

文章编号 1004-924X(2017)增-0046-06

巨型科学可控反射镜的质心检测

安其昌^{1,2*}, 张景旭¹, 杨 飞¹, 赵宏超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 100039)

摘要:三十米望远镜三镜巨型科学可控反射镜(GSSM)的质量分布对望远镜整体的控制精度影响十分巨大。为实现三十米望远镜整体运动控制,需要在在不倾倒系统的前提下实现质心测量。首先,针对 GSSM 质心检测方法进行了理论研究,结合激光跟踪仪与力传感器提出了 GSSM 质心检测方法。为了验证该方法的可行性,对三十米望远镜三镜的四分之一缩比模型(GSSMP)进行了质心检测实验。最后对所测得的结果进行了误差分析。在误差分析中,考虑了由激光跟踪仪所带来的误差与测量仪器所带来的误差,忽略系 GSSMP 弯沉所带来的误差。根据本文所提出的方法,GSSMP 的质量为 805.800 kg,其质心位置在三镜坐标系中的坐标为(-7.169 mm, 12.900 mm, 526 mm)、位置精度为 0.501 mm。

关键词:三十米望远镜;三镜;质心测量;误差分析;激光跟踪仪

中图分类号:TH751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172513.0046

Center of gravity testing for giant steerable science mirror

AN Qi-chang^{1,2*}, ZHANG Jing-xu¹, YANG fei¹, ZHAO Hong-chao¹

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: anjj@mail.ustc.edu.cn*

Abstract: The tertiary mirror of Thirty Meter Telescope (TMT) is a Giant Steerable Science Mirror (GSSM), the center of gravity (CG) of which significantly influences the control accuracy of the telescope. However, the GSSM is so large that the traditional lying down method is not suitable for the CG measurement. To measure the CG of the GSSM at small tipping angles, a method for testing the CG with a laser tracker and load cells was proposed and verified theoretically and experimentally. In the experiment, a 1/4 scale prototype of the TMT was constructed and its CG was located. Furthermore, the error of the measuring result was analyzed considering the laser tracker error and equipment error, whereas the gravity sag of GSSMP was ignored. The mass of GSSMP is 805.800 kg, and the location of CG is (-7.169 mm, 12.900 mm, 526 mm) with an accuracy of 0.501 mm.

Key words: Thirty Meter Telescope(TMT); tertiary mirror; center of gravity testing; error analysis; laser tracker

收稿日期:2017-05-10;修订日期:2017-06-13.

基金项目:中国科学院青年创新促进会资助项目(No. 2016198);国家自然科学基金资助项目(No. 11673080, No. 11403022)

1 引言

三十米望远镜 (Thirty Meter Telescope, TMT) 是世界上最大的望远镜之一,同时其三镜 (Giant Steerable Science Mirror, GSSM) 也成为世界上最大的平面镜。与传统意义上的 4 m 级地基望远镜不同, TMT 三镜对于望远镜主体结构来说不仅是光学元件,也是负载。其质量分布与整体质量都会对望远镜驱动系统产生巨大的影响。根据系统工程所提出的 GSSM 要求文件 [REQ-2-M3-0030P] 曾指出,三镜系统的总质量需要不大于 11 150 kg。同时,其执行与理想位置的偏差需要不大于 25 mm。具体来说,三镜系统的质心位置要求与总质量要求有互相关联的关系。首先,在其质心位置可测的情况下,是可以通过配重将其位置调节到需要的位置。同时,增加的配重不能超过一定限度,否则,三镜系统的总质量会超出上限。传统的地基大口径望远镜极少有质量要求,FAST 射电望远镜的柔性反射面以及吊舱的质心随时在变化,它主要利用静力平衡估计系统的质心位置;对于空间载荷,由于其质量一般较小,故可直接使用现有的设备进行测量。但是 GSSM 作为主系统的负载,其质量分布直接影响了系统的性能,同时由于尺寸巨大,现有的设备难以直接利用。针对此情况,研究一套针对 GSSM 的质量以及质心位置的测量方案就显得十分必要^[1-3]。

激光跟踪仪在大口径望远镜装调检测中的应用已经较为广泛。James Webb Space Telescope (JWST) 是一台口径为 6.5 m 的空间望远镜,由 18 块子镜组成,工作轨道为第二拉格朗日点,即地球与太阳引力的平衡点。在主镜单元安装与调试的过程中,使用了激光跟踪仪与六自由度调节平台。系统位置的监控由多台激光跟踪仪及靶球实现,每组共有 3 个靶球,3 个反射靶球的反射方向不同,在任何位置都可以进行装调^[4-9]。

本文利用激光跟踪仪建立坐标系以及测量基本的几何参数,结合力传感器与适当的算法实现了 GSSM 的质心测量。

2 系统组成与基本测量原理

GSSM 作为 4 m 级系统,其系统尺寸与复杂程度远远超过一般的大口径望远镜。为了研究其特性,制作了一个 1/4 的缩比模型, GSSM 缩比系统组成如图 1 所示。其中, GSSMP 坐标系的原点位于镜面中心, 镜面绕方位轴旋转定义 ECRS-Z, 绕俯仰轴旋转定义 M3CRS-X, 镜面法向为 M3CRS-Z。为了实现对 Z 方向质心位置的测量, 首先需要将待测工件旋转 90°, 但由于 GSSM 体积巨大, 将其横置的风险极高, 故与传统测量方法不同, 这里选择将 GSSMP 倾斜一定角度进行测量。

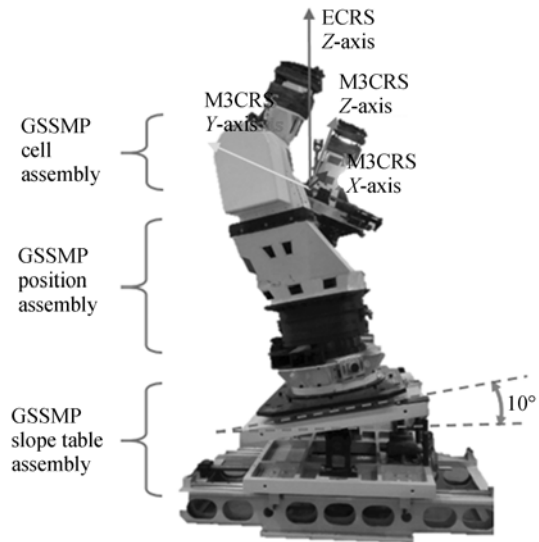


图 1 GSSMP 系统组成与坐标系

Fig. 1 GSSMP assembly and coordinate systems

首先,对于质心在水平面上的位置,可以使用联立力-力矩方程的方法得到。重心测量原理如图 2 所示:

重心表达式如式(1)所示:

$$\begin{aligned} x'_{CG} &= -\frac{x'_1 N_{1@0^\circ} + x'_2 N_{2@0^\circ} + x'_3 N_{3@0^\circ}}{N_{1@0^\circ} + N_{2@0^\circ} + N_{3@0^\circ}} \\ y'_{CG} &= -\frac{y'_1 N_{1@0^\circ} + y'_2 N_{2@0^\circ} + y'_3 N_{3@0^\circ}}{N_{1@0^\circ} + N_{2@0^\circ} + N_{3@0^\circ}} \\ m &= \frac{N_{1@0^\circ} + N_{2@0^\circ} + N_{3@0^\circ}}{g}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中: x'_{CG} 与 y'_{CG} 为质心在 X, Y 两个方向上的坐

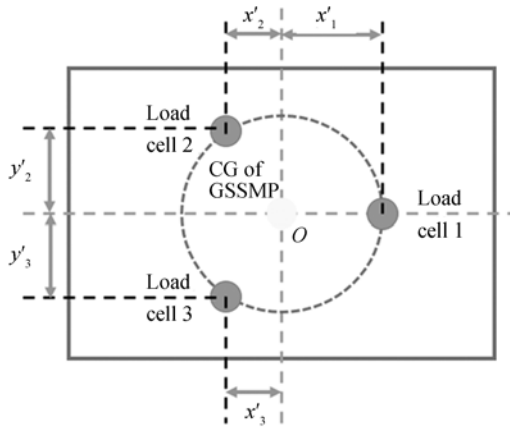


图 2 重心测量原理示意图

Fig. 2 Sketch of processing principle for center of gravity

标; $N_{1@0^\circ} \sim N_{3@0^\circ}$ 指 GSSMP 位于水平状态时 3 个力传感器的数值; $x'_1 \sim x'_3, y'_1 \sim y'_3$ 指 3 个力传感器的位置参数; m 为 GSSM 质量。

上述计算只有在测量设备坐标系与 GSSM 坐标系完全对准的前提下进行,但是,实际上很难使两个没有物理接口的设备实现坐标系完全对齐。在此使用激光跟踪仪实现坐标系的建立与对准。首先,质心测量设备具有定位孔与槽可以建立其测量坐标。GSSM 建立坐标的过程如图 3 所示,利用镜面上的 $T_1 \sim T_3$ 通过镜面绕方位轴旋转定义 ECRS-Z,绕俯仰轴旋转定义 M3CRS-X,镜面法向为 M3CRS-Z。通过 $B_1 \sim B_3$ 确定底座的位置。 T_4, T_5 作为辅助定位靶标。

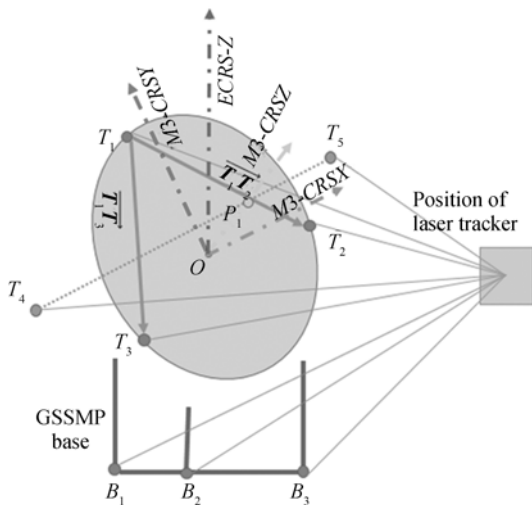


图 3 GSSM 坐标系建立过程

Fig. 3 Establishment of GSSM coordinates

设 (x', y', z') 为测试设备的坐标系, (x, y, z) . 两个坐标系之间存在 γ 的相对转动与 $(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$ 的相对移动。坐标系之间的转换矩阵为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & -\beta & -\delta_x \\ \alpha \beta \cos \gamma - \sin \gamma & \alpha \beta \sin \gamma + \cos \gamma & \alpha & -\delta_y \\ \beta \cos \gamma + \alpha \sin \gamma & \beta \sin \gamma - \alpha \sin \gamma & 1 & -\delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 γ, α, β 分别是相对于 Z-Y-X 轴的转动量。由于 α 以及 β 的转动量相对于 γ 较小,故做如下假设: $\sin \alpha \approx \alpha, \sin \beta \approx \beta, \cos \alpha \approx 1, \cos \beta \approx \beta$ 以及 $\alpha \beta \cos \gamma \ll \sin \gamma, \alpha \beta \sin \gamma \ll \cos \gamma$ 。式(2)可以变形为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & -\beta & -\delta_x \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & \alpha & -\delta_y \\ \beta \cos \gamma + \alpha \sin \gamma & \beta \sin \gamma - \alpha \sin \gamma & 1 & -\delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix}$$

提取前两行可得:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & -\beta & -\delta_x \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & \alpha & -\delta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix}$$

使用最小二乘法可以获得 α, β, γ 以及 (δ_x, δ_y) 的最小二乘估计,即:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_1 & y'_1 & -z'_1 & -1 \\ -x'_1 & y'_1 & z'_1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma \\ \beta \\ \alpha \\ \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix}$$

Z 方向上的沉降 δ_z 为:

$$\delta_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\beta \cos \gamma + \alpha \sin \gamma) x'_i + (\beta \sin \gamma - \alpha \sin \gamma) y'_i + z'_i - z_i \quad (3)$$

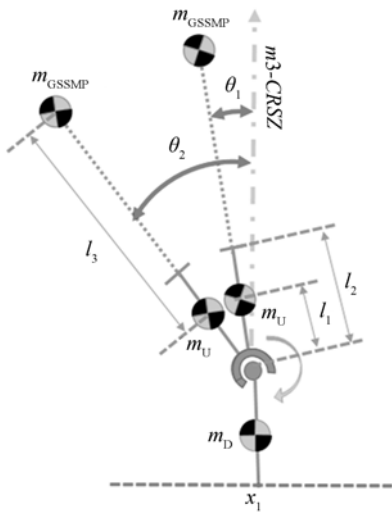


图 4 GSSM Z 方向质心测量原理

Fig. 4 Relatively calculated ZCG in GSSMP coordinate system

GSSMZ 方向质心测量原理如图 4 所示,主要原理为通过倾斜来获得 GSSM 质心的位置,由于 GSSM 质心高度的影响,在倾斜时质心位于 X-Y 平面的投影位置就会发生变化,根据这种变化可以获得 Z 方向的质心位置,其计算公式为:

$$\begin{cases} (l_1 + l_3) \sin \theta_1 m_{GSSMP} + l_1 \sin \theta_1 m_U = \\ \sqrt{x_1^2 + y_1^2} (m_U + m_D + m_{GSSMP}) \\ l_1 \sin \theta_1 m_U = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} (m_U + m_D) \end{cases}, (4)$$

$$\begin{cases} m_{2@0^\circ} = m_U + m_D + m_{GSSMP} \\ m_{2@\theta_1} = m_U + m_D \end{cases}$$

$$ZCG = \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2} m_{2@0^\circ} - \sqrt{x_2^2 + y_2^2} m_{2@\theta_1}}{\sin \theta_1 (m_{2@0^\circ} - m_{2@\theta_1})} - l_2, (5)$$

其中:ZCG 为 Z 方向的质心位置; (x_1, y_1) 为 CG 在 X-Y 平面所测量得到的位置; $m_{1@0^\circ}$ 为水平状态

下测量得到的质量; (x_2, y_2) 为倾斜状态下测得的 CG 在 X-Y 平面的位置坐标; $m_{1@\theta_1}$ 为倾斜状态下测量得到的质量; θ_1 为倾斜角度; $l_1 \sim l_3$ 意义如图 4 所示; m_{GSSMP} 为 GSSMP 的质量; m_U 为倾斜台倾斜部分的质量; m_D 倾斜台固定部分的质量。

3 GSSMP 质心测量与误差分析

为了验证其基本方案的可行性,对 GSSM 缩比模型(GSSMP)进行了质心测量实验,如图 5 所示。实验中,倾斜台偏转 4.006° ,GSSMP,CAD 模型估计得到的质心位置为 $(0 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 540 \text{ mm})$ 。



图 5 GSSMP 质心测量现场

Fig. 5 Sketch of GSSMP CG test

上述分析 GSSMP 处于 θ_1 ,实际上在 θ_2 位置的测量可以提高系统测量的信度。测量结果如下:

$$ZCG = \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2} m_{2@0^\circ} - \sqrt{x_2^2 + y_2^2} m_{2@\theta_1}}{\sin \theta_1 (m_{2@0^\circ} - m_{2@\theta_1})} - l_2 =$$

$$\frac{1570 \sqrt{(-13.576)^2 + (-37.473)^2} - 765 \sqrt{(-13.093)^2 + (-2.258)^2}}{\sin 4.066^\circ (1570 - 765)} - 397.681 = 526.1 \text{ mm}.$$

测量误差主要为激光跟踪仪的测量误差,质心测量系统的误差以及倾斜后重力变形所引入的

质心测量线性度误差。其中,激光跟踪仪的测量误差如表 1 所示。

表 1 激光跟踪仪误差
Tab. 1 Testing errors of laser tracker

Measurement distance /m		Length		Measurement error /mm
		measured by laser tracker /mm	Standard length /mm	
1	3	880.238	880.245	-0.007
2	4	880.231	880.245	-0.014
3	5	880.219	880.245	-0.026
4	6	880.265	880.245	0.020
5	7	880.219	880.245	-0.024
6	8	880.235	880.245	0.010
7	9	880.284	880.245	0.039

由表 1 可知,在 4 m 的测量距离上,测量误差为 $\Delta_{@4m}=0.014$ mm。根据平方合成规律可得:
 $\sqrt{2}\Delta_{@4m}=0.014\sqrt{2}=0.020$ mm。

由于 l_2 需要借助激光跟踪仪进行测量,故其测量精度为 $\sqrt{2}\Delta_{@4m}=0.014\sqrt{2}=0.020$ mm。

在进行测量计算时,基本假设为 GSSMP 在倾斜时不会产生变形,但是实际上会产生弯沉。现考虑第一阶挠曲线,即正弦函数形式,并以相对误差的形式进行表征:

$$E_{LS} = \left| \frac{\sin \theta - \theta}{\sin \theta} \right| \times 100\% \quad (6)$$

得到的误差曲线如图 6 所示。

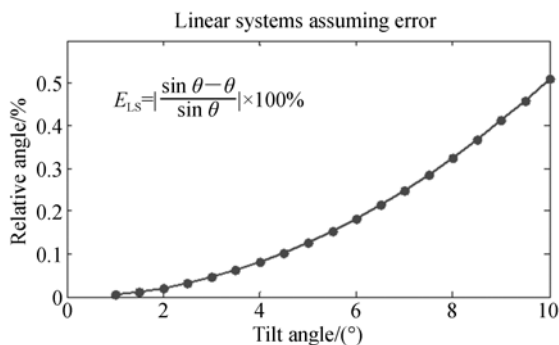


图 6 GSSMP 质心测量线性度误差估计

Fig. 6 Linear sag error curve of assumed CG of GSSMP

参考文献:

- [1] 邓赛,景奉水,梁自泽,等. FAST 馈源支撑系统位姿分配方法研究[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(2): 375-384.

激光跟踪仪的测角精度为 $10''$,故建立的 Z 轴可能出现偏离,引入的坐标轴误差为 $10'' \times 1 \text{ m} = 0.05 \text{ mm}$ 。GSSMP 质心测量误差分析结果如表 2 所示。

表 2 GSSMP 质心测量误差分析结果
Tab. 2 Error analysis result for CG testing

Error source	Amount of error	Conclusions
metrology error	0.5 mm	Considered
Laser tracker metrology error	0.020 mm (X-Y plate)	Considered
	0.020 mm (Z-direction)	Considered
Linear systems assuming Error	$\leq 0.6\%$	Ignorable
Coordinate system establishment error	0.050 mm	Considered
Total	0.501 mm	

4 结 论

本文倾斜 GSSMP,利用激光跟踪仪对其质心进行了测量。该方法测量得到 GSSMP 的质心位置测量精度为 0.501 mm。在同一坐标系下, CAD 模型所得到的理想值为 (0, 0, 557 mm), 实际值为 (-7.169 mm, 12.900 mm, 526 mm), 质量为 805.800 kg。此方法可以推广至 GSSM 全尺寸系统质心的测量中。同时,由于本方法测量重心时不需要特殊的工装,对类似设备的质心测量也有一定的指导意义。

- DENG S, JING F SH, LING Z Z, *et al.*. Research on pose distribution algorithm of FAST feed support system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(2): 375-384. (in Chinese)

- [2] KEAS P, GUERRA J, BREWSTER R, *et al.*.

- SOFIA telescope modal survey test and test-model correlation[J]. *SPIE*, 2010, 7738:77380K.
- [3] 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 2 m 望远镜主轴交流伺服控制系统设计[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(1): 163-171.
- DENG Y T, LI H W, WANG J L, *et al.*. Main axes AC servo control system for 2 m telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 163-171. (in Chinese)
- [4] LIETO D, SAHLMANN N, WALLANDER J, *et al.*. An approach to stabilizing large telescopes for stellar interferometry [J]. *Proc. ICALEPCS*, 2007.
- [5] 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 基于自适应滑模控制的大型望远镜低速控制[J]. *中国光学*, 2016, 9(6): 713-720.
- DENG Y T, LI H W, WANG J L, *et al.*. Large telescope low speed control based on adaptive sliding mode control[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 713-720. (in Chinese)
- [6] MACMARTIN D G, THOMPSON P, COLAVITA M M, *et al.*. Dynamic analysis of the active-controlled segm//KAWASHIMA S, WATANABE Y. Center of gravity detection for railway cars [J]. *Open Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 2(1): 1-5.
- [7] GOLPIRA H, MESSINA A R. A center-of-gravity-based approach to estimate slow power and frequency variations [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017. *Ented Mirror of the Thirty Meter Telescope*, *IEEE Trans. Control Sys. Tech.*, 2013, 22: 58-68.
- [8] 周程灏, 王治乐, 朱峰. 大口径光学合成孔径成像技术发展现状[J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 25-38.
- ZHOU CH H, WANG ZH L, HU F. Review on optical synthetic aperture imaging technique [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 25-38. (in Chinese)
- [9] Berger, James O, DELAMPADY M. Testing precise hypotheses[J]. *Statistical Science*, 1987: 317-335.
- [10] 邓永停, 李洪文, 王建立. 大型望远镜交流伺服控制系统综述[J]. *中国光学*, 2015, 8(6): 895-908.
- DENG Y T, LI H W, WANG J L. Overview of AC servo control system for the large telescope [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 895-908. (in Chinese)

作者简介:



安其昌(1988—),男,山西太原人,博士研究生,助理研究员,2011 于中国科学技术大学获得学士学位,2014 年于中国科学院大学获得硕士学位,主要研究方向为大口径光机系统的检测装调。
E-mail: anjj@mail.ustc.edu.cn

导师简介:



张景旭(1964—),男,吉林扶余人,研究员,博士生导师,1987 年、1990 年于北京邮电学院(现北京邮电大学)分别获得学士、硕士学位,2008 年于中国科学院长春光机所获得博士学位,主要研究方向为大型光电望远镜结构总体技术。
E-mail: zhangjx@ciomp.ac.cn