

中图分类号: 391.9

文献标识码: A

基于探索性分析的防空反导干扰仿真模型研究

樊 东, 葛 伟, 任义广

(海军装备研究院 北京 100161)

摘 要: 基于探索性分析的方法, 针对水面舰艇防空反导干扰应用问题, 构建了支持探索性分析的质心式干扰仿真模型。综合分析风速、风向和导弹来袭方向等八个因素对质心式干扰效果的影响, 通过仿真实验结果数据的分析, 得出具有鲁棒性的水面舰艇规避策略和箔条弹投放策略。

关键词: 探索性分析; 防空反导干扰; 仿真模型; 鲁棒性策略

Jamming Model on Anti-missile Based on Exploratory Analysis

FAN Dong, GE Wei, REN Yiguang

(Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China)

Abstract: To solve the problem of surface ship's anti-missile jamming, based on exploratory analysis, this paper constructed the centroid jamming model and analysed 8 factors' impact on the effect of centroid jamming, including the wind's speed, the wind's direction and the anti-ship missile's direction etc. Then the robust tactics of surface ship's evading and centroid jamming missile's projecting were discussed after analysing the result of the simulation experiment.

Key words: exploratory analysis; anti-missile jamming; simulation model; robust tactic

1 引 言

反舰导弹是现代海战中水面舰艇的主要威胁, 其制导雷达系统广泛采用了抗干扰技术, 但是由于其末制导雷达原理上的限制和自身的识别判断能力有限, 只要投放得当, 无源干扰仍然是对付反舰导弹的有效手段^[1]。在多种无源干扰方式中, 质心式干扰是舰艇对付敌来袭导弹的一种重要雷达无源干扰方式。它是在当敌制导、跟踪雷达开机并捕捉到目标之后, 发射快速离开目标并迅速散开的箔条弹, 使形成的箔条云和目标同时处于雷达的分辨单元之内, 这时制导、跟踪雷达将使导弹跟踪到目标与箔条云的反射能力中心, 即质心, 从而偏离目标^[2]。

许多专家学者从不同方面展开了针对质心式干扰方式的研究。如文献 [3] 在全系统的、信号级的、同构的仿真研究基本框架下, 建立了分布式的、随舷角变化的、按概率密度和自相关函数起伏的目标舰的 RCS (Radar Cross section, 雷达散射截面) 模型。文献 [4] 提出了采用“二次质心干扰”提高编队质心干扰效果的方法。文献 [1] 和 [2] 建立了舰艇对反舰导弹质心干扰的效果模型; 文献 [5] 中构建了两种不同情况下的质心式干扰模型, 并探讨了完成质心式干扰所需的最小极限距离; 文献 [6] 分析了箔条弹发射舷角和舰艇机动规避方向对于干扰效果的影响。虽然这些文献从模型、干扰策略和最小极限距离等方面对质心式干扰进行了研究, 但考虑影响质心式干扰效果的各种主要因素的综合性还不够, 无

法给出质心式干扰效果较优的鲁棒性决策方案。

探索性分析方法是美国兰德公司于 20 世纪 90 年代在联合一体化应急模型和战略评估系统的开发中逐步总结出来的一种定量系统分析方法,主要用于对各种不确定性要素所产生的结果进行整体研究。本文基于探索性分析的思想,构建了支持探索性分析的防空反导质心式干扰仿真模型(简称“防空反导干扰仿真模型”),研究了风速、风向、导弹来袭方向、反舰导弹末制导雷达开机距离(以下简称反舰导弹开机距离)、箔条弹投放方向、箔条弹投放距离、水面舰艇规避方向和规避速率等八个因素对质心式干扰效果的影响,通过 6 836 400 个实验方案的仿真计算,研究得出了具有鲁棒性的水面舰艇规避策略和箔条弹投放策略。

2 防空反导干扰仿真模型

2.1 基本假设

假设 1: 由于反舰导弹速度远大于水面舰艇的速度,且从反舰导弹末制导雷达开机到命中目标的时间较短,因此假设在质心式干扰过程中水面舰艇作匀速直线运动。

假设 2: 假设反舰导弹末制导雷达开机时箔条云已经形成,且能够维持到质心式干扰结束。

假设 3: 由于整个质心式干扰过程持续时间较短,因此假设箔条云自形成开始至质心式干扰结束为止,其 RCS 不发生变化。

假设 4: 假设水面舰艇或箔条云运动出反舰导弹的跟踪波门之前,反舰导弹的运动方向始终指向水面舰艇和箔条云质心。

2.2 质心式干扰数学模型

以水面舰艇为坐标原点,以风向为 X 轴,以垂直于 X 轴的方向为 Y 轴建立平面直角坐标系,如图 1 所示。

设反舰导弹的开机位置为 M_0 ,开机时与水面舰艇的距离为 R ,来袭方向 $\angle M_0 O X$ 为 φ ,半波门宽度为 $\theta_{0.5}$,箔条弹的投放方向为 γ_0 ,投射距离为 L_0 ,箔条云初始位置为 C_0 ,水面舰艇规避方向为 β ,反舰导弹和箔条云的质心位置为 G_0 。经过一

段时间 t 后,水面舰艇以速率 v_s 运动到 S ,箔条云以风速 v_w 运动到 C ,舰导弹和箔条云的质心运动到 G ,反舰导弹以速率 v_m 沿质心方向运动到 M 。

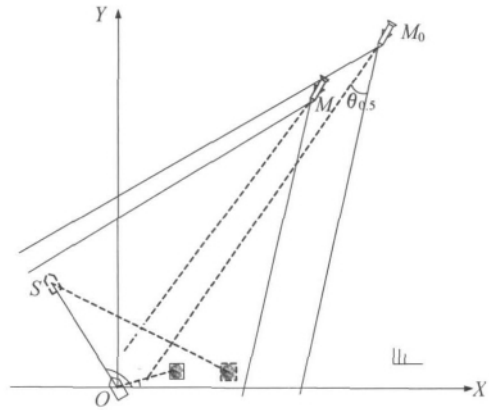


图 1 质心式干扰过程图

Fig 1 Centroid jamming process

水面舰艇的初始位置 (S_{x0}, S_{y0}) 为: $S_{x0} = 0, S_{y0} = 0$; 箔条云初始位置 (C_{x0}, C_{y0}) 为 $C_{x0} = L_0 \cdot \cos(\gamma_0), C_{y0} = L_0 \sin(\gamma_0)$; 质心位置 (G_{x0}, G_{y0}) 为: $G_{x0} = K_c L_0 \cos(\gamma_0), G_{y0} = K_c L_0 \sin(\gamma_0)$, 其中 $K_c = \sigma_c / (\sigma_s + \sigma_c)$, σ_c 为箔条云的 RCS, σ_s 为水面舰艇的 RCS; 反舰导弹初始位置 (M_{x0}, M_{y0}) 为: $M_{x0} = R \cdot \cos(\varphi), M_{y0} = R \cdot \sin(\varphi)$ 。

经过时间 t , 水面舰艇的位置 $(S_x(t), S_y(t))$ 为:

$$\begin{cases} S_x(t) = v_s \cdot t \cdot \cos(\beta) \\ S_y(t) = v_s \cdot t \cdot \sin(\beta) \end{cases} \quad (1)$$

箔条云的位置 $(C_x(t), C_y(t))$ 为:

$$\begin{cases} C_x(t) = L_0 \cos(\gamma_0) + v_w \cdot t \\ C_y(t) = L_0 \sin(\gamma_0) \end{cases} \quad (2)$$

质心的位置 $(G_x(t), G_y(t))$ 为:

$$\begin{cases} G_x(t) = K_c (L_0 \cos(\gamma_0) + v_w \cdot t) + K_s (v_s \cdot t \cdot \cos(\beta)) \\ G_y(t) = K_c (L_0 \sin(\gamma_0)) + K_s (v_s \cdot t \cdot \sin(\beta)) \end{cases} \quad (3)$$

其中: $K_s = 1 - K_c$ 。

反舰导弹的速度 $(\dot{M}_x(t), \dot{M}_y(t))$ 满足:

$$\begin{cases} \frac{\dot{M}_y(t)}{\dot{M}_x(t)} = \frac{G_y(t) - M_y(t)}{G_x(t) - M_x(t)} \\ (\dot{M}_x(t))^2 + (\dot{M}_y(t))^2 = v_m^2 \end{cases} \quad (4)$$

2.3 成功干扰的判断条件

能否成功实施质心式干扰,取决于以下条件:

条件 1: 成功实施质心式干扰的首要条件是:

$$\left| \arctan \frac{S_y(0) - M_y(0)}{S_x(0) - M_x(0)} - \arctan \frac{C_y(0) - M_y(0)}{C_x(0) - M_x(0)} \right| < \theta_{0.5} \quad (5)$$

条件 2: 当水面舰艇位于反舰导弹末制导雷达跟踪波门之外时,反舰导弹将沿箔条云的方向

$$\left| \arctan \frac{S_y(t') - M_y(t')}{S_x(t') - M_x(t')} - \arctan \frac{G_y(t') - M_y(t')}{G_x(t') - M_x(t')} \right| \geq \theta_{0.5} \quad (6)$$

条件 3: 当箔条云位于反舰导弹末制导雷达跟踪波门之外时,反舰导弹将沿水面舰艇的方向

$$\left| \arctan \frac{C_y(t'') - M_y(t'')}{C_x(t'') - M_x(t'')} - \arctan \frac{G_y(t'') - M_y(t'')}{G_x(t'') - M_x(t'')} \right| \geq \theta_{0.5} \quad (7)$$

反舰导弹末制导雷达开机时,水面舰艇和箔条云必须同时位于反舰导弹的跟踪波门内,即

运动,质心式干扰成功,即存在某时刻 t' , 满足式 (6)。

运动,质心式干扰失败,即存在某时刻 t'' , 满足式 (7)。

3 实验方案设计

在实验方案设计中,考虑了影响质心式干扰效果的八个主要因素: 风速、风向、导弹来袭方向、导弹开机距离、箔条弹的投放方向、箔条弹的投放距离、水面舰艇规避方向和水面舰艇的规避速率,由于在建模时选取风向为 X 轴正方向,因此在实验方案设计时只需对其他七个因素进行设计,其详细设计信息见表 1。

表 1 实验因子的详细设计信息表

Tab.1 Experimental factors detailed design information table

实验因素	水平值	单位	水平值数量
风速	1 2 3 4 5	级	5
导弹来袭方向	20 40 60 $\dots$ 360	($^{\circ}$)	18
导弹末制导雷达开机距离	11 12 13 $\dots$ 20	km	10
箔条弹投放方向	20 40 60 $\dots$ 360	($^{\circ}$)	18
箔条弹投放距离	300 400 500 $\dots$ 700	m	5
水面舰艇规避方向	20 40 60 $\dots$ 360	($^{\circ}$)	18
水面舰艇规避速率	10 15 20 25 30	节	5

对表 1 中八个实验设计因子的各个水平进行全面组合,形成 $5 \times 18 \times 10 \times 18 \times 5 \times 18 \times 5 = 7\,290\,000$ 个实验设计方案。在这些实验设计方案中,去除不满足式 (5) 的无效方案 453 600 个,得到有效实验设计方案 6 836 400 个。

4 实验方案分析

在第 3 节设计的实验方案基础上,设反舰导弹的速率为 300 m/s,箔条云和水面舰艇的 RCS 之比为 2:1,即 $K_c = 2/3$,反舰导弹末制导雷达半波门宽度 $\theta_{0.5} = 5^{\circ}$,利用 VC++ 工具对以上 6 836 400 个实验设计方案进行仿真计算,得到每个实验设计方案下的质心式干扰效果。

设第 i ($i = 1, 2, \dots, 7$) 个实验设计因素取第 j ($j = 1, 2, \dots, n_i$, n_i 为第 i 个实验因子的水平数) 个水平值时的有效实验设计方案中,有 s_{ij} 个方案的质心式干扰结果为成功, f_{ij} 个方案的质心式干扰结果为失败,则定义第 i 个实验因子的敏感程度为:

$$SA_i = \frac{\max\{r_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, n_i\} - \min\{r_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, n_i\}}{\max\{r_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, n_i\}} \quad (8)$$

其中: $r_{ij} = s_{ij} / (s_{ij} + f_{ij})$ 为第 i 个实验因子取第 j 个水平值时,质心式干扰成功的方案数量与有效方案数量之比。该指标越大,说明第 i 个设计因子

取不同水平值时质心式干扰成功的方案数有较大的变化,反之亦然。因此,该指标能够反映实验因子的敏感程度。

根据式(8) 计算得到以上 7 个实验因子的敏感程度, 如表 2 所示。

表 2 实验因子的敏感程度表

Tab. 2 Experimental factor sensitivity list

序号	实验因子	敏感程度
1	导弹开机距离	0.076
2	导弹来袭方向	0.075
3	水面舰艇规避速率	0.052
4	水面舰艇规避方向	0.042
5	箔条弹投放方向	0.032
6	箔条弹投放距离	0.023
7	风速	0.013

从表 2 中可以看出, 八个实验因子的敏感程度从大至小分别为: 反舰导弹开机距离、反舰导弹来袭方向、水面舰艇规避速率、水面舰艇规避方向、箔条弹投放方向、箔条弹投放距离、风速。

在这七个实验因子中, 水面舰艇决策者能够完全控制的决策变量包括水面舰艇规避方向、箔条弹的投放方向和箔条弹的投放距离, 能够部分控制的决策变量为水面舰艇规避速率(虽然可以加速航行, 但在短时间内速率不可能有大的提高), 由于风速的敏感程度较小, 因此, 质心式干扰决策问题就可转化为在导弹不同开机距离和来袭方向条件下, 如何选择水面舰艇规避方向、箔条弹的投放方向和投放距离的问题。

首先分析水面舰艇的规避方向选择问题。图 2 展示了导弹开机距离分别为 11 km 和 20 km, 且导弹来袭方向变化的条件下, 水面舰艇采用不同规避方向时质心式干扰成功的方案数。由于导弹开机距离为 12 ~ 19 km 时的图形形状相似, 囿于篇幅的限制, 这里不一一列出。

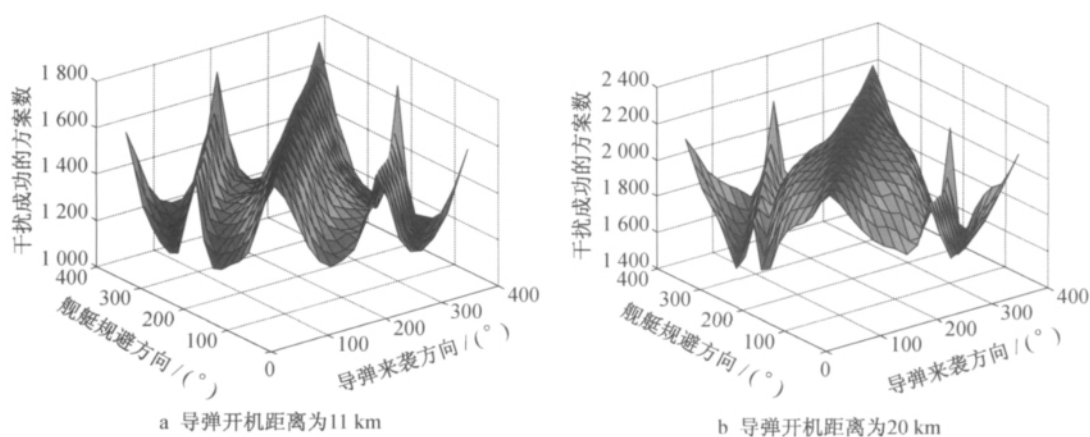


图 2 水面舰艇采用不同规避方向时质心式干扰成功的方案数图

Fig. 2 Surface ships with different direction of the centroid jamming avoidance of successful programme diagram

从图 2 中可以看出水面舰艇的规避方向等于反舰导弹的来袭方向时质心式干扰成功的方案数最多, 因此, 可以找出质心式干扰过程中水面舰艇规避方向的鲁棒性策略为: 水面舰艇的舰艏指向反舰导弹。应当指出的是, 当水面舰艇采取舰艏指向反舰导弹的规避方向进行机动时, 水面舰艇的 RCS 会明显变小, 于是导致水面舰艇与质心的距离的拉大从而增加质心式干扰成功的概率, 因此, 这也从另一个方面说明了水面舰艇规避方向的有效性。

其次分析箔条弹的投放方向选择问题。图 3

列出了导弹开机距离分别为 11 ~ 20 km(每间隔 1 km), 且导弹来袭方向变化的条件下, 箔条弹采用不同的投放方向时质心式干扰成功的 10 个方案数图。

从图 3 中可以看出, 随着反舰导弹开机距离的增加, 质心式干扰成功的方案数逐渐增多, 但都存在着四个奇异点, 也就是说当反舰导弹来袭方向为 180°或 360°且箔条弹的投放方向为 180°或 360°时质心式干扰方案数为零。根据图 3 可以找出适应导弹各种开机距离条件下的箔条弹投放方向, 如表 3 所示。

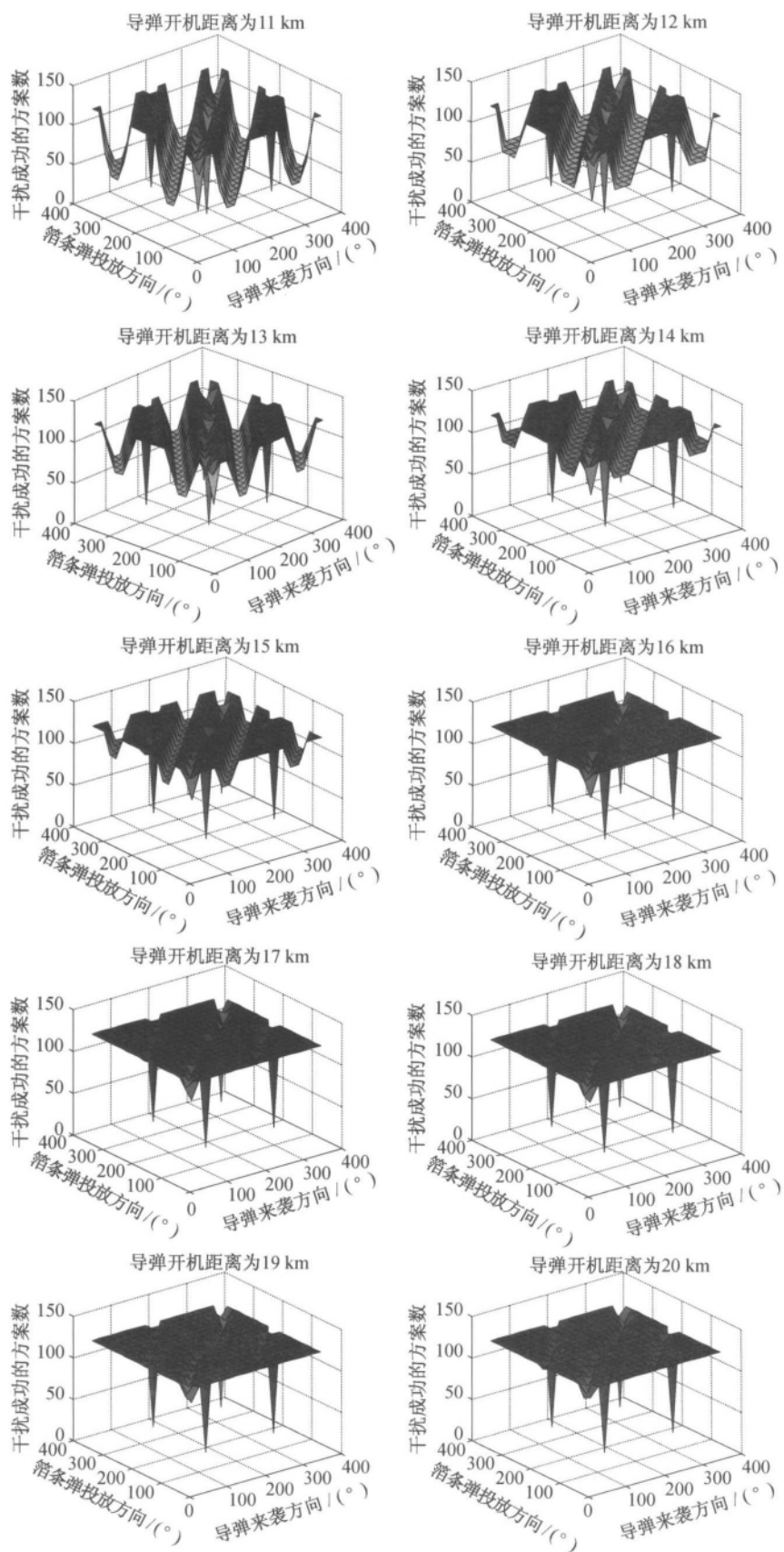


图3 箔条弹采用不同投放方向时质心式干扰成功的方案数图

Fig.3 Chaff projectiles with different on the direction of the centroid jamming successful program diagram

表 3 导弹不同来袭方向条件下箔条弹的投放方向表

Tab. 3 Missiles under the condition of different attacking direction of chaff flare running direction

导弹来袭方向	20	40	60	80	100
箔条弹投放方向/(°)	200 ~ 240	220 ~ 260	240 ~ 280	260 ~ 300	280 ~ 320
导弹来袭方向/(°)	120	140	160	180	200
箔条弹投放方向/(°)	300 ~ 340	320 ~ 360	340 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60
导弹来袭方向/(°)	220	240	260	280	300
箔条弹投放方向/(°)	200 ~ 240	220 ~ 260	240 ~ 280	260 ~ 300	280 ~ 320
导弹来袭方向/(°)	320	340	360		
箔条弹投放方向/(°)	300 ~ 340	320 ~ 360	340 ~ 20		

从表 3 中可以得出箔条弹的鲁棒性投放方向为: 顺着反舰导弹的运动方向并沿逆时针方向偏 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 。对于箔条弹的投放距离和投放时机 根据水面舰艇规避方向和箔条弹的投放方向选择策略 箔条弹的投放方向越远越能拉开水面舰艇与质心的距离 但要保证导弹开机时水面舰艇和箔条云同时处在反舰导弹的波门之内。同时 从图 3 中可以看出 当反舰导弹开机距离为 16 ~ 20 km 时质心式干扰成功的方案数较多 也就是说箔条弹投放越早越好。综上所述 可以得到如下结论:

(1) 舰艇应采取舰艏指向导弹的方向进行加速规避。

(2) 箔条弹的投放方向为: 顺着反舰导弹的运动方向并沿逆时针方向偏 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 。

(3) 箔条弹的投放距离为: 在保证反舰导弹开机时水面舰艇和箔条云同时处在波门之内的条件下 沿结论(2)的投放方向尽可能远地投放。

(4) 箔条弹的投放时机为: 在保证反舰导弹开机时水面舰艇和箔条云同时处在波门之内 且保证足够滞空时间的条件下 箔条弹应尽早投放。

5 结 语

本文基于探索性分析的思想 构建了支持探索性分析的质心式干扰模型 研究了风速、风向、导弹来袭方向、导弹开机距离、箔条弹投射角度、箔条弹投射距离、水面舰艇规避方向、水面舰艇规避速度等八个因素对质心式干扰效果的影响 并基于仿真实验结果数据给出了具有鲁棒性的水面舰艇规避策略和箔条弹投放策略 得出结论

具有一定参考意义。本文是探索性分析方法在质心式干扰决策中的实例化运用 未来研究中可以将本文的模型进行细化 例如可进一步考虑水面舰艇的长和宽 且水面舰艇的 RCS 会随来袭方向的不同发生变化 等等 得出的结论将更有意义。

参考文献:

- [1] 王光辉 滕克难 王宏伟. 舰艇对反舰导弹质心干扰效果模型研究[J]. 现代防御技术 2007 35(1): 32-36.
WANG Guanghui, TENG Kenan, WANG Hongwei. Warship centroided jamming against anti ship missile model [J]. Modern Defence Technology 2007 35(1): 32-36.
- [2] 邢昌凤 李敏勇 吴玲. 舰载武器系统效能分析[M]. 国防工业出版社 2008: 371-372.
XING Changfeng, LI Minyong, WU Ling. The shipborne weapon system effectiveness analysis [M]. The Defense Industry Press 2008: 371-372.
- [3] 邱杰. 质心式箔条干扰中舰船目标模型研究[J]. 海军航空工程学院学报 2009 22(5): 509-512.
QIU Jie. Centroid chaff ship target model [J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute 2009 22(5): 509-512.
- [4] 胡生亮 陈旗 李仙茂. 一种提高舰艇编队质心干扰效果的方法研究[J]. 舰船科学技术 2006 28(4): 71-74.
HU Shengliang, CHEN Qi, LI Xianmao. An improved centroid jamming effect of the method [J]. Science and Technology of Ship 2006 28(4): 71-74.
- [5] 陈超 沙基昌 张正强. 无源质心干扰模型及末制导雷达开机策略[J]. 火力与指挥控制 2010 35(5): 13-15.

(下转第 103 页)

- [7] 易龙强,戴瑜兴. SVPWM 技术在单相逆变器电源中的应用[J]. 电工技术学报, 2009, 22(9): 112-117.
YI Longqiang, DAI Yuxing. SVPWM technology in the single phase inverter power supply application [J]. Journal of Electrician Technique, 2009, 22(9): 112-117.
- [8] Ulian, Yan Zhu, Brad Lehman. Control loop sign for two-stage dc-dc converters with low voltage high current output [J]. IEEE Trans Power Electronics, 2005, 20(1): 44-55.
- [9] 金园园. 基于准 PR 控制的并网逆变器的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
JIN Yuanyuan. Based on the PR control of grid-connected inverter study [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [10] 陈成. 变速恒频双馈风力发电系统双 PWM 变换器控制[D]. 天津: 天津大学, 2008.

CHEN Cheng. The doubly-fed VSCF wind power generation system with dual PWM converter control [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.



胡正轩 男(1981-), 黑龙江大庆人, 本科, 主要研究方向为电力系统及其自动化。



冷光夺 男(1967-), 黑龙江大庆人, 专科, 主要研究方向为发电系统及其自动化。

(上接第 97 页)

- CHEN Chao, SHA Jichang, ZHANG Zhengqiang. Passive centroid jamming model and the terminal guidance radar boot strategy [J]. Fire Control and Command, 2010, 35(5): 13-15.
- [6] 张冬兴, 缪旭东, 陈明荣等. 舰艇箔条质心干扰反导决策建模与仿真 [J]. 舰船电子对抗, 2010, 33(1): 24-28.
ZHANG Dongxing, MIU Xudong, CHEN Mingrong. The ship-borne chaff centroid jamming anti-missile decision-making modeling [J]. Simulation of Warship Electronic Warfare, 2010, 33(1): 24-28.



樊东 男(1960-), 湖北武汉人, 高级工程师, 主要研究方向为计算机技术、建模与仿真。



葛伟 男(1960-), 湖北黄石人, 高级工程师, 主要研究方向为计算机技术。