

❖ 特约专栏 ❖

激光引信与预制破片战斗部引战配合设计

于玉亭¹, 舒敬荣¹, 丁伯圣²

- (1. 安徽新华学院 电子通信工程学院, 安徽 合肥 230088;
2. 安徽东风机电科技股份有限公司, 安徽 合肥 230022)

摘要: 针对预制破片弹破片飞散的特点, 提出了一种基于激光近炸引信控制的预制破片战斗部引战配合的设计思路。通过公式推导、Matlab 软件仿真和计算预制破片战斗部对等效面积靶板的毁伤, 获得战斗部理想的起爆高度。在理想起爆高度条件下, 选择合适的激光探测视场进行引信设计, 从而完成预制破片弹引战配合在特定条件下的最优设计。结果表明: 在导弹散布误差为 5 m、俯仰角为 60°, 攻击目标特征为 5 m×3 m×3 m 的指挥车时, 战斗部起爆高度在 4~6 m 间, 命中目标的有效破片密度最大, 在此起爆高度内对引信的探测概率和探测高度进行分析、计算得出: 激光引信最优光束发射角在 17°~30°。这种引战配合设计对于激光引信控制的预制破片弹的工程应用具有实际的参考价值。

关键词: 引战配合; 激光引信; 预制破片

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0303003

Design of fuze-warhead coordination based on laser fuze and prefabricated fragment ammunition

Yu Yuting¹, Shu Jingrong¹, Ding Bosheng²

- (1. Electronic Communication Engineering College, Anhui Xinhua University, Hefei 230008, China;
2. Anhui Dongfeng Electromechanical Technology Co. LTD., Hefei 230022, China)

Abstract: Aiming at the fragmentation dispersion characteristic of prefabricated fragment ammunition, fuze-warhead coordination was designed based on prefabricated fragment ammunition controlled by laser proximity fuze. Ideal warhead explosion height was obtained through formula deduction, Matlab software simulation and calculation of target damage at a equivalent area. Under this condition of the ideal explosion height, the laser fuze was designed through selecting appropriate laser beam detection field. Thus a optimal design of fuze-warhead coordination under specified conditions was completed. Results showed that: in the the range of 5 m of the missile dispersion, 60° pitch angle and 5 m × 3 m×3 m command vehicle target, effective fragment density is the biggest at the warhead explosion 4–6 m height. Detection probability and height of the laser proximity fuze are analyzed and calculated at the height interval of the detonating height, the optimal beam emission angle of laser fuze is from 17° to 30°. This design is of practical reference value for the application of the prefabricated fragment ammunition controlled by laser fuze.

Key words: fuze-warhead coordination; laser fuze; prefabricated fragment

收稿日期: 2017-10-10; 修订日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(11272356)

作者简介: 于玉亭(1982-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事激光探测与目标识别方面的研究。Email: yuyu0005@163.com

0 引言

引战配合是在给定的弹丸与目标交会的条件下,引信适时起爆战斗部并对目标造成最佳毁伤效果,是弹药系统研制过程中的重要环节。通过协调引信起爆区域和战斗部杀伤物质动态的飞散区域,保证战斗部在实际弹道上的最佳起爆点,可以确定制导系统的制导精度指标;选择和确定引信、战斗部的相关参数^[1-2]。

预制破片弹因其预制破片具有形状可控、分布密集、毁伤力强等优点,成为对付地面移动装甲目标、轻型指挥车辆、人员的重要武器^[3]。目前国内预制破片弹引信主要采用机械触发引信,机械触发引信因无法控制起爆高度,在触发目标后会产生漏斗坑,相当部分破片会钻入土内,使破片威力未能充分发挥。近年来随着激光应用技术的发展,激光近炸引信因探测距离远、测距精度高以及抗电磁干扰能力强而开始在国内外的导弹上得到应用,采用激光近炸引信控制的预制破片弹可通过激光高精度定角和定距性能在合适的时间和空间起爆战斗部^[4],控制破片飞散高度和方向,从而能显著提高引战配合效率、增大毁伤效果。

目前国内外在引战配中局部问题的仿真研究很多,如战斗部杀伤概率计算、引信半实物仿真、引信捕获概率计算等。预制破片弹引战配合研究涉及较少且主要侧重于对空目标的引战配合效率计算、战斗部杀伤概率研究,由于地面机动性装甲目标的毁伤与弹丸实际弹道的散布、弹目相对速度、相对姿态、战斗部破片飞散特点、引信起爆时机、目标易损性部件的分布等因素有关,因此需要将引信设计和战斗部毁伤两部分相互关联起来分析。

文中选取指挥车(MSQ104)作为攻击目标,提出了一种新的基于激光引信控制的预制破片弹引战配合设计方法。针对战斗部破片飞散的特点,选定典型影响因素通过计算和仿真出预制破片战斗部对等效面积靶板的最大破片密度,来获得战斗部合适的起爆高度,进而在起爆高度条件下对激光引信进行设计。选择合适的激光探测视场进行光束布局来提高引信对目标的探测概率和探测高

度,从而完成预制破片弹引战配合在一定条件下的最优设计。

1 系统组成及工作原理

如图1所示,系统由制导舱、战斗部、激光引信、燃料舱等组成,其中激光引信由位于导弹前端的激光探测模块和起爆控制模块组成。导弹在制导舱的控制下瞄准并接近目标,位于导弹前端的激光探测模块发射一定频率和角度的脉冲激光光束对目标进行探测,接收系统接收目标的反射光并转化为电信号,位于战斗部底部的起爆控制模块经距离判别后在最佳起爆高度起爆中心起爆管^[5-6],预制破片在战斗部装药爆轰作用下沿一定的飞散方位角命中目标。

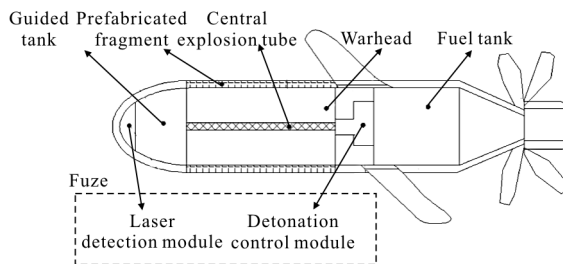


图1 导弹系统组成图

Fig.1 Composition of the missile system

2 战斗部毁伤计算和仿真

战斗部爆炸形成的破片以一定的数量、方向角度命中目标,一部分破片因起爆高度和角度无法命中目标而成为无效破片,文中选命中目标最多有效的破片孔数作为最佳起爆准则,沿最多有效破片密度方向瞄准目标作为起爆控制的策略。

如图2所示,起爆后的战斗部破片飞散中心等效为与该处壳体夹角为 Ψ_0 (破片中心飞散平均方位角)的圆锥面。在静态情况下,破片飞散角和平均方位角的表达式为:

$$\delta = \arcsin\left(\frac{V_0}{2D} \cos \alpha\right) \quad (1)$$

$$\Psi_0 = \frac{\pi}{2} - \arctan\left[\frac{(S_2 - S_1)V_0}{2LD}\right] \quad (2)$$

式中: D 和 V_0 分别为爆轰波速度和破片速度; α 为起爆点与该微元(P)的连线与壳体之间的夹角; S_1 为

起爆点至弹体等效圆筒近端内表面距离; S_2 为起爆点至弹体等效圆筒远端内表面距离; L 为战斗部等效圆筒长度。

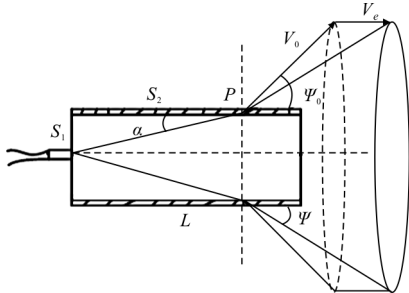


图 2 破片飞散示意图

Fig.2 Schematic of fragment dispersion

受导弹落速 V_e 的影响, 动态飞散方位角为:

$$\Psi_{0v} = \arctan \frac{V_0 \sin \Psi_0}{V_0 \cos \Psi_0 + V_e} \quad (3)$$

在靶板高度一定的情况下, 受战斗部起爆高度影响, 一部分破片飞离靶板上、下沿而成为无效破片。图 3 中阴影部分为破片命中靶板的有效区域。 θ

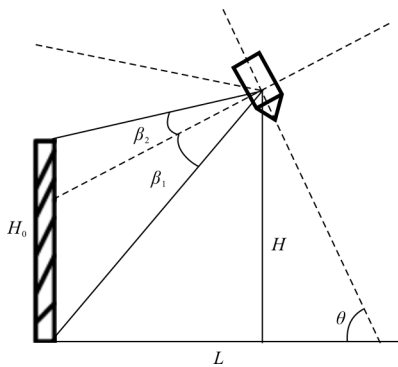


图 3 预制破片与目标交会示意图

Fig.3 Sketch of prefabricated fragment and target intersection

为导弹轴向方向与地面间夹角; β_1 为有效区域内破片向下飞散方向与方位角对称轴方向间夹角; β_2 为有效区域内破片向上飞散方向与方位角对称轴方向间夹角, 由几何运算可得:

$$\beta_1 = \theta - \arctan \frac{L - H \cdot \cot \theta}{H} \quad (4)$$

$$\beta_2 = \arctan \frac{L - H \cdot \cot \theta}{H - H_0} - \theta \quad (5)$$

破片密度分布函数在飞散球面上按平均方位角的对称轴呈正态分布, 其密度可由其分布区间内积分求得。

$$P = \int_{\Psi_0 - \beta_1}^{\Psi_0 + \beta_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_v} \exp \left[-\frac{(\Psi_0 - \Psi_{0v})^2}{2\sigma_v^2} \right] d\Psi \quad (6)$$

$$\rho = \frac{N_0 \cdot P}{S} \quad (7)$$

式中: ρ 为破片密度; σ_v 为方位角均方根, $\sigma_v = 1/3.3$; S 为等效目标靶板面积; H 为战斗部起爆高度; H_0 为等效靶板高度; L 为导弹散布距离; N_0 为有效破片总数。

取破片速度 1 700 m/s, 导弹速度 200 m/s, 等效靶板高度 3 m, $\theta = 60^\circ$, 破片数量 500 个, 静态条件下破片飞散角 13.3° , 破片平均方位角 87.4° 。取 $L = 1, 3, 5$ m, 战斗部起爆高度从 10 m 逐渐降低时, 破片密度随落点散布和起爆高度的变化曲线如图 4 所示。

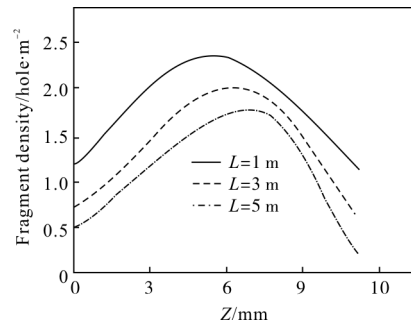


图 4 起爆高度、落点散布对破片密度的影响

Fig.4 Effect of explosion height and falling point distribution on fragment density

3 引信设计

激光引信由发射系统、接收系统、信号处理系统组成。发射系统受引信体积约束, 布置光路个数有限, 设计上应尽可能增大激光发射角来减小因导弹在末端的实际飞行中受导航精度、空气动力、环境温度等因素引起的落点在纵向、横向偏差而带来的探测“盲区”, 而接收系统受激光能量约束, 应尽量多地接收目标反射回来的激光信号, 提高峰值功率^[7-8]。因此需要选择合理的激光探测视场进行光束布局, 最大程度上提高激光引信系统效率。

3.1 发射系统设计及探测概率计算和仿真

结合上述分析, 引信设计为前置激光引信, 前置激光束探测面具有一定的前倾角以保证在弹目交会条件下, 留有足够的时间和角度进行目标识别并在

最佳时机起爆战斗部^[9]。系统通过改变前置光束的倾角来调节激光探测视场,从而实现激光引信探测概率的最大化。

目标长度为 α ,由正态分布的性质可知,在探测平面内各点出现的概率密度函数 $f(z,y)$ 的表达式为:

$$f(z,y)=\frac{1}{2\pi\sigma_z\sigma_y}\exp\left[-\frac{(z-m_z)^2}{2\sigma_z^2}-\frac{(y-m_y)^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (8)$$

如图 5 所示, m_z, m_y 为探测瞄准点 M 到目标中心 O 的位置, β_1 为激光探测到目标前沿光束与弹轴间夹角; β_2 为激光探测到目标后沿光束与弹轴间夹角;由几何关系可知:

$$\beta_1=\Psi-\arctan\frac{H}{L-a/2+H\cdot\cot\Psi} \quad (9)$$

$$\beta_2=\Psi-\arctan\frac{H}{L+a/2+H\cdot\cot\Psi} \quad (10)$$

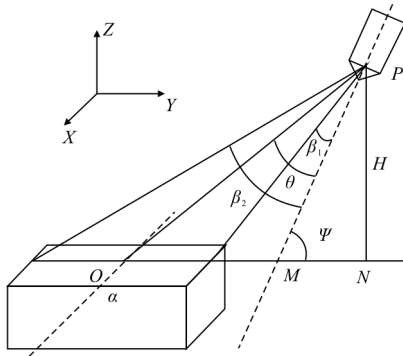


图 5 激光引信目标探测示意图

Fig.5 Sketch of target detection of laser fuze

式中: L 为弹轴线距离目标中心轴线的偏差; θ 为光束发射角; 由于单路光束在目标平面内仅能进行线扫,探测概率分布函数可以由公式(8)二维正态分布边缘分布转化为一维正态分布。

$$f(y)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{-\frac{(y-L)^2}{2\sigma^2}} \quad (11)$$

引信的探测概率可以由探测概率分布函数在可探测到的区域 $D=\{\theta\beta_1\leq\theta\leq\beta_2\}$ 内积分求得,即:

$$P=\int_D f(y)dy \quad (12)$$

设导弹制导精度 $CEP=5\text{ m}$ 、 $\sigma=2.5$ 、俯仰角 $\Psi=60^\circ$ 、起爆高度 $H=5\text{ m}$ 、目标长度 $a=3\text{ m}$,分别仿真弹轴线距目标中心轴线距离为 1、3、5 m 处引信探测概率与光束发射角的变化曲线,如图 6 所示。

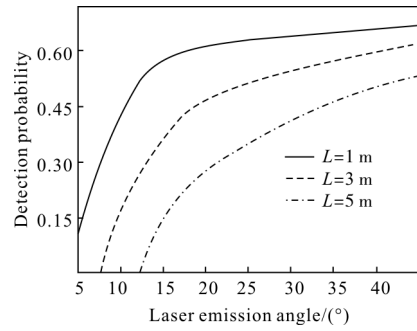


图 6 激光发射角对探测概率的影响

Fig.6 Effect of laser emission angle on detection probability

3.2 接收功率计算和探测高度仿真

导弹以一定俯仰角与目标交会,考虑目标表面的法线与发射激光光束的夹角,假设目标具有漫反射特性、弹体不滚动情况下激光接收功率为^[10]:

$$P_r=P_T\frac{A_r\tau_r\tau_T\rho\eta\cos(\theta+\varphi)}{\pi R^2} \quad (13)$$

式中: P_r 为接收功率; P_T 为发射功率; R 为引信与目标间的距离; θ 为激光光束发射角; φ 为导弹轴线方向与重力方向间夹角; τ_r 为接收光学系统透过率; τ_T 为发射光学系统透过率; ρ 为装甲目标反射率; A_r 为接收机有效接收孔径面积, $A_r=\pi D^2/4$, D 为接收孔径; η 为双程大气透过率,与激光波长、大气能见度有关^[11]。

引信与目标间的距离 R 与引信起爆高度 H 的几何关系为:

$$R=H/\cos(\theta+\varphi) \quad (14)$$

由公式(12)、(13)可以得出接收功率的表达式如下:

$$P_r=P_T\frac{\tau_r\tau_T\rho\eta D^2\cos^3(\theta+\varphi)}{4H^2} \quad (15)$$

从公式中可以看出接收功率随激光光束发射角、探测高度的增大而减小。

$$SNR=10\lg\frac{P_r}{P_n} \quad (16)$$

式中: SNR 为系统信噪比; P_n 为噪声功率。

由公式(15)、(16)可以得出引信探测高度、激光光束发射角、信噪比关系可表示为:

$$SNR=10\lg\frac{P_T\tau_r\tau_T\rho\eta D^2\cos^3(\theta+\varphi)}{4P_n H^2} \quad (17)$$

从公式(17)可以看出系统信噪比随着接收功率的减小而减小,当信噪比低于下限阈值时,系统将无法正常工作。在信噪比一定条件下,利用公式(17)建立激光系统仿真参数表(表 1),通过 Matlab 软件仿真出引信起爆高度与激光光束发射角间的关系曲线。

表 1 激光系统仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of laser system

Simulation parameters	Value
Transmitting power/W	75
Noise power/W	10^{-8}
Transmittance of receiving optical system	0.6
Transmittance of emitting optical system	0.6
Reflectivity of armored target	0.65
Receiver aperture diameter/mm	50
Double path atmospheric transmittance	0.9
Signal-to-noise ratio/dB	20

图 7 为 $\varphi=30^\circ$ 时,通过 Matlab 软件仿真出引信探测高度随激光光束发射角改变的关系曲线。

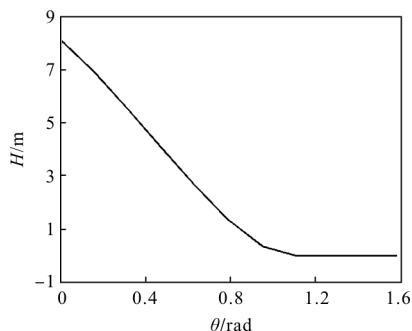


图 7 激光光束发射角对探测高度的影响

Fig.7 Effect of laser emission angle on detection height

4 仿真与分析

4.1 目标毁伤效果分析

以某预制破片导弹攻击毁伤地面指挥车为例,指挥车参数长宽高为:5 m×3 m×3 m, 导弹落点散布在 5 m 范围内,俯仰角为 60° ,等效靶板高度 3 m 条件下破片密度数据如表 2 所示。

由表 2 计算结果可以看出,破片密度随着战斗部起爆高度的增加先增大后减小,在导弹散布范围内取 $L=1, 3, 5$ m 时,破片在起爆高度为 4~6 m 间密度最大,毁伤效果最佳。

表 2 不同起爆高度、落点散布下的破片密度

Tab.2 Fragment density in different explosion height and falling point distribution

Serial number	Explosion height/m	Fragment density/hole · m ⁻²		
		L=1 m	L=3 m	L=5 m
1	0	1.1	0.56	0.45
2	2	1.9	1.17	1.05
3	4	2.24	1.84	1.53
4	6	2.58	2.05	1.84
5	8	1.93	1.75	1.61

4.2 最优激光光束发射角分析

取破片密度最大时的起爆高度($H=5$ m),探测概率和探测高度因子随激光光束发射角的改变,各项指标如表 3 所示。

表 3 不同激光光束发射角下探测概率、探测高度仿真数据

Tab.3 Detection probability and detection height in different laser emission angle

Serial number	Laser emission angle/(°)	Detection probability			Detection height/m
		L=1 m	L=3 m	L=5 m	
1	5	0.094	0.054	0.006	7.37
2	10	0.392	0.105	0.043	6.66
3	20	0.583	0.332	0.148	5.11
4	30	0.617	0.546	0.327	3.9
5	40	0.625	0.593	0.474	1.98

从表 3 中可以看出:

(1) 激光探测概率随着光束发射角增大而增大,综合导弹散布探测概率数据,分析得出激光光束发射角至少大于 17° ,才能覆盖落点散布在 5 m 范围内的目标探测;

(2) 引信探测高度随激光光束发射角的增大而减小。这是因为随着发射激光光束与目标表面的法线夹角的增大,引信与目标间等效作用距离在逐渐增大,从而导致接收功率越来越小。当系统信噪比一定时,由于接收功率的减小,引信探测高度随之逐渐减小。仿真数据表明:为满足战斗部最大毁伤效果下的起爆高度 4~6 m 要求,激光光束发射角应小于 30° 。

5 结论

文中以指挥车(MSQ104)作为攻击目标,战斗部预制破片命中目标最大有效破片密度为最佳毁伤效果,针对性的分析了导弹的散布、破片飞散特性、引信起爆高度因素对毁伤效果的影响以及激光近炸引信探测概率、探测高度与引信起爆高度、光束发射角间的关系。关联战斗部毁伤和引信设计,通过预制破片战斗部对目标的最佳毁伤计算来反推激光引信参数选择,提出了一种基于激光近炸引信控制的预制破片战斗部引战配合新的设计思路。仿真结果得出:对特征为 $5\text{ m}\times 3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的指挥车的毁伤,散布误差在 5 m 、俯仰角为 60° 的导弹战斗部起爆高度在 $4\sim 6\text{ m}$ 、激光引信光束发射角 $17^\circ\sim 30^\circ$ 为最优引战匹配参数。文中工作具有一定的工程应用前景,可为基于近炸引信控制的预制破片弹引战配合参数设计及战术使用提供理论参考。

参考文献:

- [1] Jiang Yiyang, Ni Bangfu, Qian Hongqing. Modeling and simulation of combination laser proximity fuse detecting warship target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1006001. (in Chinese)
姜易阳, 倪邦福, 钱红庆. 激光近炸复合引信探测舰船目标的建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1006001.
- [2] Zong Lina. Fuze-warhead coordination simulation of portable anti helicopter research on computer [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
宗丽娜. 便携式反直升机引战配合的计算机仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [3] Nie Hao, Wu Zhenglong. Research and calculation on damage efficiency against armored target of time-fuzed ammunition [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2015, 36(5): 57-59. (in Chinese)
聂浩, 吴正龙. 预制破片弹对装甲目标毁伤效能计算[J]. 兵器装备工程学报, 2015, 36(5): 57-59.
- [4] Chen Huiming, Jia Xiaodong, Cai Kerong. Laser Fuze Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 256-257. (in Chinese)
陈慧敏, 贾晓东, 蔡克荣. 激光引信技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [5] Shi Zhiyong, Pan Xiaosheng, Zhang Qian. High-precision pulsed laser measuring distance by time delay method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 252-258. (in Chinese)
施智勇, 潘晓声, 张谦. 利用延时法进行高精度脉冲激光测距[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 252-258.
- [6] Wang Fengjie, Chen Huimin. Simulation of characteristics of cloud and fog echo for pluse laser fuse [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10z): 1-7. (in Chinese)
王凤杰, 陈慧敏. 脉冲激光引信云雾回波特性仿真 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(10z): 1-7.
- [7] Li Dianjun, Wang Hualong, Yang Guilong, et al. Comprehension and usage of ordinary terminologies for laser taking peak power as example [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 873-880. (in Chinese)
李殿军, 王化龙, 杨贵龙, 等. 峰值功率等激光术语的理解与应用问题[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 873-880.
- [8] Tian Jingrong, Song Yanrong, Wang Li. Error analysis of peak power formula in pulsed lasers [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 253-259. (in Chinese)
田金荣, 宋晏蓉, 王丽. 常用激光峰值功率公式误差分析 [J]. 中国光学, 2014, 7(2): 253-259.
- [9] Zhu Defang, Zhang Zhen, Wang Wenqiang. Target recognition method of laser proximity fuze for anti-radiation missile [J]. *Journal of Missiles and Guidance*, 2015, 35(3): 75-78. (in Chinese)
诸德放, 张真, 王文强. 空地反辐射导弹激光近炸引信目标识别方法[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(3): 75-78.
- [10] Shi Chunbo, Ma Xianhua. Analysis of the detecting visual field influenced on the oprating distance of the laser fuze[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(21): 636-639. (in Chinese)
史春波, 马献华. 探测视场对激光引信作用距离影响分析 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(21): 636-639.
- [11] Zhang Zeyu, Xie Xiaoping, Duan Tao, et al. Numerical calculation of $3.8\ \mu\text{m}$ and $1.55\ \mu\text{m}$ laser radiation transmission characteristic under foggy condition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(s1): S104007. (in Chinese)
张泽宇, 谢小平, 段弢, 等. $3.8\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 激光辐射在雾中传输特性的数值计算 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(s1): S104007.