多机协同与多目标分配任务规划方法

魏铁涛 屈香菊

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191)

摘 要：多架飞机攻击多个目标区域是现代作战方式的重要特征，多机协同与多目标分配问题是提高团队作战效能的关键.针对该问题，综合考虑飞机能力差异、协同方式和任务环境的变化，提出多机协同目标分配的任务规划方法.建立了基于能力裕度评价的多机协同目标分配问题的数学模型.对多目标分配问题，通过约束飞机的能力裕度对分配方案进行筛选，保证在战场环境发生改变时任务兵力的完整性.仿真结果表明，采用这种方法得到的目标分配方案，适应任务目标突发性变化的能力更强.

关 键 词：多机；协同目标分配；能力评价；能力裕度

中图分类号：TP 301

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)08-0917-04

Route planning method for multiple vehicles coordinated target assignment

Wei Tietao Qu Xiangju

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Multiple vehicles coordinated target assignment is the key problem to improve the efficiency of team fighting in the mission of multiple vehicles attacking multiple target regions. A route planning method for this problem was presented with consideration of the differences in vehicle ability, cooperation mode and the abrupt change of the battle field situation. Based on the evaluation of vehicle residual ability, a mathematical model of multiple vehicles coordinated target assignment had been built. The target assignment schemes were chosen by constraints on the vehicle residual ability, then the integrity of the military strength was ensured. The final simulation results of this model show that a stronger adaptability for abrupt change of mission objective can be gained.

Key words: multiple vehicles; coordinated target assignment; ability evaluation; residual ability

在作战环境日益复杂，作战任务日益多样的趋势下，单架飞机所发挥的功能极为有限，一般都需要多架飞机相互协同才能完成.多机协同目标分配是将一组不同位置、不同价值、不同威胁程度的目标合理地分配给不同机种和飞机，以达到整体作战效能最大、代价最小的目的，是提高多机协同作战能力的关键技术之一[1].现代战场上，需要应对瞬息万变的战场态势，态势的改变可能导致原有分配方案效率降低甚至不可行[2].因此，在多机协同作战任务中，提高目标分配方案应对环境变化的能力非常必要.

多机协同目标分配属于组合优化问题，求解方法有穷举、模拟退火和遗传算法等[3-4].这些求解方法在处理飞行环境的突发性变化问题时，通常采用简化约束条件的方法，可以提高算法的搜索速度[5-7].但由于没有对分配策略本身做出改进，单纯以任务代价为优化目标得到的分配方案适应环境变化的能力较差.

本文针对存在突发性变化的任务环境研究多机协同目标分配问题，提出基于不同飞机的能力裕度评价，通过考虑飞机能力裕度约束，对可行目标分配方案进行筛选，在按照任务代价对目标分配问题进行优化的同时，最大限度地确保任务兵力的完整性.

收稿日期：2008-07-08

作者简介：魏铁涛(1981—)，男，河北石家庄人，博士生，flyerwtt@126.com.

1 任务情景描述

本文研究的变化环境中多机协同目标分配问题可以描述为:任务兵力包括 N 架飞机,用 U_1,U_2,…,U_N 表示.任务目标为攻击 M 个目标点,用 T_1,T_2,…,T_M 表示;其中 T_1,T_2,…,T_m 表示已知目标点,其位置在进行目标分配之前已经确定;T_m,T_{m+1},…,T_M 表示飞机在执行任务过程中可能出现的突发性目标点,其位置临时获知.

研究变化环境中多机协同目标分配问题的目标,是在考虑飞机性能差异、协同方式和不同种类的禁飞区域等约束因素的情况下,将目标点在任务兵力之间合理地进行分配,分配方案是目标点的有序集.目标分配方案确定后,飞机在飞行过程中获知突发性目标点时,需要对原有的目标分配方案进行调整,进而导致任务代价的增加.调整后增加的任务代价越小,说明原有目标分配方案对于任务环境不确定变化的适应性越好.

2 飞机能力裕度评价方法

飞机的能力裕度定义为对飞机某一时刻执行任务能力的一种度量,某一种目标分配方案所对应的飞机能力裕度是指飞机按该种方案完成任务时剩余的能力.为了选择对变化战场环境适应性更好的目标分配方案,需要对每一种目标分配方案所对应的飞机能力裕度进行评价.

2.1 影响飞机能力裕度的因素分析

飞机是一个复杂的系统,影响能力裕度的性能属性有很多,其中较为重要的包括:①续航能力,在一定的航程范围内,飞机的剩余航程越大,继续执行任务的能力就越强;②武器配备情况,飞机剩余的武器配备越充足,继续执行任务的能力就越强;③速度,飞机的速度范围,影响与其它飞机协同的能力,速度范围大协同能力强.

2.2 飞机能力裕度评价模型

选用降半梯形分布函数对上述属性进行量化[8],其物理意义是:对单机的某一单项性能属性 f,存在一个最高值 f_{M} 和一个最低值 f_{m},进行归一化,得到飞机单项性能(属性)的能力裕度函数,如下式所示:

$$\mu_f=\begin{cases}0 & (f\leqslant f_{\mathrm{m}})\\ \dfrac{f-f_{\mathrm{m}}}{f_{\mathrm{M}}-f_{\mathrm{m}}} & (f_{\mathrm{m}}<f<f_{\mathrm{M}})\\ 1 & (f\geqslant f_{\mathrm{M}})\end{cases}\tag{1}$$

在本文所研究的多机协同攻击多目标任务的目标分配问题中,影响飞机执行任务能力的因素有飞机的武器配备情况 c、飞行速度 v 和飞机的续航能力 l,故式(1)中 $f=c,l,v$.其中飞机的武器配备情况 c 对飞机整体能力评价的影响最大,飞机的续航能力 l 和飞行速度 v 次之.单机综合能力裕度按重要性加权,相对重要性取决于任务,决定协同方式和分配方案.对应某一种目标分配方案,单机综合能力裕度为

$$B_i(A_s)=k_c\mu_{ci}(A_s)+k_l\mu_{li}(A_s)+k_v\mu_{vi}(A_s)\tag{2}$$

式中,i 为飞机编号;A_s 为第 s 种目标分配方案,$A_s=\{T_{s,i,n}\}$,$T_{s,i,n}$ 为第 s 种分配方案中飞机 U_i 第 n 个攻击的目标点;k_c,k_l 和 k_v 分别为武器配备能力、续航能力和飞行速度的权系数,且 $k_c+k_l+k_v=1$.

3 基于能力裕度评价的目标分配

针对变化环境中多机协同目标分配问题,考虑飞机能力、协同方式和禁飞区域的约束,以及战场环境的改变对目标分配的影响,提出基于能力评价的多机协同目标分配方法.

3.1 约束条件

1) 目标访问数量的约束

定义目标分配矩阵[1-2] $\boldsymbol{W}^{N\times M}$:

$$w_{ij}=\begin{cases}1 & U_i\text{ 攻击目标 }T_j\\ 0 & U_i\text{ 不攻击目标 }T_j\end{cases}\tag{3}$$

$$\sum_{j=1}^{M}w_{ij}\leqslant D_{\max,i}\quad\forall\, i=1,2,\cdots,N\tag{4}$$

式中,$D_{\max,i}$ 为第 i 架飞机能够攻击(访问)的最大目标数.

2) 禁飞区域的约束

本文将禁飞区域约束分为两类.圆形禁飞区域用 $r\times 3$ 维矩阵 $\boldsymbol{R}$ 来描述,其中 (R_1,R_2),R_3 分别表示圆形禁飞区域圆心的坐标和半径.圆形禁飞区域的约束作用可以表示为

$$(x-R_1)^2+(y-R_2)^2\geqslant R_3^2\tag{5}$$

式中,(x,y) 为飞机路径上任意一点的坐标.

其它形状禁飞区域用 $N_{\mathrm{Z}}\times 4$ 的矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 来描述,其中,N_{Z} 表示其它禁飞区的数量,矩阵元素 (Z_{k1},Z_{k2}) 表示第 k 个禁飞区左下角的坐标,(Z_{k3},Z_{k4}) 表示右上角的坐标.矩形禁飞区的约束作用可以表示为[5]

$$\begin{cases}x-Z_{k3}\geqslant -Rr_{k1}\\ Z_{k1}-x\geqslant -Rr_{k2}\\ y-Z_{k4}\geqslant -Rr_{k3}\\ Z_{k2}-y\geqslant -Rr_{k4}\end{cases}$$

$$\sum_{z=1}^{4} r_{kz} \leqslant 3 \qquad \forall k \in [1,\cdots,N_Z] \tag{6}$$

式中,$r_{kz}(z=1,\cdots,4)$的取值决定了禁飞区域的形状.当一个 r_{kz} 取值为 0 时,禁飞区域位于一条无限长直线的一侧,另一侧则为自由区域;当两个 r_{kz} 取值为 0 时,禁飞区域位于一个两条边无限长的直角的内侧,或位于两条无限长的平行直线的内侧,外侧则为自由区域;当 3 个 r_{kz} 取值为 0 时,禁飞区为一个一端固定,另一端在无限远处的带状区域,带状区域的外侧则为自由区域;当 4 个 r_{kz} 取值为 0 时,禁飞区域为一矩形,矩形以外则为自由区域.

3) 能力裕度的约束

为保证任务兵力的完整性,对可行方案按能力裕度进行筛选.分配方案为目标的有序集,表示飞机按顺序攻击目标,对任一可行方案 $A_s=\{T_{s,i,n}\}$,定义能力裕度公差:

$$\delta(A_s)=\sqrt{[B_1(A_s)-\bar{B}(A_s)]^2+\cdots+[B_N(A_s)-\bar{B}(A_s)]^2} \tag{7}$$

式中,$B_i(A_s)$为飞机 U_i 按照此可行方案完成攻击任务后的能力裕度;$\bar{B}(A_s)=[B_1(A_s)+\cdots+B_N(A_s)]/N$ 为按照此可行方案完成攻击任务后各飞机的平均能力裕度.

能力裕度约束可以表示为

$$\delta(A_s)<\delta \tag{8}$$

式中,δ 为根据任务特点和决策者意志设置的能力裕度阈值.

3.2　最优目标分配函数

目标分配问题最优函数的优化目标包括飞机执行任务过程中产生的航程代价和威胁代价.

1) 对某一目标分配方案 A_s,其航程代价包括飞机访问目标点产生的航程代价和飞机返航时产生的航程代价:

$$L(A_s)=\sum_{i=1}^{N}\left(\sum_{j=T_{s,i,1}}^{T_{s,i,n}} P_{\mathrm{d},i,j}+P_{\mathrm{d},i,\mathrm{o}}\right) \tag{9}$$

式中,$P_{\mathrm{d},i,j}$为飞机 U_i 从当前位置到 T_j 的航程代价,文中通过计算 U_i 与 T_j 之间的最短距离得到,若 U_i 与 T_j 连线不经过禁飞区域,则 $P_{\mathrm{d},i,j}$ 为 U_i 与 T_j 连线长度 $d(i,j)$,若连线经过禁飞区域,则 $P_{\mathrm{d},i,j}$ 为 U_i,T_j 及被穿越的禁飞区域切点(顶点)连线长度之和;$P_{\mathrm{d},i,o}$ 为飞机 U_i 返航时的航程代价,计算方法与 $P_{\mathrm{d},i,j}$ 相同.

2) 对某一目标分配方案 A_s,其威胁代价包括飞机访问目标点产生的威胁代价和飞机返航时产生的威胁代价:

$$T(A_s)=\sum_{i=1}^{N}\left(\sum_{j=T_{s,i,1}}^{T_{s,i,n}} P_{\mathrm{t},i,j}+P_{\mathrm{t},i,\mathrm{o}}\right) \tag{10}$$

式中,$P_{\mathrm{t},i,j}$为飞机 U_i 从当前位置到 T_j 的威胁代价;$P_{\mathrm{t},i,\mathrm{o}}$为飞机 U_i 返航时的威胁代价.

3) 对某一目标分配方案 A_s,其综合代价为

$$J(A_s)=G_1\cdot L(A_s)+G_2\cdot T(A_s) \tag{11}$$

式中,G_1 和 G_2 为权系数.

因此,优化目标为使综合代价 $J(A_s)$最小,即得到 $J_{\min}(A_s)$.

3.3　算法流程

算法包括找到飞机出发点、目标点、禁飞区顶点(切点)间的可行航迹,计算可行航迹的最短路径生成代价列表,考虑飞机性能及能力裕度的约束对可行的目标分配方案进行筛选等过程.算法流程如图 1 所示.

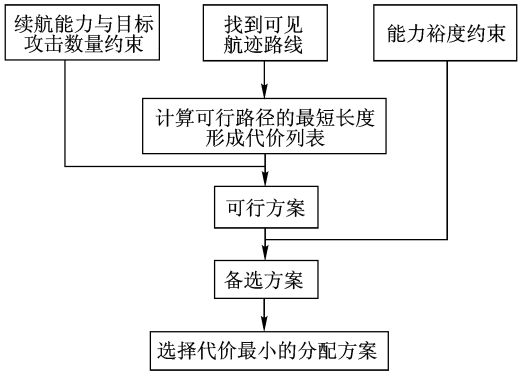

图 1　算法流程图

4　仿真实例分析

算例中,任务兵力为两架性能有差异的飞机,表 1 所示为飞机的性能数据.任务目标为攻击 8 个位置已知的目标点.在任务进行 45 min 之后,出现两个位置临时获知的突发性目标.

表 1　飞机能力数据

飞机	v_{m}	v_{M}	l_{m}	l_{M}	c_{m}	c_{M}
飞机 1	50	300	0	300	0	6
飞机 2	50	300	0	350	0	5

注:下标 m 表示各物理量的最低值,M 表示最高值

任务环境为 100 km×100 km 的区域,包含 4 个大小和位置已知的禁飞区域.除禁飞区域外,任务环境中无攻击性威胁.

分别采用单纯以任务代价为优化目标的目标分配算法,和本文提出的基于能力裕度评价的目标分配算法进行仿真计算.

表 2 给出了仿真计算中需要的一些主观量的取值;表 3 所示为部分仿真数据结果.图 2～图 5

分别为采用不同目标分配方法的目标分配结果示意图.

表2 一些主观量的取值

k_c, k_l, k_v	δ	G_1, G_2
0.8,0.1,0.1	0.2	1,0

表3 仿真结果数据表

仿真结果	仅存在固定目标	增加突发目标
未加能力裕度约束	329.19	420.87
增加能力裕度约束	365.52	376.87

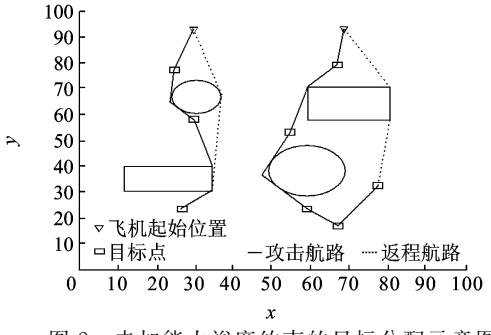

图2 未加能力裕度约束的目标分配示意图

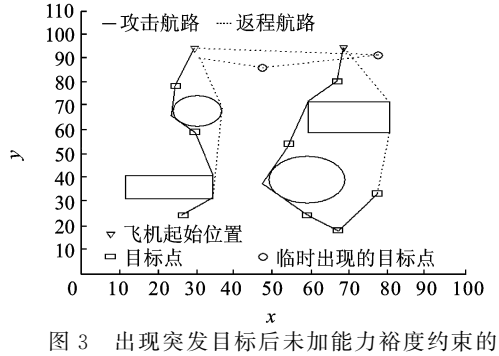

图3 出现突发目标后未加能力裕度约束的目标分配示意图

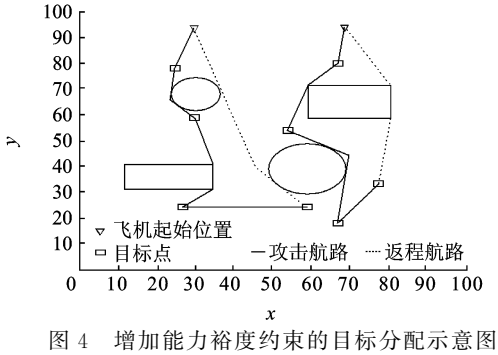

图4 增加能力裕度约束的目标分配示意图

采用未加能力裕度约束环节的目标分配算法得到的目标分配方案,如图2和图3所示.结合仿真结果数据分析可知:在战场环境已知,任务过程中无突发性目标的情况下,采用未加能力裕度约束环节的目标分配方法,能够得到任务代价最优的目标分配方案;但是这种方法得到的目标分配方案在战场环境发生变化,出现突发性目标的情况下,难以满足任务需要.

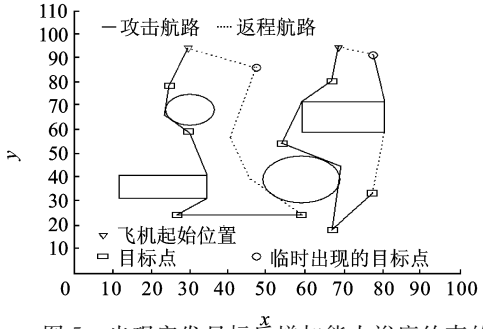

图5 出现突发目标后增加能力裕度约束的目标分配示意图

采用本文提出的基于能力裕度评价的目标分配方法得到的目标分配方案,如图4和图5所示.结合仿真结果数据分析可知:在战场环境完全已知,任务过程中无突发性目标的情况下,采用基于能力裕度评价的目标分配算法得到的是一种任务代价稍大于最优解的次优分配方案;但是在战场环境发生变化,出现突发性目标的情况下,采用这种方法得到的目标分配方案更为合理,适应任务目标突发性变化的能力更强.

5 结束语

针对变化环境中的多机协同目标分配问题,综合考虑飞机性能差异、协同方式以及战场环境变化的影响,提出了基于能力裕度评价的多机协同目标分配任务规划方法.该方法主要解决了目标分配方案中可能出现的不同飞机能力裕度差别悬殊,导致难以适应战场环境突发性变化的问题,能够充分考虑任务兵力的完整性,从而给出更为合理的分配方案.仿真算例考虑飞机续航能力、武器配备能力和速度的影响进行能力裕度评价,以两架飞机对8个目标点的攻击任务为例,但提出的方法可以推广应用到更多影响因素和更复杂飞行任务的综合.

参考文献(References)

[1] 廖沫,陈宗基.基于多AGENT分布协同拍卖的动态目标分配算法[J].北京航空航天大学学报,2007,33(2):180-183
Liao Mo, Chen Zongji. Dynamic target assignment method based on multi-agent decentralized cooperative auction[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(2):180-183(in Chinese)

(下转第924页)