

文章编号:1004-4213(2010)10-1766-4

300~1 100 nm 宽波段光学系统设计*

刘娟娟^{1,2}, 郭帮辉¹, 吴宏圣¹, 刘英^{1,2}, 王健¹, 孙强¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:为了在工业检测中实现可见光探测向近紫外和近红外波段的拓展,在消色差和消热差的要求下,完成了 300~1 100 nm 宽波段光学系统设计,并进行了工业检测样机研制.为了获得足够的后工作距,系统采取反远距的结构型式,并在后工作距内放置镀膜棱镜进行三路分光,分别实现近紫外、可见光和近红外成像.通过合理选择透镜材料来达到消色差要求,采用移动透镜来完成消热差设计.系统视场为 $\pm 3.5^\circ$,焦距为 66.5 mm, $F/\#$ 为 3.3,后工作距为 63 mm,总长 132 mm.结果表明:系统在 50 lp/mm 处的 MTF 均大于 0.3,在 $-10\sim+50^\circ\text{C}$ 温度范围内保持良好成像,成像质量满足实用要求.所研制样机在实验中获得满意结果.系统通过宽波段探测增大了目标信息获取量,在工业检测和农业检测领域具有巨大优势.

关键词:宽波段;消热差;反远距;光学设计

中图分类号:TN23;O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103910.1766

0 引言

光电成像的目的在于获取目标信息,扩展成像波段是增大信息获取量的重要手段.近紫外的“吸收”特性^[1]和近红外的“透射”和“反射”特性能充分弥补可见光成像的不足,因此,综合近紫外、可见光、近红外的 300~1 100 nm 宽波段的成像系统能很好地融合各波段成像优势,增加信息获取量,提高光电探测能力.由于近紫外成像技术起步较晚,限制了该技术的发展.近年来,随着人们对近紫外成像的日益关注,近紫外 CCD 和 CMOS 成像器件不断得到发展,使得近紫外成像继红外成像之后步入迅速发展阶段,近紫外成像方案被广泛采用^[2-4],300~1 100 nm 宽波段成像系统的研制与应用成为可能,目前尚未见相关报道.

本文根据工业检测系统波段拓展以及消色差和消热差的要求,设计了 300~1 100 nm 宽波段光学系统,采用镀膜棱镜进行三路分光,分别实现近紫外、可见光和近红外探测.系统视场为 $\pm 3.5^\circ$,焦距为 66.5 mm, $F/\#$ 为 3.3,后工作距为 63 mm,总长 132 mm,并通过移动透镜来保证系统在 $(-10\sim+50)^\circ\text{C}$ 温度范围内的成像质量,在 50 lp/mm 处,

系统 MTF 大于 0.3.

1 光学系统设计思路

结构紧凑是实用光学系统的基本要求,为了在 300~1 100 nm 宽波段范围和 $(-10\sim+50)^\circ\text{C}$ 的宽温度范围获得良好的成像质量,系统必须消色差和消热差.

1.1 系统实现方式和透镜材料选择

为了在一套系统中同时实现近紫外、可见光和近红外三路成像,系统采用镀膜棱镜对光路进行分束.

选择透镜材料时,能在 300~1 100 nm 波段范围使用的材料非常有限,考虑到材料的耐辐射性能、理化性能及加工性能,此外,材料的选择必须满足消色差条件.经分析,色散小的 CaF_2 作正透镜,色散大的熔融石英作负透镜是合理选择.

1.2 光学系统结构型式确定

为了使结构尺寸尽可能简单紧凑,系统采用折射一次成像结构.

为获得较大后工作距离以放置分光棱镜,系统采用反远距结构,即负光焦度组作前组,正光焦度组作后组.将系统看作薄透镜系统,假定光阑在后组上,在规一化条件进行分析,可得

$$1/\gamma_1 = 1 - d\varphi_1 = l'_2 \quad (1)$$

式中: γ_1 为前组角放大率, φ_1 为前组光焦度, d 为前后组间隔, l'_2 为高斯光学的后工作距离.由式(1)可知, $1/\gamma_1$ 决定了系统的后工作距离, $1/\gamma_1$ 一定时,缩

* 国家高技术研究发展计划(2007AA12Z110)、国家自然科学基金(60507003)和吉林省科技发展计划杰出青年项目资助

Tel:0431-86176292-891

Email:haphorse@gmail.com

收稿日期:2010-03-12

修回日期:2010-04-19

短筒长必须减小 d , 但 φ_1 必须增大, 后组光焦度 φ_2 随之增大, 前、后组相对孔径相应增大, 由此可知, 缩短筒长必须增加系统复杂度, 必须综合考虑两方面因素, 合理选择 d , 本设计选择 d 大约为 0.5。

为了满足前组视场和相对孔径的要求, 并初步校正色差, 前组结构在负-正和正-负分离透镜之间进行选择。由于厚度和间隔的作用, 负透镜在前能够获得更长的后工作距离, 在后工作距离一定的条件下有利于高级像差的校正, 因此, 前组采取负-正分离透镜的结构型式。

远距离物体发出的光线经负光焦度前组发散后, 对于后组来说, 就成为对近距离物体成像的投影物镜, 物像关系比较对称, 因此选择对称于光阑的结构型式, 长后工作距导致后组相对孔径不大, 光阑两边选用正负透镜组的对称结构, 后组进一步校正前组的残余像差。

1.3 温度补偿

当系统在宽温度范围使用时, 温度变化会改变系统参量, 使系统产生温度离焦。当采用薄透镜模型时, 对于镜筒内包含 j 个薄透镜的系统, 系统焦移为^[5]

$$\Delta f = - \left[f^2 \sum_{i=1}^j \left(\frac{T_i}{f_i} \right) + \alpha_H f \right] \Delta t \quad (2)$$

式中 $T_i = \frac{dN_i/dt}{N_i - 1} - \alpha_{Li}$ 为热玻璃常量, t 为当前温度, f 为系统焦距, N_i 、 f_i 和 α_{Li} 分别为第 i 个薄透镜的材料折射率、焦距和热膨胀系数, α_H 为镜筒材料热膨胀系数。公式表明: 温度变化引起的光学元件和机械结构的膨胀或收缩, 以及光学元件材料折射率变化决定了系统焦移量。

利用变焦系统设计思想, 把光学系统的无热化设计看成是广义的变焦系统设计, 可以实现复杂可见光折射系统的无热化设计^[6]。依据此思路, 本设计采用移动透镜来进行广义变焦, 补偿温度离焦, 达到消热差目的, 该方法简单有效, 无须光学系统的进一步复杂化。

2 设计实例

2.1 光学系统结构

所设计系统视场为 $\pm 3.5^\circ$, 焦距为 66.5 mm, $F/\#$ 为 3.3, 后工作距为 63 mm, 总长 132 mm。

图 1 分别给出近紫外、可见光、近红外分系统光学结构图, 反远距结构组成共光路部分, 然后采用镀膜棱镜三路分光。负-正分离透镜 1、2 构成反远距结构前组, 后组由透镜 3~6 构成, 透镜 3、4 和 5、6 对称于光阑 7, 通过移动透镜 2 进行温度补偿。系统在

一次像面前分光, 分光棱镜由三个棱镜胶合而成, 对角面 8 和 9 为胶合面, 并都镀有分光膜, 对角面 8 能反射近紫外光 (300~380 nm), 透射可见光和近红外光 (380~1 100 nm), 反射率和透射率分别约为 60% 和 90%; 对角面 9 能反射可见光 (380~760 nm), 透射近红外光 (760~1 100 nm), 反射率和透射率分别约为 85% 和 90%。近紫外探测器和可见光探测器的窗口玻璃均能滤除杂光, 近红外探测器前必须加近红外滤光片 10 滤除少量可见光。

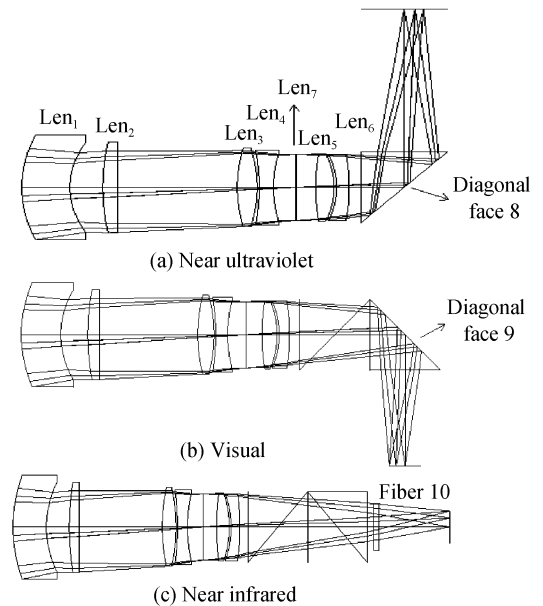


图 1 光学系统结构图

Fig. 1 Construction of the optical systems

2.2 温度补偿分析和像质评价

表 1 给出透镜 2 的温度补偿移动量, 参考温度为 20°C , 其中“+”、“-”分别表示向右、左移动, 透镜 2 的总行程为 3.18 mm。利用表 1 的数据进行最高项系数为 3 的多项式拟合, 得到图 2 的温度补偿曲线, 整个温度范围内, 补偿曲线近似线性变化, 表

表 1 温度补偿分析

Table 1 Analysis of temperature compensation

Temperature/ $^\circ\text{C}$	-10	10	20	30	50
Displacement/mm	-1.66	-0.70	0	0.47	1.52

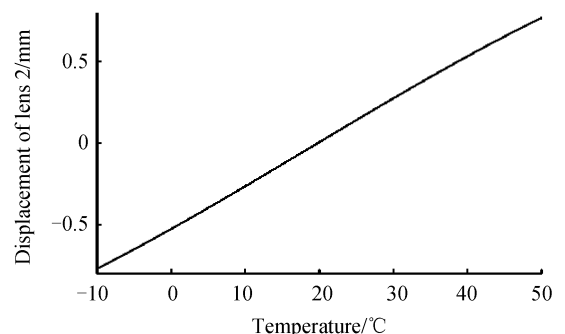


图 2 温度补偿曲线

Fig. 2 Temperature compensation curve

明实现温度补偿的机械移动具有很高的平滑性。

经优化设计后,系统三个子波段的调制传递函数(MTF)曲线如图 3,20 ℃时,空间频率 50 lp/mm 处,不同视场下,系统 MTF 均大于 0.3,满足成像要求。图 4 给出中心视场 RMS 点斑半径随温度变化的 4 次多项式拟合曲线,近紫外、可见光、近红外波段最大 RMS 点斑半径分别约为 11 μm 、10 μm 、12 μm ,变化量分别约为 2 μm 、5 μm 、5 μm ,说明系统在整个温度范围内成像质量波动不大,系统在不同波段、不同温度下具有较高的综合成像质量,满足

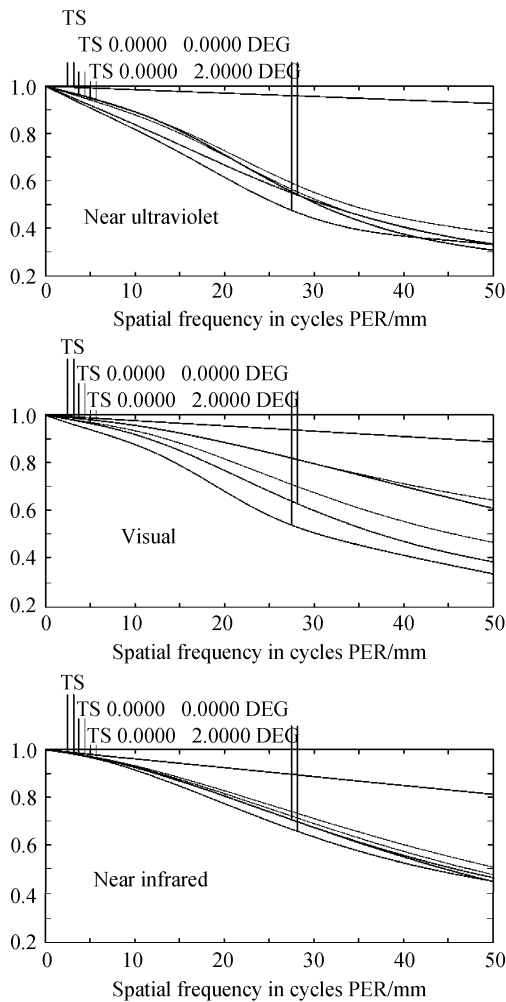


图 3 光学系统 MTF(20 ℃)
Fig. 3 MTF of optical system(20 ℃)

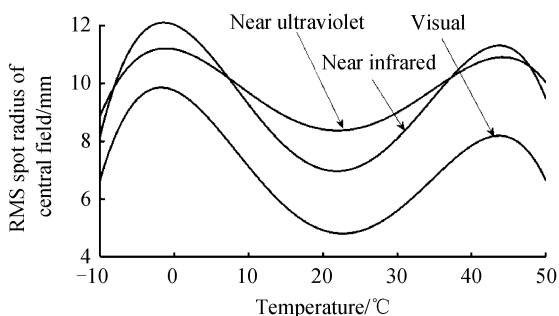


图 4 中心视场 RMS 点斑半径温度变化曲线
Fig. 4 RMS spot radius of central filed versus temperature

工业检测成像要求。

2.3 工业检测样机实验结果

将所设计多波段系统应用于工业检测样机研制,图 5 为样机实拍各子波段图像,可见光图像由 3CCD 接收,近紫外、可见光(蓝、绿、红)、近红外图像分别从不同角度提供目标的多样化信息,充分体现了各波段信息优势互补的特性,从而增大了检测目标的信息获取量,提高了检测能力。

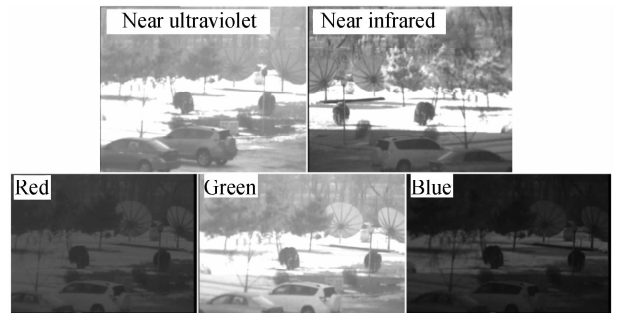


图 5 样机实拍图像
Fig. 5 Real image of prototype

3 结论

为了实现工业检测中可见光探测向近紫外和近红外的波段拓展,在消色差和消热差的要求下,设计了 300~1 100 nm 宽波段光学系统,其视场为 $\pm 3.5^{\circ}$,焦距为 66.5 mm, $F/\#$ 为 3.3,后工作距为 63 mm,总长 132 mm,并通过移动透镜,保证了系统在 $(-10\sim+50)^{\circ}\text{C}$ 温度范围的成像质量,在 50 lp/mm 处,光学系统 MTF 大于 0.3. 300~1 100 nm 宽波段探测系统通过波段拓展增加了信息获取量,具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] RICHARDS A. Digital reflected-ultraviolet imaging[J/OL]. *Advanced Imaging Magazine*, 2006-3. [2010-4-17]. <http://www.advancedimagingpro.com/print/Advanced-Imaging-Magazine/Digital-Reflected-Ultraviolet-Imaging/1MYM2631>.
 - [2] BAI Qing-lan, MIAO Xing-hua. Achromatized design of near uv-visible wide-angle objective[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1331-1335.
 - [3] JIN Gui-ping, PANG Qi-chang. The key points of UV imaging and detecting system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 294-297.
 - [4] YIN Da-yi, FENG Xin, ZHANG Yan, et al. Research of new-style ultraviolet push-broom imaging technology[C]. *SPIE*, 2009, **7384**: 738403-1-738403-7.
 - [5] RIEDL M J. *Optical design fundamentals for infrared system* [M]. 2nd ed. Washington: SPIE, 2001:132.
 - [6] QIAN Yi-xian, JIA Yuan-lin, LIANG Wei, et al. Athermal design for visible optical system on aerial CCD camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2279-2282.
- 钱义先,贾远林,梁伟,等.航空 CCD 相机可见光光学系统消热差设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2279-2282.

Design of 300~1 100 nm Broad-waveband Optical System

LIU Juan-juan^{1,2}, GUO Bang-hui¹, WU Hong-shen¹, LIU Ying^{1,2}, WANG Jian¹, SUN Qiang¹

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to extend visualized detection to near ultraviolet and near infrared waveband for industrial testing, under the requirement of achromatic and passive thermal design, broad-waveband optical system working in 300~1 100 nm range is designed, and prototype for industrial testing is developed. Inverted telephoto construction is adopted to achieve an enough back focal length, and splitting the optical beams into three is achieved by inseting a coating prisms within the back focal length, near ultraviolet, visual and near infrared are imaged in three beams respectively. Reasonably lens material is chose to realize achromatic design. The system is passive thermal by moving a lens. The designed system has a field-of-view of $\pm 3.5^\circ$, the effective focal length, $F/\#$, back focal length and total length is 66.5 mm, 3.3 mm, 63 mm and 132 mm respectively. The results indicate that all MTF is more than 0.3 at 50 lp/mm, and a good performances is achieved over a temperature range ($-10 \sim +50$) $^\circ\text{C}$, the image requirement is met. Prototype exhibit excellent resulting during experiment. The system gathers as much information as possible about the detected objects by extending waveband, and a good advantage is exhibited in industrial and agricultural testing.

Key words: Board-waveband; Passive thermal; Inverted telephoto; Optical design



LIU Juan-juan was born in 1987. She is presently pursuing her M. S. degree at Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, and her research interests focus on optical system design.



SUN Qiang was born in 1971. He received his Ph. D. degree from Nankai University. Now he is a researcher at Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, his research interests focus on binary optics, infrared optical system design and simulations.