文章编号　1004-924X(2018)06-1392-06

巨型科学可控反射镜缩比模型系统抖动检测

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 100049)

摘要：为了更好地对三十米望远镜三镜，即巨型科学可控反射镜(Giant Steerable Science Mirror，GSSM)的抖动(Jitter)特性进行研究，利用信号的复数表达分别分析了时域积分与频域积分的特性，明晰了二者之间的关系，并从积分精度的角度上，选择频域积分作为 GSSM Jitter 数据的处理方法。同时，对比了高精度编码器以及高精度加速度计对抖动测量的适用性，验证了使用加速度计测量的合理性。针对 GSSM 内部振动的影响，选择频响函数法测量内部作用力。最后，对 GSSM 缩比模型进行了 Jitter 检测，得到镜面方向 Jitter 为 0.079 7 μm，方位轴方向为 14.143 2 mas，俯仰轴方向为 20.747 5 mas，内部作用力为 0.003 3 N。

关　键　词：三十米望远镜；三镜；抖动测量；频域积分；加速度计
中图分类号：TH751　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20182606.1392

Jitter measurement of giant steerable science mirror prototype

AN Qi-chang[1,2], ZHANG Jing-xu[1], YANG Fei[1], ZHAO Hong-chao[1*]

(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: zhaohcciomp@163.com*

Abstract: The Giant Steerable Science Mirror (GSSM) is the tertiary mirror of the future large telescope, Thirty Meter Telescope. The characteristics of jitter were analyzed in the time domain and frequency domain, including the relationship between them. By considering the integral precision, frequency domain integration was chosen as the GSSM dithering data processing method. Simultaneously, the applicability of a high-precision encoder and high precision accelerometer for jitter measurement was compared, and the rationality of using the accelerometer was verified. For the internal vibration of the system, the internal forces were measured by the method of Frequency Response Function. Using the above findings, the jitter detection of the GSSM prototype was carried out. The jitter in the mirror is 0.079 7 μm, around the azimuth axis is 14.143 2 mas, around the tilt axis is 20.747 5 mas, and the internal force was 0.003 3 N.

收稿日期：2017-10-31；**修订日期**：2017-12-06.
基金项目：中国科学院青年创新促进会(No. 2016198)；国家自然科学基金资助项目(No. 11673080)；国家 863 重点研究发展计划资助项目(No. 2017YFE0102900)；吉林省科技发展计划优秀人才基金项目(No. 20180520171JH)

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Key words: Thirty Meter Telescope(TMT); tertiary mirror; Jitter measurement; frequency domain integration; accelerometer

1 引　言

与十米口径量级的望远镜相比，三十米望远镜(Thirty Meter Telescope，TMT) 拥有 9 倍集光能力以及 9 倍的面积分辨率；同时 TMT 的科学终端可以覆盖 20 μm 以上的波长范围。基于以上两点优势，TMT 可以观测到更深、更远的宇宙[1-6]。TMT 三镜系统，即巨型科学可控反射镜(Giant Steerable Science Mirror，GSSM)是世界上最大的平面镜，可以实现四米口径量级的光线中继功能。光线中继的难点在于波前质量的保持以及中继的精度。利用先进的加工手段与合理的支撑布局，GSSM 镜面自身所引入的波前误差可以控制在要求的范围以内，而实现中继功能的另一项重要的工作，即精密指向功能，则需要在多个层次上达到多项技术指标[7-10]。

GSSM 中继功能所要求的第一层次的运动为宏观指向运动，该功能由控制系统以及内置的编码器实现。为了以高性价比实现该功能，需要对 GSSM 进行标校。GSSM 第二层次的运动为对系统功能具有重要影响的抖动(Jitter)特性。GSSM 的 Jitter 不仅包括折算到镜面上决定光线中继功能的部分，还包括由于 GSSM 内部非均匀分布的回转质量、轴系的晃动以及仪器设备所引起的振动，即“内部振动”，对主镜系统成像所造成的影响。

针对 Jitter 检测的两个方面，GSSM 采用的传感器均为高精度的加速度传感器，但是后续的处理方法有所不同。为了评价光线的中继功能，需要通过积分将加速度信号转换为角位移信号，而内振动的影响则需要结合频率响应函数，从加速度信号估计内部作用力[11-13]。本文利用信号的复数表达，分别就时域积分与频域积分的特性以及相互联系进行了研究，对比了高精度编码器以及高精度加速度计对 Jitter 测量的适用性。

2 基本推导

在 Jitter 检测的过程中，获得的信号为加速度/角加速度，为了与系统要求的位移/角位移对应，需要进行数值积分运算。结合傅里叶分析的相关理论，首先，通过单一频率分量信号分析时域积分与频域积分的特性以及相互联系。单一分量的加速度信号的复数表达如下：

$$a(t)=A\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}, \tag{1}$$

其中：$a(t)$为加速度信号，A 为信号幅值，ω 为该单一频率分量信号所对应的频率，t 为连续时间。根据速度最基本的定义，可通过一次积分由加速度信号获得速度信号如式(2)所示：

$$v(t)=\int_0^t a(\tau)\mathrm{d}\tau+v(0)=\int_0^t A\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega\tau}\mathrm{d}\tau+v(0)=\frac{A}{\mathrm{j}\omega}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}+v(0)=\frac{a(t)}{\mathrm{j}\omega}+v(0), \tag{2}$$

其中：$v(t)$为速度信号，A 为信号幅值，ω 为该单一频率分量信号所对应的频率，t 为连续时间，$v(0)$为初始速度。

根据定义，对速度信号在连续时域上进行一次积分，可以得到位移信息如(3)式所示：

$$s(t)=\int_0^t v(\tau)\mathrm{d}\tau=\int_0^t \frac{A}{j\omega}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega\tau}\mathrm{d}\tau+v(0)t=-\frac{A}{\mathrm{j}\omega^2}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}+v(0)t=-\frac{a(t)}{\omega^2}+v(0)t, \tag{3}$$

其中：$s(t)$为位移信号，A 为信号幅值，ω 为该单一频率信号所对应的频率，t 为连续时间，$v(0)$为初始速度。

基于信号的复数表达可以得到精确的、解析的单一频率分量信号，本文分析了多频率复合的情况。多频率分量加速度信号的复数表达为：

$$a(t_s)=\sum_{k=0}^{N-1}A_k\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi k}{N}t_s}, \tag{4}$$

其中：$a(t_s)$为加速度信号，A_k 为信号幅值，t_s 为离散时间，N 为数据总长度。

在离散时间域上进行一次积分可得速度信号，如式(5)所示：

$$v_{\mathrm{fre}}(t_s)=\Delta t\sum_{k=0}^{N-1}\frac{A_k\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi k}{N}t_s}}{\mathrm{j}\frac{2\pi k}{N}}+v(0), \tag{5}$$

其中：$v_{\mathrm{fre}}(t_s)$为速度信号，A_k 为信号幅值，t_s 为离散时间，N 为数据总长度，$v(0)$为初始速度，Δt 为采样时间间隔。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在离散时间域上再进行一次积分可得位移信号，如式(6)所示：

$$s_{\mathrm{fre}}(t_s)=-\Delta t^2\sum_{k=0}^{N-1}\frac{A_k\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi k}{N}t_s}}{\left(\frac{2\pi k}{N}\right)^2}+v(0)t_s\Delta t\ ,\quad(6)$$

其中：$s_{\mathrm{fre}}(t_s)$为位移信号，A_k 为信号幅值，t_s 为离散时间，N 为数据总长度，$v(0)$为初始速度，Δt 为采样时间间隔。

根据式(6)所得，对多频率分量信号的复数表达进行积分，与频域积分互为等价变换，故在之后实验中的计算均使用式(6)。

本文利用信号的复数表达来对比时域积分与频域积分的特性。速度信号的时域积分为：

$$\begin{aligned}v_{\mathrm{tim}}(t_s)&=\Delta t\sum_{i=1}^{t_s}\frac{a(i-1)+a(i)}{2}+v(0)=\\&\Delta t\sum_{i=1}^{t_s}\frac{\sum_{k=0}^{N-1}A_k\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi k}{N}(i-1)}+\sum_{k=0}^{N-1}A_k\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi k}{N}(i)}}{2}+v(0)=\\&\Delta t\sum_{i=1}^{t_s}\frac{\sum_{k=0}^{N-1}A_k\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi k}{N}(i-1)}(1+\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi k}{N}})}{2}+v(0)=\\&\frac{\Delta t}{2}\sum_{k=0}^{N-1}(1+\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi k}{N}})+v(0)=\\&\frac{\Delta t}{2}\sum_{k=0}^{N-1}(1+\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi k}{N}})a(k)+v(0)=\\&\Delta t\frac{A_0+A_1}{4\pi}+v(0),\end{aligned}\quad(7)$$

其中：$v_{\mathrm{fre}}(t_s)$为速度信号，A_k 为信号幅值，t_s 为离散时间，N 为数据总长度，$v(0)$为初始速度，Δt 为采样时间间隔。根据式(7)，使用梯形积分所获得的求和结果，相当于仅考虑了其频率成分中的前两项，此次积分的误差将以线性误差的形式进入第二次积分，进而影响测量结果。同时，可得时域积分可覆盖的频域范围如式(8)所示，即在此频率范围内时域与频域的积分精度相同，如果需要提高时域积分的精度，需要采用过采样技术，扩大采样的带宽，这对硬件的要求较高。

$$\Delta\omega=\frac{2\pi}{N\Delta t}.\quad(8)$$

另一方面，如果使用辛普森积分等高阶积分方法，可以提高频率成分的利用率，但是依旧不能完全覆盖所有的频率；而使用频域积分可以避免这些问题。故使用式(6)对测量得到的加速度信号进行积分。

针对“内部振动”测试，系统要求将 GSSM 固定在无限大的质量之上，固定斜台基座，以减少测量误差。由于系统内部的力难以直接测量，在此选择间接测量法：主要依靠频率响应函数反演，在测量出力-加速度之间的频率响应函数之后，利用频响函数输入输出的互易性获得加速度-力之间的频率响应函数，进而获得“内部振动”所引起的力信号。动力系统的传递函数为：

$$H(s)=\sum_{i=1}^{2M}\frac{R_i}{s-s_i}=\frac{a_0+a_1s+\cdots+a_{2N}s^{2N}}{b_0+b_1s+\cdots+b_{2N}s^{2N}}=\frac{C(s)}{D(s)}.\quad(9)$$

令 $s=j\omega$ 可将传递函数转换为频率响应函数，即有：

$$F(\mathrm{j}\omega)=-\omega^2H^{-1}(\mathrm{j}\omega)A(\mathrm{j}\omega)=-\omega^2\frac{D(\mathrm{j}\omega)}{C(\mathrm{j}\omega)}A(\mathrm{j}\omega).\quad(10)$$

GSSM Jitter 测试的基本流程如图 1 所示。对于跟踪误差，系统 Jitter 数据评价的主要指标包括通过模拟跟踪过程的高通滤波器后的 RMS 以及通过模拟自适应系统校正过程的高通滤波器后的 RMS。另一方面，对于 GSSM 由于内部振动传递至主镜系统的力，需要使用带通滤波器(截止频率分别为 5 Hz 与 15 Hz)进行处理。

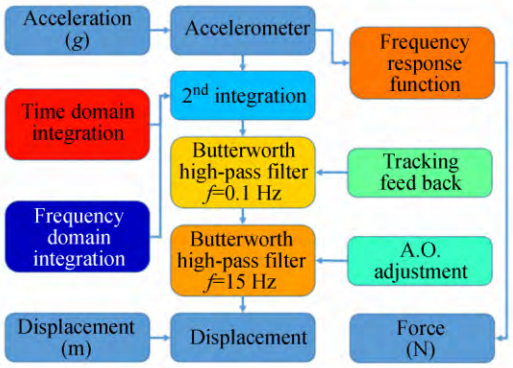

图 1 GSSM Jitter 数据处理流程

Fig. 1 Processing of GSSM Jitter data

为了分析该检测方法的误差以及与编码器直接检测位置信息的方法进行比较，进行了加速度计标定试验，如图 2 所示。加速度传感器具有精度高、体积小、便于安装的特点，可以在待检测设备上进行合理的部站；同时，与位移型传感器相比，不存在零点漂移等问题。将高精度加速度计 731A 的敏感轴方向与转动方向相切，并使用刚性螺纹连接保证加速度计与编码器检测同向运动。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

通过图 2 中的实验结果可得到，编码器由于外部环境以及内部扰动的影响，在系统停止运行时依旧存在数值接近低速运动情况下的读数。由此可见，速度计 731A 的噪声水平低于高精度编码器，编码器的检测结果更容易受到环境的影响，因此使用加速度计可以获得更好的检测精度。

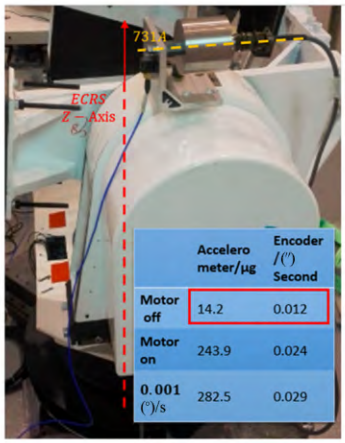

图 2　加速度计标定试验

Fig. 2　Photo and result of accelerometer calibration experiment

3　GSSMP Jitter 实验

由于 GSSM 尺寸巨大，技术难度高，因此，首先建设了一个 1∶4 模型对系统指标进行理解与学习。GSSMP Jitter 实验现场如图 3 所示，图 3 显示了 GSSMP 及其坐标系。GSSMP 的 Jitter 包括折算到镜面上决定系统光线中继功能的部分，以及内部振动对主镜系统成像所造成的影响，对光线中继来说，需要将所有误差折合到沿 M3CRS-Z，以及绕 M3CRS-X、ECRS-Z 上。GSSMP 系统位于倾斜台之上，可以模拟 GSSM 在主系统中的复杂重力工况。

测量跟踪 Jitter 的加速度计位于 Yoke 以及镜面之上；用于测量内部振动的加速度计安装于距离拐角一定距离的平坦位置，远离拐角主要考虑的因素是振动在基座内传递时，会在拐角处发生反射，对测量结果产生干扰；与此同时，连接方式对加速度计所测量信号的频段有着决定性的影响。

加速度计比较常用的连接形式有粘接、螺纹连接、磁铁连接和石蜡连接。石蜡作为一种低温黏接剂，可以较为便捷的用于小型加速度计的连接同时可以覆盖 2 048 Hz 以下的频率范围，而黏接剂或螺纹的连接方式更适用于大型的加速度计。这里对测量频响函数的 333B32 使用石蜡进行连接，而对于测量加速度信号的 731A 使用硬质的黏接剂与螺纹进行连接。

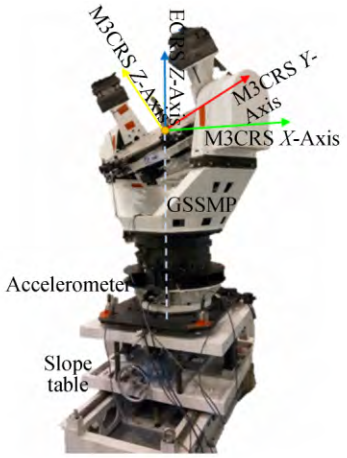

图 3　GSSMP Jitter 实验现场

Fig. 3　GSSMP Jitter measurement

GSSMP 镜面加速度计的测量结果以及通过频域积分之后的数据如图 4 所示。使用式(5)可得镜面方向的 Jitter 为 0.079 7 μm，方位轴方向为 14.143 2 mas，俯仰轴方向为 20.747 5 mas。

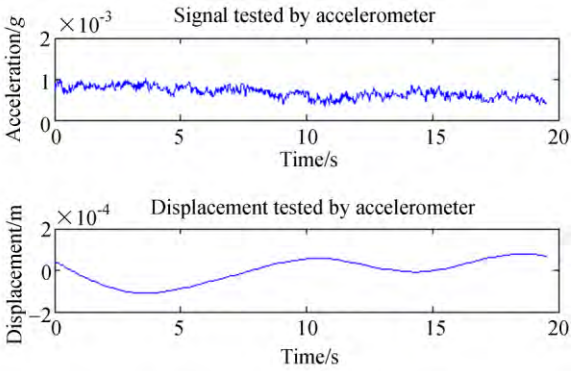

图 4　GSSMP 镜面加速度计的测量结果以及位移信号

Fig. 4　Result of jitter and displacement signal measured by GSSMP mirror accelerometer

在内部振动测试的过程中，令电机以最大加速度运动，以保证最大的能量输入。位于基板上的加速度计所采集到的 GSSMP 振动数据如图 5 所示。

GSSMP 外部加速度测量点有 3 个(点 A～点 C)，而内部用于分析内力的点有 4 个. 首先分别测量这 4 个点到某个加速度测量点的频率响应函

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

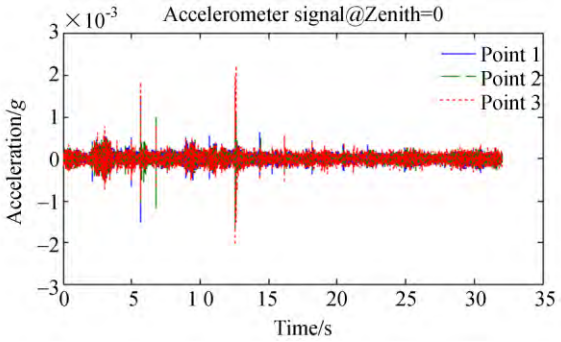

图 5 GSSMP 内部振动数据

Fig. 5 GSSMP internal vibration

数，之后将其平均得到点 A～点 C 的加速度对力的频响函数，如图 6 所示。

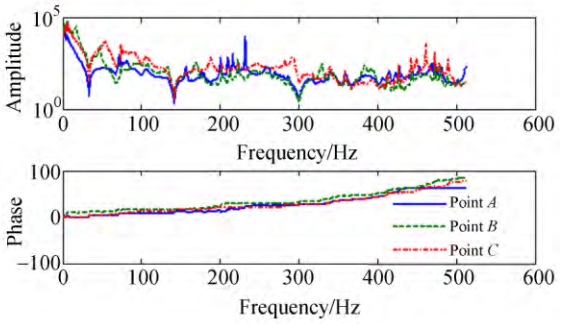

图 6 GSSMP 加速度对力的频响函数

Fig. 6 GSSMP FRE of acceleration to force

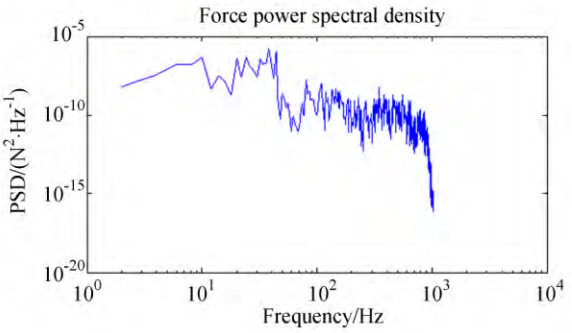

图 7 GSSMP 内部作用力的功率谱

Fig. 7 Internal vibration spectrum of GSSMP

GSSMP 内部作用力的功率谱如图 7 所示，可以看出由于带通滤波器的作用，中频分量的影响变大。通过多次实验获得的内部作用力数据如图 8 所示，其平均值为 0.003 3 N。

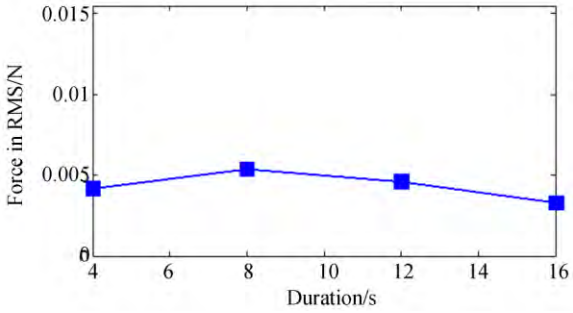

图 8 GSSMP 内部作用力数据

Fig. 8 Internal force data of GSSMP

4 结 论

本文以 GSSMP 为平台，验证了用于 GSSM Jitter 测量的多项技术，实现了 GSSMP 建造之初的计划。由于实验中采用加速度计作为测量元件，GSSM Jitter 检测需要选择积分方法。分析表明，利用信号的复数表达得出频域积分的误差累积性更小。GSSM 所面临的工况极为特殊且复杂，在此极端情况下依旧需要实现严格的技术指标。进一步发展了使用加速度计对系统进行抖动测量的方法，分析了检测误差，确定了标准流程。虽然其他望远镜工作环境没有 GSSM 苛刻，但是提高 Jitter 特性对于以长曝光为主的天文望远镜是大有裨益的。Jitter 的测量与其抑制过程是有机结合密不可分的，基于加速度信号的反馈，如何有效地抑制 Jitter 将是下一步工作的主要内容。

参考文献：

[1] AL-LAHAM R, MOUSSELLY M F, NAIM M. Methodology for predicting optical system performance when subjected to static stresses[J]. *Chinese Optics*, 2016,9(6): 678-686.

[2] BOORE D M. Analog-to-digital conversion as a source of drifts in displacements derived from digital recordings of ground acceleration[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93(5): 2017-2024.

[3] 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, 6(5): 643-651. WANG F G, YANG F, ZHAO H CH, *et al*.. Progress in TMT M3 system[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 643-651. (in Chinese)

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[4] 邓永停，李洪文，王建立，等. 结构滤波器在望远镜主轴控制系统中的应用[J]. 光学 精密工程，2017，25(4)：900-909.
DENG Y T，LI H W，WANG J L，*et al*.. Application of structural filter to principal axis system of telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*，2017，25(4)：900-909.(in Chinese)

[5] BOORE D M，BOMMER J J. Processing of strong-motion accelerograms：needs，options and consequences[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*，2005，25(2)：93-115.

[6] HENDRY M T，MARTIN C D，BARBOUR S L. Measurement of cyclic response of railway embankments and underlying soft peat foundations to heavy axle loads[J]. *Canadian Geotechnical Journal*，2013，50(5)：467-480.

[7] 董静，万秋华，于海，等. 小型绝对式光电编码器误码自动检测系统[J]. 中国光学，2016，9(6)：695-703.
DONG J，WAN Q H，YU H，*et al*.. Automatic detection system of fault code for small size absolute photoelectric encoder[J]. *Chinese Optics*，2016，9(6)：695-703.(in Chinese)

[8] 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.
SU Y Q，WANG F G，ZHANG J X，*et al*.. TMT M3 system seismic analysis based on time history method[J]. *Acta Optica Sinica*，2013，33(11)：1112002.(in Chinese)

[9] ANGELI G Z，ROBERTS S，VOGIATZIS K. Systems engineering for the preliminary design of the Thirty Meter Telescope[J]. *SPIE*，2008，7017：701-704.

[10] STEPP L. Thirty Meter Telescope project update[J]. *SPIE*，2012，8444：84441G.

[11] 赵天骄，乔彦峰，孙宁，等. 经纬仪主镜在支撑系统下的面形变化[J]. 中国光学，2017，10(4)：477-483.
ZHAO T J，QIAO Y F，SUN N，*et al*.. Surface deformation of theodolite primary mirror under the support system[J]. *Chinese Optics*，2017，10(4)：477-483.(in Chinese)

[12] 杨飞，安其昌，张静，等. 大口径光学系统的镜面视宁度检测[J]. 光学 精密工程，2017，25(10)：2572-2579.
YANG F，AN Q CH，ZHANG J，*et al*.. Seeing metrology of large aperture mirror of telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*，2017，25(10)：2572-2579.(in Chinese)

[13] 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)

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，研究方向为大口径光机系统的检测和装调。E-mail：anjj@mail.ustc.edu.cn

通讯作者：

赵宏超(1985－)，男，副研究员，主要从事望远镜轴系设计技术的研究。E-mail：zhaohcciomp@163.com

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net