

人在回路红外成像导弹搜捕概率建模与仿真

罗木生, 沈培志, 陈邓安, 张海峰

(海军航空大学, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对人在回路的导弹搜捕概率计算问题, 通过分析人在回路特点、红外成像导弹末端捕控的实际过程, 建立了红外成像瞬时航向视场、纵向视场计算模型, 研究了导引头最大搜索扇面、目标区边界制约下的转侧搜扫条件, 给出了综合距离与方位约束的发现目标判据模型。根据计算流程, 仿真分析了导弹进入航向、开机距离、目标区边长等因素对搜捕概率的影响。结果显示, 导弹从目标区对角线方向进入时的搜捕概率比最低值高出 21%; 最佳开机距离因目标区边长而异, 边长小于 7 km 可使发现概率大于 0.85; 增强红外成像导引头作用距离、提高操作员转动光轴的速率均能极大提高搜捕概率。

关键词: 搜捕概率; 人在回路; 红外成像导弹; 瞬时视场; 转侧搜扫

中图分类号: E927; TJ760 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0804003

Modeling and simulation of acquisition probability of infrared imaging missile with human-in-the-loop

Luo Musheng, Shen Peizhi, Chen Deng'an, Zhang Haifeng

(Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at acquisition probability with human in the loop, the terminal searching process of infrared imaging missile and the features of human-in-the-loop seeker were analyzed. The calculation models were built for the horizontal and longitudinal instantaneous field of infrared imaging view. The condition turning to another side search was investigated, including exceeding the maximum search sector and over boundary of target area. The criterion of target discovery was presented, which integrated distance constraint and azimuth constraint. According to flow process, the factors which influenced acquisition probability was simulated, such as missile course, start searching distance and length of target area side and so on. Results show that acquisition probability exceeds the minimum value 21% when searching along diagonal line of target area; the optimum start searching distance is different as the length of target area side changes, and if the length is less than 7 kilometer, the acquisition probability is greater than 0.85; improving the coverage of infrared imaging seeker or speeding up angular velocity of operator turning ray axis will increase acquisition probability.

Key words: acquisition probability; human-in-the-loop; infrared imaging missile; instantaneous field of view; turn to another side search

收稿日期: 2016-12-21; 修订日期: 2017-01-22

基金项目: 国家安全重大基础研究项目(61331401)

作者简介: 罗木生(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事兵种战术与作战建模方面的研究。Email: luosen_2008@163.com

0 引言

红外成像导弹在反舰作战、对地攻击等方面运用广泛,其导引头具有被动探测、隐蔽性好、功耗低、体积小等特点^[1];人工参与搜索、捕控,增强了导弹的目标选择性能,使导弹具备在复杂背景条件下准确识别、精确攻击指定目标的能力。

红外成像导弹的相关研究较多,如红外成像的处理与识别^[2-3]、导引头搜捕策略^[4-5]、抗干扰^[6-7]等。关于人在回路的红外成像导弹的相关问题,目前国内研究侧重于目标获取性能模型^[8]、制导链路传输性能^[9]、最优发射区的确定^[10-11]、射手操控行为建模^[12]等方面,关于人参与下的末端搜索、捕控的相关内容进行研究的不多,尤其是缺乏针对搜捕策略、搜捕概率等问题的研究,而搜捕概率是作战决策中最为关键的参数之一。

为此,文中在分析人在回路红外成像导弹搜捕过程的基础上,构建计算搜捕概率的仿真模型,以期较好地解决这些问题,为科学决策提供参考和依据。

1 人在回路红外成像导弹搜捕过程

人在回路控制的红外成像导弹,通常采用惯性或 GPS 中制导与捕控指令末制导相结合的方式实现对目标的精确打击。导弹发射出去后,按照预先规划的航路飞行。到达距目标区一定距离的末端时,数据链传输系统和红外成像导引头激活,建立与捕控系统的传输链路,并传输目标区红外影像。

载机或地面的捕控系统接收到图像后,操作人员通过传输链路不断操纵弹上导引头对视野内的目标区进行搜索;一旦发现目标后,操作人员立即给出截获指令;导弹完成对目标的截获后,立即转入自动跟踪状态;操作人员继续观察回传的图像,如有必要,则迅速更改攻击点,或者重新截获、锁定新的目标^[10,13],如图 1 所示。

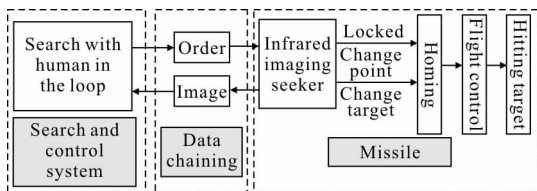


图 1 人在回路红外成像导弹搜捕工作过程

Fig.1 Working process of infrared imaging missile with human-in-the-loop

由于红外成像导引头视场角较小,操作员需控制导引头光轴依次向导弹左侧或右侧转动,从而获取不同目标区的图像以搜寻目标。假设目标区为矩形,如图 2 中的矩形阴影区域, C 为矩形区的中心点。导弹沿着点 S_1 到点 S_i 方向飞行,在点 S_1 开始向导弹左侧(亦可向右侧,方法相同)转动并获取目标区的红外图像,当导引头持续搜扫一定时间(转过的角度不超过导引头最大搜索扇面角)后停止搜索,并将光轴迅速回位到导弹航向,此时导弹到达点 S_2 处,然后向导弹右侧转动进行搜索,如此循环,如图 2 所示。

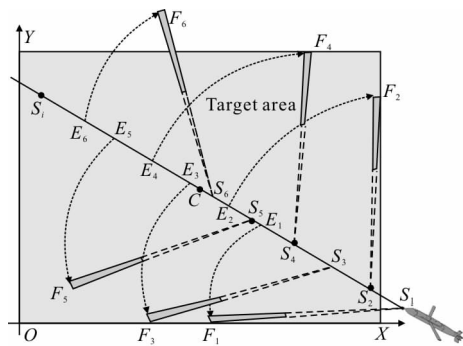


图 2 导引头在目标区的搜捕过程

Fig.2 Searching process of infrared imaging seeker in target area

2 搜捕概率仿真模型构建

由于导弹处于飞行中,导引头转动过程中视场扫过的区域很不规则。以点 S_i 开始搜索为例,导引头视场的变化如图 3 所示,其中 $E_i E_i' F_i' F_i$ 区域为导引头视场扫过的范围。考虑到这种不规则以及目标在区域内的随机运动,搜捕概率难以解析求解,因而采用蒙特卡洛算法建立仿真模型进行研究。

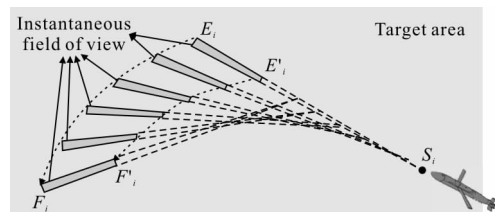


图 3 导引头视场扫过的区域

Fig.3 Searched area of infrared imaging seeker

2.1 红外成像瞬时视场建模

红外成像瞬时视场纵向距离边界与导引头纵向

视场角、导引头光轴的俯仰角、导弹飞行高度、导引头有效作用距离相关。对于同一型导弹,其导引头纵向视场角为固定值。在搜扫阶段,导弹飞行高度、导引头光轴俯仰角通常保持不变,因此,假定红外成像瞬时视场纵向距离远界 $D_{B\ far}$ 、近界 $D_{B\ near}$ 为固定值。下面建模计算红外成像瞬时视场航向边界。

令导弹飞行航向为 θ_{mil} , 在点 $S_i(i>1)$ 开始的单侧搜扫持续时间为 $T_{sear,i}$, 则导弹飞行到点 S_i 的时刻 t_i 为:

$$t_i = \sum_{j=1}^{i-1} T_{sear,j} \quad (1)$$

从 S_i 开始的单侧搜扫期间, 红外成像瞬时视场中心, 即导引头光轴中心的方位角 ψ_{cent} 为:

$$\psi_{cent}(t) = \theta_{mil} + F_{flag} \cdot \omega_{opti} \cdot (t - t_i) \quad (2)$$

式中: $t \in (t_{i+1}, t_i)$ 、 F_{flag} 为 1 表示在导弹的右侧搜扫, 为 -1 表示左侧搜扫; ω_{opti} 为操作员控制导引头光轴转动的角速度。

因此, 红外成像瞬时视场航向边界的方位角分别为:

$$\begin{cases} \psi_{left}(t) = \psi_{cent}(t) - 0.5 \cdot \varphi_{inst} \\ \psi_{right}(t) = \psi_{cent}(t) + 0.5 \cdot \varphi_{inst} \end{cases} \quad (3)$$

式中: φ_{inst} 为导引头瞬时航向视场角。

2.2 转侧搜扫条件

红外成像导引头在导弹一侧搜扫过程中, 当满足一定条件时必须转到另一侧搜扫, 这些条件即为转侧搜扫条件。转侧搜扫的目的是为了实现对导弹航线两侧的目标区均进行成像探测。当满足下列条件之一, 立即转侧搜扫。

(1) 瞬时视场到达导引头最大搜索扇面

无论红外成像导引头从导弹航往左侧还是往右侧搜扫, 其光轴中心的方位角 ψ_{cent} 不能超过导引头最大搜索扇面 ψ_{max} 的一半, 即:

$$|\psi_{cent} - \theta_{mil}| \leq 0.5 \cdot \psi_{max} \quad (4)$$

式中: θ_{mil} 为导弹飞行航向。

(2) 瞬时视场到达目标区边界

为了尽快搜扫所有目标区, 不对目标区之外的区域进行成像搜索。因此, 当红外瞬时视场即将越出目标区时, 必须转到另一侧。存在如图 4 所示的两种越出目标区情况。

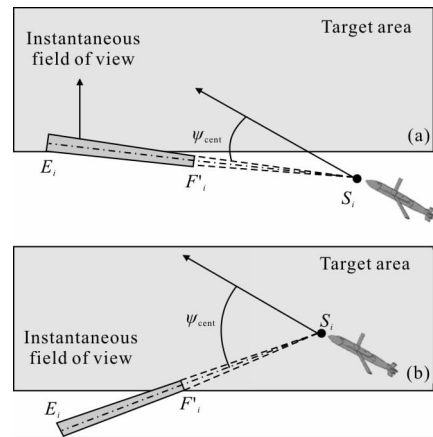


图 4 红外成像瞬时视场即将越出目标区

Fig.4 Instantaneous field of infrared imaging view nearly exceeding boundary of target area

当导弹还未进入目标区时, 转侧条件为: 红外瞬时成像瞬时视场距离远界到达目标区边界, 如图 4(a) 所示; 当导弹已经进入目标区时, 转侧条件为: 红外瞬时成像瞬时视场距离近界到达目标区边界, 如图 4(b) 所示。

2.3 发现目标的判据模型

判断为发现目标的条件是目标落入红外成像瞬时视场内, 即必须同时满足以下两个条件。

(1) 距离约束

目标与导弹的距离 $d(t)$ 为:

$$d(t) = \sqrt{(x_{mil}(t) - x_{trg}(t))^2 + (y_{mil}(t) - y_{trg}(t))^2} \quad (5)$$

目标必须位于红外成像瞬时视场纵向距离范围内, 即: 当 $d(t) \geq D_{B\ near}$ 且 $d(t) \leq D_{B\ far}$ 时, 认为满足距离条件。其中, $D_{B\ far}$ 、 $D_{B\ near}$ 分别表示红外成像瞬时视场纵向距离远界、近界。

(2) 方位约束

根据导弹、目标的位置坐标, 可解算出导弹指向目标的方位角 $\varphi(t)$, 在笛卡尔坐标系中, 有:

$$\varphi(t) = \arctan\left(\frac{y_{trg}(t) - y_{mil}(t)}{x_{trg}(t) - x_{mil}(t)}\right) \quad (6)$$

目标必须位于红外成像瞬时视场航向边界内, 即: 当 $\varphi(t) \geq \psi_{left}(t)$ 且 $\varphi(t) \leq \psi_{right}(t)$ 时, 认为满足距离条件。

当同时满足距离、方位角约束时, 判定为发现目标。假设在 N_f 次模拟人在回路的红外成像导弹搜捕的仿真中, 共发现目标 n_f 次, 则搜捕概率为 $p = n_f / N_f$ 。

2.4 导弹运动模型

令导弹航速为 V_{mil} 、航向为 θ_{mil} ，点 S_1 的坐标为 $(x_{mil,1}, y_{mil,1})$ ，在点 $S_1(i>1)$ 开始的单侧搜扫持续时间为 $T_{sear,i}$ ，则 t 时刻导弹的坐标为：

$$\begin{cases} x_{mil}(t) = x_{mil,1} + V_{mil} \cdot t \cdot \cos(\theta_{mil}) \\ y_{mil}(t) = y_{mil,1} + V_{mil} \cdot t \cdot \sin(\theta_{mil}) \end{cases} \quad (7)$$

S_1 是导引头开机位置，为导弹飞行航路上的点，取决于开机距离。开机距离是导引头开机时与目标的距离。由于目标位置未知，取开机位置与目标区中心点的距离来表征，如图 2 中点 S_1 、点 C 之间的距离。

因此，根据导弹飞行航向、目标区中心点 $C(x_C, y_C)$ 的坐标，可得出点的坐标为：

$$\begin{cases} x_{mil}(t) = x_C + D_{start} \cdot \cos(\theta_{mil} - \pi) \\ y_{mil}(t) = y_C + D_{start} \cdot \sin(\theta_{mil} - \pi) \end{cases} \quad (8)$$

式中： D_{start} 表示导引头开机距离。为了能够对目标区实现有效搜扫，开机点 S_1 应位于导弹未进入目标区的航路上，但与目标区边界的距离应小于导引头有效作用距离。

2.5 目标运动模型

若被攻击的目标是固定的，则搜捕概率主要与导引头在目标区搜索的面积有关。较之于固定目标，对运动目标的搜捕则更为复杂。假设目标可能位于目标区的任意位置，则初始位置为：

$$\begin{cases} x_{trg 0} = A_{len} \cdot \text{rand}(1) \\ y_{trg 0} = A_{wid} \cdot \text{rand}(1) \end{cases} \quad (9)$$

式中： A_{len} 、 A_{wid} 分别为目标区的长、宽。

由于导弹导引头搜捕过程时间较短，可以认为在这段时间内，目标采取匀速直线运动。目标运动的方向 θ_{trg} 未知，假定服从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 内的均匀分布，则

$$\theta_{trg} = 360 \cdot \text{rand}(1) \quad (10)$$

目标运动速度 V_{trg} 与目标的类型密切相关，如果是地面运动的车辆，则速度可能为 20~80 km/h；若是海上运动的舰船，则可能是 10~30 节。假设目标速度服从 $V_{trg \min} \sim V_{trg \max}$ 之间的均匀分布，则

$$V_{trg} = V_{trg \min} + (V_{trg \max} - V_{trg \min}) \cdot \text{rand}(1) \quad (11)$$

目标的位置坐标为：

$$\begin{cases} x_{trg}(t) = x_{trg 0} + V_{trg} \cdot t \cdot \cos(\theta_{trg}) \\ y_{trg}(t) = y_{trg 0} + V_{trg} \cdot t \cdot \sin(\theta_{trg}) \end{cases} \quad (12)$$

式中： $\text{rand}(1)$ 为产生一个 0~1 之间均匀分布随机数的函数。

3 搜捕概率仿真计算分析

3.1 仿真流程

依据人在回路的红外成像导弹搜捕的实际过程进行仿真模拟，其流程如图 5 所示。

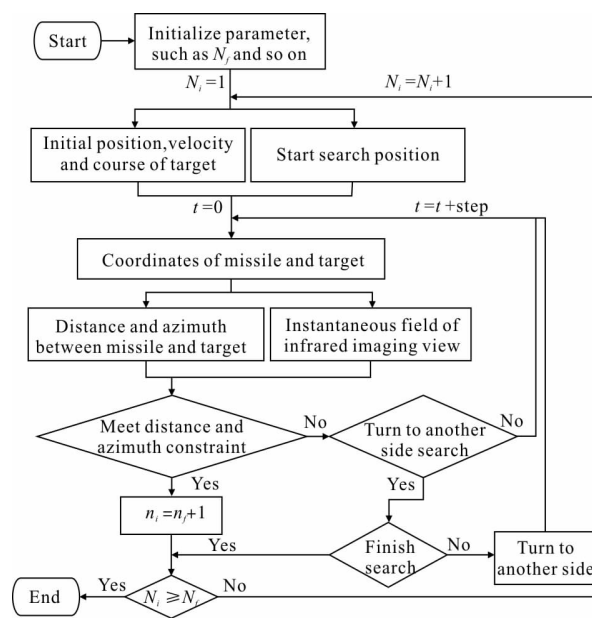


图 5 仿真流程

Fig.5 Simulation process

其中，仿真时间步长 $step$ 的选取要考虑到操作员控制导引头光轴转动的角速度 ω_{opti} ，必须满足 $\omega_{opti} \cdot step \leq \varphi_{inst}$ 。

3.2 仿真参数

设目标区域的长度、宽度均为 15 km，目标速度介于 3~15 m/s，导弹飞行速度 300 m/s，红外成像导引头有效作用距离 10 km、导引头最大搜索扇面 ψ_{max} 为 60° 、红外成像瞬间航向视场角 φ_{inst} 为 6° ，操作员控制红外成像导引头光轴转动的角速度 ω_{opti} 为 $3^\circ/s$ 。假设扩大红外成像瞬时视场、提高操作员转动光轴的速率不影响红外导引头作用距离。每次仿真时，模拟次数 $N_j = 10^4$ 次。

3.3 仿真结果与分析

搜捕概率会受到导弹飞行航向、导引头开机距

离、目标区长宽等因素的影响。

(1) 导弹进入航向对搜捕概率的影响

取导引头开机距离 15 km，仿真得到导弹不同进入航向下的搜捕概率如图 6 所示。

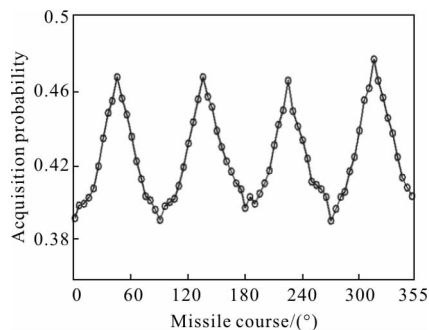


图 6 搜捕概率与导弹进入目标区航向的变化关系

Fig.6 Acquisition probability changing with missile course of flying to target area

从图中可以看出，导弹以 45°、135°、225°、315° 的方位角进入目标区时搜捕概率最高，相比以 0°、90°、180°、270° 的方位角进入提高了约 21%。也就是说，导弹从目标区对角线方向进入，比从其他方向进入的搜捕概率都高；若以垂直目标区的边界进入，则搜捕概率最低。

(2) 导弹导引头开机距离对搜捕概率的影响

取导弹进入航向为 45°，仿真得到导引头距离变化时的搜捕概率如图 7 所示。

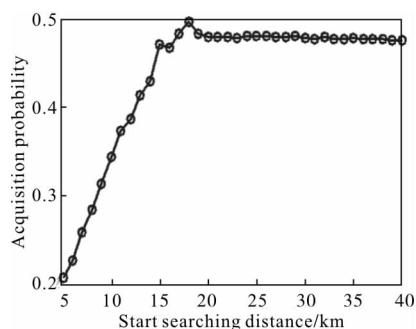


图 7 搜捕概率与导引头开机距离的变化关系

Fig.7 Acquisition probability changing with start searching distance

由图 7 可知，随着开机距离的增大，搜捕概率迅速增加至 0.497；当超过临界值 18 km 时，搜捕概率趋于不变。这是因为开机距离过大时，前期均是对目标区外的区域或目标区的一个小区域进行成像搜捕，对搜捕概率的提高影响不大，反而增加了操作员

的操作和识别等工作量，易于疲劳。因此，开机距离选取临界值为佳。

(3) 目标区边长对搜捕概率的影响

由上述仿真结果可知，对当前目标区的最大搜捕概率不到 0.5。取导弹进入航向 45°，对搜扫不同边长目标区进行仿真，结果如表 1 所示。

表 1 目标区边长变化时的仿真结果

Tab.1 Simulation result of target area side length change

Length of target area side/km	Optimum start searching distance/km	Acquisition probability
3	8	1.000
4	9	0.997
5	10	0.947
6	11	0.889
7	12	0.851
8	12	0.757
9	13	0.707
10	13	0.663

由表 1 可知，若要求搜捕概率不低于 0.85，对于导引头有效作用距离 10 km 的红外成像导弹，最大只能搜扫 7 km 的方形目标区。结合表 1，可根据目标区大小选择最佳开机距离，而搜捕概率可为使用导弹数量等决策提供支持。

仿真发现，扩大红外成像瞬时视场对搜捕概率的增加影响不大，但导引头作用距离对搜捕概率影响大，若由 10 km 增强到 15 km，则对 15 km 方形目标区的搜捕概率将由不足 0.5 提高到 0.88，提高了 76%。

此外，操作员的熟练程度、从移动的红外图像中识别目标的能力对搜捕概率也有较大影响。若操作员能够以 5 (°)/s(导引头作用距离仍为 10 km)转动导引头光轴来搜扫目标区，则对 15 km 的方形目标区的搜捕概率将由不足 0.5 提高到 0.72，提高了 44%。

因此，在提高红外成像导引头性能的基础上，提高操作员的业务能力也是重要方面。

4 结 论

搜捕概率计算是人在回路红外成像导弹作战运

用中的关键问题之一。通过建模与仿真分析得出:

(1) 从目标区对角线方向进入, 导弹的搜捕概率最高, 比从垂直目标区边界进入高出 21%;

(2) 目标区大小对红外成像导引头最佳开机距离、搜捕概率影响较大, 当前仿真条件下最佳开机距离为 18 km, 若使搜捕概率大于 0.85, 则目标区边长要小于 7 km;

(3) 增强红外成像导引头作用距离能极大提高搜捕概率, 当前仿真条件下由 10 km 增强到 15 km, 搜捕概率将提高 76%;

(4) 在不影响导引头作用距离的前提下, 提高操作员转动导引头光轴的速率也能提高搜捕概率, 当前仿真条件下由 35 (°)/s 提高到 5 (°)/s, 搜捕概率将提高 44%。

由此可见, 文中建立的仿真模型较好地解决了人在回路的导弹搜捕概率的计算问题, 可根据导弹性能及使用背景制定如表 1 所示的表格以便于决策查询, 为人在回路红外成像导弹的搜捕策略的制定、使用数量的决策等提供一定的依据和参考。

参考文献:

- [1] Xu Zhenya, Qi Ming, Li Lijuan. Application of man-in-the-loop in ATR criteria optimization[J]. *Infrared*, 2013, 34(6): 25-28. (in Chinese)
- [2] Li Cheng, Li Jianxun, Tong Zhongxiang, et al. Research on partial image recognition and tracking in infrared imaging terminal guidance[J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(7): 1213-1221. (in Chinese)
- [3] Wang Yuxi, Qi Hongxing, Ma Yanpeng, et al. Bundle adjustment in real-time mosaicking of frame-sweep infrared imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0104002. (in Chinese)
- [4] Zhang Xiaoyang, Xu Yanke, Fu Kuisheng. Field of view selection and search strategy design for infrared imaging seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3866-3871. (in Chinese)
- [5] Jiang Yanlin, Ma Qidong, Sun Weidong, et al. Research on target searching model of IR imaging guidance anti-ship missile to near-shore and mobile warship[J]. *Journal of Dalian Naval Academy*, 2011, 34(6): 19-22. (in Chinese)
- [6] Yan Xiaoke, Zheng Junjie. Surface-type decoy recognition for long wave infrared imaging seeker based on anti-ship missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3583-2587. (in Chinese)
- [7] Zhou Jianzhong. Research on jamming arrangement against IR image guided anti-ship missile [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(9): 1086-1090. (in Chinese)
- [8] Zhang Jian, Li Hua, Li Bin, et al. Soldier-in-the-loop target acquisition performance model of IR imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 217-220. (in Chinese)
- [9] Liu Kun, He Zhiming. Simulation of guidance link with man in the loop [J]. *Communication Technology*, 2010, 43(9): 127-129. (in Chinese)
- [10] Chen Zhongqi, Luo Huan, Zhang Bin, et al. Determination of optimum weapon launching area for man-in-the-loop TV-guided missile [J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, 16(9): 17-19. (in Chinese)
- [11] Ding Dali, Ren Bo, Huang Changqiang, et al. Modeling and simulation of the optimal attacking area for a TV guided weapon with man in the loop [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2010, 31(5): 1054-1059. (in Chinese)
- [12] Zhao Junmin, Hu Guohuai, Duan Chenlu, et al. The research on shooter modeling in the imaged-guided missile of "People-in-the-loop" [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2012, 32(4): 74-76. (in Chinese)
- [13] Chen Dali, Zhou Faqiang, Wu Yanbin. Analysis on the mathematic models of TV guidance [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(1): 329-331. (in Chinese)