

引用格式:王光源,毛世超,李建华.基于马尔可夫链的舰艇反导毁伤决策研究[J].电光与控制,2019,26(1):87-91. WANG G Y, MAO S C, LI J H. Warship anti-missile decision-making based on Markov chain[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(1):87-91.

基于马尔可夫链的舰艇反导毁伤决策研究

王光源¹, 毛世超^{1,2}, 李建华¹

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军92852部队, 浙江 宁波 315033)

摘要:通过分析舰载防空导弹武器系统拦截反舰导弹的典型作战流程和舰空导弹战斗部的毁伤机理,对战斗部预置破片的运动特性进行量化分析,建立破片的面密度模型,以 $P_{k/h}$ 函数作为描述毁伤准则建立舰空导弹一次拦截反舰导弹的毁伤概率模型,运用马尔可夫过程理论建立多次拦截反舰导弹的毁伤概率模型,并通过实例仿真分析,验证了模型的可行性、可靠性,提出了优化舰空导弹拦截反舰导弹策略的意见,为指挥员制定作战方案提供了有效的帮助和支撑。

关键词: 舰载反导系统; 马尔可夫链; 舰空导弹; 反舰导弹

中图分类号: E83 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.01.019

Warship Anti-missile Decision-Making Based on Markov Chain

WANG Guang-yuan¹, MAO Shi-chao^{1,2}, LI Jian-hua¹

(1. Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. No. 92852 Unit of PLA, Ningbo 315033, China)

Abstract: By analyzing the typical operational processes of ship-borne anti-missile system in intercepting anti-ship missile and the damaging mechanism of the warhead of the ship-to-air missile, a quantitative analysis is made to the motion characteristics of the warhead preposed fragments, and the surface density model of the fragment is established. $P_{k/h}$ function is used as the damage describing criterion to establish the damage probability model of the ship-to-air missile for one interception of anti-ship missile; and Markov chain is used for establishing the damage probability model of multiple interceptions. The feasibility and reliability of the model have been verified by the simulation analysis. Some suggestions are given for optimizing the intercepting strategy, which can provide a reference for the commanders to make operational plans.

Key words: ship-borne anti-missile system; Markov chain; ship-to-air missile; anti-ship missile

0 引言

随着信息化水平不断提高、高新技术不断融入和发射平台的多样化,反舰导弹的远程精确打击能力和多层次、多批次、多方向同时对水面舰艇发动攻击的能力不断提高,对水面舰艇的生存安全构成严重威胁。舰载反导武器系统作为水面舰艇保障自身安全的最后手段,如何科学有效地提升该系统的反导作战能力是当前水面舰艇指挥员亟待解决的问题之一^[1-3]。

提高反导武器系统的作战能力主要有两种方式:一是通过提高舰载反导武器系统的战技性能来提高系统的反导作战能力;二是通过优化武器系统对反舰导

弹的拦截策略来提高拦截效率。本文基于舰载反导武器系统拦截反舰导弹的工作流程和舰空导弹战斗部的毁伤特性,运用马尔可夫链建立舰空导弹对反舰导弹的毁伤概率模型,并通过仿真分析,计算出在不进行转火射击的前提下成功拦截反舰导弹所需的导弹数量,通过一次性发射定量的导弹后迅速转火射击次要威胁目标,从而有效弥补武器系统火力通道有限的不足,提高反导武器系统应对饱和式攻击的作战能力。

1 舰空导弹拦截反舰导弹的典型作战流程

舰载反导武器系统是水面舰艇应对反舰导弹的主要武器系统,其主要作战装备为具有垂直发射、多层次、多火力通道等优点的舰空导弹。当前,舰空导弹末端采用的制导方式主要为主动雷达、半主动雷达制导,本文以半主动雷达末制导导弹为研究对象,其典型的

收稿日期:2018-01-30 修回日期:2018-11-06

作者简介:王光源(1964—),男,山东文登人,博士,教授,研究方向为作战指挥、军事训练模拟与仿真和武器系统作战使用。

作战过程如图1所示。

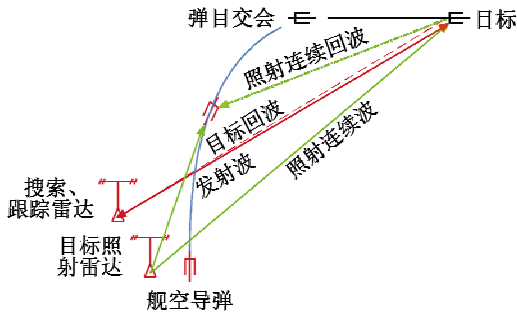


图1 舰空导弹作战示意图

Fig.1 Schematic diagram of ship-to-air missile combat

主要作战流程为水面舰艇的舰载目标搜索跟踪雷达以一定的频率搜索当前空域,发现目标后对目标进行精确跟踪,同时将精确跟踪到的目标距离、方位、仰角等信息发送给武器控制系统。武器控制系统对目标信息进行处理后,将相关参数传送给目标照射雷达,目标照射雷达根据相关指令对来袭目标进行连续照射。在目标进入防空导弹发射区后,发射控制系统控制导弹发射装置发射选定导弹,导弹飞离发射装置一段时间后,弹上导引头开机接收从目标返回的连续波,形成半主动雷达寻的制导。在飞行过程中,导弹按修正比例导引规律飞向弹目交会点,当导弹与目标的距离减小到一定值后,导弹引信开机工作,满足起爆条件后,立即引爆战斗部,击毁目标^[4]。

舰空导弹的战斗部通常会预置杀伤破片,当战斗部在反舰导弹附近爆炸时,破片以一定的速度向外飞散,最终会有一部分破片击中目标,击中的位置取决于爆炸式战斗部和目标的相对位置、姿态等信息。破片击中目标后,通过对目标的侵彻产生破坏作用^[5]。

2 舰空导弹毁伤破片面密度建模

在实际的舰艇反导作战中,来袭反舰导弹的制导特性、攻击方式及其采取的机动方式却是不可预测的,本文假设反舰导弹在舰空导弹战斗部爆炸前后段时间内的机动为匀速直线运动;而破片运动过程不考虑重力引起的弹道弯曲,因为破片达到目标时飞行时间很短,可以近似地认为破片在绝对运动时的飞行弹道是一条直线^[6-8]。

2.1 参数说明

假设舰空导弹的攻角 $\alpha_m = 0$,其战斗部相关参数设置: N_w 为战斗部破片总数; q_w 为单个破片的质量; K_H 为破片弹道系数; v_0 为战斗部静爆时破片初始速度; φ_n 为战斗部静爆时破片在纵轴平面内的平均飞散角; η_n 为静爆时破片流在赤道面上的角度; $\Delta\varphi_n$ 为静爆时破片在纵轴平面内的飞散角; $Q_n(D)$ 为战斗部静爆时破

片场密度; $\rho_n(\varphi_n, \eta_n)$ 为战斗部静爆时破片流密度。

2.2 破片流绝对运动特性分析

以反舰导弹战斗部爆炸点为坐标系原点 o_m , $o_m x_m$ 轴以导弹纵轴向前为正, $o_m y_m$ 轴在对称平面内向上为正,按右手定则建立导弹几何坐标系,对战斗部在弹道终点爆炸时的速度关系进行分析^[9],如图2所示。

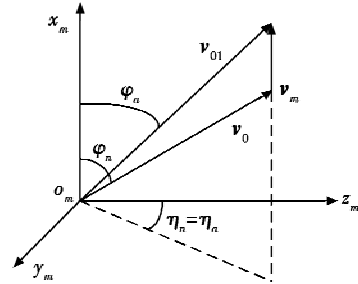


图2 破片流的绝对初始速度

Fig.2 Absolute initial velocity of fragment flow

在坐标系中,战斗部破片流的绝对初始速度为 v_0 ,战斗部终点的绝对速度为 v_m ,角 φ_n 为向量 v_{01} 与 x_m 轴正向在纵轴平面内的夹角,角 η_n 为向量 v_0 与 z_m 轴正向在赤道面内的夹角,由于舰空导弹的攻角 $\alpha_m = 0$,因此向量 v_m 与 $o_m x_m$ 平行,即 $\eta_n = \eta_n$ 。从而得到破片的绝对速度分量为

$$\begin{cases} v_{xm} = v_0 \cos \varphi_n + v_m \\ v_{ym} = v_0 \sin \varphi_n \sin \eta_n \\ v_{zm} = v_0 \sin \varphi_n \cos \eta_n \end{cases} \quad (1)$$

则破片流的绝对初始速度和飞散角分别为

$$\begin{cases} v_{01} = \sqrt{v_0^2 + v_m^2 + 2v_0 v_m \cos \varphi_n} \\ \varphi_n = \arctan\left(\frac{\sin \varphi_n}{\cos \varphi_n + v_m/v_0}\right) \end{cases} \quad (2)$$

由于破片在大气中飞行时受到空气阻力的影响,绝对速度会不断降低,其表达式为

$$v_a = v_{01} e^{-K_H D_y} \quad (3)$$

式中, D_y 为破片的绝对飞行距离。

此时,破片的飞行时间为

$$t = \frac{e^{K_H D_y} - 1}{K_H v_{01}} \quad (4)$$

破片的平均速度为

$$v_{\varphi} = \frac{D_y}{t} = v_{01} \frac{K_H D_y}{e^{K_H D_y} - 1} \quad (5)$$

令 $\varepsilon = \frac{K_H D_y}{e^{K_H D_y} - 1}$, 当大气阻力很小时, $\varepsilon \approx 1$, 则

$$\begin{cases} v_{\varphi} = v_{01} \\ t = D_y/v_{01} \end{cases} \quad (6)$$

2.3 破片流相对运动特性分析

考虑到反舰导弹与舰空导弹之间存在相对运动,在

导弹几何坐标系中引入反舰导弹速度矢量 v_t ，则舰空导弹战斗部破片流相对于反舰导弹的运动如图 3 所示。

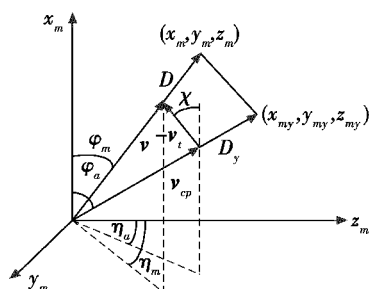


图 3 相对运动示意图

Fig. 3 Schematic diagram of relative motion

破片流平均相对速度为

$$v = v_{cp} - v_t \quad (7)$$

根据式(1)，向量 v 的速度分量为

$$\begin{cases} v'_{xm} = v_0 \cos \varphi_n + v_m + v_t \cos \chi \\ v'_{ym} = v_0 \sin \varphi_n \sin \eta_m \\ v'_{zm} = v_0 \sin \varphi_n \cos \eta_m - v_t \sin \chi \end{cases} \quad (8)$$

式中， χ 为弹目交会角。

v 的值和其在导弹几何坐标系中的位置分别为

$$\begin{cases} v = \sqrt{v'^2_{xm} + v'^2_{ym} + v'^2_{zm}} \\ \varphi_m = \arccos(v'_{xm}/v) \\ \eta_m = \arctan(v'_{ym}/v'_{zm}) \end{cases} \quad (9)$$

式中： φ_m 为破片流的相对飞散角； η_m 为破片流在赤道面的角度。

2.4 目标面上的破片分布密度

定义飞散在单位立体空间角 $\Delta\varphi\Delta\eta$ 内的破片相对数量为破片流密度^[10]，即

$$\rho(\varphi, \eta) = \frac{1}{N_w} \lim_{\Delta\varphi \rightarrow 0, \Delta\eta \rightarrow 0} \frac{\Delta N(\varphi, \eta)}{\Delta\varphi\Delta\eta} \quad (10)$$

式中， $\Delta N(\varphi, \eta)$ 为单位立体空间内破片流包含的破片数量。

定义落在炸点距离为 D 且垂直于破片飞行方向的单位面积上的破片数为破片场密度，即

$$Q(D, \varphi, \eta) = \rho(\varphi, \eta) \frac{N_w}{D^2 \sin \varphi} \quad (11)$$

在战斗部静爆时，破片流密度为

$$\rho_n(\varphi_n, \eta_n) = \frac{\sin \varphi_n}{2\pi(\cos \varphi_{n1} - \cos \varphi_{n2})} \quad (12)$$

式中： φ_{n1} 为静爆时破片流的上边界； φ_{n2} 为静爆时破片流的下边界。

破片场密度为

$$Q_n(D) = \frac{N_w}{2\pi D^2 (\cos \varphi_{n1} - \cos \varphi_{n2})} \quad (13)$$

则在相对运动时，破片流密度为

$$\rho_m(\varphi_m, \eta_m) = \rho_n(\varphi_n, \eta_n) \cdot \frac{v^2 \sin \varphi_m}{v_0^2 \sin \varphi_n [\sin \varphi_n \sin \varphi_m \cos(\eta_n - \eta_m) + \cos \varphi_n \cos \varphi_m]} \quad (14)$$

设 $Q^{(t)}(D^{(t)}, \varphi_m, \eta_m)$ 为目标舱段表面上破片的分布密度，其中， $D^{(t)}$ 为战斗部炸点与落入破片的面的中心点的距离，当破片以 α 角落在目标面上时，有

$$Q^{(t)}(D^{(t)}, \varphi_m, \eta_m) = Q(D^{(t)}, \varphi_m, \eta_m) \sin \alpha = \rho_m(\varphi_m, \eta_m) \frac{N_w \sin \alpha}{(D^{(t)})^2 \sin \varphi_m} \quad (15)$$

3 舰空导弹对反舰导弹的毁伤概率建模

3.1 舰空导弹一次拦截反舰导弹的毁伤概率

反舰导弹主要由制导舱、战斗部舱、燃料舱、控制舱和发动机舱等部件组成。不同舱段的制造材料、厚度不同，舰空导弹爆炸形成的破片流对反舰导弹不同舱段的毁伤效果也不同。本文以函数 $P_{k/hi}$ 作为描述导弹第 i 舱段毁伤的准则，该准则以毁伤舱段所需的有效破片（即能穿透导弹舱段的壳体，并具有一定毁伤后效的破片）的面密度表示舱段的易损特性^[10]。命中舱段的有效破片的面密度越大，对舱段毁伤的概率就越高。则 $P_{k/hi}$ 可表示为

$$P_{k/hi} = 1 - e^{(-n_e/n_{si})} \quad (16)$$

式中： n_e 为舰空导弹战斗部爆炸形成的破片流命中反舰导弹的有效破片面密度； n_{si} 为毁伤反舰导弹第 i 舱段所需的破片的面密度。舰空导弹一次拦截反舰导弹的毁伤概率 $P_{k/h}$ 可表示为

$$P_{k/h} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{k/hi} \quad (17)$$

3.2 马尔可夫分析

破片击中反舰导弹后，可能使导弹处于某一种状态，如反舰导弹的无冗余关键部件被毁伤而使导弹被毁伤，部件及其冗余部件同时被毁伤而使导弹毁伤，有冗余的关键部件被毁伤而使导弹处于非毁伤状态，或者无关部件被毁伤而使导弹处于非毁伤状态。本文以舰空导弹每拦截反舰导弹一次为一个时间步，显然反舰导弹的状态在不同的时刻具有不同的随机特性，且该过程是具有无后效性的状态变化和时间变化均为离散的随机过程，即马尔可夫链。在整个拦截过程中，反舰导弹状态的随机特性不随时间变化，其状态转移概率与时间无关，这种状态和时间均为离散的平稳过程称之为齐次马尔可夫链^[11-12]。

记状态空间 $I = \{1, 2, \dots, q, q+1, \dots, r\}$ 其中， $1, 2, \dots, q$ 为毁伤状态， $q+1, \dots, r$ 为非毁伤状态。毁伤状态也称为吸收状态，因为不可能从毁伤状态转化为非

毁伤状态。

研究舰空导弹拦截反舰导弹 1, 2, ..., n 次的毁伤概率, 只需研究反舰导弹被拦截 1, 2, ..., n 次后其存在于某种状态的概率。

根据导弹可能存在的状态及状态间的转换关系构造状态转移矩阵为

$$[T] = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1j} & \cdots & P_{1r} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2j} & \cdots & P_{2r} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ P_{i1} & P_{i2} & \cdots & P_{ij} & \cdots & P_{ir} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ P_{r1} & P_{r2} & \cdots & P_{rj} & \cdots & P_{rr} \end{bmatrix}, \text{矩阵中每个}$$

元素表示由列定位的状态向行定位的状态转移的概率, 如 P_{ij} 表示由 j 状态向 i 状态转移的概率。

3.3 舰空导弹拦截反舰导弹 n 次的毁伤概率

反舰导弹被拦截 n 次后, 其所处状态的概率用向量形式表示为

$$\{S\}^{(n)} = \begin{Bmatrix} P_1^{(n)} \\ P_2^{(n)} \\ \vdots \\ P_r^{(n)} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

式中, $P_i^{(n)}$ 表示反舰导弹被拦截 n 次后, 目标处于 $i (i \in I)$ 状态的概率。反舰导弹被拦截 n + 1 次后, 其存在于各状态的概率为

$$\{S\}^{(n+1)} = [T] \{S\}^{(n)} = \cdots = [T]^{n+1} \{S\}^{(0)} \quad (19)$$

因为反舰导弹处于 1, 2, ..., q 状态时为毁伤状态, 所以其被拦截 n 次后, 舰空导弹对反舰导弹的毁伤概率 $P_{KH}^{(n)}$ 为

$$P_{KH}^{(n)} = \sum_{i=1}^q P_i^{(n)} \quad (20)$$

4 算例应用

假设破片总数为 3000 枚, 破片质量为 3 g, 破片初速度为 1300 m/s, 反舰导弹在爆炸点处的速度为 800 m/s, 平均飞散角为 1.396 rad, 反舰导弹的速度为 500 m/s, 弹目交会角为 0.157 rad, 破片流投影在赤道面的角度为 0.785 rad, 破片流的入射角为 1.047 rad, 飞散区在纵轴内的飞散角为 0.628 rad。反舰导弹主要舱室的几何尺寸和易损性^[13]如表 1 所示。

因为舰空导弹对反舰导弹的毁伤效果与舰空导弹在反舰导弹表面形成的破片面密度有关, 而破片面密度受弹目距离和交会姿态影响, 所以分别以破片飞行距离和弹目交会角为控制变量, 运用 Matlab 进行仿真, 并分析其对毁伤概率的影响。仿真结果如图 4 所示。

从图 4a 中可以看出, 战斗部刚起爆时, 破片流面

密度非常大, 随着破片飞散距离的增大, 破片流的面密度迅速衰减, 当 $D = 11.3$ m 时, 破片的面密度为 18 枚/ m^2 , 此时破片不足以毁伤反舰导弹, 随着飞散距离的继续增加, 形成的破片流对反舰导弹几乎不会造成任何毁伤。因此, 选取 10 m 作为舰空导弹战斗部爆炸后破片的飞行距离作为破片飞散距离进行下一步仿真, 此时破片流面密度为 24 枚/ m^2 。

表 1 反舰导弹的主要几何数据和易损特性

Table 1 The main geometric data and vulnerability of anti-ship missile

舱室	长度/mm	直径/mm	等效铝靶厚度/mm	杀伤破片面密度/(枚· m^{-2})
制导舱	1500	600	5	27
战斗部舱	1900	600	25	58
燃油舱	1400	600	10	20
控制舱	700	600	20	60
发动机舱	900	600	15	19

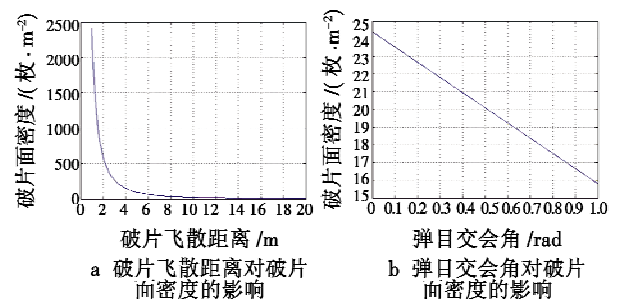


图 4 仿真结果

Fig. 4 Simulation result

由图 4b 可知, 破片面密度与弹目交会角成正比关系, 随着弹目交会角的增大, 破片面密度单调递减, 即随着弹目交会角的增大, 舰空导弹的毁伤效能不断降低。根据修正比例导引规律, 在舰空导弹引爆战斗部时, 弹目交会角一般较小, 因此选取 $\pi/20$ 作为弹目交会角进行仿真分析。

根据以上参数设定, 可计算出航空导弹的战斗部爆炸后产生的破片在反舰导弹表面的面密度为 $Q^{(i)}(10, 0.28, 0.37) = 24$ 枚/ m^2 。通过一次拦截反舰导弹的毁伤概率模型求解得 $P_{KH} = 0.72$ 。

在整个拦截过程中, 反舰导弹只存在毁伤和非毁伤两种状态, 故其状态转移矩阵为 $[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0.72 \\ 0 & 0.28 \end{bmatrix}$ 。

进一步对舰空导弹拦截反舰导弹 10 次的毁伤概率模型进行仿真, 结果如图 5 和表 2 所示。

由图 5 和表 2 可知, 随着舰空导弹拦截次数的增加, 反舰导弹的毁伤概率不断增加, 达到 4 次后, 毁伤概率在 99% 以上, 当拦截次数超过 8 次后, 反舰导弹的毁伤概率为 1。在实际作战使用中, 当毁伤概率超过 99% 时, 视为舰空导弹成功拦截了反舰导弹。

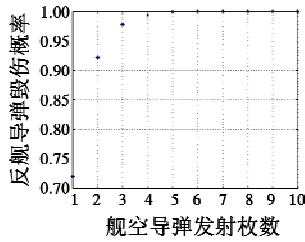


图 5 反舰导弹的毁伤概率图

Fig. 5 The damage probability of a anti-ship missile

表 2 n 次拦截反舰导弹的毁伤概率

Table 2 Damage probability of anti-ship missile in n times of intercepting

拦截次数 n	1	2	3	4	5
毁伤概率 $P_k^{(n)}$	0.7200	0.9216	0.9780	0.9939	0.9983
拦截次数 n	6	7	8	9	10
毁伤概率 $P_k^{(n)}$	0.9995	0.9999	1	1	1

5 结束语

针对舰载反导武器系统运用策略的优化问题,本文在分析舰空导弹拦截反舰导弹的典型作战流程和舰空导弹战斗部毁伤特性的基础上,在导弹几何坐标系中建立反舰导弹战斗部破片面密度模型,运用马尔可夫随机过程理论对反舰导弹的拦截过程进行马尔可夫分析,建立舰空导弹拦截反舰导弹的毁伤概率模型。通过算例应用分析,在已知来袭反舰导弹型号特性的基础上,计算出一次性发射 4 枚导弹可完成拦截任务。

面对反舰导弹的饱和攻击战法和当前舰载反导武器系统火力通道数量的限制,在水面舰艇防空作战中,提出“发射后不管”战法,即一次性连续发射击毁反舰导弹所需的 n 枚舰空导弹,而后迅速转火射击,拦截其他威胁目标,此方法可有效提高舰空导弹的拦截效率,进一步保障舰艇安全。

参考文献

- [1] 陈榕,沈培志,张海峰,等. 多型反舰导弹协同攻击岛礁区日标攻击方向选择研究[J]. 电光与控制,2016,23(5):22-25.
- [2] 李明,赵夏丽. 舰空导弹拦截反舰导弹仿真模型研究[J]. 计算机仿真,2006,23(5):14-17.
- [3] 张旭东,彭杰,刘卫东,等. 基于模糊综合评判法的舰艇反导能力评估[J]. 舰船电子工程,2011,31(8):33-35.
- [4] 孙建中. 舰载武器[M]. 北京:航空工业出版社,2010.
- [5] 王磊,姜颖资,李向阳. 爆破战斗部对超音速导弹毁伤效应研究[J]. 海军航空工程学院学报,2017,32(4):307-312.
- [6] 李翔宇,卢芳云. 三种类型战斗部破片飞散的数值模拟[J]. 火炸药学报,2007,30(1):44-48.
- [7] 王义磊,吴越. 一种离散与预制组合破片战斗部的数值模拟[J]. 兵器装备工程学报,2016,37(12):38-41.
- [8] 赵晨皓,韩朝超,黄树彩. 引战配合对反导导弹作战效能的影响[J]. 电光与控制,2010,17(12):5-7.
- [9] 何华锋,韩聪聪,杨宗浩. 弹道主动段射向变换建模与仿真[J]. 电光与控制,2017,24(12):1-4.
- [10] 李向东,杜忠华. 目标易损性[M]. 北京:北京理工大学出版社,2013.
- [11] 王桐,杨萍,欧阳海波. 基于马尔可夫链的多波次导弹作战研究[J]. 战术导弹技术,2011(4):20-22.
- [12] 汪民乐,汪德武,刘刚. 战术导弹对单个目标射击效能的马氏链决策分析模型[J]. 系统工程理论与实践,2007(7):166-170.
- [13] 李向东,唐晓斌,董平. 破片式反导导弹引战配合仿真与效率计算[J]. 上海航天,2006(3):11-15.

(上接第 80 页)

- [6] 邢素霞,吴静珠,陈天华. 图像融合质量评价方法研究[J]. 微电子学与计算机,2010,27(6):157-159.
- [7] 王跃华,陶忠祥. 红外与可见光图像融合质量评价方法综述[J]. 红外,2012,33(6):7-11.

- [8] GONZALEZ R C. 数字图像处理(MATLAB 版)[M]. 阮秋琦,译. 北京:电子工业出版社,2005.
- [9] 张瑶,刘生辉. 基于 MATLAB 的图像融合技术[J]. 中国科技信息,2016(1):55-56.
- [10] 韩潇,彭力. 基于改进拉普拉斯金字塔的图像融合方法[J]. 自动化与仪器仪表,2014(5):191-194.