

0.4~1.7 μm 宽波段大相对孔径光学系统设计

曲 锐 邓 键 彭晓乐 曹晓荷

西南技术物理研究所, 四川 成都 610041

摘要 从宽波段范围的消色差条件出发,列表对比了常用光学玻璃材料在可见光、近红外和短波红外三个宽波段范围的色散特性,指出光学玻璃材料在不同波段色散特性的差异,据此论述了一种宽波段光学系统设计过程中各光学玻璃材料的使用与替换方法,并结合复消色差的方法,完成了一个宽波段大相对孔径光学系统的设计,该系统 F 数为 1.4、焦距为 70 mm、全视场为 $6.3^\circ \times 8.1^\circ$ 、波长范围为 0.4~1.7 μm 。除球罩外,所述系统共采用了 4 种普通光学玻璃材料,透镜总数为 9 片、总长为 110 mm,在 -45°C ~ 60°C 温度范围内,均具有较好的成像质量和公差特性。

关键词 光学设计; 红外技术; 宽波段; InGaAs 探测器; 消热差

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0822007

0.4~1.7 μm Wideband Fast F -Number Optical System Design

Qu Rui Deng Jian Peng Xiaole Cao Xiaohe

Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract Table comparison of dispersive character is made between some frequently used optical glasses in visible (Vis), near-infrared (NIR) and short-wave infrared (SWIR). Through comparison, different dispersive characters of these optical glasses in different waveband are pointed out. Then, a kind of using and interchanging method of these materials especially in optical design process is discussed. Based on this method and apochromatic model, a wideband (Vis-SWIR) fast F -number optical system under the requirements of $F/1.4$, focal length of 70 mm, whole field of view of $6.3^\circ \times 8.1^\circ$, waveband of 0.4~1.7 μm is designed with optical passive athermalization technology. Except the sphere dome, the optical system, which uses 4 kinds of optical glass, consists of 9 lenses, total length of 110 mm, has good image quality and tolerance character at -45°C ~ 60°C .

Key words optical design; infrared technology; wide band; InGaAs detector; athermalization

OCIS codes 220.3260; 220.2740; 220.1000

1 引 言

具有 0.4~1.7 μm 宽波段成像探测能力的 InGaAs Vis-SWIR 探测器逐渐成熟,使得可见光(Vis)、短波红外(SWIR)共孔径共焦面成像探测成为可能。而且普通光学玻璃与光学胶在可见光、近红外、短波红外三个波段内都具有极高的透射率,使得可见光、短波红外共孔径成像系统仍保持较低成本^[1-4]。但不同光学玻璃材料在同一波段具有不同的色散特性,而同一光学玻璃在不同波段也表现出不同的色散能力,尤其是后者,某些光学玻璃材料在不同波段色散特性差异变化较大,这样的材料特性差异使得宽波段光学系统设计存在较大困难。

本文从光学消色差理论角度分析阐述了宽波段光学系统的实现途径,并建立了一个通用模型,对于类似宽波段系统的设计具有借鉴作用。

2 设计依据

宽波段范围的消色差主要通过复消色差的方法实现。其中,对波段范围较窄的光学系统,如可见光光

收稿日期: 2015-02-04; 收到修改稿日期: 2015-04-27

作者简介: 曲 锐(1990—),男,硕士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: qu_rui@foxmail.com

导师简介: 邓 键(1976—),男,博士,高级工程师,主要从事光学系统的设计、装调与检测等方面的研究。

E-mail: warhorse99@sina.com

学系统,可先校正位置色差,再校正二级光谱加以实现,而且材料选择上可参考光学玻璃的 $P-V$ 图,利用“最大三角形法则”降低难度^[5-7]。但具体到 $0.4\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 波段,波段范围较宽,涉及可见光($0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$)、近红外($0.7\sim 1.0\ \mu\text{m}$)和短波红外($1.0\sim 1.7\ \mu\text{m}$)三个波段^[4],且光学玻璃材料在各波段色散特性差异较大,使得 $P-V$ 图与“最大三角形法则”不能很好地描述各材料在各波段内及宽波段范围的色散特性差异。

2.1 宽波段消色差条件

为了便于论述,采用薄透镜理论对所涉及的模型进行描述。

一般地,对于含有三个连续波段的宽波段光学系统,为了使光学系统同时满足消各波段内色差与各波段间色差的要求,各透镜元件需满足光焦度方程、消波段内色差方程、消波段间色差方程^[5,8],即光学系统中各元件需满足:

$$\varphi = \frac{1}{h_i} \sum h_i \varphi_i, \quad (1a)$$

$$L_{1\text{ch}} = \frac{1}{h_i^2 \varphi^2} \sum h_i^2 C_{1i} \varphi_{1i}, \quad (1b)$$

$$L_{2\text{ch}} = \frac{1}{h_i^2 \varphi^2} \sum h_i^2 C_{2i} \varphi_{2i}, \quad (1c)$$

$$L_{3\text{ch}} = \frac{1}{h_i^2 \varphi^2} \sum h_i^2 C_{3i} \varphi_{3i}, \quad (1d)$$

$$L_{\text{wb}} = \frac{1}{(h_i \varphi)^2} \sum h_i^2 C_{\text{wb}} \varphi_i, \quad (1e)$$

式中 φ_{1i} 、 φ_{2i} 、 φ_{3i} 分别为每块透镜在三个不同波段的光焦度; φ 为光学系统光焦度; h_i 为近轴孔径光线在各透镜表面的入射高; C_{1i} 、 C_{2i} 、 C_{3i} 为每块透镜的在三个不同波段的归化色差系数,其值等于阿贝数的倒数; C_{wb} 为每块透镜在宽波段范围的波段间色差系数(简称宽波段色差系数); $L_{1\text{ch}}$ 、 $L_{2\text{ch}}$ 、 $L_{3\text{ch}}$ 为三个不同波段各波段内的位置色差; L_{wb} 为宽波段范围的波段间位置色差(简称宽波段位置色差)。

方程组(1a)~(1d)为光学系统的光焦方程、消各波段内色差方程,(1e)式为宽波段内的消波段间色差方程。对(1e)式作单独说明,对于宽波段光学系统,若只校正三个波段各自波段内色差,并不能保证各波段在同一焦面都能成理想像,此时,需在宽波段范围内进行波段间色差校正。可分别选取其中三个波段各自中心波长作为宽波段特征波长,以此来定义宽波段位置色差 L_{wb} :

$$L_{\text{wb}} = f_{\lambda_{3c}} - f_{\lambda_{1c}}, \quad (2)$$

式中用下标1c、2c和3c分别表示波段一、二、三的中心波长位置, λ_{1c} 、 λ_{2c} 、 λ_{3c} 分别为各波段中心波长。由此,即可定义宽波段阿贝数 V_{wb} :

$$V_{\text{wb}} = \frac{n_{2c} - 1}{n_{1c} - n_{3c}}, \quad (3)$$

宽波段色差系数 C_{wb} :

$$C_{\text{wb}} = \frac{n_{1c} - n_{3c}}{n_{2c} - 1}. \quad (4)$$

方程组(1)即为宽波段光学系统设计模型,共含有5个方程项,但具体到实际的光学设计过程中,则存在方程复杂、求解困难的问题,此时,可先采用方程(1a)~(1d)进行消各波段内色差的各组元光焦度分配,利用计算机优化校正各波段内位置色差,再考虑(1e)式联合优化校正宽波段范围内各波段间位置色差,以达到宽波段范围消色差的目的。

2.2 材料色散特性的讨论与材料选用

依上节宽波段光学系统设计模型,选取一些使用频次较高、光学机械性能优良的光学玻璃,列表进行说明讨论。采用归化色差系数对材料在各波段及宽波段范围的色散特性进行描述,其数值上等于阿贝数的倒数^[9],对各波段的归化色差系数作如下定义:

$$C_{0.4-0.7} = \frac{n_{0.4} - n_{0.7}}{n_{0.55} - 1}, \quad (5)$$

$$C_{0.7-1.0} = \frac{n_{0.7} - n_{1.0}}{n_{0.85} - 1}, \quad (6)$$

$$C_{1.0-1.7} = \frac{n_{1.0} - n_{1.7}}{n_{1.35} - 1}, \quad (7)$$

$$C_{0.4-1.7} = \frac{n_{0.55} - n_{1.35}}{n_{0.85} - 1}, \quad (8)$$

(5)~(8)式中,下标表示波长。

如表1所示,为常用光学玻璃在0.4~1.7 μm宽波段范围内性能参数对比表。可以看出,表中光学玻璃材料在可见光波段的色差系数要明显高于近红外或短波红外波段,表明可见光波段光学系统的色差可能较大,具体到材料选择阶段,需更加关注可见光波段的色差校正;在近红外与短波红外波段,表中光学玻璃材料色差系数相近,表明在色散特性上,对这两个波段可只关注某一波段;考虑宽波段范围色散特性时,HZF88、HZF62具有高的宽波段色差系数,可作色差校正元件;HFK61、H-QK3L具有低的宽波段色差系数、高的热膨胀系数,可作光学系统中热差补偿元件;而HLAF50B与HZBAF52具有几乎相等的宽波段色差系数,但二者折射率差异较大,且在各波段内色散能力不同,前者在可见光波段色散强,后者在短波红外波段色散强;HK9L与HQK3L具有相近的宽波段色差系数,且折射率相近,前者在短波红外波段色散强,后者在可见光波段色散强;由此,即可根据具体系统设计过程中色差变化趋势进行材料的相互替换;其他材料亦可依此进行分析选用。另外,光学胶在0.4~1.7 μm具有极高的透射率,使得光学设计过程中可根据具体系统中像差平衡的需要,采用双胶合、三胶合透镜组等方式来合成所需色散特性的等效材料,扩大材料使用的灵活性。

表1 常用光学玻璃在0.4~1.7 μm宽波段范围内性能参数表

Table 1 Performance of some typical optical glasses in 0.4~1.7 μm wide-band

Material	Index of refraction			Chromatic dispersive power			Thermal expansion coefficient	Wide-band chromatic dispersive power
	$n_{0.55 \mu\text{m}}$	$n_{0.85 \mu\text{m}}$	$n_{1.35 \mu\text{m}}$	$C_{0.4-0.7 \mu\text{m}}$	$C_{0.7-1.0 \mu\text{m}}$	$C_{1.0-1.7 \mu\text{m}}$	$T / (10^{-7} \text{K}^{-1})$	$C_{0.4-1.7 \mu\text{m}}$
H-K9L	1.51852	1.50986	1.50322	3.42%	1.08%	1.70%	83	3.00%
H-FK61	1.49830	1.49184	1.48750	2.70%	0.81%	1.05%	141	2.20%
H-QK3L	1.48897	1.48140	1.47516	3.11%	1.03%	1.74%	96	2.87%
H-ZK9B	1.62261	1.61168	1.60412	3.67%	1.11%	1.50%	66	3.02%
H-ZF62	1.93213	1.89079	1.87077	11.77%	2.46%	2.35%	68	6.89%
H-ZF88	1.95698	1.90835	1.88424	13.94%	2.81%	2.97%	62	8.01%
H-LAF3B	1.74753	1.73074	1.72146	5.05%	1.32%	1.32%	86	3.57%
H-LAF50B	1.77582	1.75965	1.74921	4.50%	1.28%	1.63%	60	3.50%
H-ZBAF50	1.66120	1.64786	1.63990	4.43%	1.22%	1.34%	78	3.29%
H-ZBAF52	1.67305	1.65860	1.65009	4.79%	1.28%	1.44%	73	3.49%
H-LAK7	1.71583	1.70192	1.69219	4.12%	1.22%	1.74%	60	3.37%
H-LAK52	1.73201	1.71791	1.70839	4.07%	1.21%	1.58%	60	3.29%
H-ZLAF52	1.81028	1.79042	1.77891	5.56%	1.45%	1.62%	59	3.97%
H-ZLAF68B	1.88760	1.86580	1.85381	5.57%	1.44%	1.45%	71	3.90%

不同于一般双透镜消色差设计中选用高色散材料作负透镜、低色散材料作正透镜的方法;在宽波段光学系统设计中,材料选用上类似于复消色差的方法,材料选择过程中一般应选用高折射率高色散的材料作正透镜;高折射率低色散的材料作负透镜;低折射率低色散的材料作为正透镜。如此选择的材料组合代入初始结构进行优化,再据材料在各波段色散特性对比表进行材料的增减、替换、合成(胶合)等,以实现宽波段范围消色差的目的。

2.3 光学系统无热化方面的考虑

在光学系统的无热化设计方面,普通光学玻璃材料在可见光或近红外波段的温度折射率系数很小,故而环境温度的变化对可见光或短波红外光学系统性能的影响主要表现在由透镜材料和连接件的热膨胀导

致的透镜表面曲率半径、厚度和透镜间间隔的变化导致的热离焦。较之于中长波红外波段,可见光或近红外波段光学系统无热化难度较低,主要通过匹配透镜材料与镜筒材料的热膨胀系数予以实现。实际设计过程中,也多采用先消色差,再替换材料消热差的方式,因此,在考虑设计模型阶段可先不考虑消热差条件。

3 设计实例

选用一个具体设计实例对上述方法进行说明讨论。设计实例选用0.4~1.7 μm宽波段焦平面探测器,像元数为640 pixel×512 pixel,像元尺寸为15 μm×15 μm,对角线长度为12.28 mm,镜筒材料采用普通铝合金材料。具体设计指标如表2所示。采用摄远结构+场镜的结构型式作为光学系统初始结构,其中,前固定镜组与中间固定镜组构成摄远结构,压缩总长;靠近像面的后固定镜组作场镜结构,校正系统残余场曲、畸变等像差^[10]。

表2 设计指标

Table 2 Design requirements

Parameter	Value
Work wavelength /μm	0.4~1.7
Field of view	6.3°×8.1°
Effective focal length /mm	70
<i>F</i> -number	1.4
Overall length /mm	≤120
Temperature range /°C	-45~ 60

光学系统球罩采用易加工、硬度高、环境适应性强的HK9L;前固定镜组承担系统主要光焦度,由采用HZF88的正透镜与HZBAF52的负透镜组成;中间固定镜组主要用于校正系统球差、彗差、像散和位置色差等像差,为五片式结构,包括两组由HZF88与HLAF3B胶合成的双胶合透镜组和采用HFK61的单片式正透镜;其中,HFK61正透镜在温度升高时焦距变长,温度降低时焦距变短,与镜筒材料的变化趋势相配合补偿系统热差;后固定镜组靠近像面,构成场镜结构,主要用于校正系统场曲和畸变,由采用HZF88的正透镜与采用HZBAF52的负透镜组成。

采用CodeV软件对上述光学系统进行优化分析^[11]。具体优化过程为:利用设计软件多重结构的功能,分别对各波段进行消色差的设计,此时可限制某一波段的有效焦距;合并多重结构到单一结构,控制宽波段中心波长焦距,优化消除宽波段内位置色差;利用宏程序对系统进行不同温度不同视场热分析与优化。图1即为光学被动消热差的0.4~1.7 μm宽波段大相对孔径光学系统优化结果示意图。除头罩外,所述系统仅采用了4种普通光学玻璃材料,共9片透镜,光学系统靠近头罩一侧表面至焦面,总长110 mm,单透镜最大口径小于60 mm,双胶合透镜最大口径小于42 mm。

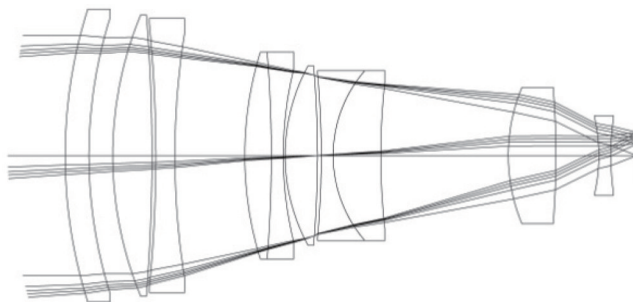


图1 0.4~1.7 μm宽波段大相对孔径光学系统优化结果示意图

Fig.1 Design result of the 0.4~1.7 μm wideband and large relative aperture optical system

对上述光学系统在不同温度不同视场情况下的点列图评价与调制传递函数(MTF)评价对比分别如图2、图3所示。可以看出,所设计的光学系统在不同温度不同视场的情形下,点列图均方根直径均在单个探测器像元15 μm以内,且在截止频率为34 lp/mm处,MTF均大于0.6,表明该系统具有较好的成像质量,也证明了上述设计方法的可行性。

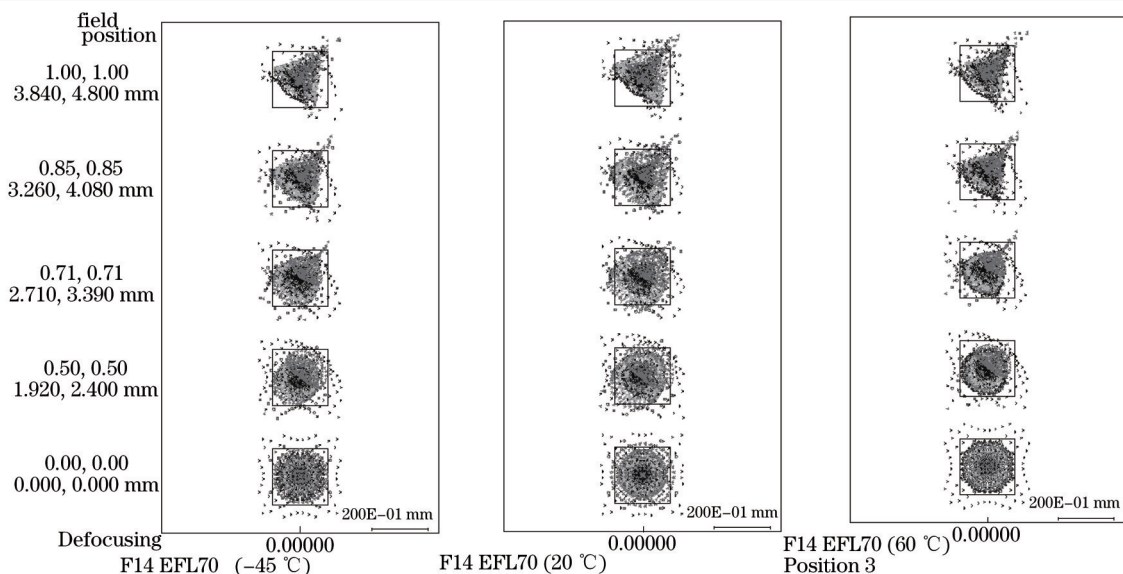


图2 光学系统在-45 °C, 20 °C和60 °C的点列图评价

Fig.2 Spot diagram of wideband optical system at -45 °C, 20 °C and 60 °C

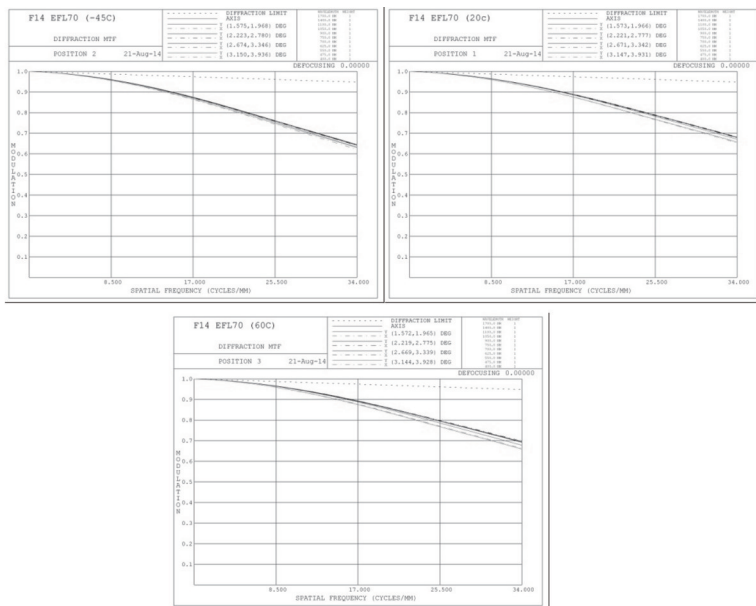


图3 光学系统在-45 °C, 20 °C和60 °C的MTF评价

Fig.3 MTF curve of optical system at -40 °C, 20 °C and 60 °C

在公差要求为:材料折射率公差为 ± 0.001 ,阿贝数公差为 ± 0.002 ;曲率半径公差为 ± 0.02 mm;厚度、偏心公差为 ± 0.02 mm;倾斜公差为 $\pm 1'$;组件与组件之间用镜筒整合,整合公差:偏心公差为 ± 0.02 mm,倾斜公差为 $\pm 1'$ 的条件下,-45 °C~60 °C范围内,90%以上概率,截止频率34 lp/mm处,MTF大于等于0.5。以上公差分析同时表明,现有的加工和装调水平完全可以满足该系统的设计要求。

4 结 论

在分析、对比光学玻璃材料在可见光、近红外和短波红外宽波段范围色散特性的基础上,论述了一种宽波段光学设计中光学玻璃材料的使用与替换方法,避免了材料选择过程的盲目性,降低了宽波段光学系统设计难度。作为例证,设计了一个0.4~1.7 μ m宽波段大相对孔径光学系统。该光学系统在所用材料皆为普通光学玻璃材料的条件下,实现了可见光、近红外和短波红外波段的共孔径共焦面集成,并且该系统具有小巧的体积、紧凑的结构、高的透射率,在全温度范围内都具有较好的成像质量与公差特性,可望在导引、预警、观瞄、跟踪等领域获得广泛应用。设计实例同时表明,该方法可用于有类似要求的光学系统的设计。

参 考 文 献

- 1 Ronald G D, Van H, Richard V. What good is SWIR? Passive day comparison of VIS, NIR, and SWIR[C]. SPIE, 2013, 8706: 87060L.
- 2 Van A Hodgkin, Jonathan G Hixson, Ted Corbin, *et al.*. Impact of waveband on target-to-background contrast of camouflage[C]. SPIE, 8355: 835519.
- 3 Cao Yang, Jin Weiqi, Wang Xia, *et al.*. Development in shortwave infrared focal plane array and application[J]. Infrared Technology, 2009, 31(2): 63-68.
曹 扬, 金伟其, 王 霞, 等. 短波红外焦平面探测器及其应用进展[J]. 红外技术, 2009, 31(2): 63-68.
- 4 Rogalski A. Optical detector for focal plane arrays[J]. Opto-Electronics Rev. 2004, 12(2): 221-245.
- 5 Kingslake R, Johnson R B. Lens Design Fundamentals[M]. Burlington: Academic Press, 2010: 137-167.
- 6 Joseph M G. Introduction to Lens Design with Practical ZEMAX Examples[M]. Richmond: Willmann-Bell Inc., 2002: 175-205.
- 7 Christopher C A. Multi spectral infrared imaging optics[C]. SPIE, 2003, 5074: 830-838.
- 8 Qu Rui, Deng Jian. Methods of correcting between-band chromatic aberration in infrared dual-band dual field of view athermalized optical design[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122006.
曲 锐, 邓 建. 红外双波段双视场消热差光学系统设计中消波段间色差条件(方法)的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122006.
- 9 Hu Yuxi, Zhou Shaoxiang, Xiang Libing, *et al.*. Design of athermal optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(10): 1386-1391.
胡玉禧, 周绍祥, 相里斌, 等. 消热差光学系统设计[J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1386-1391.
- 10 Wang Zhijiang, Gu Peisen. Practical Optical Technology Handbook[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006: 333-415.
王之江, 顾培森. 实用光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 333-415.
- 11 Optical Research Associates. Code V Reference Manual[M]. Pasadena: Optical Research Associates, 2009.

栏目编辑: 韩 峰