

TMT 三镜镜室组件柔性结构与屈曲分析

郭 鹏^{1,2}, 张景旭¹, 杨 飞¹, 赵宏超¹, 王富国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: 30 m 望远镜三镜为长轴 3.594 m, 短轴 2.536 m 的椭圆形微晶玻璃反射镜。其支撑结构采用了多种柔性结构, 以释放非支撑方向的自由度。使得轴向支承和侧向支撑能够相互解耦, 并减小支撑结构与镜子材料的热胀系数不匹配带来的热应力。柔性件柔度越高, 在望远镜观测条件的扰动下镜面形越好。但过高的柔度会降低柔性件的屈曲临界载荷, 导致结构发生屈曲失效。为此需要计算出望远镜观测过程中柔性结构所承受的最大压力载荷, 计算相应的屈曲安全系数 SF_{Buckling} 。对比了典型结构非线性屈曲分析和特征值屈曲分析的区别, 不断迭代设计和分析, 柔性元件的 SF_{Buckling} 和柔度取得了一个较好的平衡点, 热扰动下的面形也达到了设计要求。

关键词: TMT; 柔性结构; 屈曲分析; 热扰动

中图分类号: TH751 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)12-3650-06

Design and buckling analysis of TMT tertiary mirror cell assembly flexure structure

Guo Peng^{1,2}, Zhang Jingxu¹, Yang Fei¹, Zhao Hongchao¹, Wang Fuguo¹

(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)

Abstract: Thirty Meter Telescope's tertiary mirror is an elliptical ceramic glass reflector whose major axis is 3.594 m and minor axis is 2.536 m. Flexure structure was widely used in the mirror's support structure to release all the other degree of freedom except those along the support direction. The design decoupled the axial and lateral support and reduce the thermal stress due to the material mismatch. The higher compliance would benefit the telescope's mirror surface under distortion, but the buckling criteria load would decrease correspondingly, either. So the limit load of each flexure structure should be calculated as the design input. And the buckling safety factor SF_{Buckling} was analyzed for each part under the limit loads. Eigenvalue buckling analysis and nonlinear buckling analysis were both taken and compared. Based on the analysis results, the design were optimized iteratively to achieve balanced values of compliance for all the flexure. The mirror surface error under thermal distortion met the design requirements.

Key words: TMT; flexure structure; buckling analysis; thermal distortion

收稿日期: 2015-04-05; 修订日期: 2015-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(11403022)

作者简介: 郭鹏(1989-), 男, 硕士生, 主要从事大口径望远镜支撑结构方面的研究工作。Email: guopengmse@gmail.com

导师简介: 张景旭(1965-), 男, 博士生导师, 主要从事大型光电经纬仪结构设计方面的研究工作。Email: zhangjingxu@ciomp.ac.cn

0 引言

30 m 望远镜(TMT)是一台 30 m 口径的光学望远镜,其中三镜(M3M)为 3 594 mm×2 536 mm 的椭圆形平面镜该项目由美国加州理工学院(Caltech)、加州大学系统(UC)和加拿大大学天文研究联盟(ACURA)联合发起。中国科学院长春光学精密机械研究所承担了 三镜系统(M3S)的研制工作。三镜系统(M3S)分为三镜镜室组件(M3CA)、三镜跟踪指向组件(M3PA)和三镜控制系统(M3CS)。三镜(M3M)为一块微晶玻璃的椭圆形反射镜,长轴为 3 594 mm,短轴为 2 536 mm,厚度为 100 mm^[1]。

三镜通过支撑结构安装在三镜镜室组件内,支撑结构需要保证三镜在观测过程中面形精度以及三镜的安全。支撑结构分为底支撑和侧支撑,均采用 Whiffletree 结构。底支撑和侧支撑通过柔性结构相互解耦,并消减支撑结构和镜子热胀系数不匹配带来的影响。在非支撑方向的柔性越好,解耦效果越好,对热扰动的敏感性越低。但过高的柔性会使得结构的抗屈曲性能下降,在地震等外界扰动作用下,支撑结构有可能发生屈曲并损坏三镜^[2]。在 TMT 主镜、GMT 次镜的支撑结构的设计中,均对望远镜的屈曲安全系数进行了计算,作为结构的重要设计指标。文中针对三镜支撑结构的柔性组件进行屈曲分析,以屈曲安全系数 $SF_{Buckling}$ 作为设计约束。经过迭代设计,最终的安全系数达到了要求,热扰动下的面形精度也满足设计要求。

1 TMT 三镜支撑结构

TMT 三镜镜室组件包含了三镜的镜室以及支承结构。光学元件的支撑结构要求符合 Kinematic 原理,即仅约束光学元件的 6 个刚体运动自由度^[3]。这样支撑结构的变形只会引起光学元件的刚体位移,而不会产生弹性变形。根据六点定位原理,可通过 6 个点约束将一个刚体恰好完全固定。Whiffletree 结构通过杠杆或三角板将 3 个轴向支撑点和 3 个侧向支撑点扩展至多点,轴向支撑和侧向支撑各限制 3 个自由度,也符合 Kinematic 原理。如图 1 和图 2 中所示,TMT 三镜的底支撑通过杠杆和三角板将 3 个支撑点扩展为 18 个支撑点,侧支撑通过 2 级的杠杆将 3 个支撑点扩展为 12 个支撑点。连接的枢纽处释放

相应的自由度,保证整个结构自由度为 0。其中轴向支撑三角板的枢纽释放 Rotx 和 Roty 2 个旋转自由度,为双向自由度柔性枢纽。而侧向支撑的枢纽和轴向支撑杠杆的枢纽处均释放 1 个旋转的自由度,为单向自由度柔性枢纽。

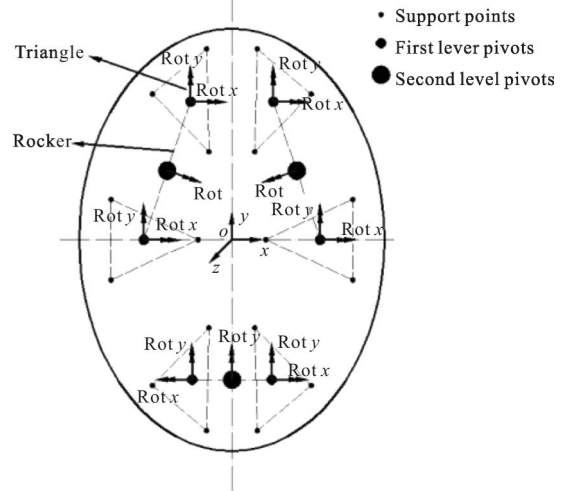


图 1 轴向支撑位置示意图

Fig.1 Axial support sketch

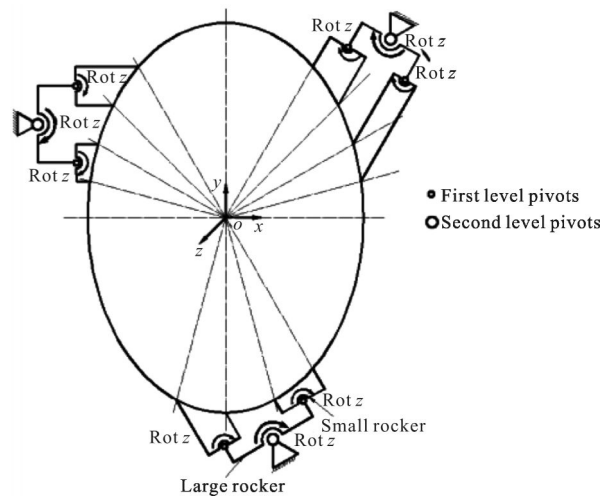


图 2 侧向支撑位置示意图

Fig.2 Lateral support sketch

实际的支撑结构一般通过柔性元件来实现对光学元件的 Semi-Kinematical 约束,即在支撑点和柔性枢纽处通过增大某一方向的柔度来“释放”该方向自由度。如图 3 所示,轴向和侧向支撑杆两端的两端以及轴向支撑的双向自由度枢纽采用双向开口的柔性铰链形式“释放”两个弯曲自由度。

柔性铰链采用如图 4 所示的矩形切口形式,柔性铰链的两个弯曲方向的柔度越大,越接近于

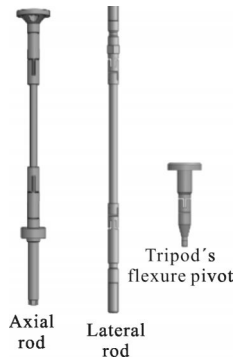


图 3 三镜支撑结构柔性件

Fig.3 Flexure structure in M3 support structure

Kinematical 约束。支撑杆和柔性枢纽的总长由结构总体设计确定，那么影响它们的柔度的主要因素为柔性铰链的长度 l 、厚度 t 和宽度 $b^{[4-7]}$ 。同时这 3 个参数也影响屈曲临界载荷。故最终设计应当满足：

$$\begin{cases} SF_{\text{Buckling}}(t,b,l) > 1.5 \\ \min K_{\text{Bending}}(t,b,l) \end{cases} \quad (1)$$

SF_{Buckling} 应当是以望远镜生存条件下的最恶劣工况下柔性元件的屈曲安全系数。 K_{Bending} 为柔性件的抗弯刚度。通过有限元方法可计算得到 SF_{Buckling} 和 K_{Bending} ，以此为设计约束对 3 个参数迭代设计直至得到一个较好的结果。

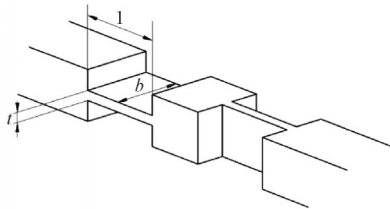


图 4 柔性铰链示意图

Fig.4 Sketch of flexure hinge

而单自由度柔性枢纽则采用 C-Flex 公司的柔性轴承，如图 5 所示。轴承在绕轴承轴线的旋转方向上具有很高的柔度，径向和轴向的刚度很高。根据载



图 5 C-Flex 柔性轴承

Fig.5 C-Flex pivot bearing

荷要求选择轴承型号，其安全性已经过生产商的分析校验，可不再进行校核。

2 屈曲分析理论

对于均匀截面的细长杆 SF_{Buckling} 可由经典的欧拉公式求出。而三镜的柔性支撑杆和柔性枢纽为变截面杆，很难得到解析解，一般通过有限元方法求出。有限元屈曲分析包括特征值屈曲分析和非线性屈曲分析两种。特征值屈曲分析的实质为求解特征值方程：

$$([K_E] + \lambda_i [K_G]) \{\phi_i\} = 0 \quad (2)$$

式中： $[K_E]$ 为结构的弹性刚度矩阵； $[K_G]$ 为结构的几何刚度矩阵； λ_i 为第 i 阶特征值，即为载荷系数； ϕ_i 为对应的特征向量，表征结构屈曲的形态。特征值屈曲分析的结果偏于理想，且无法反映出“缺陷”对结构的影响，但求解速度快。

非线性屈曲分析实质为考虑结构几何非线性的全过程静力学分析。其原理为通过在结构上逐步施加载荷直至结构稳定形态发生剧烈变化。但理想对称结构在均匀载荷作用下稳定形态不会发生改变，因此需要施加一定的“初始缺陷”。施加的缺陷越大，屈曲临界载荷越小。由于考虑到了大变形等几何非线性因素，非线性屈曲更加准确，并能够反映出结构缺陷的影响。图 6 为两种分析得到的载荷变形曲线，特征值屈曲分析为折线段，而非线性屈曲分析的载荷变形曲线为曲线。从图中可以看出非线性分析得到结果更加保守，更符合工程要求。但非线性屈曲分析的计算量大，耗时长。故选择一个典型结构件对比两种分析的临界载荷的差异。

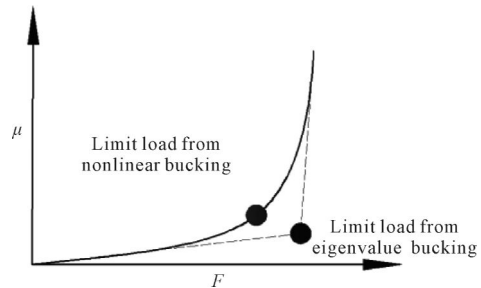


图 6 特征值屈曲与非线性屈曲的差异

Fig.6 Difference between eigenvalue buckling and nonlinear buckling

3 结构仿真分析

3.1 极限工作载荷

按照三镜 DRD(Design Requirement Document for

Tertiary Mirror System)要求,三镜系统应在 200 年返回周期地震的作用下机械结构不失效。地震作用可通过等效静力加速度来近似,TMT 站址所在处的 200 年返回周期地震的等效静力加速度为 1.8 g^[9]。为计算出柔性元件在生存工况下的最大载荷,使用 Ansys 建立三镜镜室组件的有限元模型(FEM),如图 7 所示。施加相应的等效加速度求解后提取柔性结构单元上的内力,即为各柔性结构的极限工作载荷。

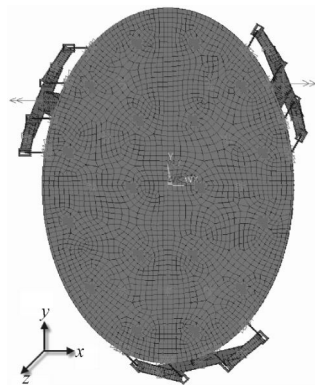


图 7 M3CA 有限元模型

Fig.7 Finite element model of M3CA

计算轴向支撑柔性结构极限载荷只需在模型中施加沿三镜坐标系(M3CRS)z 轴方向的 1.8 g 等效静力加速度。而侧向支撑杆可能会受到 M3CRS 下 xy 平面内任意方向的地震作用,故定义一组工况:在 M3CRS 下的 xy 平面中间隔 15°施加重力加速度,最后提取出所有工况下的各侧向杆中的最大轴向内力,结果列于表 1 中。按照 TMT 要求,临界屈曲载荷必须达到极限载荷的 1.5 倍。

表 1 柔性结构极限载荷

Tab.1 Limit load on flexure structure

M3CA loading	1.8 g gravity/N
Lateral flexure rod	6 707
Axial flexure rod	2 069
Small rocker's pivot	11 208
Axial tripod's pivot	7 378
Large rocker's pivot	22 294

3.2 屈曲分析与参数设计

通过迭代修改柔性结构的三个参数,直至失稳安全系数满足要求。以侧向柔性杆为例,在 Ansys 下建立出柔性杆的模型,进行特征值屈曲和非线性屈曲两种分析。特征值屈曲分析得到临界载荷为 11 627 N。以

特征值屈曲分析的失稳形态作为初始缺陷加在杆件上,缺陷的最大变形量取 0.02 mm。缺陷大小影响对结果会产生一定的影响,其大小根据结构加工的精度水平确定。然后,在 0~12 000 N 的范围内逐渐施加压力载荷,通过多个子步分析可得到杆件的载荷-变形曲线,结果如图 8 所示。可以看出变形突然增大的拐点位置与特征值屈曲分析的临界载荷十分接近,说明特征值分析与非线性屈曲分析的结果相差不大。最终结构的设计参数和失稳安全系数列于表 2 中。

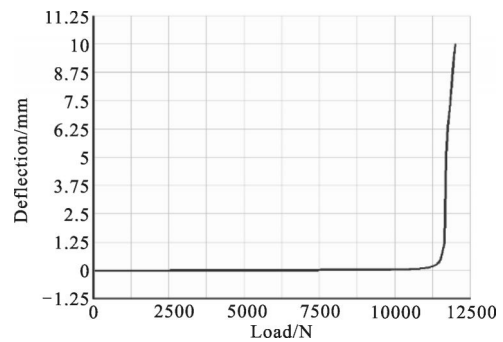


图 8 位移载荷曲线

Fig.8 Load-deflection curve

表 2 柔性结构参数设计

Tab.2 Flexure structure parameters

Component	<i>l, t, b/mm</i>	Buckling critical load/N	Safety factor
Axial rod	26, 1, 14	3 274	1.58
Lateral rod	20, 1.5, 14	11 627	1.73
Tripod's flexure pivot	18, 3.5, 20	12 103	1.64

3.3 热扰动分析

根据《TMT 三镜的面形评价标准》(TMT Tertiary Mirror Surface Specification),三镜面形分为低频误差,高频误差和极高频误差三项。SlopeRMS 主要反映了镜面面形的高频误差,与 TMT 的优化目标 PSSN(Normalized Point Source Sensitivity)有很高的相关性。并且三镜面形的低频误差可以通过 TMT 的主镜的主动光学校正一部分,包括对应 Zernike 的 defocus, astigmatism 和 trefoil。因此,SlopeRMS 是三镜面形评价的一个重要指标^[10]。其意义为镜面上节点面形梯度的均方值,表达式如下:

SlopeRMS=

$$\sqrt{\frac{1}{(N-1)(M-1)} \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{M-1} \frac{1}{2} \left(\frac{S_{k+1,j} - S_{k,j}}{dx} \right)^2 + \left(\frac{S_{k,j+1} - S_{k,j}}{dy} \right)^2} \quad (3)$$

SlopeRMS 是三镜面形差最严格的一项,故对此面形值进行校验。三镜系统的面形具体要求列于表 3。

表 3 TMT 面形指标

Tab.3 TMT mirror surface figure specification

Surface error source	SlopeRMS allocation/ μrad	Surface error source
Static errors	Polishing and metrology errors	0.8
	Static thermal distortion	0.16
	Thermal distortion	0.15
Dynamic errors	Gravity effect-nominal	0.25
	Gravity effect-manufacturing	0.16
	Other source errors	0.06
Total allocation		0.89

按照 TMT 的要求,三镜应在静态热扰动影响下镜面的 11 个子孔径的 SlopeRMS 均小于 $0.19 \mu\text{rad}$,动态热扰动影响下镜面各子孔径的 SlopeRMS 小于 $0.15 \mu\text{rad}$ 。在 Ansys 下建立三镜镜室组件的有限元模

型,并施加相应的热扰动。求解后提取镜面节点的位移值并计算出各子孔径的面形和 SlopeRMS 值,结果列于表 4。静态热扰动和动态热扰动下,各子孔径的面形图如图 9 所示。

表 4 子孔径 SlopeRMS 值

Tab.4 SlopeRMS of each sup-aperture

Sub-aperture	Static/ μrad	Dynamic/ μrad
1	0.023	0.018
2	0.025	0.019
3	0.006	0.005
4	0.025	0.02
5	0.023	0.018
6	0.016	0.012
7	0.012	0.01
8	0.033	0.026
9	0.022	0.017
10	0.014	0.011
11	0.015	0.012

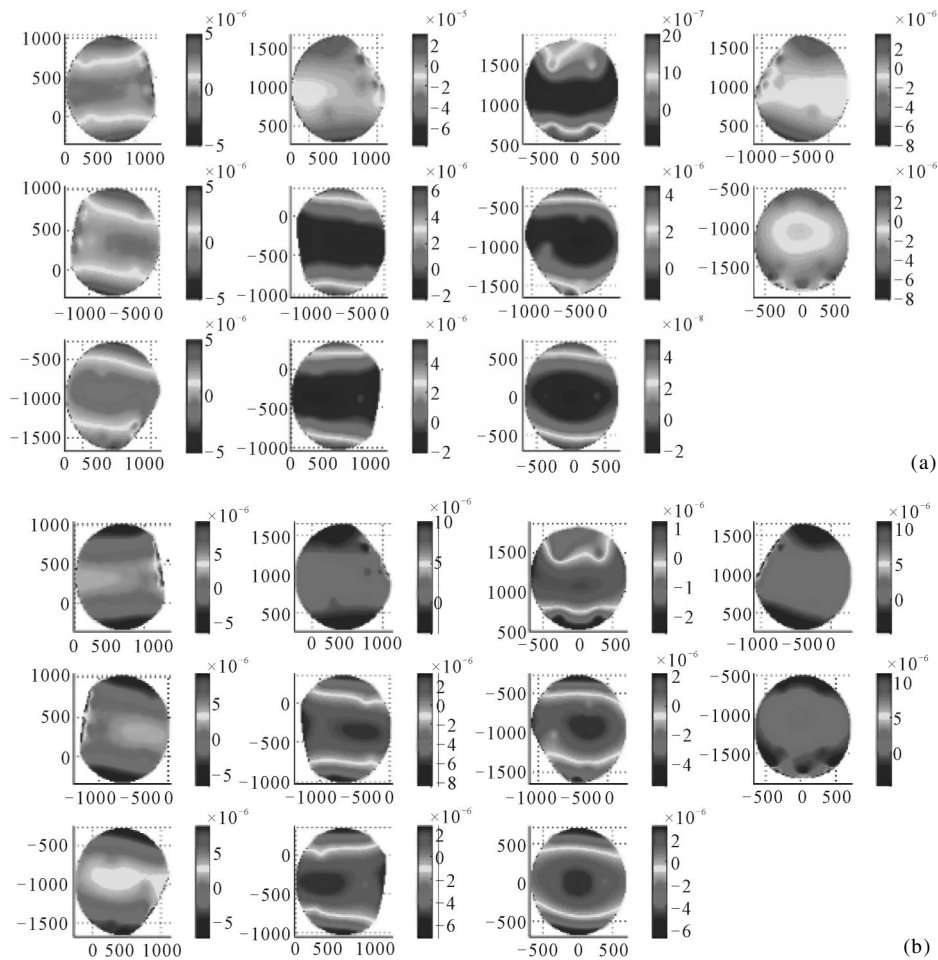


图 9 静态和动态热扰动下子孔径面形

Fig.9 Mirror surface of each sub-aperture under static and dynamic thermal distortion

结果表明,柔性结构的柔度使得三镜镜室组件在热扰动影响下镜面 SlopeRMS 值符合了 TMT 的要求。

4 结 论

柔性结构的参数设计是一个繁复的过程,要考虑到刚度、强度和稳定性等诸多因素。TMT 三镜系统对于结构稳定性和面形精度有着很高的要求,因此需要平衡系统在力扰动下的结构稳定性和在热扰动下的面形稳定性。通过迭代设计,最终使 TMT 三镜支撑结构的稳定性和镜面在热扰动下的面形均达到了 TMT 的要求。

参考文献:

- [1] Wang Fuguo, Yang Fei, Zhao Hongchao, et al. Progress in TMT M3 system[J]. *Chinese Optics*, 2013, 10(6): 643-651. (in Chinese)
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.
- [2] Williams E C, Baffes C, Mast T, et al. Advancement of the segment support system for the Thirty Meter Telescope primary mirror [C]//Proceedings of SPIE -The International Society for Optical Engineering, 2008, 7018 (7018):701810-701810-16.
- [3] Cheng Jingquan. Principle and design of astronomical telescope [M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2002.
- [4] Qi Guang, Xu Yanjun, Liu Bingqiang. Lightweight structure design for SiC/Al supporting plate of space mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (7): 2214-2218. (in Chinese)
齐光, 许艳军, 刘炳强. 空间相机反射镜 SiC/Al 支撑板轻量化结构优化设计 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43 (7): 2214-2218.
- [5] Zhou Ziyun, Gao Yunguo, Shao Shuai, et al. Design of fast steering mirror using flexible hinge[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1547-1554. (in Chinese)
周子云, 高云国, 邵帅, 等. 采用柔性铰链的快速反射镜设计[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(6): 1547-1554.
- [6] Chen Hongda, Chen Yonghe, Shi Tingting, et al. Lightweight and mounting design for primary mirror in space camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 535-540. (in Chinese)
陈洪达, 陈永和, 史婷婷, 等. 空间反射镜的轻量化及支撑设计研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 535-540.
- [7] Wu Xiaoxia, Li Jianfeng, Song Shumei, et al. Active support system for 4mSiC lightweight primary mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2451-2457. (in Chinese)
吴小霞, 李剑锋, 宋淑梅, 等. 4mSiC 轻量化主镜的主动支撑系统[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(9): 2451-2457.
- [8] Su Yanqin, Zhang Jingxu, Wang Fuguo, et al. Seismic analysis of TMT M3 cell assembly based on spectral response[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 996-1003. (in Chinese)
苏燕芹, 张景旭, 王富国, 等. 基于谱分析的 30 m 望远镜三镜支撑结构地震分析 [J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(4): 996-1003.
- [9] Corredor A, Park W H, Cho M, et al. Optomechanical analysis and testing of a fast steering secondary mirror prototype for the Giant Magellan Telescope[C]//SPIE, 2013, 8836(21):10660-10667.
- [10] Wang Fuguo, An Qichang. Evaluation of mirror surface figures for TMT based on SlopeRms[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(5): 1171-1175. (in Chinese)
王富国, 安其昌. 30 m 望远镜三镜镜面面形误差的斜率均方根评价[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(5): 1171-1175.