

doi:10.3788/gzxb20164509.0912006

内部振动对 30 m 望远镜三镜的影响

安其昌^{1,2}, 张景旭¹, 杨飞¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

摘 要:利用数值方法得到任意形式振动下 30 m 望远镜三镜的光学传递函数, 并分析其数值精度. 在光学传递函数的基础上引入标准化点源敏感性来表征振动对系统光线中继功能的影响. 为了验证理论分析, 对于某大口径设备进行实验, 采用多个加速度计共同采集数据并合成信号的方法来实现镜面运动信息的解耦与测量误差抑制. 结果表明: 在内部振源工作的情况下, 设备点源敏感性从 0.999 96 下降到 0.999 92; 使用二阶巴特沃兹带通滤波器后, 对于外部的力输出为 0.075 N.

关键词:大口径光学系统; 30 m 望远镜三镜; 数值分析; 光学传递函数

中图分类号: TH751

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)09-0912006-6

Influence on the 30 m Telescope Tertiary Mirror Performance by the Internal Vibration

AN Qi-Chang^{1,2}, ZHANG Jing-xu¹, YANG Fei¹

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

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The optical transfer function of 30m telescope tertiary mirror under arbitrary forms of vibration was obtained by numerical method, and the accuracy was analyzed. The normalized point source sensitivity was introduced to present the influence of internal vibration on the light beam transmit function. To verify the theoretical analysis, a larger aperture telescope was experimented. In the experiment, a multi-accelerometer method was used, the decoupling of the mirror rigid body motion and the constrain of the testing error were realized by data collected by the residual accelerometers. The results demonstrate that, under the influence of the internal vibration source, the normalized point source sensitivity degrades from 0.99996 to 0.99992. After passing the filter the output force is 0.075N.

Key words: Large telescope; 30m telescope tertiary mirror; Numerical analysis; Optical transfer function

OCIS Codes: 120.4640; 120.4610; 120.4800; 120.5050

0 引言

30 m 望远镜 (Thirty Meter Telescope, TMT) 是由美国主导、多国参与建设的下一代大口径光学红外望远镜, 利用拼接镜与自适应光学技术, 针对不同的观测目标可以将观测能力提高 10~100 倍. 为了探测更暗更远的星体, TMT 所配备的探测器种类与数量 (8 个主要仪器, 诸多辅助仪器, 分 10 年安放完毕) 也远远超出一般的大口径望远镜, 因此 TMT 采用了奈氏平

台方案来安放诸多仪器设备^[1]. TMT 三镜位于主镜中央位置, 是目前在研的最大平面反射镜, 其尺寸为 3.594 m×2.576 m×100 mm, 由背部 18 点 whiffletree 支撑. 除用于主镜面形调整的科学仪器 (Alignment Pointing System, APS), 其余设备的光轴均与 TMT 望远镜俯仰轴不重合, 故在此情况下, TMT 三镜需要实现精密的光线中继功能, 将主镜收集的光线在任意俯仰角下都能稳定地反射到科学终端处^[2]. 因此, 考虑如何消除 TMT 三镜的自身误差与外界对其的影响显得

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11403022) 资助

第一作者: 安其昌 (1988-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大口径光机系统检测装调. Email: anjj@mail.ustc.edu.cn

导师: 张景旭 (1964-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为大型光电望远镜结构总体技术. Email: Zhangjx@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2016-03-04; 录用日期: 2016-06-15

<http://www.photon.ac.cn>

十分重要. TMT 三镜驱动与内部子系统振动对其造成的影响主要分为两个部分:第一部分是由驱动及控制系统误差引起的,在保持高精度指向时所造成的晃动影响;另一部分是由于三镜系统内部器件(电机,传动系统,拖链系统等)的振动对镜面本身,以及通过接口对主镜单元所产生的影响.由于三镜在系统主光路中的特殊性,对其抗振动性有严格的要求.

标准化点源敏感性(Normalized Point Source sensitivity, PSSn)是美国 TMT 团队所提出的一种针对大口径望远镜误差分配的新指标,相对于传统评价指标,具有更好的分解与合成精度.其定义为带有误差望远镜的点扩散函数与理想望远镜在视宁影响下的点扩散函数^[3].对不同误差源引入的波前误差,利用 PSSn 评价时,可以通过合成来精确估计最后的数值;另一方面, PSSn 是对整个频域综合评价之后的指标,与 80% 能量集中度、全宽半高等指标相比,可以更加全面地评价系统的成像质量^[4].

SRudoler 与 OHadard 等^[5]在 1991 年提出了一种受机械振动影响时系统传递函数变化的研究方法,即理想点扩散函数在空间域平均的思想.之后, I. Dror, HADAR^[6], Kopeika^[7]等在具体计算方法与数值精度等方面进行了研究.一般来说,对于影响系统成像的振动主要分为 3 种类型:1)低频影响,假设系统为匀速直线运动,受该种振动影响的系统传递函数为 sinc 函数;2)中频影响,在该频段,系统的传递函数为零阶贝塞尔函数;3)对于高频的振动,一般认为其传递函数为高斯型.对 TMT 三镜而言,低频振动可依靠自适应系统进行校正,而中高频的扰动却需要从两方面考虑:1)由于 TMT 三镜系统本身结构阻尼很小,中高频振动都会对镜面产生直接影响;2)当考虑三镜对主镜的影响时,由于主镜子镜单元(共 492 块,对角线 1.44 m)带有阻尼环节,需主要研究某特定频段的影响^[8-10].

本文利用数值方法获得在任意形式振动下 TMT 三镜理想系统光学传递函数(Optical Transfer Function, OTF)的变化,并分析了该方法的数值精度,进而得到内部振动对 TMT 三镜 PSSn 的影响.最后,将本方法应用在某大口径望远镜主镜上进行了实验验证.

1 理论推导

由振动所引起的光学传递函数变化(或者称为模糊),需要分频段进行分析.在低频下,可以认为像点进行匀速直线运动.可利用图像处理对振动的速度与方向进行还原;对于高频振动,一般可以当作高斯分布来处理,由于高斯分布在时域和频域具有一致性,其处理过程与结果都大幅简化^[5].

对于中频振动所引起的波前变化,一方面可以使

用理论分析方法,但是对特色各异的振动,其表征的准确程度会大为下降;另一方面是使用数值方法进行分析,借助计算机超高的计算能力,该方法的应用范围也越来越广.

一般的分析方法都是基于系统的位移信息,如果外部信号为加速度信号,需要对其进行积分以获得位移信号^[11].获得振动位移之后,需要对系统成像质量进行评估.本方法使用光学传递函数 OTF(f)来表征,光学传递函数为线扩散函数(Line Spread Function, LSF)的傅里叶变换,表示为

$$\text{OTF}(f) = \int \text{LSF}(s) e^{-ifs} ds \quad (1)$$

式中, f 为圆频率,单位为 cycle/s,为空间位置,同时 OTF(f)又可以展开成为级数的形式,即

$$\text{OTF} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left. \frac{\partial^n \text{OTF}}{\partial f^n} \right|_{\omega=0} f^n \quad (2)$$

式中, n 为整数.

将光学传递函数的麦克劳林展开作为中间过渡,建立激励系统的振动与 OTF 的关系,即

$$\left. \frac{\partial^n \text{OTF}}{\partial f^n} \right|_{\omega=0} = \left. \frac{\partial^n}{\partial f^n} \int \text{LSF}(s) e^{-ifs} ds \right|_{f=0} = (-j)^n \int s^n \text{LSF}(s) ds \quad (3)$$

光学线扩散函数作为一种概率密度,通过积分容易转化为系统振动($E\{\cdot\}$),即

$$\int s^n \text{LSF}(s) dx = E\{s^n\} \quad (4)$$

由此在 $s(t)$ 的外界激励下,系统 OTF 可以表示为

$$\text{OTF} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{m_n}{n!} (-jf)^n \quad (5)$$

式中, $m_n = \frac{1}{t_e} \int_{t_e}^{t_e+t_e} s^n(t) dt$, 为系统振动的 N 阶矩, j 为单位虚数, f 为圆频率,单位为 cycle/s, n 为整数, t_0 为开始采用的时刻, t_e 采样时间.

由于在实际计算过程中,数值方法首先需要考虑的是截断误差,根据泰勒阶数分解的原理,任意函数都可以分解为无限多项幂级数,其截断误差为

$$\Delta = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{m_n}{n!} (-jf)^n - \sum_{n=0}^N \frac{m_n}{n!} (-jf)^n = \frac{m_{N+1}}{(N+1)!} (-j\xi)^{N+1} \leq \frac{S_{\max}^{N+1}}{(N+1)!} \quad (6)$$

一般来说 S_{\max} 本身比较小,故截断误差较小.

受到正弦振动激励的系统,其 OTF 为零阶贝塞尔函数^[5],表示为

$$\text{OTF} = J_0(D\Omega) \quad (7)$$

式中, D 为抖动的幅值, Ω 为振动的频率.在此情况下,理论解与数值解的比较如图 1,可见 $N=200$ 即可达到较好的数值精度,故在以后的计算中 N 取为 200.

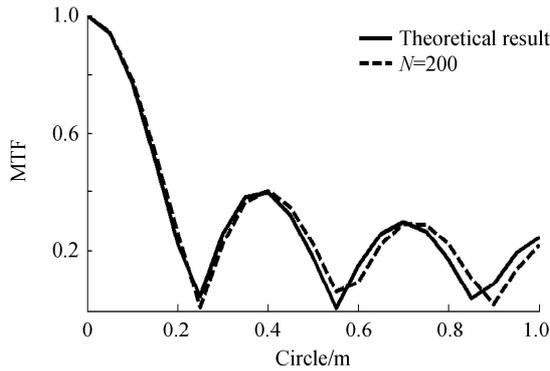


图 1 不同振动幅度下的光学传递函数

Fig. 1 The OTF under varied vibration amplification

2 实验验证与分析

为了验证理论分析,针对与 TMT 三镜类似,且具有内置振源的某大口径光电设备进行实验.实验设备以及坐标系如图 2;加速度计及其连接方式如图 3,在主镜背部,分布 3 个三向加速度计用来检测内部振动对于镜面的影响;在镜室之上,安放 3 个单向加速度计用来检测.

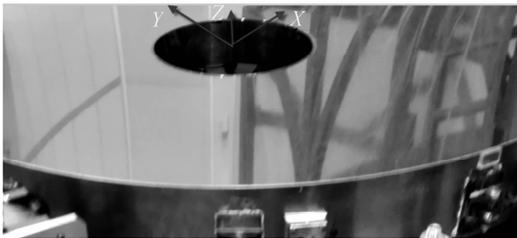


图 2 内部振动实验现场

Fig. 2 The set up for the internal vibration testing

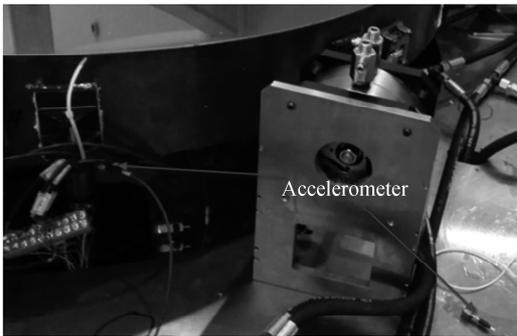


图 3 加速计实验现场安装

Fig. 3 Accelerometers location in the testing set up

试验采用的加速度计为 Leuven Measurement & System 公司所配套的 333B32 单方向传感器加速度计,标定方法采用声学标定法.将传感器放置于距离扬声器 300 mm、600 mm 以及 900 mm 的位置,播放同一段音频文件.之后分别进行功率谱分析,采用频率为 2 048 Hz@22.6°(图 4).

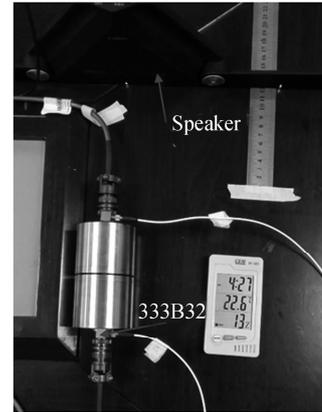


图 4 333B32 加速计标定实验现场

Fig. 4 333B32 accelerometers calibration

从功率谱的峰值上可以得到系统的固有频率信息,如图 5,10 Hz 之后,不同位置音频文件的功率谱具有相同的特征谱峰,可见在该区段内,加速度计的工作状况良好.

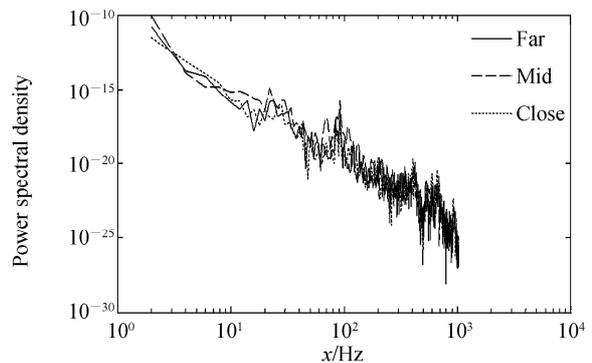


图 5 333B32 标定加速度功率谱

Fig. 5 The power spectral density of the 333B32 calibration

通过加速度计获得加速度信号,通过简单的坐标变换可以获得主镜实际的抖动加速度数值以及系统对外输出的振动输出数值.镜面法向的振动数据如图 6.

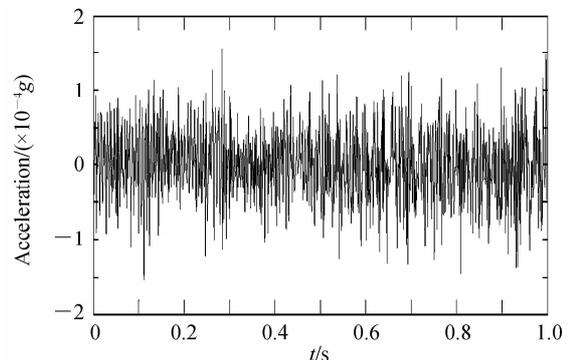


图 6 加速度计所得到加速度信号

Fig. 6 The acceleration signal achieved by accelerometer

实际检测得到的是大口径光学元件在振动下的面形,由于干涉仪本身的采样带宽限制,相当于对实验结

果添加了滤波器;同时,两次测量之间除振动引起的误差之外,由大气以及对准所产生的误差可能将振动影响淹没,故在此利用由振动引起的传递函数,将实际检测到的振动施加到静止状态下实际检测到的波前之上,振动影响下的镜面面形如图 7,可以看出,由于抖动的作用使得系统波前的起伏表现得不如原来尖锐.实际上,两者的(Root Mean of Square, RMS)仅从 23 nm变为 25 nm,但是其对于整个 TMT 系统的影响却较大,故需要能更好评价系统光学行为的标准.

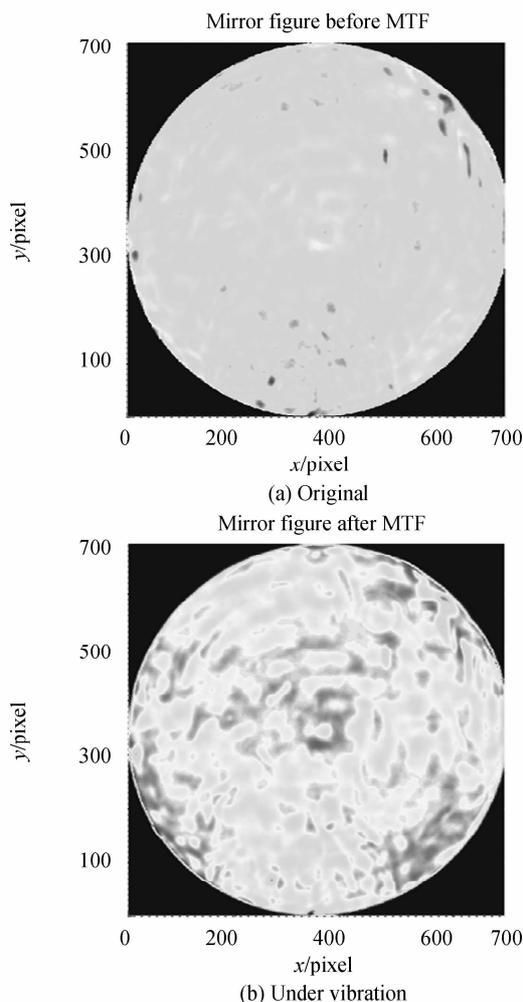


图 7 振动影响下的镜面面形
Fig. 7 The mirror figure influenced by the vibration

功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)最早由美国点火实验室(National Ignition Facility, NIF)用于评价中频误差,一般的过程为利用 Zernike 拟合的方法去除低阶像差,之后分行或者分列来研究其中高频信息^[12-13].系统内部振源启动与关闭时,仿真镜面面形功率谱如图 8.

在较为剧烈的抖动下,系统的高频信息会更加模糊,故对于实际系统,在误差分配过程中,可以充分考虑此问题,适当降低对于面形的要求;另一方面,如果对于光线中继要求特别高,就需要对系统的振动进行

特别考虑.但是 PSD 的评价过于定性以及主观化,故需要引入标准化点源敏感性(PSSn)对面形进行评价.

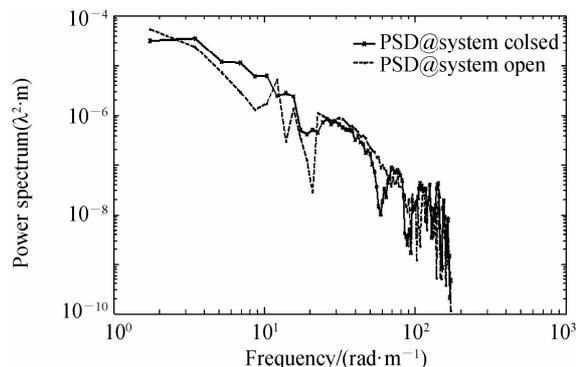


图 8 振动影响下的镜面面形功率谱
Fig. 8 The PSD of the mirror figure under vibration

PSSn 定义为

$$PSSn = \frac{\int |\text{PSF}_{t+a+e}|^2}{\int |\text{PSF}_{t+a}|^2} = \frac{\int |\text{OTF}_{t+a+e}|^2}{\int |\text{OTF}_{t+a}|^2} \quad (8)$$

式中, PSF_{t+a+e} 、 PSF_{t+a} 分别为含有误差的望远镜在视宁影响下的点扩散函数,以及理想望远镜在视宁影响下的点扩散函数. OTF_{t+a+e} 、 OTF_{t+a} 分别为含有误差的光学传递函数,以及理想望远镜在视宁影响下的光学传递函数

通过 PSSn 的变化,可以分析得到系统光学性能的变化.理想系统的 PSSn 为 1,随着数值的下降,与理想系统差别变大.根据经验公式,可估计 PSSn 在振动下的变化^[14-15]为

$$1 - PSSn \approx \frac{\gamma \sigma_{\text{slope}}^2}{\lambda^2} \quad (9)$$

式中, $\gamma = 0.11 \text{ m}^2/\text{rad}^2$ 为系数, $\lambda = 0.5 \text{ }\mu\text{m}$ 为波长, σ_{slope} 为斜率均方根(单位: μrad).得到在内部振源工作的情况下,其 PSSn 从 0.999 96 下降到 0.999 92;PSSn 与传统的 RMS 相比,其合成误差更小. RMS 的平方合成规律的成立条件为若干个统计量之间互相独立,这对于大口径望远镜的诸多误差项或多或少存在着相关性,故不可能完全解耦,一般来说,随着合成项数的提高,最后的合成误差会越来越大.在此得到的 PSSn 可以直接与其他误差源所引入的 PSSn 相乘,得到的结果精度要高于利用 RMS 分析使用滤波器来代替复杂的误差模型以及有限元建模,是 TMT 从之前的望远镜建设中继承的重要方法^[16].对于三镜内部振动对于 TMT 主镜的影响,主要是从滤波器的角度来考虑.为了简化系统的误差分配以及分析过程, TMT 在实际工程应用中,多处使用滤波器来代表较为复杂的误差传递以及矫正过程.如在获得 TMT 三镜指向数据之后,要考虑系统本身的准直标校,以及自适应光学系统的矫正.利用一个二阶巴特沃兹带通滤波器来模拟 TMT 三镜系统内部振动与主镜的相互作用过程^[15-16].

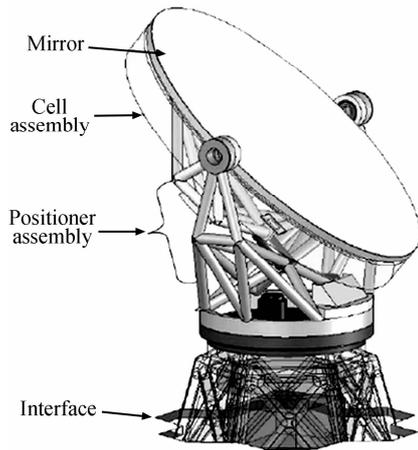


图9 三镜系统与主镜系统相互关系示意图

Fig. 9 The sketch of the relationship between tertiary mirror and main mirror

该滤波器的低频截止频率为 5 Hz, 高频截止频率为 20 Hz, 过低的频率由于阻尼的作用很难传递到主镜上去, 而超过系统固有频率之后对于主镜的影响也会降低. 该系统传递到基础的振动及通过滤波器之后的 PSD 如图 10. 考虑到系统质量之后, 就可以获得系统对于外部的力输出, 即对主镜系统输出的力. 在使用二阶巴特沃兹带通滤波器后, 对于外部的力输出为 0.075N. 之后根据 TMT 主镜单元的硬点刚度模型, 就可以估计出主镜单元的偏移.

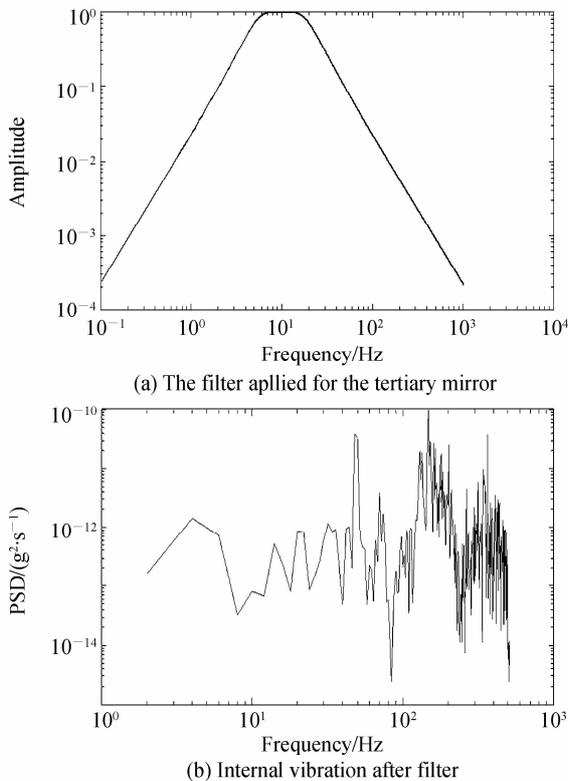


图 10 系统对外界的振动输出

Fig. 10 The output vibration of the system

3 结论

本文研究了内部振动对 30 m 望远镜三镜光线中继功能的影响. 通过实验分析可以得到, 在内部振源工作的情况下, PSSn 从 0.999 96 下降到 0.999 92, 两者的 RMS 仅从 23 nm 变为 25 nm, 可知 PSSn 可更好地体现振动的影响. 以二阶巴特沃兹带通滤波器代替复杂的有限元模型, 简化了建模过程, 提高了建模分析效率. 除本文分析的因素, 内部振动对整体光学系统的成像质量以及视轴偏移、镜面刚体运动、系统的动力学响应都有影响, 这将在后续的工作中进一步研究.

参考文献

- [1] FORD V, CARTER C, DELREZ C, *et al.* Jitter studies for the secondary and tertiary mirror systems on the Thirty Meter Telescope[C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation*, 2014, **9151**(2): 1-15.
- [2] SU Yan-qin, ZHANG Jing-xu, WANG Fu-guo, *et al.* Seismic analysis of TMT M3 cell assembly based on spectral response [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(4): 996-1003.
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.
- [3] BYOUN G, NISSE Y, GEORG E, *et al.* Analysis of normalized point source sensitivity as a performance metric for the thirty meter telescope[C]. *SPIE*, 2010, **7738**: 77380G.
- [4] PAZDER J S, VOGIATZIS K, ANGELI G Z. Dome and mirror seeing estimates for the thirty meter telescope[C]. *SPIE*, 2008, **7017**(0R): 1-9.
- [5] RUDOLER A S, HSDAR O, FISHER M, *et al.* Image resolution limits resulting from mechanical vibrations [C]. *SPIE*, 1985, **26**(6): 529-533.
- [6] HADAR O, DROR I, KOPEIKA N. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part IV: real-time numerical calculation of optical transfer functions and experimental verification[J]. *Optics Engineering*, 1994, **33**(2): 566-578.
- [7] KOPEIKA N, WULICH D. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations[J]. *Journal of Modern Optics*, 2008, **55**(3): 401-407.
- [8] SU Yan-qin, WANG Fu-guo, ZHANG Jing-xu, *et al.* TMT M3 system seismic analysis based on time history method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(11): 1112002.
苏燕芹, 王富国, 张景旭, 等. 基于时程分析的 TMT 三镜支撑系统地震分析[J]. *光学学报*, 2013, **33**(11): 1112002.
- [9] SHAO Liang, WU Xiao-xia, CHEN Bao-gang, *et al.* Passive support system of light-weighted SiC primary mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(5): 1380-1386.
邵亮, 吴小霞, 陈宝刚, 等. SiC 轻量化主镜的被动支撑系统 [J]. *光学·精密工程*, 2015, **23**(5): 1380-1386.
- [10] LIU Xiang-yi, ZHANG Jing-xu, WU Xiao-xia, *et al.* Affect of environment on mirror seeing of large-aperture SiC lightweight primary mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(3): 776-783.
刘祥意, 张景旭, 吴小霞, 等. 环境对大口径 SiC 轻量化主镜视宁度的影响[J]. *光学·精密工程*, 2015, **23**(3): 776-783.

- [11] YANG Xiao-xia, MENG Hao-ran, YIN Yu-mei, *et al.* Jitter measurement for large opto-electronic telescope using accelerometers[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, **27**(9): 823-830.
杨晓霞,孟浩然,阴玉梅,等.利用加速度计的大型光电望远镜抖动测量方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, **27**(9): 823-830.
- [12] BYOUNG J, CARL N, GEORGE A, *et al.* Analysis of normalized point source sensitivity as a performance metric for the thirty meter telescope[C]. SPIE, 2008: 70170T.
- [13] DENG Yong-ting, LI Hong-wen, WANG Jian-li. Overview of AC servo control system for the large telescope [J]. *Chinese Optics*, 2015, **8**(6): 895-908.
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.
- [14] WANG Fu-guo, AN Qi-chang. Evaluation of mirror surface figures for TMT based on slope Rms [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(5): 1171-1175.
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.
- [15] MACMYNOWSKI D, COLAVITA M, SKIDMORE W, *et al.* Primary mirror dynamic disturbance models for TMT: Vibration and wind[C]. SPIE, 2010: 7738E.
- [16] MACMARTIN D, THOMPSON P, COLAVITA M, *et al.* Dynamic analysis of the active-controlled segmented mirror of the Thirty Meter Telescope [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, **22**: 58-68.