

doi: 10.3788/gzxb20144306.0622003

二次成形式 Coude 光学系统的设计、检测与装调

明名, 吕天宇, 吴小霞

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要:介绍了一台口径为 1.23 m 光电望远镜的 Coude 光学系统, 通过比较国内外地基大口径望远镜 Coude 光学系统的形式, 结合实际情况, 设计了以离轴非球面反射镜作为二次成像元件的 Coude 光学系统, 并给出了相应的检测和装调的方法. 经实际检测和装调对准后, 对 Coude 光学系统的设计、检测和装调对准过程中的误差进行了分析和比较, 证明了检测与装调方法的可靠性和先进性. 该 Coude 光学系统的焦距为 125 m, 视场为 $1.5'$, 波段为 $0.4\sim 5\ \mu\text{m}$, 系统波像差优于 $\lambda/50$ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$), 实验室内检测波像差为 $\lambda/20$. 装调对准完成后对恒星观测, 用 Shack-Hartmann 波前探测器测量其波前误差, 得到整个望远镜 Coude 光学系统的波像差优于 $\lambda/4$.

关键词:光学望远镜; 光学检测; 二次成像; 光学准直; 非球面; 装调对准

中图分类号: TH75

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)06-0622003-6

Design, Measurement and Alignment of a Coude Optical System with Reimaging

MING Ming, LÜ Tian-yu, WU Xiao-xia

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

Abstract: A 1.23 m aperture optical telescope and its Coude optical system were introduced. Compared several forms of Coude optical systems with internal and overseas ground-based telescope, a kind of optical system was designed that used off-axis elliptical mirror as reimaging element. Then the corresponding measurement and alignment methods of optical system were obtained. After actual measurement and alignment, the wavefront errors among three processes (designed errors, test error and alignment errors) were compared and analyzed, which proved that the method of measurement and alignment were reliable and advanced. The focal length of Coude optical system is 125 meters, field of view is $1.5'$, the band of wavelength is between $0.4\sim 5\ \mu\text{m}$, and the designed RMS wavefront error is less than $\lambda/50$ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$). The RMS wavefront error that measured in the room is less than $\lambda/20$. The telescope was used to observe fixed star, the wavefront was tested with Shack-Hartmann wavefront sensor, and the whole Coude optical system RMS wavefront error of less than $\lambda/4$ was obtained.

Key words: Optical telescopes; Optical testing; reimaging system; Optical collimators; Aspherics; Alignment

OCIS Codes: 220.1140; 220.1250; 220.2740; 220.4830; 220.4840

0 引言

现代光学望远镜的通光口径越来越大, 其功能应用也越来越多, 如空间目标探测、自适应高分辨力成像、光谱成像、白天成像、红外成像与测量等. 这些多功

能应用通过主光学系统和多个子光学系统的对接耦合来实现. 子光学系统的位置有两种选择: 望远镜跟踪机架上的平台和望远镜机下的封闭实验室. 对小口径光学系统来说, 由于跟踪机架结构尺寸较小, 子光学系统一般可以放置在望远镜跟踪机架的平台上, 称之为机

基金项目: 中国科学院三期创新基金(No. O65X32C060)资助

第一作者: 明名(1983-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要研究方向为大口径光电望远镜光学系统设计、检测和装调. Email: 18987610@qq.com

收稿日期: 2013-09-11; 录用日期: 2013-12-05

<http://www.photon.ac.cn>

上光学系统. 它的优点主要是光程短, 保证系统的能量损失很小; 这种机上系统的缺点主要有: 1) 随跟踪机架一起运动, 光学系统稳定性差; 2) 机上光学系统受环境温度影响较大.

对于大口径光学系统来说, 由于跟踪机架尺寸很大, 而机上系统又存在无法避免的缺点, 因此采用将子光学系统放置在机下封闭实验室的形式. Coude 光学系统就成了对接主光学系统和子光学系统不可或缺的一部分, 它的成像质量直接决定了机下终端的成像质量.

国内外地基大口径望远镜几乎都采用 Coude 光学系统的形式与机下终端进行对接. 作为世界上最先进的望远镜之一, 美国研制的 3.67 m 先进光电系统望远镜 (Advanced Electro-Optical System, AEOS)^[1] 的 Coude 光学系统焦距长达 720 m, 视场为 $1'$, 其 Coude 光学系统长达 40 m, 通过 Coude 光学系统与机下的自适应成像、中波红外成像、光谱成像等终端进行对接. 欧洲南天文台研制的 8 m 欧洲超大口径地基望远镜 (Very Large Telescope, VLT)^[2] 的 Coude 光学系统焦距达到了 414 m, 视场为 $2'$, 利用它与机下实验室内各个子光学系统终端进行对接耦合. 国家天文台的 2.16 m 望远镜和云南天文台的 1.2 m 望远镜采用 Coude 光路作为主光学系统与子光学系统终端的承接纽带^[3-4].

本文设计了一种利用离轴椭球面反射镜进行二次成像的 Coude 光学系统, 对该 Coude 光学系统设计了检测和装调对准方案, 并将实际检测结果与设计结果进行了比较.

1 应用类型

1.1 一次成像形式

一次成像形式的特点在于主光学系统和 Coude 光学系统共用焦距, 在 Coude 光路中只添加平面镜来传导光束, 两者成像质量完全相同, 如图 1.



图 1 一次成像形式 Coude 光学系统

Fig. 1 The Coude optical system of single image

美国的 3.67m AEOS 光电望远镜和 3.5m SORT 光电望远镜采用这种形式的 Coude 光学系统.

1.2 无焦形式

无焦形式的特点在于主光学系统的焦距无穷大, 主、次镜将望远镜入瞳口径的平行光束缩束, 在 Coude 光路中添加平面反射镜, 将缩束后的小口径平行光束

导入机下, 如图 2.

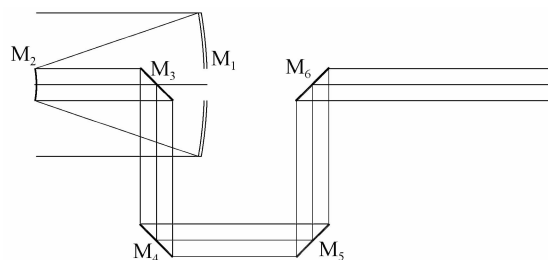


图 2 无焦形式 Coude 光学系统

Fig. 2 The Coude optical system of afocal kind

云南天文台 1.2 m 光学望远镜的 Coude 光学系统采用这种形式.

1.3 二次成像形式

二次成像形式的特点在于主光学系统短焦距, 而 Coude 光学系统为长焦距, 在 Coude 光路中添加二次成像元件来实现.

欧南台的 8 m VLT 望远镜的 Coude 光学系统采用这种形式, 光束经过望远镜主镜、次镜反射后, 在望远镜机架外侧形成小焦比的光束, 通过二次成像元件形成大焦比的光束, 导入机下实验室与子光学系统对接耦合, 其中二次成像元件为离轴非球面反射镜, 如图 3.

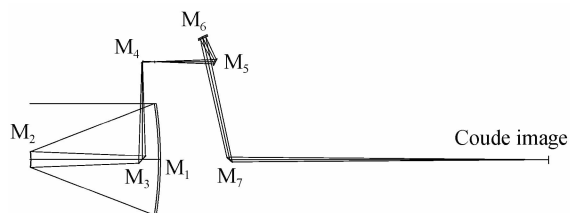


图 3 离轴非球面形式 Coude 光学系统

Fig. 3 The Coude optical system of off-axis aspheric mirror

中国国家天文台的 2.16 m 望远镜也采用二次成像形式的 Coude 光学系统. 与 VLT 望远镜不同的是, 它的二次成像元件选择了同轴非球面反射镜, 如图 4.

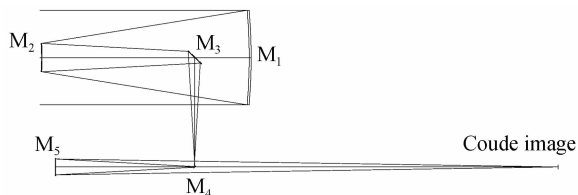


图 4 同轴非球面形式 Coude 光学系统

Fig. 4 The Coude optical system of on-axis aspheric mirror

2 二次成像 Coude 系统

2.1 系统设计

1.23 m 光学望远镜的主光学系统采用卡塞格林形式, 主镜为抛物面反射镜, 次镜为双曲面反射镜, 如图 5.

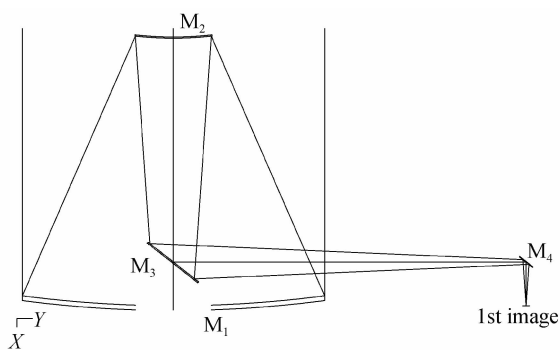


图 5 主光学系统

Fig. 5 The primary optical system

主光学系统的相关参量如表 1。

表 1 主光学系统参量

Table 1 The tolerance of compensator

Tolerance	Range
Diameter	1230 mm
Focal length	10.8 m
Spectral range	0.4 μm ~5 μm
Field of view	1.5'
Back focal length	3 000 mm

主光学系统中,第一像面之后的光束急剧发散,导致 Coude 光路中的元件急剧增大,无法直接将光束导入机下。因此,其 Coude 光学系统的实现只有两种形式:1) 切换次镜,采用一次成像形式 Coude 系统;2) 采用二次成像形式的 Coude 光学系统。

切换次镜方案需要机械结构在两片次镜切换时保持极高的准确度要求(偏心小于 0.02 mm,倾斜小于 5'),因此,1.23 m 望远镜采用二次成像形式的 Coude 光学系统,在第一像面后添加二次成像元件,将系统焦距延长的同时消除像差。考虑到同轴非球面形式会在望远镜立柱一侧形成悬臂梁结构,给望远镜跟踪机架带来不稳定性,二次成像元件采用一片离轴非球面反射镜,使系统焦距扩大为 125 m,然后通过较小口径的平面反射镜将光束导入机下实验室。

经过优化设计后的离轴非球面反射镜面型为椭球面,这是利用椭球面反射镜的两个无像差点来校正二次成像带来的像差,延长系统焦距。如图 6。

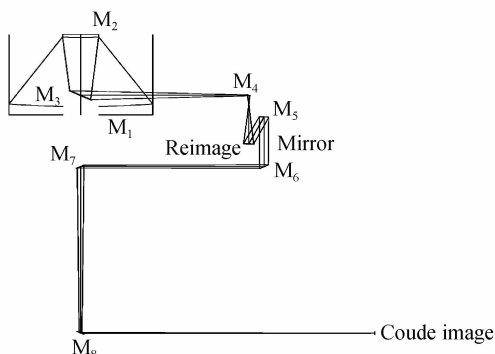


图 6 Coude 光学系统

Fig. 6 The Coude optical system

Coude 光学系统设计的相关参量如表 2。

表 2 Coude 光学系统参量

Table 1 The tolerance of compensator

Parameter	Number
Diameter	1 230 mm
Focal length	125 m
Spectral range	0.4 μm ~5 μm
Field of view	1.5'
Back focal length	8 757 mm

这种二次成像形式的 Coude 光学系统设计只保证视场为 3" 内的成像质量良好,达到衍射极限,在 30"~90" 视场内剩余较大的像散,留给机下的子光学系统去校正。其均方根值(Root Mean Square, RMS)波像差如图 7。

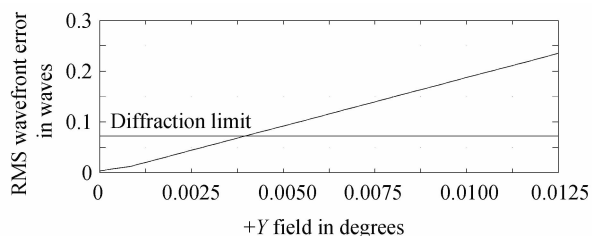


图 7 RMS 波像差

Fig. 7 The RMS wavefront error of Coude optical system

2.2 系统检测与装调

1.23 m 光学望远镜的主光学系统和二次成像系统能够各自单独检测^[5-6],因此,Coude 光学系统的检测分成三个步骤:

- 1) 主光学系统检测;
- 2) 二次成像光学系统检测;
- 3) 两者装调对准后组合检测。

2.2.1 主光学系统检测

1.23 m 光学望远镜主光学系统(Primary Optical System, POS)为卡塞格林形式,主、次镜各自单独检测完毕,其 RMS 面形误差均优于 $\lambda/30$ ($\lambda=0.6328 \mu\text{m}$)。主光学系统的波像差检测采用大口径平面标准反射镜配合 4D 动态干涉仪进行自准直检测^[7-8]。

在检测之前需将主、次镜的光轴对准,采用测微准直望远镜来实现^[9-11]。主镜装入主镜室后固定,次镜装入次镜室后待调整,分别在主镜中孔和次镜顶点位置安放带有中心十字丝的平面透射靶标,利用测微准直望远镜测量两个中心十字丝的偏差,该偏差对应着主、次镜的相对偏心误差,调整次镜室,使偏心误差小于 $\pm 0.03 \text{ mm}$;利用平面透射靶标的自准直特性,通过测微准直望远镜测量主、次镜的相对倾斜误差,调整次镜室,使倾斜误差小于 $\pm 1''$;主、次镜间距误差通过系统测量的三级球差来控制,调整次镜调焦机构使其小于 $\pm 0.03 \text{ mm}$ 。装调完成后,检测过程如图 8。



图 8 主光学系统的检测
Fig. 8 The test of POS

自准直检测得到主光学系统(主、次、三镜)的系统 RMS 波像差优于 $0.14\lambda(\lambda=0.6328\ \mu\text{m})$, 如图 9.

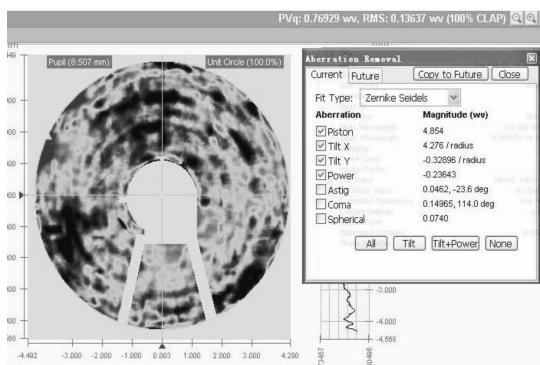


图 9 主光学系统的检测 RMS 波像差
Fig. 9 The RMS wavefront error of measurement for POS

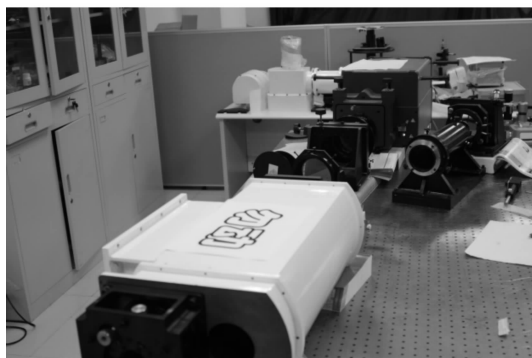


图 11 离轴椭球面组件检测过程
Fig. 11 The test process of off-axis ellipsoidal mirror group

图 12 是二次成像光学系统的自准直干涉检测结果,从图中的泽尼克(Zernike)多项式系数可以看出,系统中残余的最大初级像差项为初级像散,大小为 -0.041λ ,整个二次成像光学系统的 RMS 波像差为 $0.051\lambda(\lambda=0.6328\ \mu\text{m})$,成像质量达到衍射极限.

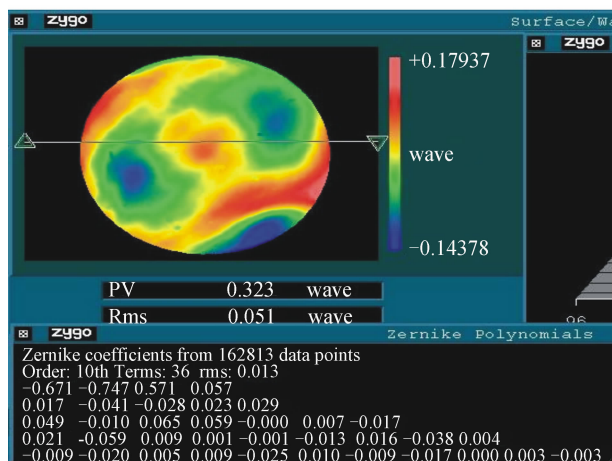


图 12 二次成像系统的检测 RMS 波像差
Fig. 12 The RMS wavefront error of measurement for ROS

2.2.2 二次成像系统检测

二次成像光学系统(Reimage Optical System, ROS)根据其自身特点,利用离轴椭球面反射镜的两个无像差点,采用小口径透镜补偿器和标准平面反射镜组合自准直检测,检测光学系统如图 10.

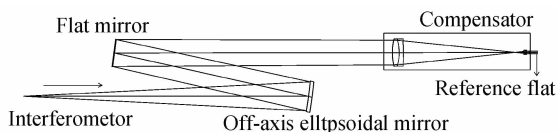


图 10 离轴椭球面组件检测光路
Fig. 10 The test layout of off-axis ellipsoidal mirror group

Zygo 干涉仪发出焦距为 $F/9$ 的会聚光束,经发散后由离轴椭球面反射镜反射后,经过一个补偿器透镜组,最后由小口径标准平面反射镜自准直返回进行干涉检测,如图 11.

表 3 是离轴椭球面反射镜的参量和面形检测结果.

表 3 离轴非球面反射镜面形误差检测准确度要求
Table 3 The accuracy of the aspheric mirror figure error testing

Surface kind	Hyperbolic
Radius	-1 392
Conic constant	-0.707 446
Aperture	90 mm
Figure error	$<\lambda/70(\text{rms}, \lambda=632.8\ \text{nm})$

2.2.3 系统装调对准和组合检测

分别单独完成主光学系统和二次成像系统的检测后,将二次成像系统装配在望远镜机架外侧,与主光学系统进行对接,构成整个 Coude 光学系统(Coude Optical System, COS).

如图 13 所示,离轴椭球面组件安装在望远镜机架

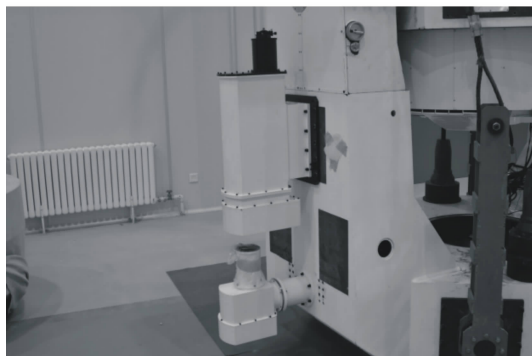


图 13 Coude 光学系统的装调对准
Fig. 13 The alignment of COS

上,首先利用测微准直望远镜作为工具,以主镜、次镜上已经安装对准完毕的靶标作为基准,对三镜的位置进行调整,使其光轴与机械俯仰轴重合。

首先在第一像面放置点光源,利用点光源发出的光束,在机下 Coude 像面位置用 Shack-Hartmann 波前探测器进行波前测量,根据测量的像差,调整光源组件的平移和倾斜,直到像差最小为止,调整完毕后测量得到的装配在机架上的二次成像系统 RMS 波像差为 0.125λ 。

通过调节望远镜轴头的 M_1 反射镜和离轴椭球面组件来实现主光学系统的光轴与二次成像系统的光轴重合。其中 M_1 反射镜的调整自由度为二维倾斜和一维平移,这三个自由度的调整能保证主光学系统的光轴水平与垂直倾斜误差优于 $\pm 10''$,垂直于立柱方向的偏心误差优于 $\pm 0.03\text{ mm}$ 。这时只需要调整离轴椭球面组件平行于立柱面方向的平移就能使主光学系统的光轴与二次成像系统的光轴重合,该方向的偏心误差优于 $\pm 0.03\text{ mm}$ 。

此时望远镜主光学系统与 Coude 光学系统已经装调对准完毕,望远镜对恒星观测,通过机下 Coude 像面放置哈特曼波前探测器进行波前测量,得到系统 RMS 波像差为 0.235λ ,如图 14。

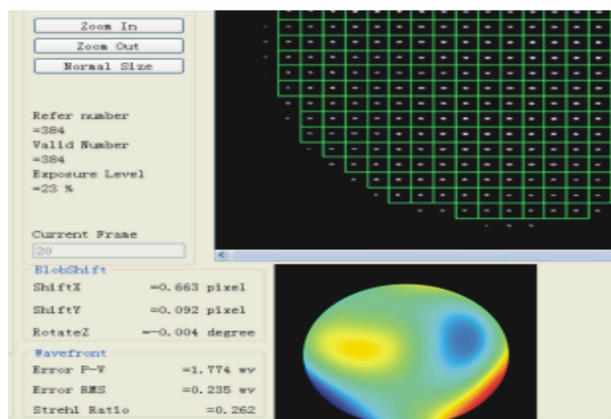


图 14 Coude 光学系统的检测 RMS 波像差

Fig. 14 The RMS wavefront error of COS

表 4 是 1.23m 光学望远镜各个光学系统的实际检测结果。

表 4 $\Phi 900\text{ mm}$ 大视场光学系统的参量要求

Table 4 The parameters of $\Phi 900\text{ mm}$ optical system

Optical system	RMS wavefront
POS	0.14λ
ROS	0.13λ
COS	0.23λ

3 结果分析

在系统设计过程中,主光学系统的 RMS 波像差为 0.015λ ,但在望远镜上装调对准完毕后,利用自准直干

涉检测方法测得的主光学系统 RMS 波像差仅为 0.14λ 。这是由于从设计到装调对准的过程中,系统波像差受到了两个因素的影响:

1) 元件加工的面形误差。其中主反射镜的加工面形误差为 0.033λ ,次反射镜的加工面形误差为 0.033λ ,三镜的加工面形误差为 0.025λ ,这三部分对系统 RMS 波像差的贡献为 0.106λ ;

2) 元件装调对准的误差。其中主、次镜偏心误差为 0.04 mm ,引入的 RMS 波像差为 0.068λ ,倾斜误差为 $15''$,引入的 RMS 波像差为 0.045λ ,这两部分对系统 RMS 波像差的贡献为 0.082λ 。

同样,二次成像系统的波像差受到了三个因素的影响:

1) 元件加工的面形误差。其中离轴椭球面反射镜的加工面形误差为 0.02λ ,平面反射镜(四片)的加工面形误差为 0.025λ ,这部分对系统 RMS 波像差的贡献为 0.108λ ;

2) 元件装调对准的误差。主要是离轴椭球面反射镜组件相对于主光轴的偏心 and 倾斜误差,其中偏心误差为 0.03 mm ,引入的 RMS 波像差为 0.038λ ,倾斜误差为 $10''$,引入的 RMS 波像差为 0.023λ ,这部分对系统 RMS 波像差的贡献为 0.045λ 。

3) Shack-Hartmann 探测器自身的测量误差为 0.05λ 。

通过分析设计、检测与装调对准的相关过程,得到了 1.23 m 光学望远镜 Coude 光学系统的设计波像差、误差产生的波像差和测量所得波像差的相应结果,如表 5。

表 5 设计与实际检测结果的比较

Table 5 The comparison of designed and measured results

	POS	ROS	COS
Designed WF	0.015λ	0.005λ	0.01
Error WF	0.134λ	0.128λ	0.186
Measured WF	0.14λ	0.13λ	0.23λ

由表 5 看出 COS 中测量波像差比误差波像差要大,这是因为测量波像差包括了大气的抖动误差。因此,根据上面的分析可知,1.23 m 光学望远镜 Coude 光学系统的设计、检测和装调对准所达到的准确度均已达到国内先进水平,满足预定要求。

4 结论

本文通过对 Coude 光学系统在国内外地基大口径望远镜中的典型应用介绍,阐述了 Coude 光学系统的关键作用,即作为主光学系统和子光学系统终端对接耦合的纽带。对几种 Coude 光学系统的形式和优缺点进行了分析和总结,以 1.23 m 地基光学望远镜光学系统为例,对其 Coude 光学系统进行了设计,并介绍了相

应的检测方法和装调对准过程,最后通过 1.23 m 望远镜对星观测,对集成后的 Coude 光学系统进行波像差测量,得到了系统 Coude 像面的 RMS 波像差优于 0.236λ 。这种利用离轴非球面进行二次成像形式的 Coude 光学系统在国内地基大口径望远镜上尚未使用,该系统的设计、检测和装调对准方法在国内其它文献中未有提及,具有较强的创新意识。

参考文献

- [1] JENNIFER PATIENCE, BRUCE A, CLAIRE E. High resolution imaging with AEOS[C]. SPIE, 2001, **4490**: 178-186.
- [2] AVILA G. Optical design of the VLT Coude Path for visible-range instrumentation[C]. SPIE, 2008, **7014**: 70145B-1-9.
- [3] ALEXANDRE CABRAL, ANDRE MOITINHO, HOAO COELLO, *et al.* ESPRESSO- design and analysis of a Coude-Train for a stable and efficient simultaneous optical feeding from the four VLT unit telescopes[C]. SPIE, 2012, **8444**: 8444F-1-9.
- [4] JIA Peng, ZHANG Si-jiong. Performance modeling of the adaptive optics system on the 2.16m telescope[J]. *Physics, Mechanics & Astronomy*, 2013, **56**(3): 658-662.
- [5] LEELEN PHELPS, THOMAS RIMMELE, ROBERT P, *et al.* The advanced technology solar telescope coude lab thermal environment[C]. SPIE, 2010, **7733**: 77333U-1-12.
- [6] PHILIPPE B, SAMUEL A, GERARDO A, *et al.* IRIS: an infrared tilt sensor for the VLTI[C]. SPIE, 2004, **5941**: 944-953.
- [7] KENDREW S, HIPPLER S, BRANDNER W, *et al.* GRAVITY coude infrared adaptive optics(CIAO) system for the VLT interferometer[C]. SPIE, 2012, **8446**: 84467W-1-9.
- [8] JASON B, DANIEL V, JOHN D, *et al.* Comparing adaptive optics approaches for NASA LCRD ground station # 2[C]. SPIE, 2013, **8610**: 86100M-1-11.
- [9] DUAN Xue-ting, ZHOU Ren-kui, CHEN Jian-jun, *et al.* Alignment analysis of large aperture RC system based on wavefront aberration test[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 36-38.
- [10] MING Ming, WANG Jian-li, MA Pei-li. A new method for testing the whole lens group of large optic system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 419-423.
明名,王建立,马佩立.一种检测大口径光学系统中透射镜组的新方法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(3): 419-423.
- [11] WANG Fu-guo, WANG Zhi, MING Ming, *et al.* Opto-mechanical structure design, alignment and test of prime focus optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 21-25.
王富国,王志,明名,等.主焦点式光学系统的光机结构设计与装调检测[J]. *光子学报*, 2012, **41**(1): 21-25.
- [12] YANG Fei, MING Ming, WANG Fu-guo, *et al.* Influences of thermal diversification to opto-mechanical system of 1.23m telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 26-29.
杨飞,明名,王富国,等.温度变化对 1.23m 望远镜光机系统的影响[J]. *光子学报*, 2012, **41**(1): 26-29.
- [13] LI Hong-zhuang, WANG Zhi-chen, WANG Fu-guo, *et al.* Method of wavefront error test in the outfield for large aperture telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 39-42.
李宏壮,王志臣,王富国,等.大口径望远镜波像差的外场检验方法[J]. *光子学报*, 2012, **41**(1): 39-42.
- [14] ZHANG Jin-ping, ZHANG Xue-jun, ZHANG Zhong-yu, *et al.* Test of rotationally symmetric aspheric surface using Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(3): 492-498.
张金平,张学军,张忠玉,等. Shack-Hartmann 波前传感器检测大口径圆对称非球面反射镜[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(3): 492-498.
- [15] HU Chun-hui, YAN Chang-xiang. Optical-mechanical assembly based on Gaussian optical homogeneous coordinate transformation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(11): 2353-2359.
胡春晖,颜昌翔.基于高斯光学齐次坐标变换的光机装调[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(11): 2353-2359.