

文章编号 1674-2915(2010)04-0310-08

大型双曲面次镜面形检测技术现状及发展趋势

侯 溪, 伍 凡

(中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要:随着以双曲面为次镜的两镜光学系统在天文和空间光学等领域的应用日趋广泛,双曲面次镜的口径和相对口径越来越大,由此对双曲面次镜的面形检测技术提出了很高的要求。本文基于国外有代表性的双曲面次镜参数分析了其基本特征和发展趋势,重点介绍了国外大型双曲面次镜的面形检测技术,并对其中的关键技术进行了分析。同时,概述了国内双曲面次镜检测技术现状。最后,总结和展望了大型双曲面次镜面形检测技术发展趋势。提出今后一段时间内,高均匀性的光学透射材料,高精度、大口径的辅助元件以及基于子孔径拼接的检测方法和数据处理方法是该领域的研究重点。

关键词:面形检测;双曲面次镜;光学检验

中图分类号:TQ171.68; O439 **文献标识码:**A

Status and trends of surface measurement technologies for large hyperboloidal secondary mirrors

HOU Xi, WU Fan

(*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

Abstract: With the large applications of the two-mirror optical system with hyperboloidal secondary mirror to astronomical and spacial fields, the aperture and relative aperture of the mirror grow larger and larger, which demands the measurement techniques to be improved greatly. According to the parameters of internationally typical hyperboloidal secondary mirrors, the basic specification and developing trends of secondary mirror is analyzed. The surface measurement method in overseas for the secondary mirror is emphatically introduced, and the corresponding key techniques and applicability are analyzed. In addition, the status of surface measurement method in our country for the mirror is also introduced. Finally, the developing trends of surface measurement technology for the secondary mirror are summarized and prospected, it points out that the research on measurement method in future should focus on the transmission materials with high homogeneity, high precision and large aperture auxiliary components and the measurement methods and data processing based on sub-aperture stitching.

Key words: surface measurement; hyperboloidal secondary mirror; optical test

收稿日期:2010-03-11;修订日期:2010-05-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60908042)

1 引言

以双曲面为次镜的两镜光学系统 Cassegrain 和 Ritchey-Chretien 在天文和空间光学领域得到了愈来愈广泛的应用^[1,2],而且随着光学制造和检测技术的不断发展,已研制出和计划使用的双曲面次镜的口径和相对口径也越来越大,其次镜通常为新型的轻质镜结构。由于制造技术与检测技术息息相关,没有检测就没有控制和确定性制造,大口径双曲面次镜的高精度制造同样需要相应的检测技术,其制造精度主要受相应检测精度的限制。

大型双曲面次镜的加工过程一般可分为工件成型、研磨和抛光 3 个阶段。每个加工阶段都有其相应的面形检测方法作为加工指导。对于大型双曲面次镜成型和研磨阶段的检测,现有商业化的三坐标测量机可以满足米级测量口径和亚微米级精度要求。双曲面次镜面形检测方法的本质是利用辅助镜得到同心光束而进行零位检验,它的主要困难在于需要特殊辅助元件产生一束至少与被测双曲面次镜同等口径的会聚光束,因此对大型双曲面次镜抛光阶段的面形检测面临着巨大的

技术挑战。本文将综述国内外大型双曲面次镜面形检测技术,指出其关键技术问题,并展望其发展趋势。

2 双曲面次镜基本特征及发展趋势分析

现代大型望远镜等大型光学工程已成为国家综合实力和科技进步水平的标志之一,欧美发达国家一直保持领先的地位,俄罗斯也显示了相当的实力。现代大型望远镜的光学系统结构主要为 Cassegrain 型和 Ritchey-Chretien 型^[1,2]。表 1 列出了国际上具有代表性的大型望远镜中双曲面次镜的基本参数,从中可以看出现代大型望远镜主镜(M1)口径已经达到几米甚至几十米量级;其次镜(M2)均采用双曲面镜,且相应的口径达米级甚至几米量级。此外,表 1 数据显示双曲面次镜的相对口径越来越大,即 $f/\#$ 越来越小,有接近 1 的趋势,这大大增加了光学制造和检测难度。图 1 为法国研制的 Gemini 次镜实物照片,图 2 为俄罗斯研制的 VISTA 次镜实物照片,从图中可以清晰看到大型次镜为轻质镜结构,这也是大型次镜发展趋势之一。

表 1 国际上有代表性的大型双曲面次镜参数列表

Table 1 List of parameters of internationally typical and large hyperboloidal secondary mirrors

Aperture of telescope	Name	Diameter of M1/mm	Diameter of M2/mm	M2 $f/\#$	Vertex curvature radius of M2/mm	Conic constant of M2	manufacturer
2 m	Sloan	2 500	1 143	3.15	7 194	-12.110	America
	TTL	2 050	645	2.45	4 813.19	-4.179	Russia
	NOA	2 280	753	2.00	4 602.2	-4.208 7	Russia
	VST	2 650	938	1.40	4 374.46	-5.421 864	Russia
4 ~ 6 m	VISTA	4 100	1 241.5	0.96	4 018.81	-5.548 792	Russia
	MMT $f/9$	6 500	996	1.41	2 806	-1.749	America
	MMT $f/15$	6 500	620	1.34	1 663	-1.397	America
	MMT $f/5$	6 500	1 688	1.16	5 150.89	-2.694 7	America
	JWST	6 500	738	1.05	1 778.913	-1.659 81	America
8 ~ 10 m	Gemini	8 100	1 023.5	1.80	4 190.2	-1.618	France
	VLT	8 200	1 120	1.77	4 553.57	-1.669 26	France
	LBT $f/4$	8 400	1 170	1.41	3 294	-3.236	America
	Keck	10 000	1 445	1.44	4 738	-1.644	America
E-LT	TMT	30 000	3 100	0.93	6 200	-1.32	America
	E-ELT	42 000	6 000	1.02	15 500	-2.39	France

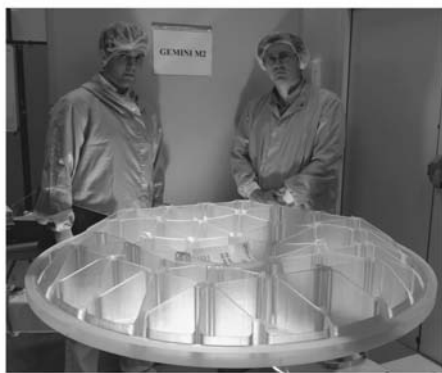


图1 法国研制的 Gemini 次镜

Fig.1 Gemini secondary mirror made in France



图2 俄罗斯研制的 VISTA 次镜

Fig.2 VISTA secondary mirror made in Russia

3 国外双曲面次镜面形检测技术现状和发展趋势分析

在现代大型天文和空间望远镜计划的直接牵引下,大型双曲面次镜的检测技术得到了迅速发展,欧洲、美国和俄罗斯已经处于该领域的领先地位,并形成了各具特色的技术解决方案。

在双曲面次镜的抛光加工阶段,常用的定量检测方法有无像差点法和补偿器零检验法。凸双曲面的共轭点为一个实几何焦点和一个虚几何焦点,对其进行无像差点检测需要一块口径为被测双曲面镜口径两倍以上甚至更大的高精度 Hindle

球面反射镜^[3],以将置于被测凸双曲面镜实几何焦点处的点光源发出的光经凸双曲面镜反射所形成的发散球面波前由原路反射回来,该 Hindle 检测方法较适合中小口径凸双曲面,而用于大口径双曲面次镜检测所需的高精度 Hindle 球面反射镜通常制造有难度,且价格昂贵,其对于超大口径双曲面次镜的 Hindle 无像差点检测几乎无法实现。Simpson-Hindle 检测方法^[3]将 Hindle 镜靠近被测凸双曲面,这样使得 Hindle 镜变成一个口径略大于凸双曲面镜口径的 Hindle 球壳,由于检测光需要通过该 Hindle 球壳,因此对 Hindle 球壳材料的均匀性提出了较高要求。对于口径为 300 mm 左右的双曲面次镜,法国 Reosc 常采用此方法。因此,大口径的 Hindle 球壳在实际制造中存在较大困难,口径大于 1 m 时更是难以实现。

补偿器零检验法是广泛使用的另一种大口径双曲面次镜检测方法。目前国外采用的零补偿器方法主要包括:非球面样板法^[3,4]和计算全息板法^[3,5]。补偿方法的实质是借助补偿器把平面或球面参考波前转换为与被测双曲面次镜理论形状重合的双曲面波前,由补偿器出射的波前,可以看作是叠在被检双曲面次镜上的无接触样板。

在超大望远镜(VLT)和 Gemini 等 8 m 级望远镜次镜的研制中,法国 Reosc 采用非球面样板法^[4],如图 3 所示。非球面样板法通过制造一块口径略大于被测双曲面次镜口径的非球面样板来实现零检测,该检测方法对非球面样板的材料均匀性要求苛刻,同时制造和标定这样的非球面样板存在一定困难。德国 Schott 能提供大尺寸高均匀性的光学材料,法国 Reosc 具有较强的非球面透镜加工能力和高精度加工设备(如离子束加工设备),这也是选择该技术方案的重要前提条件。图 4 为 Reosc 提出的欧洲超大型望远镜 E-ELT 中 6 m 双曲面次镜检测方案^[6],该方法采用口径分别为 3.3 和 3.4 m 的 2 个球面镜,通过旋转次镜,3.4 m 球面镜可检测次镜内环带区域,而 3.3 m 球面镜可检测次镜外环带区域,其对应的子孔径配置如图 4(b)所示,各个相邻子孔径之间存在一定重叠区,最后进行数据拼接处理可以得到全口径面形信息。

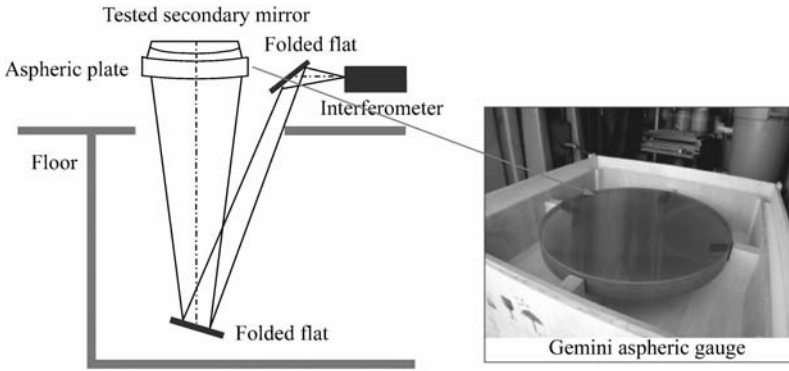


图 3 法国 Reosc 采用的 Gemini 次镜检测系统组成及非球面样板

Fig. 3 Layout of measurement system for Gemini secondary mirror and corresponding aspheric plate by Reosc in France

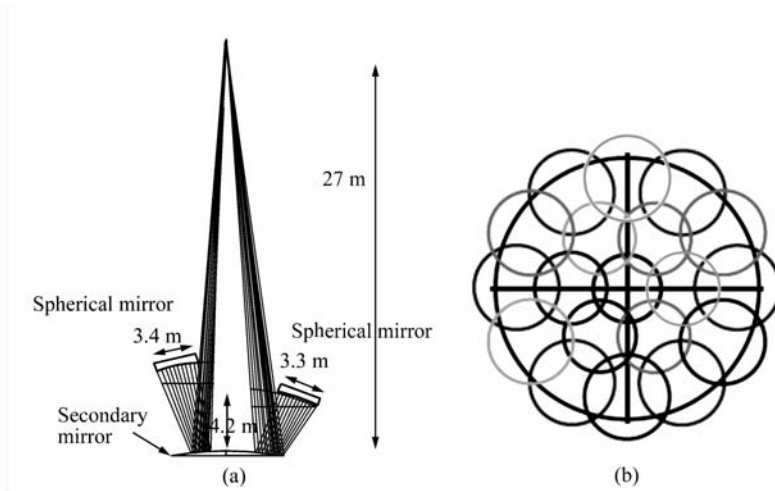


图 4 法国 Reosc 提出的 E-ELT 6m 次镜检测方案(a)及子孔径配置图(b)

Fig. 4 Measurement scheme of 6 m secondary mirror of E-ELT by Reosc in France(a) and its layout of subapertures(b)

美国 SOML 在 MMT 和 LBT 等 6 ~ 8 m 级望远镜次镜的研制中,采用计算全息板法^[5]已有十几年的发展历程,现已研制出专用的大型激光直写设备。如图 5 所示,计算全息板法是通过制造一块口径略大于被测双曲面次镜口径的计算全息板来实现零检测,该检测方法专用的大型激光直写设备把计算全息图刻划在球面上以产生理想的检测波前,同时需要一块大口径非球面主镜与球面次镜组成照明系统。在 LSST 和 TMT 望远镜超大口径凸非球面镜研制过程中,考虑到超大口径计算全息板和非对称在计算全息板制造上的困难,美国 SOML 近期提出将采用 1 m 口径非球面

样板的抗振动菲索型干涉仪和子孔径拼接技术组合起来检测超大口径凸非球面次镜的方法^[7],如图 6 所示。该菲索型干涉仪是在商业化的偏振移相干涉仪的基础上外部扩展一个带有非球面样板的辅助光学系统组成的。美国 Ball 公司在 JWST 次镜检测方案中提出了一种改进的基于带孔 Hindle 球面分块镜的子孔径检测方法^[8],该方法的特点在于所有子孔径数据在其孔附近有一个共同的环形检测区域,在数据拼接处理时可以提高拼接精度,但该 Hindle 球面分块镜的口径相对偏大,对于口径不算太大的 JWST 次镜相对较适用,较难扩展到米级甚至更大口径的双曲面次镜检测。

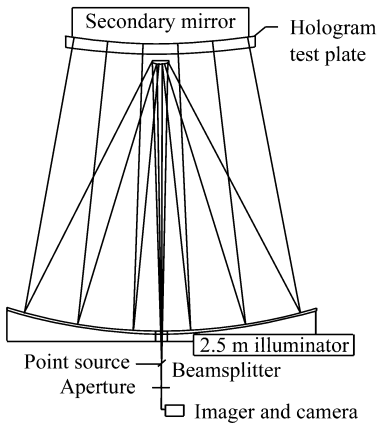


图5 美国 SOML 采用的计算全息次镜检测系统
Fig. 5 Measurement system of secondary mirror with computer generated holography by SOML in America

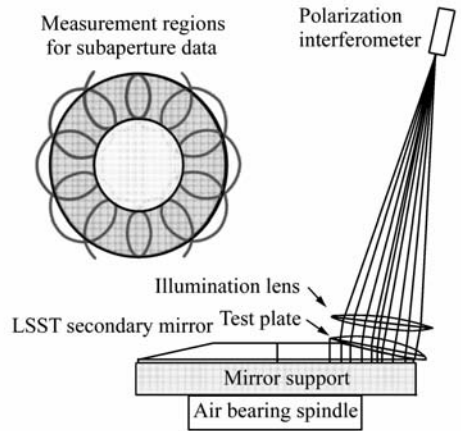
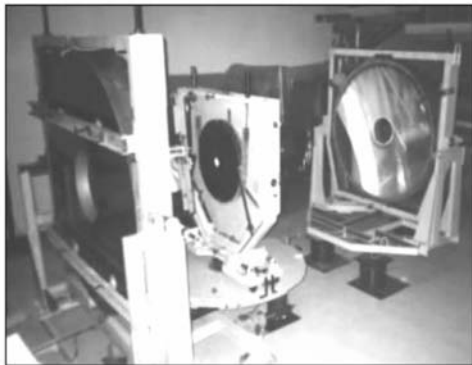


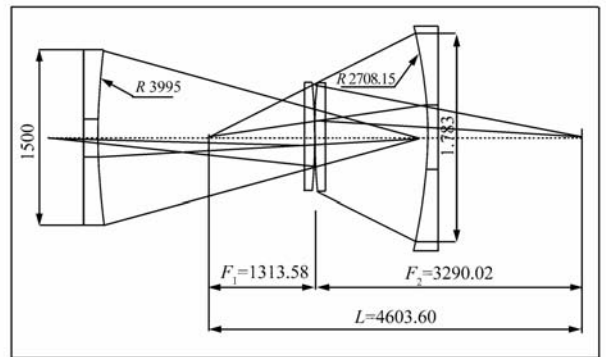
图6 美国 SOML 提出的超大口径凸非球面镜检测系统
Fig. 6 Measurement system of extremely large convex aspheric mirror by SOML in America

在 VST 和 VISTA 望远镜次镜的研制过程中,俄罗斯 LZOS 采用两块 Hindle 球面镜分段测量法^[9]。如图 7 所示,该方法采用串接两个 Hindle 球面镜的方法,沿着光轴的方向放置两个中心通光孔径不同的 Hindle 球面镜实现对被测次镜内外不同区域的分段检测,最后进行数据处理以得

到全孔径面形。俄罗斯在传统光学领域具有优势,在项目牵引下自行研制出多块 1~2 m 级的 Hindle 高精度球面镜,配合分段测量基本可以满足米级双曲面次镜抛光阶段的检测,但该方法不适于极大型望远镜中次镜的检测。Noble^[10]和 Percino-Zacarias^[11]等推导了该方法的解析公式。



(a)



(b)

图7 俄罗斯 LZOS 采用的两块 Hindle 球面镜分段检测系统(a)及光路图(b)

Fig. 7 Measurement system with twin Hindle spherical mirrors and subaperture method by LZOS in Russia (a) and its optical layout (b)

4 国内双曲面次镜面形检测技术现状

我国在大型非球面主镜制造和检测技术方面

进步较快,但总体上与国外发达国家仍存在较大差距。同时,我国在大型次镜制造和检测技术方面显得更为薄弱,目前所研制的双曲面次镜口径集中在 200 mm 以下;检测方法除传统Hindle法

之外,中科院光电技术研究所、中科院长春光机所、中科院南京天文光学技术研究所、苏州大学、同济大学等单位在凸非球面检测技术方面也进行了诸多努力和探索^[12~16],主要方法包括:背部工艺球面法、透射自准法和零补偿法。

对于口径在 200 mm 以上 400 mm 以下的双曲面次镜主要采用 Simpson-Hindle 法进行检测,该方法主要对辅助光学元件材料均匀性提出了较高的要求。目前我国研制的次镜口径最大为 2.16 m 望远镜的中双曲面次镜^[17],其基本参数为:口径为 730 mm,顶点曲率半径为 5 797.5 mm,二次常数为 - 5.077 526,最大非球面度约为 14 μm ;检测方法采用传统的 Hindle 无像差法,制造的大型辅助元件为一块口径 1 591 mm 的球面反射镜和一块口径为 480 mm 的平面转折镜。为了减小检测双曲面次镜所需 Hindle 球面镜口径,中科院南京天文光学技术研究所提出了基于椭球反射镜的补偿器法^[18],其口径远小于 Hindle 球,但制造要比球面镜困难,且需要在被测双曲面次镜中心区域开孔以通过检测光。中科院长春光机所曾开展过单离轴 Hindle 球面镜检测凸非球面方面的方案探索^[19],但未对数据处理方法进行深入研究。

近期,中科院光电技术研究所正在开展针对大型双曲面次镜的基于双 Hindle 分块球面镜和子孔径拼接技术的新检测方法研究^[20,21],该方法综合权衡检测成本、系统性能和检测效率,仅需要通常光学加工实体容易加工的较小口径标准球面镜,可以有效地解决其它定量检测技术中的辅助元件(全口径 Hindle 球、Hindle 球壳、椭球镜、非球面样板和计算全息板)制造困难、成本高、对材料均匀性要求高、装调误差灵敏等问题,也可解决单 Hindle 分块球面镜检测技术的较低检测效率

问题,并且结构简单,检验成本相对较低。

5 结束语

综上所述,对于大型双曲面次镜的检测都需要制造特殊的大型辅助元件(如全口径 Hindle 球、Hindle 球壳、椭球镜、非球面样板和计算全息板),国外先进国家根据自身优势各自具备至少一种检测大型双曲面次镜的手段,且具备制造相应特殊辅助元件的能力,并经受住了实际工程实践检验。对于超大口径次镜的检测,法国、美国和俄罗斯所提出的检测方案都体现了子孔径测试思想。国内所研制的双曲面次镜口径集中在 200 mm 以下,主要采用以背部工艺球面法为代表的透射式零补偿方法进行检测;对于口径在 200 mm 以上 400 mm 以下的双曲面次镜主要采用 Simpson-Hindle 法进行检测。

基于上述分析,以大口径高均匀性光学透射材料为代表的基本前提条件,以大口径高精度球面反射镜、高精度非球面样板和计算全息板为代表的辅助元件研制能力和以子孔径拼接技术为代表的检测方法和数据处理方法将是该技术发展的重点。优化的大型双曲面次镜面形检测方案需在基本前提条件的约束下,根据被测次镜基本参数,考虑可能检测方法的适应性及所需配套辅助元件的研制能力,进而综合平衡确定。

大型和超大型双曲面次镜的研制是未来大型和极大型望远镜计划中关键环节之一,而其抛光阶段的面形检测方法是研制大型和超大型双曲面次镜的关键技术和基本保障。尽快缩短我国在大型次镜制造和检测技术方面与发达国家的差距是目前面临的紧迫任务之一,因此,应当加强此方面的研究工作。

参考文献:

- [1] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州:苏州大学出版社,2004.
PAN J H. *The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces* [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京:科学出版社,2001.
YANG L. *Advanced Optical Manufacture Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)

- [3] SMITH W S, JONES G W. Comparison of metrology methods for large astronomical secondary mirrors[J]. *SPIE*, 1994, 2263:243-252.
- [4] GEYL R, RUCH E, PRIMET S, *et al.*. Progress toward a third Gemini M2 mirror[J]. *SPIE*, 2005, 5869:586901/1-4.
- [5] BURGE J H, ANDERSON D S. Full-aperture interferometric test of convex secondary mirrors using holographic test plates[J]. *SPIE*, 1994, 2199:181-191.
- [6] RUCH E. Extremely large telescope: the challenge of the optics[C]. *SPIE Proceedings on Advanced Manufacture and Testing Technology*, Chengdu, China, 2007:6723.
- [7] BURGE J H, SU P, ZHAO C. Optical metrology for very large convex aspheres[J]. *SPIE*, 2008, 7018:701818/1-12.
- [8] SMITH K Z, SCHWENKER J P, BROWN R J, *et al.*. Current concepts for cryogenic optical testing of the JWST secondary mirror[J]. *SPIE*, 2004, 5494:141-151.
- [9] SEMENOV A P, ABDULKADYROV M A, BELOUSOV S P, *et al.*. Manufacturing of secondary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST[J]. *SPIE*, 2001, 4451:138-144.
- [10] NOBLE R, MALACARA D, CORNEJO A. Multistep hindle test[J]. *Appl. Opt.*, 1974, 13:2476-2477.
- [11] PERCINO-ZACARIAS M E, CORDERO-DAVILA A. n-hindle-sphere arrangement with an exact ray trace for testing hyperboloid convex mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(28):6050-6054.
- [12] 伍凡. 大口径透镜凸面零检验的补偿器设计[J]. *应用光学*, 1996, 17(5):12-15.
WU F. Design of a compensator for zero-checking of large aperture lens's convex surface[J]. *J. Appl. Opt.*, 1996, 17(5):12-15. (in Chinese)
- [13] 张宝安, 潘君骅. 透射凸二次非球面检验方法的研究[J]. *光学技术*, 2002, 28(4):360-362.
ZHANG B A, PAN J H. Study on testing of refractive convex conic aspheric surface[J]. *Opt. Technol.*, 2002, 28(4):360-362. (in Chinese)
- [14] 胡明勇, 王鹏, 郝沛明, 等. 大口径、离轴凸双曲面反射镜的补偿检验[J]. *光学技术*, 2004, 30(2):240-244.
HU M Y, WANG P, HAO P M, *et al.*. Testing of an off-axis convex hyperboloid mirror using compensator[J]. *Opt. Technol.*, 2004, 30(2):240-244. (in Chinese)
- [15] 沈正祥, 郝沛明, 赵文才, 等. 凸二次非球面反射镜的自准法检验[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(1):46-50.
SHEN ZH X, HAO P M, ZHAO W C, *et al.*. Autocollimating testing of convex conic aspheric surface[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2005, 34(1):46-50. (in Chinese)
- [16] 张海洪. 凸非球面的检验方法[J]. *红外*, 2002, 12:23-26.
ZHANG H H. Method for testing convex aspheric surfaces[J]. *Infrared*, 2002, 12:23-26. (in Chinese)
- [17] 朱政. $\phi 2.16$ m 望远镜新副镜的加工工艺[J]. *光学技术*, 1998, 24(3):41-43.
ZHU ZH. The producing technology of the new secondary mirror for $\Phi 2.16$ m telescope[J]. *Opt. Technol.*, 1998, 24(3):41-43. (in Chinese)
- [18] 王欣, 潘君骅. 2.4 m 天文望远镜光学系统的设计及副镜检验的几种可能方案[J]. *云南天文台台刊*, 2002, 2:41-49.
WANG X, PAN J H. Optic system design of a 2.4 m class telescope and several methods for testing the secondary mirror[J]. *Publicalioss of Yunnan Observatory*, 2002, 2:41-49. (in Chinese)
- [19] 王鹏, 赵文才, 胡明勇, 等. 离轴凸非球面的 Hindle 检测[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(2):139-142.
WANG P, ZHAO W C, HU M Y, *et al.*. Hindle testing of the off-axis convex asphere surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2):139-142. (in Chinese)
- [20] 侯溪, 伍凡, 范斌, 等. 一种大口径双曲面次镜检测系统: 中国, 10239211.5[P]. 2009-04-29.
HOU X, WU F, FAN B, *et al.*. A measurement system for large hyperboloidal secondary mirror; CHN, 10239211.5[P]. 2009-04-29. (in Chinese)
- [21] HOU X, WU F, YANG L, *et al.*. Experimental study on measurement of aspheric surface shape with complementary annular subaperture interferometric method[J]. *Opt. Express*, 2007, 15(20):12890-12899.

作者简介:侯溪(1980—),男,四川阆中人,副研究员,博士,主要从事面向先进光学制造的检测技术研究及设备研制工作。E-mail:hxxh6776@sohu.com

《光机电信息》征稿启事

本刊由中国光学学会、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办,科学出版社出版。

本刊征集光学和应用光学、激光和光电子学、微纳科技和精密工程、材料科学、电磁学和电子学、仪器仪表、信息科学和技术等几大领域如下形式的文章:

1. 研究信息快报

本栏目主要报道最新研究成果、阶段新结果、片段新结果的介绍或说明,不要求是纯学术论文。目的是为那些尚未能形成正式研究论文,但希望把已有的最新研究成果、阶段或片段新结果抢先发表的科研工作者提供一个平台,保护广大科研人员的知识产权。主要内容包括研究背景简介、研究过程或实验过程简述、观察到的结果、数据及相关信息说明、评论等,附图表数据等,也可附参考文献(一般不要求)。本栏目发表的论文数据不影响在正式发表论文时使用。

本栏目出版周期:收稿日期为每月5日之后、25日之前收到,下月即出版发表。如为当月5号之前收到,当月发表。

2. 研究快报

本栏目主要征集研究新成果的快速报道。要求具有如下内容:摘要、关键词、研究背景(引言)、研究过程或实验过程、研究结果、参考文献。

3. 研究评论

主要是对当前最新研究结果或研究动态的评论或展望,也可是基于他人研究结果的二次开发或更深层次的研究结果报道。

4. 综述文章

(1)综述本领域或本学科的研究成果和进展、发展动态和趋势。

(2)作者本研究群体的研究工作综述。

5. 研究论文

征集研究新结果的学术论文。

6. 应用开发类论文

接受各类大学、研究所、企业自主研发的新产品性能报道和新应用报道;新型器件在系统应用结果方面的报道等。是反映企业研发创新和对自身产品的再认识的能力、并能够让用户更好地了解产品性能、拓展应用范围的手段。本栏目论文具有产品推广广告作用。

7. 成果信息和研发信息

本栏目主要为大学、研究所等研发部门发布研究成果信息或项目工程研发信息;企业需要开发或攻关的项目信息等。目的是为研发部门和企业之间架起沟通桥梁。

8. 各类形式的企业宣传、广告,具体来电来函商谈。

本刊做各类宣传、广告,欢迎媒体利用。“好酒也怕巷子深”——您的产品多一份广告就会多一份收益,本刊广告收费比高,宣传范围广。纸版的广告+电子版的广告——更值得客户信赖,更能为您培养潜在的中、远期客户。

网上投稿:E-mail:xxfw@ciomp.ac.cn;xxfwome@sina.com;gjdxw@gmail.com

挂号邮寄:邮编:130033 地址:长春市东南湖大路3888号《光机电信息》编辑部

电话:0431-86176853