

控制与决策

Control and Decision

基于多目标优化的Holonc-C2组织协作式资源动态调度方法

王勋, 贾方超, 张杰勇, 万路军, 焦志强

引用本文:

王勋, 贾方超, 张杰勇, 等. 基于多目标优化的Holonc-C2组织协作式资源动态调度方法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(6): 1472–1481.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1032>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于正态云模型的状态转移算法求解多目标柔性作业车间调度问题

State transition algorithm based on normal cloud model for solving multi-objective flexible job shop scheduling problem
控制与决策. 2021, 36(5): 1181–1190 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1233>

基于分解的多目标多因子进化算法

A multiobjective multifactorial evolutionary algorithm based on decomposition
控制与决策. 2021, 36(3): 637–644 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0525>

基于改进NSGA-II算法求解多目标资源受限项目调度问题

An improved NSGA-II algorithm for multi-objective resource-constrained project scheduling problem
控制与决策. 2021, 36(3): 669–676 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0906>

基于复杂昂贵仿真的体系效能多目标优化

Complex and expensive simulation based multi-objective optimization to system-of-system effectiveness
控制与决策. 2021, 36(3): 589–598 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0844>

基于负荷平衡的柔性预约决策

Flexible outpatient appointment decision model with loading balance
控制与决策. 2021, 36(1): 226–233 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1690>

基于多目标优化的Holon-C2组织协作式资源动态调度方法

王 勋^{1,2†}, 贾方超³, 张杰勇¹, 万路军⁴, 焦志强¹

(1. 空军工程大学 信息与导航学院, 西安 710077; 2. 国防科技大学 信息通信学院, 西安 710106;
3. 空军通信士官学校, 辽宁 大连 116600; 4. 空军工程大学 空管领航学院, 西安 710051)

摘要: 针对Holon-C2组织协作式资源的动态调度问题,对战场上的突发事件进行分析,面向任务属性变化、可用平台减少和任务数量变化3类基本突发事件,提出Holon-C2组织双层结构下针对突发事件的协作机制,在战术决策Holon模块构建两种多目标优化模型,在战役决策Holon模块提出战术Holon协作选择方法.仿真实验表明,所提出的Holon-C2组织协作式资源动态调度过程能够有效处理单个战术Holon无法处理突发事件的情况,可实现多个战术Holon的协作,验证了所提方法的可行性.

关键词: 指挥控制组织; 多目标优化; Holonic; 资源动态调度

中图分类号: E917

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1032

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 王勋,贾方超,张杰勇,等.基于多目标优化的Holon-C2组织协作式资源动态调度方法[J].控制与决策,2021,36(6): 1472-1481.

Holon-C2 organization collaborative resource dynamic scheduling method based on multi-objective optimization

WANG Xun^{1,2†}, JIA Fang-chao³, ZHANG Jie-yong¹, WAN Lu-jun⁴, JIAO Zhi-qiang¹

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. College of Information and Communication, National University of Defense Technology, Xi'an 710106, China; 3. Sergeant School of Air Force Communication, Dalian 116600, China; 4. Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to solve the collaborative dynamic resource scheduling problem in Holonic-C2 organization, Firstly, the emergencies on the battlefield are analyzed, and three basic types of emergencies are given, such as changes in task attributes, reduction of available platforms, and changes in the number of tasks. We propose a collaborative mechanism based on the Holonic-C2 organization's two-layer structure to deal with emergencies. Two multi-objective optimization models are built for tactical decision Holon and a kind of tactical Holon selection method is provided for operation decision Holon. The simulation experiments show that the proposed Holonic-C2 organization collaborative dynamic scheduling method can effectively deal with the situation of that a single tactic Holon cannot handle emergencies well, and realizes the cooperation of multiple tactical Holons, which verifies the feasibility of the proposed method.

Keywords: command and control organization; multi-objective optimization; Holonic; resource dynamic scheduling

0 引言

现代战争是复杂作战环境下体系与体系之间的对抗,为了掌握作战的主动权,指挥控制(command and control, C2)组织^[1]在其运行过程中需具备应对各类突发事件的处置能力,能够对自身的作战资源进行实时整合、动态调度、灵活运用,进而保证组织能够获取并维持对抗优势^[2-3]. C2组织的资源动态调度是指针对战场中出现的突发事件,组织按照一定的规则对其自身作战平台与作战任务之间的执行关系进

行调整,在调整代价尽可能小的基础上达到最优任务完成效果^[4].目前,国内外的相关研究主要集中在以多无人机协同作战为背景的分布式任务分配领域,以分布式拍卖^[5-6]、合同网^[7-8]等基于市场机制的算法作为问题的解决方法.文献[9]研究了多智能体系统协作环境下的任务分配问题,提出了基于联盟、公告板、优先级的3种合同网改进方法,降低了系统的通信量,减少了信息阻塞,提高了合同网的协商效率;文献[10]针对多战机的多目标分配问题进行了研究,建

收稿日期: 2019-07-18; 修回日期: 2020-02-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573017, 61703425).

†通讯作者. E-mail: wxkgdxy@163.com.

立了动态不确定环境下的协同多目标分配模型,采用分布式网络结构改进了组合拍卖算法,并设计了新的启发式方法,提高了算法的稳定性和可扩展性;文献[11]为了实现C2组织灵活的分布式规划,提出了基于Holon的双层控制结构,给出了战役战术双层规划过程,基于多目标进化算法(MOEAs)进行了多目标优化,提高了C2组织资源配置的灵活性. 本文基于文献[11]Holon双层控制结构的基础上提出Holon-C2组织结构,在此基础上研究针对突发事件的战术决策实体和战役决策实体协作式资源规划方法.

1 Holonic-C2组织概念模型

1.1 Holonic-C2组织的基本结构

C2组织是战场上各作战单元围绕特定的作战目的,通过多种作战关系有机结合而形成的面向使命任务的军事组织^[12]. Holonic-C2组织^[13]是一种松耦合关系的双层指挥控制组织,兼具集中式和协作式决策能力,能够根据条件的变化实现决策方式的自主适应^[14]. Holonic-C2组织的基本组成单元为Holon, Holon是具有自治能力和协作能力的单元模型,同时具有“部分”和“整体”属性的实体^[15]. Holonic-C2组织涉及的元素包括决策Holon、平台Holon、资源、任务. 根据指挥控制的层级不同, Holonic-C2组织划分为战役Holon和战术Holon,战役Holon是执行战役级作战行为的单元,其由一个战役决策Holon与若干个战术Holon构成,战术Holon是执行战术级作战行为的单元,其由一个战术决策Holon与若干个平台Holon构成.

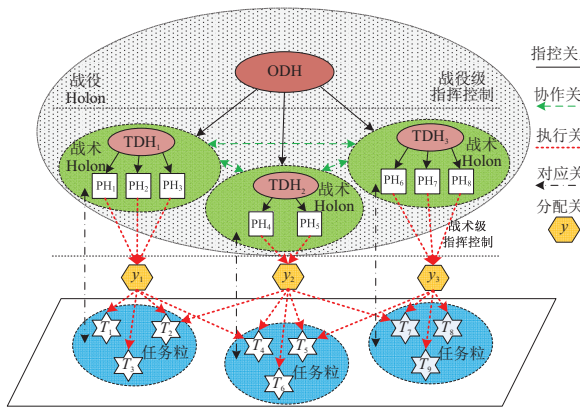


图1 Holonic-C2组织结构

与传统的C2组织相比, Holonic-C2组织中Holon单元具备更鲜明的自治性和协作性,战术决策Holon不再单纯发挥指挥控制平台的作用,而是具有更强的自主决策能力,能够对资源调度方案的制定和调整进行有限的决策;战术Holon之间的协作不仅执行战役决策实体协作指令,而且以任务的顺利完成为导向,

主动寻求战术Holon间的协作.

1.2 Holonic-C2组织的基本单元

定义1 决策Holon (decision Holon, DH) 是 Holonic-C2组织各层级Holon中具备自主决策、交互协作和指挥控制的核心单元,分为战役决策Holon (operational decision-Holon, ODH) 和战术决策Holon (tactical decision-Holon, TDH).

定义2 资源(resource, R)是指C2组织作战过程中不可分割的基本单元,用于对作战平台某一项作战能力大小的定量描述和为完成作战任务所需求的某些能力的定量描述.

定义3 平台Holon (platform Holon, PH),简称平台,是组织中承载作战资源的实体单元,是作战任务的直接参与者. $PH = \{PH_1, \dots, PH_j, \dots, PH_J\}$, J 为平台Holon的数量. PH_j 的资源能力向量可以表示为 $r_j = [r_{j1}, \dots, r_{jl}, \dots, r_{jL}]$, r_{jl} 为第 j 个平台Holon能够提供的第 l 种资源的数量. 所有平台的资源能力矩阵如下所示:

$$r = (r_{jl})_{J \times L}. \tag{1}$$

其中: r_{jl} 表示该平台 PH_j 具备的第 l 种资源的数量, $j = 1, 2, \dots, J$, J 表示集合中平台的数量, $l = 1, 2, \dots, L$, L 表示平台所具备的资源类型数量.

定义4 任务(operation task, T)由作战使命分解而来,是在特定的时间窗口内,需要具有特定资源能力的平台完成的军事行动,是组织需要处理的对象. 作战任务构成的集合可以记为 $T = \{T_1, \dots, T_i, \dots, T_I\}$, 其中 I 表示集合中任务的数量. 资源需求和起止时间是任务集合中的任意一个任务 T_i 均具备的基本属性,如下所示:

$$S^T = [R, t]. \tag{2}$$

其中: R 表示任务的资源需求属性矩阵, t 表示任务的时间属性矩阵.

任务 T_i 的资源需求向量记为 $R_i = [R_{i1}, \dots, R_{il}, \dots, R_{iL}]$, 所有任务的资源需求矩阵如下所示:

$$R = [R_{il}]_{I \times L}. \tag{3}$$

其中: R_{il} 表示任务 T_i 对第 l 种资源能力的需求数量, $i = 1, 2, \dots, I$, I 表示任务的数量, $l = 1, 2, \dots, L$, L 表示处理该资源能力类型的数量.

任务 T_i 的起止时间记为二元数组 $t_i = (ts_i, te_i)$, 所有任务的时间属性矩阵如下所示:

$$t = [(ts_i, te_i)]_{1 \times I}. \tag{4}$$

其中: ts_i 为任务 T_i 的起始时刻, te_i 为任务 T_i 的结束时

刻, $i = 1, 2, \dots, I$, I 表示任务的数量.

定义5 任务-平台分配关系是以任务对资源需求的满足程度为依据,所有平台到所有任务的对应关系. C2组织的任务-平台分配关系矩阵如下所示:

$$y = [y_{ij}]_{I \times J}. \quad (5)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, I$, $j = 1, 2, \dots, J$; y_{ij} 表示任务 T_i 与平台 PH_j 的执行关系,其赋值如下所示:

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & PH_j \text{ 执行 } T_i; \\ 0, & PH_j \text{ 不执行 } T_i. \end{cases} \quad (6)$$

2 Holonic-C2组织资源调度方案调整问题

2.1 Holonic-C2组织使命任务规划过程

通常情况下, Holonic-C2组织主要处理战役级的作战使命,其资源调度方案的制定更侧重于整体的可行性. 为了达到资源调度方案的持续可行性要求, Holonic-C2组织将作战使命划分成若干个阶段,按作战阶段的时间顺序制定资源调度方案,对临近阶段的作战任务进行精确规划,对后续阶段的任务进行粗略规划,并考虑各类突发事件的影响,适当调整临近阶段资源调度方案形成最终执行的资源调度方案^[6]. Holonic-C2组织的使命规划过程如图2所示,规划阶段1预规划时间段1和时段2两个时间段任务,规划阶段2调整时间段2的资源调度方案,连续的两个规划阶段完成了对时间段2内可执行资源调度方案的制定,通过这种时间上的滚动规划实现整个作战使命的顺利完成.

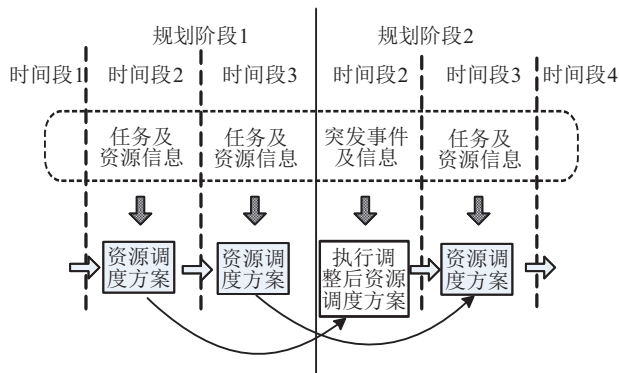


图2 Holonic-C2组织滚动时域规划过程

2.2 Holonic-C2组织资源动态调度问题

2.2.1 问题分析

针对战场上出现的突发情况, C2组织主要有两类应对方法. 一类是基于冗余备份的思想,每一次战役行动前均保证具备较为充足的平台资源,利用预留的一部分平台应对突发事件,保证原资源调度计划顺利实施;另一类是基于调整优化的思想,利用现有平

台的任务执行关系的调整应对突发事件,保证所有任务的顺利完成^[7]. 第1类处理方法能够有效处理各种突发事件,但是,实际的作战行动往往是资源有限条件下的调度行为,战役决策者更倾向于发挥所有平台资源的效能,因此,第1类方法应用范围具有局限性;第2类方法通过提高组织的适应性处理某些突发事件,能够为有限资源下的作战行动提供更为优化的解决方案,但是,该方法只能处理一些局部的、有限的突发事件,资源的有限性在一定程度上限制了组织对任务变化的处理能力. 本文着重研究资源约束下的计划规划问题RCPSP(resource constrained project scheduling problem)^[18-19],重点研究属于第2类的C2组织资源动态调度优化方法.

基于调整优化的资源动态调度不同于预先生成资源调度计划的过程,动态调度过程不能由于突发事件的到来而对整个资源调度计划进行简单地重新规划,这是因为各个作战平台已经为既定的作战任务进行了针对性准备,任意一次任务的临时变更都会带来潜存的代价. 资源的动态调整应在确保能够处理突发事件的情况下,在尽可能不改变原有资源调度计划的基础上进行平台资源的适度调整. 因此,针对动态资源调度问题,进行多目标优化具有十分重要的意义,一方面最大化所有任务的完成质量,另一方面最小化平台的任务调整代价. 此外,进行多目标优化产生的帕累托前沿最优解集能够在决策者解决当前的突发事件并进行决策时提供多元选择.

2.2.2 突发事件分析

由于作战环境具有高对抗、不确定等特点,任何作战行动都是双方博弈的过程,预先制定的资源调度方案在实施过程中必然出现诸多突发事件,这些突发事件对组织的任务信息、平台信息等产生不同程度的影响,将造成Holonic-C2组织整体的任务资源配给率不能满足作战要求. 因此,为了提高Holonic-C2组织资源调度过程对突发事件的应对能力,本文首先从作战环境变化、敌方对抗博弈、平台生存能力等多个角度,对作战过程中的任务信息和平台信息产生的影响进行分析.

1) 不确定的作战环境.

复杂的战场环境必然是时变的、不确定的,这些作战不利因素反映在数学模型上,将会引起任务对资源的需求量和任务起止时间等属性的改变,例如突发的恶劣天气可能导致任务执行时间延误,并且这些任务将需要更多的资源才能被执行.

2) 不完备的战场信息.

作战是一个高对抗、强博弈的过程,虽然我方能够通过侦察探测获得战场态势,但相对于整个作战环境而言,能够获取的信息是有限的.作战过程中,由于信息的不完备,极有可能出现新的作战任务,任务新增将直接导致Holon-C2组织需对任务的数量发生的变化做出应对.

3) 平台作战能力失效.

由于高对抗的作战环境,我方平台在执行任务过程中必然会遭受到对方的反制措施,作战过程中部分平台的能力丧失难以避免,这将直接导致我方可用平台数量减少,无法执行既定的后续任务.

2.3 突发事件数学模型

上述3种突发事件会导致任务属性变化、任务数量新增和平台损毁等多种具体的突发事件,但这些事件本质上都会引起任务资源供给率的不足,进而触发资源调整过程,3种突发事件调整机制上相近,调整方法上相同.由于任务新增是对平台需求最大的一种突发事件,资源调整的难度最大,本文主要研究“任务新增”下的资源动态调度方法,构建的模型如下.

假设第 k 个战术Holon由1个 TDH_k 与若干个平台构成,该战术Holon所有平台构成集合为 PC_k , TDH_k 处理的任务集合为 TC_k ,受突发事件影响的任务集合为 Ta .由于原有的调度方案必然存在所属不同战术Holon的平台协作完成同一任务的情况,为了降低资源调整问题的复杂性,避免与其他战术Holon有交织关系的任务和平台发生调整时连带影响其他战术Holon的资源调度方案,在进行单个战术Holon的资源调整时,参与调整的平台限定为仅执行本战术Holon任务的平台集 $Pc_k \in PC_k$,能够调整的任务限定为仅由战术Holon自身处理的任務,任务的基本属性为 $Tc_k \in TC_k$.

新增任务的集合为 T^{new} ,新增任务的属性矩阵如下所示:

$$S^{T^{new}} = [R^{new}, t^{new}]. \tag{7}$$

其中: R^{new} 为新增任务的资源需求属性矩阵, t^{new} 为新增任务的时间属性矩阵.

任务新增后的所有任务集合为 $T^{all} = Tc_k \cup T^{new}$,任务属性的数学表示如下所示:

$$S^{T^{all}} = \begin{bmatrix} S^{Tc_k} \\ S^{T^{new}} \end{bmatrix}. \tag{8}$$

其中: S^{Tc_k} 为任务集合的属性矩阵, $S^{T^{new}}$ 为新任务集合的属性矩阵.

3 Holonic-C2组织的协作式动态调度过程

根据决策单元的不同,Holon-C2组织具备集中式调整和协作式调整两种调整模式.集中式调整是战役决策Holon进行全局资源调度方案的调整.这种方法的优点在于能够更容易获得全局最优解决方案,利用全局的资源能够处理更复杂的突发事件;缺点在于直接对平台进行调整会产生更加复杂的战术Holon间的协作关系.协作式调整是战术决策Holon为决策主体的局部资源调整,每个战术Holon独立处理其所辖范围内出现的突发事件,当战术Holon无法单独处理事件时,则向其他战术Holon发起协作请求.这种方法的优点在于可以减少战术Holon间不必要的协作,有效发挥单个战术Holon的任务处理能力;缺点在于难以达到全局的最优资源调度.本文重点对协作式的资源调整过程进行研究,探索单个战术Holon的突发事件处理方法和单个战术Holon无法处理突发事件时多个战术Holon之间的协作机制.

Holon-C2组织协作式调整决策信息流转过程如图3所示,战术决策Holon接收到突发事件信息后利用自身的决策能力进行事件处理,如果自身无法处理该事件,则将无法处理的事件信息流传输至战役决策Holon,战役决策Holon作为协调者按一定的规则向其他战术决策Holon发送任务信息,其他战术决策Holon生成协作计划后经协调者反馈回原战术决策Holon,最后形成针对突发事件的战术决策Holon之间的协作关系.

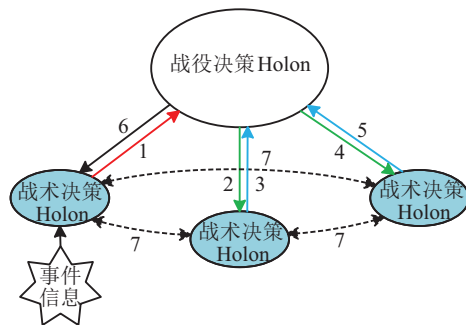


图3 Holonic-C2组织协作式调整决策信息流转过程

4 单个战术Holon资源动态调度模型

4.1 资源调度测度及目标函数的构建

资源调度的测度是衡量资源调度方案优劣的依据.对于Holon-C2组织动态资源调度而言主要考虑两方面的内容,一是任务资源配给率,在保证各单任务的完成质量达到最低阈值的前提下,实现整体任务资源配给率的最大化;二是计划调整的代价,在保证所有任务资源配给率达到要求的同时,最小程度地

调整原调度计划.

1) 任务资源配给率.

定义6 资源满足度是指在任务-平台分配关系 y 下, 分配给任务 T_i 的平台拥有的第 l 类资源量与任务 T_i 的第 l 类资源需求量的比值, 且其值不大于 1. 任务 T_i 的第 l 类资源满足度如下所示:

$$z_{il} = \min \left(\sum_{j=1}^J r_{jl} y_{ij} / R_{il}, 1 \right), \quad (9)$$

其中 $\min(\cdot)$ 为取最小值运算.

定义7 任务资源配给率是指分配给某一任务的平台能够提供的所有资源量对该任务所有资源需求量的满足程度, 任务资源配给率是客观衡量所分配平台的资源能力与任务资源能力需求之间匹配程度的测度, 如下所示:

$$QT_i = \left(\prod_{l \in RT_i} z_{il} \right)^{1/\|RT_i\|}. \quad (10)$$

其中: RT_i 表示任务 T_i 所需的资源类型标号的集合, $\|RT_i\|$ 表示任务 T_i 所需的资源种类数量.

对于 TDH_k 而言, 调度目标为参与资源调整的任务资源配给率最大, 本文采用各任务资源配给率加权和表示整体的资源配给情况, 如下所示:

$$QM = \sum_{i \in Tc_k} \omega_i \cdot QT_i. \quad (11)$$

其中: ω_i 表示任务 T_i 的权重, 其取值取决于决策者的偏好, 本文取均值权重; Tc_k 表示受平台调整影响的任务集合.

2) 计划调整代价.

定义8 平台计划调整代价是指作战平台放弃执行原计划任务, 转移执行其他任务时需要付出的代价. 每一个平台的调整代价信息可用平台任务转移代价矩阵表示, 如下所示:

$$C = (c_{jnm})_{J \times I \times I}. \quad (12)$$

其中: c_{jnm} 表示第 j 个平台从计划执行第 n 个任务转移至执行第 m 个任务的代价, 且 $c_{jnm} \in [0, 1]$. 平台计划调整代价 c_{jnm} 的值一般由相关领域专家给出, 也可以根据相关的数学模型进行计算.

定义9 平台任务转移矩阵是反映平台任务转移情况的数学描述, 表示为 $\text{Ptr} = (\text{ptr}_{jnm})_{J \times I \times I}$. 其中: ptr_{jnm} 为 1 时, 表示第 j 个平台从计划执行第 n 个任务转移至执行第 m 个任务, 否则 ptr_{jnm} 为 0; $j \in \{1, 2, \dots, J\}$, $n, m \in \{1, 2, \dots, I\}$. 其计算方式如下所示:

$$\text{Ptr} = f(y^k, y^{k*}). \quad (13)$$

其中: y^k 为 TH_k 的新资源调度方案, y^{k*} 为 TH_k 的原资源调度方案, $f(\cdot)$ 为对比两个资源调度计划的函数. 整体的计划调整代价是所有平台变更任务的代价总和, 如下所示:

$$\text{Cost} = \sum_{j \in Pc_k} C_j \cdot \text{Ptr}_j. \quad (14)$$

其中: C_j 表示平台 PH_j 的调整代价向量, Ptr_j 表示平台 PH_j 的转移向量, Pc_k 表示可调整的平台编号集合.

4.2 资源动态调度的一般性约束

1) 资源满足度约束.

资源满足度 z_{il} 需满足不大于 1 的约束, 即

$$z_{il} = \min \left(\sum_{j=1}^J r_{jl} y_{ij} / R_{il}, 1 \right). \quad (15)$$

2) 任务资源配给率约束.

有限资源条件下, 平台计划的调整极易导致某些任务资源配给率降低, 为保证任务整体的完成质量, 每一个任务的完成质量应大于某一阈值, 而阈值的大小取决于决策者对任务完成情况的最低要求, 如下所示:

$$QT_i > QT_{\text{threshold}}, \quad (16)$$

其中 $QT_{\text{threshold}}$ 表示任务资源配给率应达到的最低要求.

3) 平台数量的均衡性约束.

为了保证平台分配的均衡性, 避免出现某一任务分配过多平台的情况, 执行同一任务的平台数量需不大于某一阈值 cp , 且每个任务至少由一个平台执行, 如下所示:

$$0 < \sum_{j \in Pc_k} y_{ij} \leq cp, \quad y_{ij} \in \mathbf{Z}. \quad (17)$$

4) 平台的任务数量约束.

考虑到平台的作战负荷, 单个平台不能执行过多的作战任务, 其执行的任务数量应不大于某一阈值 ct , 如下所示:

$$0 \leq \sum_{i=1}^I y_{ij} \leq ct, \quad y_{ij} \in \mathbf{Z}. \quad (18)$$

5) 平台的任务时间约束.

当某一个平台需要执行多个任务时, 为保证同一个平台同一时刻只能执行一个任务, 该平台所分配任务的执行时间不能重合, 在分配关系矩阵 y^k 下, 所有平台的任务执行时间矩阵如下所示:

$$\text{tp} = y^k \cdot t = [y_{ij} \cdot (ts_i, te_i)]_{I \times J}. \quad (19)$$

假设任务 T_i 和任务 $T_{i'}$ 是平台 PH_j 需要执行的两个任务,为保证两个任务执行时间不重合,任务 T_i 的开始时间减去任务 $T_{i'}$ 的结束时间与任务 T_i 的结束时间减去任务 $T_{i'}$ 的开始时间保持相同的正负关系,如下所示:

$$(y_{ij} \cdot \text{ts}_i - y_{i'j} \cdot \text{te}_{i'}) \cdot (y_{ij} \cdot \text{te}_i - y_{i'j} \cdot \text{ts}_{i'}) > 0, \quad \forall i, i' \in \text{Tc}_k \cup \text{Ta}, \forall j \in \text{Pc}_k. \quad (20)$$

5) 平台的任务序列约束.

平台的任务序列约束是指平台需要执行多个任务时,执行完一个任务后再执行其他任务的可行性.虽然平台的任务时间约束能够确保不会将有时间重叠的任务分配给同一平台,但实际中可能由于地理环境、平台机动速度等因素影响,平台无法执行两个时间不重叠的任务.因此,需预先评估平台执行多任务的可行性,构造平台的多任务可执行矩阵如下所示:

$$\text{Mut} = (\text{mut}_{jnm})_{J \times I \times I}. \quad (21)$$

其中: mut_{jnm} 为1时,表示平台 PH_j 执行完第 n 个任务后可以执行第 m 个任务,否则为0; $\forall j \in \text{Pc}_k, \forall n, m \in \text{Tc}_k \cup \text{Ta}$.

假设任务-平台分配方案为 y ,平台 PH_j 的任务分配向量为 y_j ,集合 M_j 为平台 PH_j 所执行任务的编号集合,即 $M_j = \{i | y_{ij} = 1, y_{ij} \in y_j\}$,令任务按时间顺序排序后的集合为 M'_j ,满足 $\text{te}_{M'_j(v)} < \text{ts}_{M'_j(v+1)}$,其中 v 表示集合 M'_j 中的第 v 个元素.平台的任务序列约束如下所示:

$$\prod_v \text{mut}_{jM'_j(v)M'_j(v+1)} = 1. \quad (22)$$

4.3 单个战术Holon的多目标优化模型

任务资源供给率的定义确保了资源调度方案能够满足各任务对所有资源类型的需求,但对资源有限的战术Holon而言,用文献[4]方法处理突发事件任务时,极易出现由于某种资源类型的缺失而导致资源供给率为0的情况,任务资源供给率约束成为资源类型有限条件下获取优化解的最严格约束条件.

单个战术Holon不能通过调整提供突发事件任务所需的所有资源类型,故战术Holon应在确保原有任务资源供给率大于阈值的基础上,最大程度提供满足新任务需求的资源类型,因此,资源动态调度时应首先最大化满足阈值约束的原任务的数量,其次优化提供给新任务的资源类型数量,最后优化新任务的资源供给情况.优化目标如下所示:

$$\text{QM}' = 10 \cdot \text{Tnum} + \|\text{Rm}\| + \frac{\sum_{l \in \text{RTnew}} z_{il}}{\|\text{RTnew}\|}. \quad (23)$$

其中: Tnum 表示资源调整后资源供给率大于阈值的任务数量, Rm 表示平台提供给突发事件任务所需资源类型的集合, RTnew 表示突发事件任务所需的资源类型集合, $\|\cdot\|$ 表示计算集合元素个数.

单个战术Holon资源不完备情况下的资源动态调度模型如下所示:

$$\min \text{QM}'' = -\text{QM}',$$

$$\min \text{Cost} = \sum_{j \in \text{Pc}_k} C_j \cdot \text{Ptr}_j.$$

$$\text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} z_{il} = \min \left(\sum_{j=1}^J r_{jl} y_{ij} / R_{il}, 1 \right); \\ 0 < \sum_{j \in \text{Pc}_k} y_{ij}^k \leq \text{cp}, y_{ij}^k \in \mathbf{Z}; \\ 0 \leq \sum_{i \in \text{Tc}_k \cup \text{Ta}} y_{ij}^k \leq \text{ct}, y_{ij}^k \in \mathbf{Z}; \\ (y_{ij} \cdot \text{ts}_i - y_{i'j} \cdot \text{te}_{i'}) \cdot (y_{ij} \cdot \text{te}_i - y_{i'j} \cdot \text{ts}_{i'}) > 0; \\ \prod_v \text{mut}_{jM'_j(v)M'_j(v+1)} = 1; \\ \text{QM}' = 10 \cdot \text{Tnum} + \|\text{Rm}\| + \frac{\sum_{l \in \text{RTnew}} z_{il}}{\|\text{RTnew}\|}; \\ \text{QT}_i = \left(\prod_{l \in \text{RT}_i} z_{il} \right)^{1/\|\text{RT}_i\|}, \forall i \in \text{Tc}_k; \\ \text{QT}_i \geq \text{QT}_{\text{threshold}}, \forall i \in \text{Tc}_k; \\ \text{Ptr} = f(y^k, y^{k*}); \\ S^{\text{Tall}} = \begin{bmatrix} S^{\text{Tc}_k} \\ S^{\text{Tnew}} \end{bmatrix}, S^{\text{Tnew}} = [R^{\text{new}}, t^{\text{new}}]. \end{array} \right. \quad (24)$$

与文献[4]中模型相比,优化目标为最大化突发事件任务的资源供给率,突发事件任务的资源供给率等式约束为资源满足度的算术平均值.该模型不再寻求整体任务(包括因平台调整受影响的任务和受突发事件影响的任务)资源匹配率的最大化,而是在保证参与调整的任务(因平台调整受影响的任务)资源供给率满足最低阈值的基础上,为突发事件任务提供最大的资源供给.

4.4 多目标优化求解算法

该模型是具有复杂约束的混合整数非线性规划问题,虽然传统的多目标进化算法能够对该模型进行求解,但是,由于解的高度离散性,进化算法在交叉、变异等操作后极易出现非可行的解,这会极大地影响算

法的寻优能力. 因此,为提高进化算法的寻优效率,本文利用文献[4]中改进的多目标进化算法(improved multi-objective evolutionary algorithm, IMOE)对单Holon多目标优化模型进行求解.

5 多战术Holon间的协作机制

5.1 协作战术Holon的选择

当战术Holon无法处理突发事件时,战役决策Holon选择其他战术Holon协作完成突发事件任务,为了确保突发事件任务顺利完成,优先选择平台数量相对较多的战术Holon作为协作者.

假设战术Holon TH_k 的任务数量为 NT_k , 可以调整的平台数量为 NP_k , 则 TH_k 平台冗余度如下所示:

$$RE_k = \frac{NP_k}{NT_k} \quad (25)$$

按平台冗余度由高到低对战术Holon进行排序,战役决策Holon按顺序发起协作.

5.2 协作战术Holon的选择

Holonic-C2组织协作式资源动态调度流程如图4所示.

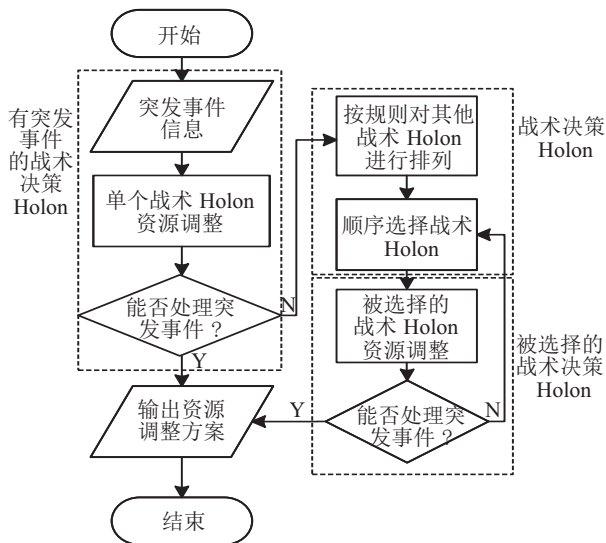


图4 Holonic-C2组织协作式资源动态调度流程

6 仿真实验

本实验在Intel(R) Core(TM) 3.5 GHz 台式计算机上利用Matlab R2009a 仿真软件进行实验.

6.1 仿真案例

由于协作式资源动态调度是处理特殊情况下的动态调度问题,就动态调度案例而言,主要有3种情况:一是资源较为充裕条件下单个战术Holon能够独立调整的情况,二是资源相对充裕条件下单个战术Holon不能独立调整但可通过多个战术Holon协作完成调整的情况,三是资源相对匮乏无法通过多个战术

Holon协作完成调整的情况. 本文主要是对第2种情况的案例进行仿真验证,由于随机生成的不同规模的案例无法保证是上述哪一种情况,进而无法准确验证本文所提方法,因此,本文选取了相对权威的仿真案例进行实验验证.

为了保证实验案例的客观性,避免随机生成的实验数据缺乏真实性,以文献[20]中使用的作战想定为算例,该算例是美国海军行动中心(maritime operation centers, MOC)提供的使命案例,具有较高的真实性. 整个作战想定中,涉及资源能力种类数为 $L = 12$, 任务数量为 $n = 11$, 其任务的属性信息如表1所示; Holonic-C2组织的平台数量 $m = 12$, 平台拥有的资源能力信息如表2所示, Holonic-C2组织分为3个战术Holon, 各个战术Holon所属的任务和平台信息如图5所示.

表1 任务的属性信息

任务	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	r_9	r_{10}	r_{11}	r_{12}	$t_{s,i}$	$t_{p,i}$	
T_1	5	0	5	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	30	
T_2	5	0	12	14	10	0	0	0	12	0	4	0	0	30	
T_3	3	0	8	8	7	0	0	0	6	0	4	0	0	30	
T_4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	30	
T_5	2	0	0	0	0	0	0	0	5	0	4	0	0	6	10
T_6	5	0	10	0	8	10	6	0	5	5	0	0	0	26	4
T_7	2	0	0	0	8	0	0	0	0	5	0	0	0	24	
T_8	2	5	5	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	24	
T_9	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	30	
T_{10}	2	8	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	18	
T_{11}	2	7	0	0	0	0	0	0	0	0	5	7	0	30	

表2 平台的资源能力信息

平台	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	r_9	r_{10}	r_{11}	r_{12}
PH ₁	5	6	5	0	2	5	2	1	5	5	2	5
PH ₂ ~ PH ₃	3	5	8	7	6	4	3	3	7	5	0	0
PH ₄ ~ PH ₆	2	5	8	7	6	4	3	3	6	4	0	0
PH ₇ ~ PH ₈	0	3	0	0	0	5	4	2	1	3	1	0
PH ₉ ~ PH ₁₁	1	0	0	0	0	6	2	0	0	6	0	3
PH ₁₂	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
PH ₁₃ ~ PH ₁₄	5	0	5	0	0	0	0	0	8	3	1	0
PH ₁₅	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	3
PH ₁₆	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	4	3
PH ₁₇	2	0	0	0	0	0	0	0	4	3	3	2
PH ₁₈ ~ PH ₂₀	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	5
PH ₂₁	5	7	5	0	0	1	0	0	4	1	3	3

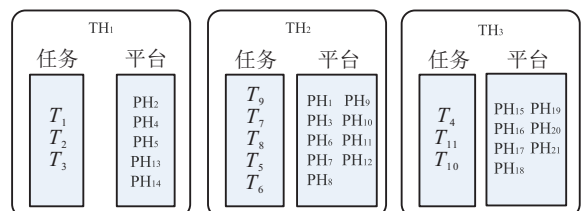


图5 各个战术Holon的任务、平台隶属关系

根据文献[20],基于上述任务信息和平台信息生成的初始资源调度方案如表3所示.

表 3 初始的资源调度方案

	任务	PH ₁	PH ₂	PH ₃	PH ₄	PH ₅	PH ₆	PH ₇	PH ₈	PH ₉	PH ₁₀	PH ₁₁	PH ₁₂	PH ₁₃	PH ₁₄	PH ₁₅	PH ₁₆	PH ₁₇	PH ₁₈	PH ₁₉	PH ₂₀	PH ₂₁	资源配给率 / %
TH ₁	T ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	100.00
	T ₂	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	81.82
	T ₃	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	95.32
TH ₂	T ₉	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.00
	T ₇	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90.86
	T ₈	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	87.06
	T ₅	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	92.83
	T ₆	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100.00
TH ₃	T ₄	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	100.00
	T ₁₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	96.22
	T ₁₀	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	88.91

6.2 实验结果

为验证算法应对“任务新增”突发事件的可行性,随机增加一个任务作为突发事件进行仿真实验.随机产生的任务一部分可以由单个战术Holon处理,一部分则需要多个战术Holon之间的协作完成,本文重点研究单个战术Holon无法处理新增任务的情况(即新增任务资源配给率无法达到阈值),假定新增的任务属性为 $R^{new}=[0,0,2,0,0,0,0,0,3,2,3,1]$, $t^{new}=[0,30]$,资源配给率最低阈值设置为0.7,该任务发生在TH₂的所辖范围,利用本文所提的模型及求解方法进行多目标优化,TH₂获得的帕累托前沿如图6所示.

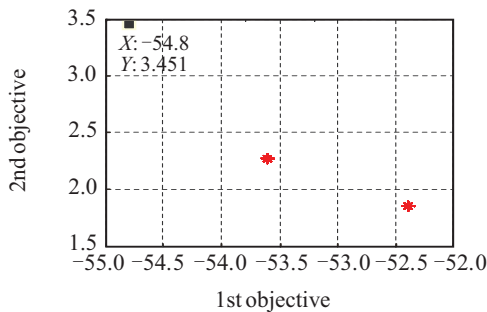


图 6 TH₂对新增任务多目标优化的帕累托前沿

1) 战术Holon TH₂ 优化阶段.

根据表3所示的资源调度计划,TH₂可参与新任务处理的平台为PH₁、PH₃、PH₆、PH₇、PH₉、PH₁₀、PH₁₁、PH₁₂.

TDH₂根据指挥员对效益和代价的偏好选择帕累托前沿中合适的解作为TH₂调整后的资源调度方案,目标优化值为(-54.8, 3.451)的解进行分析:第1个优化目标值为-54.8,TH₂中原有的5个任务均能达到资源配给率最低阈值要求,TH₂调整后的资源调度方案能够为新增任务提供4种资源类型,新增任务的资源平均配给率为0.8;第2个优化目标是此方案下资源调整的代价为3.451.该解对应的资源调整方

案如表4所示.

表 4 帕累托前沿点对应的资源调整方案

任务	PH ₁	PH ₃	PH ₆	PH ₇	PH ₉	PH ₁₀	PH ₁₁	PH ₁₂	资源配给率 / %
T ₉	0	0	0	1	0	0	1	0	79.37
T ₇	0	1	0	0	0	0	0	0	90.85
T ₈	1	0	0	0	0	0	0	0	100.00
T ₅	0	0	0	0	0	1	0	1	73.68
T ₆	1	1	0	0	0	1	0	0	100.00
T _{new}	0	0	1	0	1	0	0	0	-

如图7所示,经过资源的调整,牺牲了部分原有任务的资源配给率,但为新任务提供了部分所需的资源.需要其他战术Holon协作处理的任务为新增任务中资源未被满足的部分,如下所示:

$$R^{new'} = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 3, 0]. \quad (26)$$

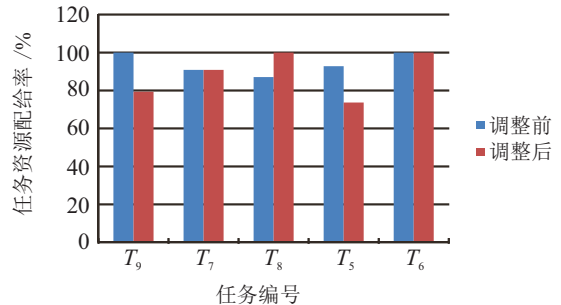


图 7 调整前后原任务的资源配给率对比

2) 战役决策Holon协调阶段.

根据表3中的平台和任务执行关系信息,计算各个战术Holon的平台冗余度,TH₁的调整平台数为4,任务数为3;TH₃的调整平台数为5,任务数为3;根据式(25)计算可得各战术Holon的平台冗余度,RE₁ = 1.33, RE₃ = 1.67,优先选择TH₃作为新增任务的协作战术Holon.

3) 战术Holon TH₃.

由表3中平台和任务执行关系信息可知,TH₃中可调整的平台为PH₁₆、PH₁₇、PH₁₉、PH₂₀、PH₂₁,采用式(24)的数学模型进行求解,获得的帕累托前沿如

图8所示。

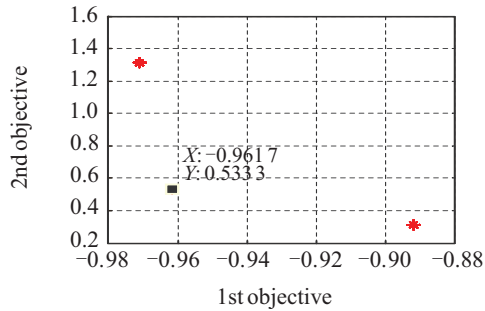


图8 TH₃对新增任务多目标优化的帕累托前沿

表5 TH₃的资源调整方案

任务	PH ₁₆	PH ₁₇	PH ₁₉	PH ₂₀	PH ₂₁	资源分配率/%
T ₄	0	1	0	0	0	100.00
T ₁₁	1	0	0	0	1	96.22
T ₁₀	0	0	0	1	0	88.91
T' _{new}	0	0	1	0	0	100.00

TH₃中的TDH₃按指挥员的意图从帕累托前沿中选择合适的解作为资源调整方案,假定选择图8中标注的解,其资源调整方案如表5所示,该调整方案有效利用了TH₃中的冗余平台协作处理TH₂的新增任务.由TH₂和TH₃的优化结果可知,该新增任务T_{new}由TH₂中的PH₆、PH₁₀和TH₃中的PH₁₉协作完成。

上述仿真实验表明,本文提出的协作式资源调整过程能够在单个战术Holon无法独自处理突发事件时发起多个战术Holon的协作,在保证原任务资源分配率达到阈值要求的基础上,通过多个战术Holon中平台的协作实现对突发事件的有效处理,仿真实验验证了Holon-C2组织协作式资源调整方法的有效性。

7 结论

本文针对Holon-C2组织协作式资源调整问题,提出了基于多目标优化的协作式资源调整的基本过程,在分析了几种突发事件的基础上,建立了多目标优化的资源调整模型,研究了单个战术Holon无法处理突发事件时的资源调度机制;最后,以“任务新增”的典型突发事件为例进行了仿真实验,验证了所提出的协作式资源调整方法的可行性。

上述研究也存在以下不足,首先,为了降低任务交织关系造成的资源调整的复杂性,将平台的可调整范围限定在仅执行自身任务的平台;其次,在处理突发事件时,采用了顺序选择战术Holon的方法,并未考虑多个战术Holon同时协作的情况;最后,由于目前相关的研究均是基于能够处理突发事件而进行的调整,没有对局部不能调整的情况进行研究,故与本

文相比在方法上缺乏可比性,仿真实验部分仅验证了方法的可行性。

参考文献(References)

- [1] 刘忠, 张维明, 胡剑文, 等. 以网络为中心的指挥控制组织探索性分析[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(5): 31-35.
(Liu Z, Zhang W M, Hu J W, et al. Exploratory modeling and optimization of network centric operation organization[J]. Fire Control and Command Control, 2009, 34(5): 31-35.)
- [2] Athans M. Command and control (C2) theory: A challenge to control science[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1987, 32(4): 286-293.
- [3] Abello M B, Michalewicz Z, Bui L T. A reactive-proactive approach for solving dynamic scheduling with time-varying number of tasks[C]. 2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE, 2012: 1-10.
- [4] Wang X, Yao P, Zhang J, et al. Dynamic resource scheduling for C2 organizations based on multi-objective optimization[J]. IEEE Access, 2019, 7: 64614-64626.
- [5] 费爱国, 张陆游, 丁前军. 基于拍卖算法的多机协同火力分配[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(9): 1829-1833.
(Fei A G, Zhang L Y, Ding Q J. Multi-aircraft cooperative fire assignment based on auction algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(9): 1829-1833.)
- [6] 许可, 宫华, 秦新立, 等. 基于分布式拍卖算法的无人机分组任务分配[J]. 信息与控制, 2018, 47(3): 341-346.
(Xu K, Gong H, Qin X L, et al. Multi-UAV task assignment for grouped tasks based on distribution auction algorithm[J]. Information and Control, 2018, 47(3): 341-346.)
- [7] 龙涛, 陈岩, 沈林成. 基于合同机制的多UCAV分布式协同任务控制[J]. 航空学报, 2007, 28(2): 352-357.
(Long T, Chen Y, Shen L C. Distributed cooperative mission control based on contract mechanism for multiple unmanned combat aerial vehicles[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2007, 28(2): 352-357.)
- [8] 李娟, 张昆玉. 基于改进合同网算法的异构多AUV协同任务分配[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(6): 418-423.
(Li J, Zhang K Y. Heterogeneous multi-AUV cooperative task allocation based on improved contract net algorithm[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2017, 25(6): 418-423.)
- [9] 肖玉杰, 李杰, 刘方. 基于合同网的分布式动态任务分配算法[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(3): 113-118.

- (Xiao Y J, Li J, Liu F. Distributed dynamic task assignment algorithm based on CNP[J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(3): 113-118.)
- [10] 刘波, 张选平, 王瑞, 等. 基于组合拍卖的协同多目标攻击空战决策算法[J]. *航空学报*, 2010, 31(7): 1433-1444.
(Liu B, Zhang X P, Wang R, et al. Air combat decision making for coordinated multiple target attack using combinatorial auction[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2010, 31(7): 1433-1444.)
- [11] Yu F L, Tu F, Pattipati R. Integration of a holonic organizational control architecture and multiobjective evolutionary algorithm for flexible distributed scheduling[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics — Part A: Systems and Humans*, 2008, 38(5): 1001-1017.
- [12] 阳东升, 张维明, 刘忠, 等. C2组织设计方法研究[J]. *系统工程学报*, 2005, 20(6): 606-612.
(Yang D S, Zhang W M, Liu Z, et al. Research on methodology of designing C2 organizations[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2005, 20(6): 606-612.)
- [13] Wang X, Zhang J Y, Wan L J, et al. Holonic-C2 organization structure generation method based on clustering optimization algorithms[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 118459-118471.
- [14] 王勋, 姚佩阳, 张杰勇, 等. Holonic-C2 组织资源调度问题研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(3): 564-570.
(Wang X, Yao P Y, Zhang J Y, et al. Research on problem of Holonic-C2 organization resource scheduling[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(3): 564-570.)
- [15] 郭凤娟. 基于Holon的有人机/UAV编队对地攻击C2S研究[D]. 西安: 西北工业大学电子信息学院, 2012.
(Guo F J. Research on C2S of manned vehicle/UAV formation air-to-ground attack based on holon[D]. Xi'an: School of Electronic and Information, Northwest Polytechnical University, 2012.)
- [16] Han X. Optimization-based decision support algorithms for network identification and dynamic resource management[D]. Connecticut: University of Connecticut, 2016.
- [17] 孙昱. 敏捷指挥控制组织设计及评估方法研究[D]. 西安: 空军工程大学信息与导航学院, 2017.
(Sun Y. Research on design and evaluation method for agile command and control organization[D]. Xi'an: College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, 2017.)
- [18] Habibi F, Barzinpour F, Sadjadi S J. Resource-constrained project scheduling problem: Review of past and recent developments[J]. *Journal of Project Management*, 2018, 3(2): 55-88.
- [19] Bui L T, Michalewicz Z, Parkinson E, et al. Adaptation in dynamic environments: A case study in mission planning[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2012, 16(2): 190-209.
- [20] Han X, Mandal S, Suvasri K R, et al. An optimization-based distributed planning algorithm: A blackboard-based collaborative framework[J]. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Systems*, 2014, 44(6): 673-686.

作者简介

王勋(1990—), 男, 讲师, 博士, 从事指挥控制组织、指挥信息系统的研究, E-mail: wxkgdxy@163.com;

贾方超(1989—), 男, 助理工程师, 从事指挥信息系统的研究, E-mail: hijiafc@163.com;

张杰勇(1983—), 男, 副教授, 博士, 从事空中无人作战体系、指挥信息系统等研究, E-mail: dumu3110728@126.com;

万路军(1986—), 男, 副教授, 博士, 从事有人/无人协同作战、指挥控制组织等研究, E-mail: pandawlj@126.com;

焦志强(1992—), 男, 博士生, 从事指挥信息系统的研究, E-mail: jzq_paper@163.com.

(责任编辑: 闫 妍)