

卡塞格林式离轴反射系统准直仪的设计与装调方法

徐正奎¹, 王春兴¹, 王世锦², 王贵全¹, 蔡顺文¹, 李晓斌¹, 黄 声¹

(1. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223; 2. 重庆军代局驻昆明地区第一军代室, 云南 昆明 650032)

摘要: 根据生产需要, 设计、生产了焦距为 8 m 的卡塞格林式离轴反射系统准直仪, 并构建先进装调方法精准装校, 通过干涉图像和干涉条纹的判读, 使卡式准直仪系统的成像质量接近设计水平, 解决生产中准直仪最长焦距只有 3 m 而无对应的产品所需空间频率的红外鉴别率测试靶板问题。

关键词: 离轴反射系统; 四杆靶; 装调方法

中图分类号: TP274

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2020)12-1164-06

Design and Development of a Cassegrain Off-axis Reflection System Collimator

XU Zhengkui¹, WANG Chunxing¹, WANG Shijing², WANG Guiquan¹, CAI Shunwen¹, LI Xiaobin¹, HUANG Sheng¹

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China; 2. The First Military Commissary Department Garrisoned in Kunming of Chongqing Military Commissary Bureau, Kunming 650032, China)

Abstract: We design and develop a Cassegrain off-axis reflection system collimator with a focal length of 8 m according to production requirements and construct an advanced installation and adjustment method to accurately calibrate it. Through the interpretation of images and interference fringes, the imaging quality of the collimator system is found to be close to the designed value. We solve the problem of the infrared discrimination test target board in production because the longest focal length of the existing collimator focal length is 3 m, and there is no corresponding spatial frequency required by the product.

Key words: off-axis reflection system, four targets, alignment method

0 引言

平行光管检测设备准直仪按光学透镜形式分为透射式系统和反射式系统。用于红外产品检测所需的大口径准直仪, 因透射式所需透镜直径大, 红外透镜材料需特制成本高且加工困难, 因此反射式系统是最佳选择。反射式系统准直仪按光学结构形式分为牛顿式反射系统和卡塞格林式反射系统(简称卡式反射系统), 牛顿式反射系统只由一片离轴抛物面反射镜与平面反射镜构成, 卡式反射系统是由一片离轴抛物面主反射镜、一片双曲面次反射镜和平面反射镜构成^[1]。

反射式系统与透射式系统相比, 具有易于轻量化、对温度变化不敏感、无色差等诸多优势, 因此大口径长焦距的准直仪中常采用反射式系统结构。

卡式反射系统与牛顿式反射系统相比, 具有成像质量好, 像平面与光轴垂直, 焦距长体积小, 可小型

化的优点。且保持了牛顿式反射系统的优点, 光阑设在离轴抛物面主反射镜顶点时不产生畸变, 同时校正其他像差。焦距长而外形尺寸短(3 m 焦距牛顿式准直仪的工作台面长度不少 4 m, 而 8 m 焦距卡式准直仪的工作台面长度只需 2 m)。

现生产所用的牛顿式准直仪最长焦距为 3 m, 随着产品观察远距离目标的要求其焦距相应的要长, 所需空间频率就高, 红外用测试靶即四杆靶线宽对应变窄, 而制造二三十微米线宽的四杆靶制造费用上万元, 有些线宽细到十几微米或几微米级的四杆靶制造成本高昂。而对应的空间频率 8 m 焦距卡式准直仪比 3 m 焦距准直仪的线宽增加 2.67 倍, 从而使制造四杆靶成本大幅降低, 保证产品所需的空间频率完成测试。

卡式系统结构不仅用于大口径长焦距的准直仪, 还用于空间多光谱成像与远距离探测系统(焦距长口径大)的结构中镜头的前部, 在国内也有多家公司用

收稿日期: 2020-04-03; 修订日期: 2020-09-07.

作者简介: 徐正奎(1963-), 男, 高级工程师, 主要从事光学系统设计, E-mail: xzkkm@126.com.

于准直仪,其焦距有16m的,本文所述自主产权、焦距为8m的卡式准直仪,旨在解决生产中长焦距产品测试靶板加工难度大的问题。

1 技术指标

根据使用要求设计的卡式反射系统准直仪参数如表1所示。

表1 光学性能参数表

Table 1 Optical performance parameters	
Parameter	Value
Working band	0.5-12 μm
Focal length	8000 mm
Diameter of the pupil	φ500 mm
f#	16
Field of view	0.6°
off-axis quantity	450 mm
Primary mirror diameter	φ520 mm

2 系统设计

2.1 方案确定

离轴反射系统用的离轴抛物面反射镜(如图1所示)的主要参量有3个:通光孔径 D 、母体抛物面的焦距 f 和离轴量 h 。焦点的出射点 d 是重要的,先要确定 d 值,当 d 值很大,又要维持一定的主、次反射镜焦距比值不太大,则势必要增大次反射镜的放大率,从而增大次反射镜口径。如果不想增大次反射镜口径,只能增大主反射镜的相对口径,相应次反射镜放大率增加。离轴量的增加会带来抛物面主反射镜出射光的发散程度从而导致像差增大,因此影响离轴抛物面反射镜准直特性的主要因素有离轴量、有效孔径和焦面出射点的位置等^[2]。

根据以上的分析选用卡式反射系统,而轴对称抛物面反射镜具有对无限远目标成像无球差的重要优点,它却存在很大的彗差(与孔径的平方成比例),且有中心遮拦(中心遮拦随视场增加而加大)。离轴抛物面反射镜保持了轴对称抛物面反射镜的优点,克服了中心遮拦等缺点,但随之而来的问题是像差特性导致离轴抛物面反射镜的成像面不再垂直于光轴,而是相对光轴有一定角度倾斜,这是光学系统设计人员需考虑的问题,合理确定光阑位置和像面倾斜角度,可使成像质量得到大幅提高^[3]。

主反射镜相对口径的选择和多方面因素有关,像差是随相对口径的一次或二次方增加,在经典卡式反射系统中,主要和系统相对口径有关。若系统焦距长,主镜相对口径可取小一些,即焦距长一些易加工。若

系统焦距很短,主反射镜焦距就须很短,从而相对口径就大。从缩短镜筒长度来说,当然主反射镜相对口径愈大愈有利,但加工难度增加,降低主、次反射镜的相对口径对于设计及加工都是十分重要的。

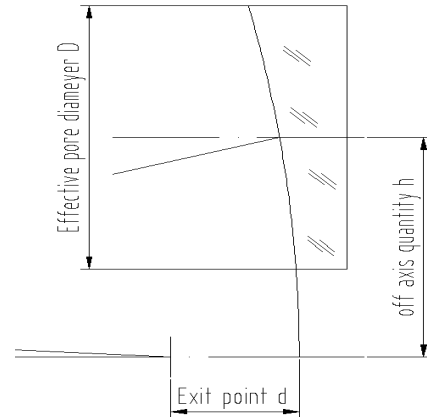


图1 抛物面的参数示意图

Fig.1 Parabolic parameter sketch

2.2 设计及结果

根据使用需求主反射镜的有效直径取φ500mm,其外径取φ520mm,相对孔径取1:3.3,从布局考虑出射点 d 取为0。根据卡式系统及像差特性,确定次反射镜,并由光学设计软件CODEV优化,得出系统结果。

1) 卡式反射系统结构

主反射镜焦距:1650mm,次反射镜焦距:312.5mm,有效直径φ230mm,外圆直径φ240mm。两镜间隔:1402mm,结构图如图2。

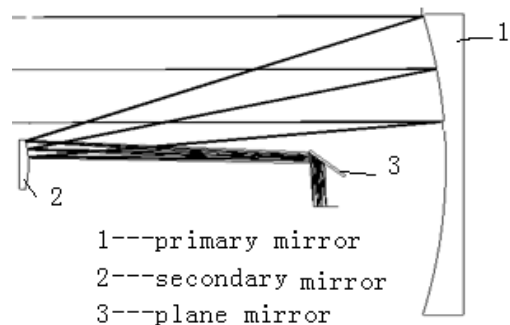


图2 卡式反射系统二维有效口径结构图

Fig.2 Two-dimensional structure of Cassegrain

为保证系统像质要求,离轴卡式准直系统的RMS设计值为 $\lambda/5$,一般要求光学零件面形均方根值(root mean square, MRS)为 $\lambda/8$,若要求波峰波谷差值(peak to valley, PV)为 $\lambda/8$ 则难以达到。

两反射镜加工完后实测主反射镜的焦距为1649.32mm,次反射镜的焦距为312.59mm,为消除由于加工透镜产生的半径误差带来影响系统的像质

问题，在 CODEV 软件将两反射镜间的间隔进行调整 0.8，保证了与原设计的成像质量和调制传递函数 (modulation transfer function) MTF 值不变，总焦距变为 7996.91 mm，与设计理论值 8000 mm 相差 0.0386%。

2) 卡式反射系统的二维模拟图

由于卡式系统主、次反射镜的组合，使其长度小于系统的焦距。由以上参数的二维图如图 3 所示。

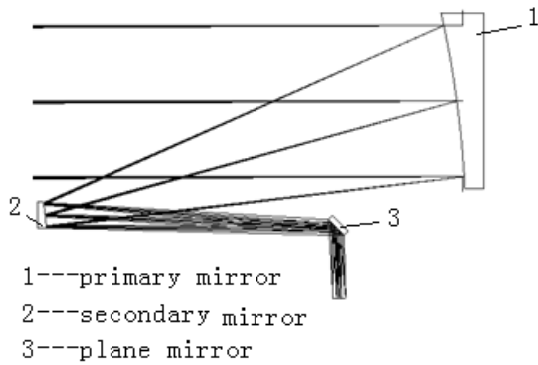


图 3 卡式反射系统实际二维模拟图

Fig.3 Actual two-dimensional simulation of Cassegrain reflector system

3) 卡式反射系统的 MTF 图

卡式反射光学系统成像质量优于牛顿式反射系

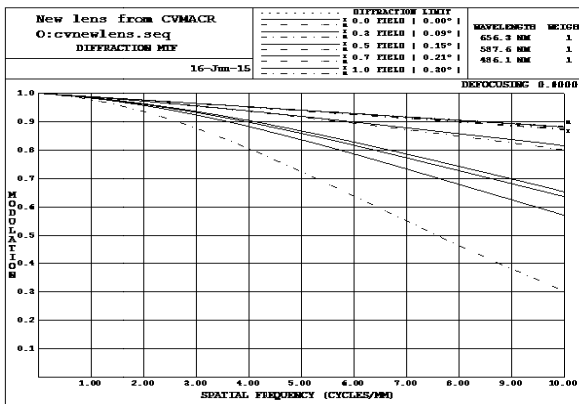


图 4 卡式反射系统用于白光波段的 MTF

Fig.4 MTF of white light band using card reflection system

统，用于白光波段时的 MTF 为 0.5 以上，只有全视场的弧矢方向差一些为 0.3，是因离轴抛物面反射镜在弧矢方向上结构不对称引起的，如图 4 所示。该系统用于红外波段时的 MTF 几乎都接近射线，全视场的弧矢方向也是差 0.1 左右，如图 5 所示。

2.3 杂散光分析及抑制措施

与同轴反射系统相比，离轴反射系统的主反射镜中心不存在遮拦，因而无法像同轴反射系统那样在主反射镜中心开孔处加入遮光罩，且离轴反射系统光路折叠紧密，留给消杂光结构设计空间小^[4]。与同轴反射系统不同，离轴反射系统在弧矢方向结构不对称，因此杂光的传播路径和挡光结构也不对称。由于主、次反射镜的光线间距较小，内部挡光结构的装调较难，因此在次反射镜与平面反射镜之间设计了挡板加工成光阑以抑制系统的杂散光，如图 6 所示。次反射镜为便于检测和装配，按 $\phi 240\text{ mm}$ 直径加工，其有效口径范围只是一部份，为避免未用面积对光线入射和反射产生的散射（即对系统来说是杂散光），因此在次反射镜前做了一个保护罩，作遮光光阑的作用，如图 7 所示。

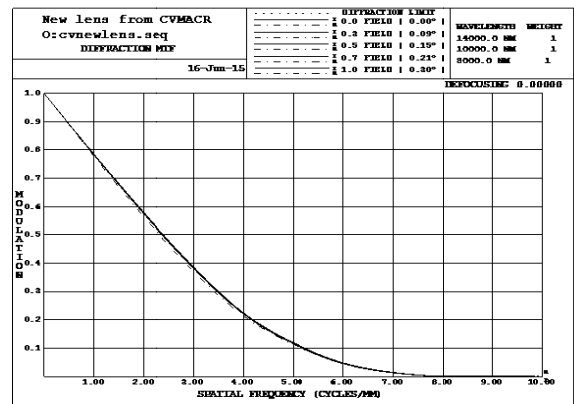


图 5 卡式反射系统用于红外波段的 MTF

Fig.5 MTF of infrared band with card reflection system

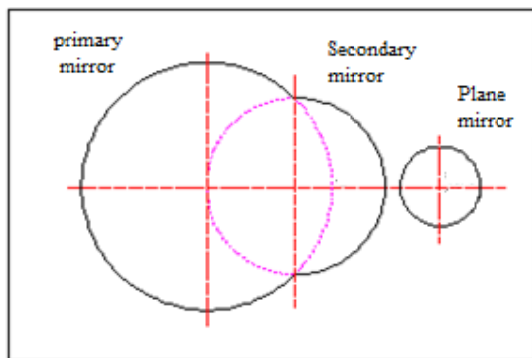


图 6 卡式反射系统的光阑图

Fig.6 Bar diagram of Cassegrain reflector system

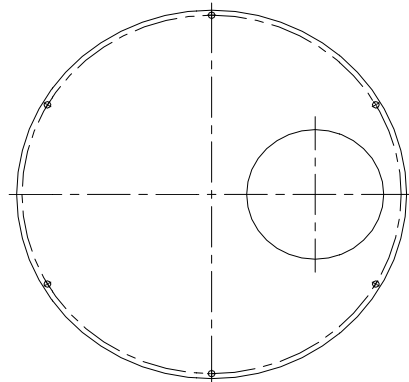


图 7 卡式反射系统的次镜保护罩

Fig.7 Secondary mirror shield for Cassegrain reflector system

3 卡式反射系统的装调

牛顿式反射系统是由离轴抛物面反射镜起作用,平面反射镜只为转折光路,其像差特性导致成像面不再垂直于光轴,装调时需考虑好像面的倾斜方向和焦面位置(靶标在焦点上)。

卡式反射系统由主、次反射镜的组合使用并相互补偿,使系统成像质量非常好,装调时在保证主、次反射镜空间位置的同时也要保证二者间的轴向位置。

3.1 构建的调校测试系统

利用 ZYGO 激光干涉仪原理构建的调校测试系统进行装调,以达到理想值。

构建的调校测试系统原理如图 8:调校测试系统的原理是激光干涉仪发出准直平行光线,由激光干涉

仪的物镜汇聚到焦面出射,其焦面与卡式反射系统焦面 5 重合,光线经序号 4、3、2 组成的卡式反射系统准直仪射出平行光到序号 1,经序号 1 反射按原路返回并聚焦在焦面处,与激光物镜汇聚的焦点重合叠加产生干涉而形成干涉条纹,根据干涉条纹判断准直仪的成像质量好坏,从而确定卡式反射系统准直仪的装调是否达到设计要求。

图 9 是构建的调校测试系统原理实物图。

3.2 卡式反射系统装调

1) 初步装配

在卡式反射系统结构设计时,充分考虑系统的装配和调校,将主反射镜装配后固定不作调节环节,在次反射镜的安装部位设置多维调节机构。按照图纸布局要求在光学平台上进行初步装配,使各反射镜的空

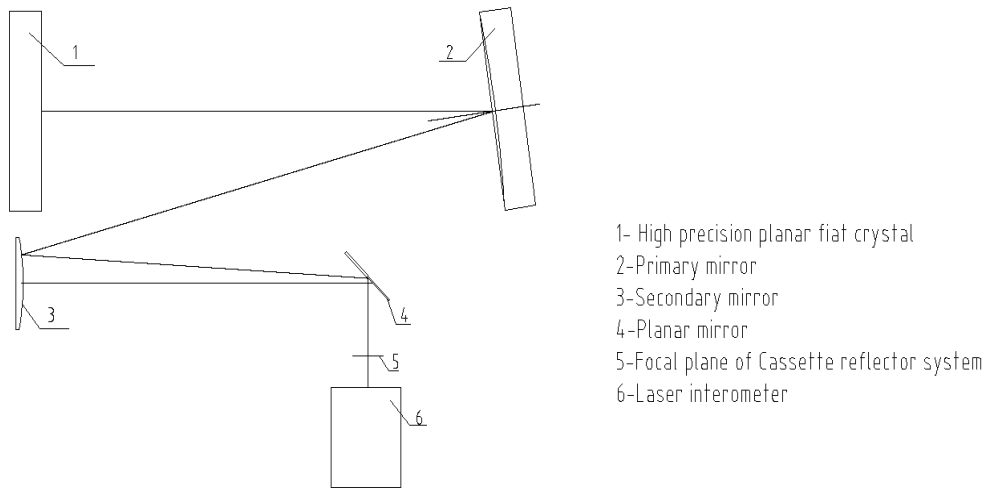


图 8 调校测试系统原理图

Fig.8 Principle diagram of calibration test system

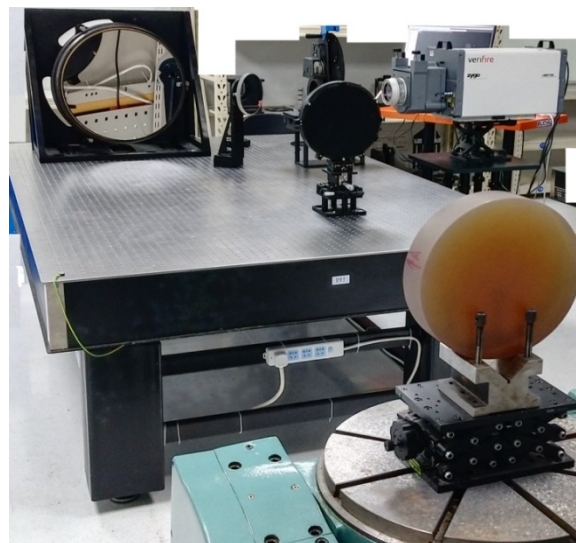


图 9 调校测试系统实物图

Fig.9 Physical diagram of calibration and testing system

间位置基本在理论值,用光学调试方法,使主反射镜和平面反射镜相对光轴垂直。主反射镜体积大且重量也大,装调后固定其位置。次反射镜小而轻,使其在空间能够多维调节(上下前后的平移和水平俯仰的旋转),这样系统的调校轻便,消除两反射镜的空间状态、轴向位置及装配后将形成累积误差,初装不能调试很好,然后通过构建的调校测试系统进行精准调试和校正,消除累积误差。

2) 配件要求

高精度平面平晶的面型精度将影响卡式反射系统干涉条纹,面型精度越高影响越小,因此其面型精度(平面度)RMS要求在 $\lambda/20$ ($\lambda=0.6328\mu\text{m}$)以上,以免将其误差叠加到调试系统中。

特别强调的是调校测试系统调试准直仪是能使主、次反射镜安装在理论设计位置,两反射镜的匹配最好,成像质量达到最优。但因主、次反射镜的加工面型误差过大,不能将卡式系统调得很好。

3) 装调过程需注意如下事项:

①主、次反射镜间以间距偏差为主

图 10 为主反射镜和次反射镜间的轴向位置 1401.2 mm 及离轴量有误差的成像图,图 11 是其干涉条纹图。调节两反射镜间的轴向、左右位置使图 11 沿图像长方向变得越来越短。

②主、次反射镜间相对位置偏差

激光平行光束射入离轴抛物面反射镜时,当抛物面反射镜绕激光平行光轴旋转,通过调节激光干涉仪使得平行光(相当于斜入射的光)的反射像点不动,则表明抛物面反射镜的光轴与激光干涉仪的出射光轴重合,否则像点在封闭曲线上周期转动^[5]。

图 12 是主反射镜与次反射镜相对光轴有偏差的成像图,图 13 是其干涉条纹图。主反射镜装配时基本校正,调整次反射镜上下位置或左右的旋转,并微调次反射镜的轴向位置,使图上的图像点近似成为圆点,微动高精度平晶使两个像重合产生干涉,形成干涉条纹图。



图 10 间距偏差的成像图

Fig.10 Imaging of spacing deviation



图 11 间距偏差的干涉条纹图

Fig.11 Interference fringe pattern with spacing deviation



图 12 反射镜微小倾斜的成像图

Fig.12 Imaging of a mirror with a slight tilt

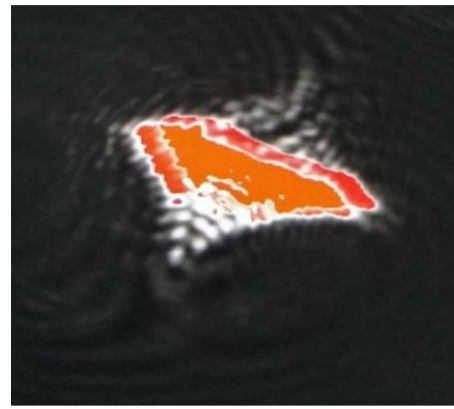


图 13 反射镜微小倾斜的干涉条纹

Fig.13 Interference fringe pattern of mirror with slight tilt

③卡式反射系统调校好的情况

图 14、15 说明,消除了主反射镜或次反射镜相对光轴的微小倾斜,保证了离轴抛物面反射镜的离轴量和主、次反射镜间距在理论位置后,微转高精度平

面平晶使两个像重合产生干涉出现的干涉图,微调激光干涉仪的焦点位置,使干涉图上的干涉条纹达到最少,调校测试系统调校的RMS与设计值相差在 $\lambda/4$ 内,这种情况下说明卡式反射系统装调满足设计要求。



图 14 调校好的成像图
Fig.14 Fine-tuned image



图 15 调校好的干涉条纹图
Fig.15 Adjusted interference fringe pattern

4 结论

从实际生产需求出发,解决了因在制产品因焦距变长引起的测试用四杆靶加工难度大、成本高等问题。本文论述了卡式准直系统的设计要考虑的问题、零件面形的精度制约、装配时需注意的事项,构建高精系统的要求,以及调试系统成像质量最终达到瑞利判据之 $\lambda/4$ 内。卡式准直系统不仅用于红外系统的调校测试,还能用于白光系统的调校测试。

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, 1994.
PAN Junhua. *The Design Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces*[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 1994.
[2] 梁培. 离轴抛物镜准直特性的研究[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 899-912.

LIANG Pei. Study on Collimation property of off-axis parabolic mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(6): 899-912.
[3] 胡玉禧, 周绍祥. 离轴抛物面反射镜的成像特性[J]. 光子学报, 1983, 12(1): 47-56
HU Yuxi, ZHOU Shaoxiang. Property of off-axis parabolic mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1983, 12(1): 47-56.
[4] 岑兆丰, 李晓彤, 朱启华. 光学系统杂散光分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 300-304.
CEN Zhaofeng, LI Xiaotong, ZHU Qihua. Stray light analysis for optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 300-304.
[5] 陈钦芳, 徐昌杰, 王青松. 抛物面反射镜光轴的确定[J]. 应用光学, 2008, 29(2): 225-229
CHEN Qinfang, XU Changjie, WANG Qingsong. Alignment for optical axis of parabolic mirror[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(2): 225-229.