

文章编号 1004-924X(2011)06-1228-07

三波段电晕检测光学系统的设计

刘建卓^{1,2*}, 王学进³, 黄剑波^{1,2}, 郭帮辉^{1,2},

曲锋^{1,2}, 王健^{1,2}, 方伟¹, 孙强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 100049; 3 第二炮兵工程设计研究院, 北京 100011)

摘要: 为了对电晕放电进行全天候的检测, 设计了一套包含日盲紫外、可见光和长波红外的三波段电晕检测光学系统。为了减小系统体积, 提高系统性能, 日盲紫外和可见光波段采用共光路结构; 长波红外段采用独立光路, 利用衍射面特殊的色散特性和非球面技术对系统进行单色像差和色差校正, 减少系统的镜片数量。系统采用单镜片调焦设计来保证其在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内清晰成像。对设计的系统进行了像质评价, 结果表明, 在空间频率 60 lp/mm 处, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时全视场内日盲紫外波段系统的 $\text{MTF}>0.37$, 可见光波段系统的 $\text{MTF}>0.35$; 在空间频率 20 lp/mm 处, 全视场内长波红外波段系统的 $\text{MTF}>0.6$, 3个波段均能清晰成像, 满足电晕检测的要求。

关键词: 电晕放电检测; 三波段光学系统; 日盲紫外; 长波红外

中图分类号: TB971; TN23 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111906.1228

Design of three-band optical system used in corona detection

LIU Jian-zhuo^{1,2*}, WANG Xue-jin³, HUANG Jian-bo^{1,2}, GUO Bang-hui^{1,2},

QU Feng^{1,2}, WANG Jian^{1,2}, FANG Wei¹, SUN Qiang¹

(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 100049, China;*

3. *Engineering Design & Research Institute of the Second Artillery, Beijing 100011, China)*

** Corresponding author, E-mail: ljz0220@163.com*

Abstract: In order to detect corona discharge in all weather situations, a three-band optical system worked at three bands of the solar blind UV, visible and the long infrared was designed for the corona detection. To reduce the system volume and improve the performance merits, a co-lens system was used for both the solar blind UV and visible bands, and an independent lens system containing aspheric surfaces and diffraction surface was adopted for the long infrared band to correct monochromatic and chromatic aberrations. Furthermore, the focusing system was designed with a single lens to ensure an excellent imaging in the temperature from $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. The image quality of the system was evaluated, and it is shown that at the temperature of $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, the MTF at the spatial frequency of 60 lp/mm

收稿日期: 2010-11-22; 修订日期: 2011-01-15.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA12Z110); 国家自然科学基金资助项目 (No. 60507003, No. 60977001)

is greater than 0.37 in the solar blind UV, and greater than 0.35 in the visible band for the whole fields of view; the MTF at the spatial frequency of 20 lp/mm is greater than 0.6 in the long infrared band for the whole fields of view. These results indicate that the system has excellent imaging characteristics at all three bands, and can be used in the detection of corona discharge in all weather situations.

Key words: corona discharge detection; three-band optical system; solar blind UV; long infrared

1 引言

电力系统中的电晕放电易导致电能大量损耗,且会损坏绝缘子,造成电力系统严重事故,因此,必须在电力故障发生之前及早对电晕放电进行检测、定位和评估,从而减小电力系统损失^[1-3]。

传统的电力线路电晕检测采用人工目视检查,很难观察到小面积的电晕放电,即使观察到电晕放电也无法准确记录电晕放电位置。90年代长波红外热像仪被用于电晕检测,但由于白天太阳光谱中含有非常强的长波红外光,而且电晕放电产生的长波红外光能量弱,系统信噪比低,检测效果比较差。目前国外已有紫外和可见光两波段电晕检测仪,可仅限于白天环境。

为了从根本上克服以上缺点,提高电晕检测的准确率,同时保证系统能在白天、雾天、雪天和夜晚都能进行电晕检测,本文设计了一种电晕放电检测系统。该系统集成了日盲紫外、可见光和长波红外3个波段,其中,日盲紫外光学系统能够检测到电晕放电,可见光系统能够在白天对电晕周围背景成像,长波红外光学系统可以在雾天、雪天和夜晚工作,对电晕周围背景成像。然后通过图像融合,准确得到电晕放电位置。

2 系统方案

2.1 检测原理

为了减小电能远距离传输损耗,电力系统多采用高压甚至超高压传输。由于传输导线长期裸露在空气中,极易被腐蚀的破损,导致导线表面不平滑,产生不均匀的强电场,使周围空气电离,形成电晕。F. Grum等人对20 kV电线产生的电晕放电光谱进行了测量^[4],其210~500 nm的电

晕光谱如图1所示。R. Stolper等人对电晕光谱和太阳光谱进行了比较^[5],如图2所示。从图2可以看出,电晕光谱的10 000倍比太阳光谱还要弱,而且波长大于300 nm时,两个光谱重叠。由于在光谱重叠部分,电晕能量太弱,因此,为了对电晕放电进行测量,只能利用波长小于300 nm的240~280 nm日盲紫外波段,因为这个波段的太阳光被臭氧层完全吸收,无法到达地球表面。

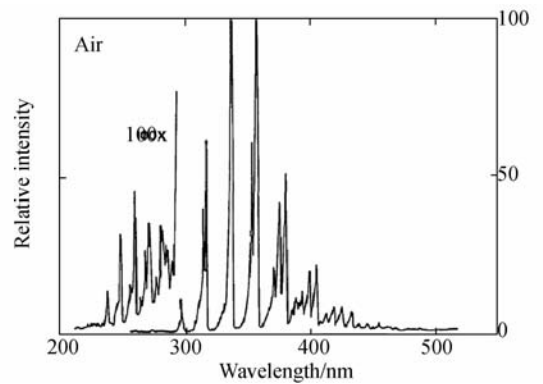


图1 20 kV电晕光谱

Fig. 1 20 kV corona discharge emission

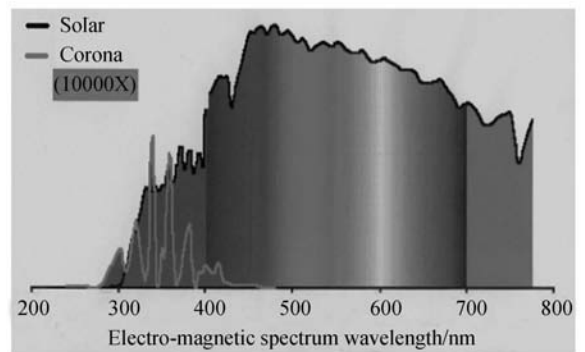


图2 电晕和太阳辐射光谱

Fig. 2 Corona and solar spectral irradiances

设计的光学系统中采用了日盲紫外窄带滤光片,让240~280 nm光波透过,其他波长的光透过率非常低,需利用图像增强型日盲紫外探测器,

将微弱的日盲紫外信号进行放大,形成电晕图像,而且图像不受太阳光影响^[6]。在系统中,还集成了可见光和长波红外成像系统,用于对电晕周围背景成像,融合电晕和背景图像,即可对电晕准确定位。在白天使用时,利用日盲紫外和可见光系统对电晕进行检测;而在夜晚或者大雾大雪天,则利用日盲紫外和长波红外系统对电晕进行检测。因此,此系统可以全天候针对任何天气状况对电晕进行检测。

2.2 系统结构

为了全天候对电晕放电进行检测,必须得到电晕放电的日盲紫外图像,同时得到周围背景图像,以便确定电晕位置。所设计的系统结构如图 3 所示。此电晕检测系统包含三个波段的光学系统,其中可见光和日盲紫外波段共用同一透镜组,利用分光镜将可见光和日盲紫外波段分别透射和反射,反射的日盲紫外光束经过日盲紫外窄带滤光片,允许 240~280 nm 的日盲紫外光透射,其他波长的光透过率非常低。由于普通光学玻璃无法透射长波红外,因此,长波红外采用一套独立的光学系统。将日盲紫外图像与可见光图像或者长波红外图像进行融合,就可以得到电晕放电图像。



图 3 系统结构图

Fig. 3 Structure of system

3 光学系统设计

3.1 光学系统参数

为了实现上述全天候电晕放电检测,本文根据图 3 所示的系统结构,设计了一套三波段电晕检测光学系统,其参数如表 1 所示。

表 1 主要技术指标

Tab. 1 Main specifications

视场角	日盲紫外和可见光: $\pm 3.3^\circ$ 长波红外: $\pm 4.1^\circ$
目标距离	5~200 m
焦距	70 mm
相对孔径	日盲紫外和可见光: 1:3 长波红外: 1:1 日盲紫外和可见光: 像元数 752×582 像元大小 8.6 μm
探测器	长波红外: 像元数 320×240 像元大小 25 μm 日盲紫外: 240~280 nm
波段	可见光: 500~650 nm 长波红外: 8~12 μm
温度	-40~+60 $^\circ\text{C}$

3.2 日盲紫外和可见光系统设计

为了减小系统体积,提高共轴精度,日盲紫外和可见光波段共用同一透镜组,利用分光镜分为两路,光束聚焦到各自的探测器,形成电晕和背景的图像。

此共光路系统的波长为 240~650 nm,能用于这个波段的透镜材料很少,常用的材料有 CaF_2 和熔融石英。根据色差平衡方程组,为了减小系统的色差,选择色散小的 CaF_2 作为正透镜,色散大的熔融石英作为负透镜。由于 CaF_2 在潮湿空气中易潮解,应在透镜表面镀保护膜。

由于本系统采用分光镜进行分光,增加了透镜组后表面到像面之间的距离,因此,光学系统采用反远距结构,以满足长的后工作距要求。

反远距结构中,负光焦度透镜组作为前组,正光焦度透镜组作为后组,在规一化条件下,总光焦度 $\varphi=1$,可以得到:

$$l_2' = 1 - d \cdot \varphi_1, \quad (1)$$

式中: l_2' 是后工作距, d 是前后透镜组之间的距离, φ_1 是前透镜组的光焦度。由式(1)可知,系统的后工作距 l_2' 一定时,为了缩短镜筒长度必须减小 d ,但由此必须增大 φ_1 ,这样后组光焦度就会随之增大,前、后组相对孔径也相应增大,从而引起与孔径相关的高级像差增加,使系统结构复杂化。综合考虑两方面因素,本设计选择 d 为 0.4。

本系统工作温度为 -40~+60 $^\circ\text{C}$,目标距离

为5~200 m,温度和物距变化会使系统像面移动,必须对系统像面位置进行调节才能保证高的成像质量。由于本系统中有两个成像探测器,移动探测器会增加结构复杂度,因此,采用移动一片透镜的方法进行温度和距离调焦补偿,使日盲紫外和可见光波段在温度和物距变化时都能清晰成像。本系统中通过移动图4中的透镜2微量调节焦距,对温度和物距变化时的像面位置进行补偿,透镜2移动量在±1.2 mm内。

图4为日盲紫外和可见光系统光路图,光学元件1~6组成反远距结构,其中,透镜1和2组成前负透镜组,它们与系统光阑和透镜4~6组成后正透镜组。分光镜可以使240~650 nm的光束半透半反,可见光滤光片可使500~650 nm的光束透过,其它波长的光被吸收。日盲紫外窄带滤光片的峰值波长为260 nm,带宽为40 nm。

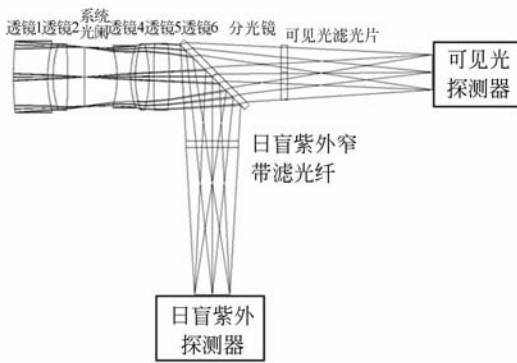


图4 日盲紫外和可见光系统结构图

Fig. 4 Structure of solar blind UV and visible system

由于日盲紫外波段的能量很弱,为了提高日盲紫外探测器的信噪比,必须满足^[7]:

$$T \cdot Q < 10^{-12}. \quad (2)$$

式中: T 是日盲紫外滤光片对240~280 nm之外的光线透过率; Q 是日盲紫外探测器对240~280 nm之外光束的响应率。

3.3 长波红外系统设计

长波红外系统^[8]采用独立的光路,系统采用Pvetzval物镜结构,在满足光学性能要求下,为减小系统复杂程度,系统只用两片透镜,系统光路图如图5所示。在图5中,两透镜上的面1和2都是非球面,在面2上加载了两个衍射环带,构成二元光学衍射面^[9-11]。

非球面可以引入多个变量,从而在不增加光学表面的前提下对系统进行优化,提高成像质量。二元光学衍射面具有纯位相任意调制的特点,能够提供正光焦度和负色散,其参与的折射/衍射光学系统具有优良的像差校正特点,特别是对于宽光谱色差的校正尤为有效,本系统在标准非球面基底上加工衍射环带,进而使光学系统大大简化,系统集成更加容易。衍射面位相和周期关系曲线如图6所示。

该衍射面包含两个环带,环带宽度分别为24.05 mm,35.12 mm。衍射环带可以采用金刚石车削技术进行加工。

本系统中通过移动第二片透镜微量调节焦距,对温度和物距变化时的像面位置进行补偿,透镜2移动量在±0.65 mm内。

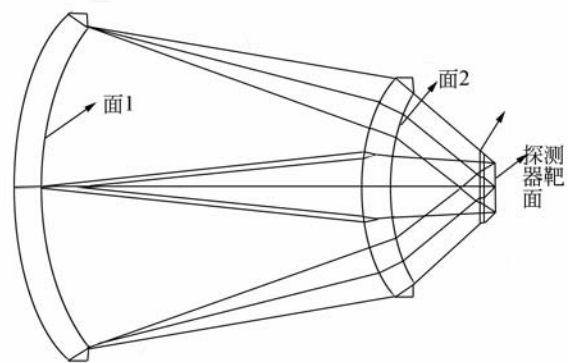


图5 长波红外光路图

Fig. 5 Structure of long infrared system

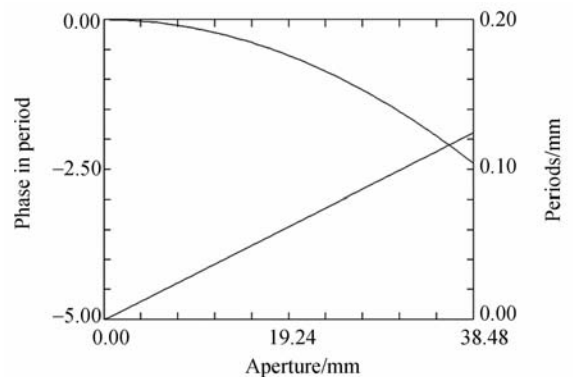


图6 衍射面位相和周期曲线

Fig. 6 Phase and phase frequency versus aperture of DOE

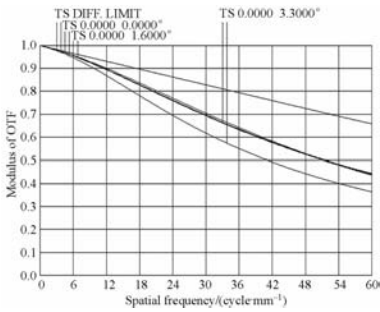
4 像质评价

根据以上设计方案,光学系统经优化设计后,三个波段的光学系统调制传递函数曲线如图 7、8 和 9 所示。

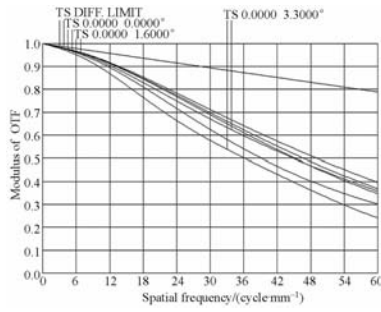
图 7(a)、(b)和(c)分别是日盲紫外光学系统在 20、-40 和 60 °C 时的传递函数曲线。20 °C 时,空间频率 60 lp/mm 处,在全视场内日盲紫外光学系统 $MTF > 0.37$; -40 °C 和 60 °C 时,空间频率 60 lp/mm 处,在全视场内,日盲紫外光学系统 $MTF > 0.25$,满足清晰成像要求。

图 8(a)、(b)和(c)分别是可见光光学系统在 20、-40 和 60 °C 时的传递函数曲线。20 °C 时,空间频率 60 lp/mm 处,在全视场内可见光光学系统 $MTF > 0.35$; -40 °C 和 60 °C 时,空间频率 60 lp/mm 处,在全视场内日盲紫外光学系统 $MTF > 0.18$,均满足清晰成像要求。

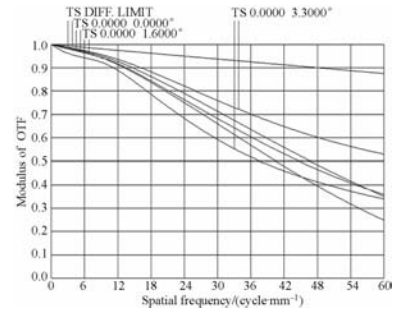
图 9(a)、(b)和(c)分别是长波红外光学系统在 20、-40 和 60 °C 时的传递函数曲线。20 °C 时,空间频率 20 lp/mm 处,在全视场内,长波红外光学系统 $MTF > 0.65$; -40 °C 和 60 °C 时,空间频率 20 lp/mm 处,在全视场内日盲紫外光学系统 $MTF > 0.42$,均满足清晰成像要求。



(a) 20 °C 日盲紫外光学系统传递函数曲线
(a) MTF of solar blind UV optical system at 20 °C

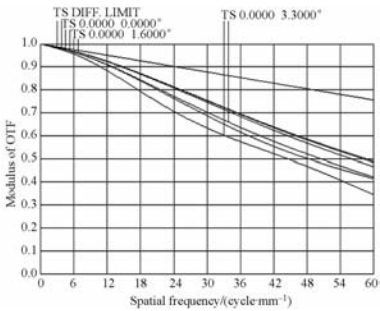


(b) -40 °C 日盲紫外光学系统传递函数曲线
(b) MTF of solar blind UV optical system at -40 °C

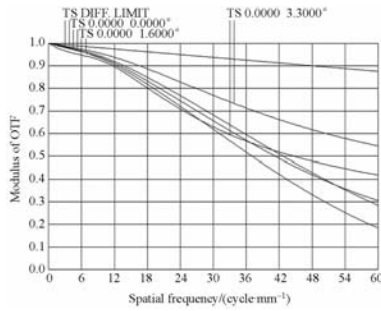


(c) 60 °C 日盲紫外光学系统传递函数曲线
(c) MTF of solar blind UV optical system at 60 °C

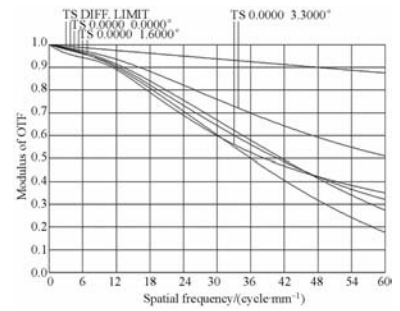
图 7 日盲紫外光学系统传递函数曲线
Fig. 7 MTFs of solar blind UV optical system



(a) 20 °C 可见光光学系统传递函数曲线
(a) MTF of visible optical system at 20 °C

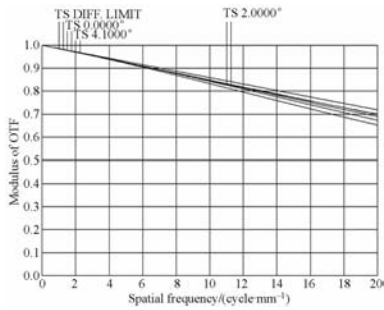


(b) -40 °C 可见光光学系统传递函数曲线
(b) MTF of visible optical system at -40 °C



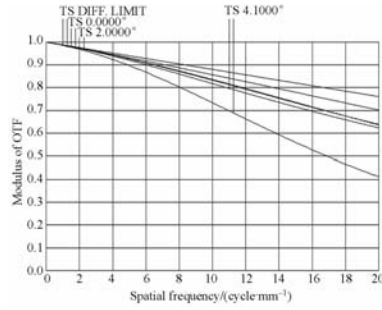
(c) 60 °C 可见光光学系统传递函数曲线
(c) MTF of visible optical system at 60 °C

图 8 可见光光学系统传递函数曲线
Fig. 8 MTFs of visible optical system



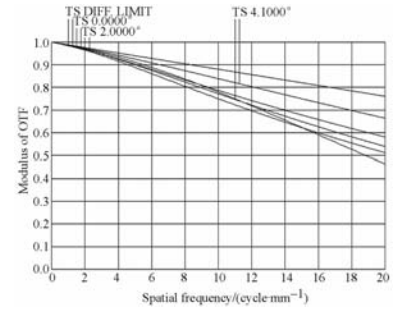
(a) 20 °C 长波红外光学系统传递函数曲线

(a) MTF of long infrared optical system at 20 °C



(b) -40 °C 长波红外光学系统传递函数曲线

(b) MTF of long infrared optical system at -40 °C



(c) 60 °C 长波红外光学系统传递函数曲线

(c) MTF of long infrared optical system at 60 °C

图9 长波红外光学系统传递函数曲线

Fig. 9 MTFs of long infrared optical system

5 结论

三波段电晕检测系统,能够在白天、夜晚、大雾天和大雪天等天气状况下,远距离探测高压输电设备的电晕放电,并对电晕放电位置进行精确定位,从而判断高压输电设备的损坏程度,为电力部门预防重大电力事故的发生提供了技术保障。

本文设计了一套三波段电晕检测光学系统,包含日盲紫外波段、可见光波段和长波红外波段。

其中,日盲紫外和可见光波段采用共光路结构,提高了两个光路的同轴性,便于图像融合处理;长波红外波段采用独立光路,并利用衍射面和非球面技术对系统进行像差校正,既减少了系统的镜片数量,又提高了系统成像质量。该系统采用单镜片调焦方式,能满足-40~+60 °C和5~200 m使用条件下的温度和距离调焦要求。系统设计结果表明,该系统在指标要求的环境下使用,能够清晰成像,满足电力设备电晕检测的要求。

参考文献:

- [1] 张海锋,庞其昌,陈秀春. 高压电晕放电特征及其检测[J]. 电测与仪表, 2006,43(482):6-8.
ZHANG H F, PANG Q CH, CHENG X CH. The characteristics of high-voltage corona and its detection [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2006,43(482):6-8. (in Chinese)
- [2] 张文海. 电晕放电及其危害[J]. 大众科技, 2005(6):35.
ZHANG W H. Corona discharge and its hazards [J]. *Da Zhong Ke Ji*, 2005(6):35. (in Chinese)
- [3] 傅晨钊,周建国,肖嵘,等. 紫外电晕检测仪检测线路绝缘子的模拟试验[J]. 华东电力, 2005,33(6):50-53.
FU CH Z, ZHOU J G, XIAO R, et al.. Simulation experiments of UV corona detectors for monitoring

- of line insulators[J]. *East China Electric Power*, 2005,33(6):50-53. (in Chinese)
- [4] GRUM F, COSTA L F. Spectral emission of corona discharges[J]. *Applied Optics*, 1976,15(1):76-79.
- [5] STOLPER R, JACO H, MAHATHO N, et al.. The design and evaluation of a multi-spectral imaging camera for the inspection of transmission lines and substation equipment[EB/OL]. http://www.corocam.co.a/papers/inmr_publication-2005-hk.pdf.
- [6] 靳贵平,庞其昌. 紫外成像检测技术[J]. 光子学报, 2003,32(3):294-296.
JIN G P, PANG Q CH. The key points of UV imaging and detecting system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003,32(3):294-296. (in Chinese)
- [7] FORSYTH K W. Corona discharge imaging system for outdoor daylight use: United States Patent, No. 6323491B1[P]. 2001.

- [8] 刘英,王靖,曲锋,等. 广角 $f-\theta$ 静态红外地平仪镜头的光学设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1243-1248.
LIU Y, WANG J, QU F, *et al.*. Optical design of a high precision wide-angle lens for static infrared earth sensors [J]. *Opt. precision Eng.*, 2010, 18(6): 1243-1248. (in Chinese)
- [9] 刘英,孙强,卢振武,等. 谐衍射中、长波红外超光谱成像系统设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3), 579-585.
LIU Y, SUN Q, LU ZH W, *et al.*. Design of hyper-spectral imaging system with harmonic diffraction element in medium and long infrareds [J]. *Opt. precision Eng.*, 2010, 18(3): 579-585. (in Chinese)
- [10] 刘英,孙强,卢振武,等. 折射/谐衍射红外双波段成像光谱仪系统研究[J]. 物理学报, 2010, 59(10): 6977-6984.
LIU Y, SUN Q, LU ZH W, *et al.*. Study on hyper-spectral imaging system with harmonic diffraction element in medium and long infrared [J]. *Acta phys. Sin.*, 2010, 59(10): 6977-6984. (in Chinese)
- [11] 刘英,潘玉龙,王学进,等. 谐衍射/折射太赫兹多波段成像系统设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2065-2071.
LIU Y, PAN Y L, WANG X J, *et al.*. Design on imaging system with harmonic diffraction element in terahertz multi-band [J]. *Opt. precision Eng.*, 2008, 16(11): 2065-2071. (in Chinese)

作者简介:



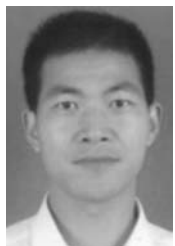
刘建卓(1983—),男,吉林松原人,博士研究生,2005年于吉林大学获得学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光学仪器的研究。E-mail: ljz0220@163.com



黄剑波(1983—),男,四川广元人,助理研究员,2006年,2008年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学仪器结构设计的研究。E-mail: huangjianbo208@163.com



曲锋(1984—),男,山东泰安人,博士研究生,2006年于长春理工大学获得学士学位,主要从事红外图像处理方面的研究。E-mail: qu8888@sohu.com



郭帮辉(1983—),男,湖北鄂州人,研究实习员,2006年,2008年于华中科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光电测量设备光学设计的研究。E-mail: gbhyxl@163.com



王健(1980—),男,吉林辉南人,博士研究生,助理研究员,2002年,2005年于南开大学分别获得学士、硕士学位,主要从事红外系统光学设计,红外成像系统测试方面的研究。E-mail: mr-wangj@hotmail.com

导师简介:



方伟(1965—),女,辽宁朝阳人,研究员,博士生导师,1987年于山东大学获得学士学位,1997年,2005年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事辐射计量及空间光学遥感仪器的研究。E-mail: fangw@ciomp.ac.cn



孙强(1971—),男,黑龙江海伦人,研究员,博士生导师,2003年于南开大学获得博士学位,2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所博士后出站,主要从事现代红外光学仪器方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.an.cn