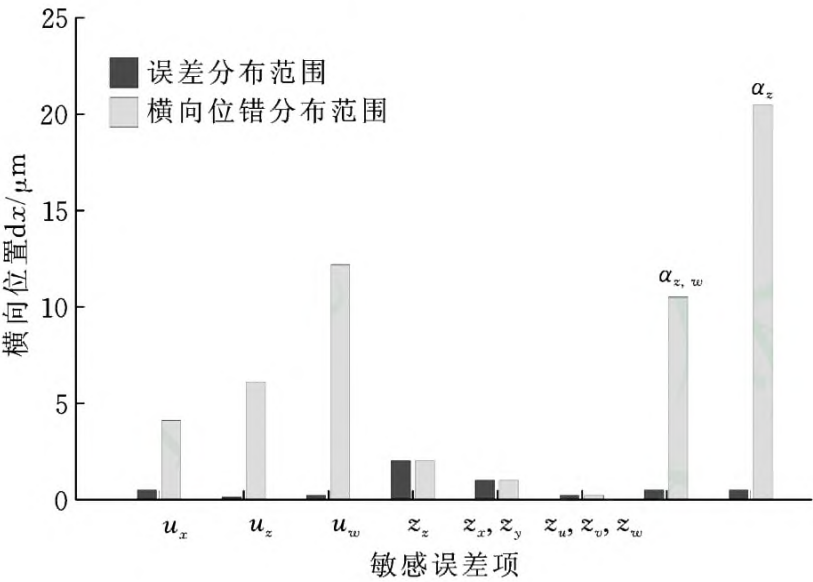


图 4 敏感误差项对横向位错的影响

Fig.4 Impact on transverse dislocation by sensitive error

同理,可得出上述 48 项误差对准精度中对准偏差(绕 x 方向与绕 y 方向)的映射关系,见表 6。可以看出,绕 x 方向的转动误差直接反映到阵列光纤同方向对准偏差。同理,绕 y 方向的转动误差也直接反映到阵列光纤姿态同方向对准偏差,见表 7。

表 6 敏感误差项与对准精度对准偏差(绕 x 方向)的映射关系

Tab.6 Mapping rules between sensitive error and aligning accuracy for axial deviation (x -axis)

误差源	对准精度(绕 x 方向)(mrad)
平动单元运动角度误差 $u_x = 0.1 \mu\text{m}, u_y = 0.1 \mu\text{m}, u_z = 0.1 \mu\text{m}$	0.1, 0.1, 0.1
转动单元运动角度误差 $u_v = 0.2 \mu\text{m}, u_w = 0.2 \mu\text{m}$	0.2, 0.2
定位误差 $u_u = 3.0 \mu\text{m}$	3
安装误差 $\alpha_{zw} = 0.5 \mu\text{m}, \alpha_x = 0.5 \mu\text{m}, \alpha_u = 0.5 \mu\text{m}, \alpha_{yv} = 0.5 \mu\text{m}$	0.5

表 7 敏感误差项与对准精度对准偏差(绕 y 方向)的映射关系

Tab.7 Mapping rules between sensitive error and aligning accuracy for axial deviation (y -axis)

误差源	对准精度(绕 y 方向)(mrad)
平动单元运动角度误差 $v_x = 0.1 \mu\text{m}, v_y = 0.1 \mu\text{m}, v_z = 0.1 \mu\text{m}$	0.1, 0.1, 0.1
转动单元运动角度误差 $v_u = 0.2 \mu\text{m}, v_w = 0.2 \mu\text{m}$	0.2, 0.2
定位误差 $v_v = 3.0 \mu\text{m}$	3
安装误差 $\beta_{zw} = 0.5 \mu\text{m}, \beta_y = 0.5 \mu\text{m}, \beta_v = 0.5 \mu\text{m}, \beta_{xu} = 0.5 \mu\text{m}$	0.5

4 几何误差与对准精度映射关系测量实验

为了验证敏感误差项与对准精度横向位错的映射关系,本文对该六轴精密运动平台各几何误差对准精度的影响进行了测量实验。以横向位错(x 方向)为例,采用 Renishaw XL-80 激光干涉仪测量六轴精密运动平台的横向位错,将其与上文计算结果进行对比,进而验证仿真结果。测量实验装置见图 5,激光干涉仪线性测长原理见图 6。

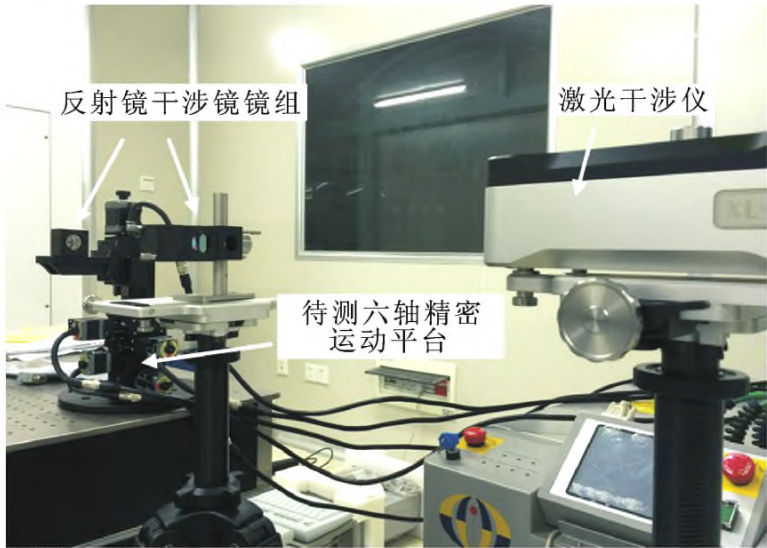


图 5 横向位错测量实验示意图

Fig.5 Schematic of experiment for transverse dislocation measurement

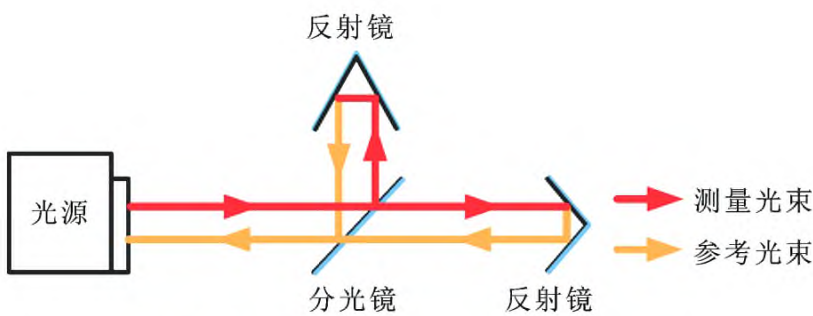


图 6 激光干涉仪线性测长原理示意图
Fig.6 Schematic of the linear measurement principle for laser interferometer

采用数学软件对测量数据进行拟合,得出各待测几何误差参数与横向位错的关系(图 7),计算结果与实际测量结果比较见表 8。由表 8 可以看出,前 3 行几何误差参数的测量结果与推导结果相近,而安装误差的测量结果与推导结果有一定的差异,这主要是因为安装过程中人为因素与环境因素造成的影响较为显著,而其他误差参数均是运动平台自身的运动误差,在制造过程中应尽可能地避免。

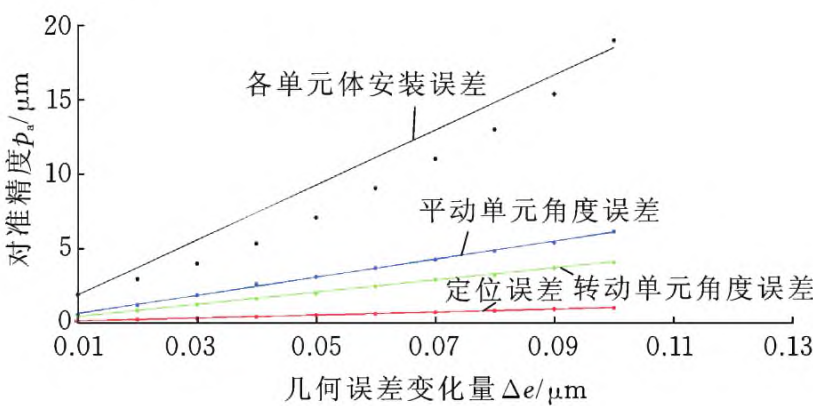


图 7 横向位错测量结果
Fig.7 Results for transverse dislocation measurement

表 8 计算结果与测量结果与
横向位错的映射关系

Tab.8 The mapping rule between transverse dislocation of derivation results and measuring results

几何误差	推导结果	拟合结果	拟合近似度 (R 平方函数)
z_x, z_y, z_z z_a, z_b, z_c	$y=x$	$y=0.998x$	0.998 5
u_x	$y=4.1x$	$y=4.082x$	0.999 8
u_z, u_c	$y=6.1x$	$y=6.078x$	0.972 4
α_{zc}	$y=21x$	$y=18.48x$	0.969 1

比较测量得出的映射关系与表 8 推导得出的映射关系的差异可以发现,基于误差模型的误差敏感性分析可准确得出六自由度精密运动平台几何误差与光纤对准精度的映射关系,为提高运动平台的精密提供了帮助。同时,这也在一定程度上揭示了六自由度精密运动平台几何误差与光纤对准精度的映射规律。其他方向的测量结果可根据同样的步骤得出。

通过实验与计算比较,对于横向位错,安装误差分布范围较广,影响程度最高。若安装误差达到 $0.5\text{ }\mu\text{m}$,则横向位错有 $10.5\sim 20.5\text{ }\mu\text{m}$ 的偏差;而运动单元的角度误差的影响也较大,当 $u_x=0.1\text{ }\mu\text{m}, u_z=0.1\text{ }\mu\text{m}, u_c=0.2\text{ }\mu\text{m}$ 时,横向位错别为 $4.1\text{ }\mu\text{m}, 6.1\text{ }\mu\text{m}, 12.2\text{ }\mu\text{m}$,而同方向的直线度误差直接反映到横向位错,因此,平台自由度的搭建需严格控制上述敏感误差项。对于对准偏差,同方向的角度误差也将直接反映到对准偏差。

5 结论

研究结果表明,控制阵列光纤的位姿及对准精度,可以依据齐次坐标矩阵几何误差模型,采用方差敏感性分析方法,辨识得出影响对准精度的重要误差项;分析运动平台的搭建结构,且通过实验结果验证,运动平台几何误差与光纤对准精度之间的确存在映射规律。综上所述,该方法可靠、有效,对提高光纤对准效率与封装效率大有帮助。本文研究思路与方法可为同类型高精密系统误差分析提供借鉴。关于热误差、运动速度与运动载荷等因素对对准精度的影响问题,笔者将在后续研究中深入展开。

参考文献:

[1] LI X H,GAO W,HIROSHI M,et al. A Six Degree of Freedom Surface Encoder for Precision Positioning of a Planar Motion Stage [J].Precision Engineering,2013,37(3):771-781.

[2] 郑煜,段吉安.平面光波导与阵列光纤耦合分析[J].中南大学学报(自然科学版),2009,40(3):681-686. ZHENG Yu, DUAN Ji'an. Coupling Analysis between Planar Optical Waveguide and Fiber Array [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2009,40(3):681-686.

[3] SUH S H,LEE E S,JUNG S Y. Error Modeling and Measurement for the Rotary Table of Five-axis Machine Tools[J]. Advanced Manufacturing Technology,1998,14(9):656-663.

[4] ERIK L J,BANCH A. Systematic Geometric Rigid Body Error Identification of 5-axis Milling Machines [J]. Computer-Aided Design, 2007, 39(4): 229-244.

[5] 刘又午.多体动力学的休斯敦方法及其发展[J].中国机械工程,2000,11(6):601-607. LIU Youwu. Development of Huston's Method on Multi-body Dynamics [J]. China Mechanical Engineering,2000,11(6):601-607.

[6] 张栋,张承进,魏强,等.压电工作台的神经网络建模与控制[J].光学精密工程,2012,20(3):587-596.

- ZHANG Dong, ZHANG Chengjin, WEI Qiang, et al. Modeling and Control of Piezo-stage Using Neural Networks [J]. Opt. Precision Eng., 2012, 20(3): 587-596.
- [7] 栗时平, 李圣怡, 王贵林. 基于空间误差模型的加工中心几何误差辨识方法[J]. 机械工程学报, 2002, 38(7): 121-125.
- SU Shiping, LI Shengyi, WANG Guilin. Identification Method for Errors of Machining Center Based on Volumetric Error Model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(7): 121-125.
- [8] 王秀山, 杨建国, 闫嘉钰. 基于多体系统理论的五轴机床综合误差建模技术[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(5): 761-765.
- WANG Xiushan, YANG Jianguo, YAN Jiayu. Synthesis Error Modeling of the Five-axis Machine Tools Based on Multi-body System Theory[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(5): 761-765.
- [9] 杨建国, 任永强, 朱卫斌, 等. 数控机床热误差补偿模型在线修正方法研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(3): 81-84.
- YANG Jianguo, REN Yongqiang, ZHU Weibin, et al. Research on On-line Modeling Method of Thermal Error Compensation Model for CNC Machine [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(3): 81-84.
- [10] 田延岭, 张大卫, 陈华伟, 等. 基于微定位工作台的精密磨削过程动力学建模与误差补偿技术[J]. 机械工程学报, 2005, 41(4): 168-173.
- TIAN Yanling, ZHANG Dawei, CHEN Huawei, et al. Modeling of Precision Grinding Process Based on Micro-positioning Table and Error Compensation Technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(4): 168-173.
- [11] TANG Hao, DUAN Ji'an, LAN Shuhuai, et al. A New Geometric Error Modeling Approach for Multi-axis System Based on Stream of Variation Theory[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 92: 41-51.
- [12] TANG Hao, DUAN Ji'an, ZHAO Qiancheng. A Systematic Approach on Analyzing the Relationship between Straightness & Angular Errors and Guideway Surface in Precise Linear Stage [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 120: 12-19.
- [13] TANG Hao, DUAN Ji'an, LU Shengqiang. Stream-of-variation (SOV) Theory Applied in Geometric Error Modeling for Six-axis Motion Platform[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 120: 1-9.
- [14] 唐皓, 段吉安, 郑煜, 等. 平面光波导精密对准平台运动误差的敏感性分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(8): 888-892.
- TANG Hao, DUAN Ji'an, ZHENG Yu, et al. Motion Error Sensitivity Analysis of Planar Optical Waveguide Precise Aligning Stage[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(8): 888-892.
- [15] ZI B, DING H F, WU X, et al. Error modeling and Sensitivity Analysis of a Hybrid-driven Based Cable Parallel Manipulator[J]. Precision Engineering, 2014, 38(1): 197-211.

(编辑 陈 勇)

作者简介: 唐 皓, 男, 1988年生, 讲师。研究方向为复杂精密运动系统误差分析等。唐果宁(通信作者), 男, 1959年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为矿山机械及材料摩擦磨损等。E-mail: 964800226@qq.com。

(上接第 1719 页)

- [13] ROSTAGHI M, AZAMI H. Dispersion Entropy: a Measure for Time-series Analysis[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(5): 610-614.
- [14] AZAMI H, ROSTAGHI M, ABASOLO D, et al. Refined Composite Multiscale Dispersion Entropy and Its Application to Biomedical Signals[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2017, 64(12): 2872-2879.
- [15] CHANG C C, LIN C J. LIBSVM: a Library for Support Vector Machines[EB/OL] (2016-12-22) [2017-6-20]. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.
- [16] Bearing Data Center Website. Case Western Reserve University [DB/OL] [2017-6-20]. <http://www.eecs.cwru.edu/laboratory/bearing>.

(编辑 陈 勇)

作者简介: 李从志, 男, 1994年生, 硕士研究生。研究方向为机械故障诊断、旋转机械故障特征提取。郑近德(通信作者), 男, 1986年生, 副教授。研究方向为动态信号处理、非线性动力学及机械故障诊断等。E-mail: lqdlzheng@126.com。