

文章编号: 1672-8785(2011)01-0023-04

红外双视场光学系统的初始结构求解

晏 蕾^{1,2} 贾 平¹ 洪永丰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. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 介绍了红外双视场光学系统的变焦理论和二次成像理论, 利用高斯成像原理物像交换原则求解了各透镜组元的焦距及间隔, 详细介绍了双分离镜组初始结构的求解方法。分析了利用 PW 方法进行求解的基本理论。最后根据上述理论设计了基于中波红外制冷型 320×240 元凝视焦平面阵列的红外双视场光学系统, 并利用光学调制传递函数对其像质进行了评价。结果表明, 该系统的像质优良, 满足实际应用需求, 证实了这种方法的可靠性。该方法对于设计红外两档光学系统具有较好的参考意义。

关键词: 红外光学系统; 初始结构; 光学设计; 双视场

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.01.004

Design of Initial Structure of Infrared Dual Field-of-view Optical System

YAN Lei^{1,2}, JIA Ping¹, HONG Yong-feng¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The zoom lens theory and re-imaging theory of dual field-of-view infrared optical systems are presented. The focus length and space of each element in a lens group are solved according to the object-image exchanging rule in Gaussian imaging principle. The solving method for an initial structure of the double separate lens in a lens group is described in detail. The basic theory for solving with PW method is analyzed. Finally, an dual field-of-view infrared optical system based on a 320×240 pixel cooled staring middle infrared focal plane array is designed according to the above theory. The optical system is evaluated in image quality with the optical modulation transfer function. The result shows that the design has a high image quality and can meet the requirements of practical applications.

Key words: infrared optical system; initial structure; optical design; dual field-of-view

1 引言

近年来, 红外成像系统在警戒、侦查、地面防空和制导等领域的广泛应用, 引起了众多研究人员的关注。红外搜索 / 跟踪一体化系统一

般具有两个或两个以上视场: 大视场搜索, 小视场远程跟踪。它可根据系统搜索 / 跟踪的具体需求, 进行视场间的快速切换^[1]。红外两档变焦光学系统是其最常用的光学系统。双视场透镜系统可分为两类。一类为切入式, 此类系统

收稿日期: 2010-07-16

基金项目: 973 国家自然科学基金项目 (2009CB72400105)

作者简介: 晏蕾 (1985-), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 主要从事变焦距光学系统的研究设计工作。 E-mail: limit_beyond@163.com

通过切换系统中的透镜组以改变光学系统的焦距。其问题是视场切换时存在冲击振动,容易丢失跟踪目标^[2]。另外总有一组透镜在光路以外,处于闲置状态。因此,透镜的数量多,系统成本高,而使用效率却不高。此外,由于透镜切换时需要较大空间,该系统的横向尺寸较大,整体结构不紧凑,而且多次的透镜组切入易使两个视场光轴的一致性变差,因而对机械设计以及电子控制精度的要求较高。另一类双视场系统是通过透镜组轴向间隙的变化来改变系统焦距的。这类系统能克服切入式系统所存在的问题,其缺点是轴向尺寸较大。但通过优化设计对轴向尺寸进行控制,同样可以在较短的轴向尺寸下获得令人满意的成像质量。

本文针对第二类双视场系统,介绍了基于高斯光学理论和二次成像原理的红外双视场光学系统的初始结构求解方法。针对中波红外 320×240 元致冷型探测器,设计了一个中波红外两档变焦光学系统。利用光学调制传递函数对其像质进行了评价,得出的设计结果完全满足实际应用需求,验证了该求解方法的可靠性,这对于设计红外两档变焦系统具有一定的指导意义。

2 红外双视场变焦理论

根据变焦距系统的基本理论^[3],采取变倍组物像交换原则设计,在变倍组的两个共轭位置处形成两个横向放大率,使其互成倒数,从而构成系统的两档变焦。

确定变倍组和后固定组的焦距、短焦时前固定组与变倍组的间隔以及长焦时变倍组与后固定组的间隔。这两个间隔的取定以透镜组不相碰为宜,因此须留下一定的空间。二次成像部分的倍率 β 选 -1,以保证较好的信噪比。

设短焦焦距为 f_s ,变倍比为 M ,变倍组和后固定组的焦距分别为 f'_2 和 f'_3 ,变倍组的短/长焦横向放大率和物像距分别为 m_{2_s} 、 m_{2_l} 、 m_{3_s} 、 m_{3_l} 和 l_{2_s} 、 l'_{2_s} 、 l_{2_l} 、 l'_{2_l} 、 l_{3_s} 、 l'_{3_s} ,短/长焦时前固定组与变倍组的间隔分别为 d_{12_s} 和

d_{12_l} ,变倍组与后固定组的间隔为 d_{23_s} 和 d_{23_l} (均为归一化参数)。则前组成像部分的公式组为长焦焦距:

$$fl = f_s \times M \quad (1)$$

横向放大率:

$$\begin{aligned} m_{2_s} &= -\frac{1}{\sqrt{M}} \\ m_{2_l} &= -\sqrt{M} \end{aligned} \quad (2)$$

物像距:

$$\begin{aligned} l_{2_s} &= (1 - m_{2_s})/m_{2_s} \times f'_2 \\ l'_{2_s} &= l_{2_s} \times m_{2_s} \\ l_{2_l} &= (1 - m_{2_l})/m_{2_l} \times f'_2 \\ l'_{2_l} &= l_{2_l}/m_{2_l} \end{aligned} \quad (3)$$

导程:

$$\begin{aligned} q &= l_{2_s} - l_{2_l} \\ f'_1 &= d_{12_s} + l_{2_s} \\ d_{12_l} &= d_{12_s} + q \\ d_{23_s} &= d_{23_l} + q \\ l_{3_s} &= l'_{2_s} - d_{23_s} \\ l'_{3_s} &= l_{3_s} \times f'_3/(l_{3_s} + f'_3) \\ m_{3_s} &= l'_{3_s}/l_{3_s} \\ m_{3_l} &= m_{3_s} \\ FL &= fl \times m_{2_l} \times m_{3_l} \end{aligned} \quad (4)$$

缩放比:

$$\begin{aligned} A &= fl/FL \\ f'_1 &= f'_1 \times A \\ f'_2 &= f'_2 \times A \\ f'_3 &= f'_3 \times A \\ d_{12_s} &= d_{12_s} \times A \\ d_{23_s} &= d_{23_s} \times A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d12_l &= d12_i \times A \\
 d23_l &= d23_i \times A \\
 q &= q \times A
 \end{aligned} \quad (5)$$

在计算出变焦部分的高斯解之后, 通过用光线追迹结果以及二次成像关系^[4]保证长焦位置时系统的入瞳位于前固定组附近以压缩口径, 便可以计算出二次成像透镜组的焦距以及前后间隔, 从而计算出光学系统的高斯参数。

3 初始结构的求解

在计算出光学系统的高斯参数以后 (光焦度、间隔), 根据光学系统的像差理论求解出透镜组内部的结构参数 (r, d, n)。下面介绍用于求解初始结构的 PW 方法。

不同于可见光学系统, 可用于红外系统设计合适红外材料很少, 而且又没有合适的透红外胶, 一般人们是将双胶合分裂为双分离镜组的。红外材料的折射率一般较高, 价格昂贵, 同时为了保证较高的透过率, 通常要求红外镜头的镜片数越少越好。因此, 在红外光学设计中, 单透镜和双分离透镜是用得最多的类型。

对于单透镜, 球差最小原则是常用的设计方法之一。但由于其自由度少, 一般不作单独设计。而双分离透镜组由于具有较多的自由度, 可以消除多种像差^[5], 因此得到了更为广泛的应用。下面介绍红外双分离镜组的 PW 方法。

假设在镜组光焦度归一化条件下, 前后组光焦度分别为 φ_a 和 φ_b , 材料折射率为 n , 阿贝数为 v , 单透镜第二面的弯曲系数为 Q_2 , 则

$$\varphi_a + \varphi_b = 1 \quad (6)$$

$$\frac{\varphi_a}{v_a} + \frac{\varphi_b}{v_b} = C \quad (7)$$

$$u = \frac{\varphi_a}{\varphi_b}$$

$$W^\infty = -\frac{n+1}{n}Q_2 - \frac{1}{n-1}$$

$$P_0 = \frac{n}{(n-1)^2} \left[1 - \frac{9}{4(n+2)} \right]$$

$$P^\infty = P_0 + \left[1 - \frac{1}{(n+1)^2} \right] \left[W^\infty - \frac{1}{2(n+2)} \right]^2$$

$$W = W^\infty + u \left(2 + \frac{1}{n} \right)$$

$$P = P^\infty + u(4W^\infty - 1) + u^2 \left(3 + \frac{2}{n} \right)$$

$$\varphi_a^2 W_a^\infty + \varphi_b^2 W_b^\infty = W^\infty \quad (8)$$

$$\varphi_a^3 P_a^\infty + \varphi_b^3 P_b^\infty = P^\infty \quad (9)$$

$$c_2 = Q_a + 1$$

$$c_1 = c_2 + \frac{1}{n_a - 1}$$

$$r_1 = \frac{f'}{c_1 \varphi_a} \quad (10)$$

$$r_2 = \frac{f'}{c_2 \varphi_a} \quad (11)$$

$$c_4 = Q_b + 1$$

$$c_3 = c_4 + \frac{1}{n_b - 1}$$

$$r_3 = \frac{f'}{c_3 \varphi_b} \quad (12)$$

$$r_4 = \frac{f'}{c_4 \varphi_b} \quad (13)$$

将 P_a^∞ 、 W_a^∞ 、 P_b^∞ 、 W_b^∞ 用 Q_a 和 Q_b 表示, 并将其代入式 (8) 和式 (9), 最终求得双分离的半径值。

根据 PW 与像差系数的关系^[6]可知, 当 $P^\infty = W^\infty = C = 0$ 时, 双分离镜组自行消除球差、彗差和色差。因此在取定双分离镜组材料组合之后, 就可以求得消除三种像差的透镜组合半径。

4 设计实例与结果

采用的探测器为中波 320×240 元致冷型探测器, 探测器的像元尺寸为 30μm×30μm。根据实际应用的需要, 红外两档变倍光学系统的主要设计参数如表 1 所示。

表 1 光学设计参数

工作波段 (μm)	3 ~ 5
焦距 f' (mm)	240(窄视场) 60(宽视场)
视场 2ω (°)	2.29° × 1.83° (窄视场) 9.16° × 7.32° (宽视场)
F 数 (#)	4

表 2 列出了根据前面介绍的高斯光学理论求解出的系统参数结果。

结合 PW 法求解像差方程即可得到系统的内部参数。透镜组的加厚缩放保证了光焦度不变。调整各透镜组元间隔,使长/短焦位置时一次和二次像面基本重合。利用软件优化得到了比较令人满意的设计,如图 1 所示。

光学传递函数 (MTF) 是光学系统像质的重要评价参数。该系统的传递函数如图 2 所示。其中,图 (a) 和图 (b) 分别为宽视场和窄视场两种情况。从图中可以看出,在 17lp/mm 的空间频率 (奈奎斯特频率) 下,该系统的 MTF 都大于 0.6,

接近衍射极限,说明该系统具有较好的像质,有一定的加工和装配裕度。

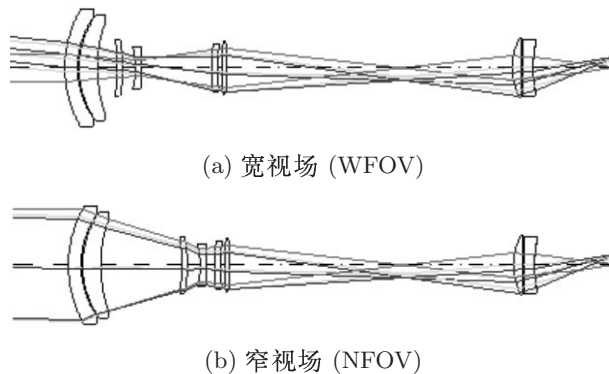
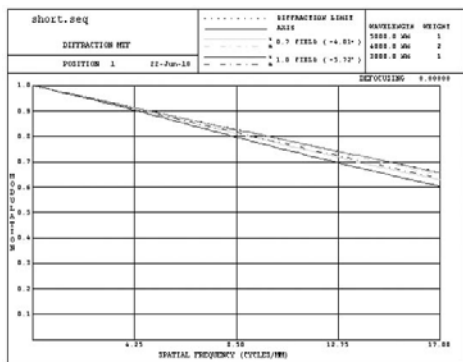


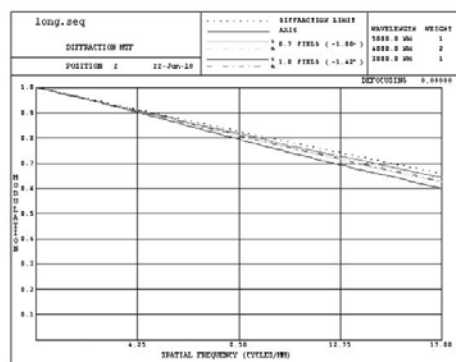
图 1 系统的外形结构示意图

表 2 光学系统的高斯解

参数 (mm)	前固定组 f1	间隔 d12	变倍组 f2	间隔 d23	后固定组 f3	间隔 L1	二次成像组 fR	间隔 L2	冷栏像面距离 L3
短焦	152	21.7143	-43.4286	82.5143	65.1429	159.6852	21.5569	23.1138	20
长焦		86.8571		17.3714					



(a) 宽视场 (WFOV)



(b) 窄视场 (NFOV)

图 2 系统的传递函数曲线

5 结论

介绍了红外双视场光学系统的变焦理论,详细阐述了双分离镜组的初始结构求解方法。重点分析了利用 PW 方法求解的基本理论。最后根据上述理论设计了基于中波红外致冷型 320×240 元凝视焦平面阵列的红外双视场光学系统,并利用光学调制传递函数对其像质进行了评价。结果表明,该系统的像质优良,满足实际需求,证实了这种方法的可靠性。该方法对于设计红外两档变焦系统具有较好的参考意义。

参考文献

- [1] 王海涛,耿安兵,杨长城. 切换变倍光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 872-875.
- [2] 任德清, B J Rauscher. 红外双视场透镜系统的光学设计[J]. 红外技术, 1995, 20(3): 19-22.
- [3] 电影镜头设计组. 电影摄影物镜光学设计[M]. 北京: 中国工业出版社, 1971.
- [4] K H Lee. First-order optics computation for re-imaging IR optical systems, infrared imaging systems[J]. SPIE, 5076, 2003: 123129.
- [5] 赵秀丽. 红外光学系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [6] 常群. 光学设计文集[M]. 北京: 科学出版社, 1976.