

# 电视制导导弹末端攻击方向规划

赵云<sup>1</sup>, 于雷<sup>2</sup>, 周中良<sup>1</sup>, 李飞<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安, 710038; 2. 空军工程大学科研部, 陕西西安, 710051)

**摘要** 针对电视制导导弹末端攻击方向规划问题, 提出了一种基于粒子群算法的规划方法。建立了导弹攻击方向限制模型; 提出了导弹攻击方向优化指标, 建立优化模型, 并基于粒子群算法对所建模型进行了解算; 通过仿真分析求得了最优指标值对应的导弹末端攻击方向角, 验证了所建模型与规划方法的有效性。

**关键词** 电视制导; 末端规划; 地形遮蔽; 粒子群算法

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.01.010

**中图分类号** TJ761.3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)01-0043-05

## Research of Terminal Attack Angle for TV Guidance Missile

ZHAO Yun<sup>1</sup>, YU Lei<sup>2</sup>, ZHOU Zhong-liang<sup>1</sup>, LI Fei<sup>1</sup>

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Scientific Research Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Aimed at the planning problem of terminal attack for TV guidance missile, a terminal planning algorithm is put forward based on a particle colony algorithm. Firstly, factors those have influence on the entrance aim angle of missile at the end are analyzed, and a restrained model of entrance angle is established. An optimization guide line of entrance angle is proposed, and an optimization model of terminal planning is built up based on a particle colony algorithm. At last, simulation and analysis are carried out, the results show that the use of this algorithm can obtain a rapid convergence and find the optimization guide line value and angel can be obtained. The validity of each model is verified adequately, and this provides an effective means for the campaign use and planning of TV guidance missile.

**Key words:** TV guidance; terminal planning; terrain masking; particle swarm optimization

近几场高技术局部战争中, 电视制导巡航导弹以其防区外发射、低空突防、电视导引精确打击等诸多优点倍受指挥官的青睐, 众多学者对导弹的作战使用都做了深入研究。文献[1]研究了电视制导导弹最优发射区的求解方法; 文献[2]对载机的航迹进行了规划; 文献[3]对导弹的航路规划进行了分析。由于防区外发射使导弹发射条件较易满足, 低空巡航使导弹所受防空威胁变小, 因此, 影响导弹作战效

能的重要阶段应为末端攻击。为提高导弹末端作战效能, 本文对电视制导导弹末端攻击方向进行优化。

## 1 导弹末端效能影响因素建模

### 1.1 高炮火力威胁模型

高炮作用区域可简化为以发射点为圆心, 作用距离为半径的半球体, 见图1。

**收稿日期:** 2013-06-08

**作者简介:** 赵云(1988—), 男, 陕西渭南人, 硕士生, 主要从事航空火力控制与战术引导研究. E-mail: zy-bl1129@163.com

**引用格式:** 赵云, 于雷, 周中良, 等. 电视制导导弹末端攻击方向规划[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2014, 15(1): 43-47. ZHAO Yun, YU Lei, ZHOU Zhongliang, et al. Research of terminal attack angle for TV guidance missile[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(1): 43-47.

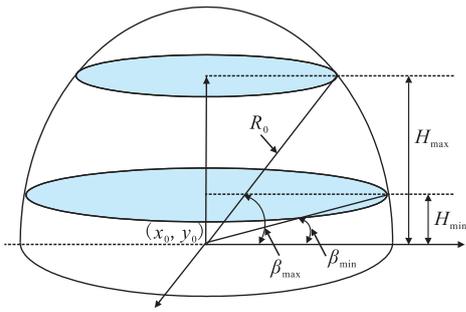


图1 高炮火力半径R的计算

Fig.1 Anti-aircraft gun firepower radial numeration

设高炮阵地位置坐标为  $(x_0, y_0)$ , 作用距离为  $R_0$ ,  $\beta_{\max}$ 、 $\beta_{\min}$  分别为最大、最小攻击仰角, 当导弹飞行高度为  $H$  时, 火力半径  $R$  为:

$$R(H) = \begin{cases} H / \tan\beta_{\min}, & H \leq H_{\min} \\ \sqrt{R_0^2 - H^2}, & H_{\min} < H \leq H_{\max} \\ 0, & H > H_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $H_{\min} = R_0 \cos\beta_{\min}$ ;  $H_{\max} = R_0 \cos\beta_{\max}$ 。

目标被预警后, 高炮需一定反应时间才可对目标实施有效攻击<sup>[4]</sup>。因此可在保证导弹被高炮攻击之前穿越一定威胁概率的高炮作用区域, 见图2。

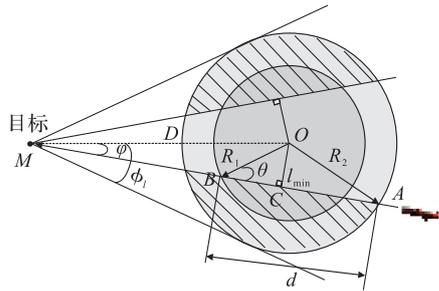


图2 基于高炮反应时间的导弹突防俯视图

Fig.2 Missile path planning platform based on the response time of anti-aircraft gun

图2中  $O$  为高炮阵地位置,  $R_1$  为高炮对应导弹飞行高度的杀伤半径。假设配合高炮的雷达系统与高炮位置重合,  $R_2$  为高炮探测半径, 图2中导弹沿  $AM$  方向进入目标, 经  $B$  点逃离高炮威胁覆盖区, 导弹不被高炮杀伤的计算式为:

$$d \leq V_d(t_r + t_{pf}) \quad (2)$$

式中:  $V_d$  为导弹平均速度;  $t_r$  为从探测系统预警到发射炮弹的反映时间;  $t_{pf}$  为炮弹从  $O$  点到  $B$  点的飞行时间, 其值为:

$$t_{pf} = R_1 / V_c \quad (3)$$

式中,  $V_c$  为高炮的平均速度, 当  $d = V_d(t_r + t_{pf})$  时, 可得最小航路捷径  $l_{\min}$  为:

$$l_{\min} = R_1 \sin\theta \quad (4)$$

导弹进入方向与目标和高炮阵地连线的夹角  $\phi_l$  为:

$$\theta = \arccos\left(\frac{R_2^2 - R_1^2 - d^2}{2R_1 d}\right) \quad (5)$$

$$\phi_l = \arcsin(l_{\min}/D) \quad (6)$$

## 1.2 电视导引头使用限制因素建模

### 1.2.1 地形遮蔽约束建模

导弹飞行过程中与目标的几何位置见图3。

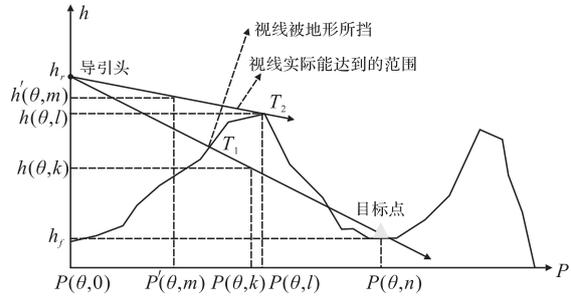


图3 地形遮蔽盲区剖面图

Fig.3 The section fig of landform obscure blind areas

设导弹飞行高度为  $h_r$ , 位置坐标为  $P_{(\theta, 0)}$ ; 目标高度为  $h_f$ , 位置坐标为  $P_{(\theta, n)}$ 。则决定导引头视线范围的射线方程为:

$$h_{(\theta, k)} = h_f + (P_{(\theta, k)} - P_{(\theta, n)}) \frac{h_r - h_f}{P_{(\theta, 0)} - P_{(\theta, n)}} \quad (7)$$

当导引头视线目标连线与山地地形交点  $T_1$  低于导引头视线与山顶的交点  $T_2$  时, 决定导引头在该方向的探测距离线方程  $L'$  为:

$$h'_{(\theta, m)} = h_{(\theta, l)} + (P'_{(\theta, m)} - P_{(\theta, l)}) \frac{h_r - h_{(\theta, l)}}{P_{(\theta, 0)} - P_{(\theta, l)}} \quad (8)$$

式中:  $k, l, m, n$  为极坐标辅助计算网格在径向划分的栅格序号;  $P_{(\theta, 0)}$  为导弹极坐标栅格, 依次比较极坐标栅格  $P_{(\theta, s)}$  ( $s = 0, 1, \dots, n$ ) 所对应地形高度  $h_{(\theta, s)}$  和由式(7)或式(8)所确定导弹所在位置射线上各点高度  $h'_{(\theta, s)}$  的关系, 导弹在当前高度和  $\theta$  方向对目标不可见时须满足:

$$h_{(\theta, k)} > h'_{(\theta, k)} \quad (9)$$

### 1.2.2 太阳角约束建模

太阳入射角可由高度角和方位角合成, 可参照文献[5]求得地理坐标系下任意时刻、经纬度位置所对应的太阳高度角和方位角。针对太阳角约束建立几何模型, 见图4。

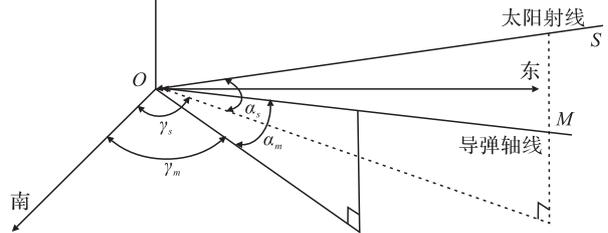


图4 太阳约束空间模型图

Fig.4 The model figure of the sun restriction area

图 4 以目标为原点建立地理坐标系,  $SO$  为太阳射线方向,  $MO$  为导弹轴线方向,  $\gamma_s$ 、 $\alpha_s$  分别为太阳射线方位角和高度角,  $\gamma_m$ 、 $\alpha_m$  分别为导弹轴线方位角和高度角。设定电视导引头视场为一长方形, 水平、垂直方向范围分别为  $\pm \Delta\gamma_m$ 、 $\pm \Delta\alpha_m$ , 则导弹轴线与太阳方位角约束关系见图 5。

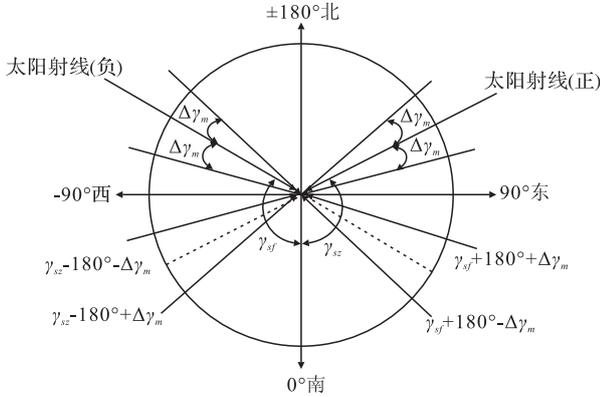


图 5 太阳方位角限制俯视图

Fig.5 The platform of sun orientation angle restrict

图 5 中:方位角范围  $[-180^\circ, 180^\circ]$ , 当太阳射线角为正时, 导引头水平方位角限制范围为  $[\gamma_{sz} - 180^\circ - \Delta\gamma_m, \gamma_{sz} - 180^\circ + \Delta\gamma_m]$ ; 当太阳射线角为负时, 导引头水平方位角限制范围为  $[\gamma_{sf} + 180^\circ - \Delta\gamma_m, \gamma_{sf} + 180^\circ + \Delta\gamma_m]$ 。导弹轴线与太阳高度角约束见图 6, 高度角范围为  $[-90^\circ, 90^\circ]$ , 可知  $\alpha_m > 0^\circ$  且  $\alpha_s$  确定时, 导引头轴线方向限制范围为  $[-\alpha_m + \Delta\alpha_m, -\alpha_m - \Delta\alpha_m]$ 。

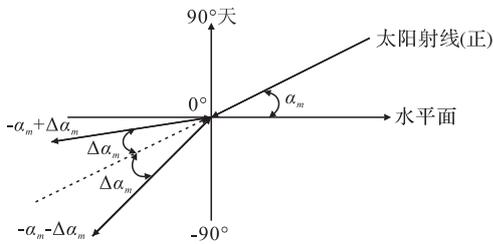


图 6 太阳高度角限制剖面图

Fig.6 The section fig of sun altitude angle restrict

## 2 导弹末端攻击方向优化建模

### 2.1 目标易损性

#### 2.1.1 导弹侵彻深度建模

目标形状以长方体为例, 长、宽、高分别为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ , 见图 7。

图 7 中:  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  分别为长方体的正面、侧面、顶部,  $O$  为  $S_1$  面的几何中心,  $MO$  为  $S_1$  面的法线,  $DO$  为导弹侵彻目标时的进入方向, 与法线的夹角为  $\theta_d$ 。导弹侵彻深度可参照文献[6]求解。

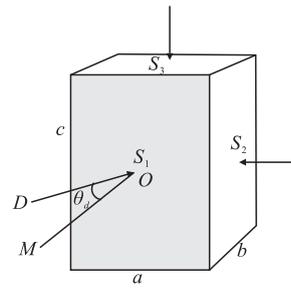


图 7 长方体目标模型

Fig.7 The aim model of cuboid

#### 2.1.2 目标攻击面选择

导弹攻击的目标面选择应遵守使目标面在导弹轴线与目标连线垂直面上的投影最大化的原则, 见图 7, 导弹以相同制导精度从  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  3 个面分别进入目标, 命中概率显然不同。

### 2.2 目标易瞄性

目标的易瞄性主要与目标和背景的对比度  $c_0$  有关<sup>[7]</sup>, 即:

$$c_0 = \left[ \frac{(\beta_T - \beta_B)}{\beta_B} \right] \times 100\% \quad (10)$$

式中,  $\beta_T$ 、 $\beta_B$  分别为目标和背景反射系数, 由式(10)可知, 目标和背景反射系数差值越大, 导引头瞄准目标将越容易。

### 2.3 末端进入角优化指标建模

基于以上因素, 建立进入方向优化模型为:

$$\begin{cases} J(\phi) = \alpha H(\phi) + \beta S(\phi) + \gamma C(\phi) \\ \alpha + \beta + \gamma = 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\phi$  为导弹进入方向角;  $H(\phi)$  为侵彻深度指标;  $S(\phi)$  为投影面积指标;  $C(\phi)$  为反射系数指标;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别对应前 3 者的相对权重<sup>[8]</sup>。  $H(\phi)$ 、 $S(\phi)$ 、 $C(\phi)$  分别为:

$$H(\phi) = \begin{cases} \frac{1 - (h_{d\min} - h_d(\phi))}{h_{d\min}}, & (h_d(\phi) \leq h_{d\min}) \\ 1, & (h_d(\phi) > h_{d\min}) \end{cases} \quad (12)$$

$$S(\phi) = \begin{cases} \frac{S_{ty}(\phi)}{S_{\max}}, & (S_{ty}(\phi) \leq S_{\max}) \\ 1, & (S_{ty}(\phi) > S_{\max}) \end{cases} \quad (13)$$

$$C(\phi) = \frac{(|\beta_T - \beta_B|)}{(\beta_{\max} - \beta_{\min})} \quad (14)$$

式中:  $h_{d\min}$  为导弹最优侵彻深度最小值;  $S_{\max}$  为导弹以可接受的概率瞄准和命中目标所要求的目标在导弹、目标连线的垂直面上的投影值;  $S_{ty}(\phi)$  为导弹不同进入方向对应的目标在导弹目标连线垂面上的投影面积;  $\beta_{\max}$ 、 $\beta_{\min}$  分别为自然界中典型材料的最大、最小反射系数值。

### 3 基于 PSO 的导弹攻击方向优化模型求解

将 PSO<sup>[9]</sup> 用于导弹攻击方向优化模型,可使每个导弹进入角度  $\phi$  对应一个粒子,  $0^\circ \sim 360^\circ$  范围为粒子的飞行空间。本文按照十进制编码方式对粒子位置  $X(i)$  进行 4 位编码,  $\phi = \left(\frac{X(i)}{9\ 999}\right) 2\pi$ 。算法指

标函数可参照式(11)进行求解,寻优流程见图 8。

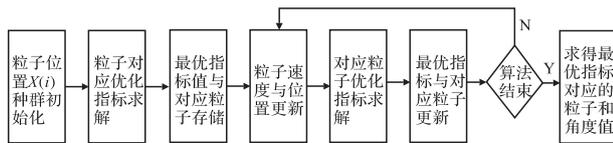


图 8 PSO 寻优流程图

Fig.8 The optimization flow chart based on PSO

### 4 仿真分析

计划于 1 月 25 日上午 10 点整使用某型电视制导导弹攻击长宽高分别是 30 m、10 m、50 m 的长方体目标,  $\beta_T = 0.3$ , 目标周围背景为绿草,以目标为圆心,地理正南方为  $0^\circ$  起点,在  $0^\circ \sim \pm 180^\circ$  范围内,背景的反射系数服从  $0.1 \sim 0.15$  间的均匀分布;  $K_q = 1.1 \times 10^{-6}$ , 目标经纬度为 (E68.42, N33.36), 地形高程数据地图已知,目标周围高炮单元参数见表 1。  $l_{dt} = 0.5\text{ m}$ ,  $m = 600\text{ kg}$ ,  $d = 0.4\text{ m}$ ,  $H = 400\text{ m}$ ,  $V_d = 300\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\pm \Delta\gamma_m = \pm 10^\circ$ ,  $\pm \Delta\alpha_m = \pm 5^\circ$ , 导引头探测距离 20 km;  $S_{\max} = 600\text{ m}^2$ ,  $h_{d\min} = 0.8\text{ m}$ 。以目标底面中心为原点建立地理坐标系, X、Y、Z 轴分别为正南、正东和指天。

表 1 目标周围高炮威胁参数表

Tab.1 The parameter tab of anti-aircraft gun threaten around aim

威胁分类	经纬度坐标/(E,N)	$R_1/\text{km}$	$R_2/\text{km}$	$t_r/\text{s}$	$V_c/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
威胁 1	68.33,33.29	3.5	8	32	1.2
威胁 2	68.32,33.36	4.0	9	35	1.2
威胁 3	68.37,33.26	3.0	7	25	1.2

由以上初始化可得太阳角限制范围为:  $[203.1^\circ, 223.1^\circ]$ 。由所建高炮模型可得目标周围威胁分布与高炮限制角度范围,见图 9、图 10。具体为:  $[205.8^\circ, 227^\circ]$ 、 $[0, 16^\circ]$ 、 $[343.98^\circ, 360^\circ]$ 、 $[207.2^\circ, 259.1^\circ]$ 。由图 9、图 10 可知,基于高炮反映时间的导弹突防模型增大了导弹末端进入方向的规划区域。

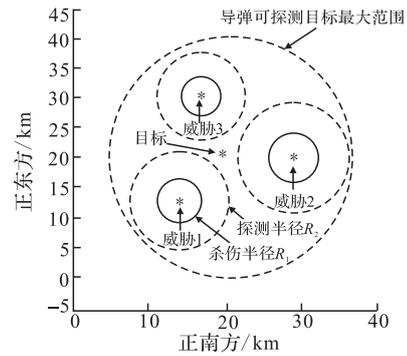


图 9 目标周围高炮威胁分布

Fig.9 The distributing of anti-aircraft gun threaten around aim

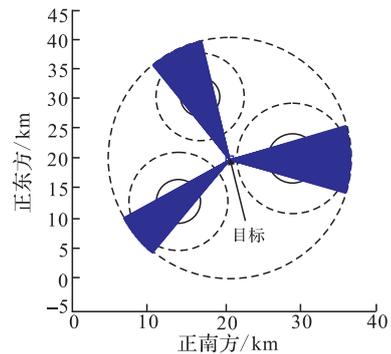


图 10 高炮对应角度限制范围

Fig.10 The angle restrict range of anti-aircraft gun minatory

考虑地形遮蔽,由 2.2 节模型可得地形遮蔽限制角度,图 11 黑色区域为地形遮蔽限制方向范围。

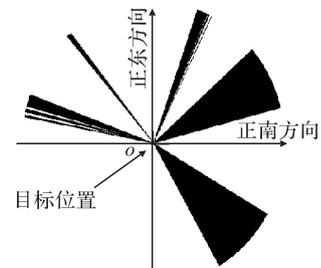


图 11 地形遮蔽方向限制

Fig.11 Landform obscure angle restrict

设置 PSO 种群粒子数为 30,学习因子  $c_1$ 、 $c_2$  都为 0.5,惯性权重取 1.5,  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别取 0.3、0.35、0.35,迭代 100 次可得图 12。

由图 12 可知,PSO 算法寻优速度较快,适应度函数在迭代 57 次后开始收敛,最优指标值为 0.964,对应导弹末端攻击方向为  $18.5^\circ$ 。根据该方向,可分别求得导弹侵彻深度为 0.86 m,投影面为  $876\text{ m}^2$ ,目标背景反射系数差为 19.9%。从该角度攻击目标,导弹具有较高的目标截获概率和命中精度,侵彻深度达到 0.8 m 的指标要求。

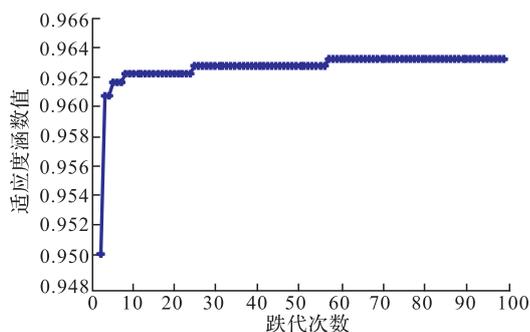


图 12 粒子群算法仿真寻优

Fig.12 The optimization simulation of particle swarm optimization

## 5 结语

本文建立了导弹末端攻击方向优化模型;通过 PSO 求得了能够较好地满足导弹作战要求的末端攻击角度。仿真结果充分验证了末端攻击方向优化模型的有效性,同时表明了 PSO 收敛快速,易于实现,能够较好地满足导弹实时规划的使用要求。本文所建优化模型可作为电视制导导弹作战使用规划的重要工具,规划时可通过调整分指标的相对权重,来求得满足导弹特定作战要求的末端攻击角度,提高导弹末端攻击的作战效能。

### 参考文献(References):

- [1] 陈中起,罗寰,张斌.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.  
GHEN Zhongqi, LUO Huan, ZHANG Bin. Determination of optimum weapon launching area for man-in-the-loop TV guided missiles[J].Electronics optic & control,2009,16(9):17-19.(in Chinese)
- [2] 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 Changqiang, ZHAO Hui, DING Dali. Research on carrier airplane's path planning in the course of attacking target by TV instruction guided missile [J].Acta armamentarh,2010,31(3):396-400.(in Chinese)
- [3] Zhang Yong fang, Zhang An, Lu Yanjun. Simulation of TV self-guided weapon[J].Transaction of Nanjing university of aeronautics and astronautics,2012,24(1):68-73.
- [4] 王雷,马大为,于存贵.防空火箭炮射序优化分析[J].南京理工大学学报,2012,36(1):132-136.  
WANG Lei,MA Dawei,YU Cungui. Firing order optimization of anti-aircraft rocket launcher[J]. Journal of Nanjing university of science and fechmolog,2012,36(1):

132-136.(in Chinese)

- [5] 李廷杰.导弹武器系统的效能及其分析[M].北京:国防工业出版社,2000.  
LI Yanjie. The Efficiency of weapon system of missile and its analysis[M]. Beijing:National defense industry press,2000.(in Chinese)
- [6] Heuze F E. An overview of projectile penetration into geologic materials with emphasis on rocks[J]. Int journal rock mech min sci,1990,27(2):36-42.
- [7] Masd. A self-calibraion technique for active vision system[J]. IEEE trans on robotics and automation,1996,12(1):114-120.
- [8] 庞晓楠,王凡.基于多目标动态威胁的潜艇航路规划建模与求解[J].海军工程大学学报,2013,25(2):93-97.  
PANG Xiaonan,WANG Fan. Submafine foute planning wodel and calculation based on multi-object dynamic theat[J]. Jounfnal of naval university of engineering,2013,25(2):93-97.(in Chinese)
- [9] Atyabi, Adham, Phon Amnuaisuk. Applying area extensi-on PSO in robotic swarm[J].Journal of intelligent and robotic systems: theory and applications,2010,58:253-285.

(编辑:田新华)