

无人攻击机编队配系优化算法

刘毅, 李为民, 赵全习, 崔超

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:以无人攻击机(UCAV)编队协同火力打击为背景,探讨了无人攻击机编队配系优化问题。首先分析了连续马尔可夫链(CTMC)理论描述无人攻击机火力打击的适用性,并利用CTMC理论对无人攻击机的作战过程进行建模,根据无人攻击机的特点构建了多型无人机打击多种目标的作战模型;对无人攻击机协同作战效果进行了预测,给出了效能预测的MATLAB求解框架;采用基于理想点法的决策方法,根据编队协同作战的预测效果对无人攻击机编队配系进行优化。算例分析表明本文的模型能够反映不同类型无人攻击机的打击特性,有效预测编队打击效能并确定最优配系。此方法能够准确描述无人攻击机编队的作战特性,算法便于计算机实现,为无人攻击机编队作战提供决策支持。

关键词:无人攻击机;编队;配系

中图分类号: TB114 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)02-0028-05

随着无人攻击机(UCAV),特别是高空高速无人攻击机技术的不断成熟,其作为远程快速打击和精确打击力量的军事意义不断凸显。无人攻击机编队可最大化任务效能和无人机的生存概率,提高火力打击的效能。由于不同类型的无人攻击机在性能参数和对目标杀伤效果上存在差异,如何根据无人攻击机的参数特性和战场环境对无人攻击机编队配系进行优化,是指挥员制定协同作战计划、落实作战决心的重要步骤;也是实现不同类型无人攻击机混编作战,合理利用资源,达成最优作战效果的基础。

1 无人攻击机编队配系优化概述

1.1 无人攻击机编队配系优化的概念

无人攻击机编队配系优化是指在对空中无人攻击机编队进行战术决策的过程中,通过综合考虑敌方目标数据(数量和类型等)、我方无人攻击机的作战任务、装载武器载荷的种类和数量等因素,选择最佳的组合方案,取得最优的打击效果。由于无人机攻击机类型一般在作战前给定,因此本文主要求解无人攻击机最佳数量组合方案。

无人攻击机编队配系优化属于军事预测与决策问题,需要通过对无人攻击机编队作战效能的预测为配系优化提供制定决策所必须的效能预测信息,因此首先应针对无人攻击机编队作战的特点,对其作战效能进行有效预测,再利用此预测信息进行编队配系的优化分析。

1.2 CTMC理论进行作战效能预测研究的适宜性分析

与传统的有人机作战过程有本质不同,随着传感器系统、机载处理器、决策支持算法和高精度自主导引头技术的快速发展,无人攻击机作战的自主化水平不断提升,其作战过程包含多个自主完成的子过程;对地面目标的探测、识别、杀伤目标、自身可靠性原因引起机械故障,均可认为是独立随机过程,且持续时间只与该子过程开始和结束的状态有关。因此假设无人攻击机作战的子过程(探测、识别、打击和机械故障)均是

* 收稿日期:2008-10-06

基金项目:国家“863”计划资助项目(2007AAXX1503)

作者简介:刘毅(1981-),男,河北定州人,博士生,主要从事反导作战运筹分析研究;E-mail:seagull089@126.com
李为民(1964-),男,甘肃民勤人,教授,博士生导师,主要从事防空作战系统工程研究。

相对独立、服从负指数分布的随机过程^[1-2]。

传统的概率理论难以建立无人攻击机数量、性能参数(对目标的发现概率、杀伤概率、可靠性等)到作战效能之间的映射关系,不能有效描述无人攻击机作战过程,更不能预测火力打击的效能,但马尔可夫链^[3]理论可以有效表征和解决该问题。

连续马尔可夫链(CTMC)最适合描述带有时间参数的无人攻击机作战过程,原因体现在以下2方面:首先,CTMC理论是用来描述一个随时间不断变化的随机过程,时间连续且状态转换时间服从负指数分布,战场态势由系统的状态信息决定。作战状态的转换依赖于当前状态信息,状态间转换时间由转换前后2个状态的参数决定。其次,CTMC在计算过程中可保存各种效能指标参数(如杀伤目标的期望值、任务执行期望时间等),能够比较全面地反映无人攻击机系统的作战效能。

2 基于CTMC理论的无人攻击机编队作战建模

2.1 无人攻击机编队作战的CTMC模型

为了建模和分析方便,假设^[4-6]:①无人攻击机不会受航程的限制;②无人攻击机不保存上次的搜索结果;③无人攻击机之间存在协同机制,不会发生一个目标被多次攻击的情况;④无人攻击机类型包含A、B2种,目标包括3型,1型目标(高价值目标)和2型目标(普通价值目标)为有效目标,3型目标为假(无效)目标;⑤A型为高空高速无人机,受敌方防空导弹威胁较小,B型为普通无人攻击机,受敌方防空导弹威胁较大,2型无人机均只能执行一次对地打击任务;⑥为了更全面反映无人攻击机的作战性能,选取无人攻击机的性能参数包括:发现目标概率、识别出有价值目标的概率、将无价值目标误识别为有价值目标概率和对不同目标的毁伤概率;战场数据包括无人攻击机以及敌方目标的数量,参数定义见表1。

表1 参数定义

Tab.1 Variables Definition

参数	定义	参数	定义
λ_i	第 <i>i</i> 型UCAV对目标的发现率	T_{ii}	第 <i>i</i> 型目标的价值
θ_i	第 <i>i</i> 型UCAV的任务失效率 (由于机械故障坠毁或丧失作战能力)	T_j	第 <i>j</i> 型目标的初始数量
r_i	第 <i>i</i> 型UCAV将非目标识别为无价值目标的概率	N_i	第 <i>i</i> 型UCAV的初始数量
q_{ij}	第 <i>i</i> 型UCAV有效识别出第 <i>j</i> 型目标的概率	n_i	第 <i>i</i> 型UCAV的实时数量
p_{ij}	第 <i>i</i> 型UCAV有效杀伤第 <i>j</i> 型目标的概率	t_j	第 <i>j</i> 型目标的实时数量

为了有效地表征无人攻击机火力打击的效果,我们选取无人攻击机和敌方目标的数量作为状态参数。故系统初始状态可表示为 (N_A, N_B, T_1, T_2) ,实时状态为 (n_A, n_B, t_1, t_2) 。

无人攻击机作战的连续时间马尔可夫链定义如下:设 $\{(X(t))\}$ 是一个无人攻击机作战的随机过程 $\{X(t)\} \subset \{(N_A, N_B, T_1, T_2), (n_A, n_B, t_1, t_2)\}$, t 表示作战持续时间可以取一切实数值。如果对任取的一组时间数值 $0 \leq t_0 < t_1 < \dots < t_n < u < t$,及任取的一组状态值 $i_0, i_1, \dots, i_n, i_0 = (N_A, N_B, T_1, T_2)$ 代表系统的初始状态, $i_1, i_2, \dots, i_n, i_n = (n_A, n_B, t_1, t_2)$ 代表系统的实时状态; $X(t)$ 的条件概率满足下式:

$$P(X(t) = j | X(t_0) = i_0, X(t_1) = i_1, \dots, X(t_n) = i_n, X(u) = i) = P(X(t) = j | X(u) = i) \quad (1)$$

即已知 $X(u) = i$ 时, $X(t)$ 的条件概率与在时刻 u 以前系统所处的状态无关,而只与状态 i 和状态 j 有关。根据1.2小节的分析可知,无人攻击机作战状态转换 $i \rightarrow j$ 包含以下7种事件:① (n_A, n_B, t_1, t_2) 到 $(n_A - 1, n_B, t_1 - 1, t_2)$ 为A型UCAV有效杀伤第1类目标;② (n_A, n_B, t_1, t_2) 到 $(n_A - 1, n_B, t_1, t_2 - 1)$ 为A型UCAV有效杀伤第2类目标;③ (n_A, n_B, t_1, t_2) 到 $(n_A, n_B - 1, t_1 - 1, t_2)$ 为B型UCAV有效杀伤第1类目标;④ (n_A, n_B, t_1, t_2) 到 $(n_A, n_B - 1, t_1, t_2 - 1)$ 为B型UCAV有效杀伤第2类目标;⑤ (n_A, n_B, t_1, t_2) 到 $(n_A - 1, n_B, t_1, t_2)$ 为A型UCAV失效、未杀伤有效目标、攻击无效目标;⑥ (n_A, n_B, t_1, t_2) 到 $(n_A, n_B - 1, t_1, t_2)$ 为B型UCAV失效、未杀伤有效目标、攻击无效目标;⑦ (n_A, n_B, t_1, t_2) 到 (n_A, n_B, t_1, t_2) 系统状态维持不变。

无人攻击机作战的CTMC是一个时间连续、状态离散化的马尔可夫链,由于系统状态不随时间变化,仅与系统初始状态、系统实时状态有关系,故可称为时齐的、有限状态的马尔可夫链,由于系统最终会达到一定程度的稳定终态,且不具备状态遍历性。

2.2 无人攻击机编队作战状态的概率转换模型

为了对无人攻击机作战效能进行预测,需要根据2.1小节构建的无人攻击机作战转换事件和无人攻击机的性能参数以及战场数据,构造准确的状态转换模型^[7-9]。

1) 作战事件①-④具有相同的转移概率,描述为*i*型UCAV有效杀伤第*j*类目标, $i=A,B, j=1,2$ 。其转移概率为:

$$P_1 = \frac{n_i \lambda_i}{\sum_{k=1}^2 n_k (\lambda_k + \theta_k)} \frac{t_j p_{ij} q_{ij}}{\sum_{m=1}^3 T_m} \quad (2)$$

2) 作战事件⑤-⑥具有相同的转移概率,描述为*i*型UCAV失效,或未杀伤有效目标,或攻击无效目标, $i=A,B$ 。其转移概率为:

$$P_2 = \frac{n_i (\theta_i + \lambda_i)}{\sum_{k=1}^2 n_k (\lambda_k + \theta_k)} \frac{\sum_{k=1}^2 t_k q_{ij} (1 - p_{ij}) + (\sum_{k=1}^3 T_k - \sum_{k=1}^2 t_k) (1 - r_i)}{\sum_{m=1}^3 T_m} \quad (3)$$

3) 作战事件⑦代表系统状态不改变,此时的转移概率为:

$$P_3 = \sum_{i=1}^2 \frac{n_i \lambda_i}{\sum_{k=1}^2 n_k (\lambda_k + \theta_k)} \frac{\sum_{k=1}^2 t_k (1 - q_{ik}) + (\sum_{i=1}^3 T_i - \sum_{i=1}^2 t_i) r_i}{\sum_{k=1}^3 T_k} \quad (4)$$

系统状态转移的有效性条件为: $(N_A - n_A) \delta_A + N_B - n_B \geq T_1 - t_1 + T_2 - t_2$ 。且易验证, $P_1 + P_2 + P_3 = 1$ 。系统的吸收状态条件包含以下2种情况: $n_A + n_B$ 或 $t_1 + t_2 = 0$,分别代表无人攻击机消耗完或地面目标被全部有效杀伤。

3 基于多属性决策的无人攻击机编队配系优化

3.1 无人攻击机编队火力打击效能预测

选取无人攻击机编队作战效能预测的指标为3项:①被毁伤目标的期望价值(E_v);②目标被毁伤的比例($P_{KT_i}, i=1,2$);③任务持续的期望时间(T)。

第1个效能指标度量了无人攻击机的作战有效性;第2个指标度量了目标被毁伤的程度;第3个指标度量了无人攻击机作战的效率。3项指标的量化公式如式(5)、式(6)、式(7)所示。利用MATLAB进行效能预测的步骤如下:

步骤1 对参数进行初始化。对战场参数和无人攻击机的性能参数进行赋值,设 $N_A = 1$ 。

步骤2 构建状态矩阵。根据系统状态的有效性条件构建状态矩阵 $S_{k \times 4}$ (k 为系统有效状态的数量,4个状态参数为 (n_A, n_B, t_1, t_2)),将系统状态分为吸收状态和中间转移状态。

步骤3 根据2.1小节的理论和状态矩阵求解状态转移类型矩阵 $P_{k \times k}$ 。

步骤4 计算一步转移概率矩阵。根据2.2小节的公式和 P_k 矩阵计算一步转移概率矩阵 $P_{k \times k}$ 。

步骤5 计算平稳转移矩阵。利用时齐马尔可夫链理论求解平稳转移矩阵 $P_{E_{k \times k}}$ ^[3]。

步骤6 求解效能指标。按照状态是否为吸收状态,将一步转移矩阵和平稳转移矩阵表示为:

$$P = \begin{bmatrix} I_{r \times r} & O \\ R & Q \end{bmatrix}, \quad P_E = \begin{bmatrix} I_{r \times r} & P_E \\ R_E & Q_E \end{bmatrix}$$

式中 r 为吸收状态的数量。

则有 $E_{KT_i} = \sum_{j=0}^r R_{E_{\text{Row_Init},j}} (T_i - S_{j,i+2}), i=1,2$ 。 E_{KT_i} 为第*i*类目标被杀伤的期望值,Row_Init为初始状态所在的行数。则3个效能指标的求解公式为:

$$E_v = \sum_{i=1}^2 E_{KT_i} T_{vi} \quad (5)$$

$$P_{KT_i} = E_{KT_i} / T_i \quad (6)$$

$$T = \sum_{j=0}^r \frac{(I - Q)_{\text{Row_Init},j}^{-1}}{S_{j,1}(\lambda_1 + \theta_1) + S_{j,2}(\lambda_2 + \theta_2)} \quad (7)$$

步骤7 如果 $N_A \geq M_{\text{MAX}}$, 则结束运行; 否则, $N_A = N_A + 1$, 返回到步骤2。

3.2 基于理想点法的无人攻击机编队配系优化决策

基于理想点法^[10]的决策方法可以处理不同量纲的数据, 具有鲁棒性强和便于编程实现的特点。将3.1节得到的 M_{MAX} 组效能指标作为决策属性, 采用正理想点的多属性决策模型如下:

根据3.1节的结果知, $A = (a_{ij})_{M_{\text{MAX}} \times 4}$ 和 $R = (r_{ij})_{M_{\text{MAX}} \times 4}$ 分别为决策矩阵及其规范化矩阵, 属性的权重向量为 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_4)$ 。矩阵 R 中的行向量 $(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{i4})$ 与方案 x_i 相对应。根据规范化矩阵 R , 可令正理想点(正理想方案)对应于 $x^+ = (1, 1, \dots, 1)$, 方案 x_i 越接近正理想点就越优。建立最优化模型如下:

$$\begin{cases} \min F^+(\omega) = \sum_{i=1}^n f_i^+(\omega) \\ \text{s. t. } \omega_j \geq 0, j \in M, \sum_{j=1}^m \omega_j = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中 $f_i^+(\omega) = \sum_{j=1}^4 (1 - r_{ij}) \omega_j^2$ 表示方案 x_i 与正理想点之间的偏差。建立拉格朗日函数为:

$$L(\omega, \xi) = \sum_{i=1}^{M_{\text{MAX}}} \sum_{j=1}^4 (1 - r_{ij}) \omega_j^2 + 2\xi \left(\sum_{j=1}^4 \omega_j - 1 \right) \quad (9)$$

求得权重 $\omega^+ = (\omega_1^+, \omega_2^+, \dots, \omega_4^+)$, 并代入 $f_i^+(\omega)$, ($i \in \{1, 2, \dots, M_{\text{MAX}}\}$), 按 $f_i^+(\omega^+)$ 的值由小到大的顺序对方案 x_i ($i \in \{1, 2, \dots, M_{\text{MAX}}\}$) 进行排序, $f_i^+(\omega^+)$ 的最小值所对应的方案为最优配系方案。

4 算例分析

考虑到无人机指挥中心的指挥控制以及通信能力, 取决策变量为: $N_A + N_B = 10$, 结果见图1。

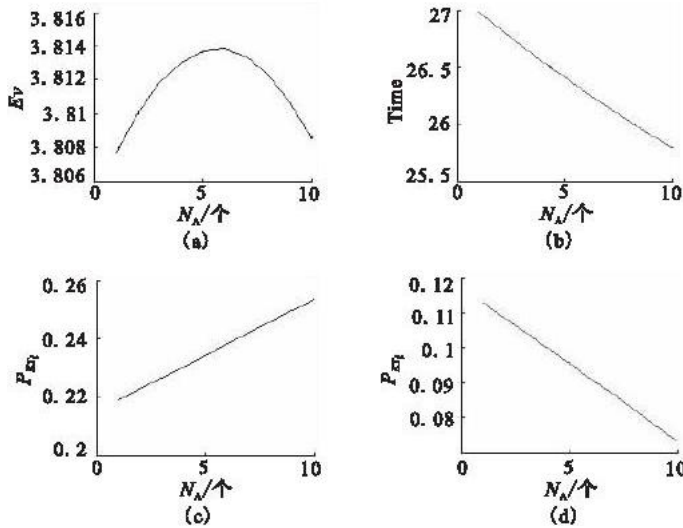


图1 A型攻击无人机数量与效能指标间关系

ig. 1 Relationship between the MOEs and the number of A-type UCAV

由图1可知A型无人机数量的增加并未导致对目标毁伤价值的增加, 有一个临界值可以使任务执行时间变短, 增强时效性; A型无人机对第1类目标毁伤相比第2类目标更有效; A型无人机和B型无人机分别对第1类和第2类目标毁伤价值高。

将4项指标值作为属性值, 再利用3.2节的理论进行属性聚合, 得出权值分布 $\omega^+ = (0.9606, 0.0275, 0.0085, 0.0034)$, 理想偏差矩阵 $f^+ = (15, 10, 5, 2, 1, 0, 1, 4, 8, 13) \times 10^{-4}$, 优化配系结果为A型无人攻击机6架、B型无人攻击机4架。

5 结束语

本文探讨了无人攻击机编队配系优化的计算方法,利用连续马尔可夫链模型模拟了比较真实的无人攻击机作战过程,利用马尔可夫链的特性计算出了作战效能指标值,将作战效能指标作为属性指标进行配系优化计算,所讨论的方法均便于计算机程序实现,便于推广。但是,由于对该问题的研究刚刚起步,相关理论有待于进一步的研究和深入探讨:例如攻击无人机具有多次打击能力的情况,不确定战场环境对作战结果预测和配系比例的影响,以及选取指标对作战效能影响的灵敏度等。

参考文献:

- [1] Kress M, Baggesen A, Gofer E. Probability Modeling of Autonomous Unmanned Combat Aerial Vehicles (UCAVs) [J]. Military Operations Research, 2006, 11(4): 5-24.
- [2] Bolonkin A. Some Optimal Problems in Search, Observation, and Attack [C]//AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. California: AIAA, 2005: 1-9.
- [3] 王梓坤, 杨向群. 生灭过程与马尔可夫链[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
WANG Zikun, YANG Xiangqun. Birth and Death Processes and Markov Chain[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [4] Baggesen A. Design and Operational Aspects of Autonomous Unmanned Combat Aerial Vehicles [D]. California: Naval Postgraduate School, 2005.
- [5] Vijay K Shetty, Moises Sudit. Priority-based Assignment and Routing of A Fleet of Unmanned Combat Aerial Vehicles [J]. Computers & Operations Research, 2008, 35: 1-14.
- [6] Yeonju Eun, Hyochoong Bang. Cooperative Control of Multiple UCAVs for Suppression of Enemy Air Defense [C]//AIAA the 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference. Chicago: AIAA, 2004: 1-14.
- [7] Stacy. The Global Hawk UAV Australian Deployment: Imaging Radar Sensor Modifications and Employment for Maritime Surveillance [J]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002, 2(6): 699-701
- [8] Corey Schumacher. UAV Task Assignment with Timing Constrains [C]//AIAA Guidance Navigation and Control Conference and Exhibit. Austin: AIAA, 2003: 1-7.
- [9] 曹泽阳, 王颖龙. 基于动态聚类分析的空袭编队判断模型[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2008, 9(4): 6-9.
CAO Zeyang, WANG Yinglong. Model of Attack Formation Estimation Based on Dynamic Clustering Analysis [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2008, 9(4): 6-9. (in Chinese)
- [10] LI Jun-lin, ZHU Chun-xiang. Decision Theory of Military Operations [D]. Wuhan: Air Force Radar Academy, 1998.

(编辑: 田新华)

Research on Air Strike Deployment Optimization of UCAV Formation

LIU Yi, LI Wei-min, ZHAO Quan-xi, CUI Chao

(Missile Institute, Air force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the analysis of the air strike made by a formation of UCAVs, the deployment optimization of the formation is discussed. Firstly, the attacking process is analyzed based on the real word scenario. Secondly, the Continuous Time Markov Chain theory is introduced to model the basic models and the probability transient models of the UCAV combat process. Thus the UCAV formation campaign result can be forecasted. The Multi-attribute method is used to integrate the data gained previously and the optimized deployment can be attained.

Keywords: Unmanned Combat Aerial Vehicle; formation; deployment