

基于迈克耳孙干涉仪的凝视型激光告警系统设计

王 龙 王永仲 沈学举 何永强

(解放军军械工程学院光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要 设计了一种基于迈克耳孙干涉仪的凝视型激光告警系统,理论分析了系统定向精度和滤光片透射率的变化规律。结果表明,入射激光经过告警系统后,形成环形干涉条纹,根据条纹中心的坐标和条纹间隔可解算入射激光的方向和波长;在探测器像元尺寸固定的情况下,系统的定向精度由光束变换透镜和球面反射镜焦距的比值决定,定向精度随该比值的减小而提高;告警系统滤光片的透射率取决于变换透镜的焦距,当变换透镜焦距为鱼镜头焦距 10 倍时,滤光片对系统入射角为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内激光的透射率为 $90.0\% \sim 87.5\%$,这保证了系统对各角度的入射激光都有较高的探测灵敏度。

关键词 光学设计;激光告警;迈克耳孙干涉仪;凝视告警;定向精度;灵敏度

中图分类号 TN247;TN977 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0312003

Design of Staring Laser Threat Detection System Based on Michelson Interferometer

Wang Long Wang Yongzhong Shen Xueju He Yongqiang

(Department of Optics & Electron Engineering, Ordnance Engineering College of Chinese People's Liberation Army, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

Abstract A staring laser threat detection system based on Michelson interferometer is designed, and rules of orientation direction precision and filter's transmission efficiency are analysed in theory. Results show that, round interference stripes are formed when input laser is transmitting through the laser threat detection system, the direction and wavelength of input laser can be calculated based on the central coordinate and space of stripes. The direction precision is decided by the ratio of focal lengths of varying lens and spherical reflector when the pixel size of detector is fixed, and the precision rises when the ratio decreases. Filter's transmission efficiency is decided by focal length of varying lens. If the varying lens's focal length is ten times of fish eyes lens's focal length, filter's transmission will be $90.0\% \sim 87.5\%$ for inputting laser with angle from $0^\circ \sim 90^\circ$, and this can make the detecting system have high sensitivity for every input laser from $0^\circ \sim 90^\circ$.

Key words optical design; laser threat detecting; Michelson interferometer; omni-direction staring detection; orientation direction precision; detective sensitivity

OCIS codes 120.1880; 220.4830; 120.3180

1 引 言

研究激光告警技术的目的是在较大视场范围内、尽可能准确地确定入射激光的方位和波长等信息^[1~6]。凝视型激光告警系统主要由鱼镜头和 CCD/CMOS 阵列探测器件构成^[7~9],探测器接收鱼镜头会聚入射激光形成的光斑,根据光斑位置解算入射激光的方向^[10~13],为表述方便,称其为普通凝视型激光告警系统。其突出的优点是视场大,但

由于鱼镜头焦距较小,系统的定向精度受探测器像元尺寸制约比较严重,且无法确定入射激光的波长。对于迈克耳孙干涉仪型激光告警系统,入射激光在探测器上形成环状干涉条纹,由条纹的中心坐标和条纹间隔可确定入射激光的方向和波长^[14~16],但其视场较小。

为了在大视场范围内同时确定入射激光的方位和波长,并且在探测器像元尺寸不变的情况下,提高

收稿日期:2010-09-07;收到修改稿日期:2010-11-10

作者简介:王 龙(1985—),男,博士研究生,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail:wanglong4800533@163.com

导师简介:王永仲(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事光电对抗方面的研究。

告警系统的定向精度,提出了一种基于迈克耳孙干涉仪的凝视型激光告警系统。理论分析和数值模拟表明,该系统在大视场范围内,可同时测量入射激光的方位和波长,选择合适的变换透镜和球面反射镜焦距,可使滤光片对系统入射角为 $0^\circ\sim 90^\circ$ 范围内的激光都有高透射率,且与普通凝视型激光告警系统相比有更高的定向精度。

2 理论模型

2.1 基于迈克耳孙干涉仪的凝视型激光告警系统结构

基于迈克耳孙干涉仪的凝视型激光告警系统的结构如图1所示, F_1 为鱼眼镜头,其后焦面 P 与变换透镜 F_2 的前焦面重合,为减轻背景光的干扰,在变换透镜 F_2 后面加入滤光片 L ;迈克耳孙干涉仪由半透半反镜 M 和半径为 R 的两球面反射镜 R_1, R_2

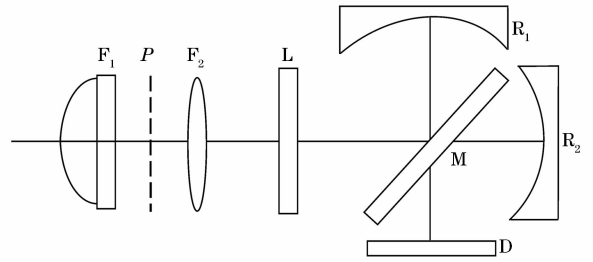


图1 基于迈克耳孙干涉仪的凝视型激光告警系统结构
Fig.1 Structure of staring laser threat detection system based on Michelson interferometer

组成,干涉条纹用探测器 D 接收。

2.2 工作原理分析

为分析问题方便,将半径为 R 的球面反射镜 R_1 和 R_2 等效成间隔为 a ,焦距 $F=R/2$ 的透镜 T_1 和 T_2 进行分析, Q_1 和 Q_2 分别为其后焦平面,探测器接收面 D 与 Q_2 平面距离为 l ,变换透镜 F_2 焦距为 f_2 ,系统等效光路如图2所示。

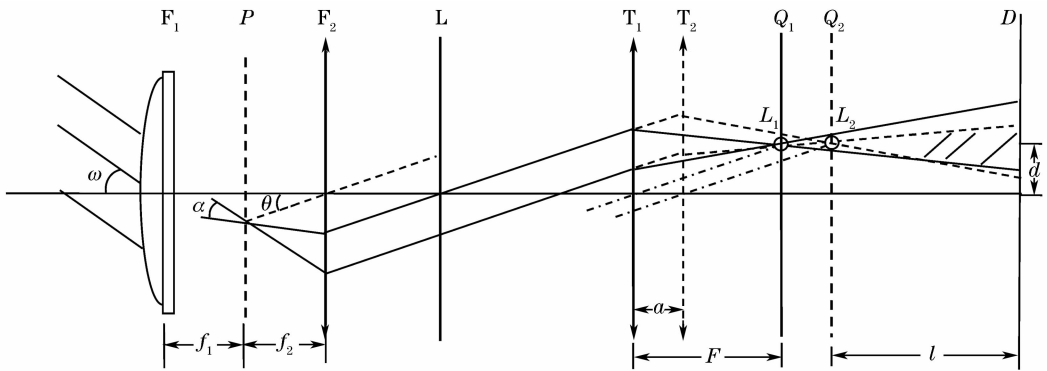


图2 基于迈克耳孙干涉仪的激光探测系统工作原理示意图

Fig.2 Schematic mechanism of the laser detection system based on Michelson interferometer

与光轴夹角为 ω 的入射激光被鱼眼镜头 F_1 聚焦后,以张角 α 会聚为后焦面 P 上一点,规律满足鱼眼镜头的成像公式^[11]

$$y' = f_1 \sin \omega, \quad (1)$$

式中 y' 为激光束在鱼眼镜头后焦面的像高, f_1 为鱼眼镜头的焦距。

因为 P 为变换透镜 F_2 的前焦面,经 F_2 的出射光为平行光,其传输方向为

$$\theta = \arctan(y'/f_2). \quad (2)$$

激光束再经滤光片后射入迈克耳孙干涉系统,在两球面反射镜各自后焦面 Q_1 和 Q_2 上形成沿光轴方向间隔为 a 的两个会聚像点 L_1 和 L_2 ,接收平面 D 上的阴影范围将出现像点 L_1 和 L_2 的环状干涉条纹, L_1 和 L_2 连线与平面 D 的交点为干涉条纹的圆心位置^[17],其偏离接收平面中心的距离为

$$d = F \tan \theta. \quad (3)$$

将(1)和(2)式代入(3)式得

$$d = Fy'/f_2 = Ff_1 \sin \omega / f_2, \quad (4)$$

由(4)式知,入射激光与光轴的夹角为

$$\omega = \arcsin\left(\frac{f_2 d}{F f_1}\right), \quad (5)$$

将(5)式中的 d 替换为条纹中心的坐标 x, y 即可计算出射激光的方位角^[15]。

以上分析表明,解算入射激光方向的关键在于确定干涉条纹的中心,而平面 D 上干涉区域内干涉亮环半径为^[15]

$$r = \sqrt{2m\lambda l(a+l)/a}, \quad (6)$$

式中 m 为整数。

若相邻亮环半径分别为 r_1 和 r_2 ,可求得入射激光波长为^[15]

$$\lambda = a(r_1 + r_2)(r_2 - r_1) / [2l(l + a)]. \quad (7)$$

入射激光角度较小时,显然可以在平面 D 的中

心附近得到干涉条纹；当入射激光角度较大时，只要合理设计变换透镜 F_2 与球面反射镜 R_1 的位置，仍然可以在平面 D 上的中心附近得到干涉条纹，如图 2 所示，进而可以确定条纹的中心，解算入射激光方向，因此告警系统仍具有大视场。

3 数值模拟及结果分析

3.1 定向精度分析

威胁激光的定向精度是衡量告警系统性能的最重要指标之一^[3]，通过光学结构设计提高告警系统的定向精度是关键研究内容之一。

设探测器的像元尺寸为 Δl ，根据(1)和(4)式可分别求得普通凝视型激光告警系统和基于迈克耳孙干涉仪的凝视型激光告警系统的最小分辨角分别为

$$\Delta\omega_1 = \frac{\Delta y'}{f_1 \cos \omega} = \frac{\Delta l}{f_1 \cos \omega}, \quad (8)$$

$$\Delta\omega_2 = \frac{\Delta l f_2}{F f_1 \cos \omega} = \frac{f_2}{F} \frac{\Delta l}{f_1 \cos \omega} = \frac{f_2}{F} \Delta\omega_1. \quad (9)$$

由(8)和(9)式看出，基于迈克耳孙干涉仪的凝视型告警系统的最小分辨角除与探测器像元尺寸有关外，还与变换透镜和球面反射镜的焦距有关。

取变换透镜的焦距 $f_2 = 50 \sim 150$ mm，做出 $F = 100, 150$ 和 200 mm 3 种情况下， $\Delta\omega_2/\Delta\omega_1$ 随变换透镜焦距的变化曲线，如图 3 所示。在球面反射镜焦距固定的情况下，基于迈克耳孙干涉仪的凝视告警系统最小分辨角随变换透镜焦距的增加而变大，且球面反射镜焦距越小，最小可分辨角的增大速度越快。但只要 $f_2 < F$ ，则 $\Delta\omega_2 < \Delta\omega_1$ ，与普通凝视型告警系统相比定向精度得到提高。

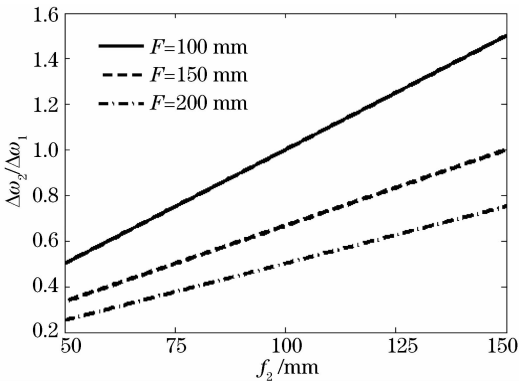


图 3 变换透镜焦距对系统定向精度的影响曲线

Fig. 3 Curve of direction precision's dependence on focal lengths of varying lens

取 $F = 100 \sim 200$ mm，做出 $f_2 = 50, 100$ 和 150 mm 3 种情况下， $\Delta\omega_2/\Delta\omega_1$ 随 F 的变化曲线，如图 4 所示。在变换透镜焦距固定的情况下，基于迈

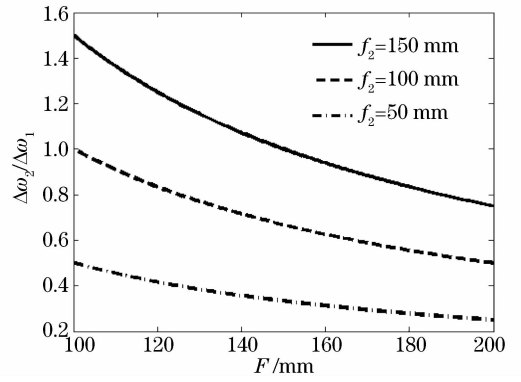


图 4 球面镜焦距对系统定向精度的影响曲线

Fig. 4 Curve of direction precision's dependence on focal lengths of spherical reflector

克耳孙干涉仪的凝视告警系统的最小分辨角随球面反射镜焦距 F 的变大而减小，在球面反射镜焦距相同的情况下，变换透镜焦距越小，最小分辨角越小，定向精度越高。

3.2 干涉滤光片的透射率分析

激光告警设备工作在复杂背景条件下，常采用窄带干涉滤光片提高信噪比^[18,19]。

3.2.1 普通凝视型激光告警系统干涉滤光片

简单的法布里-珀罗滤光片主要用于可见光和近红外区^[18]，其中心波长透射率为

$$T = [\tau(1 - \rho_\theta)^2] / [(1 - \rho_\theta)^2 + 4\rho_\theta \sin^2(\varphi_\theta/2)], \quad (10)$$

式中 τ 为考虑介质和玻璃平板吸收及反射等因素时的透射系数，令 $\tau = 0.9$ ； $\varphi_\theta = 4\pi h \sqrt{n_o^2 - n_2^2 \sin^2 \theta} / \lambda$ 为银膜间多次反射时，介质层产生的相位差；对于不同的人射角，滤光片银膜的反射系数 ρ_θ 基本不变，取 $\rho_\theta = 0.9$ ； n_o 和 n_2 分别为介质和空气的折射率，取 $n_o = 1.35, n_2 = 1.0$ ； h 为介质层厚度，取 $h = 0.39 \mu\text{m}$ ；取 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ，由(10)式做出干涉滤光片透射率随其表面激光入射角的变化曲线，如图 5 所示。

可以看出，滤光片透射率随激光在其表面入射角的增大急剧下降，在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 范围内，透射率由 0.9 迅速减小为 0.1 左右，当入射角 $\theta > 40^\circ$ 时透射率基本为零。普通凝视型激光告警系统中，滤光片安装在鱼镜头和探测器之间，当告警系统的激光入射角 $\omega = 90^\circ$ 时，滤光片表面的入射角约为 10° ^[18]，根据(10)式求得，当系统的激光入射角 ω 从 0° 增大为 90° 时，滤光片的透射率相应地从 90% 减小为 72%，这使告警系统的探测灵敏度随激光入射角的增加明显下降。

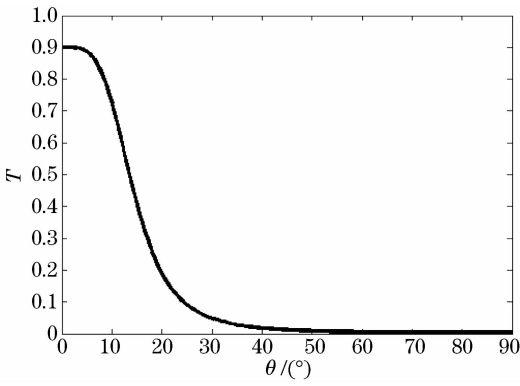


图 5 干涉滤光片的透射率曲线

Fig. 5 Transmission efficiency curve of filter

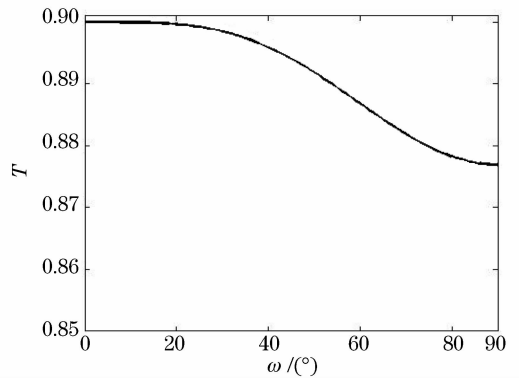


图 7 滤光片透射率随系统激光入射角的变化曲线

Fig. 7 Filter's transmission curve with different incident angles

3.2.2 基于迈克耳孙干涉仪的凝视型告警系统干涉滤光片

由(2)式知,对基于迈克耳孙干涉仪的凝视型激光告警系统,角度为 ω 的入射激光经变换透镜压缩后,以角度 θ 射向滤光片,联立(1)和(2)式做出 $f_2 = 5f_1, 10f_1$ 两种情况下,滤光片表面激光入射角随系统激光入射角的变化曲线,如图6所示。

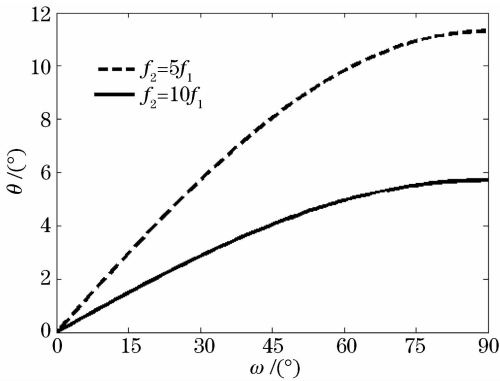


图 6 滤光片表面激光入射角的变化曲线

Fig. 6 Curve of incident angle on filter's surface

可以看出,告警系统激光入射角相同时,变换透镜焦距越大,滤光片表面的激光入射角越小,当 $f_2 = 10f_1$ 时,系统入射角为 90° 的激光在滤光片表面的入射角仅为 6° 左右,这对提高滤光片对系统不同入射角度激光的透射率非常有利。

取 $f_2 = 10f_1$,联立(1),(2)和(10)式,做出滤光片透射率随告警系统激光入射角的变化曲线,如图7所示。可以看出,在基于迈克耳孙干涉仪的凝视型激光告警系统中,滤光片对系统入射角为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内激光的透射率为 $90.0\% \sim 87.5\%$,这使告警系统对各入射角度的激光有稳定的探测灵敏度。

4 结 论

通过引入变换透镜 F_2 将鱼眼镜头和迈克耳孙

干涉仪型告警系统相结合,设计了一种基于迈克耳孙干涉仪的凝视型激光告警系统,该系统在具备普通凝视型和迈克耳孙干涉仪型告警系统各自优点的同时,可克服两种系统单独使用时的不足。鱼眼镜头和变换透镜使该系统相对于迈克耳孙干涉仪型系统告警视场显著增大;与普通凝视型告警系统相比,本文所设计的激光告警系统可同时测量入射激光的方向和波长,通过对变换透镜和球面反射镜结构参数的设计,可使基于迈克耳孙干涉仪的凝视型激光告警系统具有更高的定向精度和滤光片透射率。

参 考 文 献

- Guo Hao, Ma Na, Wang Min *et al.*. Incidence measurement analysis in laser warning device based on Fabry-Perot etalon [J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(3):279~281
- 郭豪,马娜,王敏等.法布里-珀罗型告警器激光入射角度的测量方法分析[J].*激光与红外*, 2008, **38**(3):279~281
- Wang Ming, Zhang Jilong, Tian Erming *et al.*. Detectability analysis of laser warning receiver based on grating diffraction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(4):683~686
- 王明,张记龙,田二明等.光栅衍射激光告警接收机的探测性能分析[J].*红外与激光工程*, 2008, **37**(4):683~686
- Sun Jianguo, Cong Junkui. Analyzing FOV errors in laser warning technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, **30**(4):168~173
- 孙建国,从俊奎.激光告警技术中视场误差分析[J].*红外与激光工程*, 2001, **30**(4):168~173
- Liu Zhichao, Zhang Jilong, Yan He *et al.*. A method of projection measurement for laser direction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8):1518~1522
- 刘智超,张记龙,阎鹤等.一种投影式激光方向测量方法[J].*光学学报*, 2008, **28**(8):1518~1522
- Liping Su, Weijiang Zhao, Xiaoyong Hu *et al.*. Experimental investigation on wake profile detection based on laser scattering by bubbles [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(10):609~612
- Lang Wenjie. Research on two-dimensional overlapping coding for detection of laser direction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5):1374~1378
- 郎文杰.基于二维交叠掩膜编码的全方向激光方向探测应用研究[J].*光学学报*, 2010, **30**(5):1374~1378
- Yang Zaifu, Qian Huanwen, Gao Guanghuang. Development of

- laser warning technology [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(1): 98~102
- 杨在富, 钱焕文, 高光煌. 激光告警技术发展现状[J]. *激光技术*, 2004, **28**(1):98~102
- 8 Zhang Jingxu. Warning and orienting technology for threaten laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **8**(4):365~368
- 张景旭. 激光威胁源告警定向技术研究[J]. *光学精密工程*, 2000, **8**(4):365~368
- 9 Bai Xiaoming, Li Gang, Yang Jun. A design of the imaging laser threat warning system [J]. *Laser & Infrared*, 2001, **31**(4): 202~204
- 白晓明, 李 刚, 杨 军. 成像型激光预警系统的设计[J]. *激光与红外*, 2001, **31**(4):202~204
- 10 He Wuguang, Wu Jian, Wang Shifan. Design of laser detection and warning optical system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(7):48~51
- 何武光, 吴 健, 王仕璠. 激光探测告警光学系统设计[J]. *光电工程*, 2006, **33**(7):48~51
- 11 Wang Yongzhong. Fish-Eye Lens Optics [M]. Beijing: Science Press, 2006. 30~40
- 王永仲. 鱼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 42~46
- 12 Chen Yongjun, Wu Xinyu, Gong Huixing. Study on laser warning technology with wideband [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(4):346~350
- 陈拥军, 吴新宇, 龚惠兴. 宽频带激光告警技术的研究[J]. *红外与激光工程*, 2003, **32**(4):346~350
- 13 Ying Jiaju, Wang Yongzhong, He Yongqiang *et al.*. An algorithm for laser spot precise locating in omni-directional laser warning system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, **16**(12):53~56
- 应家驹, 王永仲, 何永强 等. 全向激光告警系统中激光光斑精确定位方法[J]. *光电与控制*, 2009, **16**(12):53~56
- 14 Zhang Jilong, Wang Zhibin, Li Xiao *et al.*. A review of laser warning receivers based on spectral discrimination and coherent detection [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2006, **20**(2):95~100
- 张记龙, 王志斌, 李 晓 等. 光谱识别与相干识别激光告警接收机评述[J]. *测试技术学报*, 2006, **20**(2):95~100
- 15 Wang Yunlong, Yang Kuntao. Measurement of incident laser with "cattle eye" Michelson interferometer [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(5):58~60
- 王云龙, 杨坤涛. 用“牛眼”型麦克耳孙干涉仪测量入射激光[J]. *光电工程*, 2005, **32**(5):58~60
- 16 Zhang Xiuhua. Researching on Several Critical Technologies of Laser Warning System [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2007, **4**:107~110
- 章秀华. 激光告警系统中几个关键技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007, **4**:107~110
- 17 Liang Quanting. Physical Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1987. 78~80
- 梁铨廷. 物理光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 78~80
- 18 Ying Jiaju, Wang Yongzhong, He Yongqiang *et al.*. Analysis of detective sensitivity for omni-directional laser warning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(6):1038 ~ 1042
- 应家驹, 王永仲, 何永强 等. 全向激光告警系统的探测灵敏度分析[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(6):1038~1042
- 19 Ying Jiaju, Wang Yongzhong, He Yongqiang *et al.*. Transmissivity for narrowband filter in omni-directional laser warning system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 1892~1896
- 应家驹, 王永仲, 何永强 等. 全向激光告警系统中窄带滤光片的透射率分析[J]. *光子学报*, 2009, **38**(8):1892~1896