

•光学设计•

含衍射透镜的卡塞格林红外光学系统设计

张建新¹, 陆 君²

(1.中国电子科技集团公司光电研究院,天津 300000; 2.第二炮兵装备研究院,北京 100085)

摘要: 该设计将衍射透镜引入到卡塞格林红外光学系统中。设计结果表明,衍射透镜的引入增大了卡塞格林光学系统的视场和相对孔径,改善了成像质量;同时也降低了加工工艺的要求,大大节约了成本。

关键词: 光学设计;卡塞格林红外光学系统;视场;衍射光学

中图分类号:O435 文献标识码:A 文章编号:1673-1255(2014)-03-0005-03

Design of Cassegrain Infrared Optical System with Diffraction Lens

ZHANG Jian-xin¹, LU Jun²

(1. Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300000, China;

2. No.2 Artillery Equipment Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: Diffraction lens is used in Cassegrain infrared optical system. The design results show that the field of view and relative aperture of the system are increased to improve imaging quality. And the processing technology requirements are reduced to save the cost greatly.

Key words: optical design; Cassegrain infrared optical system; field of view; diffraction optics

卡塞格林光学系统是一种典型、实用的反射系统,由于其具有无色差、工作波段范围大、易于工程化等优点而被广泛地应用于空间光通信系统、大型天文望远系统、紫外探测系统、红外探测系统和聚光照明等领域^[1]。传统的卡塞格林光学系统属于反射式系统,没有色差,口径可以做得较大,以接收尽可能多的入射辐射。为得到优良的像质,通常卡塞格林光学系统的最大视场只能做到20'左右^[2-4]。为进一步增大系统的视场,就需要引入辅助的光学元件以校正像差,提高像质。

随着衍射光学理论和制作技术的发展,衍射光学元件开始应用于光学系统。折/衍混合光学系统能突破传统光学系统的许多局限,在改善系统成像质量、减小系统体积和质量等方面表现出传统光学系统不可比拟的优势^[5]。文中设计采用衍射透镜对卡塞格林光学系统进行了优化设计,获得了具有3°

大视场高像质的卡塞格林红外光学系统。

1 设计原理

对于红外光学系统,可以考虑采用以下三种设计形式:

(1)反射式;(2)折射式;(3)折反射式。

反射式系统具有体积小、质量轻、无色差等优点,但其轴外像差较大^[6]。反射式又可分为同轴系统和离轴系统。离轴反射式系统没有中心遮拦,视场比较大,但是对反射镜的加工精度、装调要求非常高;同轴反射式系统虽然具有中心遮拦,但是可以通过减小遮拦比来提高能量利用率,对反射镜的加工精度、装调要求比离轴反射式系统要低。

折射式系统视场大,无遮挡损失,像差易通过光学设计校正,但口径大、成本高且不易制作,通常

收稿日期:2014-03-10

作者简介:张建新(1968-),女,辽宁锦州人,高级工程师,主要从事光电技术方面的研究工作;陆君(1980-),男,江苏省靖江市人,本科,主要从事光电子技术、光电工程方面的研究。

用于 250 mm 以下的口径。

折反射式系统是折射与反射相结合的光学系统,其特点是便于校正轴外像差。以球面镜为基础,加入适当的折射元件,用以校正球差,以取得良好的光学质量。

典型的红外折反射式光学系统前组反射系统较多采用卡塞格林形式。一般的卡塞格林系统主镜为抛物面,次镜为双曲面,只能校正球差^[7]。其缺点之一是没有满足正弦条件,像质优良的视场太小。如果将主镜也改为双曲面,则可校正球差和彗差,视场便可增大。但为了进一步增大视场,则还需校正场曲、像散和畸变^[8]。

系统设计采用折反射式,引入衍射光学元件,通过改变衍射光学元件的位置、表面面形、环带的数目与周期等参数产生任意波面,大大增加了设计变量,从而能设计出传统光学所不能实现的全新光学系统,实用性更强。

卡塞格林光学系统的初步设计,主要是根据系统所要求的焦距 f' 、次镜的放大倍率 β (等于系统焦距 f' 与主镜焦距 f_1' 之比)、系统的中心遮拦比 α 和焦点的伸出量 Δ (即主镜顶点到系统总焦点的距离)来确定主镜与次镜的顶点曲率半径 R_1 、 R_2 , 偏心率 e_1 、 e_2 以及它们之间的距离 d 。光路图如图 1 所示,系统焦距 f' 、焦点的伸出量 Δ 由总体设计提出。根据文献研究结果^[9]:次镜的放大倍率 β 与系统的遮拦比 α 存在如式(1)的求解关系,如下式

$$\alpha = \frac{[f' + \Delta \cdot \beta]}{\beta} (\beta - 1) \quad (1)$$

在确定了 α 值、 β 值后,主镜与次镜的顶点曲率半径 R_1 、 R_2 , 以及它们之间的距离 d 就可由式(2)~式(4)确定

$$R_1 = 2 \times \frac{f'}{\beta} \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{\alpha \beta \times R_1}{\beta + 1} \quad (3)$$

$$d = f' \times \frac{1 - \alpha}{\beta} \quad (4)$$

由上可以看出,只要确定了 α 值,其余参数也都被确定了,因此在满足约束条件的前提下,根据经验选取合适的 α 值,就能计算出所有的参数值。按照以上方法即可选择卡塞格林光学系统的初始结构,卡塞格林光学系统的光路示意图见图 1。

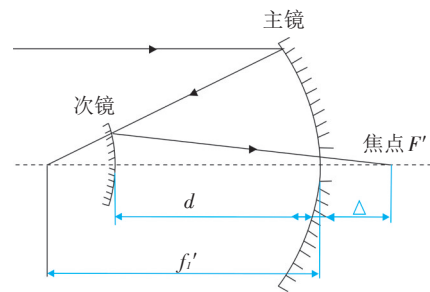


图1 卡塞格林光学系统的光路示意图

2 设计方案及分析

光学系统指标要求如下:

- (1)工作波段: 8~12 μm , 中心波长 10 μm ;
- (2)焦距: $f' = 500 \text{ mm}$;
- (3)视场: $w = 3^\circ$;
- (4)入瞳直径: $D = 300 \text{ mm}$;
- (5) F 数: 1.67;
- (6)CCD 像元尺寸: 15 $\mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 。

根据上述的技术指标,方案运用 CODE V 软件对卡塞格林光学系统进行了优化设计。

由于系统是大口径、长焦距的光学系统,各像差都很大,无论怎么进行优化都无法达到设计要求,故引入辅助的透镜加以校正剩余像差。辅助光学元件的引入主要有两种方式,即在主镜之前和在次镜后。在主镜之前引入校正光学元件可以有效地减小轴外点像差、提高视场,但其缺点是校正透镜的口径大、质量大、光学系统结构复杂、加工成本高;在次镜后引入校正透镜也可以校正像差,其优点是校正透镜口径小、质量轻、结构简单^[10-11]。由于在 8~12 μm 红外波段,锗是一种常用的材料,因其折射率高,在相同光焦度的情况下可以降低透镜表面曲率,减小像差,并且性能稳定,制造和镀膜相对容易^[12],因此采取锗为校正透镜的材料。在优化过程中,在次镜后加入了一组校正透镜,第一个透镜的前表面为衍射光学面,在很大程度上校正了系统的慧差、像散和场曲,对系统视场的提高起到了重要的作用。光学系统二维结构如图 2 所示。

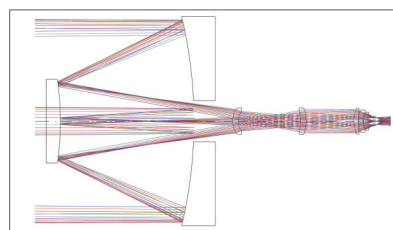


图2 3°视场卡塞格林光学系统光路图

通过多次迭代,进行像差自动平衡,最后得到满足像差要求的输出。图3为该光学系统径向能量分析曲线,其中所有视场80%的能量集中在1个像元内。图4为该光学系统的点列图,其中最大RMS(系统弥散圆)半径出现在边缘视场,最大RMS半径值为0.018 367 μm ,系统的弥散斑基本在艾里斑之内,成像达到衍射极限。图5为该光学系统的MTF(系统调制传递函数)曲线,在整个视场内的MTF曲线均接近衍射极限,根据CCD的像元尺寸求得系统的截止频率为33 lp/mm,此截止频率处的MTF值均大于0.6。该系统的总体性能达到设计要求。

图3 3°视场卡塞格林光学系统径向能量分析

图4 3°视场卡塞格林光学系统点列图

3 结论

根据衍射光学元件及卡塞格林光学系统的成像理论,研究了如何利用含有衍射光学元件的透镜组增大卡塞格林系统视场的方法,并给出了设计方案。此卡塞格林红外光学系统的视场为3°在相应视场范围内光学系统成像质量良好,而且系统中的

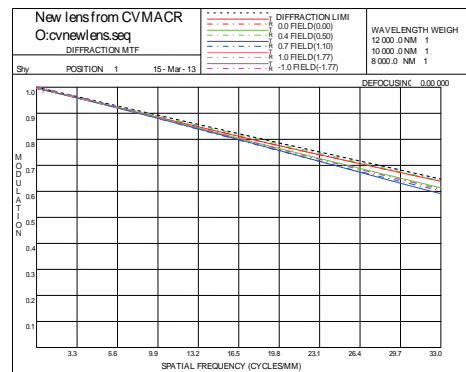


图5 3°视场卡塞格林光学系统MTF曲线

衍射光学元件可以利用金刚石车削技术精确地制作,其制作成本远远低于大口径高次非球面元件。此设计降低了对工艺水平的要求,大大降低了成本,同时结构紧凑且具有良好的消像差特性,有效地提高了卡塞格林红外光学系统的视场。

参考文献

- [1] 王治乐,张伟,龙夫年.衍射受限光学合成孔径成像系统像质评价[J]. 光学学报,2005,25(1):35-39.
- [2] 康玉思.Cook结构补偿镜的球面折反型望远系统[J]. 光学精密工程,2007,15(3):303-307.
- [3] 潘君骅.一个新的泛卡塞格林望远镜系统[J]. 光学精密工程,2003,11(5):438-441.
- [4] Swanson G J, Veldkamp W B. Infrared applications of diffractive optical elements [J]. Proc. SPIE, 1998, 885:22-29.
- [5] 史光辉.含有三个非球面的卡塞格林系统光学设计[J]. 光学学报,1998,12(2):238-241.
- [6] 张玉侠,艾勇.基于空间光通信卡塞格林天线弊端的探讨[J]. 红外与激光工程,2005,34(5):560-563.
- [7] 刘智颖.基于环形衍射理论的反射式光学系统研究[J]. 光子学报,2009,38(9):2265-2269.
- [8] 袁健男,付跃刚,郭俊,等.改进型卡塞格林望远光学系统的优化设计[J]. 长春理工大学学报:自然科学版,2010,33(3):8-10.
- [9] Wood A P. Design of infrared hybrid refractive-diffractive lenses [J]. App. Opt, 1992, 31(13): 2253-2258.
- [10] LIU L Y, XIANG L B, YANG J F, et al. Simulation study of computed- tomography imaging spectrometer [J]. Acta Optics Sinica, 2000, 20(6): 805-809.
- [11] 钱义先,梁伟,高晓东.含多个非球面大视场卡塞格林系统光学设计[J]. 光子学报,2009,38(4):896-899.
- [12] 何红星,冯生荣.双像双视场红外光学系统[J]. 红外技术,2007,29(1):12-16.