

文章编号:1001-5078(2014)12-1354-06

· 光电对抗 ·

# 面源红外干扰弹质心干扰反舰导弹的决策方法

刘松涛,刘振兴,王龙涛

(海军大连舰艇学院信息作战系,辽宁 大连 116018)

**摘要:**面源红外诱饵已经发展成为对抗红外成像制导导弹的一种有效手段。以面源红外干扰弹质心干扰反舰导弹为例,设计了相关的仿真模型,包括导弹模型、舰艇模型、面源干扰弹模型、干扰弹发射决策模型和发射机动决策对干扰效果影响的评估模型等,并依据质心干扰仿真计算流程,对干扰弹发射和舰艇机动决策方案进行了寻优仿真,提出了实施面源红外干扰时优选的干扰弹发射和舰艇规避机动决策原则与方法。

**关键词:**面源红外干扰弹;质心干扰;发射机动决策;作战仿真

**中图分类号:**TN976 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.12.013

## Decision making for surface-type infrared decoy defending anti-ship missile using centroid jamming

LIU Song-tao, LIU Zhen-xing, WANG Long-tao

(Dept. of Information Operation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

**Abstract:** Surface-type infrared decoy has been an effective jamming method for defending infrared imaging guided anti-ship missile. This paper takes surface-type infrared decoy defending anti-ship missile using centroid jamming as examples, the simulation models including missile model, ship model, surface-type infrared decoy model, decoy launching model and evaluation model of launching and maneuver's influence on jamming effectiveness, etc, are designed. Then according to computation flow of centroid jamming, the optimal scheme of decoy launching and ship maneuver is found. Finally, the rules and methods of decoy launching and ship maneuver are put forward when applying surface-type infrared decoy.

**Key words:** surface-type infrared decoy; centroid jamming; decision of launching and maneuver; operational simulation

### 1 引言

面源红外干扰弹因其红外辐射特性与被保护目标相似、辐射能量高、燃烧时间长以及辐射面积大并与被保护目标相交融,已经发展成为一种比较高效的红外成像制导导弹干扰手段。面源红外干扰弹对反舰导弹的干扰机理可以概括为三个:冲淡干扰、质心干扰和遮蔽干扰。本文从建模仿真的角度研究面源红外干扰弹质心干扰反舰导弹的发射机动决策方案问题,建立干扰弹的发射机动决策模型和干扰效果评估模型等,并通过对所建模型的验证和战术背景下的作战仿真分析,提出面源红外干扰弹防御反舰导弹的干扰诱饵布放方案和舰艇规避机动方案的

寻优方法。

发射机动决策是一个十分复杂的多重变量寻优问题,比如导弹的攻击方向、风向、舰艇的运动方向以及干扰弹的布放位置都可以在 $360^\circ$ 的方位内变化。因此,首先从工程实际和分类的角度对参数空间进行了简化<sup>[1]</sup>。然后,不偏离问题本质,简化干扰弹、舰艇目标和导弹目标的模型及仿真场景。比如:①理想化目标识别和跟踪过程。只要目标在视

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 61303192)资助。

**作者简介:**刘松涛(1978-),男,博士后,副教授,硕士生导师。主要从事电子对抗,图像处理,光电制导等研究工作。E-mail:navylst@163.com

**收稿日期:**2014-04-17; **修订日期:**2014-05-08

场内,就能被识别和跟踪;②简化导弹控制系统环节,可以实现实时控制;③简化面源红外干扰弹的辐射和运动特性。认为干扰弹发射到指定位置即形成面源,然后随风移动;④没有构造实际的三维场景,只是在三维场景内进行对抗分析。

## 2 相关模型

### 2.1 导弹模型

末制导头开机后,按照预定的角度搜捕参数和模式,进行搜索、截获,完成目标截获并稳定跟踪后,按照比例导引规律导引。

### 2.2 舰艇模型

不考虑舰艇机动转向的影响,简化为以某一机动舷角为航向,然后匀速直线运动,则舰艇的规避机动模型为:

$$\begin{cases} x_c = V_c \times (m - 1) \times \cos(C\_angle \times \pi/180) \\ z_c = V_c \times (m - 1) \times \sin(C\_angle \times \pi/180) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $x_c$  和  $z_c$  为舰艇运动的坐标点;  $V_c$  为舰艇的运动速度;  $C\_angle$  是舰艇的机动方向角。

### 2.3 面源干扰弹模型

设面源红外诱饵开始燃烧时刻为  $t_p$ , 则当  $0 \leq t \leq t_p$  时, 诱饵弹处于脱离舰艇的抛射阶段<sup>[2]</sup>。设诱饵弹的出射速度为  $V_y$ , 则抛出距离  $R_0 = V_y \times t_p$ , 此时舰艇发射红外诱饵的初始位置为:

$$\begin{aligned} x_y &= R_0 \cos(\theta_y + \varphi_c - 2k\pi) \\ z_y &= R_0 \sin(\theta_y + \varphi_c - 2k\pi) \end{aligned} \quad (2)$$

红外诱饵在风的作用下, 时间  $T$  后的位置为:

$$\begin{aligned} x_y &= R_0 \cos(\theta_y + \varphi_c - 2k\pi) + v_f T \cos\theta_f \\ z_y &= R_0 \sin(\theta_y + \varphi_c - 2k\pi) + v_f T \sin\theta_f \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $\theta_y$  为红外诱饵的布防角度;  $\varphi_c$  为舰艇航向; 当  $\theta_y + \varphi_c \geq 2\pi$  时,  $k$  取 1, 否则,  $k$  取 0;  $R_0$  为红外诱饵布防点与舰艇的距离;  $v_f$  为风速;  $\theta_f$  为风向。

### 2.4 干扰弹发射决策模型

干扰弹发射决策模型包括投射方向、投放时间间隔和齐投数量等<sup>[3]</sup>。

#### (1) 红外诱饵弹初始投射方向

本模型用于模拟和判断在  $t_p < t \leq t_p + t_{ns}$  时间内红外诱饵是否处于导弹红外导引头视场内。如果在此段时间内一直满足

$$d_{BSV}(t) \leq l(t) \quad (4)$$

则说明干扰有效, 否则, 干扰失败, 其中,  $d_{BSV}(t)$  是红外诱饵与舰艇连线在导引头视场横截面上的投影距离;  $l(t)$  是红外导引头视场半宽度。

#### (2) 红外诱饵弹齐投数量

设导引头接收到的目标舰艇的辐射强度为  $I_c$ , 红外诱饵的辐射强度为  $I_j$ , 红外导引头的抗干扰系数为  $K_j$ , 导弹引导红外诱饵弹的拖引概率为  $W_i$ , 则一次齐射投放数量为:

$$n = \left[ \frac{K_j W_i}{1 - W_i} \times \frac{I_c}{I_j} \right] \quad (5)$$

式中,  $[\ ]$  为取整符号。

#### (3) 红外诱饵弹投放时间间隔

诱饵弹最佳投放时间间隔是前一枚诱饵弹发射时刻到其使自卫舰艇即将移出导引头视场时刻的时间间隔, 其计算公式为:

$$\Delta t = \frac{D_y \theta_p (I_j + I_c)}{V_c \sin q I_c} \quad (6)$$

式中,  $\theta_p$  为导引头视场角分辨率;  $q$  为导弹来袭方位角;  $D_y$  为导弹攻击距离。当投放时机间隔小于  $\Delta t$  时, 有可能破坏前一枚干扰弹形成的质心干扰。当投放时机间隔大于  $\Delta t$  时, 不会破坏质心干扰, 但诱饵弹的干扰效率会降低。

### 2.5 发射机动决策对干扰效果影响的评估模型

#### (1) 质心轨迹模型

本模型用于模拟综合红外质心的实时坐标<sup>[4]</sup>。综合红外质心的位置计算公式为:

$$\begin{aligned} x_c(T) &= \frac{I_c x_c + \sum_{k=1}^n I_k x_{ky}}{I_c + \sum_{k=1}^n I_k} \\ z_c(T) &= \frac{I_c z_c + \sum_{k=1}^n I_k z_{ky}}{I_c + \sum_{k=1}^n I_k} \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $I_k$ ,  $x_{ky}$ ,  $z_{ky}$  为波门内第  $k$  个燃烧的红外诱饵的辐射强度及瞬时坐标;  $n$  为波门内燃烧的红外诱饵的总数量。

#### (2) 舰艇偏出视场判断模型

舰艇中心与导弹瞬时位置连线  $l_4$  的斜率满足如下条件:

$$k_{l_4} > (k_{l_1}, k_{l_2})_{\max} \text{ 或 } k_{l_4} < (k_{l_1}, k_{l_2})_{\min} \quad (8)$$

式中,  $l_1$  和  $l_2$  分别为导弹水平方向上搜索波门的边界线;  $k_{l_1}$  和  $k_{l_2}$  分别为直线  $l_1$  和  $l_2$  的斜率。满足式(8)时, 舰艇偏出导引头视场, 干扰成功。

#### (3) 命中模型

导弹离舰艇中心点的最近距离为:

$$d_m = \text{mind}_{KSH}(t) \sin \vartheta(t) \quad (9)$$

其中,  $d_{KSH}(t)$  为综合红外质心与舰艇的距离在水

平面内的投影线段的长度;  $\vartheta$  为综合红外质心和舰艇的连线与导引头轴线两者在水平面投影的夹角。令舰艇长度为  $L$ , 则舰艇一半长度在与导弹轨迹垂直方向上的投影长度为  $(L/2)\sin\theta_{Km}$ ,  $\theta_{Km}$  为导弹相对于综合红外质心的方位。如果  $d_m > (L/2)\sin\theta_{Km}$ , 导弹未命中舰艇, 否则, 命中舰艇。

### 3 仿真实验

#### 3.1 计算机仿真流程

仿真开始时刻选择面源红外干扰弹的发射时间, 并以该时刻舰艇位置为坐标原点, 正南方向为  $z$  轴方向, 垂直于地球表面方向为  $y$  轴方向,  $x$  轴方向符合右手法则。在这个三维坐标系内, 我们考虑舰艇、干扰弹和导弹的运动轨迹和辐射特性。仿真步长设为  $0.1\text{ s}$ 。

质心干扰的仿真过程分三个阶段。

第一阶段, 红外诱饵弹发射, 向上运动, 在  $t_p$  时刻爆燃形成红外诱饵。舰艇匀速直线航行。来袭导弹红外导引头跟踪舰艇, 导弹按比例导引规律, 掠海平面向舰艇飞行。

第二阶段, 红外诱饵已形成, 导弹继续向舰艇飞行, 导弹导引头凝视目标一段时间  $t_{ns}$ , 通过判断红外诱饵和舰艇是否同处于导弹红外导引头视场内, 在  $t_u = t_p + t_{ns}$  时刻决定跟踪目标是综合红外质心点还是舰艇。在  $t_p$  到  $t_u$  内的每个仿真步长上, 若式(4)成立, 导弹导引头将在  $t_u$  时刻从跟踪舰艇转为跟踪综合红外质心点, 综合红外质心点的坐标按式(7)计算, 仿真转入下一阶段。如果某一时刻式(4)不成立, 表明红外诱饵不在来袭导弹红外导引头视场内, 干扰失败, 退出仿真。

第三阶段, 导弹跟踪红外质心, 按比例导引规律接近综合红外质心。通过如下准则判断诱饵的干扰效果: 首先按舰艇偏出视场判断模型进行仿真和判断, 如果舰艇偏出红外导引头视场, 干扰成功, 否则再用命中模型进一步判断导弹是否命中舰艇。

#### 3.2 干扰弹发射决策仿真结果与分析

设初始条件为: 导弹来袭方向为  $150^\circ$ , 视场角  $4^\circ$ , 导弹凝视时间  $1\text{ s}$ , 导弹速度为  $300\text{ m/s}$ , 导弹距离  $8850\text{ m}$ ; 单发红外诱饵辐射强度为  $2000\text{ W/sr}$  ( $8\sim 12\ \mu\text{m}$ ), 起燃时间  $t = 5\text{ s}$ , 燃烧持续时间为  $60\text{ s}$ , 红外诱饵布设角度为右舷  $60^\circ$ ; 舰艇红外  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  辐射亮度为  $1000\text{ W/sr}$ , 舰艇机动航向为左舷  $60^\circ$ , 舰艇航速为  $9\text{ m/s}$ ; 风速为  $4\text{ m/s}$ , 风向为  $270^\circ$ 。主要仿真实验包括:

##### (1) 初始投射方向的影响因素分析

影响因素之一: 风向。让风向  $360^\circ$  变化, 寻找最佳发射角度, 根据最佳发射角度, 可以仿真得出导弹的脱靶量, 即舰艇和导弹的最终距离。最后, 根据导弹脱靶量大小可以判断风向对初始投射方向的影响情况。图1的仿真结果显示, 最佳风向是  $150^\circ$ , 此时, 按照最佳发射角  $150^\circ$  发射干扰弹, 舰艇和干扰弹的最终距离达到  $5418\text{ m}$ , 干扰有效。基本结论是风向和导弹来袭方向相反时, 脱靶量大, 反之, 脱靶量小。

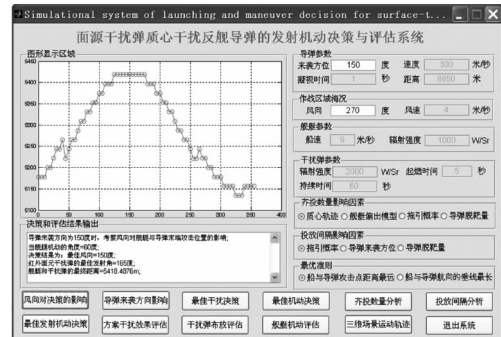


图1 风向与红外干扰弹发射方向之间的关系

影响因素之二: 导弹来袭方向。让导弹来袭方向  $180^\circ$  变化, 寻找干扰弹的最佳发射角度, 根据最佳发射角度, 可以仿真得出导弹的脱靶量以及判断导弹来袭方向对初始投射方向的影响情况。基本结论是导弹来袭方向与舰艇机动方向的夹角比较大时, 干扰有效。

影响因素之三: 综合考虑风向和导弹来袭方向。让风向  $360^\circ$ , 导弹来袭方向  $180^\circ$  范围内变化, 舰艇机动方向为左舷  $60^\circ$ , 寻找最佳的干扰弹发射方向。比如当风向  $270^\circ$ , 导弹来袭方向  $150^\circ$  时, 最佳干扰弹发射方向为  $160^\circ$ , 此时舰艇和导弹的最终距离为  $5221\text{ m}$ 。如果更改导弹来袭方向和风向, 比如导弹来袭方位为  $30^\circ$ , 风向为  $180^\circ$ , 决策结果为红外干扰弹不能有效布放, 原因在于舰艇机动方向一定。

##### (2) 干扰弹齐投数量的影响因素分析

(a) 诱饵弹齐投数量对质心轨迹的影响<sup>[5]</sup>。图2和图3分别是舰艇投放相应数量的诱饵弹后, 舰艇与红外诱饵的质心运动轨迹及舰艇与质心的距离随时间的变化曲线。图2中红外诱饵弹数量越多, 质心偏离舰艇越多。图3中诱饵弹发射的数量越多, 舰艇与质心之间的距离越大, 舰艇越安全。

(b) 诱饵弹齐投数量对舰艇偏出视场时间的影响。图4是舰艇中心与导弹连线的斜率  $k_{t4}$  及导弹跟踪波门边界的斜率  $k_{t2}$  随时间变化关系图。在发射1, 2, 3枚诱饵的情况下, 舰艇将分别在  $16.7\text{ s}$ ,  $14.6\text{ s}$ ,  $13.9\text{ s}$  后, 逃出导弹跟踪波门。因此, 诱饵弹发射数量越多, 舰艇将越快逃出导弹跟踪波门。

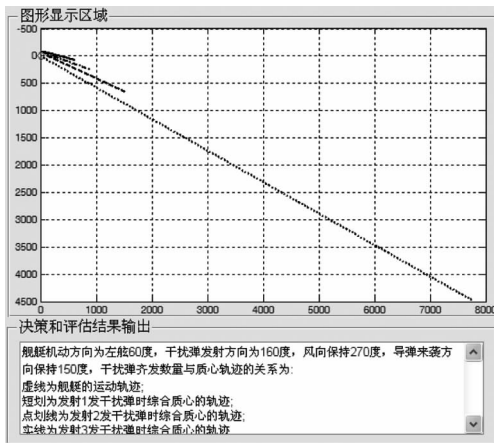


图2 舰艇及不同数量诱饵时质心运动轨迹

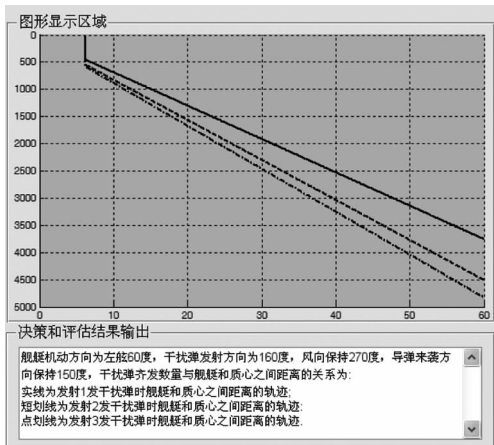


图3 舰艇与质心间距离随时间变化关系图

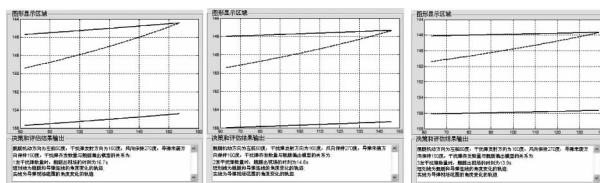


图4  $k_{14}$  及不同数量下  $k_{12}$  随时间变化关系

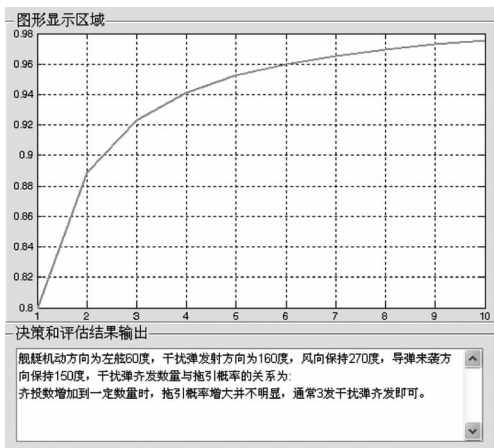


图5 诱饵弹齐投数量和拖引概率的关系

(c) 诱饵弹齐投数量对拖引概率的影响。图5

中诱饵弹齐投数量越大,则将导弹引到红外诱饵弹的拖引概率越大,但齐投数增加到一定数量时,拖引概率增大并不明显,盲目增加齐投数会浪费更多的诱饵弹。通常3发干扰弹齐发即可。

(d) 诱饵弹齐投数量对导弹脱靶量的影响。图6给出了导弹脱靶量随诱饵弹发射数量的变化。一次发射的总辐射强大必须大于目标辐射强度,辐射强度越大,导弹脱靶量越大,但齐投数增加到一定数量时,导弹脱靶量的增加并不明显。通常3发干扰弹齐发即可。

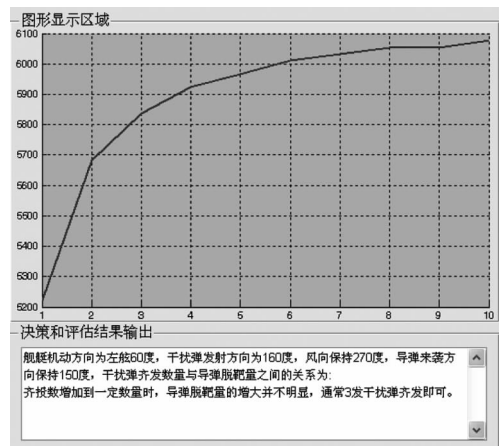


图6 导弹脱靶量与诱饵弹发射数量之间的关系

### (3) 干扰弹投放时间间隔的影响因素分析

(a) 投放时间间隔和拖引概率之间的关系如图7所示。拖引概率大,由于同时投放干扰弹的辐射强度大,舰艇很快偏出视场,导致干扰弹投放时间间隔短。拖引概率小,干扰弹投放时间间隔长,当拖引概率小于0.7时,投放时间间隔不变,这意味着1发干扰弹的情形,拖引概率最小为0.7。

(b) 投放时间间隔和导弹来袭方位角之间的关系如图8所示。当导弹来袭方向为35°到50°时,干扰无效,其他角度时,投放间隔都大于12s。投放间隔大,意味着舰艇偏出视场慢,干扰效果比较差,但都是干扰有效。这个实验也说明,当导弹来袭方向为35°到50°时,无论舰艇如何机动,干扰弹如何投放,干扰都无效。可见,即使一开始干扰弹投放到导弹的视场角内,由于受风向的影响,干扰也不一定有效。

(c) 投放时间间隔和导弹脱靶量的变化曲线如图9所示<sup>[6]</sup>。发射间隔过大或过小都不能产生最佳的脱靶量。最佳发射间隔为8s。当发射间隔过小时,诱饵弹的辐射能量集中,导致辐射中心距离舰艇较近,产生较小的脱靶量。当发射间隔过大时,舰艇已经偏出视场,脱靶量保持不变,干扰有效,再发射

干扰弹则是白白浪费。

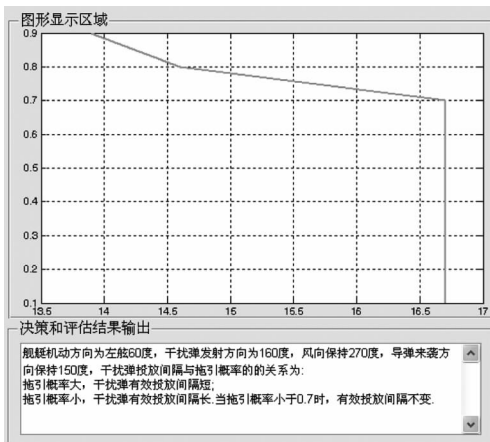


图7 诱饵弹投放时间间隔和拖引概率关系

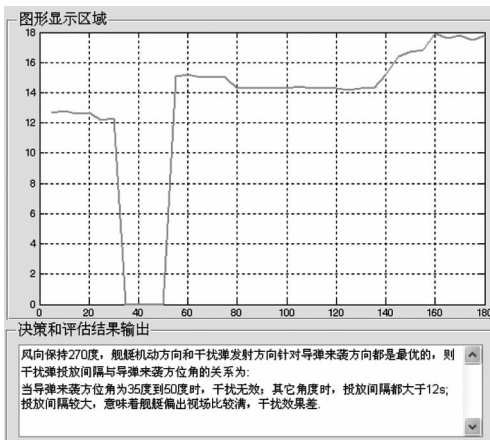


图8 诱饵弹投放时间间隔与导弹来袭方位角关系

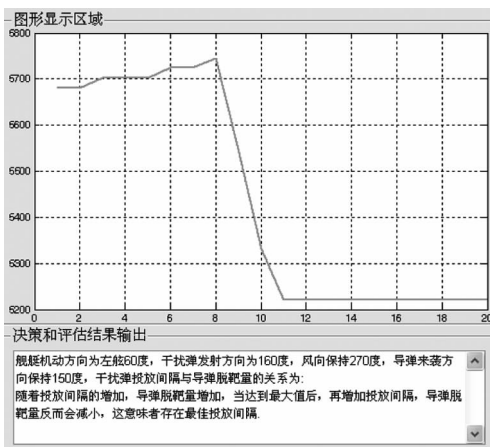


图9 诱饵弹投放时间间隔与导弹脱靶量的关系

### 3.3 舰艇机动决策仿真结果与分析

当面源红外干扰弹的发射角度为 $50^\circ$ , 风向 $270^\circ$ , 导弹来袭方向为 $150^\circ$ , 舰艇的最佳机动角度为 $0^\circ$ , 最终舰艇和导弹的距离为 $4754\text{ m}$ 。如果改变风向, 比如风向为 $180^\circ$ , 保持导弹来袭方向, 则舰艇最佳机动方向变为左舷 $40^\circ$ ; 如果改变导弹来袭方

向, 比如导弹来袭方向为 $90^\circ$ , 保持风向不变, 则舰艇最佳机动方向变为左舷 $55^\circ$ 。可见, 风向和导弹来袭方向都会对舰艇机动方向产生影响。如果导弹来袭方向为 $20^\circ$ , 保持风向不变, 则由于干扰弹发射方向不变, 会出现舰艇机动不能有效规避导弹跟踪的情况, 这也说明舰艇机动方向与风向、导弹来袭方向和干扰弹发射方向等都是密切相关的。

### 3.4 最优发射机动决策方案

前面讨论干扰弹发射和舰艇机动方案时存在一个前提条件, 即求舰艇最佳机动方案时, 干扰弹发射方案要合理; 或者求干扰弹发射决策方案时, 舰艇机动方案要合理, 否则会得到最优解。实际情况下, 这两个方案是相互耦合的, 都是未知的, 最优解要在某种评判准则下同时给出, 即导弹从 $0^\circ$ 到 $180^\circ$ 的某一角度来袭, 风向为 $0^\circ$ 到 $360^\circ$ 的某一角度, 求解干扰弹布放在什么位置以及舰艇如何机动, 可以使舰艇最终与导弹的距离最远。

比如: 风向 $270^\circ$ , 导弹来袭方向右舷 $90^\circ$ 时, 主观分析的结果是干扰弹布放在 $170^\circ$ , 舰艇不机动, 直航即可。根据这种干扰弹发射和舰艇机动决策, 由于干扰弹发射后直接出导弹视场范围, 干扰无效。而最优发射机动决策的程序给出的结果为, 舰艇机动角度为左舷 $45^\circ$ , 干扰弹发射角度为 $20^\circ$ , 舰艇与导弹的最终距离为 $5601\text{ m}$ , 干扰有效。

由于风向和导弹来袭方向任意, 通过多次仿真发现, 不管风向如何, 当导弹来袭方向为 $35^\circ$ 到 $50^\circ$ 时, 干扰无效, 其他角度时, 干扰都有效。通过分析发现, 干扰无效的原因是诱饵弹无法在凝视时间内持续待在导引头视场内。这与常见的结论“只要红外诱饵发射到导弹红外导引头视场内, 舰艇通过机动就能最终偏出红外导引头视场”是相矛盾的。还要统筹考虑导弹来袭方向和舰艇机动能力的影响, 才能得出合理的决策。

## 4 结语

本文以面源红外干扰弹质心干扰反舰导弹为例, 设计了干扰弹发射和舰艇机动的相关模型, 并对决策方案进行了寻优仿真。通过一系列的仿真实验, 得出如下相关结论:

(1) 最佳投放角度受风向和导弹来袭方向的影响, 干扰弹的初始投放位置一定要位于导引头视场内, 而且要能够持续一段时间。

(2) 一次发射的诱饵弹总辐射强度必须大于舰艇的辐射强度, 才能有效地干扰导弹。齐投数量越大, 综合质心偏离舰艇越多, 舰艇越快偏出导引头视

场,导弹脱靶量越大,拖引概率越大,舰艇越安全。但齐投数量太多时,上述指标的变化并不明显,浪费干扰弹。通常3发干扰弹齐发即可。

(3)拖引概率大,发射间隔小。存在某些导弹来袭方位角,干扰无效。导弹脱靶量与发射间隔之间的关系说明存在最佳发射间隔。总之,发射间隔的选取不能过大或过小,既要保证诱饵在导引头视场内时间足够长,又要能迅速有效诱偏导弹。通常发射间隔取舰艇即将偏出视场的时刻。

(4)舰艇机动是否有效要取决于多个因素,比如:导弹来袭方向、风向和干扰弹的布放决策等,要统筹考虑这些因素,依据舰艇机动模型,才能给出最佳的舰艇机动决策方案。

#### 参考文献:

- [1] LIU Songtao, GAO Donghua, YANG Shaoqing. Research on the decision scheme of launching and maneuver for shipborne smoke screen defending infrared imaging guided missile[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(3): 285 - 289. (in Chinese)  
刘松涛,高东华,杨绍清. 舰载烟幕防御红外成像制导导弹的发射机动决策方案研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(3): 285 - 289.
- [2] TIAN Xiaofei, MA Linhua, HONG Hua, et al. study on characteristic and simulation of surface-type infrared decoy[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(2): 165 - 169. (in Chinese)  
田晓飞,马丽华,洪华,等. 面源红外诱饵的干扰特性分析以及模拟研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(2): 165 - 169.
- [3] HU Chaohui, CHEN Kai, YAN Jie. Operational parameters of airborne infrared decoy aerial-launched set[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(3): 396 - 399. (in Chinese)  
胡朝晖,陈凯,闫杰. 红外诱饵弹投放装置控制参数研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 396 - 399.
- [4] HUANG Bingyue, WU Xiaofeng, LENG Huaping, et al. Simulation of warship-equipped infrared bait's effectiveness in interfering with anti-vessel missile[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(1): 17 - 24. (in Chinese)  
黄炳越,吴晓锋,冷画屏,等. 舰射红外诱饵对反舰导弹干扰效果仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(1): 17 - 24.
- [5] CHEN Rong, ZHAO Wei, SONG Ningtao. Modeling calculation and analysis of ship-borne infrared decoy against infrared imaging guided missile[J]. Modern Defence Technology, 2010, 38(5): 17 - 21. (in Chinese)  
陈戎,赵威,宋宁涛. 舰载红外诱饵防御红外成像制导导弹建模与分析[J]. 现代防御技术, 2010, 38(5): 17 - 21.
- [6] HU Yifan, SONG Bifeng, WANG Xu, et al. Method of evaluating the effect of airborne infrared decoy[J]. Infrared Technology, 2009, 31(3): 136 - 140. (in Chinese)  
胡一繁,宋笔锋,王旭,等. 机载红外诱饵弹干扰效果评估方法[J]. 红外技术, 2009, 31(3): 136 - 140.