

一种基于模体的无人机集群智能任务规划方法

王维平, 王涛, 李小波, 刘佳杰

(国防科技大学系统工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 由于无人机集群中通信受到制约, 无人机集群配系需要随着任务的改变而变化。如何在有限通信下进行无人机集群的智能任务规划成为研究的热点和难点问题。基于功能建立了无人机集群作战网络模体模型框架, 提出了6类不同功能类型的基础模体模型; 通过能力需求和信息需求将作战任务映射到完成这项任务需要的模体种类和数量; 利用“多维动态列表调度法”进行无人机集群的任务规划策略的自动生成。使用定制的NSGA-II算法通过改变任务执行顺序, 对作战时间和连接改变量进行任务规划策略的自动优化选择。通过一个案例对本文所提出的方法进行了初步验证。

关键词: 无人机集群; 模体; 多维动态列表调度; NSGA-II 算法

中图分类号: C935

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 04-1211-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201804001

Motif-based Intelligent Mission Planning Method for UAV Swarms

Wang Weiping, Wang Tao, Li Xiaobo, Liu Jiajie

(School of System Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Due to the restriction of communication among UAV swarms, configuration of UAV swarms needs to be changed dynamically along with the task changes. How to do mission planning under limited communication for UAV swarms has become a hot and difficult question. The UAV combat network motif model framework is built based on the function, and six different types of basic motif model are proposed. Through capability demand and communication demand, a task is mapped into types and numbers of motifs which are required to complete the task. The 'multidimensional dynamic scheduling list' method is used to automatically generate mission planning schemes. The NSGA-II algorithm is used to automatically select planning schemes towards optimizing the operational time and the quantity of changed connections through changing task execution order. The proposed method is validated through a case study.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV) swarm; motif; multidimensional dynamic list scheduling; NSGA-II algorithm

引言

与传统的有人机相比, 无人机拥有零伤亡、连

续作战时间长和全周期成本低的优点, 因此无人机在战争中扮演着越来越重要的作用。面临高度对抗性、高度不确定性、高度动态性的战场环境, 无人机的作战运用模式已经逐步从单平台作战向集群组网协同作战方向发展^[1]。无人机集群的任务规划成为无人机集群作战应用研究的热点和难点问题。

目前的研究主要从两个方向来探讨无人集群



收稿日期: 2018-03-22

修回日期: 2018-03-27;

项目名称: 国家自然科学基金(71373282);

作者简介: 王维平(1962-), 男, 满族, 辽宁金县, 博士, 教授, 博导, 研究方向为体系工程与体系仿真; 王涛(1976-), 男, 江苏连云港, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为人工智能与无人集群。

<http://www.china-simulation.com>

任务规划这一问题。(1) 许多研究人员将智能优化算法应用于任务规划问题模型的求解。陈侠等提出了一种基于二维矩阵形式编码的粒子群算法,解决无人机任务规划问题^[2]。Ramirez-Atencia C 提出了一种新的多目标遗传算法来求解复杂的无人集群任务规划问题^[3]。G.B. Lamont 开发了一个基于多目标进化算法的并行任务规划系统^[4]。(2) 由于规划问题的复杂性,国内外很多研究都在仿真系统中的进行关于无人集群任务规划的仿真实验。乔体洲等为解决无人机编队协同任务规划的仿真问题,提出了一个基于 HLA/RTI 的并行仿真架构进行协同任务规划仿真,通过真实的无人机气动力学仿真和飞控仿真,可以更真实有效地验证算法方案^[5]。王国强等针对无人机编队协同任务规划实验的成本和风险较高的问题,设计了一种基于 VR-Forces 的分布式的无人机编队协同任务规划仿真系统^[6]。Y.wei 等提出了一种基于作战时间的无人集群的任务规划仿真框架^[7]。

这些规划方法对无人集群的任务规划问题从不同角度进行了研究,并取得了丰硕的成果。然而,这些任务规划方法没有考虑到无人机之间的实际通信限制。一方面,由于受到无人机之间通信技术,例如带宽,频率等技术的水平制约,无人机集群的通信技术受到极大的限制。另一方面,战场环境复杂,甚至还经常面临敌方的电磁通信干扰,无人机之间的通信受到很大影响。因此,无人机集群需要随着任务的变化进行动态配系。如何在有限通信下进行无人集群的任务规划成为目前无人机领域研究的热点和难点问题。

针对这种情况,本文引入了模体作为无人集群配系的基本单元。模体是一种仅需要很少连接的一种基础结构单元。在基于模体的配系基础上,本文提出了一种基于模体的智能的考虑动态重构的无人集群任务规划方法。我们引入一个具有三层结构的总体框架规划模型。首先,通过目标使命分解法将使命分解为一系列具有逻辑关系的任务集合。然后,这些子任务通过能力需求与信息需求映

射到完成这些任务所需要的模体的种类和数量。通过多维动态列表调度法,将任务的优化执行顺序和完成每个任务所需的模体的种类和数量作为输入,自动生成任务规划方案。每种任务优化执行顺序都对应一种任务规划方案。任务排列顺序的组合爆炸造成了计算量的指数增加,从海量可行的任务规划方案中,寻找符合要求的优化规划方案是一个需要巨大计算量的问题。NSGA-II 算法是现在比较流行并且高效的双目标优化算法。本文基于一种定制的 NSGA-II 算法进行任务规划方案的优化选择。

最后本文结合了一个案例对本文所提的无人集群的任务规划方法的可行性和有效性进行了初步验证。

1 面向功能的无人机集群模体构建

模体是一种在特定的网络或者不同网络中重复出现的子网结构,可以反映一个框架内能够有效实现的功能^[8]。

模体是构建复杂网络的基础结构,模体在复杂网络中具有重要特性:

(1) 频繁性,模体在网络中出现的频率相较于其他随机拓扑结构要高很多。

(2) 无标度性,模体在网络中的出现频率与网络的规模无关。

(3) 基础性,模体是构成网络的简单基础图案,模体内部的结构以及模体之间的交互连接都较为简单。

文献[9]根据模体的这些特性,从作战网络中抽象出独立攻击模体和联合攻击模体,使用两种模体的数量进行作战效能评估。本文将模体引入无人集群协同作战网络中。首先,根据模体的频繁性,从无人集群协同作战网络中找出基础模体,将其作为基础的装备配系结构单元。其次,无人集群作战是大规模数量的无人机作战,由于模体的无标度性,可以由设计小规模无人集群网络配系进行大规模无人集群的作战网络设计。最后,模体具有简单基础性,模体内部结构以及模体之间的交互结

构简单,连接数量较少,对于受到地理环境限制、天气气候等诸多限制无人机之间的通信连接而言,模体适用于无人集群作战的设计。

本文基于无人机功能用途构建了无人机集群面向功能的模体模型,并在文献[7]研究的基础上提出了6类不同功能类型的基础模体。本文基于功能将无人机集群协同作战中的无人机分为4类:(1) 侦察无人机,英文记作 RUAV。(2) 决策无人机,英文记作 DUAV。(3) 攻击无人机,英文记作 AUAV。(4) 察打一体无人机,英文记作 RAUAV。

对无人机集群协同作战网进行观察,根据模体的特性,从无人机集群协同作战网络中抽象出了6种在网络中基础简单的、频繁出现的、具有实际作战意义的基础模体模型,建立无人机集群作战的模体模型。

(1) 侦察模体(M1): 如图1(a)所示,决策无人机与侦察无人机相连接的线形结构。根据作战任务要求,决策无人机向侦察无人机下达侦察命令,侦察无人机对目标区域进行侦察,并将侦察获得的信息传回给决策无人机。

(2) 攻击模体(M2): 如图1(b)所示,决策无人机与攻击无人机相连接的线形结构。根据作战任务要求,决策无人机向攻击无人机下达攻击命令,攻击无人机对指定目标和区域进行火力打击。

(3) 察打模体(M3): 如图1(c)所示,决策无人机与察打一体无人机相连接的线形结构。根据作战任务要求,决策无人机向察打一体无人机下达侦察攻击命令,察打一体无人机对指定区域进行侦察并对目标实施火力打击。

(4) 侦控打模体(M4): 如图1(d)所示,决策无人机与侦察无人机和攻击无人机相连接的“V形”结构。侦察无人机将侦察获取的信息传输给决策无人机,决策无人机结合战场信息与态势进行分析决策,将命令下达给攻击无人机,攻击无人机对目标实施火力攻击。

(5) 侦控察打模体(M5): 如图1(e)所示,决策无人机与侦察无人机、攻击无人机和察打无人机相

连接的放射形结构。侦察无人机将侦察获取的信息传输给决策无人机,决策无人机结合战场信息与态势,将命令下达给攻击无人机与察打一体无人机,攻击无人机对目标实施火力攻击,察打一体无人机实施侦察攻击。

(6) 侦控打评模体(M6): 如图1(f)所示,决策无人机与两个侦察无人机和攻击无人机相连接的放射形结构。侦察无人机将侦察获取的信息传输给决策无人机,决策无人机结合战场信息与态势,将命令下达给攻击无人机,攻击无人机对目标实施火力打击,火力打击结束以后攻击无人机将信息传回给决策无人机,决策无人机下达命令给第二个侦察无人机,对作战效果进行评估。

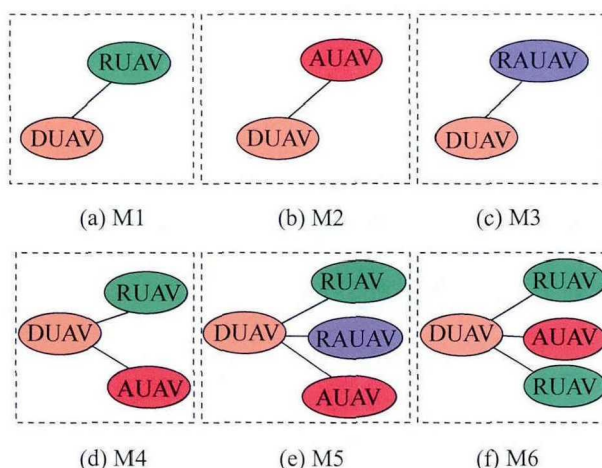


图1 基础模体模型
Fig. 1 Basic motif model

2 基于任务-模体需求映射的无人机集群配系

传统的作战任务配系是按照粒度分解原则,将作战任务不断分解,分解到元任务,通过能力需求矢量将作战元任务映射到武器装备。本文借鉴能力需求矢量,将作战任务映射到模体需求矢量。在能力映射的基础上,考虑到无人机集群协同作战中通信的重要性,增加了通信需求矢量。因为在无人机集群作战中,无人机之间的通信、态势共享对无人集群作战有着很大影响。作战任务的完成不仅需要能力的满足,还需要足够的通信连接与信息态势的

共享。所以本文将作战任务需求分解为作战能力需求与通信能力需求，如图2所示，通过能力需求与通信需求将作战任务映射到模体需求向量。

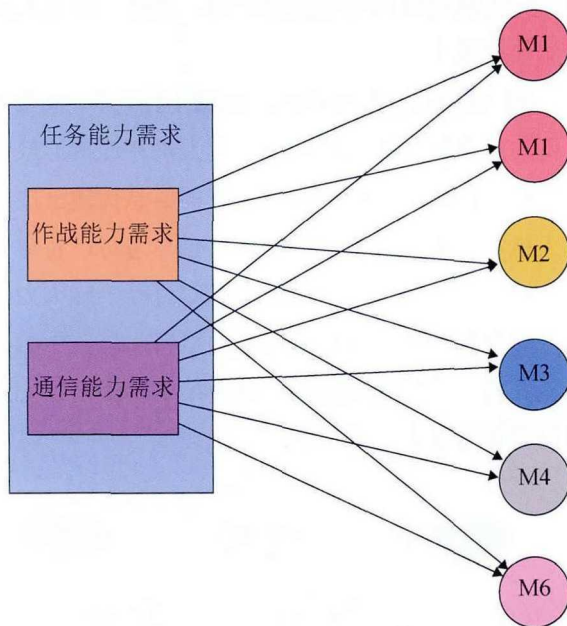


图2 任务需求分解映射图

Fig. 2 Task requirement decomposition mapping diagram

2.1 作战能力需求分解

参考有人装备配系研究中的传统能力需求矢量，并结合无人集群作战的具体特点，本文将无人机集群能力需求分解为6个能力值：低空侦察能力、高空侦察能力、空对地打击能力、空对空打击能力、巡察打击能力和信息处理能力。

根据完成任务的地理环境、目标数量和作战范围等这些具体参数可以量化求解完成任务所需要的6种能力需求值，即能力需求矢量。记任务 T_h 。 T_h 的能力需求矢量为 C_h ：

$$C_h = (C_{1h}, C_{2h}, C_{3h}, C_{4h}, C_{5h}, C_{6h}) \quad (1)$$

根据6种模体中无人机的种类、数量、每架无人机的能力以及无人机之间的通信连接，对以上6种模体的6种能力进行定义：为了表示方便，将低空侦察能力、高空侦察能力、空对地攻击能力、空对空作战能力、巡察攻击能力和信息处理能力分别记为第1种能力、第2种能力……第6种能力，第 i 个模体的第 j 种能力记为 β_{ij} 。

从能力需求角度出发，选取的模体应该具备完成任务的能力，即需要满足能力需求矢量的约束。假设完成一个作战任务所需的6种模体的数量分别为 $n_k (k=1, 2, \dots, 6)$ 。得到下面的线性不等式：

$$(n_1, n_2, \dots, n_6)^T \cdot \begin{pmatrix} \beta_{11} & \dots & \beta_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{61} & \dots & \beta_{66} \end{pmatrix} \geq C_h^T \quad (2)$$

2.2 通信能力需求分解

仅从能力域考虑作战任务到模体的映射是不够的。没有足够的通信连接与信息交互，即使能力值满足需求，也无法完成作战任务，还需要从通信需求考虑任务到模体的映射。

针对通信需求，本文主要考察连通度与通信率2个要素。

其中，连通度使用平均度来度量

$$\omega = \frac{l}{n} \quad (3)$$

通信率使用聚集系数来度量

$$\tau = \frac{2l}{n(n-1)} \quad (4)$$

式中： l 为边的数量， n 为节点数量。

$$l = n_1 + n_2 + n_3 + 2n_4 + 3n_5 + 3n_6 \quad (5)$$

$$n = 2n_1 + 2n_2 + 2n_3 + 3n_4 + 4n_5 + 4n_6 \quad (6)$$

网络中平均度表示每个节点平均连接的节点数量，对应到无人机通信网中每架无人机平均连接的无人机数量。通信率使用聚集系数度量，网络中聚集系数表示2个节点之间连通的可能性，对应无人机通信网中2架无人机之间有通信的概率。

对任务进行评估，参考任务复杂度，交战范围，目标分布等具体参数，评估计算完成任务的通信能力，包括连通度需求值 ω_i 和装备之间的通信率需求值 τ_i 。要求选取的模体的整体满足连通度以及通信率需求得到下列不等式：

$$\begin{cases} \omega \geq \omega_i \\ \tau \geq \tau_i \end{cases} \quad (7)$$

2.3 配系数学模型

通过将作战任务映射到能力需求与通信需求, 即对作战任务进行评估并计算完成任务所需的能力需求向量和通信需求向量。选取合适种类和数量的模体组合, 满足能力和通信的需求, 保证任务的完成。但在实际应用中, 必须考虑以尽量少的无人机去完成作战任务, 问题转换为一个有约束的多目标优化求解问题。为了简化计算, 本文使用线性权重法, 将多目标优化问题转换为单目标优化问题, 每个目标的权重为相对应的模体中无人机的数量, 这样优化的目标变为完成任务需要的无人机的总的数量。可将任务到模体的映射问题转换为线性规划问题:

$$\text{minimize } 2n_1 + 2n_2 + 2n_3 + 3n_4 + 4n_5 + 4n_6 \quad (8)$$

通过最小化总的使用的无人机的数量, 进行配系方案的求解。

3 基于多维动态列表调度法的任务规划方案自动生成

本节主要介绍无人机集群规划方案的自动生成。3.1 节讲述了总体使命的分解, 通过目标分解法将作战的总体使命进行分解, 分解为一系列的具有逻辑关系的子任务。3.2 节介绍了基于多维动态列表调度方案的自动生成。

3.1 使命分解

首先将作战的总体使命分解为一系列具有逻辑关系的任务。现有的分解方法有目标分解法, 功能分解法和领域分解法等。本文不关注使命分解方法, 在本文中使用目标分解法^[8]进行使命分解。假设使命被分解为一个任务集合 $T=\{T_1, T_2, T_3, \dots, T_N\}$, (N 为任务集合中任务的数量) 每个任务有两个属性:

- (1) 任务的预计完成时间 t 。
- (2) 任务的模体需求向量, 即完成任务需要的模体的种类以及数量。

一个使命被分解为一个任务集合, 这些任务之

间存在着内在的逻辑关系。在本文中, 我们使用任务图^[10]来表示他们之间的关系:

(1) 任务优先度^[11]: 在一个任务优先关系的链路中, 任务之间具有着优先的内在逻辑关系。在资源不充足的情况下, 在任务优先链路靠前的任务具有优先开始的权利。如果资源充足, 任务可以同时开始。

(2) 任务顺序^[12]: 在一个任务顺序链路中, 处在链路位置后面的任务需要前面的任务完成了才能开始。

如图3所示, 我们使用一个有向的任务图来表示任务之间的关系, 我们把任务之间的顺序关系视为具有严格时间顺序的特殊优先关系。

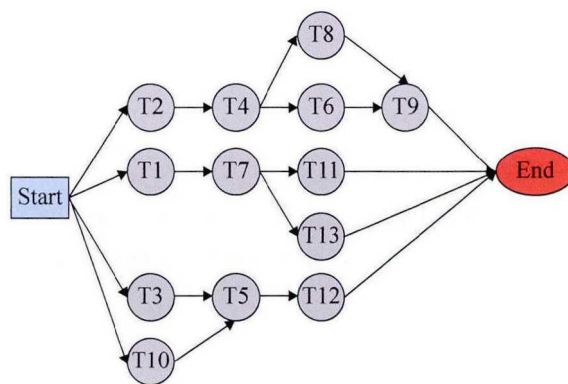


图3 任务图示例

Fig. 3 Example of a task graph

3.2 任务规划方案的自动生成

作战使命被分解为一系列具有逻辑关系的子任务。这些任务通过作战能力需求和通信能力需求映射到完成他们所需的模体。问题的难点就在于如何基于已有的无人机资源进行调度与规划, 构建任务需要的模体并取得更好的作战效能。

3.2.1 作战效能指标设计

在本文中, 我们主要关注任务规划策略的2个作战效能。

- (1) 使命完成时间: 作为一个衡量作战效能常用的指标, 它常被用来评价任务规划策略的优劣。
- (2) 通信连接的平均改变量: 无人机网络的通

信连接的改变会造成通信延迟^[13]。无人机网络通信连接的改变量有利于降低通信延迟,增强通信的稳定性,保障任务的实施。

3.2.2 多维动态列表调度法

无人机的调度问题是无人机任务规划的核心问题。多维动态列表调度法^[14]常被用作战争中的装备调度并且取得了不错的效果。因此,在我们的研究中,我们使用多维动态列表调度法。我们将模体分配给任务直到所有的任务完成。多维动态列表调度法主要包含2个步骤:

(1) 选择即将要开始的任務。

(2) 选择“空闲”的无人机构建完成这个任务需要的模体。

在步骤(1)中,一个“准备好”的任务被选择(准备好是指优先权比它高的任务都已经开始,顺序在它之前的都已经结束)。

在步骤(2)中,挑选“空闲”的无人机组成完成任务需要的模体(空闲是指不正处在完成任务期间)。步骤(1)之后,一个“准备”好的任务被挑选出来。如果“空闲”的无人机能够满足构成新的任务所需的模体,这个任务就可以开始。如果不能,这个任务只能等待,直到有任务完成并释放出无人机资源。

多维动态列表调度准则如下:

初始化

$t=0$ 开始时间初始化为0;

$n=0$ 连接改变的数量初始化为0;

$FT=[0]$ 初始化时间记录集合;

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}, M \text{ 是配系数数量矩阵;}$$

$R=[R_1, R_2, R_3, R_4]$ 初始化集群剩余资源集合,
 R_1, R_2, R_3, R_4 是可用的决策无人机, 侦察无人机,
攻击无人机和察打无人机的数量;

m 为对应的模体需求矢量

STEP1 完成时间、资源更新

$$f = \min(f_i), f_i \in FT$$

$$FT = FT \setminus \{f\}$$

$$R = R + m_{FG} \cdot M \text{ (FG 为对应的任务)}$$

$$\text{before} = m_{FG}$$

STEP2 判断资源能否完成下一任务

$$\text{if } m_{\text{next}} \cdot M > R$$

GO TO STEP1

else

$$\text{now} = m_{\text{next}}$$

$$R = R - m_{\text{next}} \cdot M$$

$$FT = FT \cup \{f + s_{\text{next}}\}$$

GO TO STEP3

end if

STEP3 检查资源能否完成下一个任务

for($i=1; i++$) {

$$\text{if } m_{\text{next}} \cdot M > R$$

break;

else

$$\text{now} = \text{now} + m_{\text{next}+i}$$

$$R = R - m_{\text{next}+i} \cdot M$$

$$FT = FT \cup \{f + s_{\text{next}+i}\}$$

}

STEP4 更新连接改变数量

$$n = n + n(\text{before}, \text{now})$$

STEP5 任务完成时间计算

所有任务完成后 $t = \max(FT)$

输出 n

通过多维动态列表调度法,在给定目标列表的前提下,可以计算出整个任务执行过程中总的通信连接该变量和任务的完成时间。

3.2.3 动态重构

在多维动态列表调度法中,当有任务完成,无人机资源被释放,检查现有的可使用的无人机资源能否满足下一个任务的资源需求。如果满足,下一个任务可以开始。如果不能,下一个任务继续等待,

直到有任务完成, 无人机资源释放。无人机之间的连接改变量越小, 无人机之间的通信延迟越低。作战过程中, 无人机集群的通信延迟会影响信息的传输与态势的共享, 会对作战效果产生较大的影响。因此本文从降低网络通信延迟的角度出发, 减少无人机通信连接的改变数量, 进行无人机集群的动态配系优化。

为了减少无人机之间的通信连接改变量, 降低通信延迟。从任务 T_i 到任务 T_j 连接重组的方式遵循“冗余重组”的演化规则, 如图 4 所示。

记任务 T_i 的模体向量为 \mathbf{m}_i 。

$$\mathbf{m}_i = (m_{1i}, m_{2i}, m_{3i}, m_{4i}, m_{5i}, m_{6i})$$

(9)

任务 T_j 的模体向量为 \mathbf{m}_j 。

$$\mathbf{m}_j = (m_{1j}, m_{2j}, m_{3j}, m_{4j}, m_{5j}, m_{6j})$$

(10)

任务 T_i 完成时, 根据刚完成的任务 T_i 和下一个任务 T_j 所需要的模体的种类以及数量即 \mathbf{m}_i 和 \mathbf{m}_j 进行连接的改变和演化。任务 T_j 所需要的模体先从已经存在的任务 T_i 的模体中寻找匹配。对于

匹配完缺少的模体, 使用 T_i 中 T_j 不需要的冗余模体, 将这些模体中无人机之间的通信断开, 按照 T_j 缺少的模体方式进行重组。因此, 从 T_i 到 T_j 连接改变的数量为:

$$n = \sum |\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j|$$

(11)

4 基于 NSGA-II 的任务规划方案优化

4.1 优化变量

任务的执行顺序确定以后, 把它作为多维动态列表调度法的输入, 计算出一个使命的完成时间和平均连接改变量。因此, 任务的优先执行顺序是任务规划策略的关键。在任务规划的数学模型中, 将任务优先执行顺序作为优化的变量, 需要满足任务图的约束。因为检查一个任务优先执行顺序是否符合任务图非常繁琐, 我们将任务图分解为任务链路, 如图 5 所示。只需要检查任务优先执行顺序是否满足任务链路。

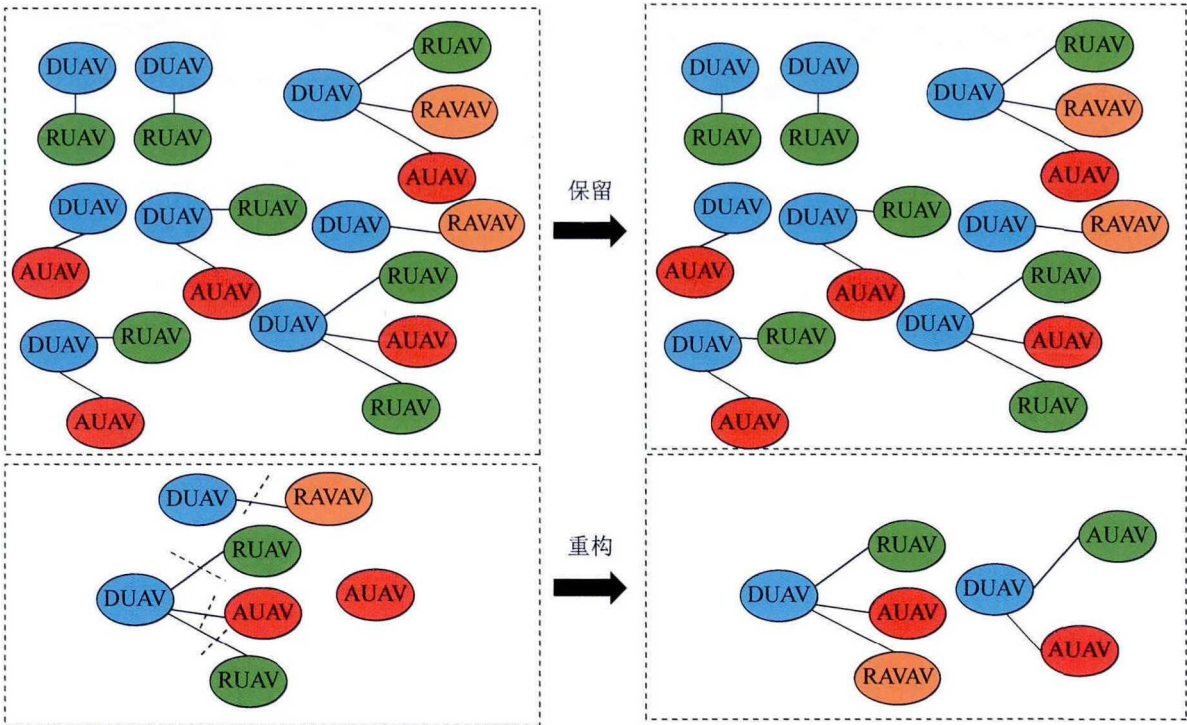


图 4 模体的保留和重构图
Fig. 4 Preservation and reconstruction of motifs graph

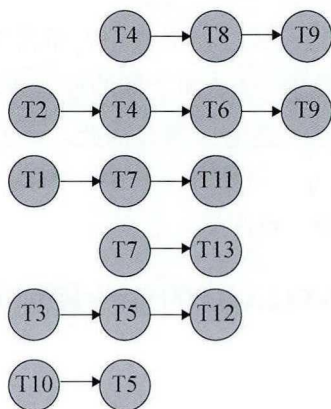


图5 任务链路图
Fig. 5 Task chains graph

4.2 目标函数

如3.2.1所示,有2个目标函数:

1. 使命完成时间 $t = \max(FT)$

2. 平均连接改变量: 计算平均连接改变量有两种情况。第一种情况, 当有任务完成时, 没有任务开始, 因为释放的资源不能满足即将开始的任务的资源条件约束。所有模体内部连接断开, 尽量避免敌方的侦察。连接改变量为:

$$n_d(t_j) = m(t_j) \cdot (1, 1, 1, 2, 3, 3)^T \quad (12)$$

$m(t_j)$ 是完成的任务的总的模体需求向量。 t_j 是这些任务的完成时间。另一种情况, 一些任务在其他任务完成时候开始。连接的改变量记为

$$n_r(t_k) = |m_c(t_k) - m_s(t_k)| \cdot (1, 1, 1, 2, 3, 3)^T \quad (13)$$

$m_c(t_k)$ 是在 t_k 时刻完成的任务的模体需求向量。 $m_s(t_k)$ 是在 t_k 开始的任务总的模体需求向量。

连接改变量记为 n

$$n = \sum_{t_j \in t_c \setminus t_s} n_d(t_j) + \sum_{t_j \in t_c \cap t_s} n_r(t_k) + n_c \quad (14)$$

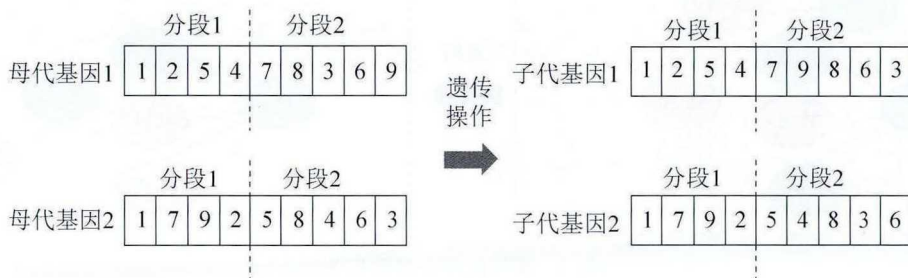


图6 交叉操作示意图
Fig. 6 Example of the crossover operator

4.3 算法求解

任务规划策略的选择成为一个双目标优化问题。优化的变量是任务的优先执行顺序, 优化的目标函数是使命的完成时间和平均连接改变量。NSGA-II^[15]算法(基于非支配排序的遗传算法)是Srinivas和Deb于2000年在NSGA的基础上提出的, 它比NSGA算法更加优越: 它采用了快速非支配排序算法, 计算复杂度比NSGA大大的降低; 采用了拥挤度和拥挤度比较算子, 代替了需要指定的共享半径, 并在快速排序后的同级比较中作为胜出标准, 使准Pareto域中的个体能扩展到整个Pareto域, 并均匀分布, 保持了种群的多样性; 引入了精英策略, 扩大了采样空间, 防止最佳个体的丢失, 提高了算法的运算速度和鲁棒性。

本文将任务执行顺序编码, 编码为长度 N 的任务顺序向量 $order$, 把任务完成时间和连接改变量作为优化函数使用NSGA-II算法进行迭代优化。

注意到问题的变量是受任务图约束的任务优化执行顺序, 为了将NSGA-II算法应用于问题的求解, 需要在算法中使用定制的遗传算子, 使自变量在遗传变化中保持任务之间的相对逻辑顺序。

4.3.1 交叉算子

本文使用分段交叉的遗传算子, 进行交叉操作。中间点将母代的两条基因链分为两段, 第一段保持不变, 第二段按照另外一条基因中的任务的相对顺序进行重新排序, 如图6所示。

4.3.2 变异算子

本文使用定制的变异算子, 进行变异操作。随机从基因链中随机选择一个点, 先判断这个任务能否和其先后的任务交换。如果能, 则进行二点交换的变异操作。如果不能, 则进行重新选择, 直至找

到一个能交换的任务点。如图 7 所示, 现有任务链路 T2-T1-T6-T7, T2-T4-T3, T8-T6-T5-T9, 我们随机选择了任务 T4, 发现 T4 之前的任务 T8 可以和 T4 交换。

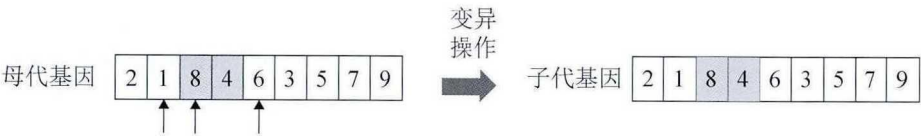


图 7 变异操作示意图
Fig. 7 Example of the mutation operator

5 案例研究

本节通过一个案例对无人集群的任务规划方法进行演示说明。实验假设如下: 无人机集群由 60 架无人机构成, 其中, 决策无人机 20 架, 侦察无人机 18 架, 攻击无人机 16 架, 察打一体无人机 6 架。现有一个作战使命, 经过分解得到 10 个作战任务, 通过能力需求与通信需求将任务映射到模体。

如表 1 所示, 共有 10 个任务。任务之间的逻辑关系为:任务优先顺序 T4-T7-T3, T2-T5。任务的先后顺序 T7-T3, T2-T5。

T3-T2-T1-T7-T6-T5-T4-T10-T9-T8, 完成时间最短, 为 52 min。

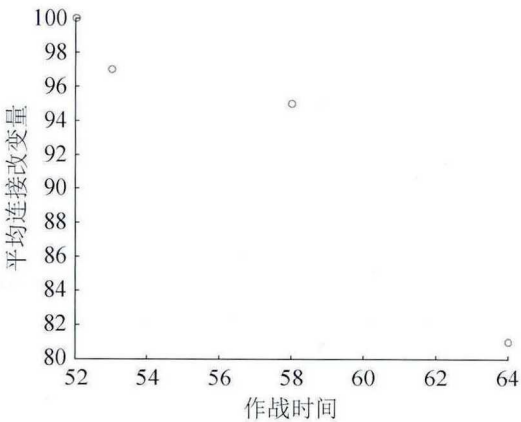


图 8 Pareto 前沿图
Fig. 8 Pareto front graph

表 1 任务模体需求表
Tab. 1 Demand of motifs for tasks

任务	M1	M2	M3	M4	M5	M6	t/min
T1	3	3	2	4	3	2	15
T2	2	4	3	3	4	3	8
T3	2	1	2	3	0	1	7
T4	1	2	1	0	1	1	12
T5	1	0	1	1	0	1	9
T6	0	1	1	0	1	0	5
T7	2	1	0	1	2	1	6
T8	1	2	1	0	1	2	11
T9	3	1	0	1	0	2	10
T10	2	0	1	2	1	0	18

当要求连接网络最稳定即网络连接变化数量最小时, 任务的完成顺序为 T3-T2-T1-T7-T6-T5-T4-T8-T9-T10, 此时连接改变量最小为 81, 完成时间为 64 min。

而当要求两者都达到较优的情况时, 则可以在其余 2 个 Pareto 最优解中选取。

如图 8 所示, 经过 NSGA-II 算法的 50 次迭代, 得到 Pareto 前沿解, 存在着 4 个 Pareto 最优解。可以根据具体的任务需要选择 Pareto 最优解。当要求完成任务时间最短时, 可以选择任务顺序为

6 结论

针对有限通信下的无人机集群任务规划问题, 本文提出了一种基于模体的无人机集群智能任务规划方法。使用模体作为无人机集群配系的基本单元, 支持无人机集群任务规划方案中的规模粒度可变。使用多维动态目标列表调度法, 实现了任务规

划策略的自动生成。基于 NSGA-II 算法实现了任务规划策略的自动优化选择。最后本文通过一个案例对基于模体的智能任务规划方法的有效性进行了验证。

下一步, 将结合仿真实验验证本文所提的基于模体的无人机集群智能任务规划方法的有效性。

参考文献:

- [1] 牛轶峰. 无人机集群作战概念及关键技术分析[J]. 国防科技, 2013, 34(5): 37-43.
Niu Yifeng. Analysis of the concept and key technology of unmanned aerial vehicle cluster operation[J]. Journal of Defense Science, 2013, 34(5): 37-43.
- [2] 陈侠, 胡永新, 徐光延. 面向多无人机任务分配的二维编码粒子群算法[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(12): 3045-3049.
Chen Xia, Hu Yongxin, Xu Guangyan. Two-dimensional coded particle swarm optimization (PSO) algorithm for multi UAV task assignment[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(12): 3045-3049.
- [3] Ramirez-Atencia C, R-Moreno M D, Camacho D. Handling swarm of UAVs based on evolutionary multi-objective optimization[J]. Progress in Artificial Intelligence (S2192-6352), 2017, (11):1-12.
- [4] Lamont G B, Slear J N, Melendez K. UAV Swarm Mission Planning and Routing using Multi-Objective Evolutionary Algorithms[C]//Computational Intelligence in Multicriteria Decision Making, IEEE Symposium on. USA: IEEE, 2007: 10-20.
- [5] 乔体洲, 郭新平, 李亚威, 等. 动态环境下的多无人机协同任务规划仿真[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(9): 2126-2132.
Qiao Tizhou, Guo Xinpeng, Li Yawei, et al. Multi unmanned aerial vehicle collaborative task planning simulation under dynamic environment[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 2126-2132.
- [6] 王国强, 罗贺, 胡笑旋. 无人机编队协同任务规划仿真系统研究[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(8):1856-1862.
Wang Guoqiang, Luohe and Hu Xiaoxuan. Research on collaborative task planning simulation system of unmanned aerial vehicle formation[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(8):1856-1862.
- [7] Wei Y, Blake M B, Madey G R. An operation-time simulation framework for uav swarm configuration and mission planning[J]. Procedia Computer Science (S1877-0509), 2013, 18(1): 1949-1958.
- [8] Zhang L, Orosz G. Motif-Based Design for Connected Vehicle Systems in Presence of Heterogeneous Connectivity Structures and Time Delays[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (S1524-9050), 2016, 17(6):1638-1651.
- [9] Youngwoo Lee, Taesik Lee. Network-based Metric for Measuring Combat Effectiveness[J]. Defence Science Journal (S0011-748X), 2014, 64(2): 115-122.
- [10] Abdeyazdan M, Parsa S, Rahmani A M. Task graph pre-scheduling using nash equilibrium in game theory [J]. TJSC (S0920-8452), 2013, 64(1): 177-203.
- [11] Petters S M, Bertogna M, Davis R I. Limited Pre-emptive Global Fixed Task Priority[C]// IEEE, Real-Time Systems Symposium. Vancouver, Canada, IEEE Computer Society, IEEE, 2014: 182-191.
- [12] Benoit A, Hakem M, Robert Y. Fault tolerant scheduling of precedence task graphs on heterogeneous platforms [C]//IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing. Miami, USA, IEEE, 2008: 1-8.
- [13] 付晓梅, 赵梦微, 李奕, 等. 无人机通信网络动态联盟形成方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(1): 193-197.
Fu Xiaomei, Zhao Mengwei, Li Yi, et al. A dynamic alliance formation method for UAV Communication Network[J]. System engineering and electronic technology, 2017, 39(1): 193-197.
- [14] Yang D S, Lu Y L, Liu Z, et al. Research on algorithms of task scheduling[C]//International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Shanghai, China, IEEE, 2004: 42-47.
- [15] Deb K, Agrawal S, Pratap A, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation (S1089-778X), 2002, 6(2): 182-197.