

激光半主动制导弹作战效能影响分析

宋振之^{1,2}, 韩道文¹, 吴中伟¹, 王 宇¹

(1. 国防科技大学, 安徽 合肥 230000; 2. 31649 部队, 广东 汕尾 516600)

摘 要:激光半主动制导弹是现代战争中不可或缺的精确打击手段之一,为研究激光半主动制导弹的作战效能,在分析导弹工作原理的基础上,分别探讨了飞行员对目标发现概率、导引头对目标指示信号捕获概率、理想情况下导弹对目标的杀伤概率等因素对导弹作战效能的影响,建立了相应的数学模型。并通过仿真与计算,得到了有意义的结论,可为分析激光半主动制导弹的作战效能提供方法和参考。

关键词:激光半主动制导;发现概率;捕获概率;杀伤概率;作战效能

中图分类号:TJ765.3⁺32 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2022.02.017

Analysis of operational effectiveness of laser semi-active guided missile

SONG Zhen-zhi^{1,2}, HAN Dao-wen¹, WU Zhong-wei¹, WANG Yu¹

(1. National University of Defense Technology, Hefei 230000, China;

2. Unit 31649 of the Chinese People's Liberation Army, Shanwei 516600, China)

Abstract: Laser semi-active guided missile is one of the indispensable precision strike means in modern war. In order to study the operational effectiveness of laser semi-active guided missile, based on the analysis of the working principle of the missile, the influences of such factors as the probability of finding targets by the pilot, the probability of capturing the indication signal by the seeker, and the probability of killing the target by the missile under ideal conditions on the operational effectiveness of the missile are discussed respectively. The corresponding mathematical models are established. Through simulation and calculation, meaningful conclusions are obtained, which can provide a method and reference for analyzing the operational effectiveness of laser semi-active guided missile.

Keywords: laser semi-active guidance; find probability; capture probability; kill probability; operational effectiveness

1 引 言

20世纪70年代以来,随着激光精确制导技术的应用普及,现代战争的作战形式发生了深刻的变化。因精确制导导弹能够自动搜索、识别目标,并实时修正飞行弹道偏差,具有极高的打击精度,可以实施“点穴式”或“外科手术式”的新型作战方式,成为现代战争精确打击的最主要手段。激光精确制导导

弹根据制导方式的不同可分为主动寻的式和半主动式两种。主动寻的式精确制导导弹的激光目标指示器位于导弹自身上,因技术原因难以小型化,目前还未实际应用,当前广泛应用的是激光半主动制导导弹。

目前,针对激光半主动制导导弹目前主要研究集中于导弹仿真技术及制导精度的分析^[1-5],而对

基金项目:军内科研项目(军装计[2019]753号)资助。

作者简介:宋振之(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为电子对抗战术。E-mail:492507040@qq.com

收稿日期:2021-04-23;修订日期:2021-05-24

导弹的作战效能的研究较少。本文主要从作战时飞行员发现目标从而完成投弹概率、导弹发射后导引头对目标捕获概率、理想情况下导弹对目标杀伤概率等影响激光半主动制导导弹作战效能的因素进行深入分析与探讨。

2 激光半主动制导导弹工作原理和作战过程

2.1 激光半主动制导导弹工作原理

激光半主动制导导弹的激光目标指示系统与激光信号探测系统分离。激光目标指示系统位于弹外平台,通常采用调 Q 的 Nd:YAG 激光器,使用波长为 $1.064\ \mu\text{m}$ 的激光。在作战时,激光目标指示器通过向待攻击目标发射脉冲激光束,经目标漫反射后被位于导弹导引头上的激光信号探测系统接收,按照预定编码识别出自己目标指示信号,并锁定目标,控制导弹飞向目标,直至完成攻击任务。

2.2 激光半主动制导武器的作战过程

根据导弹发射平台与目标指示平台之间的关系,可将激光半主动制导导弹打击目标的应用方式分为三种:地面目标指示空中打击、本机目标指示/打击、双机协同目标指示/打击三种方式。其作战过程为:在接收打击任务后,飞行员驾驶携有激光半主动制导导弹的载机向目标区域飞行,并通过 TV 搜索设备(白天使用)或红外搜索设备(晚上使用)对预定区域的目标进行搜索识别。当发现并确认目标后,通过激光测距判断是否处于投弹区域。若处于投弹区域,则操作火控系统瞄准目标发射导弹,否则继续前行。导弹在投放后有一段无控飞行时间,此时激光指示器处于静默状态,地面激光告警装置接收不到指示信号。在接近攻击目标时,激光指示器开机,半主动制导导弹的导引头进入搜索阶段,搜索激光指示信号。一旦捕获自己的目标指示信号后,即可按照激光指示信号的指引飞向目标。

以某型激光半主动制导导弹为例,通常在距离目标 $8\sim 10\ \text{km}$ 区域,飞机完成对目标的搜索,进行多次测距和校准,在距离目标 $7\sim 8\ \text{km}$ 时发射导弹,投弹后导弹经过一段距离的依靠惯性无控飞行,在距离目标约 $4\sim 6\ \text{km}$ 时,激光指示器开始照射目标,导弹导引头通过搜索目标指示信号,并识别、锁定目标后转入末制导阶段,按激光指示的方向飞向目标。

其作战过程如图 1 所示。

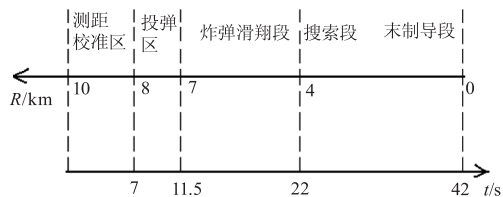


图 1 某型半主动激光制导导弹攻击过程

Fig. 1 Attack process of a semi-active laser guided missile

2.3 影响激光半主动制导导弹作战效能的主要因素

由激光半主动制导导弹工作原理和作战过程可知,要成功实现对目标毁伤需满足三个条件:

- (1) 飞行员在一定时间范围内发现目标;
- (2) 导弹发射后,导引头能够成功捕获目标指示信号;
- (3) 导弹成功杀伤目标。

对于激光半主动制导导弹,这三个条件相互独立,是否满足均存在一定概率,因此可分别用发现目标完成投弹的概率、导引头对目标指示信号捕获概率、理想情况下导弹杀伤目标的概率表示。这些都是影响激光半主动制导导弹作战效能的重要因素,下面逐一进行研究分析。

3 飞行员发现目标的概率

不管是利用 TV 搜索设备还是利用红外搜索设备搜索目标,均属于目力搜索的范围^[6]。目力搜索是人眼直接搜索或利用光电侦察设备间接搜索的侦察手段。利用光电侦察设备搜索最终也是转化为可供人眼观察的可见光图像。因此,下文主要以人眼搜索为例。

3.1 模型建立

目标通常位于一定的背景当中,区分背景与目标主要依靠背景与目标之间的辐射特性的差异。从飞机上搜索目标时,是否能够发现目标,由背景和目标的亮度对比度 C 决定,其表达式为:

$$C = \frac{|L_t - L_b|}{\max(L_t, L_b)} \quad (1)$$

式中, L_t 为目标的亮度; L_b 为背景的亮度。通常作战飞机与目标的距离较远,相比之下背景与目标的距离可忽略不计,且背景与目标表面近似为漫反射时, C 也可由背景与目标的亮度系数表示:

$$C = \frac{|r_t - r_b|}{\max(r_t, r_b)} \quad (2)$$

式中, r_t 为目标亮度系数; r_b 为背景亮度系数。由于光线在传播过程中会受到大气的衰减, 实际到达人眼中的背景与目标的对比度与光线发出时的对比度不同, 称为视在对比度 C_s 。其表达式为:

$$C_s = \frac{C}{1 + r_h \frac{e^{\alpha R_{cm}} - 1}{\max(r_t, r_b)}} \quad (3)$$

式中, r_h 为水平方向上天空亮度系数, 通常随季节、地区、太阳位置、大气能见度等变化, 取值 0.2 ~ 15.8; α 为大气衰减系数; R_{cm} 为作战飞机与目标的距离。可以看出, $0 \leq C_s \leq 1$ 。

目标是否能被人眼探测到还与人眼的视亮度对比阈值 ε 有关, 视亮度对比阈值 ε_y 为人眼恰能发现目标的最小视在对比度。大量生理、物理实验结果表明, ε_y 与人眼训练水平、精神状态、视觉功能、视角、目标形状等各种因素有关。通常可视为服从 $N(\mu, \sigma^2)$ 的正态分布。其中均值 μ 可由下式表示:

$$\mu = \begin{cases} 0.05 & \theta_y \geq 30' \\ 0.812\theta_y^{-0.819} & \theta_y < 30' \end{cases} \quad (4)$$

式中, θ_y 为视角。标准差 $\sigma = 0.39 \mu$ 。

距离 R_{cm} 处观察横向尺寸为 D_m 的面状目标时的视角:

$$\theta_y = 2 \arctan \frac{D_m}{2R_{cm}} \quad (5)$$

因此, 目力搜索时一次瞥视发现目标概率为视在对比度 C_s 大于或等于人眼视亮度对比阈值 ε 时的概率, 即为:

$$\begin{aligned} P_{ps} &= P(\varepsilon \leq C_s) \\ &= \int_{-\infty}^{C_s} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\varepsilon_y - \mu)^2}{2\sigma^2}} d\varepsilon \\ &= \Phi\left(\frac{C_s - \mu}{\sigma}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

当飞行员对预定区域进行搜索, 使侦察装备视场通过扫描覆盖预定搜索区域, 不断与目标接触, 从而探测发现目标。若侦察装备在搜索的时间 t 内与目标接触的次数为随机变量, 通常假定服从平稳的 Poisson 流, 则飞行员发现目标从而完成投弹的概率为:

$$P_f = P_l \cdot [1 - \exp(-m \cdot P_{ps} \cdot t)] \quad (7)$$

式中, P_l 为目标落入搜索区域的概率; m 为侦察装备的搜索视场与预定目标发生接触的频率; P_{ps} 为一次瞥视发现目标的概率; t 为搜索的持续时间。

3.2 仿真计算分析

设目标面积为 $7 \text{ m} \times 8 \text{ m}$, 水平方向上天空亮度系数 $r_h = 0.4$, 目标亮度系数 $r_t = 0.5$, 背景亮度系数 $r_b = 0.3$ ^[7]。分别令大气能见度为 15 km (衰减系数约为 0.107)、20 km (衰减系数约为 0.08)、25 km (衰减系数约为 0.064), 由式(3)、式(4)可以仿真出视在对比度 C_s 和人眼亮度对比阈值 μ 随侦察距离 R 的变化图像, 如图 2 所示。

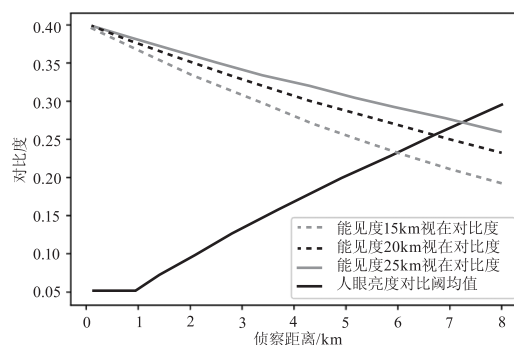


图2 视在对比度 C_s 和人眼亮度对比阈值 μ 与侦察距离 R 的关系

Fig. 2 The relationship of reconnaissance distance R between C_s and μ

由仿真结果可知, 随着侦察距离的变远, 由于视角的变小, 导致人眼亮度对比阈值逐渐增大。由于大气的衰减, 侦察距离的增大, 使得视在对比度逐渐减小。人眼亮度对比阈值的增大和视在对比度的减小都会导致侦察难度的加大。只有视在对比度大于人眼亮度对比阈值时才能发现目标, 当视在对比度小于人眼亮度对比阈值时通常就不再能发现目标。

分别令大气能见度为 15 km、20 km、25 km, 由式(6)可以仿真出侦察距离与单次瞥视发现目标概率之间的关系随距离变化的图像, 如图 3 所示。

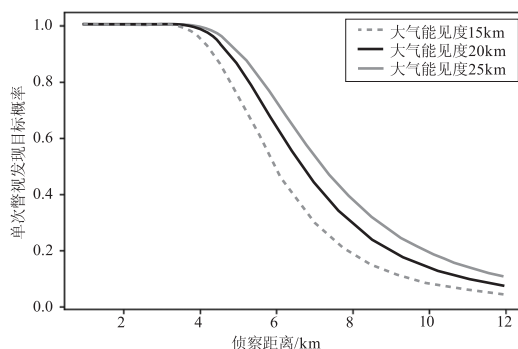


图3 侦察距离与单次瞥视发现概率关系

Fig. 3 The relationship between detection distance and detection probability in one glance

由仿真结果可知, 对于 $7 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ 的目标在 3 km 内的发现概率几乎为 100%, 随着侦察距离的增大,

发现概率逐渐降低;在相同侦察距离上,大气能见度越高,发现概率越高。

设目标落入搜索区域的概率 $P_1 = 0.6$, 侦察装备的搜索视场与预定目标发生接触的频率 $m = 1$, 分别令单次瞥视发现目标的概率为 0.2, 0.4, 0.6, 由式(7)可仿真出持续搜索时间 t 与发现目标概率的关系,如图 4 所示。

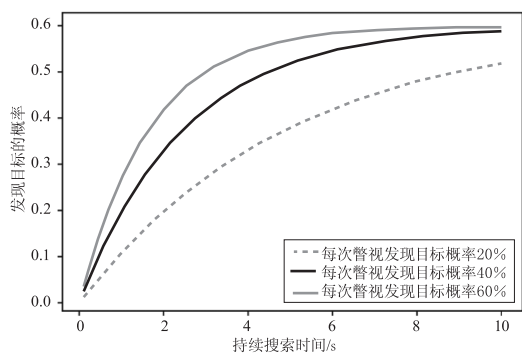


图 4 持续搜索时间与发现目标概率关系图

Fig. 4 Relationship between duration of search and probability of discovery

由仿真结果可知,持续搜索时间越长发现目标的概率越大,但在实际作战中,持续搜索时间越长,飞机被击落的概率也越大,同时因飞机不断向目标运动,若持续搜索时间过长会导致错过最佳的攻击时机,因此会存在一个最长搜索时间 $t_{\max}$ 。单次瞥视发现目标的概率越大,发现目标的概率也越大。发现目标的概率最终受限于目标落入搜索区域的概率,因此找准搜索区对发现目标的意义重大。

表 1 几种典型干扰单独作用及综合作用下的捕获概率

Tab. 1 The capture probability of several typical interferences

投弹高度/km	投弹速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	投弹区域	离轴发射角	风场	综合影响
4	200	0.98	0.99	0.99	0.91
4	300	0.95	0.96	0.99	0.87
6	200	0.98	0.99	0.99	0.96
6	200	0.97	0.97	0.99	0.91
8	300	0.98	0.99	0.99	0.97
8	200	0.97	0.98	0.99	0.93
10	300	0.99	0.99	0.99	0.99
10	200	0.98	0.99	0.99	0.95

由表可知,投弹区域相对离轴角和随机风来说对激光半主动制导弹的捕获概率影响更大,在相同投弹条件时,投弹区域偏差越大、离轴发射角越大、风速越大,与名义弹道的偏离也就越大,对目标

4 导引头对目标指示信号捕获概率

飞行员在发现目标后,要在合适的投弹区域发射导弹,导弹经过一段距离的无控飞行,进入搜索段,若不能及时捕获到目标指示信号,就会失去制导功能,也就达不到毁伤目标的目的。因此,导引头对目标的捕获概率对激光半主动制导弹作战运用来说非常重要。要成功捕获目标指示信号必须要满足两个条件:一是导弹与目标的距离位于导引头最大作用距离和最小作用距离之间;二是导引头光轴与弹目线的夹角小于导引头的视场角^[8]。

在飞行员发现目标后,投放激光半主动制导弹,在无误差和干扰时,导弹严格按名义弹道飞行,那么导引头总是会捕获到目标指示信号。但在实际投弹过程中,导引头对目标指示信号捕获受到诸多干扰因素的影响,主要有投弹区域、离轴发射角、风场等,这些干扰因素共同使得导弹实际弹道偏离名义弹道,最终导致导弹落点散布增大或因无法捕获指示信号而造成脱靶。

运用蒙特卡洛法,通过激光半主动制导武器弹道仿真软件,可对不同干扰条件下导引头对目标捕获概率进行仿真。以某型激光半主动制导弹为例,其导引头的最大作用距离 $R_{\max} = 6000 \text{ m}$, 导引头搜索视场角 $\beta = 24^\circ$, 利用弹道仿真软件模拟打靶 5000 次,可得到典型干扰因素单独作用及综合作用下导引头对目标捕获概率 P_{bh} 大小,如表 1 所示^[9]。

指示信号的捕获概率就会越低。

5 理想情况下导弹杀伤目标概率

导引头在捕获到目标指引信号后进入末制导阶段,此阶段导弹受到导弹内部和外界的随机干扰产

生的误差为制导误差。内部干扰主要包括导弹元器件及系统加工、装配误差,导弹单位时间燃料消耗量随机偏差而导致的发动机推动力的偏差,制导元器件制造工艺产生的固有噪声,制导回路各环节的惯性干扰等;外界随机干扰主要包括大气环境如气压、温度、风场、湿度等不恒定而引起的空气动力学干扰,外界复杂电磁环境干扰、目标指示信号强度和有效中心随机起伏等。这些误差对导弹制导精度的影响相互独立,且没有一个主要因素,因此根据误差理论的原理,制导误差应服从正态分布。

5.1 模型建立

以通过目标中心并与导弹相对速度矢量方面垂直的平面为靶平面。通常情况下,弹着点在靶平面上的散布为椭圆,在靶平面建立坐标系 O_{xyz} ,原点位于目标上, O_z 轴为原点沿导弹相对目标速度矢量方面, O_x 轴和 O_y 轴分别为弹着点散布椭圆的两个主轴方向。设弹着点在靶平面上的坐标为 (x, y) ,因弹着点在靶平面 O_x, O_y 方向散布相互独立,则弹着点分布的概率密度函数可表示为^[10]:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2}\right]\right\} \quad (8)$$

式中, x_0, y_0 分别表示导弹实际弹道的平均弹道相对理想弹道的偏差,即为系统误差,可通过修正而消除^[11]; σ_x, σ_y 分别为实际弹道相对平均弹道的偏差,即为随机误差。通常情况下,导弹在靶平面上散布近似相等,即 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$,同时假定系统误差已得到修正,即 $x_0 = y_0 = 0$ 则上式可以变为:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right] \quad (9)$$

设激光半主动制导导弹对目标的杀伤半径为 R ,则理想情况下其对目标的杀伤概率可表示为:

$$\begin{aligned} P_{ss} &= \int_{-R}^R \int_{-R}^R f(x, y) dx dy \\ &= \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_{-R}^R e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \cdot \int_{-R}^R e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} dy \\ &= \left[2\Phi\left(\frac{R}{\sigma}\right) - 1\right]^2 \end{aligned} \quad (10)$$

5.2 仿真计算分析

分别令导弹的制导精度为 5 m、10 m、15 m,可以仿真出导弹杀伤半径和理想情况下导弹对目标杀

伤概率的关系如图 5 所示;仿真出导弹杀伤半径与制导精度比值和理想情况下导弹对目标杀伤概率的关系如图 6 所示。

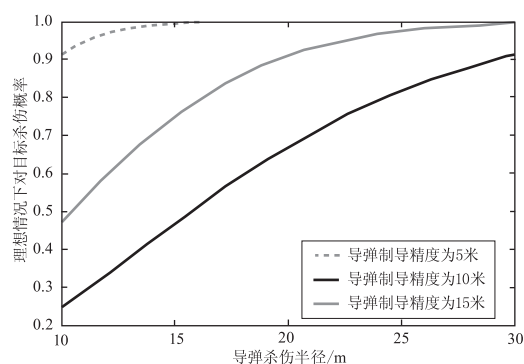


图 5 导弹杀伤半径和理想情况下导弹对目标杀伤概率的关系

Fig. 5 The relationship between missile kill radius and missile kill probability under ideal condition

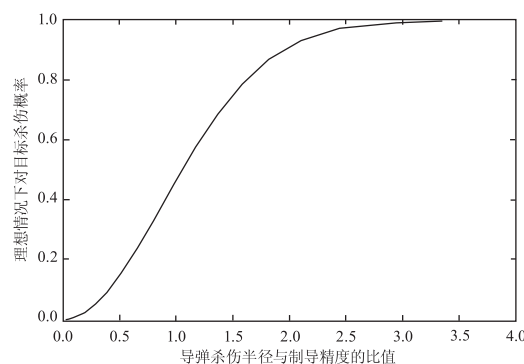


图 6 导弹制导精度与杀伤半径的比值和理想情况下导弹对目标杀伤概率关系

Fig. 6 The relationship between ratio of missile guidance accuracy to kill probability and missile kill probability to targets

由仿真结果可知,在导弹制导精度一定的情况下,导弹杀伤半径越大对目标的杀伤概率也就越大;在导弹的杀伤半径一定的情况下,制导精度越高导弹对目标理想情况下的杀伤概率越大。当杀伤半径和制导精度的比值大于 3.5 时,导弹对目标理想情况下的杀伤概率可达到 99.9 % 以上。

6 结 语

激光半主动制导导弹作战效能与飞行员对目标的发现概率 P_f 、导弹发射后导引头捕获目标的概率 P_{bh} 、理想情况下导弹杀伤目标的概率 P_{ss} 等因素有关。从仿真和分析结果可知,飞机对目标的搜索时间越长、搜索距离越近,发现目标的概率越大。在相同投弹条件时,投弹区域偏差越大、离轴发射角越大、风速越大,对目标指示信号的捕获越低。

导弹杀伤半径越大、制导精度越高对目标理想情况下的杀伤概率越大,并且当其比值大于 3.5 时,导弹对目标的杀伤概率可达到 99.9 % 以上。这三个影响导弹作战效能因素相互独立,因此,单发制导导弹对目标的毁伤概率可以概略表示为三个概率的乘积,即 $P_f \cdot P_{bh} \cdot P_{ss}$ 。

参考文献:

- [1] Xing Hui, Lei Ping, Lu Hongpeng, et al. Analysis and test of tracking angle error for semi-active laser seeker[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, (4): 78 - 83. (in Chinese)
邢晖, 雷萍, 吕鸿鹏, 等. 半主动式激光导引头跟踪角误差的分析与测试[J]. 光电工程, 2012, (4): 78 - 83.
- [2] Guo Zerong. Study on the correction capability of the trajectory correction system based on semi-active laser[J]. Optical Technique, 2008, 34 (Supplement): 321 - 325. (in Chinese)
郭泽荣. 基于激光半主动的弹道修正系统修正能力的研究[J]. 光学技术, 2008, 34 (增刊): 321 - 325.
- [3] Ye Shunliu, Zhu Shaolang, Sun Qibing, et al. Influence of atmospheric turbulence on the accuracy of semi-active laser guidance[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(6): 628 - 631. (in Chinese)
叶顺流, 朱少岚, 孙启兵, 等. 大气湍流对激光半主动制导精度的影响[J]. 激光与红外, 2010, 40(6): 628 - 631.
- [4] Wang Jiang, Lin Wei, Wang Peng, et al. Analysis of laser energy chain in the hardware-in-the-loop simulation system of semi-active laser guidance[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1230 - 1233. (in Chinese)
王江, 林蔚, 王鹏, 刘满仓, 等. 激光半主动制导武器半实物仿真系统能量链研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1230 - 1233.
- [5] Du Yawei, Dong Quanlin, Pu Xiaoqing, et al. Analysis and design of optical system of laser semi-active seeker[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(12): 1536 - 1540. (in Chinese)
杜亚雯, 董全林, 蒲小琴, 等. 激光半主动导引头光学系统设计与分析[J]. 激光与红外, 2018, 48(12): 1536 - 1540.
- [6] Li Shuanggang, Nie Jingsong, Li Hua. Effectiveness analysis on eyeballing optical reconnaissance under a typical atmospheric condition[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(5): 915 - 919. (in Chinese)
李双刚, 聂劲松, 李化. 典型大气条件下目力光学侦察效能分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 915 - 919.
- [7] Chen Yuru, Hu Yihua, Rui Jiang. Operating range prediction of high resolution visible light camera[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2006, 4(3): 40 - 42. (in Chinese)
陈玉茹, 胡以华, 芮健. 高分辨率可见光相机作用距离的估算[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(3): 40 - 42.
- [8] Deng Lei, Liu Zaozhen, Liu Yongshan. Capture probability simulation of the laser-guided bomb system[J]. Computer Simulation, 2006, 23(7): 34 - 36. (in Chinese)
邓蕾, 刘藻珍, 刘永善. 激光半主动寻的导引头目标捕获概率仿真研究[J]. 计算机仿真, 2006, 23(7): 34 - 36.
- [9] Yang Guiqing, Xia Qunli, Wang Linping. Study of target acquisition probability for laser-guided bombs with proportional navigation guidance law[J]. Arrows and Guidance Journal, 2006, 26(2): 20 - 23. (in Chinese)
杨桂清, 夏群力, 王林平. 激光比例制导导弹对目标的捕获概率分析[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(2): 20 - 23.
- [10] Gao Wei, Sun Yifang, Wei Yanling. Test and evaluation of electronic jamming effect on precision guided weapon systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018: 121. (in Chinese)
高卫, 孙奕帆, 危艳玲. 精确制导武器系统电子干扰效果试验与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 121.
- [11] Jing Xing, Hong Yanji, Zhang Mingliang, et al. A test computation method of guidance error probability density for missile[J]. Arrows and Guidance Journal, 2005, 25(3): 34 - 36. (in Chinese)
金星, 洪延姬, 张明亮, 等. 导弹制导误差概率密度试验计算方法[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(3): 34 - 36.