

## 激光引信在防空导弹高效引战配合中的应用研究

蔡克荣, 余 曜, 高志林, 蒋 涛, 申卫民, 高瑞林

(上海机电工程研究所, 上海 201109)

**摘 要:** 激光引信通过周向多通道布局可以实现对导弹类目标的无盲区探测, 以轮流主动窄脉冲探测方式, 能够获得弹目距离、脱靶方位、目标类型等信息, 同时因其窄波束、无旁瓣的特点具有较小的启动区散布, 为防空导弹的高效引战配合提供了重要技术途径。在分析防空导弹引战配合影响因素的基础上, 设计了一种基于八通道周视激光引信的引战系统总体方案, 融合了激光引信测得的弹目距离、脱靶方位和目标类型等信息。典型弹道条件下的引战配合仿真计算结果表明, 单发杀伤概率在有激光引信信息时最多可提升 10% 以上, 可为防空导弹引战系统和激光引信总体设计提供借鉴。

**关键词:** 激光引信; 引战配合; 防空导弹

中图分类号: TJ43<sup>+</sup>4.2

文献标志码: A

DOI: 10.3788/IRLA202049.0403002

## Research on application of laser fuze for efficient fuze-warhead coordination in the air-defense missile

Cai Kerong, Yu Yao, Gao Zhilin, Jiang Tao, Shen Weimin, Gao Ruilin

(Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** The laser fuze can realize omnidirectional detection of missile targets through the circumferential multi-channel layout, its active-rotational-narrow pulse detection method can obtain the information about missile-target distance, miss azimuth angle and target type. At the same time, due to the characteristics of narrow beam and no side lobes, the fuze initiation zone has a small distribution area. All of these factors provide an important technical approach for efficient fuze-warhead coordination. Based on the analysis of the influence factors of air-defense missile fuze-warhead coordination, a fuze-warhead system scheme with eight-channel circumferential laser fuze was designed, combined with missile-target distance, miss azimuth, and target type. The fuze-warhead coordination simulation results in conditions of typical encounter parameters indicate that, the kill probability of single missile could be obtained to a maximum of 10% with the laser fuze information. It is useful for optimal design.

**Key words:** laser fuze; fuze-warhead coordination; air-defense missile

收稿日期: 2020-02-07; 修订日期: 2020-03-05

作者简介: 蔡克荣 (1984-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事激光探测与目标识别方面的研究。Email: caikerong@163.com

## 0 引言

随着科学技术的发展,防空导弹武器系统在拦截各类入侵目标时面临的压力不断增大,高速、大机动、隐身类目标应用智能技术后不仅大大压缩了防御方的反应时间和拦截空域,还明显降低了拦截成功率<sup>[1]</sup>。徐俊峰等<sup>[2]</sup>讨论了一种发挥可瞄准战斗部定向优势的引战配合技术方案。董康生等<sup>[3]</sup>讨论了不同弹目交会情况对激光成像引信引战配合的影响。张斌<sup>[4]</sup>分析了防空导弹多种类目标特性并提出了高效引战配合技术发展途径。这些技术研究推动了防空导弹高效引战配合技术的发展,也为激光引信的应用探索了方向。

激光引信具有抗电磁干扰能力强、定角/测距精度高和系统体积小等优点,目前已在防空导弹中得到应用,特别是相干探测<sup>[5]</sup>、偏振探测<sup>[6]</sup>、双色探测<sup>[7]</sup>、干扰仿真<sup>[8]</sup>等技术明显改善了激光引信易受烟雾、雨、雪、海面或者地表背景等干扰的缺点,促使其应用领域不断扩大。

文中以防空导弹多通道周视激光引信为背景,分析了影响引战配合设计的因素,通过典型引战系统总体方案下的引战配合仿真计算,对比分析了单发杀伤概率在有无激光引信信息条件下的变化情况,为防空导弹引战系统和激光引信总体设计提供技术支撑。

## 1 防空导弹引战配合影响因素分析

防空导弹引战配合规律研究武器系统规定杀伤空域和制导精度等限定条件下,引信启动区与战斗部杀伤区协调的问题,保证导弹对目标的有效毁伤,满足武器系统对单发杀伤概率的指标要求。引战配合规律与引信启动特性、战斗部毁伤特性、脱靶量、脱靶方位、弹目相对速度、弹目交会角等因素密切相关。下面分别对平行交会条件、非平行交会条件进行分析。

### 1.1 平行交会条件

防空导弹拦截目标在理论平行交会条件下的引战配合情况如图 1 所示。图中,  $V_r$  为弹目相对速度,  $V_m$  为导弹速度,  $V_t$  为目标速度,  $\rho$  为脱靶量,  $\varphi_r$  为引信视场倾角,  $\varphi_a$  为引信启动角,  $\varphi_w$  为战斗部破片动态飞散角,  $L_d$  为引战配合距离,  $L_1$  为引信波束中心与战斗部破片飞散中心距离,  $L_2$  为目标易损中心与头部距

离,  $R_{mt}$  为引信测得的弹目距离。

对于已知目标,可以通过分析研究获得散射特性和易损特性,最优引战配合就是控制战斗部破片动态飞散带命中目标易损中心,最佳引战延时  $\tau$  可表示为:

$$\begin{cases} \tau = L_d / V_r \\ L_d = L_1 + L_2 + \rho \cot(\varphi_a) - \rho \cot(\varphi_w) \end{cases} \quad (1)$$

由公式 (1) 可知,不考虑引信视场倾角和战斗部破片静态飞散角在工程产品上的不一致性,则最佳引战延时与脱靶方位无关,实际拦截过程中只需测得脱靶量  $\rho$  和弹目相对速度  $V_r$  即可准确计算。

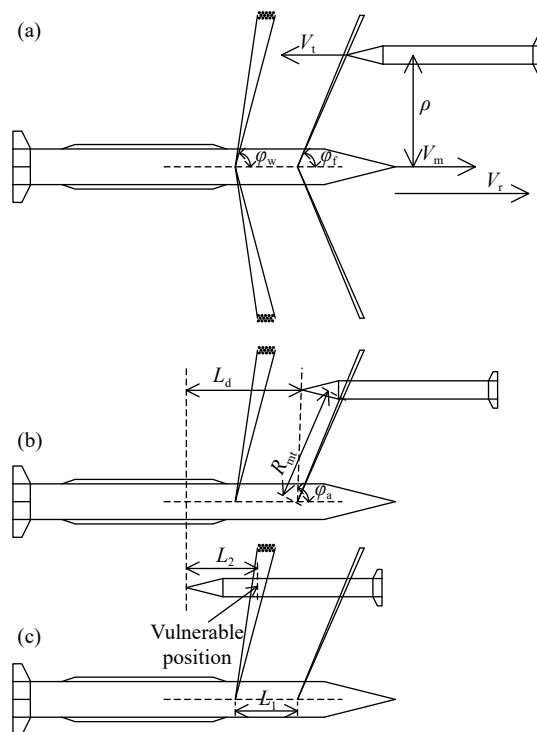


图 1 导弹和目标平行交会示意图

Fig.1 Diagram of missile-target encounter (theoretical condition)

### 1.2 非平行交会条件

防空导弹拦截目标的实际情况几乎都是非平行交会条件,导弹和目标的攻角和侧滑角均需考虑,并且脱靶方位  $\theta$  也将对最佳引战延时  $\tau$  产生影响,如图 2 所示。

图 2 中,由于弹目相对速度矢量和导弹弹轴和目标纵轴不平行,导致战斗部破片动态飞散角在圆周方向上变化,不再是固定值,可用  $\varphi_w(\theta)$  表示,即图示中的  $\varphi_w$  和  $\varphi_w'$  不相等。这就导致导弹从目标不同脱靶方位上过靶时,最佳引战延时也不再是固定值,无法用诸如公式 (1) 的数值公式解算得到。参考文献 [9]

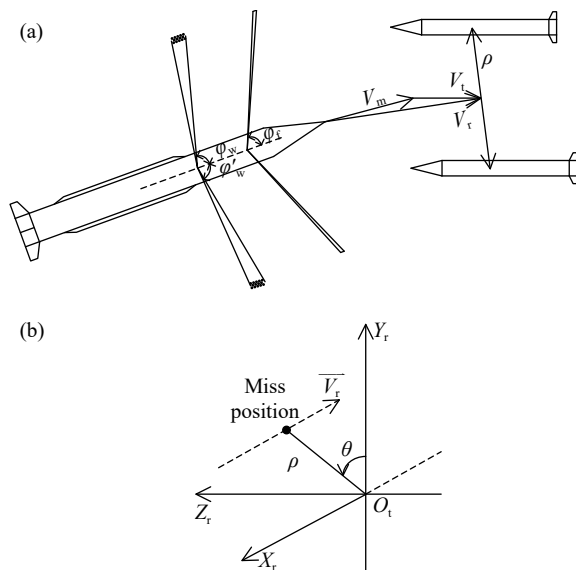


图 2 导弹和目标非平行交会示意图

Fig.2 Diagram of missile-target encounter (normal condition)

详细阐述了影响引战配合的因素,参考文献[10]对早晚到这种复杂现象也有深入研究,结果表明,在弹目非平行交会条件下,最佳引战延时是一个受多变量影响的非解析函数。工程应用中通过融合弹上所能获取的各类信息设计引战配合规律,仅是对最佳引战延时的一种逼近,需要通过大量数值仿真计算验证在全空域范围内对目标的毁伤效果,达到单发杀伤概率这一关键技术指标。

## 2 激光引信对引战配合的影响因素分析

在防空导弹引战配合设计时需要综合考虑武器系统、导弹总体、引信和战斗部的性能参数影响,一般来说,具有拦截导弹类目标能力的防空导弹也就要求近炸引信具备全向探测能力。激光引信通过在周向均匀布置多套激光收发系统即可实现全向无盲区探测,在总体设计中,除最大作用距离、视场倾角、视场宽度、抗干扰性能等主要技术指标外,从高效引战配合角度还应关注弹目距离  $R_{mt}$  及其误差  $R_e$ 、引信启动角  $\phi_a$  及其误差  $\phi_e$ 、脱靶方位  $\theta$  及其误差  $\theta_e$ 、目标类型识别能力等。

### 2.1 弹目距离

弹目距离  $R_{mt}$  可用于调整式(1)中脱靶量  $\rho$  对引战延时的影响,显然  $R_e$  越小越好,文中主要讨论  $R_{mt}$  的影响。

由图2可知,引信测得的弹目距离  $R_{mt}$  与脱靶量

$\rho$  并不相等,即使在图1所示的平行交会条件中,两者也因引信视场倾角而不相等。但整体而言,在相同条件下,弹目距离越大,脱靶量也越大;另据公式(1),引战延时  $\tau$  也会因此增大。工程应用中,引信视场倾角是确定值,弹目交会角也被控制在一定范围内,激光引信的测距能力强、测距精度高的特性有利于引战配合规律的优化设计,在脱靶量大于 3 m 以上时显得尤为重要。

### 2.2 引信启动角

引信视场倾角和战斗部破片静态飞散角的设计主要考虑适应弹目相对速度变化,以使防空导弹在弹目遭遇段及时探测目标,并在识别确认后控制战斗部起爆毁伤目标。为了确保引信探测识别的准确性和可靠性,引信启动角  $\phi_a$  一般大于视场倾角  $\phi_f$ ,也就是存在引信固有延时。

激光引信相比于无线电引信而言,视场宽度更小且几乎无旁瓣,引信启动角误差  $\phi_e$  也即引信启动区散布明显更小,在引战配合规律确定后,各种弹目交会条件下都能控制战斗部破片更高概率地命中目标易损部位。相反地,战斗部破片就会偏离目标易损部位,引信启动角误差越大,偏离越大,毁伤效果也就越差。

图3(a)示意了无线电引信探测波束形状,图3(b)

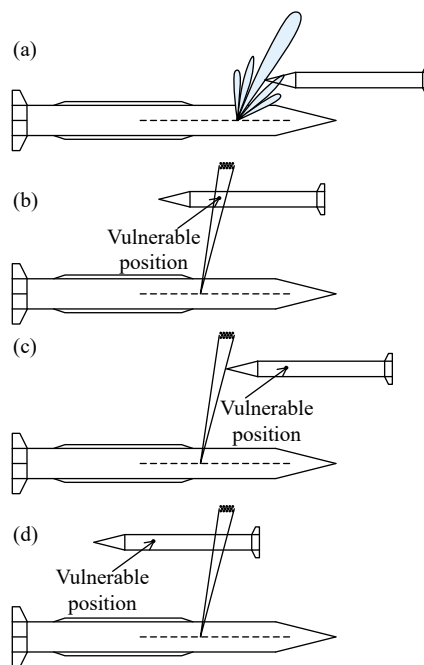


图 3 引信启动角误差对引战配合的影响

Fig.3 Influence of fuze-warhead coordination with  $\phi_e$

表示理想情况下战斗部破片应能命中目标易损部位。但由于引信前副瓣的存在,在近距离过靶时有可能早启动,导致战斗部破片命中目标前部甚至不能命中,如图 3(c) 所示;而由于目标近场雷达散射特性的起伏,在引信探测过程中有可能晚启动,导致战斗部命中目标后部,毁伤效果下降,如图 3(d) 所示。相比之下,激光引信启动角散布更小,有利于高效引战配合。

### 2.3 脱靶方位

图 2 示意了脱靶方位对引战配合的影响,而定向战斗部技术的发展加速了目标脱靶方位识别技术的研究。参考文献 [2] 描述的方案,通过转动机构在弹道末段控制可瞄准战斗部在几十 ms 内对准目标,一般需要与 GIF 技术配合使用。参考文献 [11] 描述的方案,通过周向起爆点选择,控制偏心起爆战斗部形成在目标方向上的毁伤场增强,侧向探测近炸引信在起爆前测定目标脱靶方位即可。

周视多通道激光引信综合判断各探测通道回波信号的有无即可识别目标脱靶方位,通道数越多,误差也就越小,通过采用线阵探测器多元回波信号比幅方法可将脱靶方位识别误差减小至  $10^\circ$  以内,有利于精确控制战斗部起爆方位,也为非平行交会条件下的最佳引战延时实现提供了可能。

### 2.4 目标类型

当前防空导弹武器系统需要对付的目标种类越来越多,大型目标如轰炸机、预警机、加油机等,中型目标如战斗机、高空无人机、直升机等,小型目标如各类导弹、炸弹、小无人机等。这些目标在外形尺寸、运动特性和雷达散射特性等方面存在较大差异,但又有所交叉,比如隐身战斗机 F-22 的 RCS 仅为  $0.01 \text{ m}^2$  左右,比普通导弹类目标还小。虽然防空导弹武器系统通过各类探测手段可以获得入侵目标的高度、速度、加速度、运动轨迹等参数并通过信息融合对目标进行分类,但在复杂环境下的准确度难以保证。

因为目标类型对引战配合设计的影响非常重要,所以基于多源信息融合的认识策略不断发展<sup>[12]</sup>。在周视激光探测体制中,各类空中目标和烟雾、雨、雪等干扰在形态、体积等方面存在较大差异,其形成的回波信号特征也有所不同。如反舰导弹类目标为细

长型,只能进入一两个探测通道;直升机和固定翼飞机类目标尺寸较大,同时能进入 3 个以上探测通道;烟雾、雨、雪等悬浮颗粒物为弥漫型,最多能同时进入所有探测通道。激光引信据此可以设计目标类型识别准则,不仅能够剔除部分干扰,还能在武器系统的基础上提高识别准确率<sup>[13]</sup>,继而针对不同目标类型优化设计引战配合规律,提升防空导弹的整体作战性能。

## 3 周视激光引信引战配合设计及仿真

### 3.1 引战系统总体方案

一种八通道激光引信如图 4 所示,视场倾角  $60^\circ$ ,最大作用距离 8 m,测距精度 1 m,目标脱靶方位识别精度  $45^\circ$ 。与其配合的是八方位偏心起爆定向战斗部,中心起爆时的破片初速为 2 100 m/s,距爆心 6 m 处的破片密度为 85 枚/ $\text{m}^2$ ,偏心起爆时的增益区破片初速提高 20%,密度提高 15%。引战配合规律融合了主动导引头测得的弹目相对速度、引信测得的弹目距离、脱靶方位、目标类型,典型目标为战斗机和巡航导弹,制导精度为 5 m(落入以目标中心为圆心的 5 m 圆内的概率为 95%)。

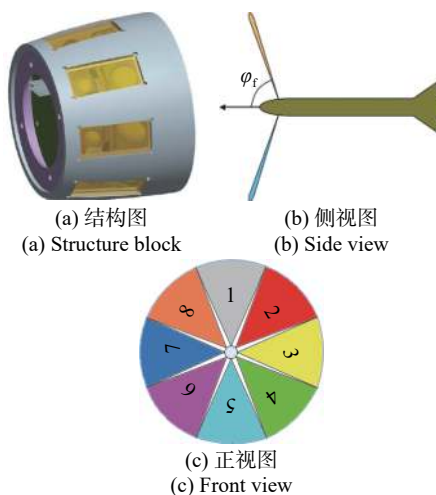


图 4 周视激光引信视场分布示意图

Fig.4 Field distribution of omni-directional laser fuze

### 3.2 引战配合仿真计算

选取 10 条典型弹道条件(如表 1 所示)采用蒙特卡洛法开展引战配合仿真计算,单发杀伤概率  $P_1$  的结果对比见图 5~图 7。

表 1 典型交会条件的仿真参数

Tab.1 Typical encounter parameters for simulation

Trajectory number	Target parameters			Hit position parameters	
	Name	$V_t/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Height/m	Range/m	Course shortcut/m
1	BGM-109	240	500	14 972	2 500
2	BGM-109	240	1 500	9 900	1 000
3	BGM-109	240	1 500	17 458	800
4	BGM-109	240	3 000	5 564	0
5	BGM-109	240	1 500	15 090	500
6	F-22	300	1 000	9 070	3 000
7	F-22	300	1 000	14 055	1 000
8	F-22	300	3 000	8 900	0
9	F-22	300	5 000	7 977	1 000
10	F-22	300	1 500	10 020	150

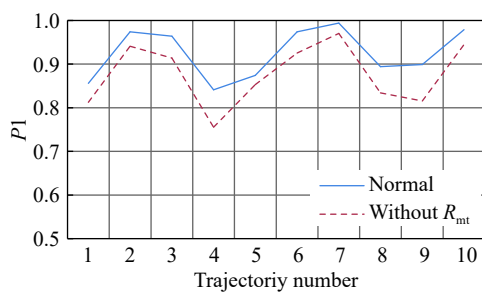


图 5 有无弹目距离信息引战配合仿真曲线

Fig.5  $P_1$  curves with  $R_{mt}$  information & without  $R_{mt}$  information

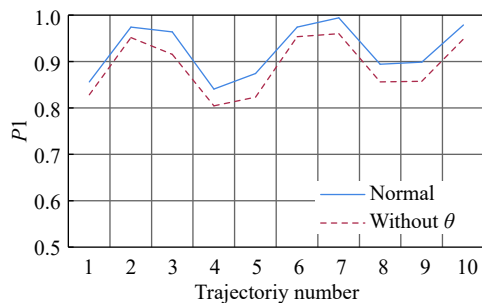


图 6 有无脱靶方位角信息引战配合仿真曲线

Fig.6  $P_1$  curves with  $\theta$  information & without  $\theta$  information

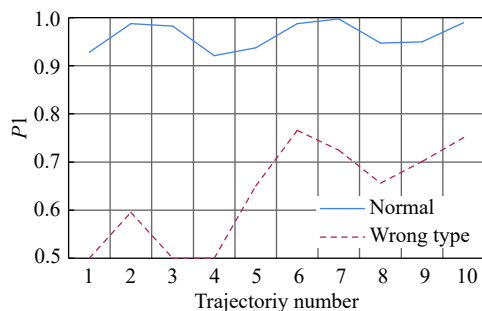


图 7 目标类型识别正误引战配合仿真曲线

Fig.7  $P_1$  curves with right target type & wrong target type

经统计,引入激光引信测得的弹目距离信息可使单发杀伤概率提高 2.4%~10.2%,引入激光引信测得的脱靶方位角可使单发杀伤概率提高 2.1%~5.8%。若系统将 BGM-109 误判为飞机类目标,将导致单发杀伤概率降至 0 左右;若系统将 F-22 误判为导弹类目标,将导致单发杀伤概率下降 50% 左右。而辅以激光引信目标识别算法,或应用成像激光引信技术则可进一步降低误判概率。

## 4 结 论

防空导弹因其对目标的无盲区探测和抗复杂电磁干扰的需求牵引了周视多通道激光引信的发展,文中在分析激光引信对引战配合设计影响的基础上设计了一种引战系统总体方案,通过典型弹道条件的引战配合仿真计算,对比了有无激光引信探测信息条件下的单发杀伤概率,实现了对目标的高效毁伤。由于常见的激光引信并无弹目相对速度测量功能,还无法实现早晚到的判别,但在应用相干探测体制或与多普勒体制无线电引信复合等技术手段后可进一步提高引战配合效率,具备更广阔的应用前景。

## 参考文献:

- [1] Zhou Beibei, Liu Jue. Application of intelligent technology in precision strike system [J]. *Air & Space Defense*, 2019, 2(3): 77-83. (in Chinese)
- 周蓓蓓, 刘珏. 智能化技术在精确打击体系中的应用[J]. *空天防御*, 2019, 2(3): 77-83.



- [2] Xu Junfeng, Jiang Chunlan, Mao Liang, et al. Coordination technology of ranging-imaging guidance integrated fusing and aimable warhead [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1794–1800. (in Chinese)  
徐俊峰, 姜春兰, 毛亮, 等. 测距成像一体化引信与可瞄准战斗部配合技术[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(6): 1794–1800.
- [3] Dong Kangsheng, Cao Linping, Han Tong, et al. Application research on laser imaging fuze in air-to-air missiles [J]. *Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition)*, 2013, 14(2): 42–46. (in Chinese)  
董康生, 曹林平, 韩统, 等. 激光成像引信在空空导弹中的应用[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2013, 14(2): 42–46.
- [4] Zhang Bin. Analysis of fuze-warhead coordination technology for effectively damaging mulit-targets [J]. *Modern Defence Technology*, 2015, 43(1): 39–45. (in Chinese)  
张斌. 有效应对多种类目标的引战配合技术途径分析[J]. *现代防御技术*, 2015, 43(1): 39–45.
- [5] Liu Ximin, Zhang Jianhua, Yang Dezhaoh, et al. Review on coherent laser fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0303001. (in Chinese)  
刘锡民, 张建华, 杨德钊, 等. 相干激光引信综述[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(3): 0303001.
- [6] Meng Xiangsheng. Applications of the polarization detection in laser fuse anti-environmental interference [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1716–1719. (in Chinese)  
孟祥盛. 偏振技术在激光引信抗烟雾干扰中的应用分析[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(7): 1716–1719.
- [7] Ren Hongguang, Yu Haishan, Huo Lijun, et al. Anti-interference of dual- wavelength laser fuze [J]. *Journal of Detection & Control*, 2015, 37(1): 1–4. (in Chinese)  
任宏光, 于海山, 霍力君, 等. 基于双色探测的激光引信抗干扰方法[J]. *探测与控制学报*, 2015, 37(1): 1–4.
- [8] Frederic Schwenger, Endre Repasi. Simulation of laser beam reflection at the sea surface[C]// Proc of SPIE, 2011, 8014: 80140R.
- [9] Zhang Zhihong, Zhou Shensheng. Fuze Warhead Coordination Efficiency and Warhead Design of Air Defense Missile[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1994: 6-16. (in Chinese)  
张志鸿, 周申生. 防空导弹引信与战斗部配合效率和战斗部设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1994: 6-16.
- [10] Shi Zhizhong. Enhance the efficiency of fuze warhead matching by Doppler frequency of fuze [J]. *Guidance & Fuze*, 2005, 26(3): 38–42. (in Chinese)  
史志中. 利用引信多普勒频率提高引战配合效率[J]. *制导与引信*, 2005, 26(3): 38–42.
- [11] Wang Shushan, Ma Xiaofei, Sui Shuyuan, et al. Experimental research on fragments dispersion of the warhead under asymmetrical multi-spots initiation [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2001, 21(2): 177–179. (in Chinese)  
王树山, 马晓飞, 隋树元, 等. 偏心多点起爆战斗部破片飞散实验研究[J]. *北京理工大学学报*, 2001, 21(2): 177–179.
- [12] Shi Zhizhong, Yuan Aihua. Application of target ID in fuze-warhead matching [J]. *Guidance & Fuze*, 2008, 29(3): 22–26. (in Chinese)  
史志中, 原爱华. 目标识别在防空导弹引战配合中的应用[J]. *制导与引信*, 2008, 29(3): 22–26.
- [13] Cai Kerong, Qiu Likuan, Gao Ruilin. Feature extraction methods and applications of signal feature of pulse laser fuze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0303004. (in Chinese)  
蔡克荣, 仇理宽, 高瑞林. 脉冲激光引信的信号特征提取方法及应用[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(3): 0303004.