

智能弹药时敏目标协同打击技术与建模*

王嘉博, 刘莉, 王正平, 许萌

(北京理工大学宇航学院, 北京 100081)

摘要:时敏目标已经成为当今和未来战争中的主要打击目标之一。针对智能弹药时敏目标协同打击任务,在阐述了时敏目标概念及其时敏特性的基础上,介绍了打击时敏目标的主要作战模式,分析了智能弹药协同打击时敏目标的协同搜索、协同攻击和航迹规划等协同技术,并指出了其发展趋势。从任务模式上将智能弹药时敏目标协同打击任务分为协同搜索任务和协同攻击任务,并针对性的进行协同搜索策略、协同任务分配以及航迹规划的任务建模。

关键词:时敏目标;智能弹药;协同搜索;协同攻击;航迹规划

中图分类号:E92 **文献标志码:**A

Cooperation Techniques and Modeling for Time Critical Target Cooperative Striking using Smart Munitions

WANG Jiabo, LIU Li, WANG Zhengping, XU Meng

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Time critical targets (TCT) have become one of the most important targets in current and future wars. For cooperative striking on time critical targets using smart munitions, the primary killing models were introduced on the basis of explanation of TCT concept and its time-critical characteristic. Some key cooperation technologies of cooperative search, cooperative attack and path planning were presented, and their developing trends were then deduced. The task of cooperative striking on time critical targets using smart munitions was decomposed into cooperative search task and cooperative attack task. Modeling of cooperative searching strategy, cooperative task assignment, path planning and system of systems was carried out accordingly.

Keywords: time critical target; smart munitions; cooperative search; cooperative attack; path planning

0 引言

随着信息化程度的不断提高,当今和未来战争将是建立在高度信息化、智能化技术基础上的战争,对于武器信息化和智能化的要求日益提高。为了对付日益先进的信息系统,高机动性的武器装备正在成为战争的主流,其中突出的代表就是时敏目标^[1]。时敏目标通常是指其弱点和打击时机受有限时间窗口严格限制,必须在有限的“攻击窗口”或“交战机会”内发现、定位、识别、锁定和打击的目标^[2]。按照美国空陆海应用中心(ALSA)的定义,时敏目标(time critical target,或者 time sensitive target^[3], TCT, TST)是“值得作为目标的、短暂的,陆上或海上的,对于友军优先级很高的,被联合司令官(JFC)或分部指挥官指定为需要立即响应的目标”。典型的时敏目标包括导弹的运输/安装/发射车、移动的火箭发射架、移动的指挥与

控制车等^[4]。时敏目标已经成为当今和未来战争中的主要打击目标之一,针对其开展作战模式研究和武器系统研发已经成为各国研究发展的热点。

1 打击时敏目标的主要作战模式

2004年,美国空军大学(麦克斯韦尔空军基地)Gregory S. Marzolf^[5]少校提出了两种打击时敏目标的主要作战模式——反应式和预设式。2006年,原乔治亚理工大学的Fleeman^[6]教授在《战术导弹设计》(第二版)中,从战术导弹发展的角度,也对打击时敏目标的作战模式进行了分析,其作战模式也可归结为以上两种模式,同时,对其中的弹药给出了进一步的分析。

1.1 反应式作战模式

反应式作战模式是指:发展具有快速响应能力的武器装备,在信息系统感知到时敏目标后,迅速到达

* 收稿日期:2011-12-05

作者简介:王嘉博(1984-),男,山东烟台人,博士研究生,研究方向:多无人机协同任务规划。

目标上空发射精确制导弹药或防区外发射快速响应武器,对目标实施快速打击。这种作战方式的突出优点是有的放矢,其不足之处是对快速响应武器的性能要求很高,尤其是武器系统的响应时间难以达到快速响应的要求。

1.2 预设式作战模式

预设式作战模式是指:根据战场信息系统提供的战场信息,由作战指挥系统决定在可能出现时敏目标的区域部署具有长时间滞空、自主信息和打击能力的低成本弹药群,实施对目标区域的有效压制和打击。这种作战方式的突出优点是可以实现对时敏目标的实时打击,其不足之处是可能出现战场环境的误判和突变,造成弹药的损失。

2 协同技术与发展趋势

由于反应式作战模式依赖的超高速飞行器的研制难度大、作战成本高,因此,预设式作战模式得到了迅速的发展。预设式作战模式的实质就是,具有信息和攻击双重能力的智能弹药群通过协同搜索和攻击,完成对目标区域内的时敏目标的有效打击,实现对目标区域的控制。

2.1 协同搜索技术

打击时敏目标的前提是在目标可能出现的区域内部署智能弹药搜索并发现目标,因此,协同搜索技术^[7]是关键技术之一。发现时敏目标的协同搜索问题可以描述为: M 枚智能弹药在分布着 m 个未知目标的作战区域内,利用弹载侦察设备进行自主搜索和侦察,要求在任务时间内,控制多枚智能弹药以最小的代价发现目标。协同搜索技术是协同控制与最优搜索相结合的技术^[8-11],包括协同搜索任务建模、智能弹药平台建模、目标特性分析与建模、搜索区域环境信息描述与建模以及协同搜索策略等。

2.2 协同攻击技术

通过协同搜索发现时敏目标后,能否在窗口时间内快速、准确的对目标进行协同攻击是时敏目标协同打击任务成功与否的关键环节,因此,协同攻击技术是关键技术之一。主要包括协同任务分配技术、动态任务规划等。任务分配问题^[12]是指有 N 个任务需要分配给 n 个智能弹药,每个智能弹药可接受多个任务,每个任务可以分配给多个智能弹药,目标是求出最优分配方案,使得整体任务收益最大。任务分配问题的算法分为集中式任务分配方法和分布式任务分

配方法。集中式任务分配方法包括整数规划、搜索算法、智能优化算法和基于图论的方法等;分布式任务分配方法包括,基于行为的方法、基于市场机制的方法和基于群智能的方法等。

2.3 航迹规划技术

智能弹药不论在协同搜索还是协同攻击时依据协同控制策略做出决策后,需要在作战区域内寻找一条满足约束条件并能使任务性能指标达到最优的飞行航迹,因此,航迹规划也是其关键技术之一。航迹规划^[13]通常分为两类问题:一类是最优控制问题,对应的规划算法是基于控制论的优化算法;另一类是空间搜索问题,对应的规划算法实际同几何学的搜索算法。

2.4 发展趋势

随着时敏目标的重要性越来越凸显,智能弹药协同打击时敏目标的任务也会越来越重要。目前,由于尚无成熟的系统投入使用,主要研究集中在武器系统作战模式和关键技术攻关阶段,还需要大量的时间和精力进行研究成果的积累。随着研究进展的不断深入,对智能弹药协同打击时敏目标任务的要求也会不断提高,其发展趋势可归纳为:任务规划智能化、作战决策自主化、打击时间快速化以及作战区域立体化。

3 协同任务建模

从任务模式上分析,智能弹药打击时敏目标作战中主要包含协同搜索任务和协同攻击任务。本节针对具体子任务进行任务建模,分别建立协同搜索策略模型、协同任务分配模型以及航迹规划模型。在此基础上,进行系统之系统建模,寻求任务子系统与弹药设计子系统的整体最优解。

3.1 协同搜索策略建模

协同搜索问题通常是指多任务主体在相关任务信息共享的条件下,利用有限的资源和代价获得最大的目标探测概率。

3.1.1 搜索环境描述

假设搜索目标空间为长度(X 方向)为 L_1 ,宽度(Y 方向)为 L_2 的矩形,沿 X 方向将目标空间分成 m 段,沿 Y 方向将目标空间分成 n 段,如此将原始目标空间分解为 mn 个矩形单

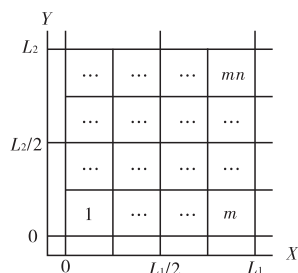


图 1 搜索目标空间网格化

元格,每个单元格的面积 $A = L_1 L_2 / mn$,目标空间(如图1所示)即可表示为 $j \in J, j = 1, 2, \dots, mn$ 。

3.1.2 探测函数和成本函数

探测函数直观上可以理解在付出一定搜索代价的前提下,探测到目标的条件概率。搜索代价可以是路线长度、扫描面积、搜索时间等,文中以搜索时间为搜索代价。在离散环境 J 中,探测函数 $b(j, z)$ 表示,假设目标在搜索空间的单元 j 中,当智能弹药付出搜索代价(搜索时间) z 时,能够探测到目标的条件概率:

$$b(j, z) = 1 - e^{-Wz/A} \quad j \in J \quad (1)$$

其中: v 为智能弹药飞行速度; W 为传感器扫描宽度; A 为单元格面积。

成本函数是对搜索代价和成本的度量。在大多数情况下将成本函数定义为:

$$c(j, z) = z \quad j \in J \quad (2)$$

其中 z 为搜索时间。

弹药群在目标空间内对多个目标进行搜索,其收益函数为:

$$e(j, z) = \sum_{i=1}^V \omega_i p_i(j) b(j, z) \quad j \in J \quad (3)$$

其中: ω_i 为第 $i = 1, 2, \dots, V$ 个目标的权重系数, $p_i(j)$ 表示第 i 个目标在第 j 个单元格内的概率。搜索问题可抽象为如下优化问题:

$$\begin{aligned} \text{Max } E[f] &= \sum_{j \in J} e(j, f(j)) \\ \text{s. t. } C[f] &= \sum_{j \in J} c(j, f(j)) \leq K \end{aligned} \quad (4)$$

即在满足搜索成本 $C[f]$ 不超过常量 K 的约束条件下,求解使搜索收益 $E[f]$ 最大化的协同搜索策略。

3.2 协同任务分配建模

协同攻击任务的核心问题是弹药资源分配问题。本节在传统武器目标分配问题的基础上,考虑战场信息不确定性和目标的时敏特性等问题,建立引入不确定性模型的鲁棒武器目标分配问题模型和解决时间约束的鲁棒滚动任务分配模型。

3.2.1 鲁棒武器目标分配问题

考虑一个标准的武器目标分配问题,假设有 N_T 个目标和 N_M 枚弹药,第 i 个目标的任务收益值为 c_i ,武器目标分配问题的任务是找出最优分配方案 $x \in X^{N_M}$ 使得攻击任务收益最大,其中 $X = \{0, 1\}$,问题可抽象为 0-1 整数规划问题如下式所示:

$$\begin{aligned} \max_x J &= \sum_{i=1}^{N_T} c_i x_i \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^{N_T} x_i &= N_M \end{aligned}$$

$$x_i \in \{0, 1\} \quad (5)$$

然而,由于传感器的误差、敌方的欺骗性策略以及我方情报失误等原因,实际作战任务中的目标收益值往往是不确定的。因此,要解决这一不确定性问题,需引入不确定性模型改进传统的武器目标分配问题,建立如式(6),所示的鲁棒武器目标分配问题模型:

$$\begin{aligned} \max_x J_k &= \sum_{i=1}^{N_T} (\bar{c}_{k,i} - \mu \sigma_{k,i}) x_{k,i} \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^{N_T} x_{k,i} &= N_M, x_{k,i} \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (6)$$

式中用目标收益值的不确定模型 $\bar{c}_{k,i} - \mu \sigma_{k,i}$ 代替式(5)中的确定模型 c_i ,其中 $\bar{c}_{k,i}$ 为目标收益值的平均值, $\sigma_{k,i}$ 为标准差, μ 为权重系数。

3.2.2 鲁棒滚动任务分配问题

由于时敏目标的时敏特性,本节将时间约束引入武器目标分配问题,采用滚动任务分配(receding horizon task assignment, RHTA)算法解决带时间约束的武器目标分配问题。

通过引入时间折算因子 λ^t 描述目标收益值与弹药对目标的攻击时间之间的关系。其中, $0 < \lambda \leq 1, t$ 代表弹药从当前点到毁伤目标所需要的时间。故引入时间约束的目标收益值模型为 $\lambda^t c_i$ 。引入时间折算因子后,问题会随着弹药和目标数量的增加而使得计算量急剧增加。因为所有可能的“弹药-目标”对的排列组合数量会随着弹药和目标数量的增加呈指数增长,分配问题将随着问题规模的增加而无法进行解算。因此,需采用滚动任务分配(RHTA)算法解决这一难题。

RHTA 并不会考虑所有可能的“弹药-目标”对的排列,而仅仅考虑只包含 m 个目标的“弹药-目标”对的排列,其中 $m \ll N_T$ 。选取最优排列后,弹药被分配至该排列中第一个目标进行攻击,以此类推,直至所有目标全部被分配。鲁棒滚动任务分配问题的数学模型为:

$$\max_x J = \sum_{v=1}^{N_S} \sum_{p=1}^{N_{vp}} \tilde{c}_{vp} x_{vp} \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \sum_{v=1}^{N_S} \sum_{p=1}^{N_{vp}} a_{vpi} x_{vp} = 1 \quad (8)$$

$$\sum_{p=1}^{N_{vp}} x_{vp} = 1, \forall v \in 1 \dots N_v \quad (9)$$

$$\tilde{c}_{vp} = \sum_{w \in P} \lambda^{t_w} \tilde{c}_w, \forall v \in 1 \dots N_v$$

$$x_{vp} \in \{0, 1\}, \tilde{c}_i \in C, t_i \in T$$

其中： N_{vp} 表示待分配给弹药 v 攻击的目标排列组数，每一组目标排列包含 m 个目标。约束(8) 表示每一枚弹药只能攻击一个目标。 a_{vpi} 是一个 0-1 矩阵，如果目标 i 包含在弹药 v 的目标排列 p 中，则 $a_{vpi} = 1$ ，反之则为 0。约束(9) 表示每一枚弹药只能选择一个目标排列。 \tilde{c}_{vp} 是指包含不确定性的时间折算目标收益值，目标排列 p 中包含目标 w ， λ^w 是指考虑弹药与目标之间飞行时间的折算因子。 \tilde{c}_i 和 \tilde{t}_i 均代表包含不确定性的模型，分别属于集合 C 和 T 。

3.3 航迹规划建模

协同搜索策略和协同任务分配建模分别给出了在协同搜索任务和协同攻击任务中弹药的搜索目标区域和攻击目标。航迹规划建模将解决弹药如何从起始点到达目标点，即搜索目标区域或攻击目标，且满足约束条件的问题。

3.3.1 优化问题描述

假设在地形信息已知的三维任务空间内，存在威胁区域和目标航路点，要求智能弹药的航迹经过目标航路点安全抵达目标点，并满足最小转弯半径和地形约束。这是一个带约束的多目标三维航

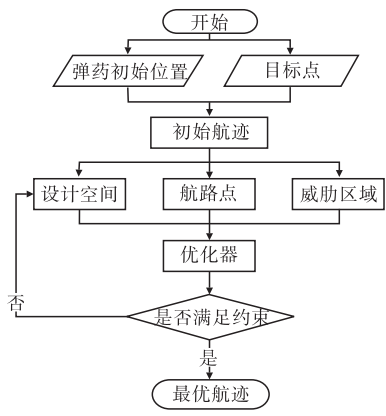


图 2 航迹规划问题求解流程图

迹规划问题，它的求解流程如图 2 所示。

3.3.2 航迹规划数学模型

航迹规划问题的数学模型包括威胁规避模型、目标侦察模型、燃料消耗模型，同时还包括最小转弯半径和地形约束：

$$\begin{aligned} \min C &= K_1 C_T + K_2 C_L + K_3 C_R \\ \text{s. t. } R &\geq R_{\min} \\ H &\geq H_{\text{safe}} \end{aligned} \quad (10)$$

其中： C_T 表示由于接近或侵入威胁区域而引起的代价值； C_L 表示生成航迹相对于初始航迹增加的额外燃油消耗所引起的代价值； C_R 代表偏离侦察目标点所付出的代价值。 K_1 、 K_2 和 K_3 是表示三种代价值之间相对重要程度的权重系数，默认 $K_1 = K_2 = K_3$ 且 $\sum_i K_i = 1$ 。

威胁规避模型的数学表达式：

$$C_T = \sum_{i=0}^{N-1} \max \{ R_T - \| p(u_i) - p_T \|_2, 0 \} \quad (11)$$

其中： $p(u_i)$ 指的是航迹曲线 $p(u)$ 上的点； p_T 是威胁区域中心点位置； R_T 是威胁区域的威胁半径。 $\| p(u_i) - p_T \|_2$ 表示点 $p(u_i)$ 到威胁区域的距离。如果点 $p(u_i)$ 落在威胁区域内部，函数将返回的代价值为正值，否则为 0。离威胁点越近，返回的威胁代价值越大。

燃料消耗代价通过生成航迹与初始航迹长度的差获得：

$$\begin{aligned} C_L &= L_u - L_0 \\ L_u &= \sum_{i=0}^{N-1} \| p(u_{i+1}) - p(u_i) \|_2 \end{aligned} \quad (12)$$

其中： L_u 表示生成航迹曲线 $p(u)$ 的长度； L_0 表示原始路径的长度。航迹曲线 $p(u)$ 的长度由各曲线段的长度和近似获得。

目标侦察模型的定义与威胁规避模型相似，其代价值由航迹偏离侦察区域引起，数学表达式为：

$$C_R = \sum_{i=0}^{N-1} \max \{ \| p(u_i) - p_R \|_2 - R_R, 0 \} \quad (13)$$

其中： p_R 是侦察区域的位置， R_R 为侦察区域半径。

4 结论

时敏目标的范围正在扩大，如已经有一些定义将恐怖分子纳入到时敏目标的范畴；同时，目标的时敏特性也在不断的提高，如导弹发射车的展开和转移时间正在进一步的缩短。因此，与之相抗衡的武器系统必将面临更严酷的挑战，需要开展深入的研究。智能弹药由于其小型化、多平台、智能化等特点，正在成为大力发展的新型弹药。通过协同技术可以实现对时敏目标的有效打击，因此，开展智能弹药时敏目标协同打击任务研究具有十分重要的意义。文中对作战任务中的协同技术进行了简要介绍，并结合作战任务分析建立了不同任务模式下的数学模型。对上述问题的深入研究将有利于我国对智能弹药时敏目标协同打击任务研究的进一步发展以及对时敏目标打击能力的进一步提升。

参考文献：

[1] Wilson G. A time-critical targeting roadmap[D]. Alabama: Air University, 2002.
 [2] Combat air forces concept of operations for time critical targeting[R]. 2000.

表 1 射击仿真统计表

命中数	次数	命中数	次数
0	1	6	11
1	5	7	9
2	11	8	6
3	14	9	6
4	19	10	2
5	16	11	0

从表 1 中可以看出发射 11 发炮弹,命中数小于 2 发的次数为 6,也就是有 94 次是可以毁伤目标,仿真结果与计算结果相符。

4 结束语

对于多炮射击也可以按单炮的方法计算,这也是弹道修正弹的一个特点。为简化运算模型,文中不考虑空炸的情况,以普通榴弹的射击效率模型为基础,充分考虑了弹道修正弹的弹道以及炸点分布的特点,

同时引入毁伤幅员概念,经过分析和层层推导,得出弹道修正弹的弹药需求量计算的数学模型。最后举例分析并利用计算机进行仿真,利用文中介绍的数学模型计算得出的弹药需求量与仿真的结果一致。该方法能够根据目标的特点和所要求达到的毁伤概率快速计算出所需弹药量,计算结果满足要求,可以为炮兵射击弹药需求量预测提供参考。

参考文献:

[1] 程云门. 评定射击效率原理[M]. 北京:解放军出版社, 1993:128 - 145.

[2] 张飞猛,言克斌,崔万善. 炮兵武器系统分析[M]. 北京:解放军出版社,2008:112 - 116.

[3] 王伟,马志赛. 制导炮弹的优势特点及发展趋势[J]. 飞航导弹,2011(7):18 - 22.

[4] 沙兆军,杨伯忠,刘怡昕. 子母弹对集群目标射击的效率评定模型及应用[J]. 弹道学报,2005,17(4):90 - 93.

(上接第 90 页)

[3] Department of defense dictionary of military and associated terms [M/OL]. 2001. <http://www.docin.com/p-299305758.html>.

[4] 廖炎平,刘莉. 区域控制弹药的发展趋势[J]. 飞航导弹,2009(4):35 - 37.

[5] Marzolf G S. Time-critical targeting predictive versus reactionary methods: An analysis for the future[D]. Alabama: Air University, 2004.

[6] Fleeman E L. Tactical missile design[M]. 2006.

[7] Baum M L, Passino K M. A search theoretic approach to cooperative control for uninhabited air vehicle[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit,2002.

[8] Nigam N, Kroo I. Control and design of multiple unmanned air vehicles for a persistent surveillance task [C]//12th AIAA Conference on Multidisciplinary Analysis and Optimization,2008.

[9] Nigam N, Kroo I. Persistent surveillance using multiple unmanned air vehicles [C]//Proceedings of the IEEE Aerospace Conference.

[10] Nigam N, Bieniawski S, Kroo I, et al. Control of multiple uavs for persistent surveillance: Algorithm description and hardware demonstration [C]// AIAA Infotech Aerospace Conference and AIAA Unmanned Unlimited Conference,2009.

[11] Nigam N. Control and design of multiple unmanned air vehicles for persistent surveillance [D]. STANFORD UNIVERSITY, 2009.

[12] 唐苏妍,朱一凡,李群,等. 多 agent 系统任务分配方法综述[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(10):2155 - 2161.

[13] 袁利平,夏洁,陈宗基. 多无人机协同路径规划研究综述[J]. 飞行力学,2009,27(5):1 - 6.