

捕控指令电视制导导弹发射位置优化

周丽芬¹, 赵云², 周中良², 谢新辉²

(1. 云南曲靖师范学院, 云南 曲靖 655011; 2. 空军工程大学航空航天大学学院, 西安 710038)

摘要: 针对捕控指令电视制导导弹发射位置优化问题, 提出了一种多威胁条件下逐步缩小优化空间的优化方法。首先, 分析了发射位置约束, 建立了导弹作战空域静态、动态威胁模型; 其次, 提出了发射位置优化指标且建立了优化模型; 最后, 在粒子群算法的基础上, 进行了数值仿真。仿真结果充分验证了优化方法和模型的有效性, 具有一定的实战应用价值, 对导弹的作战使用规划具有重要意义。

关键词: 捕控指令电视制导; 发射位置; 粒子群算法; 作战效能

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)04-0056-05

Optimization of Launching Position for TV-Command Guidance Missiles

ZHOU Li-fen¹, ZHAO Yun², ZHOU Zhong-liang², XIE Xin-hui²

(1. Qujing Normal College, Qujing 655011, China;

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

Abstract: In study on the launching position for TV-command guidance missiles, we proposed an optimization method for lessening the optimizing space with multiple threats. The constraints of launching position were analyzed, and the dynamic and static threat models of the missile operational area were established. Then, the optimization guideline of launching position was put forwarded, and the optimization model was established. Numeric simulation was made based on particle swam optimization (POS). The simulation result proved the effectiveness of the model and method, which has great application value and is of important significance for the operational planning of missiles.

Key words: TV-command guidance; launching position; particle swam optimization; combat efficiency

0 引言

当今高技术、信息化、高强度对抗的作战背景下, 使用捕控指令电视制导导弹(TV-guided missile with image catching and command, TV-GM)对地打击过程中, 选择有效的导弹发射位置已成为提高导弹作战效能的关键因素^[1-2]。TV-GM的发射位置受多种约束限制^[3-4], 本文以作战空域多威胁约束为作战背景, 从投弹载机安全性和导弹航迹规划两个方面, 对导弹发射位置建立优化模型并进行解算。

1 TV-GM 发射要求与发射位置优化流程

TV-GM 发射过程中, 对载机要求主要包括: 达到

一定飞行高度, 满足一定范围的飞行速度和载机飞行姿态(俯仰、横滚); 其次, 载机必须确保目标在导弹最大作用范围内^[5-6]。基于以上发射要求, 导弹发射位置约束包括4个方面: 战区地形、防空威胁、导弹作战使用约束、导弹航迹规划效能。导弹发射位置优化流程如图1所示。

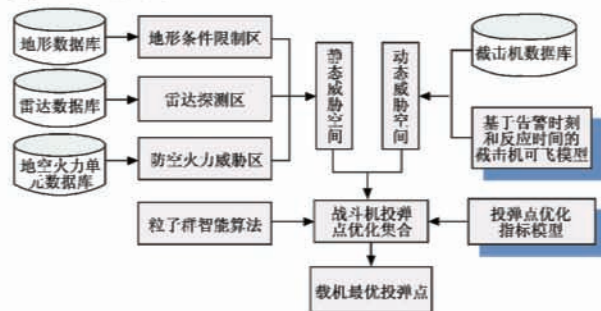


图1 导弹发射位置优化流程

Fig.1 The flow for optimizing the launch position of missile

收稿日期:2013-07-18

修回日期:2013-12-26

作者简介:周丽芬(1980—),女,云南宣威人,硕士,讲师,研究方向为图像处理、模式识别、最优控制等。

优化导弹发射位置主要考虑两方面：一是载机安全性；二是导弹航迹规划。首先对载机所受威胁进行分类建模，求解满足载机安全性和导弹发射条件的可发射位置优化集合；其次确立发射位置优化指标并建立优化模型；最后运用粒子群算法对优化模型进行解算。

2 战斗机作战空域威胁建模

2.1 静态威胁建模

2.1.1 地形威胁建模

一般用数字地图表示战区地形信息，由于导弹发射海拔高，载机受地形约束小，所以认定地形对导弹发射位置不构成影响。

2.1.2 雷达威胁建模

雷达战术性能指标主要包括最大、最小作用距离，方位、俯仰观测范围，跟踪距离和制导距离等^[7]。可将雷达作用区域简化为以位置为圆心，作用距离为半径的半球体，如图2所示。

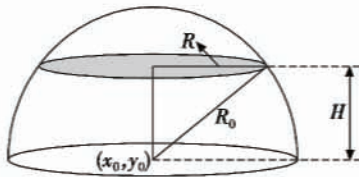


图2 雷达探测范围显示
Fig.2 The radar detection zone

设雷达阵地坐标为 (x_0, y_0) ，海拔高 h ，作用距离为 R_0 ，则高度 H 的飞行器对应的威胁范围 R 可由式(1)求解

$$R(H) = \begin{cases} \sqrt{R_0^2 - H^2}, & 0 \leq H < R_0 \\ 0, & H \geq R_0 \end{cases} \quad (1)$$

2.1.3 地空导弹与高炮威胁建模

地空导弹的杀伤范围可用杀伤远界、近界、上界、下界、杀伤仰角和方位角范围来描述^[8]，高炮杀伤范围与地空导弹相似。由于地空导弹与高炮的火力打击都基于探测雷达来实施，所以两者的作用区域模型可参照雷达威胁模型。

2.2 动态威胁建模

2.2.1 截击威胁作战想定生成

影响截击威胁大小的主要因素包括：我机被预警时机，截击机反应时间和作战能力。

为定量描述截击威胁，可做如下想定：我单架战斗机携带TV-GM对敌方地面已知目标进行打击，战区威胁源参数已知。载机沿正对目标方向进入，具体作战过程为：突防接近，定点爬升，姿态调整，定点发射，原向等高返回以及定点制导等。当我机被敌方预警后，敌截击机开始对我机进行拦截，想定态势见图3。

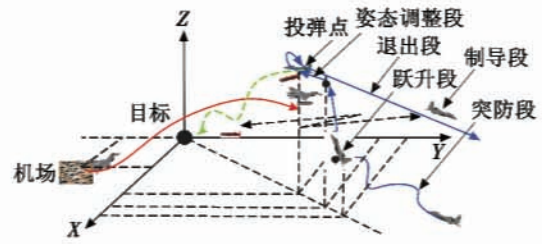


图3 作战想定态势图

Fig.3 The operation scenario state diagram

2.2.2 双机相对运动模型

在惯性坐标系中，用3个描述质心的运动学方程确定飞机的运动规律，具体可参照文献[9]。双机相对运动状态一般取 $[r, \theta, \varphi]$ ，如图4所示。

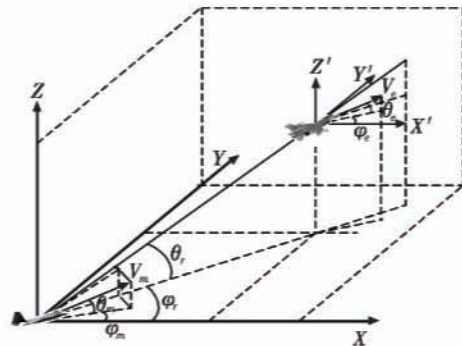


图4 双机相对运动几何图

Fig.4 The relative movement geometric pattern for two planes

建立双机的相对运动方程为

$$\begin{cases} r = \sqrt{x_r^2 + y_r^2 + z_r^2} \\ \theta = \arctan(z_r / \sqrt{x_r^2 + y_r^2}) \\ \varphi = \arcsin(y_r / \sqrt{x_r^2 + z_r^2}) \end{cases} \quad (2)$$

式中： r 为双机的空间距离； θ 为视线倾角； φ 为视线偏角。对式(2)求关于时间的导数，由图4几何关系可推出

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{r} \left\{ -\sqrt{1 - \sin^2(\varphi - \varphi_a)} \cos^2 \theta_a V_a \sin \left[\theta - \arctan \left(\frac{\tan \theta_a}{\cos(\varphi - \varphi_a)} \right) \right] + \sqrt{1 - \sin^2(\varphi - \varphi_m)} \cos^2 \theta_m V_m \sin \left[\theta - \arctan \left(\frac{\tan \theta_m}{\cos(\varphi - \varphi_m)} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{(x_m - x_a)(\dot{x}_m - \dot{x}_a) + (y_m - y_a)(\dot{y}_m - \dot{y}_a) + (z_m - z_a)(\dot{z}_m - \dot{z}_a)}{r} \quad (4)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{r \cos \theta} \left[-V_a \sin(\varphi - \varphi_a) \cos \theta_a + V_m \sin(\varphi - \varphi_m) \cos \theta_m \right] \quad (5)$$

2.2.3 截击威胁建模

设敌机在我机被预警后根据比例导引法向我接近，基于图3的想定态势，可得我机攻击路线剖面，如图5所示。

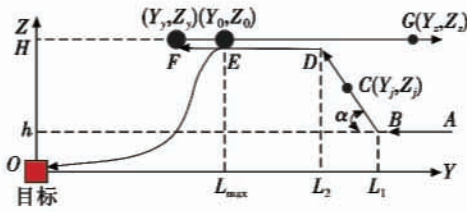


图5 飞机攻击路线剖面图

Fig.5 The attack path profile of plane

图中： H 为导弹发射高度； h 为飞机突防高度； L_{max} 为导弹最大作用距离； (Y_0, Z_0) 为对应 L_{max} 的导弹最早发射点； (Y_i, Z_i) 为我机对导弹末端制导的最远点，设我机与导弹通信最远距离为 L_{pmax} ，则应该满足 $|GO| \leq L_{pmax}$ ；战斗机最大爬升速率为 V_{pmax} ； α 表示对应 V_{pmax} 的飞机航迹俯仰角。

当载机以平均速度 V_{pl} 飞行时，需要时间 T_i 进行姿态调整才可满足投弹条件。设飞机在爬升阶段 (Y_j, Z_j) 点被敌方预警，则从点 C 到点 E 所需时间 $T_{pm} = T_i + (H - Z_j)/V_{pmax}$ 。设敌机反应时间为 T_f ，所带空空导弹的最大射程为 D_k ， $L(t)$ 表示敌我双机间的距离，为确保我机安全，必须满足 $L(t) > D_k$ 。当我机在点 E 投弹，依旧满足 $L(t) > D_k$ 时，可适当将投弹点向目标方向移动，直至刚刚不使 $L(t) \leq D_k$ ，此时的投弹点将为该方位角上的最优安全投弹点，如图5中点 F 所示。

3 TV-GM 发射位置优化建模

3.1 导弹投弹位置优化建模

针对TV-GM作战特点，载机投弹位置优化指标可包括：载机安全性，航迹规划距离和威胁代价。因此，建立导弹发射位置的优化模型为

$$J(x, y, z) = \alpha D_{is}(x, y, z) + \beta T_{br}(x, y, z) \quad (6)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (7)$$

式(6)中： (x, y, z) 为已求的满足载机安全和导弹作战使用约束的投弹点坐标； $J(x, y, z)$ 、 $D_{is}(x, y, z)$ 、 $T_{br}(x, y, z)$ 分别为总指标、距离指标和威胁指标。式(7)中， α 、 β 表示距离代价和威胁代价的相对权重。

针对距离代价，设导弹末端进入点坐标为 (x_{md}, y_{md}, z_{md}) ，可投弹点集合中距离末端进入点最远、最近两点的坐标分别为 $(x_{max}, y_{max}, z_{max})$ 、 $(x_{min}, y_{min}, z_{min})$ ，则距离代价的求解与归一化可表示为

$$\begin{cases} D_{ji}(x, y, z) = \sqrt{(x - x_{md})^2 + (y - y_{md})^2 + (z - z_{md})^2} \\ D_{min} = \sqrt{(x_{min} - x_{md})^2 + (y_{min} - y_{md})^2 + (z_{min} - z_{md})^2} \\ D_{max} = \sqrt{(x_{max} - x_{md})^2 + (y_{max} - y_{md})^2 + (z_{max} - z_{md})^2} \\ D_{is}(x, y, z) = 1 - \frac{D_{ji}(x, y, z) - D_{min}}{D_{max} - D_{min}} \end{cases} \quad (8)$$

针对威胁代价，设作战区域共有 n 个地空火力威

胁单元， (x_i, y_i, z_i) 为第 i 个火力单元的对应坐标， R_i 为杀伤半径。则每个投弹点的威胁代价为

$$T(x, y, z) = \left(\sum_{i=1}^n (D_{w_i}(x_i, y_i, z_i)) \right) / n \quad (9)$$

式中， $D_{w_i}(x_i, y_i, z_i)$ 表示第 i 个威胁源的威胁值，算式为

$$D_{w_i}(x_i, y_i, z_i) = \begin{cases} 1, & D_i(x_i, y_i, z_i) > R_i \\ \frac{D_i(x_i, y_i, z_i)}{R_i}, & D_i(x_i, y_i, z_i) \leq R_i \end{cases} \quad (10)$$

式中， $D_i(x_i, y_i, z_i)$ 为水平面内第 i 个威胁源到投弹点与导弹末端进入点所组成直线的距离。

通过上式可求得投弹点集合的所有威胁代价值，其中最大、最小代价值表示为 T_{max} 、 T_{min} ，因此威胁代价归一化为

$$T_{br}(x, y, z) = (T(x, y, z) - T_{min}) / (T_{max} - T_{min}) \quad (11)$$

3.2 基于粒子群算法的优化指标模型解算

本文基于粒子群算法^[10-11](PSO)对导弹发射位置优化模型进行解算。满足载机安全性和导弹使用条件的可投弹点集为粒子的基础空间，每个可投弹点坐标 (x, y, z) 对应的载机进入目标方位角 θ 为一个粒子， $0^\circ \sim 90^\circ$ 为粒子的飞行范围。按照十进制编码方式对粒子位置 $X(i)$ 进行四位编码， θ 与 $X(i)$ 的关系为

$$\theta = (X(i)/9999) \cdot \pi/2 \quad (12)$$

具体解算流程如图6所示。

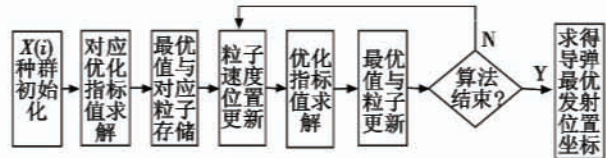


图6 基于 PSO 的导弹发射位置优化流程图

Fig.6 The flow chart for optimizing the launch position of missile based on PSO

4 数值仿真

4.1 动态威胁下的可投弹点仿真

以目标为原点，地理东、北方对应 X 轴、 Y 轴，在水平边长300 km的矩形地域内形成敌我双方作战空间。威胁单元的性能参数如表1所示。

表1 静态威胁参数

Table 1 Static threat parameters

威胁序号	威胁类型	威胁坐标/km	杀伤半径/km
威胁1	高炮密集阵	(6, 30, 1)	6
威胁2	高炮密集阵	(20, 20, 1)	6
威胁3	近距地空导弹	(45, 25, 0.5)	12
威胁4	近距地空导弹	(25, 50, 0.7)	15
威胁5	中距地空导弹	(50, 120, -0.5)	60
威胁6	中距地空导弹	(130, 50, -0.8)	50

设 H 为6 km, L_{max} 为200 km, 预警雷达坐标为(0 km, 10 km, 0 km), 预警半径为210 km, V_{pl} 为300 m/s, h 为400 m, 载机爬升航迹与水平面最大夹角为 $\pi/6$, T_i 为30 s, L_{pmax} 为400 km。仿真可得图7、图8。

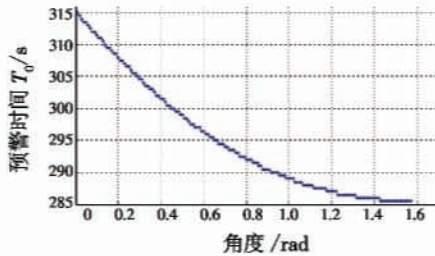


图7 进入方位对应预警时间关系
Fig.7 The early-warning time for the orientation

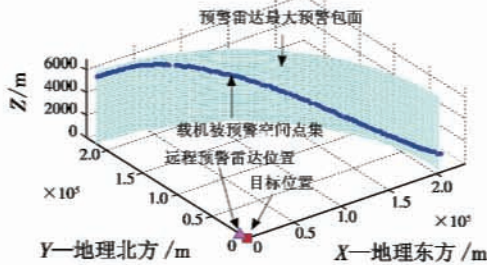


图8 载机进入目标空间预警点显示

Fig.8 The early-warning point for the plane entering orientation
图7表示 T_0 与 θ 的关系,图8为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内 T_0 对应的空间点集。随着 θ 的增大, T_0 不断提前,对应空间点高度随之增大,一定程度后不变。

设截击机场坐标为(50 km, 0 km, 0 km), 平均飞行速度为340 m/s, D_k 为60 km, 初始俯仰和偏航角都为 0° , T_f 为45 s, 导航比 $K=3$ 。当 $\theta = \pi/4$, 双机飞行航迹与对应可投弹点仿真见图9。

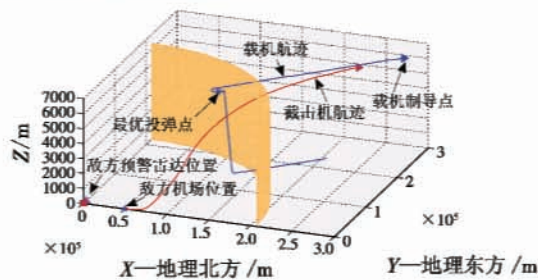


图9 45°进入角对应的双机航迹与最优投弹点
Fig.9 The best bomb-dropping point and path on 45° orientation for two planes

由图9求得 $T_0 = 296$ s, 可投弹点与目标水平距离为165.8 km, 坐标为(117.24 km, 117.24 km, 6 km)。在确保载机安全的基础上, 投弹点水平距离向目标靠近34.2 km, 减少导弹的作战时间, 提高了导弹的突防概率。基于图7和图9, $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内对应的可投弹点位置如图10所示。

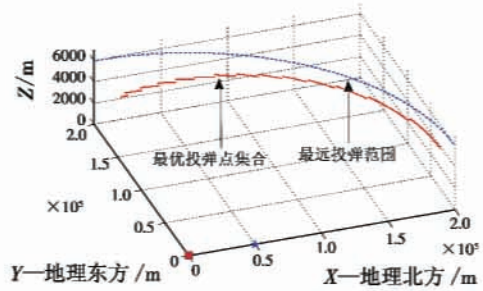


图10 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围对应的最优投弹点

Fig.10 The best bomb-dropping point in $0^\circ \sim 90^\circ$ range

4.2 静、动态威胁叠加下的载机可投弹点仿真

规定当投弹点处于静态威胁范围内时, 可在水平面内, 沿该投弹点与目标连线且远离目标的方向, 取刚脱离静态威胁的点为该方位角对应的可投弹点。仿真如图11所示。

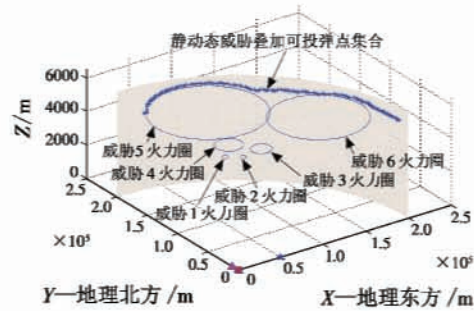


图11 静动态威胁下的可投弹点空间显示

Fig.11 The right bomb-dropping point in space with threats

4.3 基于PSO的最优投弹点解算

设载机末端攻击起点极坐标为($45^\circ, 20$ km), 求得 $D_{max} = 1.9 \times 10^5$ m, $D_{min} = 1.2 \times 10^5$ m, $T_{max} = 1$, $T_{min} = 0.61$ 。设PSO中 c_1, c_2 都为0.5, W 为1.5, 种群粒子数30个, 迭代100次后, 对应不同 α, β 权重的最优投弹点仿真如图12、图13所示。

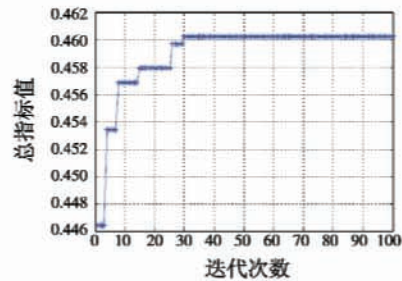


图12 $\alpha = 0.7, \beta = 0.3$ 对应总指标值

Fig.12 The whole target value when $\alpha = 0.7$ and $\beta = 0.3$

图12中, 仿真在30代收敛, 总指标值为0.4602, 对应最优进入目标方位角为1.565。求得最优投弹点距目标水平距离为154 km, 最优投弹点坐标为(1.66 km, 153.79 km, 6 km)。

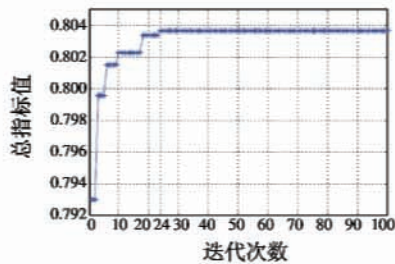


图13 $\alpha=0.2, \beta=0.8$ 对应总指标值

Fig.13 The target value when $\alpha=0.2$ and $\beta=0.8$

图13中,仿真在24代收敛,总指标值为0.804,对应最优进入目标方位角为0.035。求得最优投弹点距目标水平距离为189 km,最优投弹点坐标为(188.88 km, 6.61 km, 6 km)。

图12中 $\alpha=0.7, \beta=0.3$,最优投弹点总指标侧重距离代价,对应投弹点距目标的水平距离为154 km,由此可大大缩短导弹巡航段航程,增加了导弹突防概率。图13中 $\alpha=0.2, \beta=0.8$,最优投弹点总指标侧重威胁代价,虽投弹点距目标水平距离较图12结果有所增加,但导弹航迹规划过程面临威胁较小。由两图可知,运用PSO进行优化,具有较快的收敛速度,能够较好地符合导弹发射位置的规划要求。

5 结论

本文针对TV-GM作战特点,提出了一种导弹发射位置的优化方法。首先分析导弹发射位置约束,确定发射位置优化流程;其次建立优化空间静态、动态威胁模型和发射位置优化模型;最终通过PSO对优化模型进行解算。本文通过实例仿真求得了不同权重指标下对应的导弹最优发射位置坐标,该结果充分考虑战场威胁约束,具有较强的实战应用性,可为导弹作战使用规划提供重要依据。

参考文献

[1] 孔祥骏,高正红,商重阳.防区外攻击仿真框架和攻击动作链设计[J].系统仿真学报,2005,17(3):726-728.
KONG X J, GAO Z H, SHANG C Y. Stand off attack simulation frame and maneuver chains design[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(3):726-728.

[2] 韩志刚,孙隆和,佟明安.防区外发射空地导弹突防效能分析[J].系统工程理论与实践,1999(11):26-30.
HAN Z G, SUN L H, TONG M A. Breakthrough effectiveness analysis of SLAM[J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 1999(11):26-30.

[3] 陈中起,罗寰,张斌,等.人在回路电视制导导弹最优发射区的确定[J].电光与控制,2009,16(9):17-19.

CHEN Z Q, LUO H, ZHANG B, et al. Determination of optimum attacking area for man-in-the-loop TV-guided missiles[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(9): 17-19.

[4] 丁达理,任波,黄长强,等.人在回路电视制导武器最佳投射域建模仿真[J].航空学报,2010,31(5):1054-1059.
DING D L, REN B, HUANG C Q, 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.

[5] 杨满忠,于雷.中程空地电视指令制导导弹的建模与仿真研究[J].电光与控制,2003,10(1):66-68.
YANG M Z, YU L. Study on simulation and modeling of medium-range TV-command-guided air-to-surface missile [J]. Electronics Optics & Control, 2003, 10(1):66-68.

[6] 黄长强,赵辉,丁达理.电视指令制导导弹目标攻击中载机航迹规划研究[J].兵工学报,2010,31(3):396-400.
HUANG C Q, ZHAO H, DING D L. Research on carrier airplane's path planning in the course of attacking target by TV instruction guided missiles[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(3):396-400.

[7] 何佩,金长江,屈香菊.航迹规划中雷达探测空间的生成[J].飞行力学,2001,19(4):78-80.
HE P, JIN C J, QU X J. Generation of radar detection space in the flight vehicle route planning[J]. Flight Dynamics, 2001, 19(4):78-80.

[8] 曹海平,刘铭,王威.地空导弹抗击TBM杀伤区仿真研究[J].现代防御技术,2008,36(4):19-23.
CAO H P, LIU M, WANG W. Research on the damage zone of SAM intercepting the tactical ballistic missiles [J]. Modern Defense Technology, 2008, 36(4):19-23.

[9] 雷虎民,何广军.导弹制导与控制原理[M].北京:国防工业出版社,2006.
LEI H M, HE G J. Theory of guided and control for missile[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2006.

[10] 杨永生.一种自适应调节粒子群优化算法的研究[J].西安科技大学学报,2011,31(3):356-362.
YANG Y S. A particle swarm optimization algorithm with adaptive adjusting [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, 31(3):356-362.

[11] 吴钦,许晓飞.粒子群算法在巡航导弹航路规划中的应用[J].舰船电子工程,2010,11:18-20.
WU Q, XU X F. Application of PSO algorithm in path planning of cruise missile[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 11:18-20.