

文章编号: 1001-0920(2008)05-0563-04

基于效能的时间敏感目标打击策略问题研究

崔乃刚¹, 殷志宏¹, 杨宝奎²

(1. 哈尔滨工业大学 航天工程系, 哈尔滨 150001; 2. 北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘要: 针对时间敏感目标打击问题, 分析了目标时间敏感特性与目标对抗策略, 描述了精确制导武器打击时间敏感目标的过程, 并以此为基础提出了基于效能的打击策略优化模型. 将打击策略等效为复杂环境条件下的路径规划问题, 设计了基于效能的时间敏感目标打击策略优化算法. 算例检验了模型与算法的有效性, 计算结果表明, 目标的时效性是影响打击效果的重要因素, 通过提高相对打击能力可提高精确制导武器对时间敏感目标的打击效果.

关键词: 决策; 优化; 时间敏感目标; 效能

中图分类号: E920.8

文献标识码: A

Research on strategy problem of striking time sensitive target based on effectiveness

CUI Nai-gang¹, YIN Zhi-hong¹, YANG Bao-kui²

(1. Department of Astronautics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Beijing Electro-Mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China. Correspondent: YIN Zhi-hong, E-mail: PowerAckoo@126.com)

Abstract: The problem of striking time sensitive target is studied. The time sensitive characteristic and the strategy of the target are analyzed. And the striking process is shown. Then the model based on effectiveness for striking strategy is built. The striking problem is processed as a route planning under complex environment. The optimization algorithm for the model is designed. An example verifies the validity of the model and the algorithm. The result shows that the time sensitive characteristic of the target is the major influencing factor for the effectiveness, and by enhancing the relative striking capability, the effectiveness for striking time sensitive target is increased.

Key words: Strategy; Optimization; Time sensitive target; Effectiveness

1 引言

时间敏感目标在军事上的解释是短时间内具有较高军事价值的目标^[1]. 例如: 重要人员的出现使某大楼或某车辆具备了时间敏感特性, 且由于该要员能影响战争胜败, 使得指定大楼或车辆暂时具有较高的军事价值, 在一定的时间范围内成为军事打击的重点目标. 由于时间敏感目标往往出现在敌防区的纵深位置, 利用战机进行打击时需付出很大代价, 而采用防区外发射的精确制导武器则可以较小的代价实现期望的打击效果. 从效能研究的角度出发, 时间敏感目标精确打击的关键是策略的研究.

时间敏感目标打击策略包括精确制导武器发射的时机、发射的位置、发射的数量、航迹规划、目标搜捕策略和目标毁伤策略等. 在目标搜捕队形和目标毁伤策略已知的条件下, 打击策略主要研究精确制

导武器发射的时机、发射的位置、发射的数量和航迹规划问题. 精确制导武器打击时间敏感目标打击策略问题与有时间窗的航迹规划问题^[2,3]具有相似性, 属于复杂环境^[4]下有时间约束和任务约束的航迹规划问题, 具有一定的难度^[3].

本文在对时间敏感目标的时间特性进行分析的基础上, 结合精确制导武器打击全过程效能模型, 建立相应的策略优化模型及算法, 并通过算例检验决策方法的有效性.

2 目标的时间敏感特性与目标对抗策略

2.1 目标的时间敏感性

定义瞄准坐标系 $OXYZ$: O 位于情报给出的停留位置上目标质心; OX 水平指向精确制导武器进攻方向; OY 与 OX 垂直且指向天顶; OZ 与其他两轴构成右手系. 定义过点 $(0, 0, 0.5L_w)$ 和 $(0, 0,$

收稿日期: 2007-10-22; 修回日期: 2008-01-22.

作者简介: 崔乃刚(1964—), 男, 沈阳人, 教授, 博士生导师, 从事导弹飞行力学、飞行控制及滤波理论与应用等研究; 殷志宏(1979—), 男, 河北阳原人, 博士生, 从事攻防对抗与作战效能的研究.

- $0.5L_w$) 且垂直于 OZ 轴的两个平面之间的区域为时间敏感区域, L_w 表示时间敏感区域宽度. 按照离开时间最短原则, 目标于 T_0 时刻沿 OZ 方向以 V_{T-in} 进入、停留, 以 V_{T-out} 离开, 则

$$\begin{cases} x = 0, \\ y = 0, \\ z = -0.5L_w + V_T(t - T_0). \end{cases} \quad (1)$$

其中: V_T 为目标的运动速度, t 为作战时间.

不考虑目标对抗的情况下, 当停留时间为 T_S 时

$$V_T = \begin{cases} V_{T-in}, & T_0 \leq t \leq t_0; \\ 0, & t_0 < t < t_1; \\ V_{T-out}, & t_1 \leq t \leq T_1. \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$t_0 = T_0 + L_w/2V_{T-in},$$

$$t_1 = T_0 + T_S + L_w/2V_{T-in},$$

$$T_1 = T_0 + T_S + L_w/2V_{T-in} + L_w/2V_{T-out}.$$

2.2 目标的对抗策略

以目标逃逸策略为研究对象, 不妨设目标对抗开始时刻为 t_D , 且目标以最大速度 V_{T-max} 在最短时间内逃离时间敏感区域, 则目标逃逸策略为: 当 $t_D < T_0$ 时, $V_{T-in} = -V_{T-max}$; 当 $T_0 < t_D < t_0$ 时, $V_{T-in} = -V_{T-max}$; 当 $t_0 < t_D < t_1$ 时, $V_{T-out} = V_{T-max}$; 当 $t_1 < t_D$ 时, $V_{T-out} = V_{T-max}$.

若采用 P_{ci} 表示威胁源对目标的发现概率, P_{c0} 表示对抗发生的门限概率, 则目标对抗开始时刻

$$t_D = t(\max(P_{ci}) - P_{c0}). \quad (3)$$

3 时间敏感目标打击过程的数学描述

3.1 目标时敏特性分析

目标停留的实际位置服从以原点为中心, 方差分别为 σ_x 和 σ_z 的二维正态分布. 影响作战的主要因素是在 OZ 上的散布, 采用 3 σ 原则, 取 $z = 3\sigma_z$. 同时考虑目标散布和逃逸策略:

当 $t_D < T_0$ 时

$$T_1 = T_0; \quad (4)$$

当 $T_0 < t_D < t_0$ 时

$$T_1 = t_D + (t_D - T_0)V_{T-in}/V_{T-max}; \quad (5)$$

当 $t_0 < t_D < t_1$ 时

$$T_1 = t_D + (0.5L_w - 3\sigma_z)/V_{T-max}; \quad (6)$$

当 $t_1 < t_D$ 时

$$T_1 = T_0 + T_S + (0.5L_w - 3\sigma_z)/V_{T-in} + (0.5L_w + 3\sigma_z)/V_{T-out}. \quad (7)$$

3.2 时间敏感特性概率模型

实现目标毁伤的必要条件为: 精确制导武器到达目标区域的时刻 $T_A \in [T_0, T_1]$. 不妨假设给出的目标出现时间为 T_0 , $T_0 \sim N(T_0, \sigma_{T_0}^2)$, 分别用 T_0 和

T_1 替换式(4)~(7)中的 T_0 和 T_1 , 可得

$$0.5(T_0 + T_1) \sim N(T_0, \sigma_{T_0}^2), \quad (8)$$

则时间条件的概率描述为

$$P_{T_A} = ((T_1 - T_0)/\sigma_{T_0}) - ((T_0 - T_0)/\sigma_{T_0}), \quad (9)$$

其中 $\Phi(x)$ 为标准正态分布函数.

3.3 逆向过程模型

精确制导武器的打击逆向过程为: 命中毁伤、目标捕捉、突防和发射.

1) 命中毁伤模型

若 R_d 为精确制导武器的毁伤半径, r 为命中精度, 则单枚精确制导武器对目标的毁伤概率^[5]

$$P_{kill} = 1 - \exp(-R_d^2/2r^2), \quad (10)$$

多枚精确制导武器的毁伤概率

$$P_{N-kill} = 1 - (1 - P_{kill})^{N_1}, \quad (11)$$

$$N_1 = P_p N. \quad (12)$$

其中: P_p 为突防概率, N 为发射的精确制导武器数量.

2) 目标捕捉模型

采用“一字形”搜捕策略时, 定义单枚精确制导武器搜捕区间函数

$$f_i(x) = \begin{cases} 1, & id - 0.5L_w \leq x \leq do + id - 0.5L_w; \\ 0, & \text{其他}; \end{cases} \quad (13)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_1.$$

其中 d 为精确制导武器编队相邻成员间距.

若单枚精确制导武器对目标的捕捉概率为 P_c , 则多枚精确制导武器对目标的发现概率

$$P_c = 1 - (1 - P_c)^{N_1-1} f_i(x). \quad (14)$$

3) 突防模型

设防空火力单元与雷达的位置一致, 且拦截能力足够, 并采用“射-看射”原则, 构建威胁场

$$U = \int_{T_F}^{T_A} f(x, y, z, t) du. \quad (15)$$

其中: $f(x, y, z, t)$ 为精确制导武器的 4 维航迹, T_F 为精确制导武器发射时刻, T_A 为精确制导武器到达目标区域的时刻.

精确制导武器采用最小安全平飞高度飞行, 则

$$\begin{cases} f(x, z, t) = 0, \\ y = \text{const}, \end{cases} \quad (16)$$

$$du = [1 - \prod_{i=0}^K (1 - P_{ci} P_L)] / L_K. \quad (17)$$

其中: K 为威胁源个数, P_L 为单个威胁源对单枚精确制导武器的拦截概率, L_K 为最小穿越距离均值,

$$P_{ci} = f_{pci}(X_i, Y_i, Z_i, x, y, z, t), \quad (18)$$

$$P_L = 1 - \exp(-L_K p_i / V t_H). \quad (19)$$

这里: p_i 为单枚拦截器的拦截概率, V 为精确制导武器飞行速度, t_H 为威胁源的平均射击时间间隔. 若 D_i 表示拦截器的最短平均发射间隔, 则

$$t_H = \begin{cases} R_i / V_L, & R_i / V_L \geq D_i; \\ D_i, & R_i / V_L < D_i. \end{cases} \quad (20)$$

若威胁源的防空半径为 d_i , 当 $d_i \geq R_i$ 时, $L_K = 0$; 其他情况下, $L_K = 2 \sqrt{d_i^2 - R_i^2}$, 则

$$P_p = 1 - U. \quad (21)$$

4) 发射模型

设精确制导武器的航程

$$L \sim N(L_0, \sigma_{L_0}^2). \quad (22)$$

其中: L_0 为规划航程, σ_{L_0} 为航程均方差.

$$t_f \sim N(L_0 / V, \sigma_{L_0}^2 / V^2), \quad (23)$$

$$T_A = T_F + t_f. \quad (24)$$

考虑发射状态和飞行状态时, 由式(9) 可得

$$P_{T_F} = P_{T_A} = P_{T_A} P_{t_f}, \quad T_0 \leq T_A \leq T_1. \quad (25)$$

4 基于效能的打击策略优化模型与算法

4.1 基于效能的打击决策模型

不妨设对时间敏感目标效能期望为 P_{T_0} , 则时间敏感目标打击成功的必要条件为 $P_{N-kill} \geq P_{T_0}$.

打击成功的条件包括: 1) 准时发射、成功突防、成功捕捉、成功命中毁伤^[5]; 2) 在保证打击效果的前提下, 减少精确制导武器的使用数量. 若条件 1) 中各事件相互独立, 则效能模型为

$$E = P_{N-kill} P_c P_{T_F}. \quad (26)$$

由式(10) ~ (26) 可得

$$E = f_E(N, x, z, T_F, v_m, p_i, r, d, R_d), \quad (27)$$

对于给定的精确制导武器和给定的作战环境, 有

$$E = f_E(N, x, z, T_F). \quad (28)$$

设计打击策略优化模型为

$$\min f_E(N, x, z, T_F) - P_{T_0}, \quad (29)$$

- s. t. 1) $N \leq N_{max}$,
- 2) $\sqrt{x^2 + z^2} \leq L_{max}$,
- 3) $0 \leq T_F \leq T_1$.

其中: N 为精确制导武器最大可用数量, L_{max} 为精确制导武器的最大动力航程.

4.2 打击策略优化算法

采用蚁群优化算法可以有效地进行带有约束条件的连续函数优化问题^[4]. 由于本文的决策优化问题属于复杂环境条件下的路径规划问题, 可采用蚁群算法求解打击策略优化问题. 具体算法如下:

Step1: 设置蚂蚁属性(从 1 开始, 代表精确制导

武器的使用数量, 属性改变由 Step6 产生), 并生成路径初始状态 (x_0, z_0, T_F) .

Step2: 产生初始时刻蚂蚁种群移动的路径, 根据移动过程中途经各点周围的威胁累计总量标定启发式信息概率, 产生多条从起点到终点的可行移动路径, 当路径数量为 0 时, 转 Step1.

Step3: 对于每条可行的移动路径, 分别计算路径的长度和所对应信息素的增量, 采用威胁累计总量更新对应路径上各点的信息素.

Step4: 对于产生的每条可行路径进行一定的修正处理, 将蚂蚁所走路径的威胁累计总量与记录的目前威胁累计总量最小路径进行比较. 如果威胁累计总量更小, 则用该路径替换威胁累计总量最小路径, 对路径上所有点的信息素采用威胁累计总量更新对应路径上各点的信息素. 如果当前时刻已达到预设终止时刻, 则执行 Step6.

Step5: 综合使用当前点周围的威胁累计总量启发式信息概率和基于信息素轨迹的转移概率, 产生由起点到终点的可行路径, 并转 Step3.

Step6: 根据当前输出威胁累计总量最小路径, 设定从该路径上威胁累计总量开始大于 0 的点之后的部分为输出的有效路径, 并判断有效路径上蚂蚁完成给定任务的可能性. 如果完成任务的可能性大于预定值, 则终止算法, 输出 N 和 $f(x, z, t)$; 否则增加蚂蚁属性(当前蚂蚁属性 + 1), 转 Step2.

5 算 例

设定防空火力布置如图 1 所示. 其中: \bullet 表示防空火力单元位置, \circ 表示目标的位置, 实线表示防空火力单元的有效拦截范围, 虚线表示发现概率大于 50% 的区域. 范围较小火力单元单发拦截概率为 0.8, 其他为 0.75; 前者平均发射时间间隔为 30 s, 后者为 40 s; 目标的毁伤概率期望为 0.9.

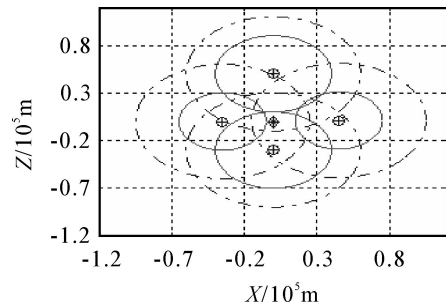


图 1 地面坐标系中防空火力单元布置示意图

1) 将防空区域按 12 × 12 设定网格, 每个点上的蚂蚁可向 8 个方向移动. 按照给定蚁群算法, 优化结果如图 2 所示, 发射时间为 4 060 s, 发射精确制导武器数量为 7, 作战效能为 0.947, 满足期望.

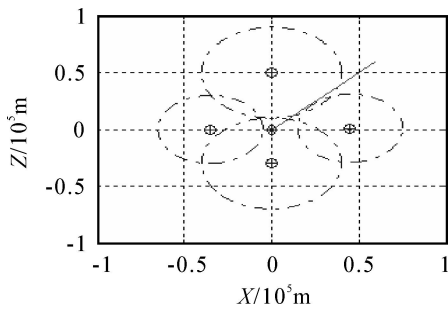


图2 优化策略

2) 在不考虑目标时效性的前提下,按给定的目标优化航迹进行攻击,发射时间任意,发射精确制导武器数量为2,作战效能为0.931,满足期望。

通过算例检验了文中策略优化模型与优化算法的有效性。对比1)和2)可知,精确制导武器打击时间敏感目标的关键是时效性的把握,增加精确制导武器发射数量可提高对时间敏感目标的捕捉能力和毁伤能力。对比两种条件下的计算结果可知,提高精确制导武器的相对打击能力可提高对时间敏感目标的打击效果。

6 结论

通过对时间敏感目标特性和精确制导武器对目标打击的过程模型的分析与建模,建立了基于效能的打击决策模型,并设计了优化算法。通过算例检验了策略优化模型与算法的有效性。本文方法可适用于不同类型的精确制导武器,具有一定的推广价值。

(上接第562页)

5 结论

本文给出了一种基于核模糊C均值聚类的多模型LSSVM回归建模方法。由于核技巧的使用,核模糊聚类避免了传统聚类方法对数据分布的依赖性。应用条件正定核使得聚类中心仍在原始数据空间中,便于利用。结合最小二乘支持向量机对每个聚类做非线性回归,并根据聚类内的样本数据分布来调整核参数,使得最后的回归模型在精度上优于传统方法。

参考文献(References)

- [1] 薛振框,李少远. MIMO非线性系统的多模型建模方法[J]. 电子学报, 2005, 33(1): 52-56.
(Xue Zhen-kuang, Li Shao-yuan. A multi-model Modeling approach to MIMO nonlinear systems [J]. Acta Electronic Sinica, 2005, 33(1): 52-56.)
- [2] 仲蔚,俞金寿. 基于模糊C均值聚类的多模型软测量[J]. 华东理工大学学报, 2000, 26(1): 83-87.
(Zhong Wei, Yu Jin-shou. Study on soft sensing

参考文献(References)

- [1] Hewitt, Mark A. Time sensitive targeting-overcoming the intelligence gap in interagency operations[R]. US: Naval War College, 2003.
- [2] 沈林成,高国华,常文森,等. 开放式飞行任务规划方法[J]. 宇航学报, 1998, 19(4): 13-18.
(Shen Lin-cheng, Gao Guo-hua, Chang Wen-sen, et al. An open system approach to mission route planning[J]. J of Astronautics, 1998, 19(4): 13-18.)
- [3] 蒋忠中,汪定伟. 有时间窗车辆路径问题的捕食搜索算法[J]. 控制与决策, 2007, 22(1): 59-68.
(Jiang Zhong-zhong, Wang Ding-wei. Predatory search algorithm for vehicle routing problem with time windows [J]. Control and Decision, 2007, 22(1): 59-68.)
- [4] 樊晓平,罗熊,易晟,等. 复杂环境下基于蚁群算法的机器人路径规划[J]. 控制与决策, 2004, 19(2): 166-170.
(Fan Xiao-ping, Luo Xiong, Yi Sheng, et al. Path planning for robots based on ant colony optimization algorithm under complex environment [J]. Control and Decision, 2004, 19(2): 166-170.)
- [5] 张克,刘永才,关世义. 关于导弹武器作战效能评估问题的探讨[J]. 宇航学报, 2002, 23(2): 58-66.
(Zhang Ke, Liu Yong-cai, Guan Shi-yi. An investigation into the problem of evaluating combat effectiveness for missile weapon systems [J]. J of Astronautics, 2002, 23(2): 58-66.)

modeling via FCM based multiple models[J]. J of East China University of Science and Technology, 2000, 26(1): 83-87.)

- [3] 李侃,刘玉树. 模糊核聚类的自适应算法[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 595-597.
(Li Kan, Liu Yu-shu. Fuzzy kernel clustering self-adaptive algorithm[J]. Control and Decision, 2004, 19(5): 595-597.)
- [4] 孔锐,张国宣. 基于核的K-均值聚类[J]. 计算机工程, 2004, 30(11): 12-14.
(Kong Rui, Zhang Guo-xuan. Kernel-based K-means clustering[J]. Computer Engineering, 2004, 30(11): 12-14.)
- [5] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory [M]. New York: Springer Verlag, 1995.
- [6] Scholkopf B. The kernel trick for distances [R]. Cambridge: Microsoft Research, 2000.
- [7] Suykens J A K, Vandewalle J. Least squares support vector machine classifiers[J]. Neural Processing Letter, 1999, 9(3): 293-300.