

doi: 10.3788/gzxb20164503.0314005

激光周向探测小型化发射技术

徐孝彬, 张合, 张祥金, 甘霖

(南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

摘要:针对小口径弹药用脉冲激光周向探测系统的小体积和轻质量的设计难点,在全面分析脉冲激光周向探测系统的基础上,提出了采用激光发射系统解体分离技术和光学系统扁平化技术实现脉冲激光周向探测系统小型化的解决方案.将传统、较大尺寸、一体化结构的激光发射系统的激光器与激光器驱动电源进行结构分离,达到轴向尺寸压缩的目的,并利用灌封技术进行抗过载处理;选择平凸球面单透镜光学元件代替非球面透镜,经过理论计算和光学系统仿真,设计出扁平化激光准直系统,有效压缩轴向尺寸.针对结构小型化带来的空间电磁干扰问题,基于磁场屏蔽机理,采用特殊结构屏蔽体,有效抑制了电磁干扰.加工制作了原理样机并进行了目标探测试验.实验结果表明:样机能有效探测近程目标,且脉冲激光周向探测系统的有效尺寸显著减小,验证了小型化技术的可行性和实用性.

关键词:脉冲激光;目标探测;小型化;发射系统;解体分离技术;扁平化技术;电磁屏蔽

中图分类号:TJ43

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)03-0314005-6

Miniaturized Transmitting Technology of Laser Circumferential Detection

XU Xiao-bin, ZHANG He, ZHANG Xiang-jin, GAN Lin

(ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at design difficulty of small volume and light weight for small caliber ammunition with pulsed laser circumferential detection system, on the basis of comprehensive analysis of pulsed laser circumferential detection system, solution for the miniaturization of the laser circumferential detection system was proposed. It was realized by adopting the laser emission system disintegration separation technology and optical system flattening technique. The laser and laser drive power of traditional, larger size and integrated structure laser emission system were separated, which achieved the purpose of axial dimension compression. Anti-overload processing was realized by use of sealing technology. Flat convex spherical lens was chosen instead of spherical lens. According to the derivation of theoretical formula and simulation of optical system, flat laser alignment system was designed, which can effectively compress the axial dimension. Aiming to space electromagnetic interference problems in miniaturization, special structure shield was used based on magnetic field shielding mechanism, which effectively suppress electromagnetic interference. The initial prototype was made and experiment of target detection was done. The results show that the prototype can measure short-range target efficiently and effective size of pulsed detection system was significantly decreased, which can verify the feasibility and practicability of miniaturization technology.

Key words: Pulsed laser; Target detection; Miniaturization; Transmitting systems; Disintegration separation technology; Flattening technology; Electromagnetic shielding

OCIS Codes: 140.0140; 140.3538; 140.346

基金项目:武器装备预先研究项目(No. 51305020104)资助

第一作者:徐孝彬(1990-),男,博士研究生,主要研究方向为激光探测与目标识别. Email: njstxxx@163.com

导师(通讯作者):张合(1957-),男,教授,博士,主要研究方向为探测制导与控制. Email: hezhang@mail.njst.edu.cn

收稿日期:2015-10-08;录用日期:2015-12-10

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

脉冲激光周向探测是一种利用脉冲激光束主动探测全周目标的探测技术,属于激光近炸引信的范畴,针对脉冲激光周向探测,国内外已有大量的研究,谢静^[1]测试了光学发射机的参量.甘霖设计了脉冲激光驱动电源和激光接收系统^[2-3].STEINVALL 等人对脉冲激光回波特性进行研究^[4-6].并且脉冲激光周向探测技术已在导弹中大量应用,如瑞典的 RBS-90 地空导弹、英国 RAPIER MARK2 导弹和美国的 Thales 导弹等^[7-9].限于小口径常规弹药体积与重量,脉冲激光周向探测技术要完全应用于小口径弹药中,小型化成为关键技术之一.

激光脉冲发射质量直接影响周向探测的测程与准确度,针对发射系统小型化技术,徐伟提出将脉冲激光发射、接收通道共用^[10],相比传统的发射系统,能有效减小体积,但是产生的光干扰难以抑制.甘霖^[11]提出采用多级非球面镜进行激光准直,丁志中^[12]提出直接在 LD 封装端面制作与半导体激光器一体的准直透镜,相比传统光学系统准直性能有所提高,但是加工成本高且未有效缩小体积.

本文提出的小型化设计方案是基于发射与接收光路在物理结构上隔离,运用激光发射系统解体分离技术和光学系统扁平化技术,有效缩小了激光发射系统体积,实现了周向探测脉冲激光发射系统的小型化.同时,对小型化后的电磁干扰问题进行了研究和结构设计.

1 传统周向探测激光发射系统基础模型

脉冲激光周向探测系统是由发射系统、接收系统、信号处理系统等部分构成.其工作原理框图如图 1.

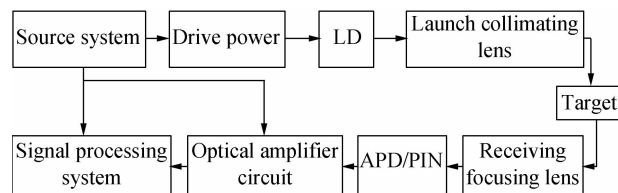


图 1 脉冲激光周向探测系统工作原理
Fig. 1 Functional diagram of pulsed laser circumferential detecting system

传统激光发射系统由激光器、激光器驱动电源、光学系统一体化构成,其结构如图 2 中的左侧结构.激光器与激光器驱动电源一体化设计,轴向尺寸较大;光学系统一般为单级非球面镜,焦距较长,总体占用轴向空间较大.为了将脉冲激光周向探测技术应用于小口径常规弹药,需要对激光发射系统进行小型化设计.

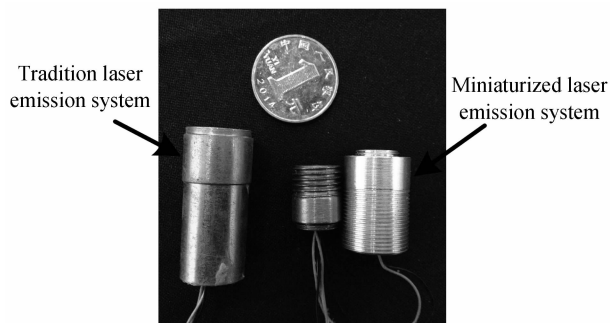


图 2 小型化发射系统与传统发射系统对比
Fig. 2 Comparison diagram of the miniaturization transmitter and traditional transmitter

2 周向探测激光发射系统小型化研究

周向探测激光发射系统小型化,要求在不影响激光发射性能的前提下,合理地设计机械结构与光学系统,压缩轴向尺寸.应用激光发射系统解体分离技术和光学系统扁平化技术可实现小型化.

2.1 激光发射系统解体分离技术

激光发射系统解体分离技术是将激光器与激光器驱动电源解体分离,相互间用导线连接,将激光器与光学系统整合为一体的技术.

传统脉冲激光器驱动电源是用分立式元件搭建而成,选用的 MOSFET 场效应管和耐高压充电电容占用体积较大.将元器件焊接在激光驱动电源电路板后,整个电路板在轴向上占用高度大于 10 mm.激光器直径和高度为 5 mm,传统发射透镜焦距达 15 mm,发射系统在轴向尺寸上达到 38.5 mm.无法满足轴向尺寸设计要求.

运用解体分离技术后,激光发射系统结构在轴向尺寸的压缩量可达 10 mm.新激光发射系统与传统激光发射系统结构实物对比图如图 2.

激光器与激光器驱动电源解体分离后,由于激光驱动电源在工作时会产生瞬时的大电流,激光器与激光驱动电源连接的短线会产生一定的电磁干扰,影响系统中其他电路的正常工作.为了消除这种电磁干扰,系统设计时需将激光器与激光驱动电源之间的连接短线嵌入屏蔽体中,实现电磁屏蔽功能;并运用灌封技术将激光驱动电源、屏蔽体等结构进行灌封,达到抗过载、防水等功能,提高激光发射系统的稳定性和可靠性,满足武器系统的使用要求.

2.2 光学系统扁平化技术

光学系统扁平化技术是对激光准直透镜进行扁平化设计时,在不影响激光发射系统发射质量的前提下,尽可能压缩光学系统轴向尺寸,并将激光器与光学系统整合为一体的技术.

2.2.1 脉冲激光发射光学系统准直性能分析

当脉冲激光周向探测系统进行近程探测时,接收

系统回波功率方程为^[13-14]

$$P_r(\lambda) = \frac{\rho P_t A_m D^2 \eta_{s1} \eta_{s2}}{\pi \theta^2 R_d^4} e^{-2k(\lambda) R_d} \quad (1)$$

式中, P_t 为脉冲激光发射器的发射功率, A_m 为目标有效截面积, ρ 为目标发射率, D 为接收光学系统直径, η_{s1} 为发射光学系统效率, η_{s2} 为接收光学系统效率, θ 为激光器远场发散角, $k(\lambda)$ 为大气衰减系数, R_d 为探测系统与目标之间的距离。

根据脉冲激光回波功率方程, 与发射光学系统相关的参量为激光远场发散角和激光光学系统效率。在其他参量相同的条件下, 激光周向探测距离与激光准直后远场发散角的平方成反比, 与光学系统效率成正比, 远场发散角越小, 光学系统效率越高, 探测距离越远。为了将激光器发出的激光能量高效集中发射, 要求激光发射光学系统具有很好的准直性能。

在单透镜准直设计中, 需设计激光器的最大发散角, 即快轴方向的分散角。高斯光束经单透镜变换后的出射高斯光束发散角为^[15]

$$\theta = \frac{2\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{1}{\omega_0^2} \left(1 - \frac{l}{F}\right)^2 + \frac{1}{F^2} \left(\frac{\pi \omega_0}{\lambda}\right)^2} \quad (2)$$

式中, l 为入射高斯光束束腰到透镜的距离; F 为透镜焦距; λ 为中心波长; ω_0 为入射高斯光束束斑。可以得出, 当 $l = F$ 时, 像方高斯光束束斑 ω_0' 达到极值, 其值为

$$\omega_0' = \frac{\lambda}{\pi \omega_0} F \quad (3)$$

可得发散角极小值为^[15]

$$\theta_0 = 2 \frac{\omega_0}{F} \quad (4)$$

因此, 要达到最好的准直效果, 半导体激光器应放在前焦面上。

2.2.2 激光发射光学系统结构选取及参量设计

根据小型化设计要求, 光学系统焦距设定为 $f = 8$ mm, 激光发射光学系统选用单透镜准直法。

传统激光发射系统选用单级非球面透镜作为准直透镜, 焦距长达 15 mm, 不能满足设计要求。若选用短焦距的非球面透镜, 一方面设计及制造难度会增加, 并增加加工工艺复杂性; 另一方面需要开模注塑成型定制, 大大增加成本开支。限于常规武器低成本和小型化的要求, 研究设计时不选用非球面透镜作为准直透镜。

本文选择平凸球面单透镜进行设计。虽然球面透镜相比非球面透镜准直性能略有下降, 但是在近程探测时, 探测距离一般不超过 10 m, 而且, 本文所设计的激光发射系统的激光发射点至出射点仅为 3 mm, 经过详细比较分析与仿真, 球面透镜准直性能完全满足探测要求。

设计选用的脉冲半导体激光器半宽发散角为 $\theta_{\perp} \leq 25^\circ$, $\theta_{\parallel} \leq 8^\circ$ 。光学系统采用 BK7 材料, 查表得在波长为 905 nm 时, 其折射率 $n = 1.5088$, 设半导体激光

器峰值半宽发散角为 $\theta_{\perp, //}$, $1/e^2$ 光强处对应的发散角为 $\varphi_{\perp, //}$, 二者之间的转换关系为

$$\tan(\varphi_{\perp, //} / 2) = \sqrt{2/\ln 2} \tan \theta_{\perp, //} = 1.6986 \tan \theta_{\perp, //} \quad (5)$$

取半导体激光器的最大发散角 θ_{\perp} 确定系统数值孔径 NA 为

$$NA = n(\sin \varphi_{\perp} / 2) \quad (6)$$

设准直后光束直径为 d , 则系统焦距为

$$f = (d/2) \tan(\varphi_{\perp} / 2) \quad (7)$$

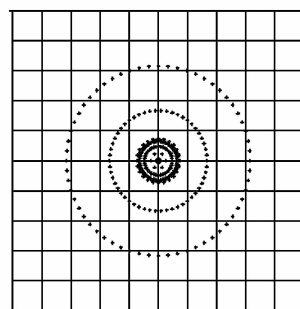
第一面的近轴球面半径为

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (8)$$

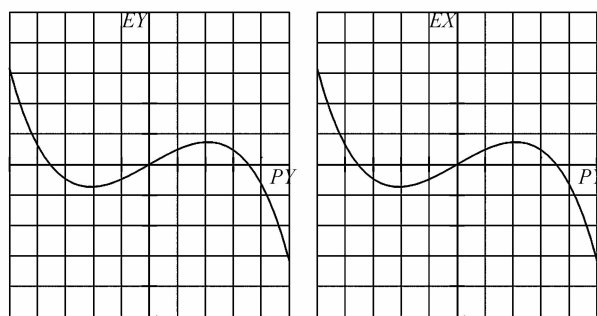
根据式(5)~(8), 获取透镜的初始结构参量: 透镜直径 d 为 8 mm, 透镜焦距 f 为 8 mm, 后表面半径 r_2 为 4.07 mm。

2.2.3 优化设计与仿真

用 ZEMAX 光学仿真软件对初始结构参量进行优化。球面透镜点列图和像差如图 3。从点列图中可得, 球面透镜的发散角 15.6 mrad。从球差图可得, 球面透镜准直后在中心处球差较小, 在边缘处球差较大。



(a) Spot diagram of spherical lens



(b) Ray fan of spherical lens

图3 球面透镜准直后的像面质量图

Fig. 3 Surface quality diagram of spherical collimating lens

对比准直前后 10 m 处的激光光照分布图, 如图 4, 可见, 准直前光斑为椭圆形光斑, 面积为 $6 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$, 光束能量发散, 光斑中心辐照度为 $5.07 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$, 准直后的光斑尺寸显著减小, 面积为 $40 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 光束能量集中, 光斑中心辐照度为 0.1702 W/cm^2 , 与未准直前相比, 光斑中心辐照度显著增加。

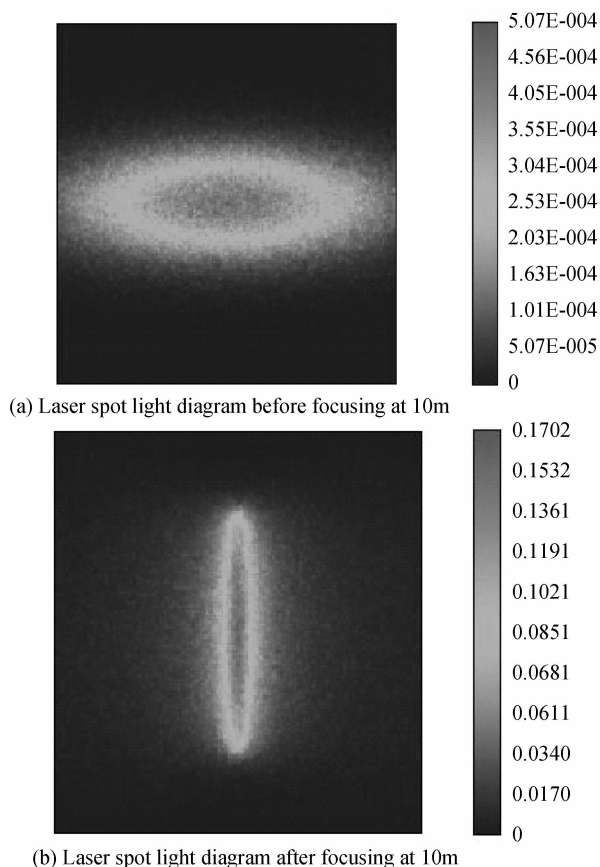


图 4 激光光斑

Fig. 4 Laser spot light diagram

光学系统扁平化处理后,采用短焦距球面透镜作为准直透镜,缩短了光学系统的轴向尺寸,而且与非球面准直透镜相比,仍然得到较好的准直性能.在脉冲激光周向近程探测中完全能满足探测要求,加工与材料成本也进一步得到降低.传统光学系统与新型光学系统实物对比图如图 5 所示.

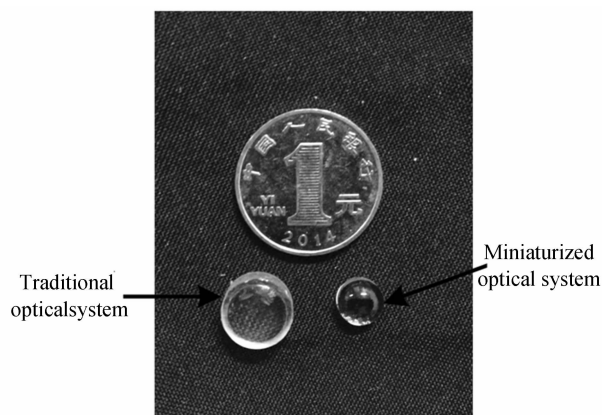


图 5 传统光学系统与新型光学系统对比

Fig. 5 The comparison chart of traditional optical system and new optical system

3 激光发射系统小型化后电磁干扰研究

激光发射系统小型化后,脉冲半导体激光器驱动电源被解体分离单独放置,其工作时会产生瞬时大电流,向空间辐射磁场,对信号处理系统产生空间电磁干扰.因此,需要对其进行电磁屏蔽处理.

3.1 脉冲激光发射系统对信号处理系统的电磁干扰机理

脉冲半导体激光器驱动电路是利用充放电回路不同的时间常量,实现能量压缩、释放^[16].能量释放时储能电容与脉冲激光器形成大电流放电回路,其电流变化率 dI/dt 很大,根据麦克斯韦电磁场理论,变化电场会以电磁波形式向空间辐射,电流信号产生电磁辐射干扰.

周向探测系统的信号处理电路中有电感升压元件,易受磁场干扰,且此种干扰较难消除.小型化后受到周向探测系统体积的限制,信号处理电路更加接近磁干扰源,必须对脉冲激光驱动电源采用电磁屏蔽技术来减少低频磁场的干扰.

3.2 磁场屏蔽机理研究及处理

磁场传播到屏蔽体表面时,主要通过三种不同机理进行衰减:1)屏蔽体表面的反射损耗 R ;2)穿越屏蔽体的吸收损耗 A ;3)屏蔽体内的多次反射损耗 B .

反射损耗 R 为^[16]

$$R = 134.68 + 10 \lg(f \sigma_r r^2 / \mu_r) \quad (9)$$

穿越屏蔽体的吸收损耗 A 为

$$A = 0.131t \sqrt{f \mu_r \sigma_r} \quad (10)$$

式中: μ_r 为屏蔽体的相对磁导率; σ_r 为屏蔽体的相对电导率; f 为磁场频率; t 为屏蔽体厚度; r 为屏蔽体距磁场源的距离.由式(9)和(10)可得,若屏蔽体的相对电导率较小,反射损耗 R 和吸收损耗 A 都较小.可利用磁导率高、电导率低、能为磁场提供旁路的高导磁材料实现电磁屏蔽.低频磁场的屏蔽材料通常选用电工纯铁、硅钢片、坡莫合金等高导磁率的铁磁材料.钢具有较高的磁导率和较低的电导率,在相同壁厚情况下,相较于铁的屏蔽性能更好,所以选用钢(45号钢,壁厚 ≥ 2 mm)进行电磁屏蔽.钢结构屏蔽体为图 2 中的中间结构.

4 激光发射系统静态测试实验

设计加工了小型化周向探测脉冲激光发射系统.采用光功率计测量传统激光发射系统和本文设计的激光发射系统的功率.各平均功率对应测试三组数据,检测结果如表 1.

表 1 传统激光发射系统和本文激光发射系统平均功率对比
Table 1 The contrast of traditional laser emission system and the proposed laser system power

Traditional laser emission system average power/mW	The proposed laser system average power/mW
7.4	10.1
7.4	10.2
7.5	10.2

可见,本文激光发射系统较传统激光发射系统的平均功率提升 30%,验证了周向探测脉冲激光发射系统小型化技术的正确性。

运用红外观测仪对光斑面积进行测量,在 10 m 处贴上网格纸,利用红外观测仪描出光斑尺寸,实际测得尺寸为 20 cm × 2 cm,准直后激光长轴发散角为 20 mrad,与仿真 15.6 mrad 相近。

发射系统电磁屏蔽前后对信号处理系统电磁干扰如图 6。

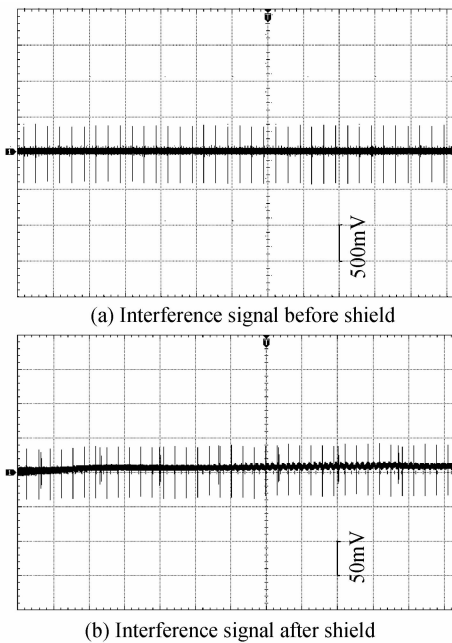


图 6 激光发射系统对信号处理系统的电磁干扰
Fig. 6 Electromagnetic interference of signal processing system of laser emission system

从图 6 中可得,采用钢结构屏蔽体前后,干扰信号幅值由 350 mV 下降到 40 mV,幅值下降 88%,采用钢结构屏蔽体能有效抑制脉冲激光驱动电源的空间电磁辐射干扰。

根据本文设计重新加工原理样机,原理样机如图 7。为验证激光发射系统性能,将弹体模拟目标在 5 m 处放置,使用红外观测仪调整激光光斑位置,将激光光斑位置调整至弹体几何中心处,调整 PIN 管接收系统接收视场角,保证接收视场与发射视场空间匹配。5 m 处回波波形如图 8。实验结果表明,周向探测脉冲激光发射系统经过小型化设计之后,在 5 m 处能有效探测

被测目标,进一步验证了周向探测脉冲激光发射系统小型化技术的可行性和实用性。

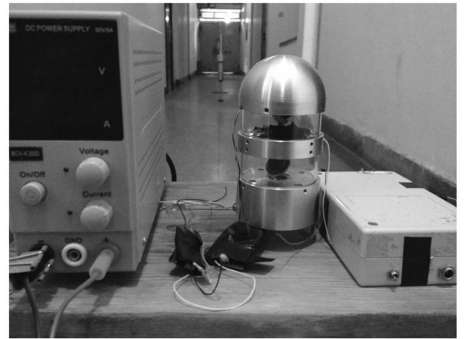


图 7 原理样机实验场景图
Fig. 7 Experiment scene of principle prototype

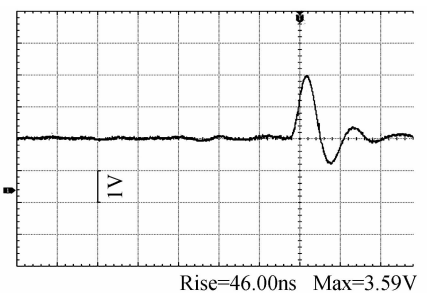


图 8 目标在 5 米处的回波信号
Fig. 8 Echo signal when target is in 5 m

5 结论

采用解体分离技术和光学系统扁平化技术,打破了传统脉冲激光发射系统结构,实现了周向探测脉冲激光发射系统的小型化。应用小型化技术后原理样机的性能得到提升,实验结果验证了周向探测脉冲激光发射系统小型化技术的正确性和有效度。为脉冲激光周向探测技术应用于小口径弹药创造了良好的基础。

参考文献

- [1] XIE Jing, CHEN Hai-qing, TAN Zuo-jun, *et al.* Parameter measurement research of optical transmitter in new laser fuze [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(8): 983-987. 谢静, 陈海清, 谭佐军, 等. 新型激光引信光学发射机的参量测试研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(8): 983-987.
- [2] GAN Lin, ZHANG He, ZHANG Xiang-jin. Design of narrow pulse-width high speed and complementary drive module for laser fuze [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1014002. 甘霖, 张合, 张祥金. 激光引信高速窄脉冲互补驱动电源设计[J]. *光子学报*, 2014, **43**(10): 1014002.
- [3] GAN Lin, ZHANG He, ZHANG Xiang-jin. New optical large field receiving technology in laser fuze [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(12): 1514-1518. 甘霖, 张合, 张祥金. 激光引信新型光学大视场接收技术研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(12): 1514-1518.
- [4] STEINVALL O. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(24): 4381-4391.
- [5] CRONWALL C, STEINVALL O, GUSTAFSSON F, *et al.* Influence of laser radar sensor parameters on range-

- measurement and shape-fitting uncertainties [J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(10): 106201-106211.
- [6] JOHNSON S, CAIN S. Bound on range precision for shot-noise limited ladar systems [J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(28): 5147-5154
- [7] BUZZARD G. Modeling the interaction of a laser target detection device with the sea surface[C]. 54th Annual Fuze Conference, 2010, 4: 67-69.
- [8] ZHANG Zheng-hui, YANG Ming, XU Shi-wen. Analysis of FOV configuration in laser proximity fuze[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(6): 700-704.
张正辉, 杨明, 许士文. 激光引信光束布局方式的选择与分析[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(6): 700-704.
- [9] BUZZARD G. Advanced laser proximity fuze[C]. First Annual International Missile and Rocket Symposium, 2000.
- [10] XU Wei, CHEN Qian, GU Guo-hua, et al. Research on miniaturization of laser proximity fuze [J]. *Acta Armamentarii*, 2011, **32**(10): 1212-1216.
徐伟, 陈钱, 顾国华, 等. 小型化激光近炸引信技术研究[J]. *兵工学报*, 2011, **32**(10): 1212-1216.
- [11] GAN Lin, ZHANG He, ZHANG Xiang-jin. Research on multi-level aspheric collimating lens of laser proximity fuze [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(7): 0702009.
甘霖, 张合, 张祥金. 激光近炸引信多级光学准直整形透镜研究[J]. *中国激光*, 2013, **40**(7): 0702009.
- [12] DING Zhi-zhong, WANG Ke-yi, ZHAN Zhen-xian. Application of aspherical liquid lens in laser diode beam shaping[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(4): 623-626.
丁志忠, 王克逸, 詹珍贤. 非球面液滴透镜在LD光束整形中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(4): 623-626.
- [13] WANG Hai-xian, WANG hai-yan. One easy method to test laser range finding capability[J]. *Laser & Infrared*. 2004(06):428-430.
王海先, 王海燕. 一种简易的激光测距能力检测方法的研究[J]. *激光与红外*, 2004(06):428-430.
- [14] DENG Fang-lin, ZHANG Yi-fei, YANG Hui. Research on ranging performance of ballistic missile's laser fuze [J]. *Journal of System Simulation*, 2005, **17**(6): 1476-1479.
邓方林, 张翼飞, 杨辉. 弹道导弹激光引信测距性能研究[J]. *系统仿真学报*, 2005, **17**(6): 1476-1479.
- [15] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [16] FENG Ying, ZHANG He, ZHANG Xiang-jin. Electromagnetic interference technique of transmitter and receiver modules for pulsed laser fuze[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(1): 249-254.
冯颖, 张合, 张祥金. 脉冲激光引信发射接收模块电磁干扰[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(1): 249-254.