

· 光学设计与制造 ·

周视扫描成像红外双波段光学系统设计

吴 凡, 王柏林, 唐树威

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

摘 要:介绍了一种周视扫描双波段红外光学系统,该系统利用 K 镜消除像旋转,能对中波 3~5 μm 、长波 8~10 μm 光谱进行双波段成像,且同时具有较大的扫描视场和较宽的光学口径.系统结构简单,装调方便,成像质量优良.

关键词:K 镜;消像旋;周视扫描;双波段

中图分类号:TH741

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2010)06-0027-04

Design of Panoramic Scanning Dual Band IR Imaging Optical System

WU Fan, WANG Bai-Lin, TANG Shu-Wei

(Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Sanhe 065201, China)

Abstract: A panoramic scanning dual band IR optical system is presented, it eliminates image rotation using K mirror, and can image both in 3~5 μm band and 8~10 μm band, and have a large scanning imaging fields and a wide optical aperture. The structure of the system is simple and easy to assemble, the performance is excellent.

Key words: K mirror; image rotation eliminating; panoramic scanning; dual bands

1 设计要求分析

通常,周视成像系统必须通过扫描来实现,但不同的扫描方式有不同的特点,适用的范围也不同,所以,采用何种扫描方式就变得非常重要了.常用的有 45° 旋转扫描反射镜扫描、平面镜摆动或者 360° 旋转扫描、棱镜旋转扫描、光学望远镜系统整体扫描等多种扫描方式.其中,光学望远镜系统整体扫描方式不会产生像的旋转、没有色差、焦面平坦,同时系统的偏振度很小,但它的转动惯量比较大,所以这种方式只能用于视场角较大、探测距离较近的系统,如瑞典的 IRS-700.而其他几种扫描方式是使系统中的部分元件进行周视旋转扫描,而大部分固定不动,这样就方便旋转扫描系统的设计,体积质量可以少受限制,视场角可做得较小,探测距离较远.但这种扫

描方式对光学系统设计提出来较高的要求.45° 旋转扫描反射镜是目前最成熟的一种二维扫描方式,应用的也最多,如法国的 VAMPIR MB,但由于此种扫描方式引入了像的旋转,设计中必须想办法消除掉^[3].

由于 45° 扫描镜相对目标旋转扫描时会引起图像的旋转,因此对于多元探测器成像系统是不能直接使用,所以,光路中必须加入消旋部件.常用的消旋技术有:棱镜消旋、滑环消旋、K 镜消旋和电子消旋等.其中 K 镜为全反射式光学部件,可应用在很宽的波段,而且不引入像差,光能量损失最小^[3],所以设计上优先选择 K 镜消旋技术.K 镜是由三面排列成“K”字形的反射镜组成的,当 K 镜和 45° 旋转扫描反射镜旋转方向相同且速度为 45° 旋转扫描反射镜转速一半时,物体在像面上的像不产生旋转,整个系统是消像旋的.

收稿日期:2010-11-19

基金项目:国家部委项目基金资助

作者简介:吴凡(1977-),男,河南商城人,学士,主要从事红外成像光学系统的研究.

为了方便引入 K 镜消旋组件,光学系统的结构选择是前部分为大口径望远系统,后部分为入瞳前置成像物镜的形式,45°旋转扫描反射镜置于望远镜物镜的上端,K 镜就设置在望远系统的目镜后部的平行光路中.为了让 K 镜组件的尺寸不至于过大,还需要将望远系统的出瞳就位于 K 镜的中间,即反射镜 R_2 处.

系统采用致冷型探测器时,其冷屏光阑约束着焦平面接收光束的相对孔径,所以整个光学系统的出瞳要与探测器冷屏光阑相匹配,达到 100% 冷光阑效率,即要求位置重合并且大小相等,否则会引起渐晕,产生杂散红外辐射,降低系统的信噪比.

对于 K 镜之后的成像物镜来说,其入瞳即为望远镜的出瞳,其出瞳即为整个系统的出瞳.显然其入瞳位于镜头前面一定距离处,而出瞳则位于镜头与其焦面之间,两者还要满足相互共轭的关系.由几何成像光学原理可知,简单的物镜系统显然不能满足,所以,聚焦成像物镜必须为二次成像结构形式.

另外,在国外很早就提出了双波段成像系统的研究^[4-6],以提高系统的性能.一般双波段热成像系统可以由两种方式构成:一是 2 个分别响应不同波段的探测器组件分别用 2 个光学系统,或部分共用一个光学系统构成,二是用一个能响应 2 个波段的双波段探测器共用一个光学系统构成.后者由于结构紧凑、便于安装,更受人们的青睐.对于前一种方式构建双波段成像系统,光路中必须加一片分光镜进行分光.为了最大限度地减小体积质量,使结构紧凑,2 个波段光束需要尽可能地共用光路,分光片的位置尽可能的往光路的后部放置.

2 关键设计参数的公式推导

设整个系统的指标参数为:静止视场 ω ,系统焦距 f' ,与探测器相匹配的相对孔径为 $1/F\#$.为了设计的方便,将整个系统分成望远镜和聚焦成像物镜两大部分分别设计.下面分别计算各部分的技术指标要求.设望远镜的放大率为 Γ ,物镜的焦距为 f_o' ,视场为 $\omega_o = \omega$,入瞳直径为 $D = f'/F\#$;望远镜目镜焦距为 f_e' ,视场为 ω_e ,出瞳直径为 d_e ,出瞳距为 L_e ,相对出瞳距为 ξ ;聚焦物镜的焦距为 f_i' ,视场为 $\omega_i = \omega_e$.有

$$\Gamma = f'/f_e' = D/d_e = \omega_e/\omega_o \quad (1)$$

$$\xi = L_e/f_e' \quad (2)$$

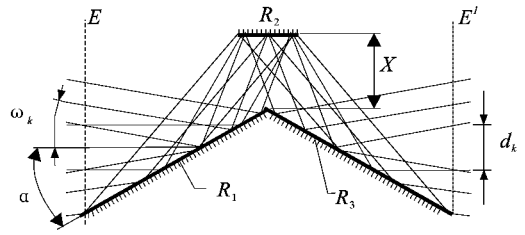


图 1 K 镜结构参数

因为 K 镜的加入要求望远镜的出瞳必须位于其 R_2 反射镜上,所以必须先求出目镜至 R_2 反射镜的距离.定义 L_k 为 K 镜内部的光程长度,即从 K 镜的入口 E 到出口 E' 之间轴上光线的光程长度.显然:

$$L_e \geq L_k/2 \quad (3)$$

K 镜结构参数如图 1 所示,其中 α 为光轴与反射镜 R_1 的夹角,为了加工的方便,通常取 $\alpha = 30^\circ$; ω_K 为 K 镜接收的视场角, $\omega_K = \omega_e$; d_k 为 K 镜接收的光束口径, $d_k = d_e$; x 为 R_2 与 R_1 、 R_3 交点的距离.设 x 取最小值,即刚好能够满足正视场的上光线和负视场的下光线交合于 K 镜 R_1 、 R_3 反射镜的交棱上.这样从 K 镜结构参数图上分析可解得

$$L_k = \frac{d_k}{\cot(30^\circ + \omega) - \tan 30^\circ} + \frac{\sqrt{3}}{2} d_k + \sqrt{3} x \quad (4)$$

望远镜的放大率必须很合理,太小则进入 K 镜的光束直径会较大,会使得 K 镜的结构较为冗肿;同样,放大率太大会使得进入 K 镜的视场角较大,也会产生同样的效果;另外望远镜目镜的出瞳距也是影响整个系统结构尺寸的重要因素之一.为了使系统的整体结构紧凑,取目镜的相对出瞳距为 L_e/f_e' 取在 1~1.5 之间,望远镜的放大倍率为 8~10 之间.再联合整个系统的指标就可以求取望远镜的基本技术指标: f_o' , f_e' , ω , ω_e , D , d_e 等.

对于聚焦成像物镜而言,有: $f' \tan \omega = f_i' \tan \omega_i$,也同样可求得其焦距等参数.

3 设计结果及系统性能分析

根据以上分析,初步选定了各部分的基本参数,确定了系统的初始结构形式.这里目镜相对出瞳距选择为 1.33,望远镜放大率为 9.为了降低装校时分光镜的位置误差对成像质量的影响,需要将分光镜置于望远镜后平行光路中,所以,将聚焦成像物镜设计成开普勒望远镜加单组透镜的型式.因为所用材料的不同,分光镜后的长波单组透镜为 2 片,中波单组透镜为 3 片.

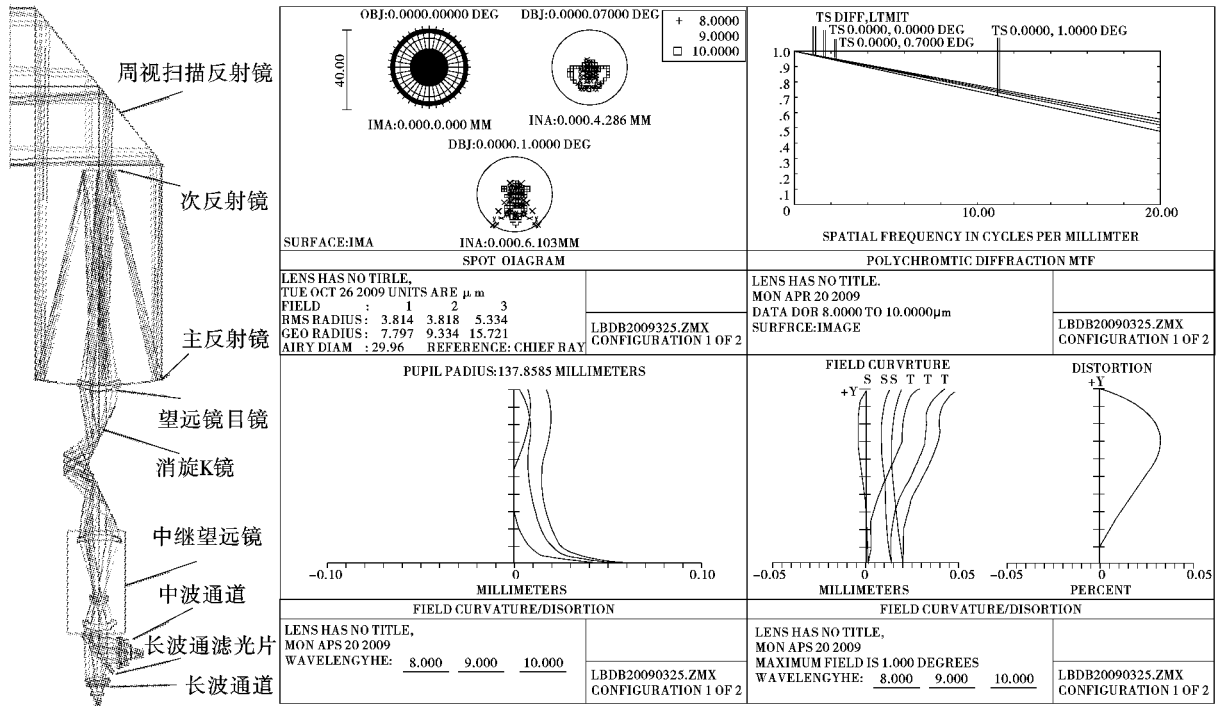


图 2 基于 K 镜消旋的大口径双波段周视扫描成像红外光学系统及其长波通道像质评价图

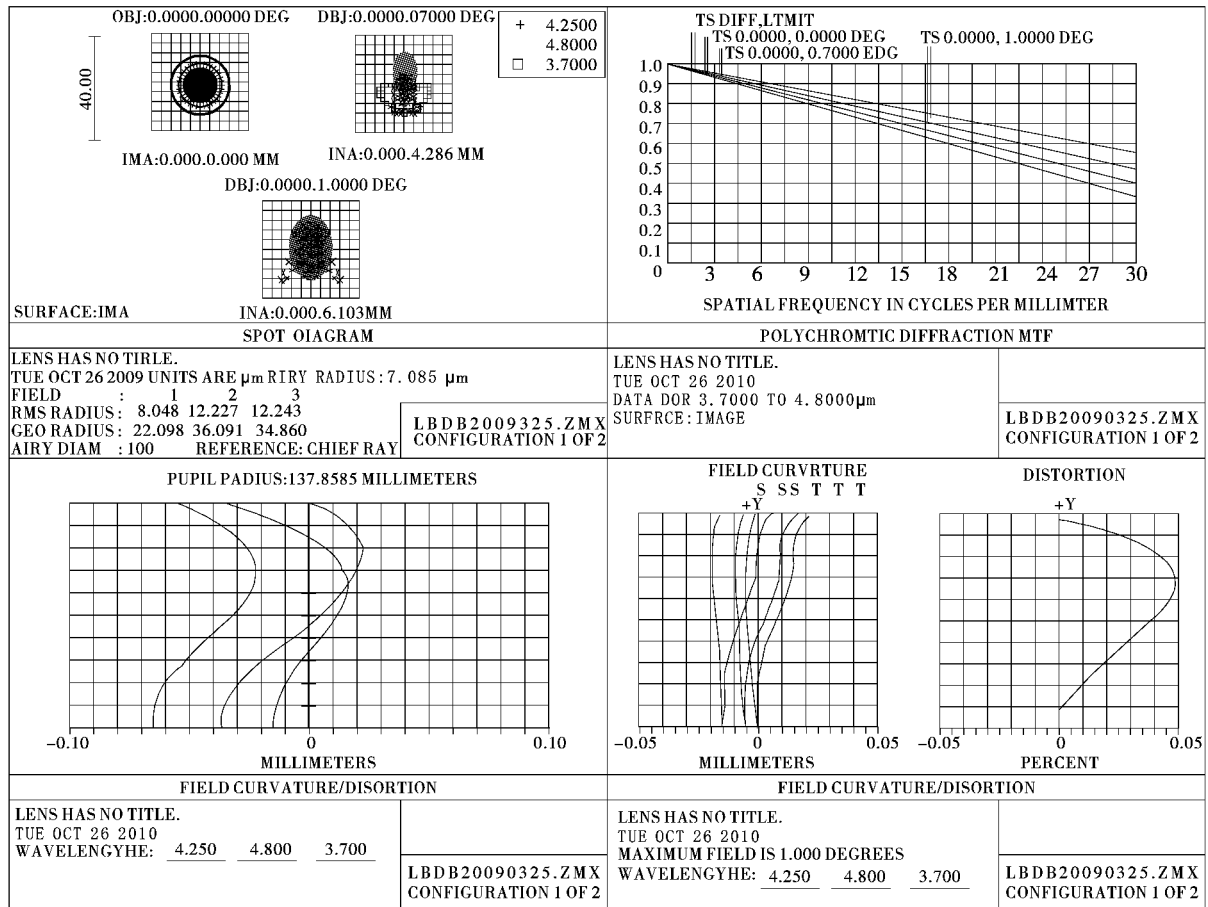


图 3 中波通道像质评价图

将分析计算所得的初始结构参数输入到光学设计软件中,经过多轮的优化计算,得到了一个最优的

设计结果,其光学系统结构和成像质量如图 2、图 3 所示.从中可以看出,长波通道的 MTF 非常接近衍射极限,成像质量优良;而中波通道的成像质量稍差,但从几何弥散斑情况看,弥散斑尺寸基本满足小于像素尺寸的要求.

4 结 论

讨论了一种基于 K 镜消旋的大口径双波段周视扫描红外成像光学系统,它能同时对中、长波 2 个波段成像.改变 45° 旋转扫描反射镜的俯仰角度,还可以扩大周视扫描的范围,使系统能够覆盖更大的空域.通过详细分析影响系统总体性能的 K 镜组件的结构,合理地分配了系统各部分的参数,再经过计算机的优化,得到一个成像质量优良的结果.

参考文献

[1] 舒金龙,陈良瑜.国外红外搜索跟踪系统的研制现状与

发展趋势[J].现代防御技术,2003(4).

- [2] 李承选,朱斌.国外舰载红外搜索跟踪系统[J].国防科技,2005(4).
- [3] 张平静.扫描反射镜光学机械消像旋转方法[J].红外,2002(12).
- [4] Jamieson TH. Ultrawide waveband optics[J]. Optical Engineering,1984,23(2).
- [5] Jiang H, Qian Y, Rhee K T. High speed dual spectral infrared imaging[J]. Opt Eng,1993,32(6).
- [6] Ritter G X, Wilson J N, Davidson J L. Data compression of multispectral image[J]. SPIE,1987,829.
- [7] 张镔,龚惠兴.消除 45° 旋转扫描反射镜像旋转系统的研究及应用[J].红外与毫米波学报,1999(2).
- [8] 冯克成,刘景生.红外光学系统[M].北京:兵器工业出版社,1994.
- [9] 安连生.应用光学[M].北京:北京理工大学出版社,2002.

(上接第 26 页)

振镜任意时刻的角加速度为

$$\sigma = \omega' = 4\pi^2 f^2 A \sin(2\pi ft) \quad (4)$$

最大角加速度为

$$\sigma_{\max} = 4\pi^2 f^2 A \quad (5)$$

为了能够使振镜更好地达到要求,采用短路匝传感器对其进行控制.这种传感器稳定性大,可靠度很高,控制精度非常精确.

(3) 振镜材料

如前所述,振镜的角加速度很大,所以必须进行振镜和镜架的轻量化设计,转动惯量越小越好.假设镜体的半径为 r ,厚度为 l ,密度为 ρ ,则镜体转动惯量为

$$I = \pi r^2 l \rho \left(\frac{r^2}{4} + \frac{l^2}{12} \right) \quad (6)$$

为了尽可能地减小振镜控制转矩,实现大角度振动.但同时还要求振镜和镜架具备较高的刚性和机械谐振频率,以在振动中保持反射镜面形和系统的谐振特性等.所以采用铝合金材料,其刚性大,质量轻,设备加工组合后机械性能良好^[5].

3 结 论

利用光学视场成像原理和伺服控制技术设计振镜系统,使其在复杂背景下对不同空域成像,从而实现了空域的搜索.虽然在整体设计上仍有不足,比如在材料选取上有更好的镍铬合金.但成本太高,整体体积较大,质量偏重,但高精度、高转速的振镜系统作为一个新的技术将会有更广阔的发展空间.

参考文献

- [1] 梅遂生,王戎瑞.光电子技术[M].北京:国际出版社,2008.
- [2] 肖泽新,安连生.工程光学设计[M].北京:电子工业出版社,2003.
- [3] 郁道银,谈恒英.工程光学[M].北京:机械工业出版社,1999.
- [4] 张建民.机电一体化系统设计[M].北京:北京理工大学出版社.
- [5] 庞怀玉.机械制造工程学[M].北京:机械工业出版社.