近红外镜头系统的设计与装调

刘婷毓1,2,张景旭1,杨飞1,明名1,吕天宇1

(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;2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:为了使 1.23 m 望远镜具有大视场捕获功能,进行了口径为 200 mm 的近红外镜头的设计与 装调工作。首先,通过光学原理确定同轴反射式光学系统。其次,通过有限元分析方法对比桁架式与 圆筒式主支撑结构、三翼梁与四翼梁式次镜支撑结构在不同工况下的变形,确定桁架式三翼梁支撑结 构。最后通过设计适当的次镜装调结构和选用适当的 CCD 电控平移台,对系统进行装调。装调后对系 统进行检测实验,检测得到系统波前误差 RMS=0.106 18 λ, PV=0.553 62λ(λ=632 nm)。检测结果表明该 近红外镜头足够满足光学设计要求及成像要求。

关键词:近红外系统; 桁架; 圆筒式; 次镜支撑结构; 次镜调整机构 中图分类号:TH751 文献标志码:A 文章编号:1007-2276(2013)03-0669-06

Design, assembly and adjustment of a near-IR camera

Liu Tingyu^{1,2}, Zhang Jingxu¹, Yang Fei¹, Ming Ming¹, Lv Tianyu¹

(1. 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: In order to achieve a large field of view for a 1.23 m large telescope, a near-IR telescope was designed and assembled in this paper. Firstly, an on-axis reflected system was designed based on the optical theory. Secondly, by designing and analyzing the deformation of different support structures for the secondary mirror and the deformation of cylinder type and truss structure, the three-beam secondary mirror support structure and the truss structure were chosen. Finally, the assembly and adjustment was done by a proper secondary mirror adjusting structure and a proper CCD counter-rail. A test was done after the assembly and adjustment, with the result of RMS=0.106 18 λ , PV=0.553 62 λ (λ =632 nm). It is proved that the design of the near-IR system meets the requirements of the optical design and imaging according to the test result.

Key words: near-IR system; truss structure; cylinder type configuration;

secondary mirror support structure; secondary mirror adjusting structure

收稿日期:2012-07-05; 修订日期:2012-08-03

基金项目:国家自然科学基金(D41074126)

作者简介:刘婷毓(1987-),女,硕士生,主要从事大型望远镜结构设计与分析方面的研究。Email:tyliu@mail.ustc.edu.cn 导师简介:张景旭(1965-),男,研究员,博士生导师,主要从事大口径地基望远镜总体结构设计方面的研究。

Email:zhangjx@ciomp.ac.cn

0 引 言

红外辐射又称作红外线,是自然界中任何温度 高于绝对零度(-273.16℃)的物体都在连续不断发出 的光波。其波长范围为0.75~1000 μm。根据波长的 不同,又可分为三个区域:近红外区(0.75~3 μm)、中 红外区(3~25 μm)和远红外区(25~1000 μm)^[1]。由于 其具有比可见光宽很多的波段范围,并且某些波段 在大气中比可见光和紫外线具有更强的穿透力,红 外光被广泛应用于红外天文观测、红外成像、红外探 测、超光谱成像、红外通讯等技术中^[2]。

红外观测与可见光观测不同, 红外天空背景是 一种热辐射效应, 在地面观测时白天和黑夜的热辐 射差别不大。与可见光望远镜相比, 红外望远镜不受 白天夜晚的限制, 观测能力极大提高^[3]。因此红外望 远镜的研制已成为现在空间天文探测的热点。

为了使 1.23 m 望远镜具有大视场捕获功能^[4], 文中开展了口径为 200 mm 的近红外镜头的设计与 装调,在成功实现白天成像功能的同时,实现了镜头 的结构轻量化、高稳定性、便于装调等优点。

1 设计原理

1.1 光学设计原理

红外镜头常用的光学系统有折射式、反射式两种。折射式红外镜头的特点是视场大、无遮拦损失, 像差易通过光学设计校正,但大口径的红外镜头成 本高且不易制作、光能损失高,通常用于 250 mm 以 下的口径。反射式红外镜头的特点是无色差,成本 低、易制造,多波段系统可共用口径,但其轴外像差 较大且有遮拦损失^[5]。由于文中研究的 200 mm 口径 近红外镜头主镜尺寸相对较大,采用折射式系统制 造难度大、成本高,且镜子本身重量大,难以达到轻 量化的目的;若采用反射式系统,制造成本低,且质量 轻,并且通过适当的调整机构又可消除反射式系统的 带来的像差。因此,综合考虑,文中研究的 200 mm 口 径近红外镜头选用反射式光学系统。

反射式光学系统中有同轴式、离轴式两种。同轴 式光学系统的特点是精度高,易装调,但系统有遮拦 损失;离轴式光学系统的特点是系统无遮拦,但光学 元件的支撑结构加工精度低,不易装调,且所占空间 大。考虑到采用离轴式光学系统会增加红外镜头的 装调难度,且镜头总体尺寸大,对红外镜头随望远镜 一同进行方位及俯仰运动带来不便,所以选用同轴 式光学系统。

经以上分析与对比,最终设计得出文中研究的 近红外镜头采用卡塞格林反射、同轴式光学系统。系 统参数见表1。

表1 红外镜头系统参数

| Tab.1 | Parameters | of | the | near - | IR | system |
|-------|------------|----|-----|--------|----|--------|
|-------|------------|----|-----|--------|----|--------|

| Parameters | Value |
|----------------------------|---------|
| Pure aperture/mm | 200 |
| Abscured ratio | 0.3 |
| Field of view/(') | 57 |
| Focal length/mm | 1 000 |
| Waveband/µm | 0.9-1.7 |
| Image surface dimension/mm | 16.4 |

1.2 结构设计原理

红外镜头设计时首要考虑的是减小视场内的杂 散辐射。杂散辐射,也称为杂光,是指扩散于光学系 统像面或者探测器接收面上的非目标光线或非成像 光线辐射能。杂散光降低了像面的对比度和调制传 递函数,使整个像面的层次减少,清晰度变坏,甚至 形成杂光斑点,严重时使目标图像被杂散光噪声所淹 没^[6]。影响红外镜头的杂散辐射有两点来源:(1)物空 间视场以外的杂散辐射。(2) 红外系统本身的辐射^[7]。 针对物空间视场以外的杂散辐射,通常采用的光学 结构为遮光筒。而针对红外镜头本身的辐射,通常采 用对系统内部的结构件进行染料染黑或喷黑漆处 理,可以有效地吸收系统自身的辐射。

红外镜头设计时仍应注意的是,在次镜机构的 设计中次镜室应置于次镜的背面,从而防止次镜框 的热辐射进入视场^[1]。

在卡塞格林光学系统中,自主镜反射来的光线 要经过次镜的二次反射,最终成像在焦点上。主镜的 支撑结构一般较容易满足要求,薄弱环节在次镜的 支撑结构。通常次镜是由若干个薄梁片支撑。梁片的 数量越多,其支撑刚度越大,但系统遮拦越大;相反,

梁片的数量过少,其支撑刚度很难满足要求。常见的 结构是三翼梁、四翼梁支撑。

除了次镜的支撑结构,望远镜的主支撑结构也 至关重要。其直接关系到主镜与次镜之间的位置关 系,及次镜相对于主镜的稳定性。望远镜主支撑结构 形式主要包含两种—圆筒式及桁架式。圆筒式结构 刚度高,但重量大、抗风阻能力弱,普遍应用于小型 的望远镜中 18。而桁架式结构以其质量轻,结构简 单,易加工、抗震能力强、拆装方便及运输便利等特 点在大型望远镜结构设计中被广泛应用。

200 mm 近红外镜头的主要光学元件有: 主镜、 次镜、校正镜组、滤光片。图1为其光路图。主、次镜 及校正镜、滤光片均通过相应的镜子支撑结构来实 现其功能。



Fig.1 Optical path

2 仿真分析

基于上述理论知识,结合近红外镜头的特点,对 比分析了三翼梁及四翼梁次镜支撑方案、圆筒式及 桁架式镜头结构,对镜头进行了合理的设计。

2.1 结构仿真

根据近红外镜头的特点及光学设计参数,理论 设计圆筒式结构及桁架式结构如图 2~3 所示。



图 2 圆筒式结构 Fig.2 Cylinder type configuration



图 3 桁架式结构 Fig.3 Truss configuration

主镜通过镜座、镜室及压块固定,次镜以三翼梁 固定为例,通过结构仿真计算得,在采用相同材料的 情况下,设计得到圆筒式结构的红外镜头总质量为 41.89 kg, 而桁架式结构的镜头总质量为 23.99 kg, 相 比较圆筒式结构质量减少了42.7%。

2.2 静力学仿真

利用有限元软件 Hyper Mesh 对支撑次镜的三翼梁、 四翼梁进行有限元建模。分析得自重作用下,当光轴垂 直时,三翼梁沿光轴方向偏移1.688×10⁻⁴mm(见图 4(a)), 四翼梁沿光轴方向偏移3.07×10⁻⁴mm(见图 4(b));





(b) 光轴垂直时四翼梁变形 (a) 光轴垂直时三翼梁变形图 (a) Deformation of the three-beam (b) Deformation of the cross-plate structure when optical axis is vertical

structure when optical axis is vertical





(c) 光轴水平时三翼梁变形

structure when optical axis is horizontal

(d) 光轴水平时四翼梁变形 (c) Deformation of the three-beam(d) Deformation of the cross-plate

> structure when optical axis is horizontal

图 4 三翼梁、四翼梁变形图

Fig.4 Deformations of the three-beam structure and the cross-plate structure

当光轴水平时, 三翼梁沿垂直于光轴方向偏移 2.274×10⁻⁵mm(见图 4(c)), 四翼梁沿垂直于光轴方 向偏移 1.753×10⁻⁵ mm(见图 4(d))。

分析得出,三翼梁与四翼梁的变形量非常小,可 以忽略不计。在考虑降低遮拦比及轻量化的情况下, 选用三翼梁结构支撑次镜。

对圆筒式结构及桁架式结构分别进行有限元建 模。以主镜为基准,当光轴水平时,分析两种结构在 自重作用下的变形。分析得到,对于圆筒式结构,次 镜相对于主镜的下沉量为 3.487×10-4 mm,圆筒结构 变形云图如图 5 所示:对于桁架式结构,次镜相对于 主镜的下沉量为 8.922×10-4 mm, 桁架式结构变形云 图如图6所示。



图 5 圆筒式自重变形 Fig.5 Deformation of the cylinder type configuration



图 6 桁架式自重变形 Fig.6 Deformation of the truss configuration

2.3 热力学仿真

近红外镜头系统在-30~30℃环境下工作。理想 工作温度为 20℃。经有限元分析得到,镜筒式结构 及桁架式结构在 40 ℃、-40 ℃的极限温度下的最大 变形量见表 3, 主次镜轴向间距的变化量见表 4。变 形云图如图7所示。

表 3 最大变形量

Fig.3 Maximum deformation

| | Cylinder type/mm | Truss/mm |
|---------|-----------------------|-----------------------|
| 40 °C | 6.18×10 ⁻² | 6.17×10 ⁻² |
| - 40 °C | 1.85×10 ⁻¹ | 1.85×10 ⁻¹ |

| | 表 4 | 主次镜 | 轴向间距 | E变化量 | |
|-------|--------|---------|----------|---------|---------|
| Fig.4 | Change | of the | distance | between | primary |
| | mirror | and see | condary | mirror | |
| | | | | | |

| | Cylinder type/mm | Truss/mm | |
|---------|------------------------|------------------------|--|
| 40 °C | 5.843×10 ⁻² | 5.911×10 ⁻² | |
| - 40 °C | 1.753×10 ⁻² | 1.733×10 ⁻² | |





(a) 40 ℃时圆筒变形图 (a) Deformation of the cylinder (b) Deformation of the cylinder type configuration at 40 °C

(b) -40 ℃时圆筒变形图 type configuration at $-40 \,^{\circ}{\rm C}$



图 7 圆筒式及桁架式结构热变形图 Fig.7 Thermal deformations of cylinder type and truss configuration

2.4 结 论

根据设计要求,近红外镜头次镜的下沉量要求 不超过 0.05 mm。静力学分析结果表明,圆筒式结构 与桁架式结构、三翼梁与四翼梁均能满足设计要求。 热力学分析结果表明,在工作环境极限温度下,圆筒 式结构与桁架式结构的热变形量较小,且基本相同。 综合对比后,选用桁架式三翼梁结构,在相同的系统 刚度及热变形下,实现了系统的轻量化,降低遮拦比。

3 装调实验

望远镜在光学设计、加工制造等方面都存在不 可避免的误差;当温度变化时,结构的热变形将引起 系统的焦面变化。为了降低这些误差对成像质量的 影响,通过光学系统的装调,将误差降到最小。因此 在结构设计时,要考虑除固定基准以外的所有光学 元件的可调性。

3.1 次镜的装调

根据红外系统结构的特点,设计得到次镜座的 尺寸小于次镜。安装次镜时,通过将其粘贴在次镜座 上,防止了次镜框的热辐射进入视场,同时实现了次 镜座对光线的零遮拦。

系统设计时以主镜为基准,次镜相对主镜进行调整。次镜光轴相对于主镜光轴的未对准会产生离焦、 偏心、彗差等像差。次镜光轴相对于主镜光轴的位置 和姿态误差包括 Ζ 轴方向的离焦量 d、沿 X、Y 方向的 横向偏移 I_x、I_y 和绕 X、Y 的倾斜 α_x、α_y,如图 8 所示。



图 8 主次镜光轴之间的位置和姿态误差 Fig.8 Position and errors between primary mirror and secondary mirror

该设计中采用以下调整机构,如图 9 所示,通过 次镜座背部三个调整螺钉调整次镜绕 X、Y 的倾斜



图 9 次镜调整机构 Fig.9 Adjusting device for the secondary mirror

α_x、α_y及离焦量 d; 径向 3 个调整螺钉可以调整次镜沿 X、Y 方向的横向偏移 l_x、l_y, 实现了次镜五自由度的调 整。6 个调整螺钉规格为 M3×0.5,螺钉转动一圈,调整 距离为 0.5 mm,实现了满足精度的次镜调整^[9]。

3.2 CCD 的调整

由于机械结构在不同的温度下会发生相应的 热变形,所以在使用过程中要对系统进行调焦。该 系统通过在 CCD 上安装在电控平移台来调整由于 热变形所引起的离焦。系统的调焦范围为-0.65~ 1.64 mm,调焦精度为±0.03 mm。电控平移台调焦精 度 *ε*应满足:

$$\varepsilon = \frac{\alpha \times i \times p}{360} \le 0.03$$

式中:α为电机步进角;i为转速比;p为导程。

计算得出满足系统调焦精度的电控平移台导程 p≤6mm。选择某型号电控平移台,该电控平移台的 参数见表5。

表5 电机参数

Tab.5 Parameters of the electromotor

| Range/mm | Lead/mm | Precision | Electromotor |
|----------|---------|-----------|---------------------|
| 50 | 1 | <0.003 | 42 step motor(1.8°) |

4 系统检测

通过以上的结构设计与装调,获得近红外镜头 实物如图 10 所示。



图 10 近红外镜头实物图 Fig.10 Configuration of the near-IR system

次镜调整结束后,由于实验条件有限,采用波长 为 632 nm 的干涉仪对红外镜头进行检测,检测结果 如图 11 所示,实验结果显示系统波前误差 RMS= 0.106 18 λ, PV=0.553 62 λ。



通过调整结果可以看出,近红外镜头的设计足 够满足系统成像要求。

5 结 论

根据近红外镜头结构设计特点,对圆筒式结构及 桁架式结构进行了结构设计、静力学及热力学仿真分 析,对比得到,在 200 mm 的镜头尺寸下,三翼梁与四 翼梁结构、圆筒式结构与桁架式结构的刚度、热稳定 性等方面均能足够满足系统的设计要求,但是桁架三 翼梁式结构达到了 42.7%的轻量化率。因此文中研究 的 200 mm 近红外镜头采用桁架式三翼梁结构。

系统装调过程中,主要对次镜进行装调,对 CCD进行调整。通过设计相应的次镜安装结构及调 整机构,选用适当的 CCD 调焦平台,获得了满足系 统要求的成像质量。

实验验证得到,桁架式结构的镜头能获得满足 要求的观测图像。说明该红外镜头的设计足够满足 光学系统的要求,可成功实现近红外观测功能。

参考文献:

- Paul R Yoder. Opto-mechanical Systems Design [M]. New York: Taylor& Francis, 2006: 460-470.
- Wang Zhongsu, Zhai Yan, Mei Gui, et al. Design of flexible support structure of reflector in space remote sensor [J].
 Optics and Precision Engineering, 2010, 18(8): 1833-1840.

(in Chinese)

王忠素, 翟岩, 梅贵, 等. 空间光学遥感器反射镜柔性支撑 的设计[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(8): 1833-1840.

- [3] Zhou Chao, Yang Hongbo, Wu Xiaoxia, et al. Structural analysis of ground-based large telescope [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(1): 138-145. (in Chinese) 周超, 杨洪波, 吴小霞, 等. 地基大口径望远镜结构的性能 分析[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(1): 138-145.
- [4] Zhou Chao, Wang Zhi, Zhao Yongzhi, et al. Thermal control for ground-based large telescope [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10): 2774-2778. (in Chinese) 周超, 王志, 赵勇志, 等. 地基大口径望远镜热控技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2774-2778.
- [5] Fan Lili, Zhang Jingxu, Jiang Hao, et al. Design of the primary mirror support of equatorial telescope [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 476-479. (in Chinese) 范李立,张景旭,姜皓,等.极轴式望远镜主镜支撑设计 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 476-479.
- [6] Chen Fulin, Zhang Jingxu, Wu Xiaoxia, et al. Supporting structure of 620 mm thin primary mirror and its active surface correction [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 1022-1029. (in Chinese) 陈夫林,张景旭,吴小霞,等. 820 mm 薄镜面的主动支撑结 构及面型矫正[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(5): 1022-1029.
- [7] Li Zhilai, Xu Hong. Design of rectangular space mirror and its support structure [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 1039-1047. (in Chinese)
 李志来, 徐宏. 长条空间反射镜机器支撑结构设计 [J]. 光 学 精密工程, 2011, 19(5): 1039-1047.
- [8] Xin Hongwei, Yang Jinsong, Gao Minghui, et al. Support design for secondary mirror of high resolution space telescope [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(9): 1724-1729. (in Chinese)
 辛宏伟,杨近松,高明辉,等.高分辨力空间遥感器次镜支 撑设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1724-1729.
- [9] Xin Hongwei, Guan Yingjun, Li Jinglin, et al. Design of support for large aperture rectangular mirror [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1560-1568. (in Chinese) 辛宏伟, 关英俊, 李景林, 等. 大孔径长条反射镜支撑结构 的设计[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(7): 1560-1568.