

大口径望远系统中主次镜系统的装调方法

韩娟¹ 段嘉友¹ 陈建军¹ 张钧² 康健¹

(¹中国科学院西安光学精密机械研究所系统工程部, 陕西 西安 710119
²中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所导航部, 陕西 西安 710065)

摘要 为了实现大口径望远系统中主次镜系统的装调,并提高光学成像质量,采用了一种调整主次镜相对位置的新方法——高精度光学定心法。该方法不同于传统的修切垫圈调整法,可同时消除主次镜系统中因次镜相对主镜的倾斜引起的像散及因次镜偏心引起的彗差,不仅大大降低了装调难度,而且消除了系统的不稳定性。另外,通过干涉自准检验和十字丝代替光轴相结合的办法,建立了一套新的主次镜系统的检验方案。通过对主镜口径为 $\Phi 520$ mm 的 R-C 系统的实际装调和检验表明,组合前后主、次镜两组件的面形波像差均方根值(RMS)均小于等于 0.03λ ($\lambda=632.8$ nm),主次镜光轴角晃动量分别为 $0.72''$ 、 $2''$,两个镜子的光轴与其各自镜框端面的垂直度均小于等于 0.005 mm,主次镜系统同心度小于等于 0.01 mm,满足系统面形波像差均方根值小于等于 0.07λ 的设计要求。

关键词 成像系统;主次镜;定心加工;装调过程;干涉自准检验

中图分类号 TH743 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0716001

An Alignment of Primary and Secondary Mirrors for Optical System in Large Telescopic

Han Juan¹ Duan Jiayou¹ Chen Jianjun¹ Zhang Jun² Kang Jian¹

¹System Department, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China
²Navigation Department, Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract In order to realize the alignment of primary and secondary mirrors in large aperture telescopic system and improve optical imaging quality, a new method for adjusting comparative position and pose between primary and secondary mirrors is introduced named high-precision alignment machining. Other than a traditional method of adjusting washer, the method can eliminate astigmatism aroused from inclination between primary and secondary mirrors, and coma aberration aroused from secondary mirror's eccentricity at the same time. The method reduces the alignment difficulty markedly and avoids systemic instability. In addition, a new method for primary and secondary mirrors test is established by combination of interference auto-collimating tests and cross wire application which replaces optical axis. The alignment and test's result from the $\Phi 520$ mm primary and secondary mirrors shows that root-mean-square (RMS) value of wave aberration hardly changes before and after assembling, and is entirely less than 0.03λ ($\lambda=632.8$ nm), axial angles swaying in primary and secondary mirrors are $0.72''$ and $2''$, respectively, the verticalities of two mirrors optical axis and respective frames are less than 0.005 mm, primary and secondary mirrors's concentricity is less than 0.01 mm, and the RMS value of the system is less than 0.7λ after interation, which achieves design requirements.

Key words imaging systems; primary and secondary mirrors; centering machining; alignment procedure; interference auto-collimating tests

OCIS codes 110.6770; 220.4610; 220.1250; 120.3180

收稿日期: 2012-02-05; 收到修改稿日期: 2012-03-19

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724006)资助课题。

作者简介: 韩娟(1977—),女,工程师,主要从事大口径光学系统装调方面的研究。E-mail: hanjuan7927@sohu.com

1 引言

近年来,长焦距、大口径的反射相机越来越多地应用于空间对地观测中,如 R-C 系统、卡塞格林系统和三镜消像散系统等结构形式。反射式光学系统以其无色差、结构紧凑^[1]以及可减轻大口径长焦距望远系统重量等优点在航天遥感领域受到了广大科研人员的长期关注^[2~5]。随着软件开发和先进技术的应用,这些光学系统的设计已不是难题,而装调出高像质的光学系统却非常困难^[6,7]。在大口径光学系统中,尤其是主次镜系统像质对整个望远系统的最终成像质量起到了至关重要的作用^[8,9]。本文提出了全新而有效的方法,使口径为 $\Phi 520$ mm 主次镜系统经装调后的波像差均方根值(RMS)小于等于 0.07λ 。

本主、次镜系统可近似为 R-C 系统,要在 R-C 式系统中得到较好的波像差,有两个重要的技术指标:1) 主、次镜在组合成系统前各自的波像差,2) 主、次镜的相对位置。

2 主、次镜的装调要求

根据系统要求,口径为 $\Phi 520$ mm 非球面主镜和其镜座部件装配完成后的波像差均方根值小于等于 0.03λ ,次镜和其镜座部件装配完成后的波像差均方根值小于等于 0.03λ 。

装配的难点在于如何调整主镜和次镜的相对位置,使位置偏差限定在许可范围内^[10,11]。将主镜部件和次镜部件装入碳纤维镜筒中,需要严格保证主、次镜光轴的同心度小于等于 0.01 mm。

3 对主、次镜相对位置装调的新方法

3.1 传统光学像差的消除

光学像差中和装调过程最紧密的是球差、彗差和像散^[12]。其中球差除与二次常数有关外,仅与主次镜之间的间隔有直接关系,只要严格控制主次镜的光学间隔在设计公差范围内,就可以保证主次镜的轴向关系;消除轴上彗差就可以保证主次镜的光轴重合;对于大视场角的光学系统,视场角越大,像散也就越大,一般都还需要进行离轴检测。

像散主要是由于主次镜的位置倾斜引起的(这里的像散指系统装调时产生的像散)。传统的消像散主要采用修研修切圈的方法,使主次镜主面平行。经验表明,该方法会同时引入机械件变形等不稳定因素。当次镜镜框相对于主次镜连接筒用连接螺钉

紧固后会引引起次镜镜框变形从而导致次镜镜面的变化,使系统很不稳定。其热稳定性及抗振性难以满足要求。

3.2 消像差的新方法

鉴于传统消像差法带来的弊端,采用一种对主次镜进行高精度定心加工装调的新方法。装调后,消除了因次镜相对主镜倾斜引起的像散以及因次镜相对主镜偏心引起的彗差,保证了主次镜光轴的重合。这样提高了系统的成像质量,也避免了因次镜镜框变形而产生的次镜面形变化和系统不稳定等因素。

4 主、次镜组件的定心加工及光轴确定

4.1 主镜组件

随着航空、航天高精度光学产品的研制,从传统的球面透镜、球面反射镜,到近年来广泛应用的非球面反射镜和离轴反射镜,光学定心加工广泛应用于解决光学镜头的高同轴度要求^[13,14]。它是基于光学成像原理,将光学件光轴、与光学件配合的机械件轴线和车床旋转主轴联系起来,以达到利用车削,使得光学件光轴和其配合的机械件轴线能高度同轴。

该系统中的主镜是口径为 $\Phi 520$ mm 的凹椭球面反射镜,虽对主镜做了轻量化加工,但裸镜加上主镜座等主镜组件,总重大约有 47 kg。主镜通过中心轴与主镜座连接,再加之和辅助支撑点的紧固,要求主镜和主镜座连接后的波像差均方根值小于等于 0.03λ 。

大口径主镜光轴的装调和加工本身就相对复杂且具有一定危险性^[15]。目前可行的技术方法是采用高精度立式车床进行定心加工,该车床在负重后的主轴轴线回转倾角误差为 $\pm 1''$,图 1 为主镜组件的定心加工示意图。

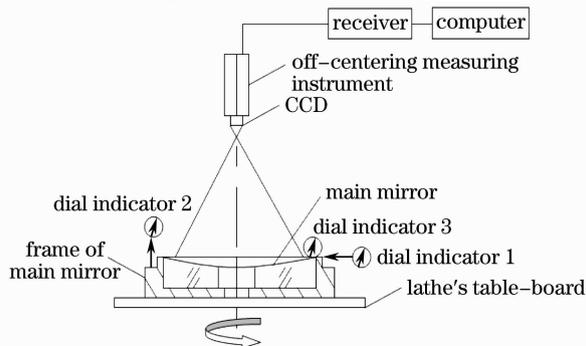


图 1 主镜定心加工示意图

Fig. 1 Assembling drawing of main mirror about centering machining

根据主镜设计,应通过非球面的内圆和外圆的曲率半径中心像这两点来确定主镜的光轴,但通过计算得主镜的法线像差仅为 19.54 mm,对于口径为 $\Phi 520$ mm,内圆曲率半径为 1600 mm 来说,这样小的数值差很难确定光轴位置。因为这两点的连线如果略微倾斜,就会产生很大的光轴偏差,所以在主镜最外圆镀膜面上的晃动量可以通过接触测量的办法测量,避免了光轴的较大偏差,并且接触测量也更为实际和直观。通过定心仪、CCD 接收器、计算机的处理,装调过程将像点放大了约 1700 倍。

根据图 1 所示,精密调整车床台面的平移和倾斜,使车床在 360° 旋转时,径向跳动小于等于 0.02 mm,镜面端面的跳动小于等于 0.002 mm,主镜光轴角动量优于设计要求 $1.58''$,这时对镜框进行光学定心加工,车削镜框的连接端面和外圆。

其中在测量曲率半径中心像晃动量时,通过公式可以算出:

$$Z = \frac{Y}{4\beta_1\beta_2}, \quad (1)$$

其中 Z 为主镜光轴晃动量, Y 为主镜像在显示屏上

的划圆量, β_1 为定心仪的放大倍率, β_2 为像通过 CCD 在计算机显示屏上的放大倍率。

通过定心加工,主镜镜框最终加工结果见表 1。在实际调试过程中,由于重力、温度、振动以及材料性质变化等原因,主次镜的相对位置会发生改变,导致像差和图像位置的漂移^[16],所以在定心加工后要分别对主、次镜进行面形检验,以确定定心加工没有将应力引入当中。主镜定心加工前、后 4 个方向(0° 、 90° 、 180° 、 270°)的波像差对比如图 2 所示,其中(a)~(d)为定心加工前这 4 个方向波面面形图,(e)~(h)为定心加工后这 4 个方向面形图。表 2 是主镜定心加工前后 4 个方向波像差对比表。

表 1 定心加工车削前后主镜组件的结果对比
Table 1 Comparative results of the main mirror before and after centering machining

	Face run-out / mm	Radial run-out / mm	Mirror face-out / mm	Error of optical axis / (")
Before turning	0.050	0.020	0.002	0.433
After turning	0.004	0.004	0.002	0.720

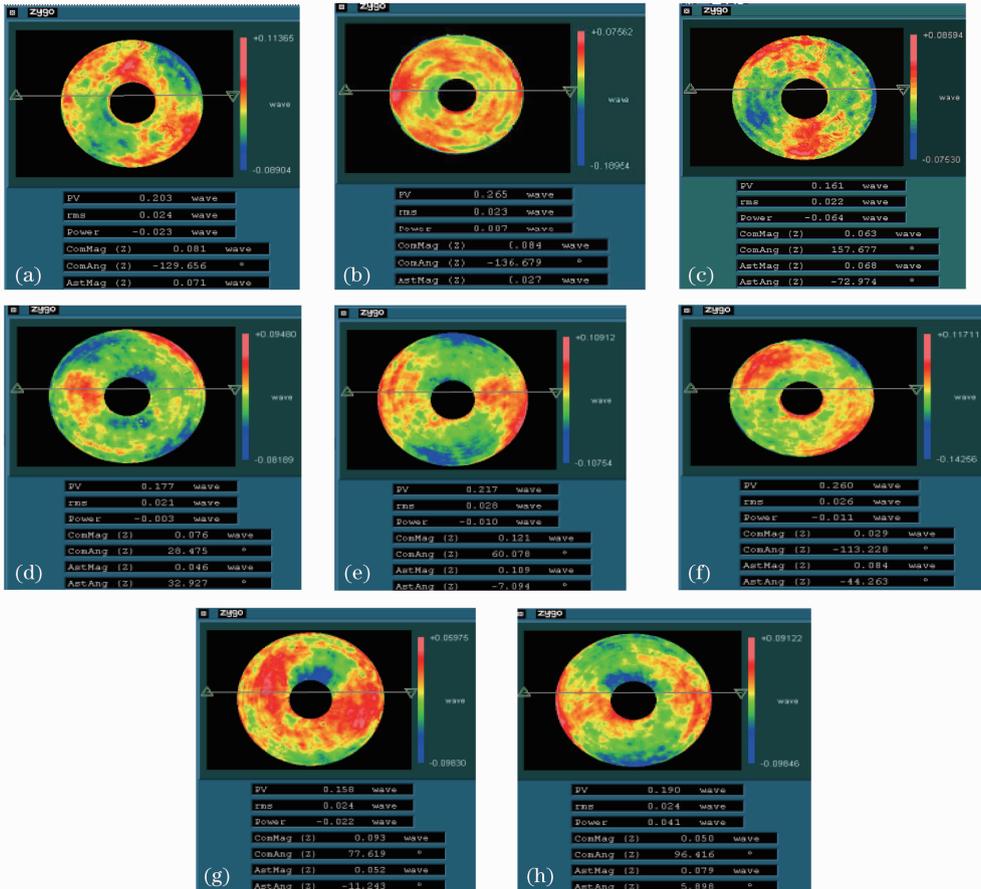


图 2 主镜定心加工前后波像差对比

Fig. 2 Wavefront comparative pictures of the main mirror before and after centering machining

表 2 主镜定心加工前后波像差检测结果对比

Table 2 Wavefront comparative results of the main mirror before and after centering machining

Rotate direction / (°)	0	90	180	270
Wavefront aberration before turning / λ	0.024	0.023	0.022	0.021
Wavefront aberration after turning / λ	0.028	0.026	0.024	0.024

4.2 次镜组件

主次镜系统中的次镜是一个凸二次曲面,曲率半径为 387 mm,为了尽可能提高定心加工后的镜面面形质量,设计要求次镜部件定心加工前、后的波像差均方根值小于等于 0.03λ 。由于曲率半径与主镜不同及实际调试的需要,将像点放大约 780 倍。图 3 为次镜组件的定心加工示意图。

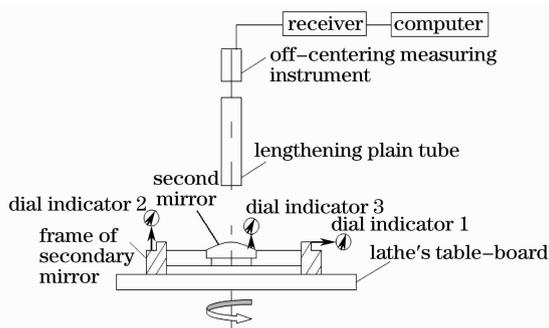


图 3 次镜定心加工示意图

Fig. 3 Assembling drawing of secondary mirror about centering machining

最终次镜的光轴晃动角量小于设计要求的 $2.6''$ 。用 Zygo 干涉仪检查次镜部件定心加工后的次镜面形,波像差均方根值仍小于等于 0.03λ 。次镜镜框的最终加工结果见表 3,次镜定心加工前后 3 次测量的波像差对比如表 4 所示。

表 3 定心加工前后次镜组件的结果对比

Table 3 Comparative results of the secondary mirror before and after centering machining

	Face run-out / mm	Radial run-out / mm	Mirror face-out / mm	Error of optical axis / (")
Before turning	0.050	0.050	0.002	1.2
After turning	0.003	0.004	0.002	2.0

表 4 次镜定心加工前后的波像差对比

Table 4 Wavefront comparative results of the secondary mirror before and after centering machining

Number	1	2	3
Wavefront aberration before turning / λ	0.021	0.021	0.020
Wavefront aberration after turning / λ	0.025	0.026	0.025

5 主、次镜系统相对位置的装调

5.1 主、次镜系统的装调原理和依据

该系统可近似为 R-C 系统,理想情况下的一次像面系统的像差特性是关于系统光轴旋转对称的,并且像散和彗差在零视场处均为零,随视场的增加,轴外像差也会很快增加。

主次镜系统的相对位置包括主次镜之间的间距、主次镜的相对偏心和倾斜^[17],即对应像差中的球差、彗差和像散。将主镜的位置作为参考基面,考虑次镜的位置就有 6 个自由度,分别为 x, y, z 的平移和 x, y, z 的转动^[11]。如图 5 所示,把 z 方向定为系统光轴的方向。 z 方向的平移完全可以通过主次镜之间的光学间隔来保证。 z 方向的转动对轴对称的次镜不会产生像差。对于高精度定心加工过的主次镜和精密加工的连接镜筒来说,次镜相对主镜的倾斜可以不予考虑,也就是说不会产生由于次镜倾斜引起的系统像散。主次镜的位置的调整主要是次镜相对于主镜光轴的偏心量的调整,次镜的调整自由度由 4 个(2 个偏心,2 个倾斜)变为 2 个,即 x 方向和 y 方向的偏心。在定心加工中主次镜的同心度已经达到 0.01 mm ,认为偏心消除。如果有少许彗差出现,只要取得系统像面处单个视场点的彗差的方向和大小就可以对次镜的偏心量通过专用工装进行少量调整,使主次镜系统在 360° 旋转过程中,以次镜的彗差在轴上近似为零作为装调依据。这样简化了系统的装调过程,使调试更容易实现。主次镜系统检测图如图 4 所示。

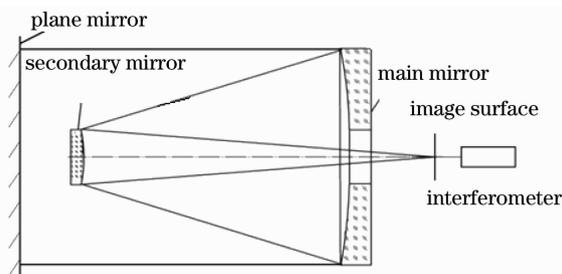


图 4 主次镜系统的检测图

Fig. 4 Test configuration of main and secondary mirrors

5.2 主、次镜系统检验的新方法

主次镜系统的像面检测采用干涉自准检测法^[18]。如图 5 所示,在装调中需要调整平面镜使自准点返回到与干涉仪的焦点重合,即如果干涉检测点与主镜光轴有少量偏差,也可以通过调整平面镜使自准点与干涉仪焦点重合的位置,并得到系统的波像差数据。依据此数据调整次镜,就会将检测点的误差引入次镜偏心的调整中^[19]。这时干涉检验

点并不在主镜光轴上,也就是说因为检验点处于不正确的位置,直接导致检验数据不正确。

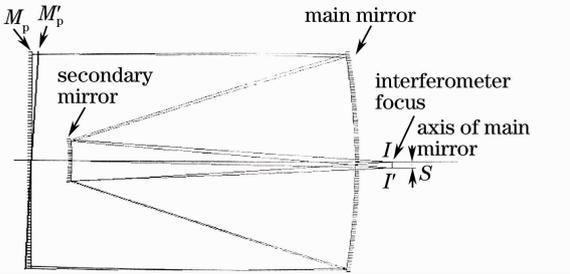


图 5 主次镜系统的轴外视场干涉自准检验示意图

Fig. 5 Interference auto-collimating tests diagram of main and secondary mirrors system outside optical axis

通过实验得出,随着自准检验点偏移距离的增加,系统像面处的彗差快速增加,像散也随着增加,但增量值不大。表 5 为检测视场点偏轴量与像差的对应关系。

为了避免以上的情况发生,对主镜组件进行高精度定心加工时,在主镜背面安装了用于标识主镜光轴的十字丝分划板。对十字丝中心自准穿心,找

表 5 检测视场点偏离量与像差的对应关系

Table 5 Diagram of the deviation in the test point and optical aberration

Deviation of the test point /mm	0	0.25	0.75	1.25	1.75
Coma of Zernike factor	0	-0.05	-0.15	-0.25	-0.33
Astigmatism of Zernike factor	0	0.002	0.002	0.003	0.002

出自准检验点的正确位置,根据十字丝位置对次镜位置进行调整,就会有效地避免上面问题的发生。主次镜系统一次像面自准检测的方法对次镜的装调起到了很好的指导作用。

6 装调最终结果

通过对主次镜系统的实际装调,系统一次像面的波像差均方根值小于等于 0.07λ 。图 6(a)~(d) 为最终系统在 4 个方向($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$)上的波面面形图。表 6 为系统在这 4 个方向的最终波像差检测结果。

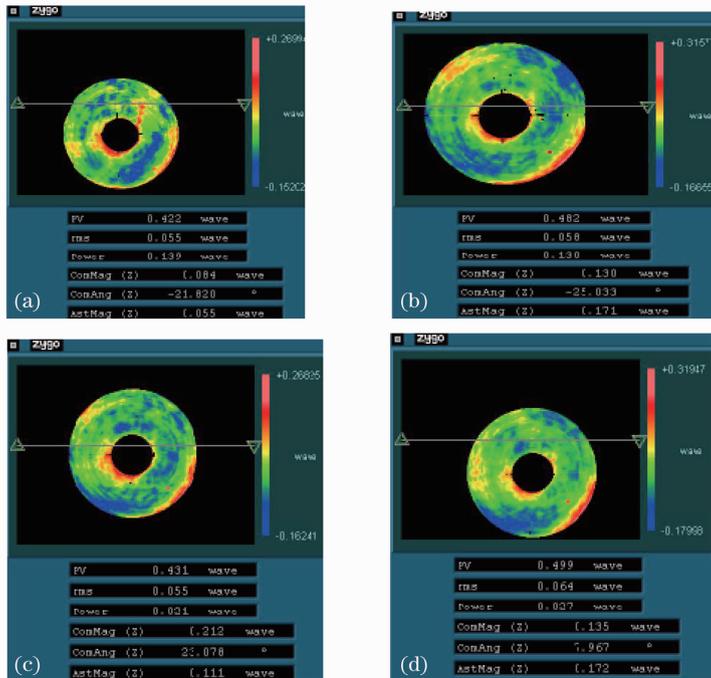


图 6 主次镜系统定心加工后的波像差对比

Fig. 6 Wavefront comparative pictures of the main and secondary mirrors after centering machining

表 6 主次镜系统定心加工后的波像差结果

Table 6 Wavefront results of the main and secondary mirrors after centering machining

Rotate direction /($^\circ$)	0	90	180	270
System of wavefront aberration / λ	0.055	0.058	0.055	0.064

7 结 论

介绍了在大口径 R-C 系统装调中,对主次镜相对位置的传统调整。提出了运用高精度定心方法,对主镜组件和次镜组件进行定心加工,不但消除了次镜相对主镜的倾斜和偏心,使两个镜子的光轴与其各自镜框端面的垂直度均小于等于 0.005 mm,系统的同心度小于等于 0.01 mm。在检测主次镜系统一次像面结果时,采用干涉自准检验和十字丝代替光轴相结合的办法,建立了一套主次镜系统的装调新方案,实现了对口径为 $\Phi 520$ mm 主次镜系统的面形波像差均方根值小于等于 0.070λ 的设计要求,并且系统通过了环境实验和航天振动实验。该技术方案易于装调,提高了系统的成像质量。

参 考 文 献

- Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen *et al.*. Optical system design of space camera with large F number and long focal length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2093~2097
李旭阳,李英才,马臻等.大 F 数长焦距空间相机光学系统设计[J].光学学报,2010,**30**(7):2093~2097
- Zheng Zhenrong, Sun Xutao, Gu Peifu *et al.*. Design of objective lens with reflective spherical Fresnel zone plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1483~1487
郑臻荣,孙旭涛,顾培夫等.应用反射型球面菲涅耳波带片的成像物镜设计[J].光学学报,2006,**26**(10):1483~1487
- Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei *et al.*. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2680~2683
郭永祥,李英才,梁天梅等.一种大视场离轴三反射光学系统研究[J].光学学报,2010,**30**(9):2680~2683
- Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin *et al.*. Design on three-reflective-mirror system used in space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 216~219
常军,翁志成,姜会林等.用于空间的三反射镜光学系统设计[J].光学学报,2003,**23**(2):216~219
- Pan Junhua. The methodic design of the IR imaging system with large aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1475~1478
潘君骅.大口径红外成像系统的光学设计[J].光学学报,2003,**23**(12):1475~1478
- Kong Xiaohui, Fan Xuewu. Alignment of two-mirror aspherical optical system based on vector aberration theory[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(8): 082202
孔小辉,樊学武.基于矢量波像差理论的两镜系统装调技术研究[J].激光与光电子学进展,2010,**47**(8):082202
- Hao Peiming, Zhou Senlin, Li Kexin. Manufacture of $\Phi 600$ R-C optical system [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2007, **35**(2): 249~252
郝沛明,周森林,李可新. $\Phi 600$ R-C光学系统的研制[J].同济大学学报(自然科学版),2007,**35**(2):249~252
- Fu Lianxiao, Wu Yonggang, Li Xinglong *et al.*. Manufacture and test of Cassegrain system's primary mirror with large relative diameter and lightweight[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 764~767
付联效,吴永刚,李兴隆等.大相对口径轻量化卡塞格林系统主镜的加工检验[J].光学学报,2008,**28**(4):764~767
- Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Beijing: Science Press, 1994. 61~66
潘君骅.光学非球面的设计、加工及检验[M].北京:科学出版社,1994.61~66
- Xu Gang, Yang Shimo, Gong Yubing. Optical design of pose and position fine tuning apparatus for secondary mirror in large optical telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(7): 1181~1189
徐刚,杨世模,龚雨兵.大型光学望远镜副镜位姿精调机构的优化设计[J].光学精密工程,2008,**16**(7):1181~1189
- Wen Zhengfang, Zhang Jingxu, Zhang Limin. Research of five degree of freedom adjustment mechanism for secondary mirror [J]. *Journal of Engineering Design*, 2010, **17**(6): 473~478
温正方,张景旭,张丽敏.五自由度次镜调整机构的研究[J].工程设计学报,2010,**17**(6):473~478
- Sun Jingwei, Chen Tao, Wang Jianli *et al.*. Computer-aided alignment for primary and secondary mirrors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(10): 2156~2163
孙敬伟,陈涛,王建立等.主次镜系统的计算机辅助装调[J].光学精密工程,2010,**18**(10):2156~2163
- Zhou Fengli, Xu Zhaodong. Research and application of lens centering technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(s2): 135~138
周凤利,许照东.透镜定心技术的研究及应用[J].红外与激光工程,2006,**35**(s2):135~138
- Yang Licheng, Ling Ning. Development of a high precision eccentricity error measurement instrument with a thrust-shaft system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(6): 39~42
杨李成,凌宁.利用平面止推轴系研制高精度定心仪[J].光电工程,2005,**32**(6):39~42
- You Rui, Wang Jing, Wang Wenge *et al.*. Adjustment and error analysis of the large mirror of test system [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2008, **31**(3): 20~23
尤锐,王晶,王文革等.大口径测量系统主反射镜装调及精度分析[J].长春理工大学学报(自然科学版),2008,**31**(3):20~23
- R. N. Wilson. Reflecting Telescope Optic is I; Basic Design Theory and its Historical Development [M]. Berlin: Springer, 1996. 134~137
- Ming Ming, Wang Jianli, Zhang Jingxu *et al.*. Error budget and analysis for optical system in large telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(1): 104~108
明名,王建立,张景旭等.大口径望远镜光学系统的误差分配与分析[J].光学精密工程,2009,**17**(1):104~108
- Sun Jingwei, Chen Tao, Wang Jianli *et al.*. R-C telescope alignment based on out-of-focus stellar image [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(4): 728~736
孙敬伟,陈涛,王建立等.基于离焦星点图的R-C式望远镜装调技术[J].光学精密工程,2011,**19**(4):728~736
- R. O. Naess. A measuring interferometer for high accuracy alignment[J]. *Appl. Opt.*, 1968, **7**(11): 2315~2317