

文章编号 1004-924X(2019)11-2374-10

大型空间望远镜次镜调整机构精度分析与测试

赵海波^{1*}, 赵伟国¹, 董吉洪¹, 杨维帆¹, 刘奉昌^{1,2}, 周平伟¹, 姜 萍¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为满足大口径离轴三反空间望远镜在轨成像质量需求,设计了一种基于 6-PSS 并联机构的次镜调整机构,并针对其精度进行了分析与实测。首先,分析了次镜调整机构的组成和光学系统对它的精度需求。随后,以逆运动学分析为基础建立了次镜调整机构的误差模型,并对结构参数、动平台位置、动平台姿态对整机精度的影响进行了理论分析,根据分析结果结合实际空间包络及重量等约束确定结构参数,并采用 Monte Carlo 模型分析了该结构参数下的次镜调整机构的随机误差和系统误差。最后,搭建了精度测试系统,对次镜六维调整机构的主要技术指标进行了实测。测试结果显示,次镜六维调整机构的位移分辨率优于 $0.1\ \mu\text{m}$,角度分辨率优于 $0.5''$,双向重复定位精度达到亚微米/亚角秒量级 ($\pm 0.4\ \mu\text{m}/\pm 0.3''$),其绝对定位精度可以达到微米/角秒量级,满足大型空间望远镜在轨成像要求。

关键词:大型空间望远镜;次镜调整机构;误差模型;精度分析;精度测试

中图分类号:TH743 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20192711.2374

Accuracy analysis and testing for secondary mirror adjusting mechanism in large space telescope

ZHAO Hai-bo^{1*}, ZHAO Wei-guo¹, DONG Ji-hong¹, YANG Wei-fan¹,
LIU Feng-chang^{1,2}, ZHOU Ping-wei¹, JIANG Ping¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: zhaohaibo07@sina.com

Abstract: To obtain images of high quality from a large space telescope in orbit, an adjustment mechanism for a secondary mirror was developed based on the 6-Prismatic-Spherical-Spherical (6-PSS) parallel mechanism, and the accuracy of the adjustment mechanism was tested. First, the composition and precision requirements for the optical system of the adjustment mechanism for a secondary mirror was analyzed. Next, the error model of the mechanism was established based on its inverse kinematics analysis. Finally, the influences of the structural parameters and position and posture of the dynamic platform on the accuracy of the mechanism were analyzed theoretically. While some structural parameters were selected based on the results of the analysis, others that posed constraints, such as

收稿日期:2019-06-21;修订日期:2019-07-15.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 11703027)

space envelope, weight of the mirror, and random and systematic errors of the mechanism, were analyzed using the Monte Carlo model. Furthermore, a system was developed to test the accuracy of the key technical indicators of the six degrees of freedom (6-DOF) adjustment mechanism for a secondary mirror. The results showed that the displacement resolution, angle resolution, and bidirectional repeatability of the adjustment mechanism were relatively better by $0.1\ \mu\text{m}$, $0.5''$, and sub-micron and sub-arc-seconds order ($\pm 0.4\ \mu\text{m}/\pm 0.3''$), respectively. The absolute positioning accuracy of the adjustment mechanism can be of the order of micron/arc-seconds. It was concluded that the accuracy of the adjustment mechanism for a secondary mirror could meet the needs of large space telescopes in orbit.

Key words: large space telescope; secondary mirror adjusting mechanism; error model; accuracy analysis; accuracy testing

1 引 言

大口径离轴三反空间望远镜具有分辨率高,集光能力强,观测视场大的优点,能够获取更多、更精确的天文资料,因此在航天领域得到了广泛的应用^[1]。然而,系统的复杂性给大口径离轴三反空间望远镜的设计带来了巨大的挑战。一方面,对于大口径、对称性差的离轴三反光学系统来讲,其光学元件的面形精度要求非常高,这就给光学镜面的加工和检测、机械支撑结构的设计、各镜面的安装以及整个光学系统的装调带来了巨大的困难。另一方面,空间望远镜在观测过程中,其口径越大,重量和体积相应就越大,就越容易受到外界环境的影响,包括发射冲击、重力释放、温度变化、气压改变和材料性质变化等原因,从而引起望远镜面形精度和镜面位置误差。传统望远镜采用刚度很大的主镜,热膨胀系数接近于零的镜面材料以及复杂的镜面支撑系统解决以上问题。但是,这会导致整个光学系统质量和技术难度加大,成本大大增加,并且,效果有限,像质依然不够理想。主动光学技术为解决这些问题提供了一种有效的手段,它通过对望远镜镜面面形和位置误差进行实时检测并校正,达到改善望远镜像质的目的^[2]。

次镜调整机构作为主动光学技术的核心组件,通过对次镜位姿的精密调整,可以校正由系统装调残差、重力释放、发射入轨、长期退化等因素引起的像散和彗差。近几十年,以 Stewart^[3-6]平台为代表的六自由度并联机构由于具有高精度、高刚度、高承载能力的优点已广泛应用于医疗设

备、光学精密加工、主动振动抑制,航空航天等领域^[7-10]。到目前为止,已有许多 Stewart 并联机构成功应用于大型天文望远镜乃至空间望远镜次镜组件的精密姿态调整。其中,地面大型望远镜较为著名的有智利的 VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) 望远镜和 LSST (The Large Synoptic Survey Telescope) 望远镜、美国亚利桑那州的 SCT (Schwarzschild-Couder Telescope) 望远镜以及中国天眼 (FAST); 空间望远镜中最著名的莫过于美国的哈勃太空望远镜 (HST) 和詹姆斯韦伯太空望远镜 (JWST)。这些大型天文望远镜大多采用传统的 6-Universal-Prismatic-Spherical (简称 6-UPS) 构型实现次镜的精密调整,位移调整精度(重复定位精度)可以达到 $2\sim 20\ \mu\text{m}$, 角度调整精度(重复定位精度)可以达到 $0.5''\sim 10''$ ^[11-12]。这种构型的 Stewart 并联机构技术成熟,应用广泛,但是如果应用到某些特殊工况下也存在支腿长度和重量较大等缺陷,导致机构的侧向刚度不足、动态性能相对较弱等问题。相比传统的 6-UPS 构型,6-Prismatic-Spherical-Spherical (简称 6-PSS) 构型的并联机构由于将直线驱动组件置于定平台后端,可以大幅减小定平台与动平台之间的距离以及支腿重量,大大提升其侧向刚度和动态性能。此外,该构型中沿轴向且对称布置直线驱动器时,可以使得定平台获得更好的加工和装配精度,整机精度得到提升,由此表明 6-PSS 机构更加适用于要求苛刻的大型空间望远镜中。

本文以 2 m 量级大口径离轴三反空间望远镜为背景,综合考虑精度、刚度、质量体积等要求,设计了一种基于 6-PSS 构型的空间望远镜次

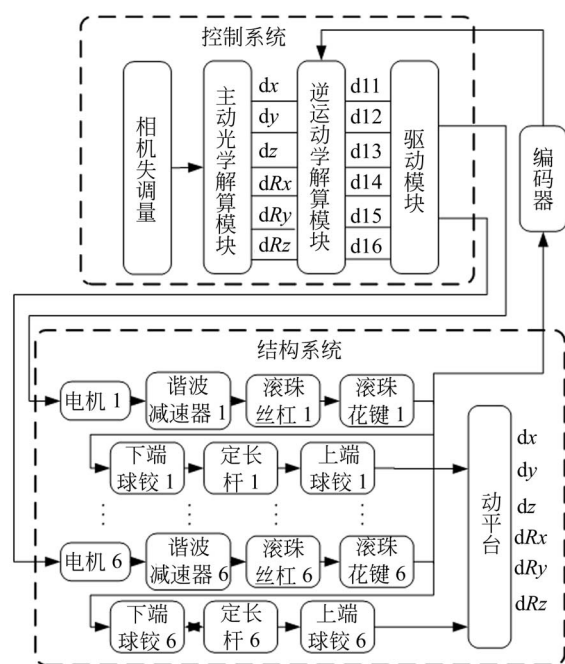
镜调整机构,分析了光学系统对次镜调整机构的精度要求,推导出 6-PSS 构型的误差模型,并以此为基础对 6-PSS 构型进行了精度设计,随后采用 Monte Carlo 模型分析了次镜调整机构的随机误差和系统误差,并制作了样机,进行了试验验证。

2 次镜调整机构组成与精度要求

2.1 次镜调整机构组成

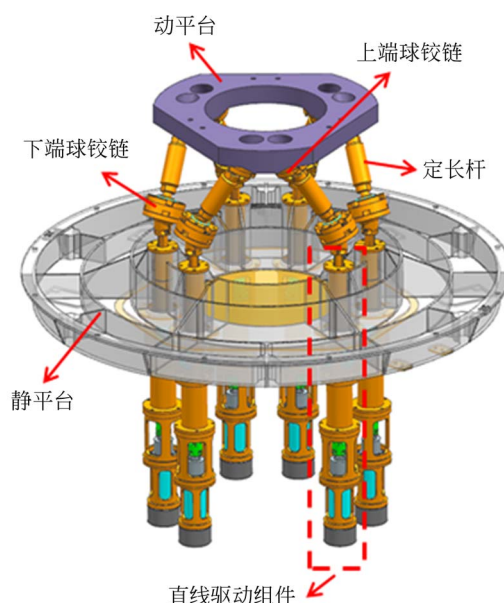
次镜调整机构采用 6-PSS 构型,主要分为控制模块和结构模块两大部分,如图 1(a)所示。控制部分接收到相机的失调量后,首先通过主动光学解算器将它解算为次镜的 6 个维度的调整量,然后通过 6-PSS 机构的逆运动学解算为 6 路直线

驱动组件的驱动量,最后通过驱动器模块驱动 6 路直线驱动组件实现预定位姿。结构部分主要由定平台、动平台、球铰链、定长杆以及六路直线驱动组件组成。其中,动平台是机构运动的终端,承载次镜组件进行六维调整;上、下端球铰链和定长杆连接构成机构的中间连接部分,上下承接动平台和直线促动器;定平台与设施框架固定安装,与直线促动器连接,承载机构整体;直线驱动组件沿机构轴向布置,为次镜调整机构的六维运动提供 6 路驱动。具体结构采用电机-丝杠形式的驱动方式,由 50 倍速比的小型谐波减速器实现力矩提升和转动细分,由滚珠花键实现承载和直线导向,由绝对式编码器配合直流无刷伺服电机组成闭环控制系统,以保证驱动精度,设计后的次镜调整机构如图 1(b)所示。



(a) 次镜调整机构组成原理图

(a) Block diagram of secondary mirror adjusting mechanism



(b) 次镜调整机构的三维模型

(b) 3D model of secondary mirror adjusting mechanism

图 1 次镜调整机构的组成

Fig. 1 Composition of secondary mirror adjusting mechanism

2.2 精度要求

图 2 为相机光路图,其主镜口径达到两米量级,焦距达到 25 m。对于如此大型的光学系统,次镜的位姿变化会非常敏感地对系统产生非常不利的影响,主要包括离焦、像散和彗差,因此需要设计一套次镜调整机构来调节次镜的位置和姿态,从而保证相机获取高质量的图像。该空间相

机分配给主动光学校正的波像差为 0.025λ 。而主动光学技术主要由校正策略模块、波前检测模块和校正执行机构三大模块组成。次镜调整机构作为主要的校正执行机构,需要满足不大于 0.01λ 的误差,考虑到一定的设计余量,细化到每个自由度,要求次镜调整机构的位移重复调整精度满足 $\pm 1\ \mu\text{m}$,旋转重复精度达到 $\pm 1''$,位移绝对定位误

差满足 $\pm 15 \mu\text{m}$, 角度绝对定位误差满足 $\pm 15''$ 。根据本相机中主动光学系统校正范围不低于 1λ 的指标, 对离轴三反光学系统进行关于失调量的 Monte Carlo 仿真, 分析表明, 系统像质失调量在 1λ 内时, 次镜调整机构的行程需要达到 $\pm 1 \text{ mm}$ 和 $\pm 1^\circ$ 。

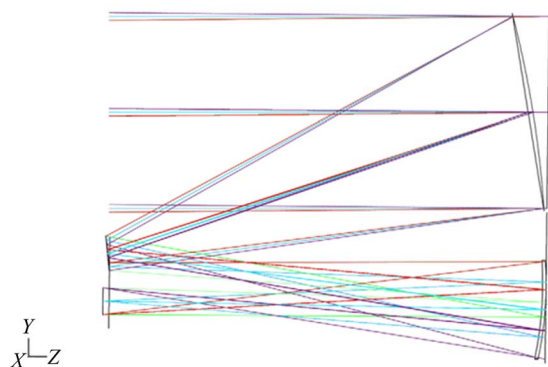


图 2 离轴三反空间相机光路图

Fig. 2 Optical system of off-axis three-mirror space telescope

3 次镜调整机构的精度分析

本文对次镜调整机构的精度进行了理论分析, 首先根据逆运动学模型建立次镜调整机构的误差模型, 随后依据误差模型对次镜调整机构的精度进行了定量分析。

3.1 逆运动学模型

6-PSS 并联机构的逆运动学是指已知动平台的位姿 $\mathbf{P} = [\psi, \theta, \varphi, x, y, z]^T$, 求解 6 个直线驱动组件的位置变化量。其逆运动学模型是基于空间矢量三角形构建的, 如图 3 所示。以定平台安装基准面的圆心为坐标原点建立定平台坐标系 $\{B\}$, Z 轴垂直于定平台表面, X 轴位于定平台安装基准面内, 且垂直于最近的两个滚珠花键安装孔圆心连成的直线。 Y 轴服从右手定则, 以动平

台所要求的旋转点(次镜的中心)为坐标原点建立坐标系 $\{P\}$ 。动平台在初始位置处, 坐标系 $\{P\}$ 和坐标系 $\{B\}$ 的 X, Y, Z 轴方向相同。下端球铰链中心所构成的圆。

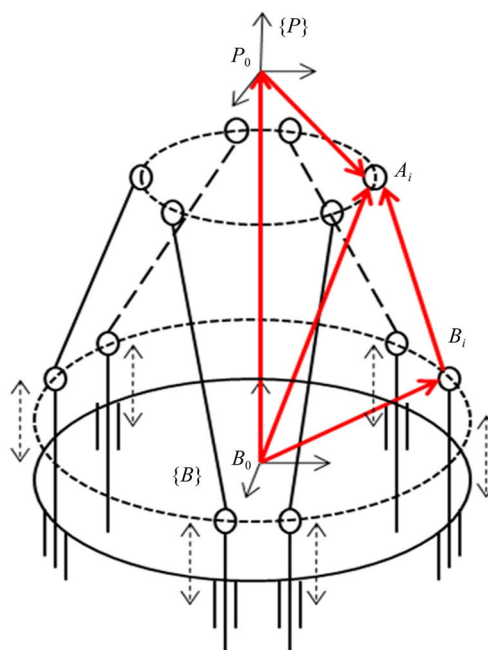


图 3 6-PSS 并联机构的矢量图

Fig. 3 Vector diagram of 6-PSS parallel mechanism

动平台由零位运动到达指定位姿之后, 可以通过矢量法来推导出杆长公式。具体需要用到定长杆作为约束条件, 即:

$$|\mathbf{B}_i \mathbf{A}_i| = l_i, \quad (1)$$

式中: l_i 为定长杆的长度, $i=1, 2, \dots, 6$ 。

由图 2 所示的矢量关系, 可得:

$$\mathbf{B}_i \mathbf{A}_i = \mathbf{B} \mathbf{A}_i - \mathbf{B} \mathbf{B}_i = \mathbf{B} \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_i - \mathbf{B} \mathbf{B}_i. \quad (2)$$

当动平台发生位姿改变之后, 得到:

$$\mathbf{B}_i \mathbf{A}_i^t = \mathbf{B}_0 \mathbf{P}_0 + [x \ y \ z]^T + \mathbf{R} \cdot \mathbf{P}_0 \mathbf{A}_i - \mathbf{B} \mathbf{B}_i, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{B}_0 \mathbf{P}_0$ 为初始状态下的 $\mathbf{B} \mathbf{P}$ 矢量; $\mathbf{A}_i^t$ 为动平台运动之后的 $\mathbf{A}_i$ 坐标矢量; $[x \ y \ z]^T$ 为动平台位置改变向量。

$\mathbf{R}$ 为动平台的姿态变换矩阵:

$$[\mathbf{R}] = \text{RPY}(\varphi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi & \cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi \\ \sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi & \sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix},$$

其中 φ, θ, ψ 为动平台姿态改变量。

3.2 误差模型

对 6-PSS 构型平台运动学模型中闭合矢量多

边形公式进行微分并化简, 可以得到平台的误差模型。误差模型表征机构的动平台位姿误差与误差源之间的关系, 动平台的位姿误差 $\delta \mathbf{P}$ 可表

示为:

$$\mathbf{J}\delta\mathbf{P} = \delta\mathbf{A} + \mathbf{M}\delta\mathbf{L} + \mathbf{N}_1\delta\mathbf{A} + \mathbf{N}_2\delta\mathbf{B}, \quad (4)$$

式中: $\delta\mathbf{A} = [\delta\mathbf{A}_1, \delta\mathbf{A}_2, \dots, \delta\mathbf{A}_6]^T \in R^{6 \times 1}$, 为直线促动器驱动误差; $\delta\mathbf{L} = [\delta L_1, \delta L_2, \delta L_3, \delta L_4, \delta L_5, \delta L_6]^T \in R^{6 \times 1}$, 表示支杆长度误差; $\delta\mathbf{A} = [\delta\mathbf{A}_1^T, \delta\mathbf{A}_2^T, \delta\mathbf{A}_3^T, \delta\mathbf{A}_4^T, \delta\mathbf{A}_5^T, \delta\mathbf{A}_6^T]^T \in R^{18 \times 1}$, $\delta\mathbf{B} = [\delta\mathbf{B}_1^T, \delta\mathbf{B}_2^T, \delta\mathbf{B}_3^T, \delta\mathbf{B}_4^T, \delta\mathbf{B}_5^T, \delta\mathbf{B}_6^T]^T \in R^{18 \times 1}$, 分别为动平台及静平台铰链中心位置误差;

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1^T / (\mathbf{S}_1^T \mathbf{a}_1) & -(\mathbf{S}_1 \times (\mathbf{T}\mathbf{A}_1)) / (\mathbf{S}_1^T \mathbf{a}_1) \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{S}_6^T / (\mathbf{S}_6^T \mathbf{a}_6) & -(\mathbf{S}_6 \times (\mathbf{T}\mathbf{A}_6)) / (\mathbf{S}_6^T \mathbf{a}_6) \end{bmatrix} \in R^{6 \times 6}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 / (\mathbf{S}_1^T \mathbf{a}_1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 / (\mathbf{S}_6^T \mathbf{a}_6) \end{bmatrix} \in R^{6 \times 6}$$

$$\mathbf{N}_1 = \begin{bmatrix} (\mathbf{S}_1^T \mathbf{T}) / (\mathbf{S}_1^T \mathbf{a}_1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & (\mathbf{S}_6^T \mathbf{T}) / (\mathbf{S}_6^T \mathbf{a}_6) \end{bmatrix} \in R^{6 \times 18}$$

$$\mathbf{N}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1^T / (\mathbf{S}_1^T \mathbf{a}_1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{S}_6^T / (\mathbf{S}_6^T \mathbf{a}_6) \end{bmatrix} \in R^{6 \times 18}.$$

当次镜调整机构在其工作空间内运动时, 矩阵 $\mathbf{J}$ 可逆, 由式(4)可得次镜调整机构的位姿误差模型:

$$\delta\mathbf{P} = \mathbf{J}^{-1}\delta\mathbf{A} + \mathbf{J}^{-1}\mathbf{M}\delta\mathbf{L} + \mathbf{J}^{-1}\mathbf{N}_1\delta\mathbf{A} + \mathbf{J}^{-1}\mathbf{N}_2\delta\mathbf{B}. \quad (5)$$

由式(5)可知, 6-PSS 构型的次镜调整机构的误差来源有 4 个, 分别为直线促动器驱动误差, 支杆长度误差, 动、静平台铰链的中心位置误差。这 4 个误差中, 最大的是动、静平台铰链的中心位置误差, 该误差由其加工和装配误差及随机误差综合决定, 量级可以达到几十甚至上百微米; 支杆长度误差次之, 可以达到几微米的量级; 而驱动误差最小, 由直线驱动组件的闭环控制精度决定, 一般可以控制在几十纳米的量级。

3.3 精度分析

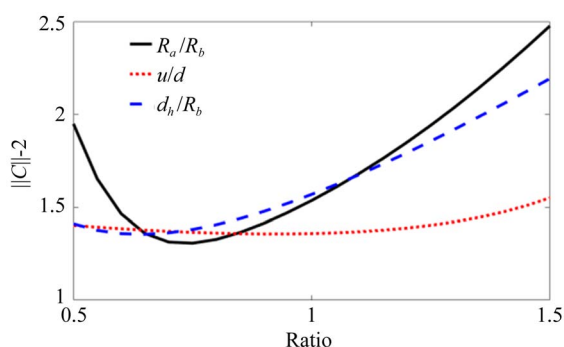
为完成次镜调整机构的精度分析, 给出了初始运动学参数, 如表 1 所示。随后对误差模型中的误差系数矩阵特性、系统误差及随机误差进行了定量分析。

表 1 初始运动学参数

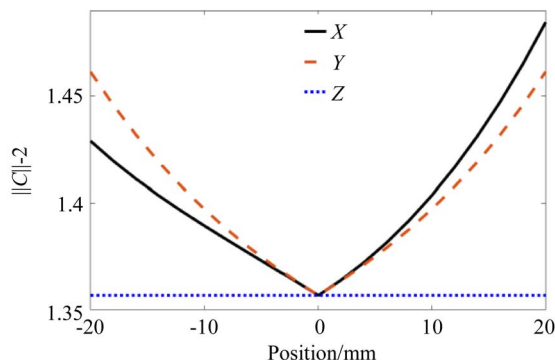
Tab. 1 Initial kinematic parameters

参数	值
上端铰链基圆半径 R_u/mm	105
下端铰链基圆半径 R_b/mm	110
上端相邻两个铰链夹角的一半 $u/(\circ)$	18.5
下端相邻两个铰链夹角的一半 $d/(\circ)$	18.5
上下基圆的间距 d_h/mm	105

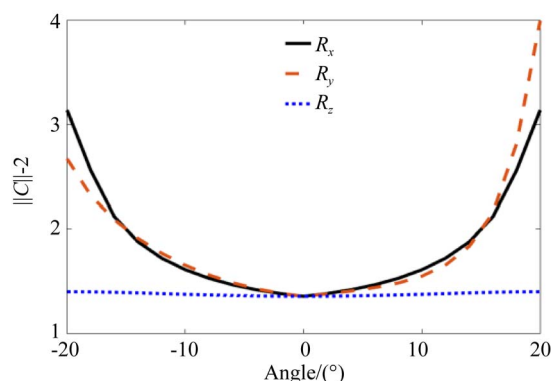
由式(5)可知, 次镜调整机构的误差来源对应 4 个误差系数矩阵, 这几个误差系数矩阵起到误差放大的作用, 其大小对于机构最终的位姿误差有着直接的影响。然而, 误差系数矩阵并非是一个常量, 而是一个变化的量, 其大小不仅与机构的运动学参数有关, 还与机构所处位姿有关。因此, 需要研究误差系数矩阵的变化规律, 为机构设计提供理论依据。本文以动平台铰链中心误差 $\delta\mathbf{A}$ 的误差系数矩阵 $\mathbf{J}^{-1}\mathbf{N}_1$ 为例(分析中发现该误差系数矩阵对变量变化最为敏感), 分别分析了机构运动学参数及平台位姿对误差系数矩阵 $\mathbf{J}^{-1}\mathbf{N}_1$ 的 2-范数的 $\|\mathbf{J}^{-1}\mathbf{N}_1\|_2$ 影响(为方便起见, 下文中将 $\|\mathbf{J}^{-1}\mathbf{N}_1\|_2$ 记为 k), 其结果如图 4 所示。



(a) 运动学参数对 k 的影响
(a) Influence of kinematic parameters on k



(b) 动平台位置对 k 的影响
(b) Influence of platform position on k



(c) 动平台姿态对 k 的影响
(c) Influence of platform posture on k

图 4 误差系数矩阵的特性分析

Fig. 4 Characteristic analysis of error coefficient matrix

图 4(a)表示运动学参数对误差系数矩阵的 2 范数 k 的影响。结果表明,在结构参数相对比值在 0.5~1.5 的变化区间内, k 在变化区间内呈现出先减小后增大的趋势,并且分别在 $R_a/R_b = 0.72$, $u/d = 0.63$, $d_h/R_b = 0.95$ 时有极小值。此外,基圆半径的相对变化对 k 的影响最为明显,高度的相对变化次之,角度的相对变化对 k 的影响较弱。根据以上分析结果,结合相机实际体积和重量的约束,最终选取的优化后的结构参数如表 2 所示。参数优化后,随机选取 ± 1 mm 和 $\pm 1^\circ$ 内 200 个位姿 k 的平均数为 1.53,比优化前(1.71)降低了 11%。

表 2 优化后的运动学参数

Tab. 2 Optimized kinematics parameters

参数	值
上端铰链基圆半径 R_a /mm	88
下端铰链基圆半径 R_b /mm	110
上端相邻两个铰链夹角的一半 $u/^\circ$	16.7
下端相邻两个铰链夹角的一半 $d/^\circ$	18.5
上下基圆的间距 d_h /mm	88

图 4(b)和图 4(c)分别表示三个方向的位置和姿态变化对 k 的影响。结果表明,动平台在零位时 k 处于最低点,位置和姿态偏离零位时, k 相应增大,对应对平台位姿误差增大。此外,Y 向位置和姿态变化对 k 的影响最为明显,X 向次之,Z 向位置和姿态变化对 k 影响非常微弱。

3.4 机构误差定量分析

次镜调整机构的动平台位姿误差主要由系统误差与随机误差决定。系统误差主要来自于各个零部件的加工与装配误差,装调后机构的各个运动学参数由于系统误差的存在而偏离理论值,势必会导致动平台的位置和姿态调整存在误差,该误差在很大程度上决定了次镜调整机构的绝对定位精度。随机误差主要来源于温度波动及系统固有的间隙、刚度、阻尼等方面,其中对随机误差影响最大的便是温度波动和间隙大小,该误差决定了次镜调整机构的重复定位精度。学者们通常采用正解法求解并联机构的误差,这种方法虽然精度高,但是并联结构正解计算困难,很难得到误差传递的显式表达式。根据各个误差源的具体数值,可以计算出末端的位姿误差,但在实际控制过程中,常常只能根据理论分析或实验得到误差源的界限,无法得到运行时的精确误差值。末端位姿误差取得最大值时并不意味着所有误差源都是最大误差。

鉴于此,为更加简洁有效地分析次镜调整机构的误差量级,引入了蒙特卡洛(Monte Carlo)模拟方法。蒙特卡洛模拟是一种通过设定随机过程,反复生成时间序列,计算参数估计量和统计量,进而研究其分布特征的方法。误差的蒙特卡洛模拟就是对不同分布特征的误差源进行抽样,并将抽样结果代入误差模型,计算和统计目标误差分布的一种方法。由式(5)可知,6-PSS 并联机构动平台位姿误差受直线促动器驱动误差,支杆长度误差,动、静平台铰链中心位置误差等共计 48 个误差项的影响。要对动平台的位姿误差进行 Monte Carlo 模拟,首先要对 48 个误差项进行随机抽样模型构建。

3.4.1 系统误差分析

系统误差主要为工件的加工和装配误差,式(5)中直线促动器驱动误差属于随机误差,且量值较小,可忽略不计。其余 42 个误差项为杆长误差和铰链的中心位置误差。由于是单件生产,这 42 个误差项全部服从均匀分布。根据现有加工装调的技术水平,取杆长误差为 $\pm 6 \mu\text{m}$,动、静平台铰链中心位置误差为 $\pm 30 \mu\text{m}$ 。采用 Monte Carlo 模型进行分析,通过 2 000 次随机采样,得到的动平台位姿误差的分布直方图如图 5 所示。由图 5

所示,2 000 次随机采样之后得到次镜调整机构各自由度的 $\pm 3\sigma$ 误差分别为 $\pm 100.08 \mu\text{m}$, $\pm 98.36 \mu\text{m}$, $\pm 34.26 \mu\text{m}$, $\pm 112.46''$, $\pm 115.23''$, $\pm 128.36''$ 。显然,如此大的位姿误差是次镜调整机构所不能接受的。为进一步降低系统误差对位姿误差的影响,需要进行运动学标定。本课题组开展了基于布谷鸟全局寻优的运动学标定,采用激光跟踪仪进行位姿测量,最终成功将次镜调整机构的位姿误差控制在 $\pm 10 \mu\text{m}/\pm 10''$ 的范围内,满足指标要求。限于篇幅,这里不对运动学标定算法进行详细阐述,具体情况请参照文献[13]。

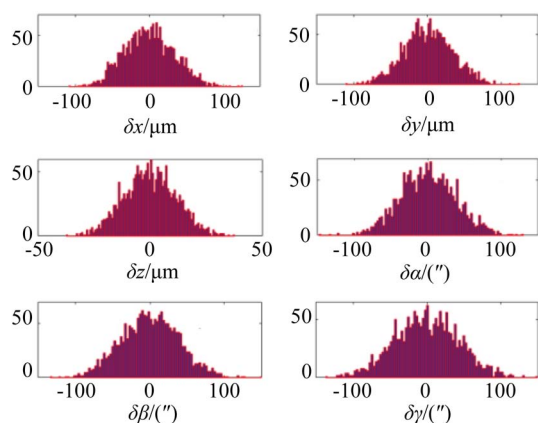


图 5 次镜调整机构的系统误差分布直方图

Fig. 5 Distribution histogram of systematic error of secondary mirror adjusting mechanism

3.4.2 随机误差分析

相比系统误差,本文更加关注随机误差对机构的影响,因为随机误差往往没有明显的规律,很难进行补偿,其大小直接决定系统的重复定位精度。针对空间望远镜的精度要求,通常要设置较为精密的温控系统,并且严格控制间隙。为定量分析随机误差的量级,为式(5)的 4 个误差源引入正态分布误差,其中,取直线驱动器的驱动误差为 $\pm 0.03 \mu\text{m}$,支杆长度误差为 $\pm 0.2 \mu\text{m}$,动、静平台铰链中心位置误差的标准差为 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 。假定每个误差都服从正态分布,采用 Monte Carlo 模型进行分析,通过 2 000 次随机采样,得到的动平台位姿误差的分布直方图如图 6 所示。由图 6 所示,2 000 次随机采样之后得到次镜调整机构各自由度的 $\pm 3\sigma$ 误差分别为 $\pm 0.82 \mu\text{m}$, $\pm 0.83 \mu\text{m}$, $\pm 0.30 \mu\text{m}$, $\pm 0.91''$, $\pm 0.92''$, $\pm 0.97''$,满足次镜调整机构的精度指标要求。

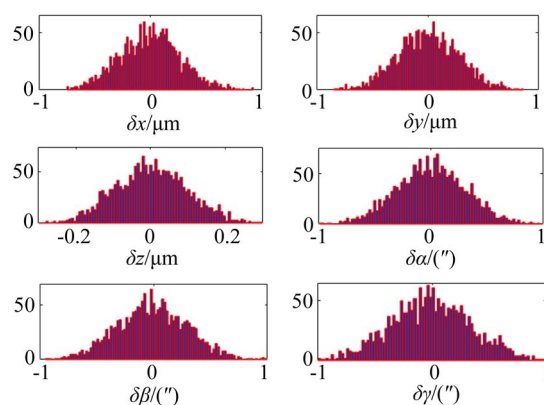


图 6 次镜调整机构的随机误差分布直方图

Fig. 6 Distribution histogram of random error of secondary mirror adjusting mechanism

4 试验与结果

4.1 测试系统

为验证次镜六维调整机构理论分析和结构设计正确性和可靠性,制作了样机并搭建了样机精度测试系统,对其主要精度指标进行试验验证。测试对象主要包括分辨率、重复定位精度和绝对定位精度。本文采用双频激光干涉仪实现高精度位移测试,其分辨率可以达到纳米级,线性测量精度可以达到 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ 。采用自准直光管实现高精度角度测量,其精度可以达到 $0.1''$ 。由于条件所限,现有的一台激光干涉仪设备配件只能同时进行两路位移测量,而一台自准直光管只能同时测量两个转动角度。本样机采取单轴精测的测试方案,测试第三路位移时需要将样机横置,重新搭建光路。角度测量采用自准直光管测量,测量两路角度完毕之后,需要将样机旋转 90° ,完成第三路角度测量。测试现场如图 7 所示。

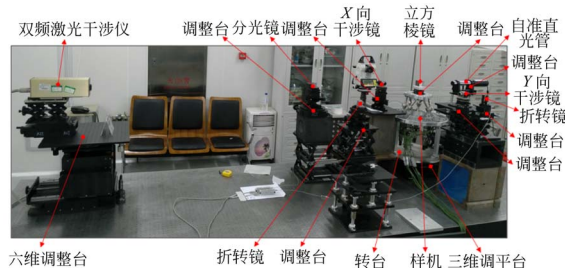


图 7 次镜六维调整机构样机精度测试现场

Fig. 7 Precision test field of prototype of secondary mirror adjusting mechanism

4.2 分辨率测试

分辨率定义为给定指令后机构的最小增量运动,包括设计分辨率与实际分辨率。本机构设计分辨率为:

$$Inc = \frac{360^\circ}{2^N} \div 360^\circ \times p = 15.3 \text{ nm}, \quad (6)$$

式中: N 为编码器位数,取 16; p 为丝杠导程,取 1 mm。

而实际分辨率需要进行实测。本文先以 $1 \mu\text{m}$ 为三个位移方向的步长, $1''$ 作为三个角度方向的步长,分别往复运行 20 步为一个循环,观测次镜六维调整机构的运行结果中每一步是否可以清晰辨识。若可以清晰辨识,则步长相应减少 $0.1 \mu\text{m}/0.1''$,继续测试,直至辨识不清晰。经测试,以 $0.1 \mu\text{m}$ 为位移步长, $0.5''$ 为角度步长运动时,次镜六维调整机构可以清晰辨识最小增量,继续缩小步长则识别不清晰,故次镜六维调整机构的位移分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$,角度分辨率为 $0.5''$,测试结果如图 8 所示。

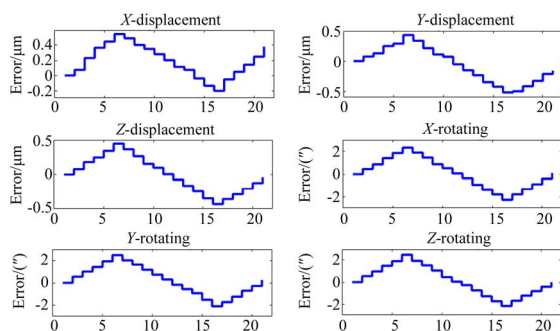


图 8 次镜六维调整机构样机的分辨率测试结果

Fig. 8 Resolution test results of prototype of secondary mirror adjusting mechanism

4.3 重复定位精度测试

重复定位精度直接反应随机误差对机构的影响,可以分为单向重复定位精度和双向重复定位精度,其中双向重复定位精度更为严格,因此本文直接测试双向重复定位精度。对于位移,本文选取 -1 mm 、零位、 1 mm 三个位置点,三个位移方向各自往复测试三个循环。对于角度,本文选取 -0.2° 、零位、 0.2° 三个位置点,三个角度方向各自往复测试三个循环。测试结果与理论位置的误差如图 9 所示。图 9 中每个子图的前三项表示负向位置点与理论位置的误差,后三项表示正向位

置点与理论位置的误差,中间 7 个数据表示回零时的误差。前三项和后三项表示的位置均为单方向到达,而中间 7 个数据点则通过双向到达。计算每个子图中每次到达某个位置点误差的最大差异便可求得双向重复定位精度。测试结果表明,次镜六维调整机构的双向重复定位精度为: X 向位移 $\pm 0.4 \mu\text{m}$, Y 向位移 $\pm 0.2 \mu\text{m}$, Z 向位移 $\pm 0.2 \mu\text{m}$, X 向角度 $\pm 0.3''$, Y 向角度 $\pm 0.2''$, Z 向角度 $\pm 0.3''$,均进入亚微米/亚角秒级别,满足 $\pm 1 \mu\text{m}/\pm 1''$ 的指标要求。

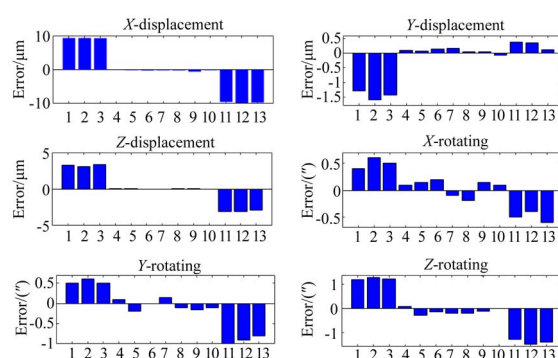


图 9 次镜六维调整机构样机的重复定位精度测试结果

Fig. 9 Test results of repeated positioning accuracy for prototype of secondary mirror adjusting mechanism

4.4 绝对定位精度测试

绝对定位精度表征系统误差和随机误差对次镜六维调整机构的综合作用。对于位移,本文以 0.2 mm 为步长, $\pm 1 \text{ mm}$ 为行程;对于角度,本文以 0.04° 为步长, $\pm 0.2^\circ$ 为行程,测试其实际位姿和理论位姿的误差,结果如图 10 所示。图 10 表明, X, Y, Z 向位移的绝对定位误差分别为 $\pm 10 \mu\text{m}$, $\pm 1.5 \mu\text{m}$, $\pm 4 \mu\text{m}$,绕 X, Y, Z 轴的角度绝对定位误差分别为 $\pm 1''$, $\pm 1.5''$ 和 $\pm 2''$ 。次镜六维调整机构经过初步标定后的绝对定位精度优于 $\pm 10 \mu\text{m}/\pm 10''$ 的量级,这和标定使用的设备精度级别是相当的(本文设计的次镜六维调整机构采用激光跟踪仪进行标定,该设备的精度等级即为 $\pm 10 \mu\text{m}/\pm 10''$)。

值得注意的是,次镜六维调整机构各个方向的绝对定位误差相对于行程具有较好的直线性,说明还有进一步提升的空间,日后若采用更高精度的标定设备则有望进一步降低绝对定位精度。

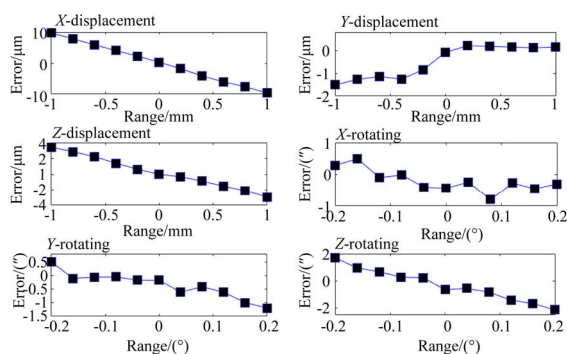


图 10 次镜六维调整机构样机的绝对定位精度测试结果

Fig. 10 Test results of absolute positioning accuracy for prototype of secondary mirror adjusting mechanism

5 结 论

本文面向大型空间望远镜开展了次镜调整机构的设计与分析,首先对机构的组成和主动光学对机构的精度要求进行了分析,其次以逆运动学

模型为基础建立了次镜调整机构的误差模型。随后分三方面对次镜调整机构的精度进行分析。其一,分析了参数和位姿对误差系数矩阵的影响,并对结构参数进行了优化,优化后误差系数矩阵的 2 范数较优化前降低了 11%。其二,分析了次镜调整机构的系统误差,其位置误差在 $\pm 100 \mu\text{m}$ 左右的水平,姿态误差在 $\pm 120''$ 左右的水平,不能满足使用要求,必须进行运动学标定。其三,分析了次镜调整机构的随机误差在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 和 $\pm 1''$ 的范围内,满足指标要求。最后,搭建了精度测试系统,对其主要性能指标进行了实测。试验结果表明,次镜调整机构的位移分辨率优于 $0.1 \mu\text{m}$,角度分辨率优于 $0.5''$;位移双向重复定位精度优于 $\pm 0.4 \mu\text{m}$,角度双向重复定位精度优于 $\pm 0.3''$,对比最著名的大型空间望远镜——哈勃太空望远镜 (HST) 中次镜调整机构的位移重复定位精度 $2.5 \mu\text{m}$ 和角度重复精度 $3.2''$,优势明显;标定后的绝对定位精度优于 $\pm 10 \mu\text{m}/\pm 10''$,满足空间望远镜的在轨需求。

参考文献:

- [1] 韩昌元. 高分辨率空间相机的光学系统设计[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(11): 2164-2172.
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2164-2172. (in Chinese)
- [2] 朱熠, 陈涛, 王建立, 等. 1.23 m SiC 主镜的本征模式主动光学校正[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(10): 2551-2563.
ZHU Y, CHEN T, WANG J L, *et al.*. Active correction of 1.23m SiC mirror using bending mode [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10): 2551-2563. (in Chinese)
- [3] 张景旭, 安其昌, 李剑锋, 等. 基于机构条件数的 30 m 望远镜三镜 Stewart 平台[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(4): 890-896.
ZHANG J X, AN Q CH, LI J F, *et al.*. Third mirror Stewart platform of TMT based on mechanism condition number [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 890-896. (in Chinese)
- [4] MCINROY J E, HAMANN J C. Design and control of flexure jointed hexapods[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, 16(4): 372-381.
- [5] KELLY R, SANTIBANEZ V, LORIA A. *Control of Robot Manipulators in Joint Space* [M]. London: Springer, 2005
- [6] 宫全一. 基于 6 自由度 Stewart 平台的控制系统研究及参数整定[D]. 天津: 天津大学, 2008.
GONG Q Y. *Research on Control System and Its Parameters Tuning of Stewart Platform* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- [7] ECKHART P, RALF-RAINER, STEFAN H, *et al.*. Five-axis secondary system for UKIRT [J]. *SPIE*, 1994, 2199: 516-522.
- [8] 顾营远, 霍琦, 李昂, 等. 用于光学遥感器耐受卫星平台微振动环境地面测试的六自由度平台[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(9): 2200-2207.
GU Y Y, HU Q, LI A, *et al.*. Six DOF platform applied in ground test of optical remote sensor alleviation margin in satellite micro-vibration environment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2200-2207. (in Chinese)
- [9] SEBRING T A, DUNHAM E W, MILLIS R I. The discovery channel telescope: a wide-field telescope in Northern Arizona[J]. *SPIE*, 2004, 5489: 658-666.
- [10] 曹小涛, 杨维帆, 王瀚, 等. 基于混合灵敏度的空间望远镜次镜调整机构鲁棒控制[J]. 光学 精密工

- 程,2018,26(5):1113-1123.
- CAO X T, YANG W F, WANG H, *et al.*. Mixed-sensitivity-based robust control of secondary mirror adjustment mechanism for space telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(5): 1113-1123. (in Chinese)
- [11] 杨维帆,曹小涛,张彬,等.空间望远镜次镜六自由度调整机构精密控制[J].*红外与激光工程*, 2018, 47(7): 231-238.
- YANG W F, CAO X T, ZHANG B, *et al.*. Six degree of freedom precision control for space camera secondary mirror adjusting mechanism[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 231-238. (in Chinese)
- [12] 于阳.大型空间望远镜次镜精密调整机构研究[D].北京:中国科学院大学,2016.
- YU Y. *Research on Precision Adjustment Mechanism for Secondary Mirror of Large Space Telescope* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [13] 王瀚,曹小涛,赵伟国,等.空间相机次镜调整机构的改进布谷鸟标定方法[J].*红外与激光工程*, 2018,47(5):0518002-1-0518002-8.
- WANG H, CAO X T, ZHAO W G, *et al.*. Improved cuckoo calibration method of space telescope secondary mirror adjusting mechanism[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0518002-1-0518002-8. (in Chinese)

作者简介:



赵海波(1989—),男,山西大同人,助理研究员,2014年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事空间光学遥感器光机结构设计、空间机构设计等方面的研究。E-mail:zhaohaibo07@sina.com



赵伟国(1985—),男,黑龙江大庆人,助理研究员,2010年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事空间光学遥感器光机结构、空间机构等方面的设计和研究。E-mail:ciompi@126.com