

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413427

超声电机驱动的激光跟踪平台误差建模与分析*

潘 松^{1,2}, 梁永锦^{1,2}, 陈 雷^{1,2}, 周年鹏^{1,2}, 马祺翀^{1,2}

(1. 南京航空航天大学精密驱动与控制研究所 南京 210016; 2. 南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室 南京 210016)

摘 要: 激光跟踪测试平台是一种空间大范围坐标测量仪器, 轴系的加工装配是其整机实现高精度测量的基础, 为了提高激光跟踪平台的指向定位精度, 研制了一套超声电机驱动的激光跟踪测量平台, 在结构误差建模和分析的基础上提出了一种评估激光跟踪平台指向精度的方法。首先, 基于多体系统理论以及坐标变换的原理, 建立了平台的拓扑结构模型。然后, 将加工装配中产生的轴系垂直度、同轴度、特征位置偏差、激光模组装配误差及各静态误差的初始位置引入误差传递矩阵, 同时根据平台转动情况, 将轴系晃动、控制误差等动态误差也引入其中, 建立了平台指向误差的完善模型。基于所建立的模型, 对其进行了数值仿真实验, 定量分析了各误差对指向精度的影响程度, 以及误差初始位置对指向精度的影响规律。最后, 基于仿真结果加工了一套超声电机驱动的激光跟踪平台, 并进行了轴系精度和指向精度测试。试验结果表明, 所搭建平台两轴轴系晃动 $<2.2''$, 轴系测角误差 $<1.1''$, 6.8 m 外激光末端 Y 方向重复定位误差在 0.20 mm 以下, Z 方向重复定位误差为 0.42 mm 以下, 试验结果验证了理论分析过程, 证明了所提方法的有效性。

关键词: 激光跟踪平台; 结构误差分析; 指向误差; 零件装配; 超声电机

中图分类号: TH115 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4025

Error modeling and analysis of a laser tracking platform driven by ultrasonic motor

Pan Song^{1,2}, Liang Yongjin^{1,2}, Chen Lei^{1,2}, Zhou Nianpeng^{1,2}, Ma Qichong^{1,2}

(1. Precision Drive Laboratory, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The laser tracking testing platform is a spatial large-scale coordinate measuring instrument. The machining and assembly of the shaft system is the base for achieving high-precision measurement of the entire machine. To improve the pointing and positioning accuracy of the laser tracking platform, a laser tracking platform driven by an ultrasonic motor is developed, and a method for evaluating the pointing accuracy of the platform is proposed based on structural error modeling and analysis. Firstly, the platform's topological structure is established based on the principles of multi-body system theory and coordinate transformation. Secondly, the shafting perpendicularity, coaxiality, feature position deviation, laser module assembly error, and the initial position of each static error are incorporated into the error transfer matrix. Meanwhile, considering the platform's rotation, dynamic errors such as bearing vibrations and control errors are also incorporated. A well-comprehensive pointing error model of the platform is formulated. Based on the established model, numerical simulation experiments are carried out to quantitatively analyze the influence of each error, as well as the influence of the initial position of the error on the precision of pointing. Building upon the established model, numerical simulation experiments are performed to quantitatively assess the impact of each error on pointing accuracy and the effect of error initial positions. Finally, based on the simulation results, a laser tracking platform driven by ultrasonic motors is manufactured. Axis accuracy and pointing accuracy testing experiments are conducted. The experiments show that the platform has a wobbling of under $2.2''$ for both axes, with an angular

收稿日期: 2024-10-30 Received Date: 2024-10-30

* 基金项目: 国家自然科学基金委员会-航天先进制造技术研究联合基金集成项目 (U2037603)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (SJCX22_0093) 资助

measurement error of less than 1.1". At a distance of 6.8 meters, the laser endpoint exhibits a repeat positioning error of less than 0.20 mm in the Y direction and below 0.42 mm in the Z direction. The experimental results validate the theoretical analysis process and demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: laser tracking platform; structural error analysis; pointing error; part assembly; ultrasonic motor

0 引 言

激光跟踪仪一种新型空间大范围坐标测量仪器,它利用激光束跟踪被测点位置靶标,测量靶标距原点的绝对和相对移动距离,再结合仪器上配备的码盘所测角度信息,计算得到被测点的空间坐标。随着现代工业制造业发展,零件复杂程度越来越高,装配精度要求不断提高,它们的发展需要激光跟踪有更好的效率、精度和便携性^[1-5]。目前,国内外激光跟踪仪多采用电磁电机进行驱动,由于在平衡位置弱磁力的作用,存在定位刚度低、定位时间长的问题,而旋转行波超声电机作为一种原动机具有低速、摩擦驱动、高功率密度、高位置分辨率和高电磁兼容等特性^[6-8],将其应用在激光跟踪仪上能进一步减小驱动系统的尺寸和重量,提高响应带宽和指向精度。

激光跟踪平台是激光跟踪仪的机械结构主体,由于零部件加工装配、负载安装、驱动控制系统等误差源的产生,直接影响了激光跟踪仪的测量精度。因此为了保证激光跟踪仪的工作精度,需找出激光跟踪平台的误差源,建立数学模型,分析各误差对平台的影响,确定零部件合理的误差范围以及装配方式,在现有的加工条件下尽可能减小误差的影响。

国内外学者对平台的误差分析提出了多种研究方法,其中机构运动学^[9]、矢量法^[10]、四元数法^[11]、误差合成^[12]等理论被应用到平台的误差建模中,但目前这些方法建立的误差模型通常存在适用性差,较为复杂,不易实现等问题。多体系统是对一般复杂机械系统或机构系统的完整抽象以及有效表述,任何多个刚体或柔体通过某种形式连接而成的复杂机械系统都可以抽象成一个多体系统,因此多体系统理论也被广泛应用到结构的误差建模中。刘宏旭等^[13-14]对平台的指向精度进行了数值仿真,分析了平台处于不同角度时部分误差对指向精度的影响。康跃然等^[15]将负载设备安装角度误差分量引入特征矩阵,完善了指向误差模型,并进行了仿真验证。刘延斌等^[16]基于多体系统理论及坐标变换建立了三轴平台的指向误差模型。童鹏飞等^[17]在此基础上基于复合函数全微分法分析了平台误差源对精度的影响程度并建立了各项误差源的灵敏度以及灵敏度系数,但未考虑平台转动角度对误差的影响。二维平台作为一个复杂的机电一体化系统,各误差相互影响,需要考虑误差之间的相互耦合关系。

从现有文献看,对于平台误差的研究大多以平台的静态误差作为研究对象,未考虑系统的动态误差,亦或将动态误差转为静态误差研究,且未考虑误差间相互耦合的关系,因此,对于平台精度的提高具有一定限度。此外,上述文献主要研究结构误差对指向精度的影响即实际指向矢量与理想指向矢量之间的夹角来定义^[13,18],对于激光跟踪仪这种复杂高精度大尺寸空间坐标测量仪器需要研究空间某一被测坐标点与激光末端实际偏差之间的关系。

针对上述问题,本研究以超声电机驱动的激光跟踪平台作为研究对象,详细分析了各误差源对轴系的影响,以理论矢量与实际矢量之差作为激光跟踪仪指向误差,建立指向误差随平台位姿变化的误差模型。并基于所建立的模型,行了数值仿真验证,对各项误差的影响系数进行分析,识别出关键误差,同时,对关键误差初始位置进行了分析。最后,设计加工了激光跟踪平台,验证了该方法的有效性。

1 平台总体结构

超声电机驱动的激光跟踪平台在保证结构强度,轴系精度的同时,应尽量减小体积和重量。激光跟踪平台的结构如图 1 所示,俯仰轴系以及方位轴系上都包括超声电机驱动装置和编码器测角装置,超声电机作为驱动与高精度编码器作为传感器一起构成闭环反馈系统,协同输出精确的角位移。为保证轴系旋转精度,俯仰轴采用双端支撑的方式,一端用 2 个 P2 级角接触轴承背对背方式固支在框架上,另一端采用 2 个深沟球轴承安装在框架上且轴承端盖间留有一定游隙,作为游动端;方位轴采用单端支撑的方式,通过一对角接触轴承背对背方式固支在基座上。

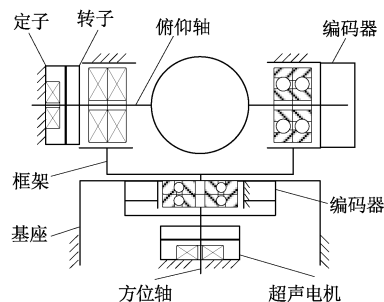


图 1 激光跟踪平台结构

Fig. 1 Structure of the laser tracking platform

为进一步减小驱动机构的体积和重量。超声电机采用定、转子分离式安装的结构,与主轴进行融合设计,俯仰轴系上的驱动装置与方位轴系上的驱动装置安装上有所不同。俯仰轴系上超声电机的转子通过支承固定在轴肩上,定子固定的支承内有一个轴承,轴承外圈与支承过盈配合,轴承内圈与俯仰轴间隙配合,并由精密锁紧螺母压住轴承内圈提供超声电机定子与转子间的预压力,电机定子的周向旋转由外框架或基座上限制。

方位轴系上的超声电机驱动装置则是定子固定在轴肩上,由定子带动方位轴旋转,方位轴为中空结构,电机定子以及编码器定字均采用内部走线的方式,由方位轴上的导电滑环供电,随轴一起转动,可以避免线束缠绕实现360°旋转。质量大的编码器转子安装在底座上可以减小方位轴系转动惯量。采用上述安装方式可以保证平台结构更紧凑,轴系刚度高。平台尺寸总高<173 mm,总宽<174 mm,质量<2.2 kg。

2 平台总体结构

2.1 多体系统误差建模理论

多体系统理论采用低序体阵列来描述复杂系统,可以全面考虑了影响系统运动精度的各项因素以及相互耦合情况,具有建模过程规范化、约束条件少、易于解决复杂系统运动问题的特点^[13,18-19]。激光跟踪平台是一个典型的串联结构,其拓扑结构如图2所示。

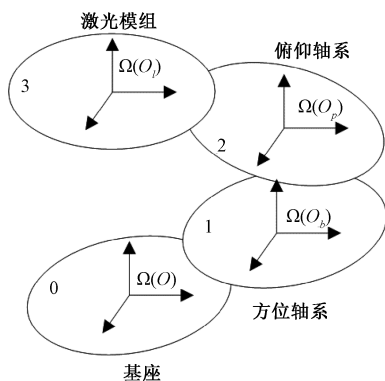


图2 激光跟踪平台拓扑结构

Fig. 2 Topology of the laser tracking platform

2.2 平台坐标系建立

在理想情况下,方位轴与俯仰轴各围绕自己回转中心旋转。如图3所示,在基座、方位轴、俯仰轴上分别建立基坐标系 $\Omega(O)$ 、子坐标系 $\Omega(O_b)$ 、 $\Omega(O_p)$ 和 $\Omega(O_l)$ 。

其中, $\Omega(O_l)$ 与 $\Omega(O_p)$ 重合;方位轴回转中心线与Z轴、 Z_b 轴、 Z_p 轴均共线, Y_b 轴与俯仰轴回转中心线平行,

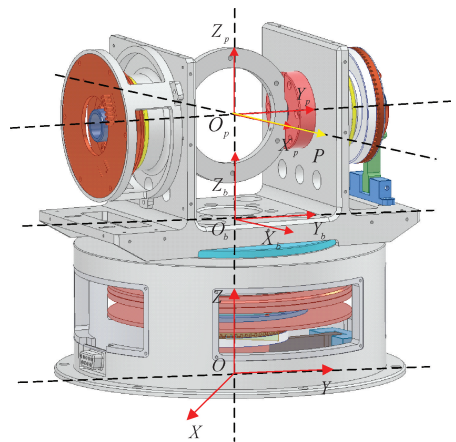


图3 激光跟踪平台坐标系

Fig. 3 Coordinate system of the laser tracking platform

Y_p 轴与俯仰轴回转中心线共线,坐标系 $\Omega(O_b)$ 和 $\Omega(O_p)$ 固定在轴上并随轴转动。矢量 P_p 与 X_p 轴共线,代表激光指向,其从基坐标系 $\Omega(O)$ 到 $\Omega(O_p)$ 转换关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} (P, 1)^T = T \cdot (P_p, 1)^T \\ T = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

式中:矢量 P 代表 P_p 在基坐标系 $\Omega(O)$ 下的表示; T 代表基坐标与坐标系的转换矩阵,其中包括一个 3×3 旋转矩阵 R 和一个平移矩阵 t 。矢量 P 从基坐标系 $\Omega(O)$ 到俯仰轴上的子坐标 $\Omega(O_b)$ 系 $\Omega(O_p)$ 经历了2次坐标变换如式(2)所示。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = T_b \cdot T_p \cdot \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

图2中 $\Omega(O_b)$ 坐标系相对于 $\Omega(O)$ 坐标系的Z轴转动,并向上平移 h ; $\Omega(O_p)$ 坐标系相对于 Z_b 轴转动,并向上平移了 h_b ,因此, $T_b = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$,

$$T_p = \begin{pmatrix} \cos(\beta_b) & 0 & \sin(\beta_b) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\beta_b) & 0 & \cos(\beta_b) & h_b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}。$$

在实际情况,由于各种误差的影响,会导致平台实际指向 P' 与理想指向 P 不同。本研究中激光跟踪平台的误差分为4类:位置误差、晃动误差、控制误差、激光测距误差。位置误差包括由机构尺寸误差导致零件安装位置发生变化,轴系同轴度导致回转轴心偏移;晃动误差主

要由零件的垂直度、轴承间隙导致轴系发生偏转;控制误差由系统的综合定位误差导致;激光测距误差主要包括激光的发射角度和测距精度。坐标系的偏移及晃动如图4所示。

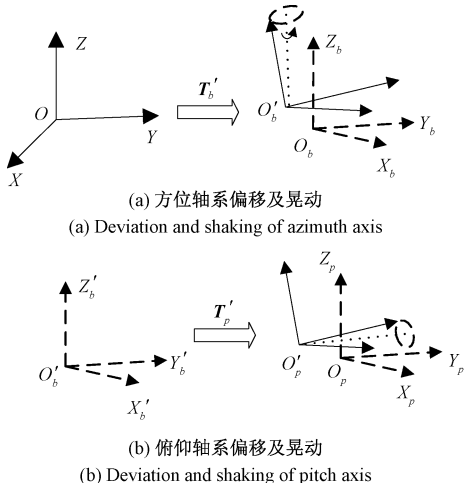


图4 坐标系的偏移及晃动

Fig. 4 The offset and shaking of the coordinate system

同样,建立它们之间的传递关系如式(3)所示。

$$\begin{cases} (\mathbf{P}_p, 1)^T = \mathbf{T}' \cdot (\mathbf{P}', 1)^T \\ \mathbf{T}' = \mathbf{T}'_b \cdot \mathbf{T}'_p \cdot \mathbf{T}_l \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{T}'_b$ 代表从基坐标 $\Omega(O)$ 到方位轴系上的坐标 $\Omega(O_b)$ 的实际转换矩阵; $\mathbf{T}'_p$ 代表从方位轴上的坐标 $\Omega(O_b)$ 到俯仰轴系 $\Omega(O_p)$ 的实际转换矩阵; $\mathbf{T}_l$ 代表从俯仰轴系上的坐标 $\Omega(O_p)$ 到激光模组上坐标系 $\Omega(O_l)$ 的实际转换矩阵,由激光模组的误差导致。

2.3 方位轴系分析

如图4(a)所示,方位轴与俯仰轴的垂直度误差,同轴度误差以及轴承的径向跳动会导致方位轴上的坐标系 $\Omega(O_b)$ 偏移以及绕着 Z_b 轴晃动,同时方位轴实际长度与理论长度存在高度差 Δh , $\Omega(O_b)$ 向上平移 Δh ,此外,方位轴基座的垂直度误差会导致轴系回转轴线偏移先于轴系转动,所以 $\mathbf{T}'_b$ 可以表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{T}'_b = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_\varphi & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{T}_b \begin{pmatrix} \mathbf{R}_b & \mathbf{t}_b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \mathbf{R}_\varphi = \text{rot}(\Delta\alpha^s) \text{rot}(\Delta\beta^s) \\ \mathbf{R}_b = \text{rot}(\Delta\gamma_b) \text{rot}(\Delta\alpha_b) \text{rot}(\Delta\beta_b) \\ \mathbf{t}_b = (\delta_x \quad \delta_y \quad \Delta h)^T \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\text{Rot}()$ 代表 3×3 的旋转矩阵, $\alpha_x, \beta_x, \gamma_x$ 分别代表绕坐标系的 X_x, Y_x, Z_x 轴转动角度,上标 s 代表误差随轴系转动改变,下面不再赘述; $\mathbf{t}_b$ 是 3×1 的平移矩阵 δ_x, δ_y 分别代表坐标系 $\Omega(O_b)$ 在基坐标系 $\Omega(O) XOY$ 面的投影坐标。 $\Delta\gamma$ 由方位轴上电机的定位误差产生; $\Delta\alpha^s, \Delta\beta^s$ 分

别代表由基座的垂直度误差导致 Z 轴绕 X, Y 轴偏转角度,设基座安装平面的垂直度为 $\Delta\varphi_b$, 偏向 γ_a^s 处,高度为 H_b , 它们关系可以表示为:

$$\begin{cases} \Delta\alpha^s = \lambda \frac{\Delta\varphi_b}{H_b} \cos \gamma_a^s \\ \Delta\beta^s = \lambda \frac{\Delta\varphi_b}{H_b} \sin \gamma_a^s \end{cases} \quad (5)$$

式中: λ 为弧度到角度的转换系数,俯仰轴系通过框架固定在方位轴端面上,俯仰轴与方位轴之间的垂直度误差主要受框架垂直度影响,设框架垂直度为 $\Delta\varphi_a$, 偏向 γ_b 方向。另外,由于轴承制造误差、轴系内部间隙以及外界干扰力矩等,运转过程中的回转轴线在外壳固定坐标系中并非稳定不变的,甚至存在明显的多圈非重复性^[20-21],因此,对处于某个具体时刻的回转轴线称之为瞬时回转轴线。为表征瞬时回转轴线在空间中的倾角变化,假定一条特定的线段作为基准,称为平均回转轴线^[20],设平均回转轴线与理论回转轴线夹角设为 $\Delta\sigma_b$, 方位轴到俯仰轴轴心距离为 L_a , 则有:

$$\begin{cases} \Delta\alpha_b = \lambda \left(\frac{\Delta\varphi_a}{L_a} \right) \cos \gamma_b + \Delta\sigma_b(\gamma) \cos \gamma \\ \Delta\beta_b = \lambda \left(\frac{\Delta\varphi_a}{L_a} \right) \sin \gamma_b + \Delta\sigma_b(\gamma) \sin \gamma \end{cases} \quad (6)$$

此外,设方位轴的同轴度 $\Delta\sigma_a$, 初始位置偏向 γ_a 处,在坐标系 $\Omega(O_b)$ 上相对位置保持不变,不随方位轴转动变化,因此有:

$$\begin{cases} \delta_x = \Delta\sigma_a \cos \gamma_a \\ \delta_y = \Delta\sigma_a \sin \gamma_a \end{cases} \quad (7)$$

2.4 俯仰轴系分析

同理,如图4(b)所示,俯仰轴系左右轴承安装孔的位置误差、俯仰轴的同轴度、轴承间隙会导致俯仰轴系 $\Omega(O_p)$ 偏移以及绕轴 Y_p 晃动,所以 $\mathbf{T}'_p$ 可以表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{T}'_p = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_\varphi^s & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{T}_p \begin{pmatrix} \mathbf{R}_p & \mathbf{t}_p \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \mathbf{R}_\varphi^s = \text{rot}(\Delta\alpha_b^s) \text{rot}(\Delta\gamma_b^s) \\ \mathbf{R}_p = \text{rot}(\Delta\beta_p) \text{rot}(\Delta\alpha_p) \text{rot}(\Delta\gamma_p) \\ \mathbf{t}_p = (\delta_{xp} \quad \delta_{yp} \quad \delta_{zp})^T \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\Delta\beta_b$ 是俯仰轴上电机的定位误差; $\Delta\alpha_b^s, \Delta\gamma_b^s$ 分别代表由于方位轴左右轴承安装孔的位置误差导致俯仰轴回转轴线偏转,偏转方向 β_b^s , 计算公式如式(9)所示。

$$\begin{cases} \Delta\alpha_b^s = \lambda \frac{\Delta\varphi_{p1} - \Delta\varphi_{p2} \cos \beta_b^s}{L_p} \\ \Delta\gamma_b^s = \lambda \frac{\Delta\varphi_{p1} - \Delta\varphi_{p2} \sin \beta_b^s}{L_p} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\Delta\varphi_{p1}, \Delta\varphi_{p2}$ 分别是俯仰轴系左右轴承孔位置误差, 整体偏向 β_b^s 。当俯仰轴转动 β_p 度时, 轴承晃动 $\Delta\sigma_s$ 的对俯仰轴影响如式 (10) 所示。

$$\begin{cases} \Delta\alpha_p = \frac{\Delta\sigma_s(\beta_p)}{2L_p} \cos \beta_p \\ \Delta\gamma_p = \frac{\Delta\sigma_s(\beta_p)}{2L_p} \sin \beta_p \end{cases} \quad (10)$$

式中: L_p 为俯仰轴长度。式 (8) 中 $\delta_{xb}, \delta_{yb}, \delta_{zb}$ 分别代表坐标系 $\Omega(O_p)$ 在基坐标系 $\Omega(O_b)$ 中 $X_bO_bZ_b$ 面的投影坐标, 其中 δ_{yb} 为俯仰轴的对称度。其余各值计算如式 (11) 所示。

$$\begin{cases} \delta_{xb} = \Delta\sigma_p \cos \beta_p^s + \frac{\Delta\varphi_{p1} + \Delta\varphi_{p2}}{2} \cos \beta_b^s \\ \delta_{zb} = \Delta\sigma_p \sin \beta_p^s + \frac{\Delta\varphi_{p1} + \Delta\varphi_{p2}}{2} \sin \beta_b^s \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\Delta\sigma_p$ 是俯仰轴同轴度误差; β_p^s 是初始偏向。
一般情况下激光测距精度远大于发射角度, 这里只考虑激光测距模块发射角度的影响, T'_l 可以表示为:

$$\begin{cases} T'_l = \begin{pmatrix} R_l & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ R_p = \text{rot}(\Delta\gamma_l^s) \text{rot}(\Delta\beta_l^s) \\ \Delta\gamma_l^s = \sigma_l \cos \alpha_l^s \\ \Delta\beta_l^s = \sigma_l \sin \alpha_l^s \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\Delta\gamma_p, \Delta\beta_p$ 分别为激光相对于坐标系 $\Omega(O_p)Z_p$ 和 Y_p 轴的偏转方向; σ_l 为偏转大小; α_l^s 为偏转方向。

综上, 将式 (2) 带入式 (1) 可以得到平台激光末端的理论坐标, 将式 (4) ~ (9) 带入式 (3) 中可以求得平台激光末端实际坐标, 各方向的末端偏差可以表示为:

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = p' - p = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (12)$$

3 关键误差数值分析

为研究单一误差对轴系精度的影响, 仅保留一个误差, 其余误差设为 0, 平台结构参数如表 1 所示, 假设误差初始位置如表 2 所示。根据误差模型, 以本文设计的激光跟踪平台为例, 使用 MATLAB 对其进行数值仿真, 激光指向距离为 5 m, 方位轴与俯仰轴旋转角度均取 $-90^\circ \sim 90^\circ$, 每隔 0.5° 取一个点, 共计 129 000 个点, X, Y, Z 各方向取最大值作为结果。

表 1 平台结构参数

Table 1 Structure parameters of the platform

结构参数	值
基座高度 H_b/mm	90
方位轴到俯仰轴距离 L_a/mm	75
俯仰轴安装长度 L_p/mm	121
激光指向距离 L_l/m	5

表 2 平台误差初始位置

Table 2 Initial position (°)

误差偏转方向	初始位置
基座垂直度 γ_a^s	90
方位轴垂直度 γ_b	-90
方位轴同轴度 γ_a	45
俯仰轴偏转方向 β_b^s	45
俯仰轴同轴度 β_p^s	-45
激光偏转方向 α_l^s	45

激光跟踪平台指向误差随机构误差变化如图 5 所示。为更清楚的表明轴系误差对指向精度的影响程度, 以指向误差增量与轴系误差增量比值来代表各误差影响程度, 对比值进行归一化后, 两轴系上各误差影响系数如图 5 所示。

从图 5(c) 中可以看出, 在方位轴系中, 轴承晃动和方位轴的垂直度对 X, Y, Z 这 3 个方向的误差均有很大影响, 各方向误差分量占方位轴系所有误差源的 83.3% 以上。

从图 5(d) 中可以看出, 在俯仰轴系中, 激光偏转误差对 3 个方向均有很大影响, 在 X, Y 两个方向的误差分量上占 40.1%, 在 Z 方向上占 80.5%。其中轴承晃动、框架轴孔偏差对 X, Y 两个方向的误差分量影响达到 52.9% 以上, 而对 Z 方向上误差影响较小。俯仰轴同轴度以及左右轴孔偏差导致的轴心偏置对 Z 方向误差影响占比 17.9%, 对 Z, Y 方向。

根据上述分析, 在设计精密轴系时应选择高精密轴承且通过合适的轴承预紧来保证轴系回转刚度, 减小轴系晃动。对于方位轴系, 在现有的加工条件下, 考虑经济性以及加工难易程度, 轴系加工应尽量保证方位轴与俯仰轴的垂直度, 可以适当放宽同轴度要求, 另外, 在进行测量工作时, 基座调平也尤为重要。对于俯仰轴系, 在装配激光模块时, 应做好激光校准工作, 其次, 框架左右轴承孔同轴度尽可能提高。考虑到零件尺寸及加工难易程度, 有重要误差源的零件加工精度大于 IT3 级, 其余按 IT6 级精度加工, 最后各误差取值如表 3 所示。

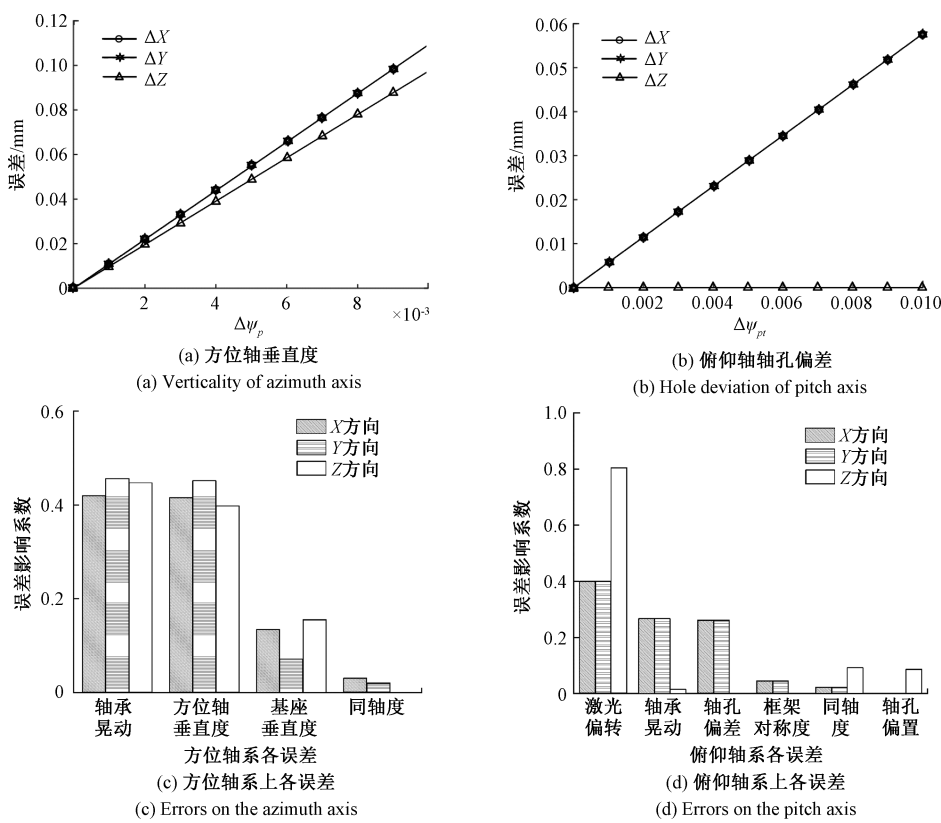


图 5 误差对轴系的影响
Fig. 5 The impact of errors on the shaft

表 3 平台误差取值
Table 3 Error value of the platform

误差来源	值
基座安装面垂直度 $\Delta\varphi_b/\text{mm}$	0.005
方位轴与俯仰轴垂直度 $\Delta\varphi_b/\text{mm}$	0.005
方位轴同轴度 $\Delta\sigma_b/\text{mm}$	0.006
轴孔偏差 $(\Delta\varphi_{p1}-\Delta\varphi_{p2})/\text{mm}$	0.005
轴心偏置 $(\Delta\varphi_{p1}+\Delta\varphi_{p2})/2/\text{mm}$	0.004
俯仰轴同轴度 σ_p/mm	0.006
安装框架对称度 δ_{yb}/mm	0.006
激光偏转误差 $\Delta\sigma_l/(\text{''})$	4

4 仿真及实验

4.1 轴系精度检测

控制误差是激光跟踪平台的重要指标,其受轴系精度、编码器和电机位置分辨率的共同影响。两轴均采用吉林省胜光电科技有限公司的 24 位编码器(分辨率 0.077 2''),超声电机由南京航达超控有限公司研制,位置

分辨率<0.5'')。如图 6 所示,采用光电自准仪(九江晶源仪器设备有限公司,型号 CSZ-1A,分辨率 0.001'',精度 0.1'')和 23 面棱体对轴系测角精度进行标定,重复多次后取平均值,因编码器读数误差具有周期性波动的特点,谐波补偿^[22-23]常被应用在轴系测角误差补偿上,这里采用三阶傅里叶变换函数对其进行拟合后补偿。平均回转轴线可以由电子水平仪(北京中西华大科技有限公司,型号 XLSQ-WL10,分度值 0.005 mm/m)获得,如图 7 中所示。测量时,首先将轴系调平,其次每隔 30°记录一次数据,重复多次后取平均值,后续仿真时轴承晃动数据由测

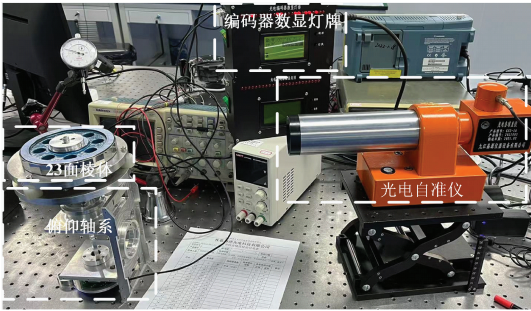


图 6 自准仪检测俯仰轴系测角精度
Fig. 6 The autocollimator detects the angle accuracy of the pitch axis system

试点拟合曲线获得。轴系精度如表 4 所示,方位轴系测角误差未经补偿时在 $-3.3''\sim 3.6''$ 内变化,变化范围为 $6.9''$;俯仰轴系测角误差未经补偿时在 $-3.1''\sim 3.0''$ 内变化,变化范围为 $6.1''$ 。

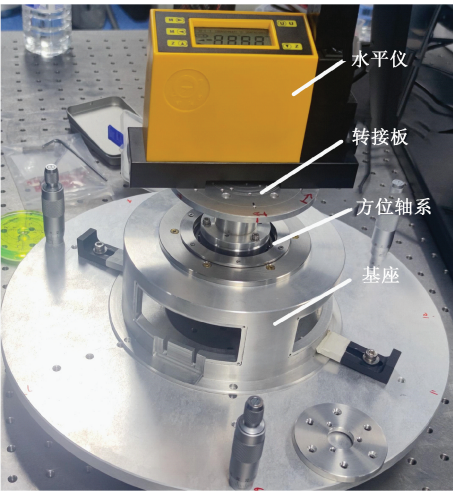


图 7 水平仪检测方位轴系晃动

Fig. 7 The gradienter detects the shaking of the azimuth axis

表 4 轴系测角精度

Table 4 Axis angle measurement accuracy

23 面棱体 角度/(°)	方位轴误差/(″)		俯仰轴误差/(″)	
	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	-3.0	-0.5	-3.1	-0.7
31	-3.3	-0.6	-1.9	0.9
46	-1.2	0.6	-2.9	-0.8
62	-0.10	0.4	-0.40	0.5
78	1.3	0.4	0.60	0.3
93	1.5	-0.5	0.30	-0.8
109	2.6	-0.2	1.6	0.3
125	3.6	0.4	1.0	0.1
140	3.2	-0.1	0.1	-0.2
156	3.0	-0.1	-0.20	0.6
172	2.6	-0.2	-2.5	-0.8
187	2.1	-0.3	-1.5	0.7
203	2.3	0.3	-2.4	-0.1
219	2.0	0.2	-1.8	0.1
234	1.7	-0.1	-1.7	-0.7
250	2.3	0.5	-0.3	-0.5
266	2.4	0.4	2.7	1.3
281	1.8	-0.3	3.0	0.6
297	1.2	-1.1	2.1	-0.9
313	2.1	-0.1	2.5	-0.5
328	2.5	0.6	2.8	0.4
344	1.7	0.4	1.7	0.3

由图 8 可知,两轴测角误差经谐波补偿后均下降到 $\pm 1.1''$ 内,测角误差满足精密测量需要。从图 9 可以看出两轴系晃动最大值在 $\pm 2.2''$ 之内,轴系刚度高,能满足精密平台要求。

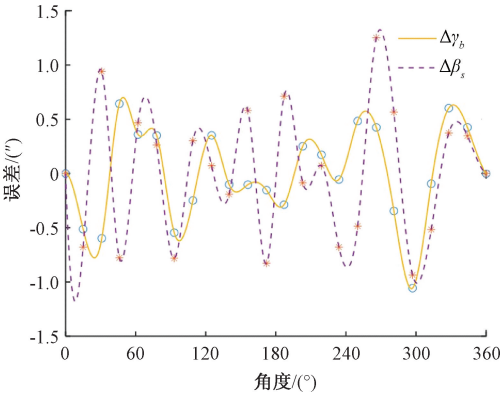


图 8 补偿后测角误差

Fig. 8 Compensated angle measurement error

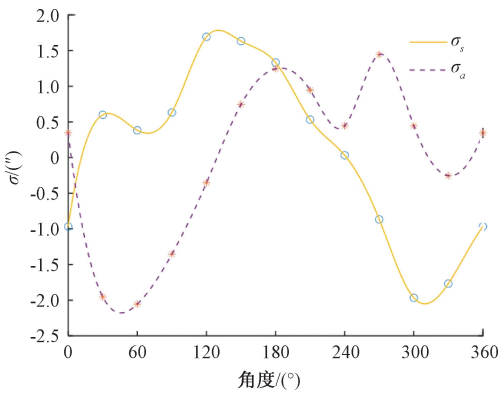


图 9 轴系晃动误差

Fig. 9 The axis shaking error

4.2 误差初始位置对指向精度的影响

机构上各误差存在相互叠加或补偿的现象,误差间的相对初始位置会影响激光跟踪平台的最终的指向精度。机构误差确定后,为进一步提高平台的指向精度需要对误差的相对位置进行分析。为研究误差初始位置对指向精度的影响,改变其中一个误差的初始角度,其余参数保持不变。

将表 1、2 数据及轴承晃动、测角误差带入误差模型,初始转态下激光跟踪平台在 5 m 处的末端偏差如图 10 中的点云所示,3 个方向的最大偏差 < 0.8 mm。从图 10(a)中可以看出 Z 方向的误差在 $0\sim 0.57$ mm 内变化,变化量为 0.57 mm,受俯仰轴转动的影响影响很大,与 $\beta = 0^\circ$ 呈对称分布且较大值集中在方位转角取 $-90^\circ\sim 0^\circ$ 俯仰转角取 $-45^\circ\sim 45^\circ$ 内,考虑是误差初始位置影响。从图 10(b)中可见 Y 方向的误差在 $-0.79\sim 0.65$ mm 内

变化,变化量为 1.54 mm,与面 $\gamma = \beta$ 呈对称分布,较大值主要分布在方位角或俯仰角处于极限位置时。从图 10(c)中可见 X 方向的误差在 $-0.70 \sim 0.81$ mm 内变

化,变化量为 1.51 mm,与面 $\gamma = \beta$ 呈对称分布,与 Y 方向误差分布形态相似,较大值同样集中在两端。 X 、 Y 两个方向的误差变化量约为 Z 方向误差的 3 倍。

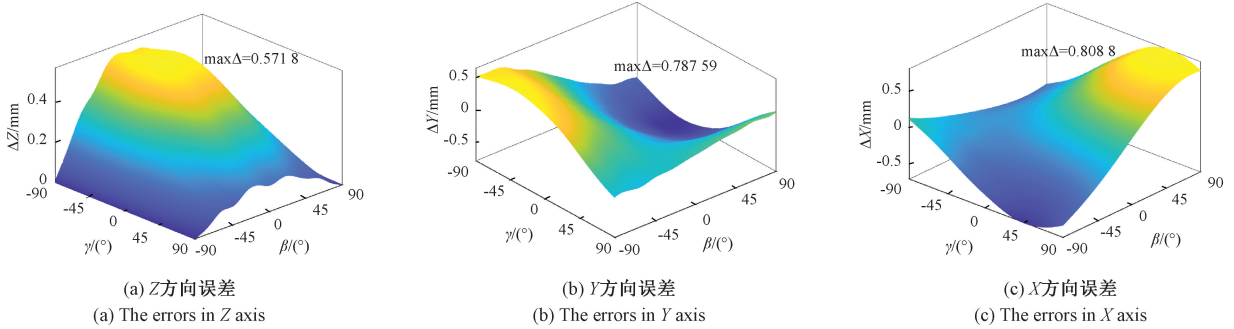


图 10 各方向误差变化趋势

Fig. 10 The trend of error changes in different directions

根据 4.1 节的分析结果,同时考虑到方位和俯仰轴系分别装配好后,方位轴轴系与俯仰轴系相对位置关系

以及激光偏转方向更易于调整,选取方位轴垂直度、激光偏转误差的初始位置进行分析,结果如图 11 所示。

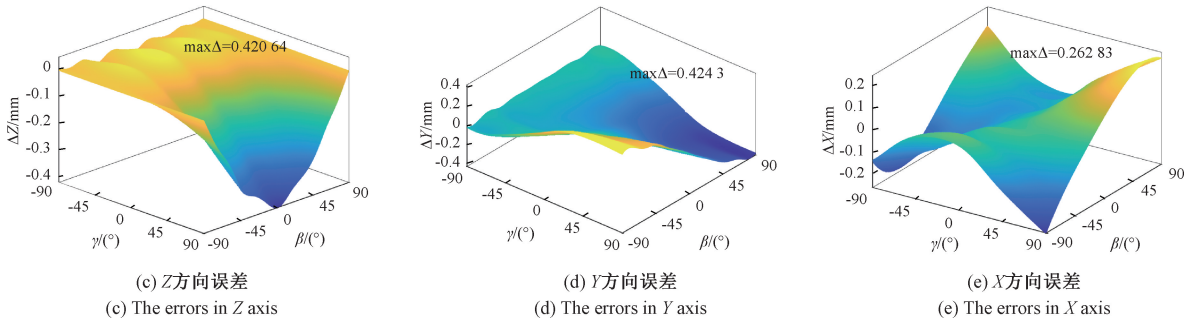
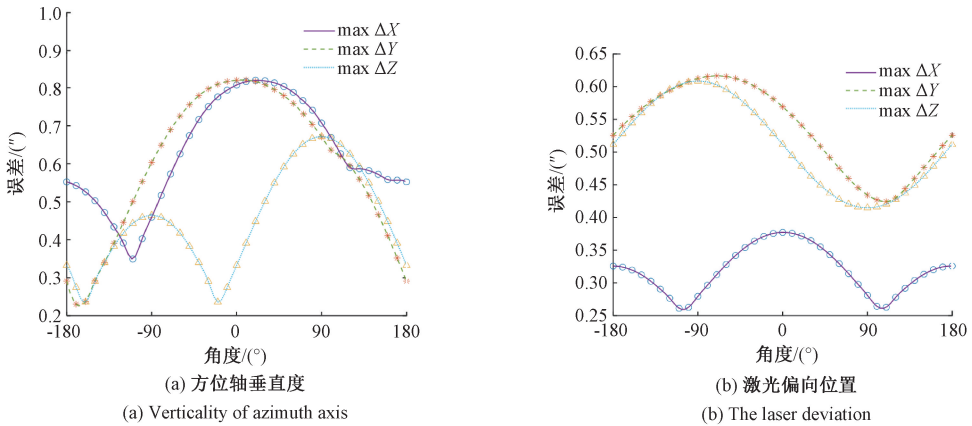


图 11 误差位置对指向精度的影响

Fig. 11 The influence of errors on pointing accuracy

从图 11(a)中可以看出方位轴垂直度初始变化对各方向误差均有较大的影响,3 个方向误差分量变化量接近 0.5 mm,在 $\gamma_b = -110^\circ$ 左右,3 个方向误差均能取到较最小值。从图 11(b)中可以看出随激光偏转方向的改变,各方向误差最大误差也有明显改变, Y 、 Z 方向误差变化趋势相似,误差变化量在 0.21 mm 内, X 方向误差分

量变化量约为 0.15 mm。在 $\alpha_l^i = 110^\circ$ 左右,3 个方向误差均能取到较最小值。将 $\gamma_b = -110^\circ$ 和 $\alpha_l^i = 110^\circ$ 带入误差模型,误差分布如图 11(c)~(e)所示。如图 11(c)所示, Z 方向误差分量变化范围 $-0.04 \sim 0.42$ mm,变化量为 0.46 mm,相比初始位置最大误差减小 26.3%,误差范围减小 15.7%。如图 11(d)所示, Y 方向误差分量变化范

围 $-0.42\sim 0.42\text{ mm}$,变化量为 0.84 mm ,相比初始位置最大误差减小 35.3% ,误差范围减小 45.4% 。如图 11(e)所示, Z 方向误差分量变化范围 $-0.27\sim 0.24\text{ mm}$,变化量为 0.51 mm 。相比初始位置最大误差减小 66.7% ,误差范围减小 66.2% 。经过调配后最大误差以及误差变化范围均有明显减小。

4.3 平台重复定位精度测试

为了验证装配后轴系的分辨率,采用开环脉冲微步进驱动电机运行,测得两轴系稳定旋转时最小分辨率,俯仰轴测试结果如图 12 所示,可以实现最小步距 $0.000\,02^\circ$ 的步进驱动,对应的编码器一个最小分辨率,换算成角秒制为 $0.077\,2''$ 。

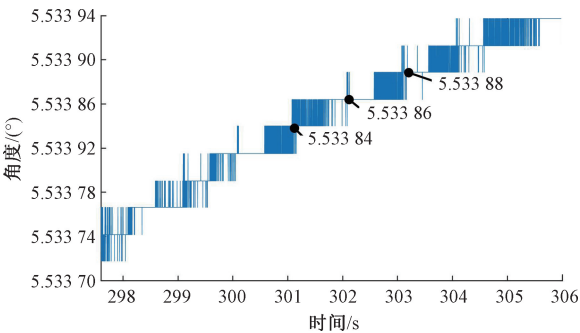


图 12 开环步进驱动
Fig. 12 Open-loop step driving

针对平台的主要参数,本研究将所提平台与代表性的平台进行了对比,如表 5 所示。平台轴系采用常规模型预测控制算法在闭环下允许调整 3 s ,伺服重复定位精度可以达到 $1.1''$,在不限限制闭环调整时间下可以实现重复定位精度在 $0.5''$ 内,与精密测量行业内商用高性能产品接近。研究中发现控制算法和策略对系统的伺服定位影响较大,摩擦驱动中非线性带来的模型参数变化给常规模型预测控制带来挑战,未来研究中将在这方面重点突破。

表 5 参数对比
Table 5 Parameters comparison

对比文献	重量/ kg	分辨率/ (")	精度/(")	
			俯仰	方位
文献[24]	1.526	5.9	272.9	272.9
文献[25]	2.35	0.62	2.00	2.0
文献[26]	8.00	0.039	5.70	5.4
文献[27]	7.70	0.1	0.50	0.5
文献[28]	5.70	0.1	1.00	1.0
本文	2.20	0.078	1.10	1.1

平台定位精度受轴系测角误差以及结构中各误差源的综合影响,因此,需要进一步对整个系统的定位精度进行验证。在空间中选取不同的点位通过闭环控制驱动平台两个轴系进行重复定位,位置伺服精度控制在编码器的一个最小分辨率之内,采用图像识别技术测定激光点中心的像素坐标。图像 CCD 传感器分辨率为 $3\,025\times 1\,948$,根据图像大小,可以得到每一个像素对应的尺寸为 $170\text{ }\mu\text{m}$,数据采集时保持相同光源环境,激光跟踪平台距反射平面 6.8 m ,如图 13 所示,选取一点为基准值,控制平台重复对这一点进行定位,每次定位后将图像数据传递到上位机进行数据处理,得到激光点坐标,如图 14 所示。按上述操作选取不同点位分组采集多次。激光点与基准点像素坐标之差乘以像素分辨率得到激光点在 Y/Z 方向的偏移量,部分结果如表 6 所示, Y 方向最大偏差为 0.20 mm , 94.4% 的点误差在 0.15 mm 以下。 Z 方向最大偏差为 0.42 mm , 88.8% 的点误差在 0.3 mm 以下,实验结果与仿真计算相符。将偏移量除以激光长度可以得到方位轴和俯仰轴角度偏差,结果如图 15 所示,方位轴角度偏差在 $5''$ 内,平均值为 $2.6''$;俯仰轴角度偏差在 $9''$ 内,误差平均值为 $5.7''$ 。俯仰轴角度误差约为方位轴角度误差的 2 倍,考虑是由于俯仰轴系误差项多,框架左、右轴孔同轴度难以保证等原因导致的。

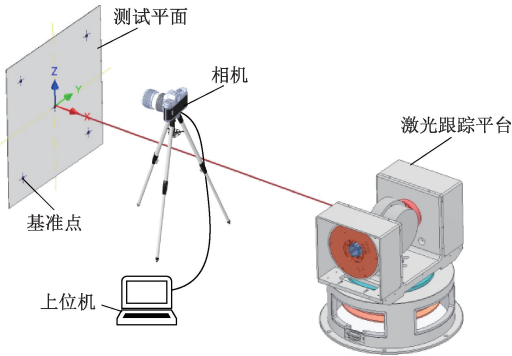


图 13 重复定位精度实验
Fig. 13 The experiments of repeatability



图 14 重复定位实验传感器数据采集
Fig. 14 Data acquisition of repeatability

表 6 重复定位误差
Table 6 Repetitive positioning errors (mm)

次数	Y 方向	Z 方向	次数	Y 方向	Z 方向
1	0.20	0.28	10	0.15	0.29
2	0.14	0.28	11	0.05	0.29
3	0.03	0.42	12	0.05	0.18
4	0.03	0.34	13	0.11	0.27
5	0.13	0.12	14	0.02	0.07
6	0.14	0.05	15	0.07	0.15
7	0.04	0.03	16	0.03	0.25
8	0.04	0.05	17	0.02	0.21
9	0.05	0.17	18	0.08	0.20

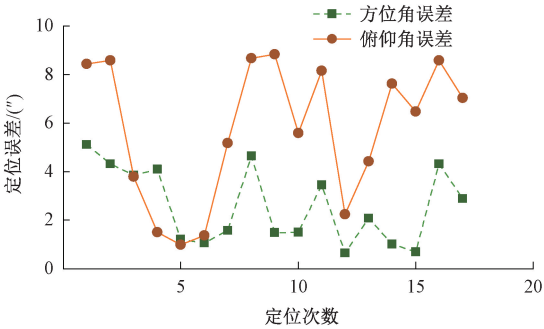


图 15 平台重复定位误差

Fig. 15 Repetitive positioning errors

6 结 论

通过对超声电机驱动的激光跟踪平台进行建模和实验测试得到如下结论：

1) 本研究为评价激光跟踪平台的指向定位精度,根据激光跟踪平台的结构设计要求,细化分析方位轴系、俯仰轴系、激光测距模块的各项误差源。考虑误差源的相对位置并将轴系晃动、测角误差等动态误差引入误差传递矩阵中,建立了完善的指向误差模型。

2) 基于模型识别出影响平台指向精度的关键误差源,为误差分配提供依据。在现有的加工条件下,优先保证轴系回转刚度、方位轴与俯仰轴的垂直度、框架上轴孔的同轴度误差以及激光的偏转误差。

3) 考虑误差间相互耦合的关系,将实验与仿真相结合,对于关键误差源的初始位置进行了研究。将平台误差数据带入模型,基于仿真结果选取合适的安装位置能有效降低系统的总体误差,为零部件装调提供了依据。

4) 搭建了超声电机驱动的激光跟踪平台,试验结果显示,激光跟踪平台轴系晃动 $<2.2''$,测角误差 $<1.1''$,6.8 m 外激光末端 Z 方向偏差 <0.42 mm, Y 方向偏差 <0.20 mm,试验结果与理论计算相符,验证了该方法的有效性。

本研究的现阶段研究主要在分析平台机械结构本身的误差,在应用中超声电机的驱动控制对系统精度有较大影响,在未来的研究中将基于本文所建理论模型和测试数据进行相关伺服控制研究。

参考文献

[1] BENJAMIN D, SIMON M K. Investigation of innovative technologies for automated assembly and joining of a full-scale thermoplastic composite fuselage [C]. AIAA SciTech Forum, Orlando, FL, 2024:8-12.

[2] ARCHENTI A, GAO W, DONMEZ A, et al. Integrated metrology for advanced manufacturing[J]. CIRP Annals, 2024, 73(2) :639-665.

[3] VIKAS, SAHU R K. A review on application of laser tracker in precision positioning metrology of particle accelerators[J]. Precision Engineering, 2021, 71:232-249.

[4] XING Y B, DONG L, WANG T, et al. High-precision spatial measurement method of accelerator pre-alignment based on multiple total stations [J]. Measurement Science and Technology, 2024, 36(1) : 5014.

[5] 张昊,熊芝,赵子越,等. 火箭撬试验长直轨道测量控制网的建立及精度分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(10) : 88-96.

ZHANG H, XIONG ZH, ZHAO Z Y, et al. Establishment and precision analysis of long-straight track measurement control network for rocket sled test [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(10) : 88-96.

[6] YANG L, HUAN Y J, REN W H, et al. Position control method for ultrasonic motors based on beat traveling wave theory[J]. Ultrasonics, 2022, 125: 106793.

[7] 陈浩,李华峰. 超声电机驱动的机械臂控制系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(9) :70-75.

CHEN H, LI H F. Research on the control system of manipulator driven by ultrasonic motor [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(9) : 70-75.

[8] 潘松,肖忠,徐张凡,等. 聚合物定子超声电机驱动的变倍激光扩束镜[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(5) :855-862,1029.

- PAN S, XIAO ZH, XU ZH F, et al. Ultrasonic motors technologies and applications[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(5): 855-862, 1029.
- [9] 李文龙, 谢核, 尹周平, 等. 机器人加工几何误差建模研究: I 空间运动链与误差传递[J]. 机械工程学报, 2021, 57(7): 154-168.
- LI W L, XIE H, YIN ZH P, et al. The research of geometric error modeling of robotic machining: I spatial motion chain and error transmission[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(7): 154-168.
- [10] 周维虎, 费业泰, 李百源, 等. 激光跟踪仪几何误差修正[J]. 仪器仪表学报, 2002(1): 56-59, 63.
- ZHOU W H, FEI Y T, LI B Y, et al. The correction of geometric error for laser tracker[J]. Instrumentation, 2002(1): 56-59, 63.
- [11] 贾建援, 柴伟, 于大林, 等. 方位俯仰转台误差参数辨识与指向精度分析[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1500-1508.
- JIA J Y, CHAI W, YU D L, et al. Error parameters identification and pointing accuracy analysis of an azimuth-elevation turntable[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1500-1508.
- [12] 于夫男, 徐抒岩. 应用于 $\Phi 300$ mm 平面反射镜的精密二维转台轴系设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(5): 1075-1082.
- YU F N, XU SH Y. Shafting design for precise two-dimensional turntable applied to $\Phi 300$ mm plane mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(5): 1075-1082.
- [13] 刘宏旭, 任珂珂. 基于多体理论的两轴光电转台结构误差分析[J]. 激光与红外, 2015, 45(10): 1239-1243.
- LIU H X, REN K K. Structure error analysis of two axis optic-electrical turntable based on the multi-system kinematics[J]. Laser and Infrared, 2015, 45(10): 1239-1243.
- [14] 李凡, 朱国力. 三轴标定转台的指向误差建模与仿真分析[J]. 机械工程与自动化, 2014(6): 147-149.
- LI F, ZHU G L. Modeling and simulation analysis of pointing error in a three-axis calibrated turntable[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2014(6): 147-149.
- [15] 康跃然, 肖本龙, 傅亦源, 等. 三轴转台系统姿态变化下指向误差建模与分析[J]. 制造业自动化, 2018, 40(12): 135-139.
- KANG Y R, XIAO B L, FU Y Y, et al. Modeling and analyzing pointing error of the three-axis turntable system under posture change[J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(12): 135-139.
- [16] 刘延斌, 金光, 何惠阳. 轴仿真转台指向误差的建模研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005(5): 701-704.
- LIU Y B, JIN G, HE H Y. Research on model of pointing error of a three-axis simulation turntable[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005(5): 701-704.
- [17] 童鹏飞, 岳义, 韦宝琛, 等. 基于多体系统理论的三轴转台几何误差建模以及灵敏度分析[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(4): 108-112, 117.
- TONG P F, YUE Y, WEI B CH, et al. Geometric error modelling of three-axis turntable and sensitivity analysis based on multi-system theory[J]. Machine Design and Research, 2020, 36(4): 108-112, 117.
- [18] 焦安铃, 陈光胜. 基于球杆仪的五轴数控机床误差快速检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1): 138-148.
- JIAO AN L, CHEN G SH. Fast error identification method for five-axis machine tools based on double ball-bar[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1): 138-148.
- [19] 范晋伟, 费仁元, 田越, 等. 基于多体系统运动学理论的并联机床运动空间分析及仿真研究[J]. 机械工程学报, 2001(1): 32-36.
- FAN J W, FEI R Y, TIAN Y, et al. Motion space analysis and simulation research of parallel machine tools based on the kinematics theory of multi-body systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2001(1): 32-36.
- [20] 任顺清, 陈世杰, 李玉华. 论瞬时轴线垂直度、平均回转轴线垂直度与 Wobble 的关系[J]. 中国惯性技术学报, 2002(1): 56-60.
- REN SH Q, CHEN SH J, LI Y H. Discussion on relationships among instantaneous axis perpendicularity, average axis perpendicularity and Wobble[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2002(1): 56-60.
- [21] 史耀强, 郑渊. 轴系回转轴线指向误差测量方法[J]. 上海航天, 2020, 37(4): 128-132, 140.
- SHI Y Q, ZHENG Y. A measurement method for the pointing error of a shafting rotation axis[J]. Aerospace Shanghai, 2020, 37(4): 128-132, 140.
- [22] 舒溢, 朱维斌, 黄垚, 等. 转台定位误差谐波函数计

- 算方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 9-17.
- SHU Y, ZHU W B, HUANG Y, et al. A calculation method for positioning error of turntable based on harmonic function[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 9-17.
- [23] 吴斌, 王航, 康杰虎. 小型精密谐波转台角度定位精度标定与补偿[J]. 光学 精密工程, 2019, 27(10): 2207-2214.
- WU B, WANG H, KANG J H. Calibration and compensation of small precision harmonic turntable[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(10): 2207-2214.
- [24] 朱李军. 压电驱动轻型地月二维指向调整机构研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- ZHU L J. Research on light two-dimensional earth-moon direction adjustment mechanism driven by piezoelectric[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [25] 薛久明, 王世明, 李永国. 超声电机驱动的轻量化扫描机构高精度控制[J]. 压电与声光, 2018, 40(3): 379-383.
- XUE J M, WANG S H M, LI Y G. High precision control method of lightweight spatial scanning drive mechanism based on ultrasonic motor[J]. Piezoelectric and Acousto-optics, 2018, 40(3): 379-383.
- [26] 胡康强. 基于超声电机的高精度二维转台控制研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- HU K Q. Study of high precision two-dimensional turntable control based on ultrasonic motor[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [27] SCHUWERACK C, QUIRIN L, LELLE N G, et al. Enhancing the accuracy of the Leica Nova TS60 total station: A multi-purpose camera-based optical measurement system[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2024: 153-160.
- [28] ZHAO H, ZHAO Y, TOMKO M, et al. MoLO: Drift-free LiDAR odometry using a 3D model[J]. Photogrammetric Record, 2024, 39(187): 641-663.

作者简介



潘松(通信作者), 2003 年于山东理工大学获得学士学位, 2009 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为南京航空航天大学副教授, 主要研究方向为智能压电作动器和传感器、超声电机的高效驱动控制、高精度伺服控制系统理论和技术以及智能无损检测。

E-mail: pansong@nuaa.edu.cn

Pan Song (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2003, and received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2009. He is currently an associate professor at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include intelligent piezoelectric actuators and sensors, efficient drive control of ultrasonic motors, theory and technology of high-precision servo control systems, and intelligent non-destructive testing.