

30 m 望远镜三镜系统运动学接口设计及分析

赵宏超 张景旭 杨 飞 郭 鹏

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 光学系统中,为防止像差的引入造成成像质量下降,光学元件的准直与间距必须严格保证。所以,在光学仪器接口设计过程中,提高接口的重复性定位能力和降低接口的接触应力水平是非常重要的。在30 m望远镜(TMT)三镜系统设计过程中,三镜作为Ritchey-Chirtien(R-C)式光学系统中重要的光学元件,需严格保证其位置和姿态。三镜系统寿命周期中,由于清洗、镀膜的要求,需要多次拆装,为保证装配精度,需设计了一套定位用运动学接口。从运动学定位原理出发,使用赫兹接触理论以及IBM磨损理论对运动学接口进行了相应校核,并分析了影响运动学接口重复性定位精度的相应误差源,使用蒙特卡罗方法进行了相应仿真。另外,以三镜面形作为评价指标,使用Ansys软件模拟了运动学接口,研究了接口参数对于三镜面形的影响。分析结果显示,在现有的设计及精度下,接口的接触应力水平满足使用要求,三个方向的重复性定位精度以及支撑效果能够达到设计指标。

关键词 光学设计;运动学定位;有限元法;重复性定位精度;镜面面形

中图分类号 TH751

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0312003

Kinematic Coupling Design and Analysis for 30 m Telescope Tertiary Mirror System

Zhao Hongchao Zhang Jingxu Yang Fei Guo Peng

*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China*

Abstract In order to avoid the introduction of aberrations which make the image quality degrade, both alignment and shift of the optical components are strictly guaranteed in the optical system. The kinematic interface has a wonderful performance in repeatability and low level of contact stress. So it is widely used in optical system. The thirty meter telescope (TMT) is an Ritchey-Chirtien (R-C) optical system. The tertiary mirror is employed to bend the light to the instruments. According to the requirement of the accuracy assembly this mirror is frequently removed to clean and recoat. So a kinematic interface is designed to meet the requirement. The study on the kinematic principle in positioning the rigid body is introduced. Then a preliminary design is constructed according with the mechanical principles. Thus the Hertz contact theory and IBM wear theory are employed to check the contact stress and the wear situation. At last, a positioning accuracy simulation is carried out by the Monte-Carlo method. In addition, a simulation is carried out to analyze the support performance in Ansys software. And some parameters is optimized. The results show that both the contact stress and the wear situation can meet the requirements. In addition, the repeatability in three directions and the support performance are achieved.

Key words optical design; kinematic coupling; finite element method; positioning accuracy repeatability; mirror surface figure

OSIC cdoes 120.4640; 120.4610; 120.4800; 120.5050

1 引 言

光学系统中,光学元件的准直及间距需严格保证,以避免像差的引入而使得成像质量下降。所以光学仪器接口设计过程中,提高接口的重复性定位能力和降低接口连接处的接触应力是非常重要的。运动学接

收稿日期: 2014-09-22; 收到修改稿日期: 2014-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(11403022)

作者简介: 赵宏超(1985—),男,博士,助理研究员,主要从事大型轴系设计方面的研究。E-mail: 18943605853@163.com

口是一种基于运动学定位的具有优秀重复性定位能力、低接触应力、加工较为廉价的接口形式。这种接口定位时不产生过约束,也不会出现欠约束,被广泛应用于光学设备定位装置之中。

三镜作为 Ritchey-Chirtien (R-C) 式光学系统中重要的光学元件,需严格保证其位置和姿态。但在 30 m 望远镜(TMT)设计寿命内,三镜需多次拆装清洗、镀膜。为保证三镜位置的重复性精度,需设计了一套三镜镜室组件定位用运动学接口^[1-3]。本文从运动学定位原理出发,校核了接口的接触应力水平;分析了影响运动学接口重复性定位精度的相应误差源,并使用蒙特卡罗方法进行了相应仿真。分析结果显示,现有的设计及精度下,接口的接触应力水平及磨损满足使用要求,三个方向的重复性定位精度能够达到设计指标。

2 运动学定位原理

2.1 问题描述

传统的地平式望远镜中,whiffle-tree 的三个硬点植根于镜室内部,并安装在一个刚度良好的四通中。这就能够有效降低加工、装配误差和结构变形对主镜支撑系统的影响,从而保证光学系统的成像质量。但是 TMT 三镜支撑系统与以往设计不同,结构更为简洁,其三个硬点直接连接在一个刚度薄弱的托架(类似于四通结构)上,所以,需要设置一个运动学接口,以便阻隔结构变形对于三镜支撑系统的影响。

运动学接口设计原理来源于刚体约束理论。每一个刚体在空间中都拥有 3 个移动自由度和 3 个转动自由度^[4-6]。当刚体过约束时,冗余约束会导致刚体位置不确定或者约束冲突而导致内应力的出现;同样,当刚体缺失约束时,刚体在空间的位置就不能唯一确定。所以,运动学接口在工程中应用时,只能约束 6 个自由度^[5-6]。

2.2 运动学接口形式

使用三组球和 V 型槽定位是运动学定位的常见形式,如图 1 所示。根据赫兹接触理论,这种定位形式中,6 个接触区域可视为 6 个约束点进行处理,所以能够达到运动学定位的目的。保证重复性定位精度的前提下,为提高运动学接口的承载能力,可以将定位球所在部件设计为鼓型承载部分配合球头定位的结构^[7]。

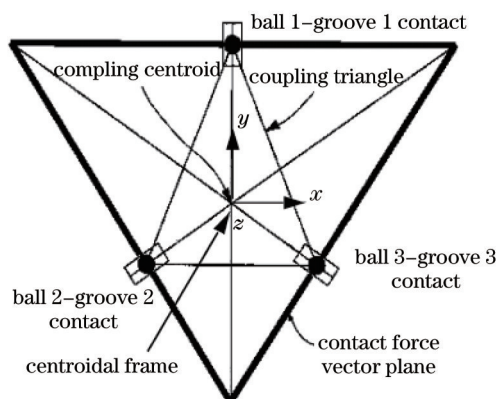


图 1 运动学定位原理

Fig.1 Principle of the kinematic coupling

三镜系统中,运动学接口是连接三镜镜室和托架的桥梁,起到定位和连接的重要作用。三镜镜室总重 4.2 t,现场拆装时,需要旋转望远镜至水平指向后再进行相关操作,此时似斜角为 58°,如图 2 所示。为严格保证三镜在光学系统中的相对位置,TMT 要求三镜镜室的重复定位精度在 Z 向为 0.025 mm,在 X 和 Y 方向为 0.2 mm^[1]。最终的设计方案就是基于这种形式的运动学接口。

3 运动学接口设计及校核

3.1 接口定位及连接原理

三镜镜室的运动学接口具有两个作用:定位与连接。3 组 V 型槽与球相互配合能够唯一定位三镜镜室;另外,3 个连接螺栓穿过 V 型槽连接到球上完成连接,见图 3。拧紧螺母与 V 型槽底部将放置一个预紧弹簧以及一个球头垫片以达到连接与定位的解耦。运动学接口也需要满足以下设计原则:运动学接口的刚心尽

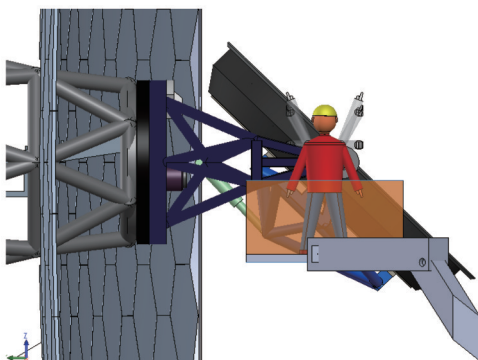


图2 三镜支撑系统安装姿态示意图

Fig.2 Posture to tertiary mirror cell assembly

量与负载的重心同心。这种设计具有三个优点,首先这一设计能够有效提高系统第一阶模态频率;其次,由于三镜支撑系统的底支撑和侧支撑都采用了 whiffle-tree 支撑形式,所以这种设计能有效保证光学元件的面形精度;再次,这种设计符合 Serrurie 桁架设计原理^[8-9],能够保证三镜(M3)镜室系统在支撑平面上只发生平移运动(重心对刚心的矩为零)。但由于定位球安装平面距离质心面的距离 L 过大($L=328\text{ mm}$),所以受安装空间限制,定位球半径最大能取 135 mm 。

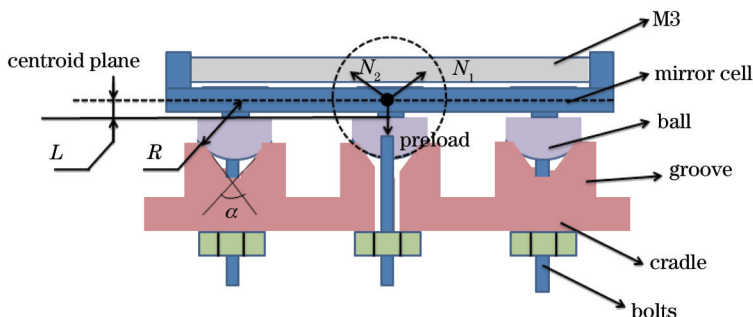


图3 运动学接口力学设计原理简图

Fig.3 Mechanics design diagram of the kinematic coupling

3.2 接触过程模拟

3.2.1 接触应力

运动学接口支撑中,由于接触区域面积积极小,所以一般会使得接触区域的应力水平很高,从而阻碍了运动学接口在机械支撑中的广泛应用。所以,在运动学接口设计中,一般选用硬度高、抗压轻度好的材料,如硬质合金等^[6],其中 YG20 钨钢的力学性能如表 1 所示。当三镜镜面平行于重力方向时,此时,运动学接口工况最为恶劣。计算可得接触表面上最大作用力为 30550 N 。则根据赫兹接触理论,最大接触应力为

$$\sigma_{\max} = 0.388 \sqrt[3]{PE^2 \frac{1}{R^2}} = 1418.5\text{ MPa}, \quad (1)$$

式中 P 为接触表面上的正压力, E 为材料的弹性模量, R 为定位球半径。此时:

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_{\max}} \geq 2.19. \quad (2)$$

校核可知,接触应力水平满足使用要求。

表1 YG20 力学性能

Table 1 Mechanical characteristics of YG20

Material	Density $\rho / (10^{-9}\text{ t/mm}^3)$	Yield σ_s / MPa	Shear strength τ_s / MPa	Hardness /HRA
YG20	13.4~13.8	3100	$0.5\sim 0.6 \sigma_s$	85~87

3.2.2 接触表面磨损

每隔一段时间三镜需要重新镀膜一次,每次镀膜需将三镜镜室组件从托架上移除,为保证运动学接口的定位精度,必须对其配合表面的磨损进行控制,根据 IBM 零磨损理论^[5],运动学接口最大剪切应力需满足以下条件:

$$\frac{\tau_b}{\tau_{\max}} \geq 5. \quad (3)$$

三镜镜室组件安装过程中,取接触表面的摩擦系数 f 为0.13^[6]。此时,根据有限元仿真结果可知,V型槽与球接触处最大作用力为28450 N。则最大剪切应力有:

$$\tau_{\max} = \frac{1.5Qf}{\pi ab} = 215.6 \text{ MPa}, \quad (4)$$

式中 Q 为安装过程中接触表面最大正压力, f 为静摩擦系数, a 、 b 为赫兹接触理论下接触椭圆的长轴和短轴。

4 重复性定位精度

对于一个设计合理且装配过程有序的运动学接口,由摩擦引起的重复性误差难以通过检测手段标定。针对摩擦对重复性精度的影响,基于球和V型槽结构尺寸和摩擦系数,Hale提出一种估算方法^[5]:

$$\rho = \frac{f}{k} \approx \mu \left(\frac{2}{3R} \right)^{1/3} \left(\frac{P}{E} \right)^{2/3} = 5.84 \text{ } \mu\text{m}. \quad (5)$$

式中 P 为运动学接口装配时的引导力,此处取28450 N。 μ 为接触表面的摩擦系数,文献[6]中给出的运动学接口接触表面的摩擦系数上限为0.38,并指出,实际摩擦系数为上限的1/3时就可以满足需要,故取 $\mu=0.13$, E 为材料的弹性模量。

计算得,摩擦引起的重复性定位误差为5.84 μm 。重复性误差的另一个主要组成部分是互换性误差。运动学接口更换定位元件时,会引入较大的互换性误差。这一误差主要来源于定位元件的加工和装配误差,其中主要有以下4项:

- 1) 定位组件安装孔的位置误差;
- 2) 定位组件安装表面的平面度误差;
- 3) 定位组件的形状误差;
- 4) 定位组件尺寸误差。

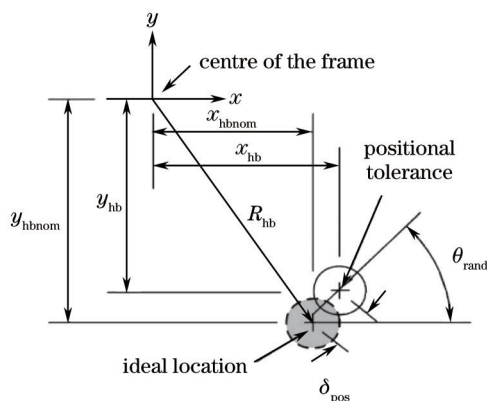


图4 定位孔位置误差示意图

Fig.4 Diagram of position error of a hole

4.1 元件加工和装配误差表示方法

定位组件安装孔的位置误差满足正态分布,其实际位置有99.7%的可能落在以理想位置为圆心,以 3σ 为半径的区域内,如图6所示。其中 (x_{hb}, y_{hb}) 可以表示为^[5]

$$x_{hb} = x_{hbnom} + \delta_{\text{pos}} \text{RandN}() \cos(\theta_{\text{rand}}), \quad (6)$$

$$y_{hb} = y_{hbnom} + \delta_{\text{pos}} \text{RandN}() \sin(\theta_{\text{rand}}), \quad (7)$$

$$\theta_{rand} = 2\pi \text{Rand}(), \quad (8)$$

式中 (x_{hbnom}, y_{hbnom}) 代表定位组件安装孔的名义位置, δ_{pos} 代表安装孔的最大位置误差, θ_{rand} 代表理想位置与实际位置连线与 x 轴的夹角,其满足均匀分布, $\text{RandN}()$ 代表-1到1之间的正态分布随机数, $\text{Rand}()$ 代表0到1之间的均匀分布随机数。

4.2 运动学接口定位误差源

根据以上分析,误差源主要有以下10项,根据加工能力其误差量大小如表2所示。其中第8、9项表示装配过程中引入的装配误差。

表2 运动学接口主要误差源
Table 2 Error source of the kinematic coupling

No.	Variable	Error
1	Position error of the mount holes δ_{pos} /mm	0.05
2	Angle between the line which connects the ideal location and the real location of the mount hole with X axis θ_{rand} /($^{\circ}$)	$2\pi \text{Rand}()$
3	Flatness of the mount surface f_a /mm	0.005
4	Roundness of the ball r_i /mm	0.005
5	Flatness of the V-groove surface f_v /mm	0.005
6	Angle error of the V-groove α_v /($^{\circ}$)	0.0003
7	Diameter of inequality of the ball R_i /mm	0.005
8	Mount error of the V-groove φ_v /($^{\circ}$)	0.005
9	Translational error between the center of the balls and the center of the V-grooves	$[\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z]'$
10	Rotational error between the center of the balls and the center of the V-grooves	$[\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z]'$

4.3 运动学接口配合过程数学建模

误差源中的各项误差通过影响定位点的位置对最终的配合精度产生影响。受误差影响的变量分别为三组V型槽定位点的坐标、三组球头球心的坐标以及三个V型槽走向误差,其中定位面误差分布带示意图如图5所示。

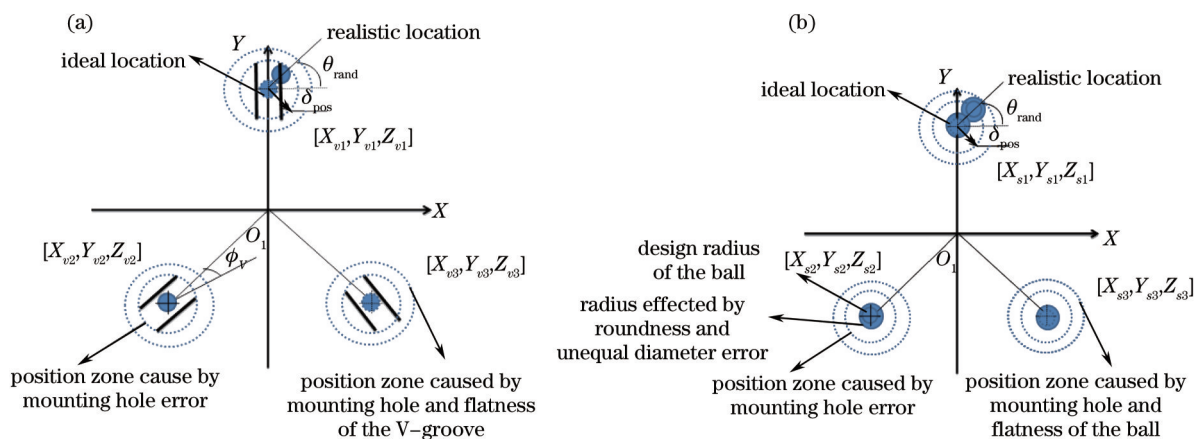


图5 运动学接口配合表面误差分布带示意图

Fig.5 Surface error distribution diagram of the kinematic coupling

根据误差幅值及其分布规律,按照向量几何可以得到误差影响下V型槽及球头球心定位点坐标。其中,各个定位点坐标可以表示为

$$\begin{bmatrix} X_{v1} \\ Y_{v1} \\ Z_{v1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{v1i} + \delta_{pos} \text{RandN}() \cos \theta_{rand} + \sqrt{2} f_a [\text{Rand}() - \text{Rand}()] \\ Y_{v1i} + \delta_{pos} \text{RandN}() \sin \theta_{rand} \\ Z_{v1i} + 2f_v [\text{Rand}() - 0.5] + \frac{\sqrt{2}}{2} f_v [\text{Rand}() - 0.5] + \alpha_v \text{RandN}() R_i \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} X_{v2} \\ Y_{v2} \\ Z_{v2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{v2i} + \delta_{\text{pos}} \text{RandN}() \cos \theta_{\text{rand}} + \frac{\sqrt{2}}{2} f_v [\text{Rand}() - \text{Rand}()] \\ Y_{v2i} + \delta_{\text{pos}} \text{RandN}() \sin \theta_{\text{rand}} + \frac{\sqrt{6}}{2} f_v [\text{Rand}() - \text{Rand}()] \\ Z_{v2i} + 2f_a [\text{Rand}() - 0.5] + \frac{\sqrt{2}}{2} f_v [\text{Rand}() - 0.5] + \alpha_v \text{RandN}(R_i) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} X_{v3} \\ Y_{v3} \\ Z_{v3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{v3i} + \delta_{\text{pos}} \text{RandN}() \cos \theta_{\text{rand}} + \frac{\sqrt{2}}{2} f_v [\text{Rand}() - \text{Rand}()] \\ Y_{v3i} + \delta_{\text{pos}} \text{RandN}() \sin \theta_{\text{rand}} + \frac{\sqrt{6}}{2} f_v [\text{Rand}() - \text{Rand}()] \\ Z_{v3i} + 2f_a [\text{Rand}() - 0.5] + \frac{\sqrt{2}}{2} f_v [\text{Rand}() - 0.5] + \alpha_v \text{RandN}(R_i) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} X_{s1} \\ Y_{s1} \\ Z_{s1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{v1i} + \delta_{\text{pos}} \text{RandN}() \cos \theta_{\text{rand}} + \frac{\sqrt{2}}{2} R_v \text{RandN}() + \sqrt{2} r_r [\text{Rand}() - 0.5] \\ Y_{v1i} + \delta_{\text{pos}} \text{RandN}() \sin \theta_{\text{rand}} + \frac{\sqrt{2}}{2} R_v \text{RandN}() + \sqrt{2} r_r [\text{Rand}() - 0.5] \\ Z_{v1i} + 2f_a [\text{Rand}() - 0.5] + \frac{\sqrt{2}}{2} R_v \text{RandN}() + \sqrt{2} r_r [\text{Rand}() - 0.5] + |X_{s1} - X_{v1}| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_x \\ \lambda_y \\ \lambda_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin[\varphi_v \text{RandN}()] \\ \cos[\varphi_v \text{RandN}()] \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} X_{s2} \\ Y_{s2} \\ Z_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{v2i} + \delta_{\text{pos}} \text{RandN}() \cos \theta_{\text{rand}} + \frac{\sqrt{2}}{2} R_v \text{RandN}() + \sqrt{2} r_r [\text{Rand}() - 0.5] \\ Y_{v2i} + \delta_{\text{pos}} \text{RandN}() \sin \theta_{\text{rand}} + \frac{\sqrt{2}}{2} R_v \text{RandN}() + \sqrt{2} r_r [\text{Rand}() - 0.5] \\ Z_{v2i} + 2f_a [\text{Rand}() - 0.5] + \frac{\sqrt{2}}{2} R_v \text{RandN}() + \sqrt{2} r_r [\text{Rand}() - 0.5] + \left| \frac{1}{2} (X_{s2} - X_{v2}) + \frac{\sqrt{3}}{2} (Y_{s2} - Y_{v2}) \right| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_x \\ \lambda_y \\ \lambda_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\left[\frac{2\pi}{3} + \varphi_v \text{RandN}()\right] \\ \cos\left[\frac{2\pi}{3} + \varphi_v \text{RandN}()\right] \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} X_{s3} \\ Y_{s3} \\ Z_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{v3i} + \delta_{\text{pos}} \text{RandN}() \cos \theta_{\text{rand}} + \frac{\sqrt{2}}{2} R_v \text{RandN}() + \sqrt{2} r_r [\text{Rand}() - 0.5] \\ Y_{v3i} + \delta_{\text{pos}} \text{RandN}() \sin \theta_{\text{rand}} + \frac{\sqrt{2}}{2} R_v \text{RandN}() + \sqrt{2} r_r [\text{Rand}() - 0.5] \\ Z_{v3i} + 2f_a [\text{Rand}() - 0.5] + \frac{\sqrt{2}}{2} R_v \text{RandN}() + \sqrt{2} r_r [\text{Rand}() - 0.5] + \left| \frac{1}{2} (X_{v3} - X_{s3}) - \frac{\sqrt{3}}{2} (Y_{v3} - Y_{s3}) \right| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_x \\ \lambda_y \\ \lambda_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\left[\frac{4\pi}{3} + \varphi_v \text{RandN}()\right] \\ \cos\left[\frac{4\pi}{3} + \varphi_v \text{RandN}()\right] \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

安装三镜支撑系统时,三个定位球头的球心与V型槽的定位点应尽量重合,所以需要三个定位球头构成的刚体经过平移、倾斜以及旋转后与V型槽配合。其中共涉及到三个平移量 $[\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z]'$ 以及三个旋转量 $[\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z]'$,运动学接口的配合过程可转换为数学中的最优解问题,即寻找一组最佳的平移、旋转量,以达到相互配合的三组定位点Z向误差的二范数最小。

4.4 重复性误差合成

蒙特卡罗法是一种按照变量分布规律随机取值然后进行统计处理的数学方法,其广泛应用于物理化学模拟、数学以及工程评估等问题上。模拟误差产生的随机过程,进行误差合成模拟也是蒙特卡罗方法的重要应用^[10]。在Matlab软件中使用蒙特卡罗法仿真结果如图6所示。

由于加工及装配误差导致的运动学接口重复性定位精度Z向为0.0194 mm, X向为0.182 mm, Y向为0.191 mm。考虑到摩擦的影响,运动学接口重复性定位精度如表3所示。

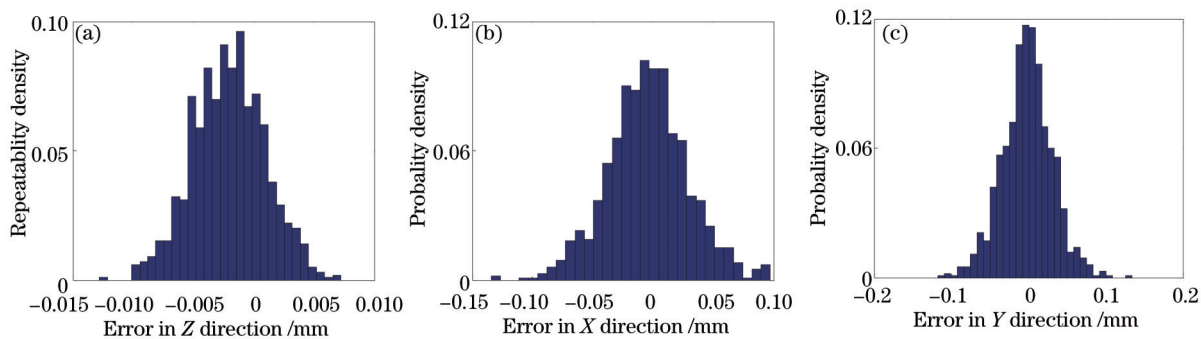


图6 运动学接口定位误差统计直方图。(a)Z方向;(b)X方向;(c)Y方向

Fig.6 Error statistical histogram of the kinematic coupling. (a) Z direction; (b) X direction; (c) Y direction

表3 运动学定位接口重复性精度设计结果

Table 3 Final results of the design of repeatability for kinematic coupling

Repeatability	X direction	Y direction	Z direction
Requirement /mm	0.200	0.200	0.025
Design results /mm	0.188	0.197	0.025

5 运动学接口支撑效果仿真

运动学接口在装配时起到定位的作用,使用中起着连接作用。工作过程中,由于三镜的受力情况不断变化,所以,当运动学接口的刚度中心与负载重心距离不为零时,运动学接口会对三镜面形产生较大影响。

5.1 三镜面形评价方法

光学检测中一般使用 Zernike 多项式拟合波面。Zernike 多项式每一项都有固定的形式,是一组正交函数集。TMT 望远镜主镜系统采用主动光学的校正方法,能够有效校正三镜面形关于离焦、像散的二阶 Zernike 误差项。主动光学的校正能力是有限的,因此,使用比例放大误差(PA)作为衡量三镜面形离焦、像散误差项的指标,其计算方法如下

$$f_{PA} = C_f \cdot Z_4 + C_a \sqrt{Z_5^2 + Z_6^2}, \quad (15)$$

式中 $C_f=1.97 \times 10^3 \cdot 10^{-3}(\mu)/\text{mm}$ (RMS), $C_a=6.370 \times 10^4 \cdot 10^{-3}(\mu)/\text{mm}$ (RMS)。Zernike 高阶项代表的误差使用斜率均方根(RMS)这一参数进行表征。斜率 RMS 能代表了镜面微观结构上的高低起伏状况,在大口径反射镜镜面形评价上比传统的 RMS 更为科学^[1]。

5.2 运动学接口支撑效果研究

在 Ansys 软件中建立相关结构的有限元模型,取重力沿 Y 轴方向时为研究工况,通过仿真研究了运动学接口刚度中心与三镜镜室组件重心之间距离与三镜面形的关系。如图 7 所示。当取定位球头半径为 135 mm(偏移量为 193 mm)或 328 mm(偏移量为 0)时,三镜面形误差中代表低阶离焦和像散的标准 Zernike 系数如表 4 所示。

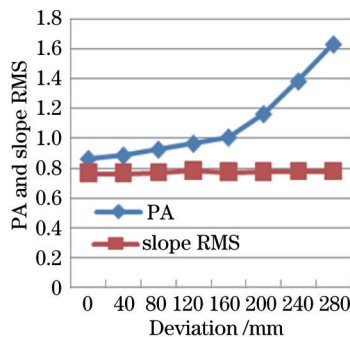


图7 PA 和斜率 RMS 与偏移量的关系

Fig.7 PA and the slope RMS versus the deviation

表4 代表离焦和像散的标准 Zernike 系数

Table 4 Zernike coefficients of the defocus and astigmatism

Repeatability deviation /mm	Z_4	Z_5	Z_6	$f_{PA} / [10^{-3} (")]$
0	1.24×10^6	3.35×10^{-5}	-1.71×10^{-4}	0.82
193	-4.70×10^{-6}	4.67×10^{-5}	1.06×10^{-4}	1.19

分析结果可得,镜面的高阶像差对这个距离变化不敏感,而代表低阶像差的PA受其影响较大。由图7可知,当运动学接口刚度中心距离负载重心为193 mm时能够满足 $f_{PA} < 1.2 \times 10^{-3}''$, $f_{slope-RMS} < 1.0 \mu rad$ 的设计指标。

6 结 论

通过分析可知,基于V型槽和球的运动学定位接口在现有设计下能够满足材料接触应力以及接口磨损的相应要求。并通过蒙特卡罗仿真可知,其能有效保证TMT三镜镜室的重复性定位精度,使其拆装过程中在X、Y、Z向的定位重复性分别达到0.20、0.20、0.025 mm的指标要求。另外,最终的设计中,运动学接口刚度中心距离负载重心约为193 mm,此时三镜的面形精度能够满足TMT的要求。这对于大口径光学设备的光学元件定位设计、安装以及装调有重要的参考价值。

参 考 文 献

- 1 TMT Observatory Corporation. Design requirements document for tertiary mirror system (M3S) [EB/OL]. http://www.tmt.org/sites/default/files/documents/application/pdf/design_requirements_document_2012-07.pdf. 2012-07-25.
- 2 J Nelson, G H Sanders. The status of the thirty meter telescope project [C]. SPIE International Society for Optics and Photonics, 2008, 7012: 70121A.
- 3 Wang Fuguo, Yang Fei, Zhao Hongchao, *et al.*. Progress in TMT M3 system [J]. Chinese Optics, 2013, 10(6): 643-651.
王富国, 杨 飞, 赵宏超, 等. TMT望远镜三镜系统的研究进展[J]. 中国光学, 2013, 10(6): 643-651.
- 4 C H Schouten, P Rosielle, P H J Schellekens. Design of a kinematic coupling for precision applications [J]. Precis Eng, 1997, 20(1): 46-52.
- 5 L C Hale, A H Slocum. Optimal design techniques for kinematic couplings [J]. Precis Eng, 2001, 25(2): 114-127.
- 6 A J Hart, A Slocum, P Willoughby. Kinematic coupling interchangeability [J]. Precis Eng, 2004, 28(1): 1-15.
- 7 Chang Lingying, Zhao Baochang, Qiu Yuehong, *et al.*. Optical system design of polarization imaging spectrometer for ground-based astronomical observation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s2): s222002.
常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪, 等. 基于地基天文望远镜的偏振成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(s2): s222002.
- 8 Yu Xinfeng, Gong Yan, Ni Mingyang, *et al.*. Optical surface figure of lens under kinematic mount apparatus and its reproducibility [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(8): 2000-2007.
于新峰, 巩 岩, 倪明阳, 等. 基于运动学支撑的透镜光学表面面形及其复现性[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 2000-2007.
- 9 Huang Jing, Liu Chaohui, Xie Youngjin, *et al.*. Design of 2-D reflection mirror gimbal for lunar based astronomy optical telescope [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(8): 2173-2179.
黄 静, 刘朝晖, 谢友金, 等. 月基光学天文望远镜反射镜转台的设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2173-2179.
- 10 Tang Yunhai, Wu Quanying, Chen Xiaoyi, *et al.*. Optimization design of the meridian line of progressive addition lenses based on genetic algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0922005.
唐运海, 吴泉英, 陈晓翌, 等. 基于遗传算法的渐进多焦点镜片子午线优化设计[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0922005.

栏目编辑: 韩 峰