

文章编号 1004-924X(2017)07-1790-06

三十米望远镜巨型可控科学反射镜系统 误差建模与分析

杨 飞^{1*}, 安其昌^{1,2}, 张 静³, 赵宏超¹, 郭 鹏^{1,2}, 姜海波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;

3. 长春理工大学, 吉林 长春 130022)

摘要:为了充分分析三十米望远镜(TMT)巨型可控科学反射镜(GSSM)系统平面镜面形精度与跟踪指向精度要求,需要对其建立完善的系统误差模型。本文采取自上而下的系统误差分配方式,基于 TMT 望远镜系统的标准化点源敏感性(PSSn)指标,利用其良好的合成与分解特性,对技术指标进行理解与分析,最终转换为平面镜面形精度与跟踪指向精度要求;另一方面对影响系统性能的扰动因素进行了分析,对于静态误差,利用有限元分析结果,比较了重力印透与大气扰动对 PSSn 的影响,对动态误差而言,使用系统传递函数进行系统性能评价。最后,提出了各个关键部件的指标要求,建立了 GSSM 的系统误差模型,结果满足 TMT 望远镜系统要求,可作为开展 GSSM 系统研制的依据。通过分析系统静态误差和动态误差与 PSSn 的关系发现:当 r_0 小于 0.1 m 时,视宁度对 PSSn 的影响较大;只有在大气视宁度较好的情况下,镜面印透才可以发挥作用。随着振动幅度的增加,系统传递函数退化,其 PSSn 会从 0.996 相应地减少到 0.992。通过本文研究可以得出,PSSn 作为下一代望远镜性能评价与误差分配指标有着特有的优势,其独特的合成特性与频域计算方法,可以对下一代望远镜的建设做出巨大贡献。

关键词:误差分析;系统工程;PSSn;GSSM;三十米望远镜

中图分类号:TH751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172507.1790

System error modeling and analysis for GSSM of TMT

YANG Fei^{1*}, AN Qi-chang^{1,2}, ZHANG Jing³, ZHAO Hong-chao¹, GUO Peng^{1,2}, JIANG Hai-bo¹

(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;

3 Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: yangflying@163.com

Abstract: To fully analyze precision requirements of surface figure precision and pointing accuracy of plane mirror for the Giant Steerable Scientific Mirror (GSSM) system of this Thirty-Meter Telescope (TMT), system error model of GSSM needed to be established. In this paper, up-to-down distribution mode of system error was adopted. Technological indexes were understood and analyzed and converted to precision requirements of surface figure precision and pointer accuracy of plane

收稿日期:2016-10-21;修订日期:2017-01-05.

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

mirror, according to standardized Point Source Sensitivity (PSSn) with its good features of synthesis and degradation. On the other hand, disturbance factors affecting system performance were analyzed, and influence of gravity print-through and atmosphere disturbance on PSSn was compared by using analysis result of finite elements for static error. System performance evaluation was conducted with systematic transfer function for dynamic error. Finally, Index requirements of all key components were proposed, and system error model of GSSM was established to satisfy system requirements of TMT as basis for GSSM system development. The experiment results indicate that seeing condition is good ($r_0 < 0.1$ m), influence of seeing on PSSn was great; mirror print-through could only exert its functions on condition of good atmosphere seeing. With increase of vibration amplitude, system transfer function degenerated, and its PSSn would also reduce correspondingly from 0.996 to 0.992. It can be found that PSSn has special advantages as the next index of performance evaluation and error distribution of telescope, and its unique synthesis features and frequency domain calculation method can contribute greatly for telescope construction of the next generation.

Key words: Error analysis; system project; PSSn; GSSM; 30-meter telescope

1 引言

三十米望远镜(Thirty Meter Telescope, TMT)是由美国发起,加拿大、日本、印度以及中国响应参加的国际合作项目。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主要负责 TMT 三镜系统的研制工作。TMT 三镜系统,即巨型可控科学反射镜(Giant Science Steering Mirror, GSSM)系统为目前世界上口径最大(3 594 mm×2 536 mm)的椭圆形平面镜系统。不仅具有一般平面镜所具有的光线折转功能还具有精密的指向功能,故对于其系统误差模型的建立与修正都十分必要^[1-4]。

自下而上的误差分配,是指在得到误差源的确切信息之后,基于某种误差评价准则,如波前均方根、斜率均方根、功率谱以及结构函数等,将误差源进行综合的一种评价方法。而自上而下的评价方法,在最初对于误差模型中各项误差都有全面而深刻的认识,在设计与分析的一开始,就在某种评价指标下,对于各项误差进行先验分配。这种分配方法主要有等精度分配与不等精度分配两种。等精度分配指的是各部分误差源所分配的误差是一样的。这对于小型光机系统,是可行的,因为系统本身的尺度不大,各个误差源的差异性的累积效应并不明显。但是对于大口径系统,由于各部分之间的误差传递关系较为复杂,得到相互之间的关系较为困难,等精度分配就会面临很多问题。对于不等精度分配,可以利用偏导数的方法获得各误差项

的权重,但是对于大多数情况,很难获得其具体表达式。对于巨型可控科学反射镜(GSSM),系统误差来源有光学加工、支撑、检测;轴承、电机、编码器、结构;温度、风载、振动;控制系统等方面。综上所述,可以首先进行自上而下的分析,在实际实施系统建设的时候,根据实际系统进行调整。将两者做合理的结合,可以更好地对系统误差进行分配。分配误差时,要考虑关键部件的精度,以有效降低成本。另一方面,自上而下的分解也是一个综合考虑误差的过程,如在镜面误差的分配过程中,充分考虑到加工检测现场的影响,就不需要对于面形的加工检测提出过于苛刻的要求。

一些常见的误差评价指标,如原来所常用的指标 RMS 不可以全面评价各个尺度起伏。 θ_{FWHM} 与 90% 能量集中半径表示系统成像的能量集中度,其数值越小就表示能量越集中,受误差影响越小。虽然 θ_{FWHM} 可以较好地定量评价系统误差,但其只利用了系统所成像的中心区域,并不能全面评价系统。点扩散函数以及斯特里尔比可以较为全面地评价全部的频域信息,但是每次合成都需要复杂的运算^[5]。

PSSn 是美国 TMT 团队所提出的误差评价准则,它是利用光学传递函数所有区域的积分平均,同时充分考虑了背景对于光学能量传递所带来的影响,故可以全面评价系统的成像质量,另一方面, PSSn 具有良好的线性合成特性,故可以简单地获得多种影响因素下的综合误差。本文将结合 PSSn 来分析 GSSM 的误差特性^[6-11]。

2 TMT 巨型可控科学反射镜系统功能及指标要求

2.1 系统功能组成

三十米望远镜(TMT)以及巨型可控科学反射镜(GSSM)如图 1 所示。由于有诸多的科学仪器位于两侧的奈氏平台之上,故需要三镜将主光学系统收集到的光线,随着望远镜的指向运动中继至各个科学终端。

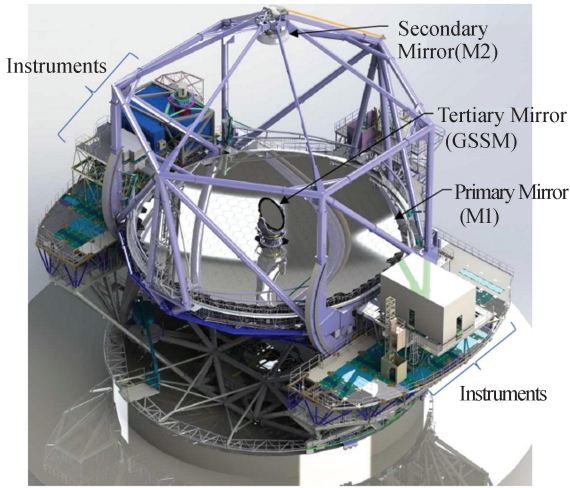


图 1 TMT 主系统以及三镜示意图

Fig.1 Configurations of TMT and GSSM

2.2 采用 PSSn 建立系统误差模型

PSSn 基本定义为:

$$PSSn = \frac{\int \left| PSF_{t+a+\epsilon}(\vec{\theta}) \right|^2}{\int \left| PSF_{t+a}(\vec{\theta}) \right|^2}. \quad (1)$$

可以理解为望远镜误差在背景下的平均。

利用三角函数来研究系统误差是国外大口径望远镜设计的常用方法。一方面,根据傅里叶级数理论,任意的曲线或者曲面都可以表示为一维或者二维的傅里叶级数的和,根据从特殊到一般的思路,从单一频率分量得到多频率分量对误差进行研究;另一方面,由于三角函数具有周期性以及求导的简便性,故对于三角函数形式误差的研究就显得十分必要。对于系统波前误差 $W(x, y)$,一般采用一定数量的基底多项式进行拟合。

$$\Phi(m, n) = \sum a_{uv} W_{uv}(m, n), \quad (2)$$

其中 a_{uv} 为基底拟合系数, $W_{uv}(m, n)$ 为离散指数基底。对于 $N \times N$ 的采样孔径, $W_{uv}(m, n)$ 的具体表达式为:

$$W_{uv}(m, n) = \frac{1}{N \times N} \exp \left[\frac{2\pi j}{N} (um + vn) \right]. \quad (3)$$

取其实部或者虚部,就可以模拟单一频率分量下的波前。当不同的误差项有频率上的耦合时,就会出现合成误差:

$$\omega_1(x) = A_1 \sin(2\pi f_{x1}x) + A_2 \sin(2\pi f_{x2}x) + A_3 \sin(2\pi f_{x3}x), \quad (4)$$

$$RMS_{w1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}$$

$$\omega_2(x) = A_1 \sin(2\pi f_{x1}x) + A_2 \sin(2\pi f_{x2}x) + A_3 \sin(2\pi f_{x2}x), \quad (5)$$

$$RMS_{w2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{A_1^2 + (A_2 + A_3)^2}$$

可见基于 RMS 的评价方法,其合成特性在复杂频率分量下,并不能很好地符合平方合成关系。而 PSSn 的最大优势在于其合成特性:

$$PSSn_m = \prod PSSn_i. \quad (6)$$

为了简化 PSSn 的表达式,在此定义基于背景的平均函数:

$$\langle \cdot \rangle = \frac{\int (\cdot) \left| PSF_{t+a}(\vec{\theta}) \right|^2}{\int \left| PSF_{t+a}(\vec{\theta}) \right|^2}. \quad (7)$$

下面来研究 PSSn 的合成特征,根据泰勒展开的原理知,由于误差量增加, PSSn 将会下降,故将误差近似于 2 阶多项式:

$$\epsilon_i(r) \approx a_i r^2$$

$$\delta \approx a_1 a_2 (\langle r^4 \rangle - \langle r^2 \rangle^2)$$

$$PSSn_i = 1 - \lceil \epsilon_i(r) \rceil \approx a_i \langle r^2 \rangle. \quad (8)$$

$$\delta \approx \frac{(\langle r^4 \rangle - \langle r^2 \rangle^2)}{\langle r^2 \rangle^2} (1 - PSSn_1) (1 - PSSn_2)$$

$$= 1.211 (1 - PSSn_1) (1 - PSSn_2)$$

由于 PSSn 的量级相对较小,随着合成项数的增加,误差还会相应减小,这也是 PSSn 作为评价指标的优点。

3 不同误差与 PSSn 的关系

需要考虑的系统误差主要有两部分,一部分是由于重力等因素所引起的静态误差,另一部分是由于振动引起的动态误差。

3.1 系统静态误差与 PSSn

在不同的天顶角下,系统静态误差主要来自于重力印透的作用以及不同的天顶角大气相干长度的变化。

在设计 GSSM 之前,项目研究团队先行建造了一个 1/4 比例的原理验证实验系统(GSSMP)来验证原理,并建立了详细的有限元模型,如图 2(a)(彩图见期刊电子版)所示,不同天顶角下的 GSSMP 镜面面形如图 2(b)所示,其底支撑印透与侧支撑所引起的弯曲均可分辨。

通过观察该面形,可以较好地分辨出由于十八点 Whiffletree 底支撑所带来的印透效应。当侧支撑起作用时,由于 GSSMP 特殊的径厚比(72 : 1),镜面的主要误差形式为初级像散。其产生的主要原因为底支撑与理想支撑条件之间的差异,或多或少地会影响侧支撑,导致像散的出现。通过直接对比发现,底支撑与侧支撑的 RMS 分别为 35 nm 与 28 nm。

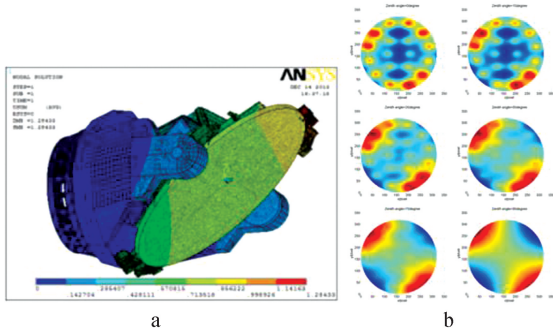


图 2 GSSMP 有限元模型及面形

Fig. 2 FEA model and SFE of GSSMP

在大气主导的情况下,假设系统的背景函数为:

$$OTF_{a+i} \approx OTF_a = e^{-3.44 \left(\frac{\lambda f}{r_0}\right)^{5/3}} \quad (9)$$

利用式(7)可以得到,PSSn 的变化如图 3 所示。

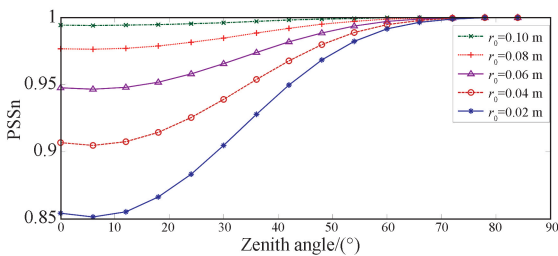


图 3 不同天顶角下的 PSSn

Fig. 3 PSSn at different zenith angles

可见,当 r_0 小于 0.1 m 时,视宁度对 PSSn 的影响较大。只有在大气视宁度较好的情况下,镜面印透才可以发挥作用。

3.2 系统动态误差与 PSSn

由于 TMT 三镜位置的特殊性,其位置控制组件(PA)不能对主光路产生额外的遮拦,不可超越包络三镜的圆柱体空间,故整体结构为锥形结构。在外界的激励下,较一般的地平式望远镜更容易发生振动。

一般来说,理想平面镜的光学传递为点物成点像,而在振动的影响下,点像的位置会有微小的移动,这种移动在一个很短的时间里的平均即为实际的光学传递函数。

根据之前的研究,理想系统在振动影响下的传递函数为零阶贝塞尔函数。

$$OTF = J_0(D2\pi f), \quad (10)$$

其中 D 为抖动的幅值; f 为外界振动的频率,不同抖动幅度下的光学传递函数如图 4 所示。

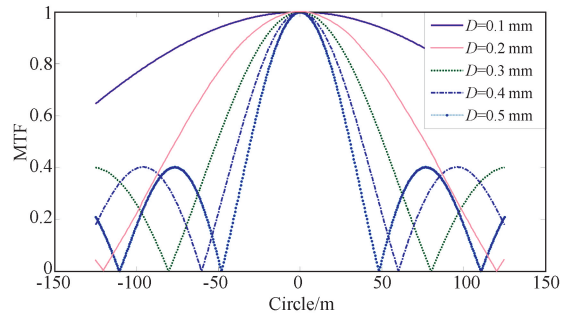


图 4 不同抖动幅度下的光学传递函数

Fig. 4 MTF at different vibration magnitudes

为了定性研究振动影响下的 PSSn 的变化情况,在大气为主导的背景函数下,可得 PSSn:

$$\begin{aligned} PSSn &= \left\langle \left| OTF_e(\lambda f) \right|^2 \right\rangle \\ &= \frac{\int \left| J_0(D2\pi f) \right|^2 \left| OTF_a \right|^2}{\int \left| OTF_a \right|^2} \quad (11) \\ &= \frac{\int \left| J_0(D2\pi f) \right|^2 \left| e^{-3.44 \left(\frac{\lambda f}{r_0}\right)^{5/3}} \right|^2}{\int \left| e^{-3.44 \left(\frac{\lambda f}{r_0}\right)^{5/3}} \right|^2} \end{aligned}$$

当 $r_0 = 0.2$ m 时,抖动的幅值与 PSSn 的关系如图 5 所示,在 $D = 0.001$ mm 时,不同的大气相干长度与 PSSn 的关系如图 6 所示。由图可以

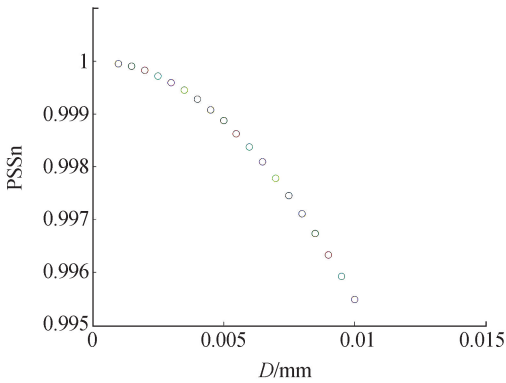
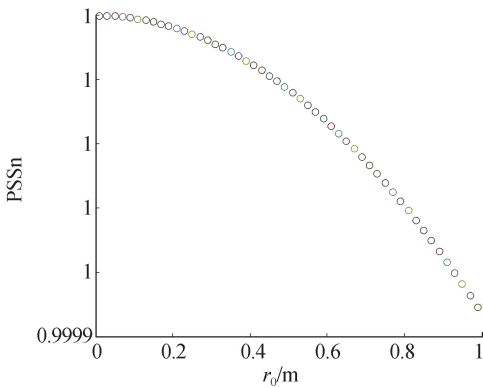


图 5 抖动幅值与 PSSn 的关系

Fig. 5 Relationship between vibration magnitude and PSSn

图 6 r_0 与 PSSn 的关系Fig. 6 Relationship between r_0 and PSSn

看出,只有在视宁度较好的情况下,抖动所引起的波前质量退化才能显现出来,由图 7 可以看出,随着振动幅度的增加,系统会逐渐出现模糊,其 PSSn 也会相应减少,从 0.996 到 0.992。

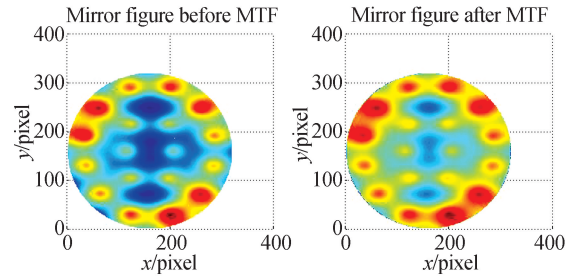


图 7 振动影响下的面形

Fig. 7 Surface figure influenced by vibration

对于大口径望远镜,由于其观测站址与制造装调检测站址通常都不相同,因此,在制造检测地点检测系统动力学传递函数,结合表征当地特征的振动来分析光学传递函数的变化,将会有效减少检测成本,同时也有利于控制系统对于将来可能遇到的问题进行预案。

4 结 论

综合来看,自上而下的系统误差分配方式比较适合作为系统工程师在项目初期对于系统误差的大体判断与评估,而在具体的工程实践中,考虑其具有合成方法简单,与光学传递函数联系紧密的特点,PSSn 可以作为下一代大口径望远镜的评价准则。与其他的光学评价指标相比,不论是对于经过自适应光学矫正的小像差系统,还是大气湍流较为强烈,视宁度为主导的系统,都可以很好的进行评价。PSSn 可以将大气与背景的因素考虑进去,在视宁度较差的情况下,大幅降低对关键部件的精度要求,以及支撑精度与刚度要求。

参考文献:

- [1] 杨飞, 刘国军, 赵宏超, 等. 30 m 望远镜三镜系统刚度分配与分析[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(1): 152-159.
YANG F, LIU G J, ZHAO H CH, *et al.*. Stiffness allocation and analysis of TMT M3S [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1): 152-159. (in Chinese)
- [2] 王富国, 安其昌. 30m 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.

WANG F G, AN Q CH. Evaluation of mirror surface figures for TMT based on Slope RMS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1171-1175. (in Chinese)

- [3] 王孝坤. 大口径离轴凸非球面系统拼接检验技术[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 130-136.
WANG X K. Measurement of large off-axis convex asphere by systemic stitching testing method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 9(1): 130-136. (in Chinese)
- [4] MACMARTIN, D G, THOMPSON P, COLAVI-

- TA M M, *et al.*. Dynamic analysis of the active-controlled segmented mirror of the Thirty Meter Telescope[J]. *IEEE Trans. Control Sys. Tech.*, 2013,22:58-68.
- [5] 陈力斯,胡中文. PSSN 在 TMT 宽视场光谱仪中的应用研究[J]. *天文学报*,2016, 57(5):585-596.
CHEN L S, HU ZH W. The research on the application of normalized point source sensitivity in wide field optical spectrometer of the thirty Meter Telescope [J]. *ACTA ASTRONOMICA SINICA*, 2016, 57(5):585-596. (in Chinese)
- [6] PAZDER J S, VOGIATZIS K, ANGELI G Z. Dome and mirror seeing estimates for the Thirty Meter Telescope[J]. *Proc. SPIE 7017, Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy III*, 70170R (July 09, 2008).
- [7] RUDOLER S, HADAR O, FISHER M, *et al.*. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations [J]. *Opt. Eng.*, 1991, 30(5):577-589.
- [8] HADAR O, DROR I, KOPEIKA N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part IV: real-time numerical calculation of optical transfer functions and experimental verification[J]. *Opt. Eng.* 1994,33(2): 566-578.
- [9] 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)
- [10] KOPEIKA N S, WULICH D. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations [J]. *Journal of Modern Optics*, 2008, 55 (3): 401-407.
- [11] 杨飞,安其昌. 基于标准化点源敏感性的镜面视宁度评价[J]. *光学精密工程*,2016,24(5):979-985.
YANG F, AN Q CH. Evaluation of mirror seeing based on PSSn [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5):979-985. (in Chinese)

作者简介:



杨 飞(1982—),男,湖北天门人,硕士,副研究员,2003年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,2017年于长春理工大学获得博士学位,主要从事大口径光电望远镜光机系统方面的研究。E-mail: yangflying@163.com