

文章编号:1674-8190(2017)01-023-06

# 高密度内埋空空导弹战斗部优化设计

黄晨,方斌,敖齐

(空军工程大学 航空航天工程学院,西安 710038)

**摘要:**空空导弹破片战斗部对空中运动目标的单发杀伤概率模型存在不足,精确计算其单发杀伤概率,并对导弹战斗部主要参数进行优化设计,对战斗部的总体设计和提高战斗部效能具有重要意义。在分析战斗机要害部位特性的基础上,根据战斗部对运动目标的杀伤机理,分别建立单枚破片对目标的击穿模型、引燃模型和冲击波杀伤模型;基于所建立的战斗部条件杀伤概率模型,采用多指标单目标粒子群优化算法对战斗部的装填系数、破片数量、单枚破片质量、破片静态飞散角和破片静态飞散方向角五个主要参数进行优化设计。结果表明:优化不仅改善了高密度内埋空空导弹单发杀伤效能,而且减小了战斗部的质量。研究结果可为新型战斗部设计提供参考。

**关键词:**高密度内埋空空导弹;战斗机;破片战斗部;单发杀伤概率

**中图分类号:** TJ761.1

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2017.01.004

## Optimization of Internal Air to Air Missile Warhead

Huang Chen, Fang Bin, Ao Qi

(College of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** The air-to-air missile warhead of air moving target single kill probability model is still inadequate. It is necessary to accurately calculate the single kill probability and optimize design of the main parameters of missile warhead. Based on the vital part analysis of the aircraft, the breakdown model and the ignition model of single fragment, as well as the shock wave damage model to the target are established according to the warhead against moving target. Based on the established single kill probability model, objective particle swarm optimization algorithm is used to optimize the loading coefficient, fragments numbers, fragment mass, static scattering angle, static scattering direction angle. The results indicate that the optimization results not only improves the missile kill probability and its main parameters, but also reduces the mass of the warhead. The results will supply new warhead design with a reference.

**Key words:** internal air to air missile; fighter aircraft; fragmentation warhead; single kill probability

## 0 引言

武器内埋是目前隐身战斗机普遍采用的武器挂载方式,高密度内埋空空导弹已成为未来空空导弹的发展趋势之一。虽然研究内埋空空导弹战斗部对战斗机类目标杀伤概率的方法比较多,但是由于战斗机的速度快、机动性高、弹目交汇情况复杂,

使得许多方法、模型的可信度和准确性不高。例如,郭锐等<sup>[1]</sup>、聂鹏等<sup>[2]</sup>仅考虑了破片对目标的杀伤性能,未考虑冲击波的杀伤作用,所计算的战斗部杀伤概率与实际存在较大误差;韩璐等<sup>[3]</sup>、谷海洋等<sup>[4]</sup>在理想情况下模拟破片着靶时的运动特性,未考虑破片运动的随机性,所计算的破片杀伤概率可信度不足;G. Tanapornraweekit 等<sup>[5]</sup>、V. M. Gold 等<sup>[6]</sup>只研究了战斗部爆炸产物对目标的毁伤,未考虑目标的要害部位,也没有对目标的易损性进行分析。

针对上述杀伤概率模型存在的问题,本文将运

收稿日期:2016-12-20; 修回日期:2017-01-03

通信作者:黄晨, chhuang97@163.com

动学原理与材料力学、动力学相结合,在已知目标要害部位分布和外形尺寸的条件下,分别建立战斗部破片击穿、引燃和冲击波超压对战斗机的条件杀伤概率模型;并利用所建立的模型对战斗部主要参数进行优化设计,以期为高密度内埋空空导弹的总体设计和高性能战斗部的研究提供有益参考。

## 1 目标特性及杀伤机理分析

假设目标飞机为第四代战斗机,高密度内埋空空导弹的战斗部为预置破片战斗部。战斗机要害部位示意图如图 1 所示<sup>[7]</sup>,其中,1 区为驾驶舱,2 区为机载设备舱,3 区为油箱,4 区为液压传动装置。飞机要害部位剖面图及其具体外形尺寸详见文献[8]。

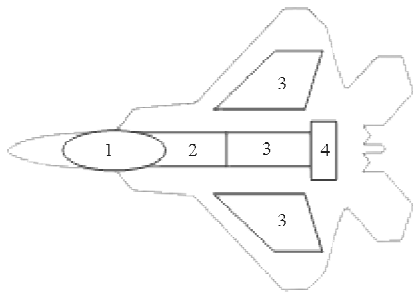


图 1 某战斗机要害部位示意图

Fig. 1 Map of fighter key parts sketch

破片对 1 区、2 区和 4 区的杀伤机理主要是击穿,破片击穿战斗机蒙皮杀伤 1 区中的驾驶员,破坏 2 区、4 区中的机载设备使战斗机失去作战能力或无法完成作战任务;对 3 区的杀伤机理主要是引燃,高温破片击穿或高速撞击飞机蒙皮引燃战斗机油箱中的燃油,从而击毁目标。除破片对目标的杀伤作用外,战斗部爆炸产生的冲击波对目标也有一定的毁伤效果<sup>[9]</sup>,战斗部爆炸瞬间会产生高温、高压、高密度的类似气体的产物,以球面形式在空气中传播,对机体架构产生向内的挤压,致使蒙皮大面积塌陷,甚至造成其内部部件受损,从而使目标失去作战能力。

## 2 战斗部对战斗机条件杀伤概率模型

通过分析战斗部对战斗机的杀伤机理可知,战斗部的杀伤作用主要为破片和冲击波对目标的毁伤。破片的杀伤作用可归纳为击穿和引燃。本文

只分析战斗部对目标要害部位的毁伤效能。

### 2.1 单枚破片杀伤模型

#### 2.1.1 击穿概率模型

假设目标材料的动态变形功为  $E$ ,即目标材料发生动态破坏时所需消耗的能量。第  $i$  个破片的动能为  $E_{im} = \frac{1}{2}m_i v_b^2$ ,则目标可被击穿的条件为

$$E_{im} \geq E \quad (1)$$

目标动态变形功由目标厚度  $b$ 、材料的强度极限  $\sigma_b$  及破片与目标的遭遇面积  $A_s$  共同决定,可表示为<sup>[10]</sup>

$$E = k_1 b \sigma_b A_s \quad (2)$$

式中: $k_1$  为比例系数,与打击速度及材料有关。

通常将目标材料等效成硬铝,用  $\sigma_{A1}$  表示硬铝的强度极限,则等效硬铝厚度为

$$b_{A1} \approx b \sigma_b / \sigma_{A1} \quad (3)$$

目标的动态变形功为

$$E = k_1 b_{A1} \sigma_{A1} A_s \quad (4)$$

当破片速度小于等于 2 500 m/s 时, $k_1 = 0.92 + 1.023v^2 \times 10^{-6}$ 。

破片在飞行过程中不断翻滚,因此  $A_s$  不是一个固定值,杀伤概率计算中通常取其期望值  $A$ ,则式(1)可写为

$$\frac{E_{im}}{A} \geq \frac{k_1 b_{A1} \sigma_{A1} A_s}{A} \quad (5)$$

令  $E_b$  为体积比动能,则

$$E_b = \frac{E_{im}}{b_{A1} A} \quad (6)$$

故破片着靶时的比动能为

$$E_b = \frac{m_i v_b^2}{2b_{A1} A} \quad (7)$$

式中: $v_b$  为破片到达目标时的剩余速度; $m_i$  为破片质量。

根据速度衰减公式求得  $v_b$  为<sup>[11]</sup>

$$v_b = v_0 e^{-K_a R} \quad (8)$$

式中: $K_a$  为速度衰减系数; $R$  为距爆炸点的距离,即破片飞行的距离; $v_0$  为破片初速度,可根据格尼公式<sup>[12]</sup>求得。

$$v_0 = 1.236 \sqrt{\frac{Q_e}{\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{2}}} \quad (9)$$

式中: $Q_e$  为炸药爆热,本文假设炸药为 TNT。

由式(5)可得,等效硬铝的可击穿必要条件为

$$E_b \geq k_1 \sigma_{A1} \frac{A_s}{A} \quad (10)$$

据此,单枚破片击穿飞机硬铝蒙皮的概率为<sup>[10]</sup>

$$P_{Me} = \begin{cases} 0 & (E_b \leq 4.41 \times 10^8) \\ 1 + 2.65e^{-3.47 \times 10^{-9} E_b} - 2.96e^{-1.43 \times 10^{-9} E_b} & (E_b > 4.41 \times 10^8) \end{cases} \quad (11)$$

### 2.1.2 引燃概率模型

破片侵入油箱时可能会引燃油箱。影响破片对目标飞机油箱引燃概率的主要因素包括破片比冲量、油箱结构和目标高度等。单枚破片侵入飞机蒙皮时的比冲量可表示为

$$i_p = \frac{m_f v_b}{A_s} \quad (12)$$

则单枚破片引燃概率的经验公式为<sup>[10]</sup>

$$P_{com} = \begin{cases} 0 & (i_p < 1.57 \times 10^4) \\ 1 + 1.083e^{-4.27 \times 10^{-5} i_p} - 1.96e^{-1.49 \times 10^{-5} i_p} & (i_p \geq 1.57 \times 10^4) \end{cases} \quad (13)$$

破片群飞散角  $\Omega$  分别为<sup>[12]</sup>

$$\Omega = \frac{0.618\sqrt{Q_e}}{V_e \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{2}}} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (14)$$

式中:  $V_e$  为炸药的爆速;  $\theta_1, \theta_2$  为破片静态飞散方向角的边界;  $\alpha$  为装填系数。

结合文献<sup>[13]</sup>计算可得命中目标 1 区、2 区、3 区和 4 区的破片数量分别为  $n_1, n_2, n_3, n_4$ 。假设破片着靶时速度相等,则破片对目标的条件杀伤概率可综合为

$$P_a = 1 - (1 - P_{Me})^{n_1} (1 - P_{com})^{n_3} \quad (15)$$

### 2.2 冲击波杀伤概率模型

战斗部在高空爆炸时,冲击波超压值为<sup>[11]</sup>

$$\Delta p = 7 \frac{m_{ex}}{R^3} \frac{p}{p_0} + 2.7 \frac{m_{ex}^{2/3}}{R^2} \left(\frac{p}{p_0}\right)^{2/3} + 0.84 \frac{m_{ex}^{1/3}}{R} \left(\frac{p}{p_0}\right)^{1/3} \quad (16)$$

式中:  $m_{ex}$  为 TNT 装药的质量;  $p_0$  为海平面大气压;  $p$  为爆炸点的大气压。(空战一般发生在 10 km 的高空,因此本文假设爆炸点距离海平面的高度为 10 km。)

冲击波杀伤概率为

$$P_{bc} = \begin{cases} 1 & (\Delta p > \Delta p_{max}) \\ \frac{\Delta p - \Delta p_{min}}{\Delta p_{max} - \Delta p_{min}} & (\Delta p_{min} \leq \Delta p \leq \Delta p_{max}) \\ 0 & (\Delta p < \Delta p_{min}) \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $\Delta p_{max}$  和  $\Delta p_{min}$  分别为冲击波杀伤空中飞机类目标的超压值范围的上、下界。

通过对空中目标的毁伤效果分析<sup>[11]</sup>可知,要使飞机达到  $K$  级毁伤效果,一般取  $\Delta p_{max} = 0.20$  MPa,  $\Delta p_{min} = 0.05$  MPa。

采用蒙特卡洛方法进行抽样,可得第  $j$  次抽样的导弹条件杀伤概率  $P_j$  为

$$P_j = 1 - (1 - P_{a,j})(1 - P_{bc,j}) \quad (18)$$

其中,  $P_{a,j}$  和  $P_{bc,j}$  分别根据式(15)和式(17)计算。

综上可得,战斗部对战斗机的杀伤概率为

$$P = \frac{\sum_{j=1}^N P_j}{N} \quad (19)$$

式中:  $N$  为抽样总数。

当导弹直接命中目标时,  $P = 1$ 。

## 3 战斗部主要参数优化

张兰等<sup>[14]</sup>采用改进的多约束单目标粒子群优化算法(如图 2 所示),对内埋空空导弹的杀伤概率  $P$  和战斗部质量  $M$  两个目标进行优化。利用加权线性组合法建立统一的目标函数(式(20)),三者的关系如图 3 所示。

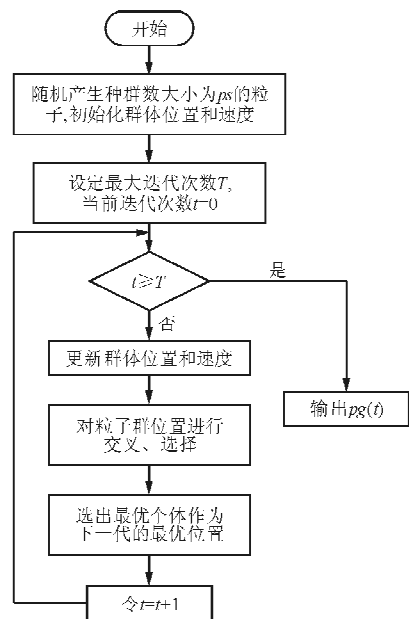


图 2 改进的粒子群优化算法流程图  
Fig. 2 Flow chart of improved particle swarm optimization(PSO) algorithm

$$F = w_1(1 - P) + w_2M \quad (20)$$

式中： $w_1$ 、 $w_2$  为权重系数。

对于空空导弹，较高的杀伤概率是追求的首要目标，其次是较小的质量，因此本文取  $w_1 = 0.6$ ， $w_2 = 0.4$ 。

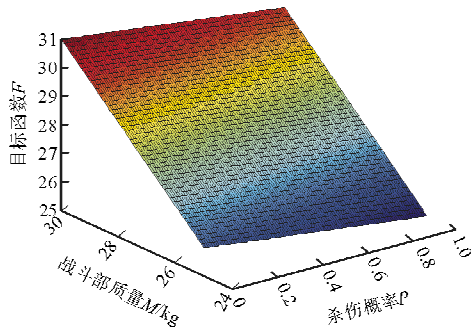


图 3 目标函数关系图

Fig. 3 Objective function relation graph

选取战斗部的装填系数  $\alpha$ 、破片数量  $n$ 、单枚破片质量  $m_i$ 、破片静态飞散角  $\varphi$  和破片静态飞散方向角  $\Omega$  为设计变量。各变量的约束范围如表 1 所示。

表 1 设计变量约束范围

Tabel 1 Design variable constraint range

变 量	下 限	上 限
$\alpha$	0.10	0.85
$n$	400	3 000
$m_i/g$	2.0	12.0
$\varphi/(\circ)$	10	60
$\Omega/(\circ)$	40	120

假设导弹与目标在同一水平面，导弹速度方向与弹体轴线重合，导弹速度  $v_M = 550$  m/s，目标飞机速度  $v_T = 350$  m/s。某高密度内埋空空导弹脱靶量  $r \sim N(6 \text{ m}, 1 \text{ m})$ ，脱靶方位角  $\eta \sim N(70^\circ, 30^\circ)$ ，战斗部质量为 22.00 kg，单发杀伤概率为 0.86，其他参数如表 2 所示。

表 2 某高密度内埋空空导弹初始值

Tabel 2 Initial value of internal missile

参 数	取 值	参 数	取 值
$\alpha$	0.82	$\varphi/(\circ)$	40
$n$	198	$\Omega/(\circ)$	85
$m_i/g$	8.0		

利用单目标粒子群优化算法对该高密度内埋空空导弹战斗部进行优化后的参数如表 3 所示。

表 3 某高密度内埋空空导弹最优值

Tabel 3 Optimal value of internal missile

参 数	取 值	参 数	取 值
$\alpha$	0.87	$\varphi/(\circ)$	28
$n$	134	$\Omega/(\circ)$	71
$m_i/g$	11.4		

从表 2~表 3 可以看出：装填系数  $\alpha$  和单枚破片质量  $m_i$  增加，破片数量  $n$ 、破片静态飞散角  $\varphi$  和破片静态飞散方向角  $\Omega$  均明显减小。

优化结果分别如图 4~图 5 所示，可以看出：优化后的战斗部质量为 20.45 kg，单发杀伤概率为 0.949 5，即战斗部质量减小了 7%，单发杀伤概率提高了 10.41%，优化效果显而易见。

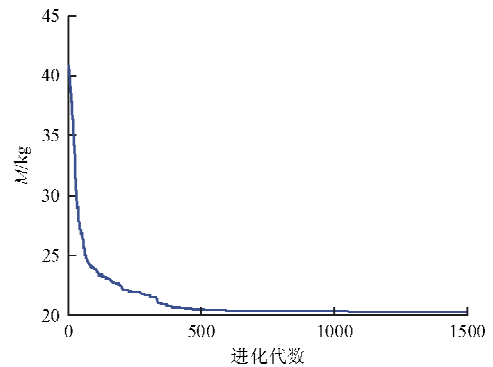


图 4 战斗部质量进化曲线

Fig. 4 Warhead mass evolution curve

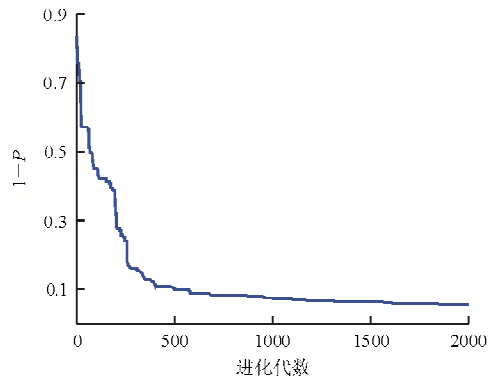


图 5 1-P 进化曲线

Fig. 5 Kill probability evolution curve

优化前后战斗部在飞机上方某点处脱靶量为 2 m 时的破片飞散特性分别如图 6~图 7 所示。

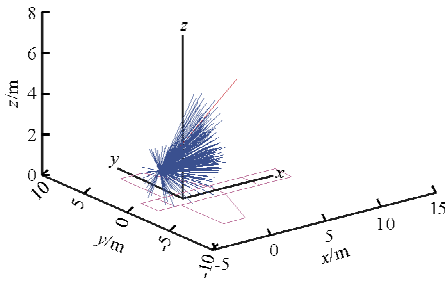


图 6 优化前的破片飞散特性

Fig. 6 Warhead dispersion characteristic before optimization

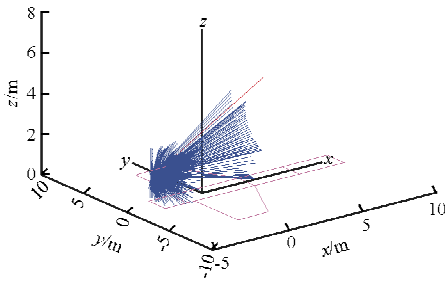


图 7 优化后的破片飞散特性

Fig. 7 Optimized scattering characteristic of warhead

从图 6~图 7 可以看出:飞散角和飞散方向角的减小提高了破片的利用率,从而弥补了破片数量减少造成的破片散布密集度的降低,但装填系数和破片质量的增加提高了破片着靶时的比动能,进而提高了破片的击穿能力,表明定向破片战斗部对空中飞机类目标的杀伤效果比普通破片战斗部的杀伤效果好。

## 4 结 论

(1) 本文在建立高密度内埋空导弹条件杀伤概率模型的基础上,利用粒子群优化算法对高密度内埋空导弹战斗部的主要参数进行优化设计,优化后的战斗部质量减小了 7%,单发条件杀伤概率提高了 10.41%。

(2) 通过减小破片静态飞散角、静态飞散方向角和破片数量,提高战斗部的装填系数、单枚破片质量,不仅可以减小战斗部的总质量,还提高了导弹的杀伤概率。

(3) 对于空中飞机类目标而言,大质量破片、较小飞散角的定向战斗部的杀伤效果比普通破片

战斗部的杀伤效果更好。

本文只研究高密度内埋空导弹对空中飞机类目标的杀伤概率,并未考虑导弹对超音速巡航导弹和无人飞行器等目标的杀伤效果,关于这部分内容还有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] 郭锐,刘荣忠,张俊,等. 预置破片战斗部对空中目标的动态毁伤威力仿真[J]. 弹舰与制导学报, 2012, 32(4): 95-98.  
Guo Rui, Liu Rongzhong, Zhang Jun, et al. The study on dynamic damage power of antiaircraft preformed fragment warhead[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(4): 95-98. (in Chinese)
- [2] 聂鹏,曹兵. 破片式战斗部对空中飞机的毁伤建模与仿真[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(6): 80-83.  
Nie Peng, Cao Bing. Damage calculation and simulation research on fragment to air plane[J]. Command Control & Simulation, 2012, 34(6): 80-83. (in Chinese)
- [3] 韩璐,韩庆. 飞机在模拟混合破片威力场打击下的易损性计算[J]. 航空工程进展, 2014, 5(4): 455-462.  
Han Lu, Han Qing. Calculation on the vulnerability of aircraft from a simulation mixed fragment warhead[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(4): 455-462. (in Chinese)
- [4] 谷海洋,涂震彪,张庆义,等. 预制破片弹攻击飞行器目标的实时可视化研究[J]. 战术导弹技术, 2012(1): 33-37.  
Gu Haiyang, Tu Zhenbiao, Zhang Qingyi, et al. Research on real-time visual simulation of missile fragments damaging aircraft target[J]. Tactical Missile Technology, 2012(1): 33-37. (in Chinese)
- [5] Tanapornraueekit G, Kulsirikasem W. Effects of material properties of warhead casing on natural fragmentation performance of high explosive(HHE) warhead[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011, 59: 1275-1280.
- [6] Gold V M, Baker E L, Poulos W J, et al. PAFRAG modeling of explosive fragmentation munitions performance[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33(1-12): 294-304.
- [7] 张晓今,张为华,江振宇. 导弹系统性能分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2013: 36-37.  
Zhang Xiaojin, Zhang Weihua, Jiang Zhenyu. Performance analysis of missile system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 36-37. (in Chinese)
- [8] 吉姆·温切斯特. 由内到外看战机 II [M]. 北京:航空工业出版社, 2015: 418-420.  
Jim Winchester. Jet fighters inside out II [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2015: 418-420. (in Chinese)
- [9] 韩晓明,高峰. 导弹战斗部原理及应用[M]. 西安:西北工

- 业大学出版社, 2012: 92-96.
- Han Xiaoming, Gao Feng. Principle and application of missile warhead[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2012: 92-96. (in Chinese)
- [10] 方洋旺, 伍友利, 方斌. 机载导弹武器系统作战效能评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 139.
- Fang Yangwang, Wu Youli, Fang Bin. Analysis of operational effectiveness of missile weapon system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 139. (in Chinese)
- [11] 过崇伟, 郑时镜, 郭振华. 有翼导弹系统分析与设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002: 56-57.
- Guo Chongwei, Zheng Shijing, Guo Zhenhua. Analysis and design of winged missile system[M]. Beijing: Beihang University Press, 2002: 56-57. (in Chinese)
- [12] 张龙杰, 谢晓方. 高超音速导弹爆炸破片飞散特性建模分析[J]. 弹道学报, 2013, 25(1): 47-52.
- Zhang Longjie, Xie Xiaofang. Modeling and analysis of dispersion characteristic of hypersonic missile fragments[J]. Journal of Ballistics, 2013, 25(1): 47-52. (in Chinese)
- [13] 李廷杰. 导弹武器系统的效能及其分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 188-210.
- Li Tingjie. Effectiveness and analysis of missile weapon system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 188-210. (in Chinese)
- [14] 张兰, 聂玉峰. 一种融合差分进化的量子粒子群优化算法[J]. 计算机仿真, 2016, 33(2): 313-316.
- Zhang Lan, Nie Yufeng. Quantum behaved particle swarm optimization algorithm merging differential evolution[J]. Computer Simulation, 2016, 33(2): 313-316. (in Chinese)

#### 作者简介:

黄 晨(1993—),男,硕士研究生。主要研究方向:高密度内埋空空导弹总体设计与论证。

方 斌(1976—),男,副教授,硕导。主要研究方向:导弹总体设计、导弹系统分析论证与效能评估。

敖 齐(1992—),男,硕士研究生。主要研究方向:导弹协同作战。

(编辑:马文静)