

文章编号 1004-924X(2013)10-2520-07

舰载光电成像系统探测能力分析

乔 健

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 归纳了远目标经过光电成像系统到输出清晰图像的过程中需满足的条件, 针对相应的指标要求, 分析了光电系统的分辨率、几何探测能力和像面照度, 确定了光学镜头的焦距、相对孔径等主要设计参数。综合考虑大气传输、光学系统及 CCD 探测器等影响因素, 讨论了整个舰载光电系统的对比度和探测能力, 对光学系统的各项性能参数进行了优化匹配。最后, 在外场试验中基于所研制的光学镜头验证了舰载光电系统的探测能力, 结果显示其满足探测距离 ≥ 18 km 的指标要求, 表明所提出的理论分析合理可行, 可用于车载及机载光学系统设计。

关键词: 光电成像; 舰载光电设备; 光学系统; 探测能力; 对比度

中图分类号: TH745; U674.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132110.2520

Analysis on detection ability of shipborne optic-electronic equipment

QIAO Jian

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

* *Corresponding author, E-mail: qiaojj99065@163.com*

Abstract: Key techniques to obtain a sharp image of the long-range target through an opto-electronic tracking system were summarized. To insure the major design parameters of an optical system, the resolution, detection ability and the image plane illumination for the opto-electronic system were analyzed. Based on the effects of atmospheric transmission, optical system and CCD detector, the object-background contrast and the detection ability of a shipborne optic-electronic system were discussed, and the focal length and relative aperture of optical system were reasonably chosen. At last, the detection ability of shipborne optic-electronic equipment was tested on fields based on the developed lens. The results show that the system can meet the demand of the detection range larger than 18 km for flying targets at sea. It provides important testing data and theoretical reference for the design of shipborne opto-electronic system. Meanwhile, the design theory of shipborne optical system is suitable for the designs of vehicle and airborne equipment.

Key words: opto-electronic imaging; shipborne optic-electronic equipment; optical system; detection ability; contrast

收稿日期: 2012-11-22; 修订日期: 2013-01-17.

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目 (No. 057X22C050)

1 引 言

目前,以 CCD 器件为成像传感器的光电成像技术得到迅速发展,其应用领域涉及军事、海防、航空航天、公安监控以及人们的日常生活^[1-4]。在光学遥感和军事探测等领域对远目标探测能力的要求越来越高,由于目标能够清晰成像是远目标分辨和识别的前提,因此能否对远目标进行清晰成像成为了评价观测设备探测能力的关键^[5-7]。远目标在经过光电成像系统到输出清晰图像的过程中需满足一定条件:首先是远目标经过光学系统传输后,对人眼张角必须超过 $1'$;同时目标表面光谱辐射能量经过大气的散射、吸收,到达光学系统 CCD 像面的照度必须大于 CCD 像面的最小照度;另外目标和背景在 CCD 像面上的对比度要超过提取信号所需要的最小对比度^[8-9]。本文结合以往的实际工程经验,通过分析光学系统分辨率确定了所需光学镜头的主要设计参数,并对该系统的探测能力进行了验证^[10-11],最后归纳出了分析光学系统成像质量优劣的理论方法,并通过外场试验对该方法的准确性进行了验证。

2 光学系统分辨率

在光电成像系统中,成像质量的好坏主要取决于光学系统和 CCD 探测器的分辨率,而光学系统的分辨率由光学艾里斑的直径和 CCD 探测器分辨率的大小来决定。

当 CCD 探测器像元面积能够覆盖整个艾里斑时,艾里斑微小的变化基本不会影响光学系统的分辨率,此时系统分辨率由 CCD 探测器的像元大小决定;当艾里斑面积大于 CCD 探测器像元面积时,系统分辨率取决于光学艾里斑直径的大小。因此,光学系统的等效分辨距离可由光学系统的分辨距离和 CCD 探测器的等效分辨距离来表示。即:

$$R_e \approx \sqrt{R_o^2 + R_d^2}, \quad (1)$$

式中: R_e 为光学系统的等效分辨距离; R_o 为光学系统的分辨距离; R_d 为 CCD 探测器的等效分辨距离。

如果系统不存在光学像差,光学分辨距离由衍射极限来决定(即 $R_o = 1.854\lambda F$; CCD 探测器

的分辨距离 R_d 等于 CCD 探测器像素的有效感光宽度 d (即 $R_d = d$)。此时,光学系统的等效分辨距离为:

$$R_e = \sqrt{(1.854\lambda F)^2 + d^2} = d \sqrt{\left(\frac{1.854\lambda F}{d}\right)^2 + 1}. \quad (2)$$

当 $\lambda F = 0.405d$ 时,系统的等效弥散圆 $R_e = 1.25d$,此时认为光学系统分辨率和 CCD 探测器像素分辨率基本平衡;随着 F 数减小,系统的等效分辨长度会降至 CCD 探测器像素的有效感光宽度,此时像素大小决定了系统的分辨率;相反, F 数增大,系统的等效分辨率距离被延长,系统的分辨率由等效弥散圆决定。

光学系统的分辨距离可表示为:

$$R_o = \sqrt{R_e^2 - R_d^2} = \sqrt{(1.25d)^2 - d^2} = 0.75d. \quad (3)$$

此时,光学分辨率和 CCD 探测器像素分辨率之间达到了匹配。同时,CCD 探测器的像元大小影响着 CCD 的动态范围和 Nyquist 频率。Nyquist 频率越大,光学设计、加工及装调就越困难。经过分析选用像元大小为 0.012 mm 的 CCD 探测器,则系统分辨率为:

$$N = \frac{1}{2 \times 0.012} = 41.7 \text{ lp/mm} \approx 42 \text{ lp/mm}.$$

3 镜头参数确定

镜头参数主要包括焦距、相对孔径和视场角。其中,焦距和相对孔径直接影响着系统对目标的探测和识别能力。

3.1 焦距

连续变焦光学镜头的短焦位置和长焦位置是由探测和识别目标所需的分辨率、视场角以及 CCD 像元尺寸来确定的。

空间分辨率为:

$$\Delta\theta = \frac{L}{2nR}, \quad (4)$$

式中: L 为目标的最大外形尺寸; R 为探测或识别的最远距离; n 为目标在像面所压的线对数。

长焦距值为:

$$f'_{\max} = \frac{P}{\Delta\theta}, \quad (5)$$

式中: P 为 CCD 探测器的像元大小。

短焦距值为:

$$f'_{\min} = \frac{f'_{\max}}{g}. \quad (6)$$

其中: g 为变倍比。

根据约翰逊判据, 目标覆盖 CCD 靶面上 2 个像元(1 对线) 可实现的目标的探测概率大于 50%; 识别目标则需在 CCD 靶面上占 8 个像元(4 对线), 探测概率可达 80% 以上^[12]。

假定目标为 18 km 处截面积为 1.8 m² 的某海上飞行目标, CCD 像元尺寸为 0.012 mm, 则该飞行目标的直径约为 1 500 mm, 满足要求(及长焦识别, 短焦分辨)的焦距值为:

$$f'_{\max} = 1\ 152\ \text{mm}, \quad f'_{\min} = 288\ \text{mm}.$$

取焦距 $f'_{\max} = 1\ 200\ \text{mm}$, $f'_{\min} = 200\ \text{mm}$ 。

表 1 不同焦距对应的像元数

Tab. 1 Pixels with different focuses

焦距 f'/mm	所占像元数
200	1.7
288	2
1 152	8
1 200	8.3

3.2 相对孔径

当光学分辨率和像素分辨率之间达到匹配时, 光学系统的等效分辨长度与艾里斑直径的关系为 $D_{\text{airy}} = 0.75d$, 且:

$$D_{\text{airy}} = 1.22\lambda F, \quad (7)$$

式中: λ 为波长, 在可见光波段 λ 取 0.65 μm 。此时: $1.22\lambda F = 0.75d$, $F = 11.2$ 。

随着 F 数增大, 光学系统的分辨率降低, 到达像面的照度降低; 而目标成像在 CCD 像面的前提是目标在像面的照度大于 CCD 的最小照度, 因此, F 数取 9.6(长焦)和 8(短焦)。所选 CCD 的最小照度为 0.01 lx, 海面照度 E_g 取黄昏时(太阳高度角为 0°) 1 000 lx, 漫反射系数 K 取 0.3, 则目标被照射后所获得的反射亮度为:

$$B_0 = \frac{E_g}{\pi} \times K = 95.49. \quad (8)$$

光学系统的透过率:

$$\tau_0 = 0.99^{16} \times 0.975^9 \approx 0.68.$$

根据大气透过率计算公式^[13]:

$$\tau_a(R) = \exp\left[-\frac{3.912}{R_V} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^q R\right], \quad (9)$$

式中: R 为观测距离; R_V 为大气能见度; q 为 1.3; λ 为波长(取 0.65 μm)。

由式(9)可得出: 大气透过率 $\tau_a = 0.023$ 。

CCD 靶面的照度计算公式为:

$$E = \frac{\pi}{4} B_0 \left(\frac{D}{f}\right)^2 \times \tau_1 \times \tau_2. \quad (10)$$

因此, 当 $F = 9.6$ 时, $E = 0.013\ \text{lx}$; 当 $F = 8$ 时, $E = 0.018\ \text{lx}$ 。

由此可知, 目标到达 CCD 靶面的照度大于 CCD 靶面的最低灵敏度 0.01 lx。因此, 在能见度为 13 km 时, 该镜头从拂晓到黄昏均可以看到 18 km 远处截面积为 1.8 m² 的飞行目标。

为保证该飞行目标在靶面上覆盖不小于 8 个像元, 镜头对应的最低分辨率为:

$$N = \frac{1}{8 \times p} = 10.5\ \text{lp/mm}.$$

当光学镜头的极限分辨率 $N_{\max} = 2N$ 时, 目标的识别概率较高, 则相对孔径为:

$$\frac{D}{f'} = N_{\max} \times 1.22\lambda = 1/60.$$

因此, 相对孔径为 1:8 和 1:9.6, 均能够满足系统要求。

综上可得, 光学系统的主要参数为:

焦距: $f' = 200 \sim 1\ 200\ \text{mm}$;

变倍比: $g = 6$;

相对孔径: $D/f' = 1/8 \sim 1/9.6$ 。

4 对比度分析

在目标成像过程中, 目标信息需经过大气、光学系统的传输直到 CCD 探测器靶面, 并经 CCD 探测器处理传输至监视器, 供人眼监视, 因此最终的成像质量受诸多因素的制约。

4.1 大气传输影响

大气传输影响主要包括大气的抖动、吸收和散射, 它们均能够引起目标-背景对比度下降。

大气絮流引起图像在积分时间内做无规则抖动, 相应的摆幅均方根值为:

$$\alpha = \delta \cdot f_{\max} \cdot f_Q \cdot t, \quad (11)$$

式中: δ 为大气抖动角的均方根值; f_Q 为抖动频率; t 为 CCD 积分时间。当 $\delta=2''$, $f_Q=20$ Hz, $t=0.01$ s 时, $\alpha=0.00194$ mm。

大气抖动所引起的传递函数为:

$$M_d = e^{-2 \cdot \pi^2 \cdot \alpha^2 \cdot N^2} \quad (12)$$

探测目标时, $N = \frac{1}{2 \times 0.012} = 42$ lp/mm, $M_d = 0.877$; 识别目标时, $N = \frac{1}{8 \times 0.012} = 10.5$ lp/mm, $M_d = 0.992$ 。

由于大气透过率会影响目标与背景的对比度, 而大气的吸收和散射又容易使目标与背景对比度下降。即:

$$C_R = C_0 \cdot \tau_a, \quad (13)$$

式中: C_R 为经过大气吸收和散射后目标与背景对比度; C_0 为目标与背景固有对比度。

目标与背景对比度的计算公式为:

$$C = (I_o - I_b) / I_b, \quad (14)$$

式中: I_o 为被观察目标亮度, I_b 为背景亮度。

经大气吸收和散射后, 目标调制度为:

$$M_{a,a} = \frac{I_o - I_b}{I_o + I_b} = \frac{C_R}{C_R + 2} \quad (15)$$

受大气的影 响, 目标调制度可表示为:

$$M_a = M_{a,a} \cdot M_d. \quad (16)$$

探测结果如表 2 所示, 目标识别结果如表 3 所示。

表 2 探测目标对比度的调制度

Tab. 2 Modulation of object-background contrast during detection

目标对比度	C_0	C_R	$M_{a,a}$	M_a
12/1	11	0.253	0.112	0.098
25/1	24	0.552	0.216	0.189
35/1	34	0.782	0.281	0.246

表 3 识别目标对比度的调制度

Tab. 3 Modulation of object-background contrast during recognition

目标对比度	C_0	C_R	$M_{a,a}$	M_a
9.6/1	8.6	0.198	0.09	0.089
20/1	19	0.437	0.179	0.178
30/1	29	0.667	0.25	0.2468

4.2 光学系统影响

光学系统影响主要包括窗口保护玻璃和变焦距镜头两部分。当受到设备内外温差和气压差影响时, 窗口保护玻璃容易产生面形变化, 从而降低目标-背景对比度。取窗口保护玻璃面形变化波像差值 $W = \lambda/6$, 则调制传递函数为:

$$M_{win} = \frac{2J_1(x)}{x}, \quad (17)$$

式中: $J_1(x)$ 为一阶贝赛尔函数, $J_1(x) = \frac{x}{2} - \frac{x^3}{16} + \frac{x^5}{384} - \frac{x^7}{38432}$; $x = 8\pi \cdot W \cdot F^\# \cdot N(1 - N \cdot \lambda \cdot F^\#)$; 该光学系统的主波长 $\lambda = 0.00065$ mm, $F^\# = 8 \sim 9.6$ 。

因此, 探测目标时, $N = 42$ lp/mm, $x = 0.715$, $M_{win} = 0.937$; 识别目标时, $N = 10.5$ lp/mm, $x = 0.256$, $M_{win} = 0.992$ 。

变焦距镜头的调制传递函数由衍射、残余像差、制造及装调误差、环境条件变化等因素所决定, 它是降低目标像反衬度的主要原因。

镜头衍射引起的调制传递函数为:

$$M_{dif} = \frac{2}{\pi} [\arccos(y) - y \arccos(y)], \quad (18)$$

式中: $y = N \cdot \lambda \cdot F^\#$ 。

探测目标时, $N = 42$ lp/mm, $y = 0.218$, $M_{dif} = 0.67$; 识别目标时, $N = 10.5$ lp/mm, $y = 0.0655$, $M_{dif} = 0.892$ 。

根据光学设计的传递函数图可得出由残余像差所引起的调制传递函数。探测目标时, $M_{des} = 0.38$; 识别目标时, $M_{des} = 0.55$ 。

制造及装调误差控制在 $\lambda/5$ 以内, 由它引起的调制传递函数表示为:

$$M_{mod} = \frac{2J_1(x)}{x}, \quad (19)$$

式中: $J_1(x)$ 为一阶贝赛尔函数, $x = 8\pi \cdot W \cdot F^\# \cdot N(1 - N \cdot \lambda \cdot F^\#)$ 。

探测目标时, $N = 42$ lp/mm, $x = 0.858$, $M_{mod} = 0.978$; 识别目标时, $N = 10.5$ lp/mm, $x = 0.307$, $M_{win} = 0.988$ 。

在采取相应的措施后, 由环境温度和气压变

化引起的离焦量 Δ 可控制在 0.066 mm 以内,其调制函数表示为:

$$M_{\text{cir}} = \frac{2J_1(x)}{x}, \quad (20)$$

其中: $x = \frac{\pi \cdot \Delta \cdot N}{F^\#} (1 - N \cdot \lambda \cdot F^\#)$ 。

探测目标时, $N = 42$ lp/mm, $x = 0.858$, $M_{\text{cir}} = 0.978$; 识别目标时, $N = 10.5$ lp/mm, $x = 0.307$, $M_{\text{cir}} = 0.988$ 。

综上可得,整个光学系统的调制传递函数为:

$$M_o = M_{\text{win}} \cdot M_{\text{dir}} \cdot M_{\text{des}} \cdot M_{\text{mod}} \cdot M_{\text{cir}}, \quad (21)$$

由此可得,探测目标时, $M_o = 0.228$; 识别目标时, $M_o = 0.475$ 。

4.3 CCD 探测器影响

CCD 探测器的调制传递函数是像素空间频率函数,为:

$$M_{\text{CCD}} = \frac{\sin(\pi \cdot P \cdot N)}{\pi \cdot P \cdot N}, \quad (22)$$

式中: P 为像元尺寸, $P = 0.012$ mm; N 为空间频率。探测目标时, $N = 42$ lp/mm, $M_{\text{CCD}} = 0.6316$; 识别目标时, $N = 10.5$ lp/mm, $M_{\text{CCD}} = 0.974$ 。

4.4 显示器影响

显示器的调制传递函数为高斯函数,其表达式为:

$$M_d = \exp\left[-\left(\frac{f_r}{f_{r_{\text{max}}}}\right)^2\right], \quad (23)$$

式中: $f_{r_{\text{max}}}$ 为显示器的截止频率; f_r 为显示器的工作频率。由于 CCD 探测器自身的电子变焦功能可使它在半截止频率处工作,因此 $M_d = 0.779$ 。

目标信息经过整个传输通道,在显示器上图像的调制传递函数为:

$$MTF = M_o \cdot M_a \cdot M_{\text{CCD}} \cdot M_d, \quad (24)$$

探测目标时,监视器上图像的反衬度 $C_{\text{over}} = 2M/(1-M)$, 计算结果如表 4 所示。

表 4 对比度与反衬度

Tab. 4 Reflectivity contrast under different object-background contrasts during detection

反衬度	目标对比度		
	12/1	25/1	35/1
C_{over}	0.022	0.043	0.057

由表 4 可知,低对比目标的反衬度 C_{over} 大于

人眼可探测的最小反衬度,因此光电成像系统能够探测到 18 km 远的海面目标。

识别辨认目标时,监视器上目标像的传递函数如表 5 所示。

表 5 对比度与传递函数

Tab. 5 MTFs under different object-background contrasts during recognition

传递函数	目标对比度		
	9.6/1	20/1	30/1
MTF	0.03	0.064	0.089

由表 5 可以看出,低对比度目标的传递函数高于人眼的极限调制传递函数值(0.026),完全可以识别 18 km 的目标。

经分析可知,在能见度 13 km 的环境下,要想探测捕获到海面上 18 km 的目标,须满足目标与背景对比度高于 12/1 的条件;要进一步识别该目标,目标与背景对比度应高于 9.6/1 的要求。

5 舰面环境的影响分析

舰载光电成像系统安装在跟踪转台上,转台直接固定到甲板上,因此成像系统易受海浪的影响,产生周期性的摇晃(横摇、纵摇、艏摇),从而导致视轴晃动,造成跟踪图像模糊甚至目标丢失^[14]。

通常光电成像设备要求积分时间内的视轴晃动不超过 1/2 瞬时视场,因此舰载光电设备在伺服控制上采取了一次性高准确度实时补偿船摇姿态角的控制策略。该策略使该舰船在五级海况(横摇 10°、纵摇 2°,周期分别为 10 s 和 6 s)下,跟踪转台的速度和加速度总跟踪误差不超过 0.6 mrad,满足跟踪精度 0.8 mrad 的要求,从而保证了该光电成像系统的探测能力。

此外,恶劣的舰面环境(盐雾、霉菌和潮湿)会对窗口玻璃产生严重侵蚀,大大缩短窗口保护玻璃的寿命,造成光学系统透过率减低,从而影响光电成像系统的探测能力。为此,可通过在窗口玻璃上镀膜“三防”保护膜来防止探测能力降低。

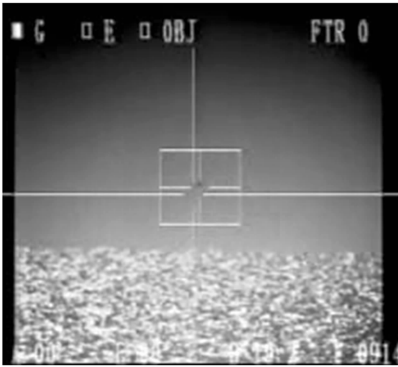
6 外场试验

在上述分析基础上,研制了某型号的变焦距

镜头和相应的跟踪转台。变焦距镜头的参数如下:

焦距: $f' = 200 \sim 1\ 200\ \text{mm}$;

相对孔径: $D/f' = 1/8 \sim 1/9.6$;



视场角: $\omega = 5 \sim 0.83^\circ$;

变倍比: $g = 6$ 。

使用该舰载光电设备对某飞行目标进行了外场捕获及跟踪试验,跟踪结果如图1所示。



图1 监视效果图片

Fig. 1 Pictures captured by opto-electronic tracking system

该试验是在能见度为13 km的海面上完成的。试验过程中,某低空飞行目标飞行至距光电设备20 km处时进入变焦距镜头的捕获视场,被稳定跟踪,并实时输出测量数据。试验结果表明,该变焦距镜头的探测能力基本符合理论分析结果。

7 结 论

光学系统设计是整个光电成像系统能否清晰

成像的关键。本文在光学设计之前,通过理论分析计算出所需光学镜头的分辨率、几何探测能力以及像面照度,确定出焦距、相对孔径和视场角等主要的光学参数,并对不同对比度条件下的探测能力进行了分析计算,最后通过外场试验,验证了理论分析的正确性。本研究对今后舰载光学系统设计及成像质量的分析具有指导作用,同时为机载、车载光学系统的设计提供了一定的借鉴和参考。

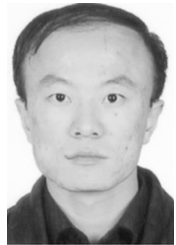
参考文献:

- [1] 赵妙娟,车宏. 军用光电系统作用距离分析[J]. 红外与激光工程,2008,37(增):501-503.
ZHAO M J, CHE H. Analysis of the efficient distance of O-E system for military [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(suppl.): 501-503. (in Chinese)
- [2] 金伟其,高绍妹,王吉晖,等. 基于光电成像系统最小可分辨对比度的扩展源目标作用距离模型[J]. 光学学报,2009,29(6):1552-1556.
JIN W Q, GAO SH SH, WANG J H, et al.. A model to predict range performance of imaging system for extended target based on minimum resolvable contrast [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(6): 1552-1556. (in Chinese)
- [3] 李连学,曹秋生. 光电跟踪仪的自主捕获技术研究[J]. 激光与红外,2006,36(12):1142-1145.
LI L X, CAO Q SH. Study on the autonomous-cap-

- turing target technology of opto-electronic tracker [J]. *Laser and Infrared*, 2006, 36(12): 1142-1145 (in Chinese)
- [4] 黄猛,张葆,沈宏海,等. 海上光电监视系统的设计与研究[J]. 红外与激光工程,2007,36(6):849-852.
HHANG M, ZHANG B, SHEN H H, et al.. Design and study of a seaborne electro-optical surveillance system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 849-852 (in Chinese)
- [5] 李零印,王一凡,王骥. 靶场光学测量中的变焦距光学系统[J]. 中国光学,2011,4(3):240-246.
LI L Y, WANG Y F, WANG J. Varifocal optical system to optical measurement of shooting range [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 240-246. (in Chinese)
- [6] 高昕,王建立,唐嘉等. 低轨微小卫星及小碎片搜索/跟踪机动式大视场光电望远镜[J]. 中国光学,2011,4(2):124-128.
GAO X, WANG J L, TANG J, et al.. Mobile tel-

- escope with large FOV for searching and tracking low-orbit micro-satellites and space debris[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(2): 124-128 (in Chinese)
- [7] 韩光宇,曹立华,高云国,等. 1m 望远镜主反射镜的支撑和装配[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(9): 1922-1928.
HAN G Y, CAO L H, GAO Y G, *et al.*. Supporting and assembling for primary mirrors of 1 m aperture telescopes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9):1922-1928. (in Chinese)
- [8] 王家琪. 光学仪器总体设计[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003.
WANG J Q. *Overall Design of Optical Instrument* [D]. Changchun:Changchun Instrument of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [9] 王伟国,陈涛,张同双,等. 电视成像系统作用距离分析[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(8): 68-70.
WANG W G, CHEN T, ZHANG T SH, *et al.*. The research for effective distance of TV system on a theodolite [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2005, 26(8):68-70. (in Chinese)
- [10] 白廷柱,金伟其. 光电成像原理及技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2006.
BAI T Z, JIN W Q. *Principle and Technology of Photoelectric Imaging* [M]. BEIJING: Beijing Institute of Technology Press, 2008. (in Chinese)
- [11] 秦琰华,赵军民. CCD 成像系统识别能力分析研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2006, 26(1):58-61.
QIN Y H, ZHAO J M. Analysis of identify capability for CCD imaging system[J]. *J. Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(1):58-61. (in Chinese)
- [12] 朱莹,常本康,刘磊. 帧积分时间对微光电视观察视距的影响[J]. *中国激光*, 2008, 35(2): 259-262.
ZHU Y, CHANG B K, LIU L. Influence of the frame integral time to detecting distance of low light level-TV[J]. *Chinese J. Laser*, 2008, 35(2): 259-262. (in Chinese)
- [13] 美国 RCA 公司. 电光学手册[M]. 史斯,伍锁译. 北京:国防工业出版社, 1978.
USA RCA Inc. *Electro-Optical Handbook* [M]. SHI S, WU S, transl. Beijing: National Defense Industry Press, 1978. (in Chinese)
- [14] 赵建川,邵俊峰,王地男,等. 航母中线电视监视系统的设计[J]. *中国光学*, 2012, 5(6):625-629.
ZHAO J CH, SHAO J F, WANG D N, *et al.*. Design of centerline television surveillance system for aircraft landing on carriers[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6):625-629. (in Chinese)

作者简介:



乔 健(1980-),男,山西忻州人,副研究员,2008 年于吉林大学获得博士学位,主要从事光电仪器设备的结构设计与研究. E-mail: qiaojj99065@163.com