

摆臂式轮廓测量不同母线条数的敏感性分析

熊 玲^{1,2}, 罗 霄¹, 戚二辉¹, 张 峰¹, 薛栋林¹, 张学军¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了确定摆臂式轮廓检测大口径离轴非球面采用不同扫描线数时系统检测误差的敏感性, 文中提出采用蒙特卡洛方法, 建立了仿真分析的模型。对母线条数分别为 8~120 条的模式进行模拟检测, 对系统噪声引入的面形误差进行 Zernike 多项式拟合, 统计分析得母线条数为 8~39 条时, 系统噪声引入的低阶项检测误差随母线条数的增加而迅速降低; 母线条数为 40~70 条时, 引入低阶项检测误差降低缓慢; 71~120 条时, 引入的低阶项检测误差几乎保持不变。结合实例, 对一口径 1 500 mm 的离轴非球面反射镜进行实验, 分别采用 36 条、72 条和 96 条母线进行面形检测。36 条母线检测误差相对较大, 检测结果为 7.73 μm PV 和 0.68 μm RMS; 72 条母线和 96 条母线检测结果十分接近, 分别为 5.755 μm PV, 0.568 μm RMS 和 5.612 μm PV, 0.569 μm RMS。验证了仿真分析结果的准确性, 为摆臂式轮廓检测大口径离轴非球面中母线条数的优化选择提供了理论指导。

关键词: 大口径; 离轴非球面; 摆臂式轮廓检测; 仿真分析

中图分类号: O439; TH72 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0217003

Sensitivity analysis of different scan arcs for swing arm profilometer test

Xiong Ling^{1,2}, Luo Xiao¹, Qi Erhui¹, Zhang Feng¹, Xue Donglin¹, Zhang Xuejun¹

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, 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: To analyze test errors induced from system noise of swing arm profilometer (SAP) testing large aperture off-axis aspherics with different scan arcs, based on the Monte Carlo method, the simulation test model was built with different scan patterns from 8 arcs to 120 arcs. To evaluate the test sensitivity, test errors induced from system noise was fitted by Zernike polynomial. The low order test errors were reduced rapidly as scan arcs increased from 8 arcs to 39 arcs, and reduced slowly from 40 arcs to 70 arcs, and kept almost the same from 71 arcs to 120 arcs. As an experiment, a Φ 1 500 mm off-axis aspheric mirror was tested by SAP scanning in 36 arcs, 72 arcs and 96 arcs respectively. The surface test error of 36 arcs are much larger with result of 7.73 μm in Peak-Valley (PV) and 0.68 μm in Root-Mean-Square (RMS). The surface test error of 72 arcs and 96 arcs are much close with result of 5.755 μm PV,

收稿日期: 2017-02-06; 修订日期: 2017-03-15

基金项目: 国家自然科学基金重点国际合作研究项目(61210015); 国家自然科学基金青年科学基金(61605202)

作者简介: 熊玲(1991-), 女, 博士生, 主要从事大口径光学检测方面的研究。Email: xyznpp@126.com

导师简介: 张峰(1969-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光学加工与检测方面的研究。Email: zhangfjyz@sina.cn

0.568 μm RMS and 5.612 μm PV, 0.569 μm RMS respectively. So the simulation results were verified and provided a guide for the scan line selection for SAP testing large off-axis aspherics.

Key words: large aperture; off-axis aspherics; SAP test; simulation analysis

0 引言

摆臂式轮廓检测最早由 David S. Anderson 等人于 20 世纪 90 年代提出^[1-2],用于大口径凸非球面的轮廓检测,后来被逐渐发展成为包括凹非球面在内的大口径非球面轮廓检测的重要手段。

随着科技的发展,在摆臂式轮廓检测中逐渐采用高精度非接触式测头替代最初的接触式测头,从而实现连续快速扫描多条轮廓线,同时提高了检测效率和面形信息采集密度。美国亚利桑那大学报道了采用 48 条母线对口径 1 400 mm 的反射镜进行轮廓检测,用来验证干涉检测结果的高阶项误差^[3-4]。英国 Huddersfield 大学报道的摆臂式轮廓检测技术采用的是 8 条同心圆环的扫描轮廓线方式^[5]。中国科学院光电技术研究所报道了采用 18 条扫描轮廓线对口径 600 mm 的平面镜进行面形检测^[6-8]。国防科技大学也报道了相关的轮廓线测量口径 200 mm 的凹抛物面的原理验证实验^[9]。

通过对各采集的轮廓线在交点处的测量值应一致来反解出系统误差,最终提取面形误差结果。对于大口径反射镜的轮廓检测,母线条数太少,则母线交点个数少,影响系统误差分离,且信息采样少,面形信息不全;母线条数过多,引入的噪声也增多,系统误差分离达到瓶颈,且测量时间过长,检测效率下降。

为了平衡系统误差和检测效率,尽可能多地采集面形信息尤其是反射镜边缘信息,得到母线条数的最优化选择,文中根据蒙特卡洛方法^[10-11]建立了系统检测敏感性分析的仿真模型,对不同母线条数引入的系统误差进行了分析,并在 1 500 mm 口径的离轴非球面上进行了实验验证。

1 仿真分析

1.1 检测原理

摆臂式轮廓检测(Swing Arm Profilometer, SAP)凹非球面的原理示意图如图 1 所示^[12],采用一个倾斜放置的转台,转台旋转轴经过非球面最接近球心;

转台上固定一末端安装有测头的长杆,当测头绕转台旋转时,测量轨迹位于非球面最接近球面上,因此测头读数即为实际非球面偏离量。通过待测镜绕光轴方向旋转不同角度,可得到待测面上多条轮廓线分布,如图 2 所示;测头读数与理论非球面偏离量进行对比,获得面形误差分布。

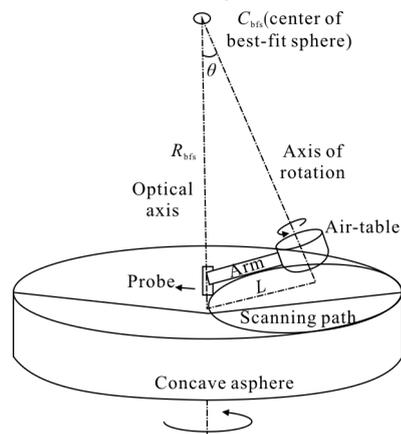


图 1 摆臂式轮廓检测原理示意图

Fig.1 Principle schematic of swing arm profilometer test

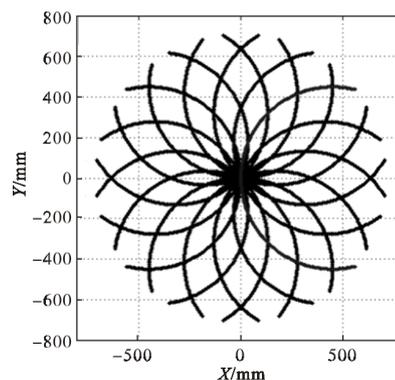


图 2 16 条轮廓线测量点分布图

Fig.2 Measuring points distribution of 16 scan arcs

1.2 模型建立

仿真分析的计算流程图如图 3 所示,首先选择一定数量的母线条数作为检测基底,单次仿真计算过程为:在每条母线上加入一定的随机噪声,包括气浮转台误差 0.2 μm ,环境误差 0.1 μm ,测头误差 0.1 μm ;然后进行模拟检测数据处理,从得到的面形中提取 5~43 项 Zernike 项拟合系数。重复进行 1 000 次仿真计算,由于每次母线中加入的是 matlab 程序随机生

成的随机误差，因此 1 000 次的仿真结果符合高斯分布。根据蒙特卡洛方法可知，通过对大量仿真计算结果进行统计分析，可以获得选定母线条数的检测模式下，系统对各 Zernike 项误差的检测敏感性。

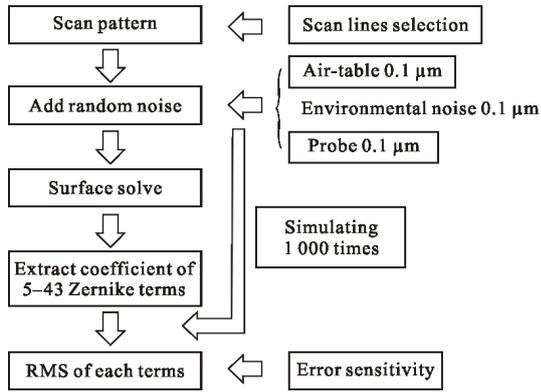
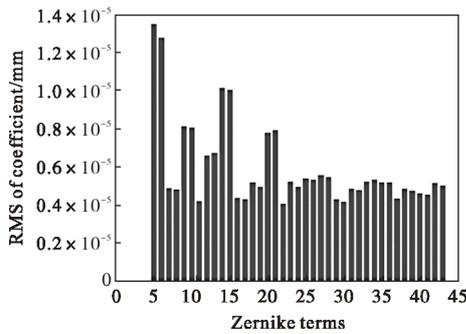


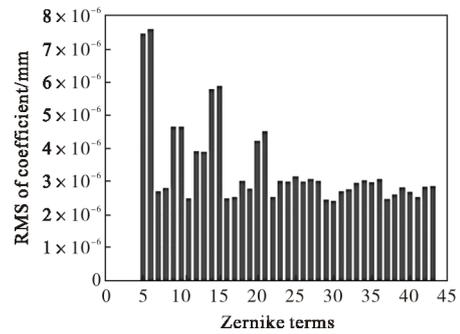
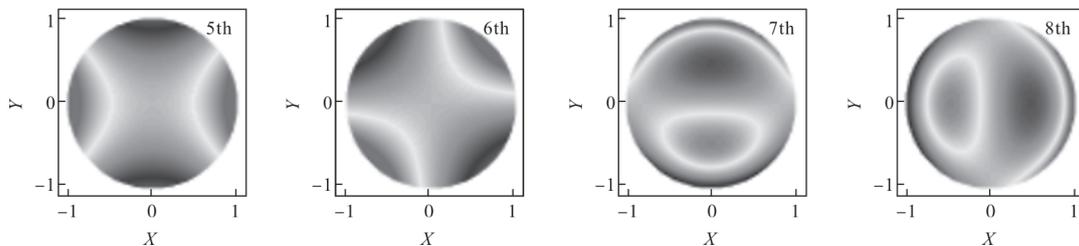
图 3 不同母线条数检测误差敏感性的仿真流程图
Fig.3 Flow chart of simulation for system error sensitivity with different scan arcs

1.3 仿真计算

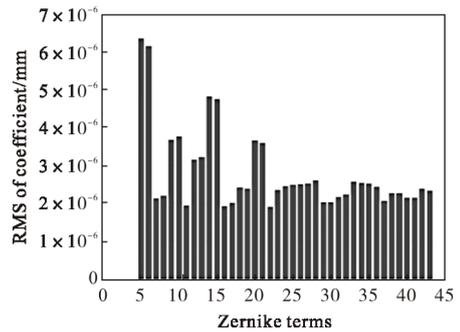
母线条数分别为 16、48、72 条时，拟合的各 Zernike 项系数的 1 000 次仿真计算的均方根分布如图 4 所示。可以看出，在面形检测过程中系统随机噪声可能影响面形低频误差的检测精度，主要体现在第 5、6、14、15 项误差上，而他们分别是像散和四叶像散，图 5 给出了对应的 5~20 项 Zernike 项的面形分布图。



(a) 16 条轮廓扫描线
(a) 16 scan arcs



(b) 48 条轮廓扫描线
(b) 48 scan arcs



(c) 72 条轮廓扫描线
(c) 72 scan arcs

图 4 面形检测误差拟合 Zernike 的系数均方根分布
Fig.4 RMS distribution of coefficient of each Zernike terms fitted from surface test error

从图 4 可以看出，母线条数较多时，系统随机噪声引入的低阶面形误差较小。为了确定最优的母线条数，课题组对不同母线条数引入的低阶面形误差进行进一步的统计分析，图 6 显示了母线条数由 8 条增加到 120 条时，系统噪声在面形检测中引入的 5~43 项 Zernike 误差的分布。可以看出，在每条母线给出相同量级随机噪声的情况下，系统噪声引入的检测误差随着母线条数的增多而逐渐降低，在 8~39 条时，引入的检测误差迅速降低，在 40~70 条时，下降缓慢，在 71~120 条时，下降到几乎保持不变。

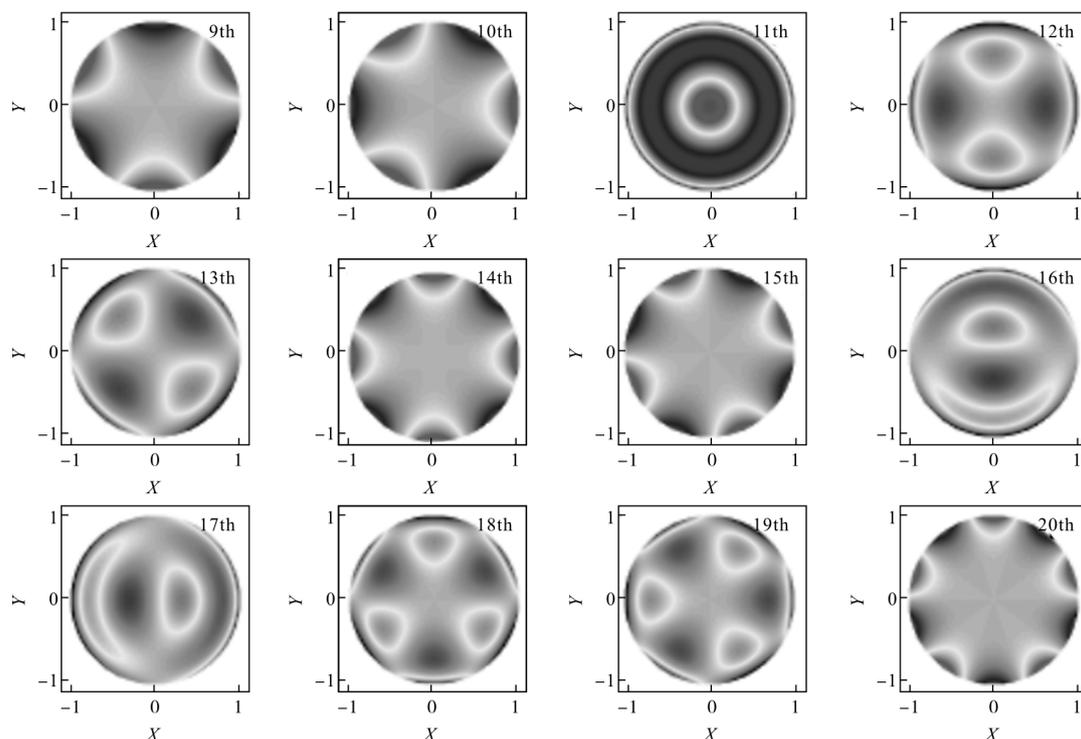


图 5 5~20 项 Zernike 多项式拟合面形图

Fig.5 Surface maps fitting from 5-20 Zernike terms

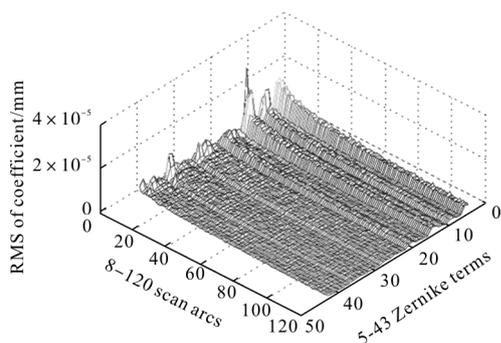


图 6 8~120 条母线的面形检测敏感性

Fig.6 Surface measurement sensitivity of 8-120 scan arcs

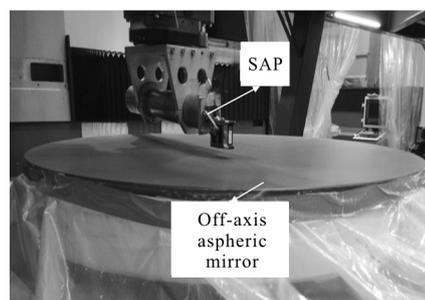
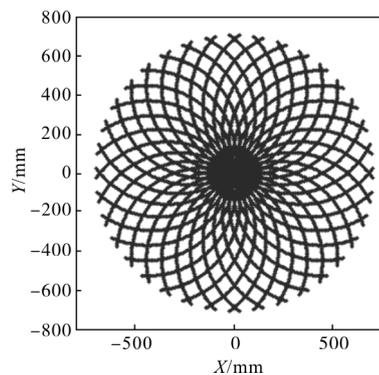


图 7 口径 1 500 mm 离轴非球面反射镜面形检测实验装置图

Fig.7 Experimental setup of surface testing a $\Phi 1500$ mm off-axis aspheric mirror

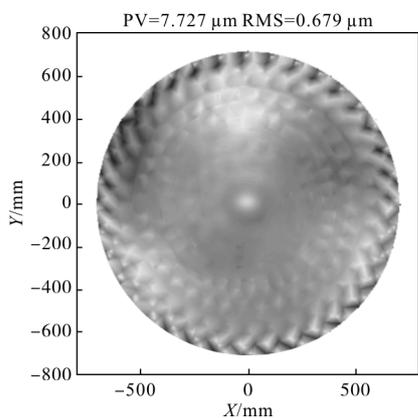
2 实验

为了验证仿真分析结果的准确性,在一块口径 1 500 mm 离轴非球面反射镜上进行面形检测实验,实验装置如图 7 所示。对应的测量臂长度为 450 mm。分别采用 36 条、72 条和 96 条母线进行面形检测,检测结果分别如图 8~10 所示。可以看出,采用 36 条母线进行检测时,数据点采集密度过小导致边缘拼痕严重,且相比于其他两组,检测结果 PV 值和 RMS 值都偏大,分别为 $7.727 \mu\text{m}$ 和 $0.679 \mu\text{m}$ 。72 条母线和 96 条母线的检测结果相近分别为 $5.755 \mu\text{m}$ PV, $0.568 \mu\text{m}$ RMS 和 $5.612 \mu\text{m}$ PV, $0.569 \mu\text{m}$ RMS, 验



(a) 测量点分布

(a) Measuring points distribution

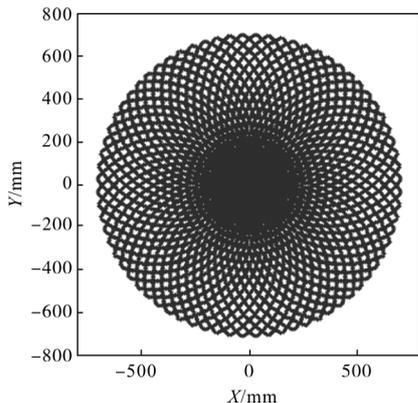


(b) 面形检测结果图

(b) Result of surface test

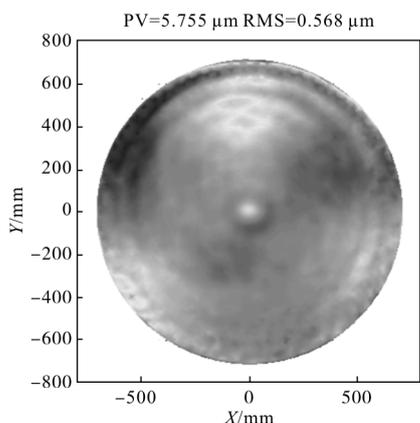
图 8 36 条母线面形检测

Fig.8 Surface test in 36 scan arcs



(a) 测量点分布

(a) Measuring points distribution



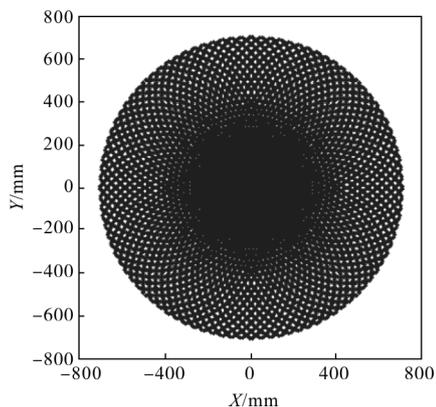
(b) 面形检测结果图

(b) Result of surface test

图 9 72 条母线的面形检测

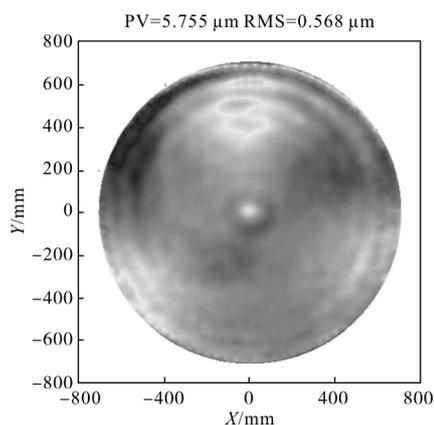
Fig.9 Surface test in 72 scan arcs

证了仿真分析中采用 71~120 母线时,系统噪声引入的误差大小基本保持不变的结果。



(a) 测量点分布

(a) Measuring points distribution



(b) 面形检测结果图

(b) Result of surface test

图 10 96 条母线检测

Fig.10 Surface test in 96 scan arcs

3 结论

模拟检测口径 1 500 mm 的反射镜,当臂长为 450 mm 时,母线条数多于 70 条以后,系统噪声引入的面形低阶项误差趋于定值。在考虑时间成本的基础上,40~70 条母线检测时引入的低阶项面形误差也较少,可以采用。在口径 1 500 mm 的离轴非球面反射镜上进行面形检测实验,得到 72 条母线和 96 条母线时,面形检测结果趋于一致,而采用 36 条母线进行检测,拼痕严重且检测误差较大,验证了仿真分析结果的准确性。

文中对大口径反射镜摆臂式轮廓检测的母线条数选择给出了理论仿真模型,给定待检镜口径和测量臂长度和误差指标参数,进行仿真分析,确定最佳的母线条数,为母线条数的选择给出了理论指导。

参考文献:

- [1] Anderson D S, Parks R E. A versatile profilometer for the measurement of aspherics [C]//OF&T Workshop Technical Digest, CA, 1990.
- [2] Anderson D S, Burge J H. Swing-arm profilometry of aspherics [C]//Proc SPIE, 1995, 2536: 169-179.
- [3] Su P, Oh C J, Parks R E, et al. Swing arm optical CMM for aspherics [C]//Proc SPIE, 2009, 7426: 74260J.
- [4] Burge J H. Fabrication and testing of 1.4-m convex off-axis aspheric optical surfaces [C]//Proc SPIE, 2009, 7426: 7426L.
- [5] Zhang Peng, Li Jie, Yu Guoyu, et al. Development of swinging part profilometer for optics [C]//Optics and Measurement 2016 International Conference, 2016: 101510B.
- [6] Wei Zhongwei. Study on the error separation for the rotary table of swing arm profilometer [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 38-39. (in Chinese)
魏中伟. 摆臂式轮廓仪工件转台误差分离技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2014: 38-39.
- [7] Lin Chen, Jing Hongwei, Wei Zhongwei, et al. Research on the measurement technology of effective arm length of swing arm profilometer [C]//Proc SPIE, 2014, 9280: 92800P.
- [8] Gao Mingxing, Jing Hongwei, Fan Tianquan, et al. Calibrating the axes of the swing arm profilometer by the four-based laser trackers[C]//Proc SPIE, 2015, 9623: 96230M.
- [9] Jia Lide, Zheng Ziwen, Dai Yifan, et al. Principle and experiments of swing-arm profilometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(4): 499-504. (in Chinese)
贾立德, 郑子文, 戴一帆, 等. 摆臂式非球面轮廓仪的原理与试验[J]. 光学精密工程, 2007, 15(4): 499-504.
- [10] Qi Erhui, Luo Xiao, Zheng Ligong, et al. Optical testing of large optical flat mirror with non-circular pupil based on scanning pentaprism technology [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2014, 25(7): 1370-1375. (in Chinese)
戚二辉, 罗霄, 郑立功, 等. 大口径非圆形光学平面的五棱镜扫描检测技术研究 [J]. 光电子·激光, 2014, 25(7): 1370-1375.
- [11] Qi Erhui, Luo Xiao, Li Ming, et al. Error analysis of scanning pentaprism system in optical testing on large aperture flat mirror. [J] *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 639-646. (in Chinese)
戚二辉, 罗霄, 李明, 等. 五棱镜扫描技术检测大口径平面镜的误差分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 639-646.
- [12] Xiong Ling, Luo Xiao, Liu Zhenyu, et al. Measurement of 2 m SiC aspheric mirror based on swing arm profilometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1212002. (in Chinese)
熊玲, 罗霄, 刘振宇, 等. 2 m 量级 SiC 非球面反射镜的摆臂轮廓检测[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1212002.