

文章编号:1002-2082(2010)05-0695-06

微光彩色夜视光学系统设计与像质评价

蔡占恩^{1,2}, 刘朝晖¹, 黄 静^{1,2}, 牛金星^{1,2}

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 为了充分利用可见光和长波红外所蕴含的不同信息进行数据融合、彩色显示, 分析了3种不同类型双波段光学系统及其成像性能, 设计了全折射光学系统、折反射光学系统和离轴三反射双谱光学系统。采用不同的分光形式, 反射可见光波段, 透射长波红外波段, 使3种不同类型光学系统的全视场角和相对孔径分别为 5° 和 $1:1.7$; 光学系统在可见光波段成像质量对应的空间频率 50 lp/mm 处的 $\text{MTF}=0.60$, 在长波红外波段成像质量对应的空间频率 15 lp/mm 处的 $\text{MTF}=0.30$ 。对不同结构类型的系统特点进行分析和讨论, 给出了各种像差曲线和光学传递函数曲线, 为多波段彩色夜视设计了不同类型的光学系统。

关键词: 夜视光学系统; 微光彩色; 双波段; 光学设计

中图分类号: TN22

文献标志码: A

Optical design for low-level-light color night vision system and its image quality evaluation

CAI Zhan-en^{1,2}, LIU Zhao-hui¹, HUANG Jing^{1,2}, NIU Jin-xing^{1,2}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China;

2. Graduate University of CAS, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to use visible and long wave infrared information for image fusion and color display, three dual-band imaging optical systems and theirs imaging performance were analyzed. All-refractive optical system, catadioptric optical system and off-axis three-reflection dual spectrum optical system were designed. A beam splitter was adopted to reflect visible and transmit LW infrared. Its full field of view and relative aperture are up to 5° and $F/1.7$, and MTF is higher than 0.60 at 50 lp/mm in the visible region, higher than 0.30 at 18 lp/mm in the LWIR region. The construction features of the lens are discussed, the aberration curves and MTF curves of the system are presented.

Key words: night vision; optical system; low-level-light color; dual-band; optical design

引言

单波段夜视技术从出现发展到现在, 已经具有相当完整的理论和比较成熟的技术, 但由于其在获取信息方面局限于几个 μm 的光谱范围内, 且为单一模式, 这使得系统的应用受到限制。由于夜晚目标的照度太低, 目前的微光夜视装置和红外热图像

仅能提供单色的黑白图像, 然而通过彩色编码, 实现双波段甚至多波段假彩色融合^[1]图像会有助于目标识别, 使识别速度提高30%, 识别错误减少60%, 尤其在军事应用中, 由于目标的伪装, 单一波段的信息减弱及辐射波段移动等原因, 使得目标的识别概率下降。众所周知, 人眼对于目标的识别不

收稿日期: 2010-01-27; 修回日期: 2010-03-05

作者简介: 蔡占恩(1985—), 男, 青海省人, 硕士研究生, 主要从事微光夜视与红外光学系统设计方面的研究工作。

E-mail: yunpiaoxiang@163.com

仅可以通过亮度和对比度,还可以通过色度来识别。目标与背景之间的色度差别,有助于提高从背景中发现和识别目标的概率,特别是在低亮度对比情况下有显著影响。同时,从信息论的角度分析,单色图像仅反映景物的亮度信息,而彩色图像不仅含有亮度信息,还有色度信息,因而彩色图像所包含的信息量比单色的灰度图像高得多。基于这样的实际情况,以提高目标探测与识别概率为出发点的微光和红外热成像双光谱融合彩色夜视技术受到越来越多的重视,彩色夜视技术是夜视技术今后发展的重要方向。国外具体代表性的两家研究机构是法国电子学与应用物理学实验室和美国麻省理工学院林肯实验室。法国电子学与应用物理学实验室成功研制出微光与红外的双谱假彩色图像处理系统,在 $3 \times 10^{-3} \text{ lx}$ 的微光条件下给出比单系统清晰得多的图像。该系统采用的是双镜头方案,存在视差以及为校正视差带来的一系列问题。美国 MIT 林肯实验室采用的是单通道双光谱融合方案,微光与红外 2 个图像传感器分别采集来自同一个视场的同一场景。系统中整个视场通过一个二向分光镜。可见光透过分光镜,通过一个透镜组成像在微光像增强 CCD 上,长波红外光学被分光镜反射,通过长波红外透镜成像在红外焦平面阵列上。

传统的双通道光学系统存在图像视差问题,需要在后续的图像融合中进行图像配准,图像融合电子设备增多,图像数据处理难度增大,达不到图像实时处理的要求。本文介绍的光学系统是单通道双光谱光学系统,解决了大视场、大相对孔径下双镜头光学系统的视差问题,结构紧凑、同轴度好、光轴稳定性好,为后续数据处理和实时彩色显示提供了便利。

1 光学系统主要性能指标

工作波段: $0.4 \mu\text{m} \sim 0.9 \mu\text{m}; 8 \mu\text{m} \sim 12 \mu\text{m}$

相对孔径: F1.7

视场: $2\omega = 5^\circ$

焦距: $f = 170 \text{ mm}$

MTF: 对于可见光波段,空间频率 50 lp/mm 处,轴上大于 0.60,轴外大于 0.40;长波红外波段,空间频率 15 lp/mm 处,轴上大于 0.30,在 0.7 视场其值大于 0.40。

全视场畸变: $< 3\%$

光电探测器件:在可见光波段采用与超二代像增强器耦合的微光 CCD 探测器,靶面有效直径为 18 mm ;在长波红外波段采用 320×240 元非制冷型焦平面阵列红外探测器,探测器单元尺寸大小为 $45 \mu\text{m} \times 45 \mu\text{m}$ 。

分光镜:根据光学系统的要求,具体指标(其中 T_{ave} 与 R_{ave} 分别表示平均透射率与平均反射率, 45° 测量),可见光区 $0.40 \mu\text{m} \sim 0.80 \mu\text{m}$,平均反射率 $R_{\text{ave}} \geq 95\%$;长波红外 $8 \mu\text{m} \sim 12 \mu\text{m}$,透射率 $T_{\text{ave}} \geq 90\%$ 。

2 光学系统结构类型

2.1 全折射光学系统

全光谱入射光线进入分光镜后被分成 2 个波段,然后 2 个波段 2 个透镜组各自校正像差,如图 1 所示。在可见光波段选用匹兹伐物镜。匹兹伐物镜是由 2 个正光焦度的双胶合透镜组成的,2 个正光焦度的双胶合透镜分开较大的距离。由像差理论可知,这将使场曲加大,故这种系统的特点就是场曲较大,球差、慧差校正得很好,前后组又分别消色差,因此可以有较大的相对孔径。相对孔径可以达到 $1:1.67$,视场 2ω 在 10° 以内。

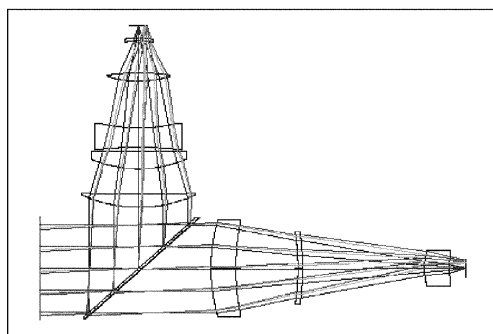


图 1 折射式双谱光学系统

Fig. 1 Dual-band refraction optical system

在长波红外波段,镜头材料可全选用锗,锗在 $8 \mu\text{m} \sim 12 \mu\text{m}$ 波长范围内折射率变化很小,有利于减小光学元件的表面曲率和光学偏向角。像差小,容易校正,设计结构容易接近衍射极限,简单的三片式物镜结构就可以达到设计要求。综上所述,图 1 为设计的光学示意图,表 1 为设计参数,图 2、3 和图 4、5 分别为其光学传递函数图和点列图。可以看到:可见光波段在空间频率 50 lp/mm 处的光学传函(MTF)大于 0.5,长波红外波段的传函达到衍射极限;双波段个视场光线所成像斑半径的均方根分别在 $9 \mu\text{m}$ 和 $5 \mu\text{m}$ 以内,成像质量良好。

表1 光学系统参数(单位:mm)

Table 1 Parameters of the optical system

半径	厚度	玻璃
-122.445 244	-15.379 782	LAF3-Z
-2 190.094 363	-28.943 269	
-110.036 220	-20.402 177	LAF2-Z
-35 415.845 289	-4.184 190	
351.459 786	-22.468 672	CAMOO4
-159.796 319	-53.759 249	
-97.960 263	-5.144 903	E-FD7
230.480 532	-37.236 738	
51.422 871	-2.499 935	FDS9
216.045 596	-15.013 894	
228.317 030	25.102 443	GERMANIUM
310.825 979	63.061 230	
-302.842 486	6.000 000	ZNSE
-243.222 867	124.228 126	
85.040 756	25.000 048	CERMANIUX
81.984 436	16.595 204	

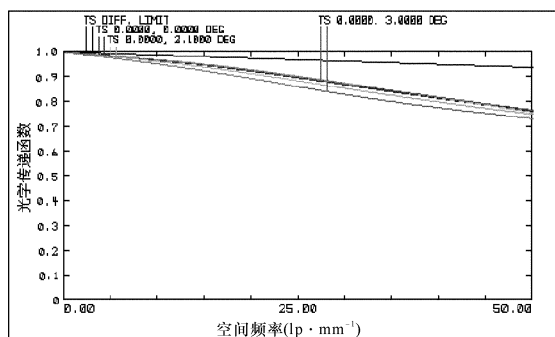


图2 可见光波段光学传递函数

Fig. 2 Optical system MTF of visible band

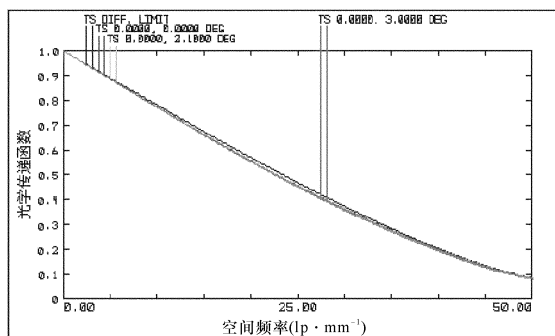


图3 长波红外波段光学传递函数

Fig. 3 Optical system MTF of LWIR

2.2 折反射光学系统

经典的卡塞格林系统主镜为抛物面,次镜为双曲面,只能校正球差,只有在很小的视场范围内得到优良的像质^[2],通常只能通过转动光学系统的方向来获得更大的观测范围。如果将主镜也改为双曲面,则可以校正球差和慧差,视场便可以增大。但为

了进一步增大视场,则还需校正场曲、像散和畸变。虽然通过复杂化校正镜可以校正慧差、像散、场曲等,但校正组太复杂,体积较大,而且校正镜的复杂程度与系统 $F/\#$ 也有很大关系,光学系统的 $F/\#$ 越小,受到二向分光镜分光空间的限制,校正镜的设计难度越大,因此共轴双反射系统的视场一直小于 3° 。随着近年来光学制造和加工技术的飞速发展,高次非球面和二元光学表面加工技术已经很成熟,加工精度能够达到系统设计公差要求,制造成本越来越低,运用高次非球面校正像差在光学设计中得到了普遍的应用。高次非球面或二元光学表面面形系数是多个自由变量决定的,为光学系统设计提供了更多的自由度。

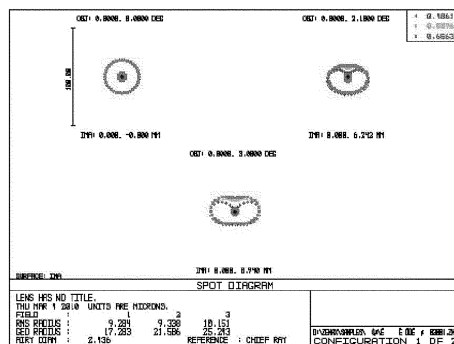


图4 可见光波段点列图

Fig. 4 Spot diagrams of visible band

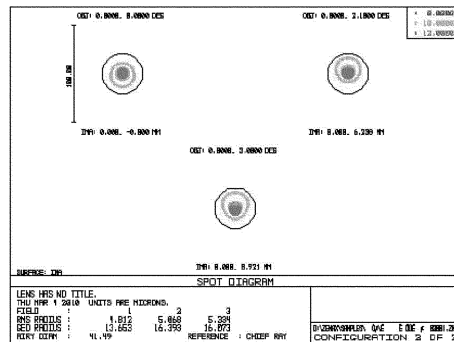


图5 长波红外波段点列图

Fig. 5 Spot diagrams of LWIR

双光谱光线从同一通光孔径入射到R-C系统,经二向分光镜分光后,在主镜后面实现可见光和长波红外分离,反射可见光波段,透射长波红外波段。次镜为一个6阶非球面,通过4片折射透镜校正可见光波段的轴外像差,其中有3面是6阶非球面;用3片锗和硒化锌(ZnSe)折射透镜校正长波红外波段像差,同时适当地改变R-C系统的结构参数,以适应双波段光谱的优化设计,如图6所示,同时成功地把R-C系统的视场提高到 5° ,得到了大视场、大相对孔径的双光谱R-C系统。由其光

学传递函数图7和图8可以看出可见光波段在空间频率50 lp/mm处的光学传函(MTF)大于0.65,长波红外的光学传函达到衍射极限;由其点列图图9和图10可以看出双光谱各视场光线成像的光斑的半径的均方根值小于6 μm 与15 μm 。

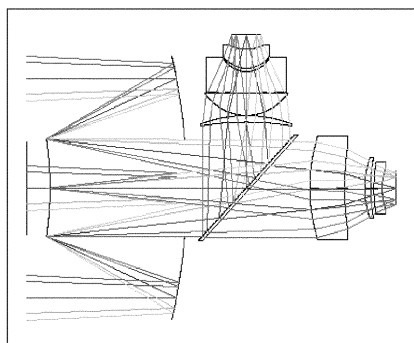


图6 折反射式双谱光学系统

Fig. 6 Dual-band catadioptric optical system

表2 光学系统参数(单位:mm)

Table 2 Parameter of the optical system

半径	厚度	玻璃
-245.376 297	-68.616 381	反射镜
-105.665 832	98.583 907	反射镜
157.080 003	-3.043 343	LAK31
68.691 678	-0.068 405	
-26.585 732	-10.317 282	LAK31
-1 338.015 293	-0.092 287	
-40.897 529	-9.547 865	SF18
-14.271 163	-1.503 144	
-15.368 085	-8.627 158	LAK31
-19.235 012	-6.739 847	
74.316 288	17.467 833	GERMANIUM
123.510 758	10.122 979	
38.991 988	2.816 886	ZNSE
58.645 712	1.732 763	
70.908 763	4.084 200	ZNSE
25.804 983	6.708 833	

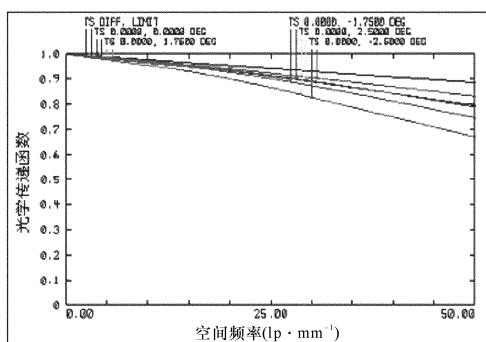


图7 可见光波段光学传递函数

Fig. 7 Optical system MTF of visible band

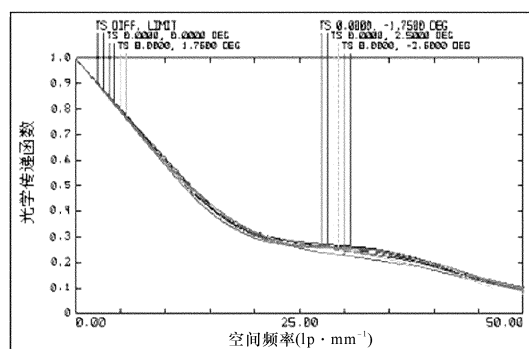


图8 长波红外波段光学传递函数

Fig. 8 Optical system MTF of LWIR

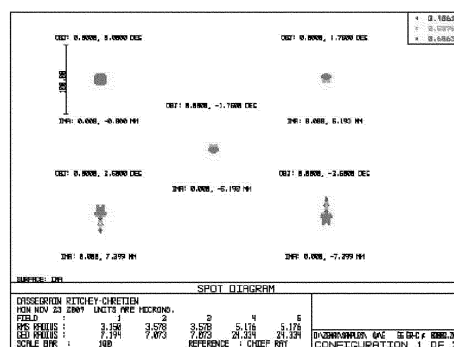


图9 可见光波段点列图

Fig. 9 Spot diagrams of visible band

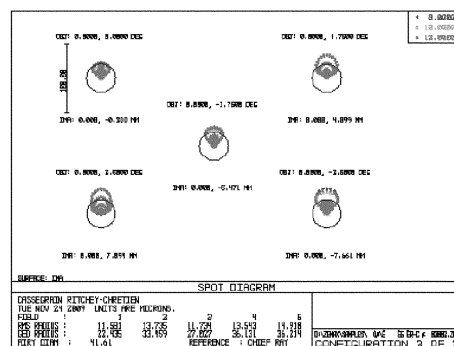


图10 长波红外波段点列图

Fig. 10 Spot diagrams of LWIR

2.3 离轴三反射系统

离轴三反射式光学系统是在同轴三反射式光学系统的基础上,将光学系统的光阑离轴、视场离轴或镜面倾斜,得到的非对称光学系统以消除同轴光学系统存在的中心遮拦问题。光阑离轴是把光阑放在主镜上,在入射光瞳上选取一部分没有被遮拦的子瞳,此类型的视场一般很小。而视场离轴是把光阑放在次镜上,主镜和三镜相对于次镜对称^[4,6],视场可以做得很大,有较大的像差校正能力,成像质量很好,但是结构比较松散,反射口径较大。图11是视场离轴的三反射系统。

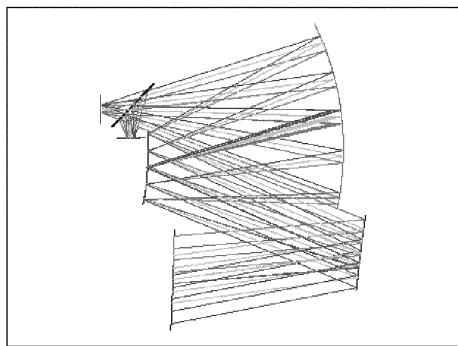


图 11 离轴三反射式光学系统

Fig. 11 Off-axis three-mirror reflective optical system

系统成像性能的评价必须选取具有代表性的视场点,在这一设计中选取如图12的视场点: $A(0, 7)$ 、 $B(2.1, 7)$ 、 $C(3, 7)$ 、 $D(0, 10)$ 、 $E(2.1, 10)$ 、 $F(3, 10)$ 、 $G(0, 13)$ 、 $H(2.1, 13)$ 和 $I(3, 13)$ 来评价整个系统的成像情况。由于系统视场关于Y方向具有对称性,因此这些点可以代表系统在整个 $6^\circ \times 6^\circ$ 的成像情况。由图13、14、15和16可以看出,双光谱各

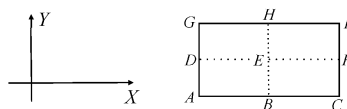


图 12 系统视场点的分布

Fig. 12 Distribution of the system's field point

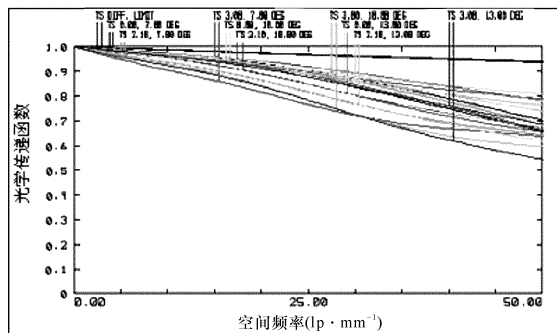


图 13 可见光波段光学传递函数

Fig. 13 Optical system MTF of visible band

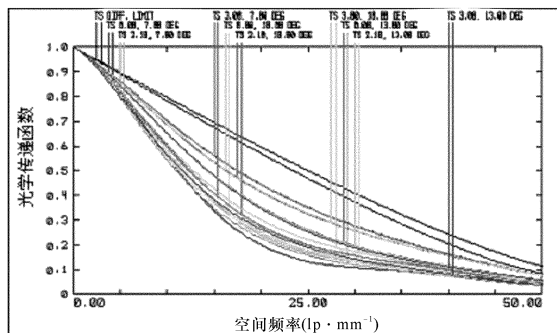


图 14 长波红外波段光学传递函数

Fig. 14 Optical system MTF of LWIR

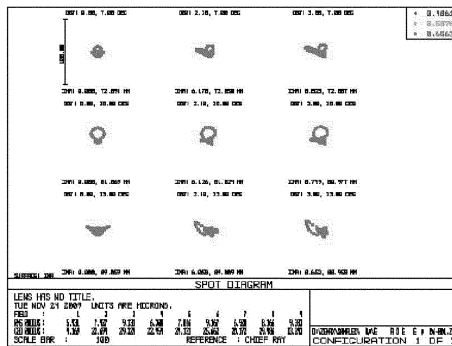


图 15 可见光波段点列图

Fig. 15 Spot diagrams of visible band

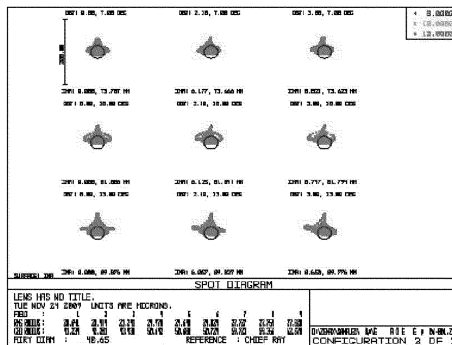


图 16 长波红外波段点列图

Fig. 16 Spot diagrams of LWIR

表 3 光学系统参数(单位:mm)

Table 3 Parameter of the optical system

半径	厚度	玻璃
-1078.449502	-471.742970	反射镜
-330.783162	408.876293	反射镜
-650.079241	-526.231825	反射镜

由传函图13、14和点列图15、16可以看出,视场空间光线所成像斑的均方根值小于 $10 \mu\text{m}$ 和 $25 \mu\text{m}$;可见光波段在空间频率 50 lp/mm 处的MTF大于0.55,长波红外波段在空间频率 15 lp/mm 处的MTF大于0.35,达到成像质量要求。

3 结论

折射式、折反射和离轴三反射在设计多光谱光学系统时,各有其优劣。折射式光学系统,每个波段由各自的光学系统校正像差,容易实现大视场、大相对孔径,但共用口径少,类似双镜头双光谱系统,系统镜片数多,体积大,质量大,不利于光学系统结构的小型化、轻量化设计。折反射系统共用R-C系统,整个系统体积小,结构紧凑,但R-C系统视场较小,有次镜中心遮拦,影响光学系统能量的利用率,降低了整个系统的可探测性和探测距离。

与反射系统和折射系统相比,离轴三反射系统避免了中心遮拦,不存在色差和二级光谱,可以在很宽的谱段范围内成像;零件数相对较少,光学系统孔径可以做得较大,且容易实现轻量化设计;减小相机体积,使整个光学系统的重量减轻;反射式光学系统对材料要求相对较低,取材容易。

参考文献:

- [1] 陶茜,郭宏,王岭雪,等. 一种双通道夜视图像彩色融合系统[J]. 应用光学, 2004,25(5):47-50.
TAO Qian, GUO Hong, WANG Ling-xue, et al. A dual-channel night vision color image fusion system [J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(5): 47-50. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 樊学武,马臻,陈荣利,等. 红外双波段卡塞格林光学系统设计[J]. 光子学报, 2003,32(4):463-465.
FAN Xue-wu, MA Zhen, CHEN Rong-li, et al. The design of Cassegrain optic system for double infrared wavebands [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(4): 463-465. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 张亮,安源,金光. 大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J]. 红外与激光工程. 2007,36(2):278-280.
ZHANG Liang, AN Yuan, JIN Guang. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view and long focal length[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 278-280. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 张颖新,乔凯,屈会鹏,等. 微光双谱彩色夜视系统研究[J]. 光电技术应用. 2006,21(5):24-27.
ZHANG Ying-xin, QIAO Kai, QU Hui-peng, et al. Research on low-light of dual-spectrum color night vision system [J]. Electro-Optic Technology Application, 2006, 21(5): 24-27. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 倪平平. 红外与微光图像融合夜视系统设计[D]. 南京:南京理工大学,2006.
NI Ping-ping. Night vision system design of image fusion with low-light and thermal infrared [D]. Nangjing: Nangjing University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [6] 卜江萍. 用于凝视式相机的大视场离轴三反光学系统研究[D]. 北京:中国科学院,2006.
BU Jiang-ping. Study on wide field off-axis reflective sytem for fixation camera [D]. BeiJing: Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)