

文章编号 1004-924X(2024)14-2200-11

二维激光跟踪转台轴系设计及动态形变误差修正

霍汉林¹, 王劲松^{1*}, 王国名^{2,3*}, 李根梓⁴, 周维虎^{2,3}

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院 微电子研究所, 北京 100094;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 雁栖湖基础制造技术研究院(北京)有限公司, 北京 101407)

摘要: 二维激光跟踪转台轴系结构的稳定性及动态形变误差补偿精度是激光跟踪仪实现高精度动态坐标测量的关键因素。为满足激光跟踪仪动态坐标测量高精度、高稳定的实际需求, 本文研制了一套基于过定位双角接触轴承对轴系的二维转台。首先, 基于转台性能指标要求开展二维转台轴系设计及精度分析; 然后, 基于所设计结构及现有装配工艺, 结合弹性力学理论, 开展转台动态形变误差形成机理分析, 并通过刚柔耦合动力学仿真分析验证理论分析合理性。最后, 提出基于共轭差动式光学自准直原理的轴系动态误差测量方法, 完成对轴系稳定性和动态形变误差的测量补偿。实验结果表明: 转台的动态形变误差重复性优于 $\pm 0.6''$, 动态形变误差由补偿前的 $\pm 7''$ 降低为 $\pm 1''$, 转台设计的稳定性和动态形变误差补偿精度满足设计需求。

关键词: 激光跟踪仪; 二维激光跟踪转台; 轴系精度; 动态形变误差; 光学自准直

中图分类号: TH74 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20243214.2200

Shafting design and dynamic deformation error correction of two-dimensional laser tracking turntable

HUO Hanlin¹, WANG Jinsong^{1*}, WANG Guoming^{2,3*}, LI Genzi⁴, ZHOU Weihu^{2,3}

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Yanqi Lake Institute of Basic Manufacturing Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 101407, China)

* Corresponding author, E-mail: Soldier_1973@163.com & wangguoming1@ime.ac.cn

Abstract: The stability of shafting structure and the compensation accuracy of dynamic deformation error are the key factors for laser tracker to achieve high-precision dynamic coordinate measurement. To fulfill the stringent requirements of high precision and stability in dynamic coordinate measurement, a two-dimensional turntable based on an over-positioned double angular contact bearing shafting system has been developed. Initially, the design and precision analysis of the two-dimensional turntable shafting were conducted

收稿日期: 2024-02-08; 修订日期: 2024-03-15.

基金项目: 国家重点研发项目(No. 2022YFB3403800); 吉林省重点科技研发项目(No. 20180201025GX)

based on the performance specifications of the turntable. Subsequently, based on the designed structure, existing assembly techniques and the theory of elasticity, the mechanism of the dynamic deformation error of the turntable was analyzed, and the rationality of the theory was verified through rigid flexible coupling dynamics simulation. Finally, a method for measuring shafting dynamic errors based on the symmetric differential optical self-collimation principle was proposed to achieve the measurement and compensation of shafting stability and dynamic deformation errors. The two-dimensional laser tracking turntable, as a crucial component of laser trackers to achieve high-precision dynamic coordinate measurements. Experimental results demonstrate that the repeatability of the turntable's dynamic deformation error is superior to $\pm 0.6''$, and the dynamic deformation error has been reduced from $\pm 7''$ to $\pm 1''$ after compensation. The stability and dynamic deformation error compensation accuracy of the designed turntable meet the requirements.

Key words: laser tracker; two-dimensional laser tracking turntable; shafting accuracy; dynamic deformation error; optical autocollimation

1 引言

激光跟踪仪是一种高端精密动态坐标测量仪器,可对空间运动目标进行快速跟踪测量,其具有测量精度高、测量速度快、便携及操作简单等特点,在航空、航天、船舶、武器装备及大科学装置等大尺寸精密测量领域具有重要应用^[1-3]。

激光跟踪仪采用球坐标测量原理,其主要由复合激光测距单元、二维跟踪转台、精准跟踪控制单元、目标探测与识别锁定单元等组成。其中通过激光测距系统完成法向距离测量,跟踪转台完成二维正交角度测量,通过转台控制系统及脱靶量探测系统完成目标精准跟踪,最终结合一维距离和二维角度测量实现空间目标的动态坐标获取。因此作为激光跟踪仪精密角度测量和精准跟踪执行的关键部件,二维跟踪转台的性能优劣直接影响激光跟踪仪综合测量精度。

二维跟踪转台不同于传统吊舱类转台和仿真测试类转台,其特点为轴系精度高、二轴正交性好、转动速率低、瞬时加速度大、控制精度高及动态形变小,是一种集测量精度、控制精度与动态性能于一体的高端专用转台类别。国际上 Leica 品牌激光跟踪仪最早采用通轴反射式轻载二维激光跟踪转台,通过光学载荷与转台运动部件的分离,实现轻负载高动态、高精度的性能参数,国内中国科学院团队也于 2009 年开发成功类似的反射式轻载激光跟踪转台,但由于该类型转台误差因素多、维护性差及无法保证激光偏振性

等缺点,为后续型号所放弃。故以 Leica, API, FARO 为代表的主流激光跟踪仪品牌先后采用双半轴式直射重载激光跟踪转台,作为激光跟踪仪的转台的主流结构,2020 年后中国科学院微电子研究所和深圳中图仪器公司分别开发的激光跟踪仪也相继使用直射式跟踪转台,推进了国产二维激光跟踪转台技术的进一步发展。

二维激光跟踪转台的轴系稳定性和动态形变的可补偿性是激光跟踪仪精度实现的重要保障,本文围绕轴系结构稳定性、动态形变误差检测补偿等研究内容,研制开发一种稳定性好、重复精度高的二维激光跟踪转台,完成其结构设计及结构形变误差来源分析,通过刚柔耦合动力学仿真分析验证误差成因分析的合理性与严谨性,并提出新型力学形变误差测量与补偿方法,实现动态形变误差的精确补偿,为进一步提升国内精密跟踪转台及跟踪测量设备的研制提供方法和技术积累。

2 转台总体结构

二维激光跟踪转台需要较高的垂直度、相交度精度,保证仪器的正交性坐标基准;需要较高的角度测量精度,保证合作目标空间角度测量精度;需要良好的瞬时加速度和控制精度,保证仪器良好的跟踪性能;本设计转台除了上述通用设计指标外,其结构设计的关键是要保证轴系动态稳定性,即要求动态形变重复性精度优于 $\pm 1''$,

补偿后形变误差 $\leq\pm 1.5''$ 。二维激光跟踪转台采用轻量化、立式一体化设计,总体结构如图1所示,主要包括方位轴系及其驱动组件、俯仰轴系及其驱动组件、O型框、负载内框及精密测角组件等。

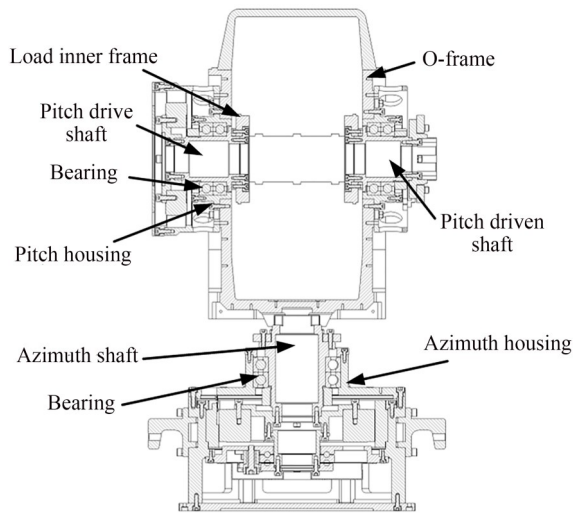


图1 二维激光跟踪转台整体结构

Fig. 1 Overall structure of 2D laser tracking turntable

O型框作为承接俯仰轴系及方位轴系的主体,它既是俯仰轴系的支撑结构,又固联于方位轴系;负载内框经转接固联于俯仰轴系,用于安装跟踪仪光学精密测量单元^[4]。方位轴系采用双联轴系,既承担双向轴向负载及径向负载,也承担转台动态跟踪时产生的倾覆力矩;俯仰轴系两端采用双联轴系,减小俯仰轴径向跳动及轴向窜动,保证转台动态稳定性。轴传动方式为直流力矩电机套轴传动,电机加速度 $2g$,圆光栅及读数头采集角度数据,精密圆光栅及力矩电机构成高精度闭环系统,使转台轴系的角度定位精度达到 $2''$ 。结合设计指标及加工成本,O型框采用7系铝合金材料,轴采用40Cr材料,其他包括底座、负载内框及轴承座材料采用6061铝合金。

3 轴系结构设计及精度分析

精密转台通常采用密珠轴系与通用精密轴系。密珠轴系精度高、系统适应能力强,但大型密珠轴系有制造成本高、加工难度大及维修性差

等缺点。通用精密轴系采用标准型号精密轴承,在中小型精密转台中,通用精密轴系凭借其制造成本低、维修难度低、互换性强及承载能力强等优点得到广泛应用。

本文所设计二维转台为小型转台,且P4级角接触轴承可以满足指标要求。因此,采用标准轴承对转台轴系进行设计。

3.1 俯仰轴系

3.1.1 结构设计

激光测量系统固定于俯仰轴系,且测量视场极小,如果转台俯仰轴系回转精度低,晃动量大,会影响激光测量系统的测距精度和靶球位置识别精度,造成测距精度差甚至丢失目标,因此转台俯仰轴保持稳定是保证跟踪性能及测量精度的前提。

俯仰轴系固定于O型框架,其精度比方位轴系更难保证,为了提高俯仰轴系精度及稳定性,采用两端“背对背”角接触轴承配置方式,如图2所示,该轴系结构为超静定结构,超静定结构承载能力强且有利于降低疲劳对转台结构影响。角接触轴承可同时承受径向负荷和轴向负荷,轴承受到径向力和轴向力由成对轴承均匀承担,避免受力不均导致轴承磨损状态存在差异影响跟踪仪测量精度。特别是对刚度有很高要求的设备,成对双联轴系角接触球轴承是最佳的选择。

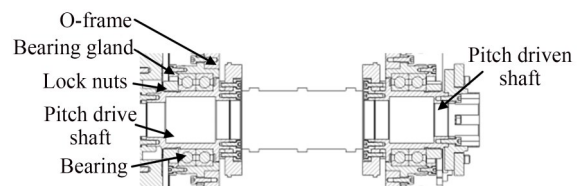


图2 俯仰轴系配置

Fig. 2 Pitching shafting configuration

背对背方式安装可避免引起内部附加力,载荷作用点在轴承中心点之外,各个作用点之间跨距大,可承受倾覆力矩,及承受两个频繁换向的轴向载荷,但每个方向上的载荷只能由一个轴承承受。负载安装端刚性更强,背对背安装可承受2倍的径向分力,两分力的交点较近,对俯仰轴的挠度要求低,轴不容易受力变形。当轴受热伸长时,轴承游隙增大,轴承不会卡死破坏^[5]。

O型框架结构复杂,且需要保证两端轴系安

装孔装配基准平面尺寸公差及形位公差满足装配精度需求,所以加工时需要加工中心一次装夹加工成型。为降低装配难度,控制制造成本,缩短制造周期。轴承通过轴承座与O型框连接,结合轴承外圈及O型框立柱孔配做轴承座,实际装配时,通过对轴承座内外圈进行修研,来保证俯仰轴系装配精度。

俯仰轴与轴承内圈,轴承外圈与轴承座之间为过盈配合。轴承外圈通过定位凸台和轴承压盖进行定位预紧,轴承内圈通过轴肩与轴承内圈锁紧螺母进行定位预紧。俯仰轴,轴承,轴承压盖和锁紧螺母组成独立构件,与O型框一端立柱孔进行配合。

俯仰主动轴装配时,先利用工装将轴承安装到俯仰轴承座上,安装轴承压盖。轴承与轴安装采用压装方式,然后通过内圈锁紧螺母将轴承进行预紧固定,利用打表法确保俯仰主动轴O型框架安装位与电机安装位径跳、端跳满足装配精度要求,通过轴承外圈压环将轴与轴承固定于轴承座,构成轴承座组件,将其与O型框架装配,利用打表法测量轴的端跳和径跳,通过修切轴承座对合面保证端跳和径跳符合装配精度要求,最后用螺钉连接。利用上述同样方法步骤,将俯仰从动轴系固定于O型框,结合打表法测量,调整两半轴同轴度满足装配精度需求。

3.1.2 俯仰轴系精度分析

俯仰轴系误差主要包括:轴系晃动误差;主轴轴径不同轴度、不圆度及粗糙度误差等加工误差;安装过程引入的随机误差^[6]。

结合俯仰轴结构特点,轴向窜动误差可以忽略。轴系最大径向晃动误差:

$$\Delta\sigma = \sqrt{\Delta\sigma_1^2 + \Delta\sigma_2^2 + \Delta\sigma_3^2}, \quad (1)$$

其中: $\Delta\sigma$ 为轴系最大径向晃动误差; $\Delta\sigma_1$ 轴承间隙引起的主轴晃动误差; $\Delta\sigma_2$ 及 $\Delta\sigma_3$ 分别为装配过程引起的主轴晃动误差及加工误差引起的主轴晃动误差,根据轴系精度设计要求, $\Delta\sigma_2$ 及 $\Delta\sigma_3$ 取值为0.5"。

$$\Delta\sigma_1 = \arctan\left(\frac{a-b}{L}\right), \quad (2)$$

其中: a, b 为轴系配合间隙,采用同一批轴承定向装配后, $(a-b) \leq 0.0002$ mm; L 为主轴承支撑间距,设计值为70 mm;计算得俯仰轴角运动误

差 $\Delta\sigma_1 = 0.59''$ 。所以,根据公式(1),轴系最大径向晃动误差 $\Delta\sigma = 0.9''$ 。

3.2 方位轴系设计与精度计算

转台方位轴系如图3所示,采用一组P4角接触轴承,配置方式为“背对背”,方位轴、轴承及方位轴承座之间选择过盈配合。轴承通过压装方式与方位轴配合,内圈由锁紧螺母和轴肩定位锁紧,外圈由方位轴承座凸台和方位轴承压环进行固定,方位轴、轴承及轴承座共同构成方位轴承座组件,方位座组件通过螺钉与转台底座连接。

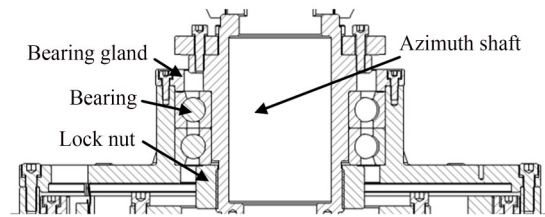


图3 方位轴系

Fig. 3 Azimuth shafting

方位轴系误差主要包括轴向窜动误差、径向晃动误差及调平误差。根据轴系结构特点,轴向窜动误差可以忽略。方位轴径向跳动误差由轴承随机跳动引起,其最大值为:

$$\sigma_{s1} = \frac{\rho \times K \times \Delta b}{D}, \quad (3)$$

其中: ρ 是由弧度单位换算成角秒的转换系数; K 为负载变形系数,结合设计参数取 $K = 0.2$; Δb 为角接触轴承端跳,所选轴承端跳为0.0015 mm; D 为所选轴承中径,为77.5 mm,所以 $\sigma_{s1} = 0.8''$ 。

方位轴承座组件完成装配后,需要将其固定于底座,装配所用平台采用电子水平仪校准,水平仪自身存在安平误差,误差 $\sigma_{s1} \leq 0.2''$ 。

所以,方位轴系误差 $\Delta\sigma_s$ 为:

$$\Delta\sigma_s = \sqrt{\sigma_{s1}^2 + \sigma_{s2}^2}, \quad (4)$$

代入数据后得 $\Delta\sigma_s = 0.82''$ 。

4 动态形变误差成因分析与实验测量

4.1 动态形变误差成因分析

受加工装配等因素影响,俯仰轴系装调完成

后,俯仰轴依然存在几何误差。俯仰从动轴与主动轴实际轴线不重合,其形式主要如图4所示,主动轴与从动轴之间存在位移偏差 e 与角度偏差 φ 。因此俯仰轴平均回转轴线转动轨迹如图5所示。

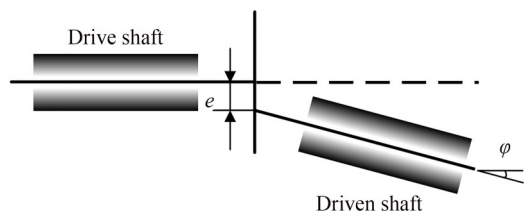


图4 两半轴位置关系

Fig. 4 Position relationship between the two axes

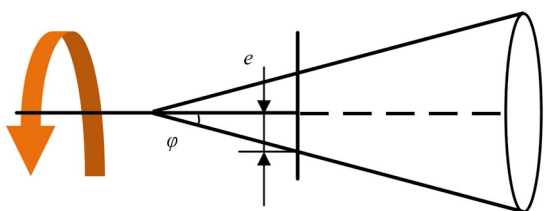


图5 俯仰轴转动轨迹

Fig. 5 Rotation track of pitch axis

轴线不对中会影响轴承与轴之间的力学特性,俯仰从动轴转动时,会与轴承之间会存在动力学作用,改变O型框应力状态,O型框受力产生挠曲变形。O型框作为轴系支撑构件,其弹性形变导致俯仰轴空间位置发生改变,导致转台综合指向位置产生偏差,由于俯仰轴运动的导致O型框形变而导致俯仰轴空间位置产生的偏差称为二维激光跟踪转台的动态形变误差。

为详细研究动态形变误差来源,下面采用弹性力学的 Timoshenko 梁单元理论建立分析模型,对俯仰轴系几何误差所产生的力学作用,以及转台O型框挠曲变形特点进行分析。

图6为从动轴实际轴线 n_1 与主动轴轴线 n 不对中时,从动轴对角接触轴承施加径向附加力 F_R ,假设轴承为刚性体,滚珠与内外圈之间无间隙,轴承与轴承座接触无相对滑动,且为刚性连接。根据牛顿第三定律,轴承内表面所受径向附加力会使得轴承座产生反作用力 F_{r1} ,大小为轴承与轴承座之间接触力。轴线存在角度偏差 φ

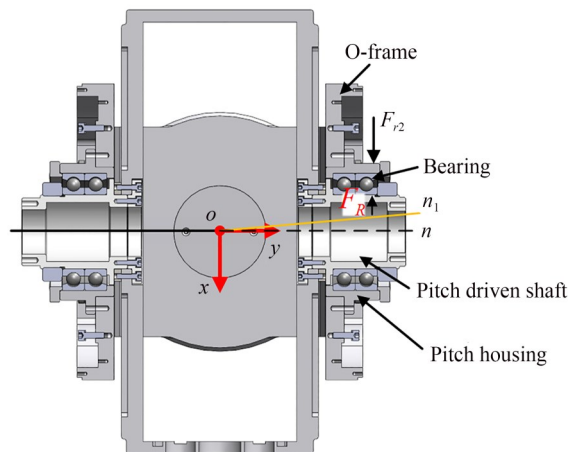


图6 俯仰轴系截面受力分析

Fig. 6 Force analysis of pitching shafting section

时,角接触轴承与轴承座之间为点接触,由于变形很小,所以材料处于弹性阶段,并且服从胡克定律,接触力与应变为线性关系,接触力 F_{r1} 大小与轴承与轴承座轴线角度有关,轴线角度变化会改变轴承外圈与轴承座接触面积,角度越大,接触面积越小,轴承座受力越集中,因此轴承座所受的局部力越大,为简化分析模型,假设轴承为刚性体,轴承座发生微小形变,轴承座所受力与轴线角度之间为线性关系,即:

$$F_{r1} = Z_E \sin \varphi, \quad (5)$$

式中 Z_E 为弹性系数,用于工程中不同接触材料弹性模量及泊松比对应力的影响,数值计算公式为:

$$Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi \left(1 - \frac{\nu_1^2}{E_1} + 1 - \frac{\nu_2^2}{E_2} \right)}}, \quad (6)$$

其中: E_1 和 E_2 为弹性模量, ν_1 和 ν_2 为材料泊松比。

在存在实际装配误差条件下,轴系运动接触特性如图7所示,轴系在以角速度 ω 旋转时,轴承座与轴承接触区域为 P ,随着轴系旋转,在理想轴线截面方向,当实际轴线绕理想轴线转动角度 β 时,在截面中,接触区域面积 P_2 增大,当 P 所在轴线截面绕 y 轴旋转角度 β 时,由图中几何关系可知:

$$F_{r2} = F_{r1} \cos \beta. \quad (7)$$

进而可以建立如图8所示的轴系不对中时轴承座力学模型,取截面 C_1 进行受力分析,从动轴实际轴线与理想轴线处于 $x_b o_b y_b$ 平面,轴承座在

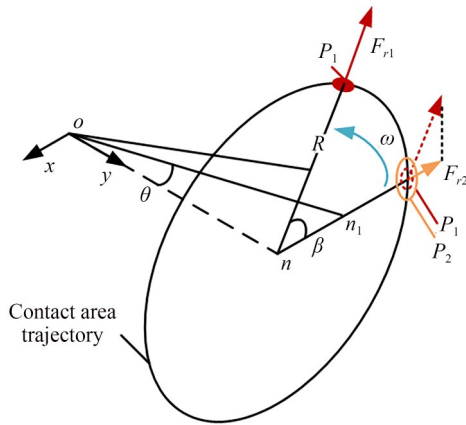


图 7 轴系接触特性分析

Fig. 7 Analysis of axial contact characteristics

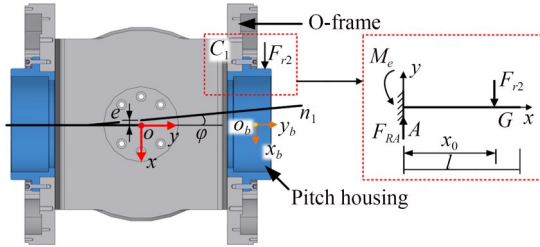


图 8 轴承座受力分析

Fig. 8 Force analysis of bearing housing

G处受到集中力 F_{r1} ,其垂直分量为 F_{r2} 。

通过受力关系分析,及静力平衡方程:

$$\sum F_y = 0, \quad (8)$$

$$\sum M_A = 0. \quad (9)$$

可得:

$$\sum F_y = F_{RA} - F_{r2} = 0, \quad (10)$$

$$\sum M_A = M_e - F_{r2}x_0 = 0. \quad (11)$$

则支座反力 $F_{RA} = F_{r2}$ 和反作用力偶矩 $M_e = F_{r2}x_0$ 。

以 O 型框截面 C_2 为研究对象,图 8 所示为 C_2 受力分析图,将截面简化为矩形梁,B 为梁的支点,该梁 D 点受到外力偶矩 M_e ,受剪力 F_{RA} 。

挠曲线微分方程^[7]:

$$\frac{d^2\omega}{dx^2} = \frac{M}{EI}, \quad (12)$$

其中: ω 为挠度; M 为弯矩; E 为弹性模量; I 为惯性矩。

式(12)积分后的转角方程为:

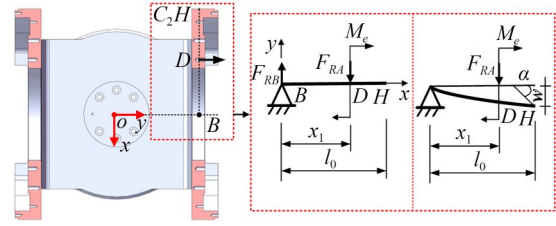


图 9 C_2 截面受力分析

Fig. 9 Force analysis of C_2 section

$$\alpha = \int \frac{M}{EI} dx + C. \quad (13)$$

O 型框变形很小,且其材料符合胡克定律,采用叠加法可以求 O 型框 C_2 截面在载荷作用下的转角,转角由剪力 F_{RA} 和外力偶矩 M_e 共同作用产生。即:

$$\alpha_H = \alpha_{H1} + \alpha_{H2}. \quad (14)$$

在剪力 F_{RA} 作用下,DH 段挠曲线方程为:

$$\omega_1 = \frac{F_{RA}x^2}{6EI}(3x - x_1)(l_0 - x_1 \leq x \leq l_0). \quad (15)$$

则 H 点转角方程:

$$\alpha_{H1} = \frac{F_{RA}x_1^2}{2EI}. \quad (16)$$

外力偶矩 M_e 作用下,H 点转角方程:

$$\alpha_{H2} = \frac{M_e x_1}{EI}. \quad (17)$$

则端面转角为:

$$\alpha_H = \alpha_{H1} + \alpha_{H2}. \quad (18)$$

基点 o 为理想俯仰与方位轴线交点,O 型框 xoy 截面对称,受力弹性形变如图 9 所示, α_H 和 α_H' 分别为 O 型框 xoy 截面两侧端面转角,两侧分析过程原理相同。实际基点位置为 o_r ,由于动态形变误差导致基点位置存在角度偏差 δ_a 及距离偏差 δ_r 。在转台应用过程中,角度偏差对转台指向轴影响更大,因此忽略距离偏差。两侧转角不同而引起基点角度偏差定义为动态形变误差,计算公式为:

$$\delta_a = \alpha_H + \alpha_H' = \frac{(x_1 + 2x_0)x_1}{EI} Z_E \sin \varphi \cos \beta. \quad (19)$$

为验证模型正确性,代入转台相关尺寸数据进行数据分析,误差结果如下图 11 所示。曲线为周期 2π 的余弦曲线,动态形变误差峰峰值为 $13''$ 。

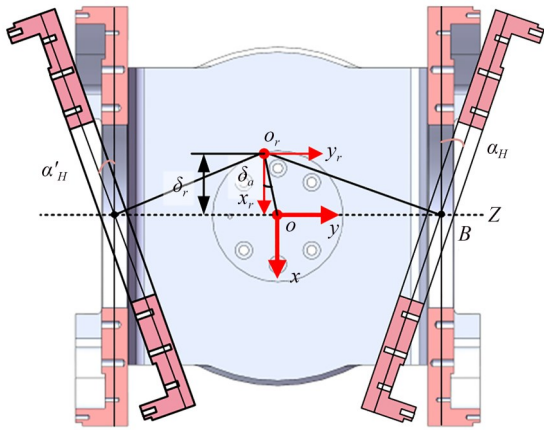


图 10 截面变形示意

Fig. 10 Section deformation schematic

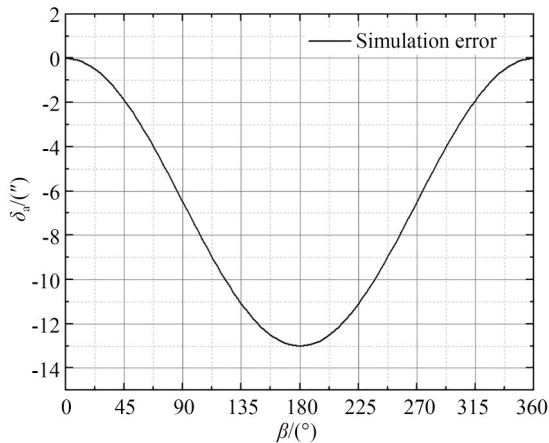


图 11 动态变形误差分析曲线

Fig. 11 Dynamic deformation error analysis curve

4.2 刚柔耦合动力学有限元分析

基于上述的理论建模和数据分析,开展基于刚柔耦合动力学原理的有限元分析,对动态形变误差的成因进行进一步的验证。

由于转台存在加工装配误差,俯仰轴转动时,转台相接触零件之间的动力学相互作用引起转台O型框形变,进而产生动态形变误差。为进一步研究转台动态形变误差产生机理,对转台误差模型开展刚柔耦合动力学仿真。根据转台设计参数及公差,利用3D建模软件建立转台刚性体误差模型,为了分析O型框形变情况,仿真模型中需要包含O型框形变信息,所以通过ANSYS软件建立O型框柔性体模型,俯仰轴和轴承等组件刚性较高,并且在设计中考虑了足够的刚

度和支撑性,在分析过程中,可以忽略轴和轴承之间的相对运动和变形,将其视为整体来进行计算和分析,根据转台实际约束情况,O型框固定于方位轴,俯仰轴两端径跳0.015 mm,端跳0.015 mm。以实际回转轴线设置旋转副,添加固定约束及模型材料等仿真初始条件,最终转台刚柔耦合误差模型如图12所示。

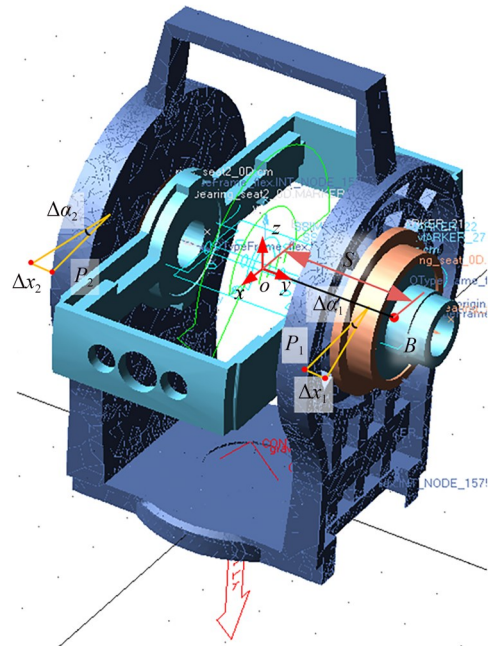


图 12 刚柔耦合模型

Fig. 12 Rigid-flexible coupling model

设置俯仰轴角加速度为 10 rad/s^2 ,角速度为 2 rad/s ,以 3° 为间隔,达位后采集节点 P_1, P_2 位移,获得O型框 xoy 截面变形量 Δx_1 和 Δx_2 ,则O型框截面转角:

$$\Delta\alpha = \arctan\left(\frac{s}{\Delta x}\right), \quad (20)$$

式中 s 为 B 点到 o 点距离。得 Δx_1 和 Δx_2 对应的 $\Delta\alpha_1$ 和 $\Delta\alpha_2$ 。结合公式(16)可计算出各离散点动态形变误差值如图13,误差随俯仰轴转动在 $0''$ 和 $-16.2''$ 之间波动,俯仰轴处于 180° 时误差达到最大值,数据波动是由轴转动时刚柔性构件之间的复杂相互作用力实时变化及结构材料固有属性等因素引起,利用多项式模型对误差进行拟合,其变化趋势与模型理论分析曲线存在一致性,表明误差理论分析有效。

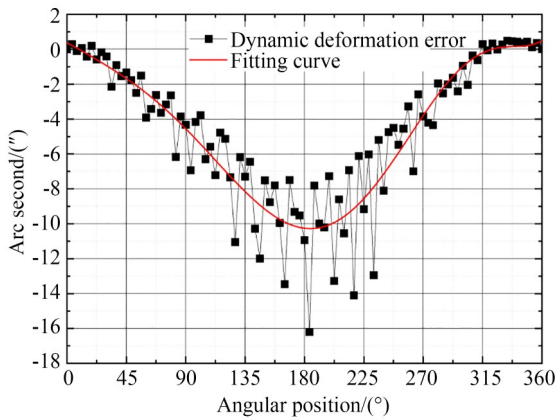


图 13 误差仿真曲线

Fig. 13 Error simulation curve

5 实验验证及误差补偿

5.1 误差测量原理

理论建模和仿真分析结果表明俯仰轴实际轴线与理论轴线存在误差时,俯仰轴转动会导致 O 型框发生周期性微形变,形变远低于 O 型框材料失效程度,属于弹性形变。因此可以通过对动态误差的精确检测和有效补偿,提高激光跟踪仪测量精度。

动态形变误差为材料变形引起,对于复杂结构变形测量主要有光云纹法和全息干涉及双目 DIC (Digital Image Correlation, DIC) 法等,其实验系统复杂且易受杂光干扰^[8-9],测得形变结果均为表面应变,属于结构局部特征,难以精确测量 O 型框变形引起的俯仰轴空间位置偏差。因此,结合动态形变误差成因,提出一种基于共轭差动式光学自准直原理的动态形变误差测量方法^[10-12]。通过主动半轴端与从动半轴端的形变误差值反演二维转台动态形变误差。

测量系统如图 14 所示,平面反射镜分别固连于转台 O 型框两侧,俯仰轴转动时,由于 O 型框形变引起转台基点位置角度偏差 δ ,通过主动轴和从动轴端的形变角度,反演由形变造成的转台二轴法平面指向误差。包括对称放置的两台光电自准直仪、平面反射镜及被测转台等部分。反射镜通过支架固连于转台 O 型框架两侧,当俯仰轴转动一定角度时,O 型框发生形变,两侧反射镜角度随 O 型框形变产生角度偏差 δ_1, δ_2 ,由几

何关系可知 $\delta_a = \delta_1 + \delta_2$ 。通过自准直仪分别测量两侧反射镜角度变化 δ_1 和 δ_2 。计算得转台动态形变误差 δ_a 。

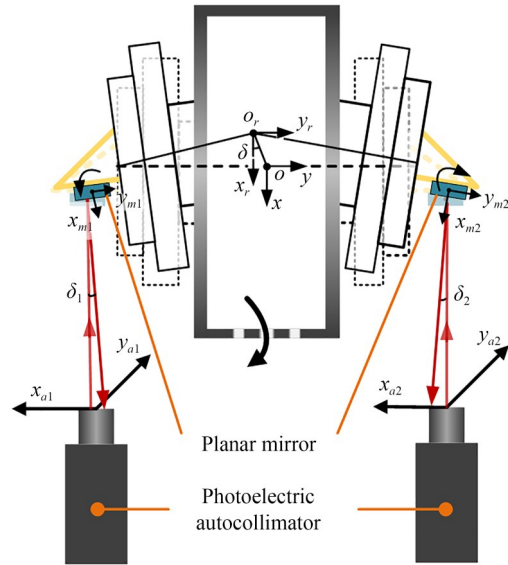


图 14 动态形变误差测量系统

Fig. 14 Dynamic coupling error measurement system

5.2 误差测量

图 15 为动态形变误差测量系统实物。

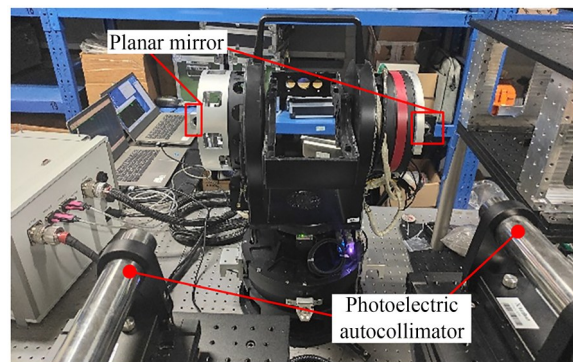


图 15 实验系统实物

Fig. 15 Real object of the experimental system

将转台置于光学平台,安装平面反射镜,调整两台自准直仪位置,驱动俯仰轴转动到零位,将此时反射镜角度设置为自准直仪测量基准点。驱动俯仰轴以 15° 为间隔转动,电机角加速度设置为 10 rad/s^2 ,角速度设置为 2 rad/s 。其为满足实际工况下所需最大角加速度及角速度,由伺服控制系统自动控制减速达位,通过自准直仪上位

机进行读数,以此类推,完成俯仰轴整周误差测量。

由于转台为闭环控制系统,轴系达位后,角度会在小角度范围内波动,当波动稳定时,在自准直仪中读角度值 δ_1 和 δ_2 ,此时角度值为俯仰轴转动后,平面反射镜转动角度与转台零位角度差,为相应俯仰角度下的动态形变误差分量,驱动俯仰轴旋转 360° ,结合公式(19)计算出俯仰轴不同角度动态形变误差值。最终误差数据如图 16 所示,动态形变误差值在 $\pm 7''$ 。

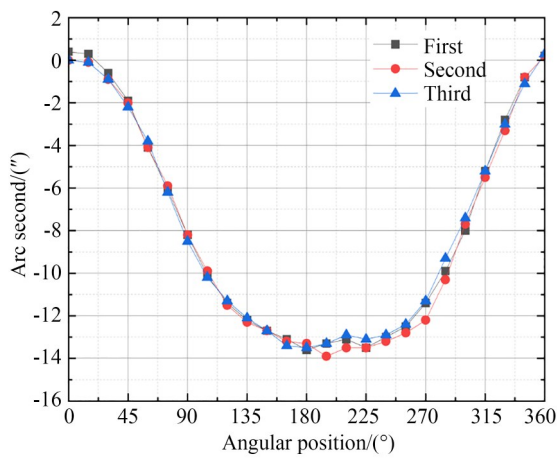


图 16 动态形变误差实验数据

Fig. 16 Experimental data of dynamic coupling error

三组误差数据与平均值偏差 d 如图 17 所示,三次测量数据偏差小于 $\pm 0.6''$ 随机误差较小,说明所设计转台具有较高的稳定性,满足设计要求。

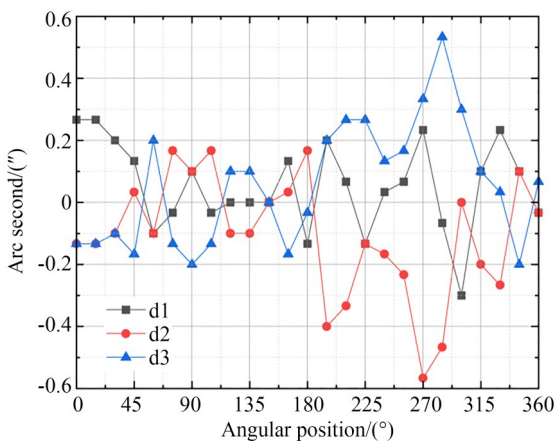


图 17 测量数据随机误差

Fig. 17 Random error of measurement data

5.3 误差补偿

通过多项式模型对动态形变误差进行补偿。将俯仰轴以 20° 为间隔进行复测,动态形变误差如图 18 所示,误差减小到 $\pm 1''$ 以内,证明多项式模型有效补偿动态形变误差。

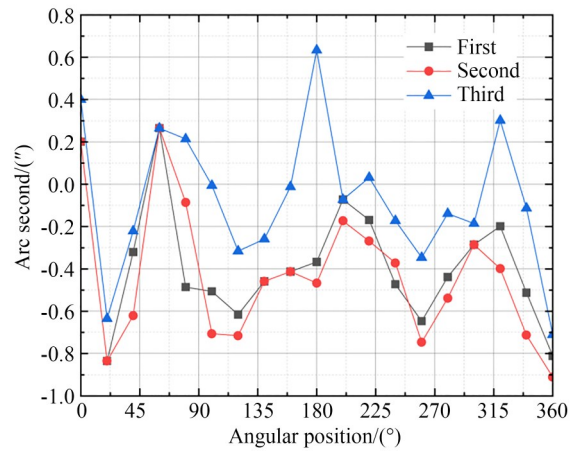


图 18 补偿后误差

Fig. 18 Error after compensation

表 1 补偿前后误差比较

Tab. 1 Error comparison before and after compensation (")

补偿前后	补偿前	补偿后
最大偏差正值	0	0.7
最大偏差负值	-14.0	-0.9

6 结 论

本文根据激光跟踪仪动态坐标测量需求,研制了一套基于过定位超稳定双角接触轴承对结构的二维激光跟踪转台,开展轴系结构详细设计及精度分析,分析了转台轴系精度的影响因素,结合精度理论对轴系误差进行了计算以评估理论设计合理性。结合 Timoshenko 梁单元理论对转台动态形变耦合误差成因进行详细分析。在刚柔耦合模型基础上增加了加工装配误差信息,形成转台刚柔耦合误差模型,对模型进行仿真计算及后处理,验证了理论分析的合理性。结合转台应用场景开展试验验证,提出了一种基于共轭差动式光学自准直原理的动态形变误差测量方法,搭建实验完成误差的测量,对

误差进行补偿。实验结果表明:动态形变误差重复性精度优于 $\pm 0.6''$,表现了转台良好的稳定性;同时通过精密检测与误差补偿,修正后的动态形变误差由补偿前的 $\pm 7''$ 减小到 $\pm 1''$,极

大降低了动态形变误差对转台精度的影响。本文为二维激光跟踪转台的研制提供了新的设计思路和技术验证,为自主化激光跟踪仪的研发提供重要支撑。

参考文献:

- [1] 刘娇月,杨聚庆,董登峰,等. 激光跟踪仪的光电瞄准与定位系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1558-1564.
LIU J Y, YANG J Q, DONG D F, *et al.* Opto-electronic aiming and orientation system of laser tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1558-1564. (in Chinese)
- [2] 周维虎,丁蕾,王亚伟,等. 光束平差在激光跟踪仪系统精度评定中的应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 851-857.
ZHOU W H, DING L, WANG Y W, *et al.* Application of bundle adjustment to accuracy evaluation of laser tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 851-857. (in Chinese)
- [3] 邱启帆,王博,张佳,等. 面向激光跟踪仪跟踪恢复的伺服运动角度计算方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(7): 93-100.
QIU Q F, WANG B, ZHANG J, *et al.* Calculation method of servo motion angle for laser tracker tracking recovery[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(7): 93-100. (in Chinese)
- [4] 秦涛,郭骏立,张美丽,等. 星载二维转台结构设计及刚度分析[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 3788/IRLA20210364.
QIN T, GUO J L, ZHANG M L, *et al.* Structure design and stiffness analysis of spaceborne two-dimensional turntable[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(5): 3788/IRLA20210364. (in Chinese)
- [5] 冯栋彦,高云国,张文豹. 采用标准轴承的光电经纬仪轴系误差修正[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3): 605-611.
FENG D Y, GAO Y G, ZHANG W B. Elimination of shafting errors in photoelectrical theodolites with standard-bearings[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 605-611. (in Chinese)
- [6] 杜俊峰,李正周. GD-220光电经纬仪轴系的精度分析[J]. 光学精密工程, 2002, 10(4): 416-419.
DU J F, LI Z Z. Analysis of the axial accuracy of the GD-220 photoelectric theodolite[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(4): 416-419. (in Chinese)
- [7] 牛荣军,刘越,唐红利,等. 多点支撑结构形变及轴系轴承承载性能分析[J]. 兵工学报, 2023, 44(2): 615-628.
NIU R J, LIU Y, TANG H L, *et al.* Deformation of the multi-point support structure and loading performance analysis of its shafting bearing[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(2): 615-628. (in Chinese)
- [8] 刘辉,梁晋,叶美图,等. 基于数据映射优化的航空机匣变形测量偏差比对[J]. 光学精密工程, 2023, 31(20): 2930-2942.
LIU H, LIANG J, YE M T, *et al.* Comparison of deviation in aircraft casing deformation measurement based on data mapping optimization[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(20): 2930-2942. (in Chinese)
- [9] 侯传涛,程昊,张跃平. 基于云纹干涉法的封装结构应变测量技术研究[J]. 微电子学与计算机, 2023, 40(11): 143-148.
HOU C T, CHENG H, ZHANG Y P. Research on strain measurement of package structure based on moiré interferometry[J]. *Microelectronics & Computer*, 2023, 40(11): 143-148. (in Chinese)
- [10] 叶朗,独伟锋,全旭松,等. 基于光学自准直原理的多维转轴角度偏差测量方法[J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(9): 69-71.
YE L, DU W F, QUAN X S, *et al.* Measurement method of angle deviation of multi-dimensional rotating shaft based on optical autocollimation principle[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2023, 59(9): 69-71. (in Chinese)
- [11] 劳达宝,王国名,崔成君,等. 精密光电小角度测量技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(9): 106-113.
LAO D B, WANG G M, CUI C J, *et al.* Research on precision photoelectric small angle measurement technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(9): 106-113. (in Chinese)
- [12] 乔培玉,何昕,魏仲慧. 加权整体最小二乘法在光学自准直法测量挠曲角中的应用[J]. 光学精

密工程, 2012, 20(9): 1953-1959.

QIAO P Y, HE X, WEI Z H. Application of weighted total least squares in measurement of de-

flection angle with optical self-collimation method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1953-1959. (in Chinese)

作者简介:



霍汉林(1999—),男,河北邢台人,硕士研究生,主要从事精密仪器设计及光电精密测量技术等方面的研究。E-mail: hhlcust@163.com

通讯作者:



王国名(1986—),男,硕士,辽宁庄河人,高级工程师,2011年于长春理工大学获学士学位,2014年于长春理工大学获硕士学位,主要从事光电精密测量技术、精密仪器设计等方面的研究。E-mail: wangguoming1@ime.ac.cn