

文章编号 1004-924X(2014)05-1171-05

30 m 望远镜三镜镜面面形误差的斜率均方根评价

王富国^{*}, 安其昌

(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)

摘要: 由于传统的均方根方法在评价大口径反射镜时难以精确表达光学表面的中空间频率误差, 本文提出了基于斜率均方根(SlopeRms)的误差评价方法来评价光学表面面形。该方法先以 Zernike 多项式拟合光学表面面形, 在此基础上求解不同空间间隔上的斜率均方根。这种评价方法可以很好地区分小尺寸磨削工具造成的误差和大口径反射镜在多点支撑下造成的面形误差。文中建立了 SlopeRms 的数学模型, 推导了 SlopeRms 的计算方法, 并以此方法为基础对 30 m 望远镜(TMT)三镜面形进行了评价。结果显示, 采用斜率均方根的评价方法得到的光学表面面形值达到 $0.9 \mu\text{rad}$, 优于传统的 RMS 评价方法(RMS=115 nm), 满足设计要求。结果显示, 基于斜率均方根的误差评价方法能更加全面和客观地评价大口径反射镜面形, 具有实际意义。

关键词: 光学检测; 30 m 望远镜; 表面面形; 面形误差; 斜率均方根; 均方根

中图分类号: TH743 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20142205. 1171

Evaluation of mirror surface figures for TMT based on SlopeRms

WANG Fu-guo^{*}, AN Qi-chang

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

^{*} Corresponding author, E-mail: wfg109@163.com

Abstract: As the traditional method based on Root Mean Square(RMS) is hard to accurately express middle spatial frequency errors of an optical surface in evaluation of a large aperture telescope, this paper proposes a new method based on SlopeRms to evaluate the optical surface. The method solves the SlopeRms in different space intervals after fitting the optical surface figure by Zernike polynomial. It can better quantify the small scale irregularities and the surface figure error from a smaller size grinding tool or from an aperture mirror surface figure error in multi-point support. The mathematical model of SlopeRms is established, how to calculate the SlopeRms is deduced and then the surface figure for TMT(Thirty Meter Telescope) tertiary mirror is evaluated by the proposed method. The obtained results show that the mirror surface figure error is $0.9 \mu\text{rad}$, which is better than that of traditional method (RMS=115 nm) and meets the design requirement. It means that the method based on SlopeRms can objectively evaluate the mirror surface figure error for a large aperture telescope.

Key words: optical test; Thirty Meter Telescope(TMT); surface figure; figure error; SlopeRms; Root Mean Square(RMS)

收稿日期: 2013-01-30; 修订日期: 2013-03-12.

基金项目: 中科院三期创新工程资助项目

1 引言

随着大口径光学技术的发展,大口径光学镜面的加工与制造技术有了长足的进步,光学加工的能力和复杂性都明显增长。测量技术的提高,图像采集和处理技术的进步,使得复杂光学组件的加工得以实现。此外,主动光学技术的发展使大口径薄镜面反射镜在多点支撑下的面形得到调整和校正^[1]。

针对加工和支撑带来的镜面面形变化的评价方法有多种^[2-3],比较常用的有峰谷值(PV)和均方根(RMS)误差评价法。这种评价方法主要用 RMS 来衡量镜面面形是否达到设计要求,比较适用于评价小口径的光学元件。磨具和光学元件的尺寸相近,容易得到最简单的光学特征,如球面和平面都可以用 PV 和 RMS 来描述。因为它们的制作过程决定误差均匀地分布在整个元件上,并且描述误差的 Zernike 多项式与三阶像差一致。另外,小口径光学元件一般采用周边支撑、中心支撑或者三点支撑等方式,不会因为支撑产生中高频误差,用 RMS 即可以客观地反映镜面的面形。但是对于大口径反射镜,这种评价方法则具有一定的局限性。首先,大口径反射镜在制造时多使用小尺寸磨削工具,极易产生子孔径尺度或中空间频率上的不规则性,尤其是对于非球面和自由曲面加工,局部磨削的光滑性依赖于工具加工分布的均匀性,以及保压时间的控制程度。其次,大口径反射镜一般采用多点支撑,支撑点数越多,越容易产生中空间频率误差,而中空间频率会产生不规则条纹,它们比光学元件的口径小几倍,但是又大于精密的表面结构,易形成镜面的表面粗糙度^[4-5]。针对上述问题,本文提出了一种斜率均方根(SlopeRms)光学表面评价方法。该方法可以准确评价多点支撑下的大口径反射镜的面形,满足加工需求。

2 SlopeRMS 的面形评价方法

2.1 SlopeRMS 的提出

图 1 反映了两种不同的光学表面面形,其中镜面 A 的光学表面主要具有低频误差,镜面 B 的光学表面主要具有中高频误差。如果采用传统

的 RMS 光学表面面形评价方法,则镜面 A 的 RMS 值比较大,而镜面 B 的 RMS 值比较小,由此会判定镜面 A 不合格,镜面 B 合格。而实际上,镜面 A 主要是低频误差,这种低频误差,很容易通过自适应光学的方法得到校正^[6];而对于镜面 B,由于其主要存在中高频误差,自适应光学很难进行校正,因此 RMS 评价方法在评价大口径镜面时具有局限性。如果采用 SlopeRms 的计算方法,可以得到镜面 A 的 SlopeRms 较小,而镜面 B 的 SlopeRms 较大,由此可以判定镜面 B 不合格。之所以出现两种不同的评价结果是因为评价方法不同,而不同的评价方法下对加工和支撑的要求也不同。

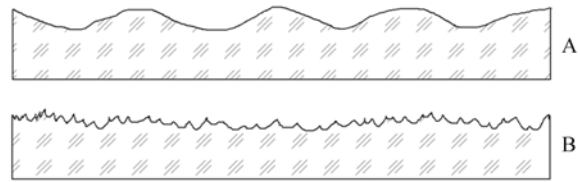


图 1 光学表面面形示意图

Fig. 1 Sketch map of mirror surface figures

不难看出,定量地确定中空间频率的影响对光学产品具有重要意义。因此文本采用 SlopeRms 的评价方法定量地描述了残余表面高度误差与空间间隔的关系,建立了 SlopeRms 的数学模型,推导了 SlopeRms 的计算方法,并以 30 m 望远镜(Thirty Meter Telescope, TMT)三镜为例,证明了 SlopeRms 在工程上能够全面地评价光学表面面形。

2.2 SlopeRms 的数学模型

对于波相差表面距离为 r 的两点连线的斜率求期望的算术平方根,得到割线 RMS:

$$GS_{RMS}(r) = \text{sqrt} \cdot \left[\frac{(\phi^r(x+r) - \phi^r(x))^2 + (\phi^\theta(x+r) - \phi^\theta(x))^2}{2r^2} \right], \quad (1)$$

其中: $\phi^r(r)$ 与 $\phi^\theta(r)$ 表示极坐标下两个正交方向的波相差。

设 $\phi^r(r)$ 与 $\phi^\theta(r)$ 的二阶矩为 $D^r(r)$, $D^\theta(r)$,令:

$$D(r) = \frac{D^\theta(r) + D^r(r)}{2},$$

得到:

$$GS_{RMS}(r) = \frac{\sqrt{D(r)}}{r}.$$

利用割线 RMS 求解 SlopeRms,当 $r \rightarrow 0$ 时:

$$S_{\text{RMS}} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sqrt{D(r)}}{r} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sqrt{D(r)} - 0}{r - 0} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sqrt{D(r)} - \sqrt{D(0)}}{r - 0} = (\sqrt{D(r)})'. \quad (2)$$

一般采用 Zernike 多项式拟合波相差。假设由两项标准 Zernike 多项式的线性组合来得到波

$$\begin{aligned} D(r) &= \langle (c_1(\phi_1(x+r) + \phi_2(x+r)) - c_2(\phi_1(x) + \phi_2(x)))^2 \rangle_{x,n} = \\ &\quad \langle ((c_1\phi_1(x+r) - c_2\phi_1(x)) + (c_1\phi_2(x+r) - c_2\phi_2(x)))^2 \rangle_{x,n} = \\ &\quad \langle (c_1\phi_1(x+r) - c_2\phi_1(x))^2 \rangle_{x,n} + \langle (c_1\phi_2(x+r) - c_2\phi_2(x))^2 \rangle_{x,n} + \\ &\quad 2\langle (c_1\phi_1(x+r) - c_2\phi_1(x))(c_1\phi_2(x+r) - c_2\phi_2(x)) \rangle_{x,n}, \quad (4) \\ &\langle (c_1(\phi_1(x+r) - c_2\phi_1(x))(c_1\phi_2(x+r) - c_2\phi_2(x)) \rangle_{x,n} = \\ &\quad \langle (c_1^2\phi_1(x+r)\phi_2(x+r)) \rangle_{x,n} - \langle (c_1c_2\phi_1(x)\phi_2(x+r)) \rangle_{x,n} - \\ &\quad \langle (c_1c_2\phi_1(x+r)\phi_2(x)) \rangle_{x,n} + \langle (c_2^2\phi_1(x)\phi_2(x)) \rangle_{x,n}. \quad (5) \end{aligned}$$

由 Zernike 多项式的正交性可知,式(5)两端都等于 0,即有:

$$D(r) = c_1^2 D_{\phi_1} + c_2^2 D_{\phi_2}.$$

将以上结论推广至 N 阶情况,得到:

$$D(r) = \sum_i^N c_i^2 D_{\phi_i}. \quad (6)$$

将式(6)代入式(2),可得:

$$S_{\text{RMS}} = \left[\sqrt{\sum_i^N c_i^2 D_{\phi_i}} \right]'. \quad (7)$$

3 用 SlopeRms 评价 TMT 三镜面形

TMT 是地基巨型光学-红外天文观测设备^[5],该设备的研制由美国和加拿大发起,其主镜口径为 30 m,由 492 块子镜拼接而成,长春光机所负责三镜系统的研制。TMT 的三镜是一个长、短轴分别为 3 594 mm 和 2 536 mm 的椭圆形平面镜,厚度为 100 mm,材料为零膨胀的微晶玻璃,质量达到 1.8 t,底支撑采用 18 点被动支撑。传统的 RMS 评价方法不能全面客观地反映 TMT 三镜的镜面面形,而 TMT 具有强大的面形自校正能力,一方面可以利用变形镜对三镜的面形进行校正;另一方面可以利用拼接主镜(M_1)进行校正,它具有 10 000 个自由度的面形校正能力,这些校正能力能够校正 $M_1 + M_2 + M_3$ 上任何可重复的变化。单星投影的阴影大小为 1.33 m,因此可以把三镜离散成直径为 1.33 m 的子孔径衡量其面形误差。对于 TMT 的三镜来说,只需要 9 个

相差,有:

$$\phi = c_i\phi_i + c_j\phi_j, \quad (3)$$

其中: ϕ_i, ϕ_j 分别为 Zernike 多项式的基底函数, C_i, C_j 分别为 ϕ_i, ϕ_j 的系数。

将两个正交方向求平均的过程也归入求期望的步骤,那么波相差的二阶矩为:

大小为 1.33 m 的子孔径即可覆盖整个镜面。

本文利用有限元仿真软件 ANSYS 得到的仿真数据,结合斜率均方根(SlopeRms)分析 TMT 三镜在底支撑下的面形。其中镜面采用 Solid 45 实体单元、Whiffletree 结构采用 Beam188 梁单元、二者使用 Cerig 连接。

TMT 三镜的底支撑采用 18 点 Whiffletree 支撑形式^[8-10],在支撑结构的作用下,如果采用传统的 Rms 评价方法,求得的三镜镜面 RMS=115 nm,三镜镜面的变形云图如图 2 所示。从图 2 可以看出,面形结果很不理想,需要增加支撑点数或者改变支撑方案,这意味着增加了风险和成本。由于 TMT 可以通过拼接主镜和变形镜校正低阶像差,因此需要进一步处理计算得到的面形误差,去除低阶像差,并且取一定大小区域的数据分别处理,然后对所有区域的数据求和。根据望远镜的校正能力可以计算得到每个区域的面形大小。按照这种方法将图 2 所示的镜面变形归一化到直径为 2 568 mm 的圆上,并进行 Zernike 多项式拟合^[5],归一化后的变形云图如图 3 所示。由于 TMT 具有强大的面形校正能力,Zernike 多项式的前 6 项均可以得到校正,即可用前 6 阶 Zernike 多项式表示面形加工或者支撑产生的起伏,并通过能动光学进行校正,不需要进一步加工镜面,因此在评价面形时可以去掉 $Z_1 \sim Z_6$ 项。根据 TMT 拼接主镜的个数、变形镜的单元数、次镜的大小和三镜的大小,计算得出 9 个子孔径为 1.33 m 的圆即可覆盖整个三镜镜面。分别计算这 9 个子孔径圆的 SlopeRms,然

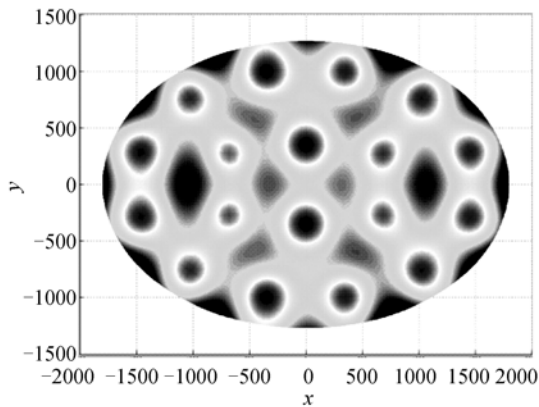


图 2 三镜在底支撑作用下的变形图

Fig. 2 Deformation of tertiary mirror surface with axial support

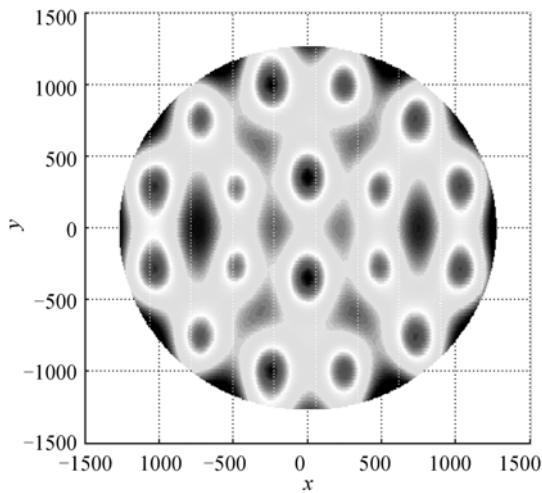


图 3 三镜归一化后的变形图

Fig. 3 Tertiary mirror deformation after normalization

后相加求得总的 $\text{SlopeRms} = 0.9 \mu\text{rad}$ 。根据 TMT 光学设计的误差分配要求,三镜面形的 $\text{RMS} < 1.0 \mu\text{rad}$ ^[1],因此按照 SlopeRMS 评价方法,三镜在 18 点 Whiffletree 支撑结构的作用下的面形满足光学设计要求,并不需要进行再次精磨或者增加支撑点数。

本文采用了对三镜镜面面形分区域进行评价

参考文献:

- [1] 张丽敏,张斌,杨飞.主动光学系统力促动器得设计和测试[J].光学精密工程,2012,20(1):38-44.
ZHANG L M, ZHANG B, YANG F. Design and test

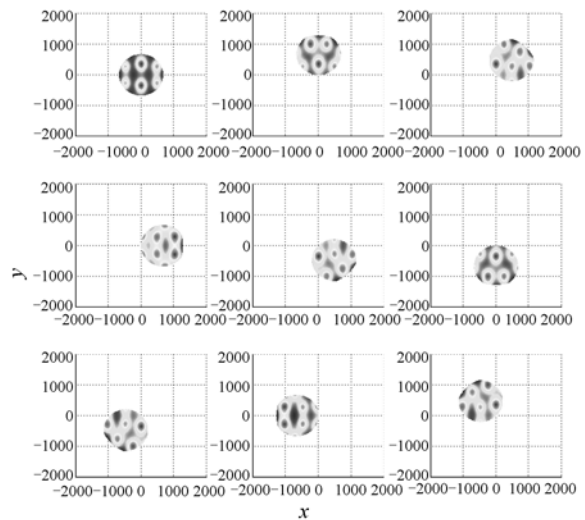


图 4 9 个子孔径

Fig. 4 Nine sub-apertures

的方法,从 TMT 的主镜可以校正三镜面形的特点出发,恰好可以完成对每个子孔径区域的校正,这和 TMT 强大的面形校正能力相适应。同时,由于去掉了 Zernike 多项式的前 6 项,因此降低了对三镜面形的要求。这种评价方法既完全反映了 TMT 的面形特点,又降低了加工的要求和成本。但对于其他的反射镜镜面,根据实际情况一般采用全口径的 SlopeRms 评价方法。

4 结 论

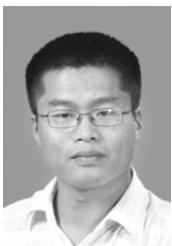
本文针对传统的 RMS 方法在评价大口径反射镜时的缺点,提出了 SlopeRms 面形评价方法。首先建立了 SlopeRms 的数学模型,推导了 SlopeRms 的计算方法,并以此方法为基础评价 TMT 三镜面形。相对于 RMS 评价方法,该方法结合 TMT 对三镜的要求,在去除 Zernike 多项式前 6 项的基础上,仍能满足需要,从而降低了三镜的面形要求和成本。这种评价方法可以在大口径反射镜的应用基础上进行推广,具有重要的实践意义。

of force actuator in active optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1):38-44. (in Chinese)

- [2] 毕勇,翟嘉,吴金虎,等.一种光学仪器镜面面形的处理方法[J].光学技术,2009,35(1).10-17.
BI Y, ZHAI J, WU J H, *et al.* One method for mirror

- surface figure treatment in optical instrument[J]. *Optical Technique*, 2009, 35(1):10-17. (in Chinese)
- [3] 王栋, 杨洪波, 陈长征. 光学表面面形的计算机仿真[J]. 计算机仿真, 2007, 24(2):298-301.
WANG D, YANG H B, CHEN CH ZH. Computer simulation of the optical surface[J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(2):298-301. (in Chinese)
- [4] WOLFGANG D. RMS slope of exponentially correlated surface roughness for radar applications [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 3(38):1451-1454.
- [5] ZHELEM R. Specification of optical surface accuracy using the structure function [J]. *SPIE*, 2011, 8083:808310-1-10.
- [6] 张伟, 刘剑峰, 龙夫年, 等. 基于 Zernike 多项式进行波面拟合研究[J]. 光学技术, 2005, 31(5):675-678.
ZHANG W, LIU J F, LONG F N, *et al.* Study on wavefront fitting using Zernike polynomials[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(5):675-678. (in Chinese)
- [7] 林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 137 单元变形镜的性能测试即校正能力实验[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2):267-273.
LIN X D, LIU X Y, WANG J L, *et al.* Performant of correction capability of 137-element deformable mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):267-273. (in Chinese)
- [8] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4):327-336.
ZHANG J X. Overview of structure of technologies of large aperture ground based telescope [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4):327-336. (in Chinese)
- [9] 倪明阳, 巩岩. 光刻投影物镜光学元件运动学支撑结构的设计与分析[J]. 中国光学, 2012, 5(5):476-483.
NI M Y, GONG Y. Design and analysis of kinematic lens positioning structure in lithographic projection objective[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(5):476-483. (in Chinese)
- [10] 邵亮, 杨飞, 王富国, 等. 1.2 m 轻量化 SiC 主镜支撑系统优化设计[J]. 中国光学, 2012, 5(3):229-234.
SHAO L, YANG F, WANG F G, *et al.* Design and optimization of supporting system for 1.2 m light weight SiC primary mirror [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3):229-234. (in Chinese)
- [11] Tertiary Mirror Surface Figure Specification [Z]. *TMT. Opt. Spe.* 12. 001. DRF02, 2012.

作者简介:



王富国(1979—),男,山东单县人,博士,副研究员,主要研究方向为大型望远镜光机系统的设计与仿真。E-mail:wfg109@163.com



安其昌(1988—),男,山西太原人,硕士研究生,2011年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事空间机构学的研究。E-mail:anj@mail.ustc.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)