

任务计划适应性改造优化建模及方法

孙鹏¹, 李锴^{1*}, 姚佩阳¹, 孙昱¹, 王娜²

(1.空军工程大学信息与导航学院,西安,710077;2.94402部队,济南,250003)

摘要 针对指挥控制(C2)组织资源层一任务计划的适应性优化问题,提出了一种方案改造代价限制条件下的任务计划适应性优化(AOMPTP)问题模型及求解算法。介绍了国内外学者对任务计划适应性优化及适应性测度的研究成果,在分析方案改造代价的必要性和衡量标准的基础上,给出了方案改造代价的定义和约束条件。在方案改造代价限制条件下,建立了以使命完成时间最短为目标的问题数学模型,设计了求解该模型的多维动态列表规划(MDLS)及循环遗传(CG)算法,使指挥员能够更好地权衡方案改造优化的性能与代价,作出决策。最后通过实验分析,验证了所提方法的有效性和适用性。

关键词 指挥控制组织;任务计划;适应性优化;方案改造代价;多维动态列表调度/循环遗传算法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.01.017

中图分类号 TN957 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)01-0090-06

Modeling and Method of Adaptive Reform and Optimization for Mission Planning

SUN Peng¹, LI Kai¹, YAO Peiyang¹, SUN Yu¹, WANG Na²

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Unit 94402, Ji'nan 250000, China)

Abstract: In order to solve the problems of adaptive optimization for resource layer of command and control organization-mission planning, this paper proposes a model and an algorithm of adaptive optimization of mission planning under cost of changing tasks project. Aimed at the shortest mission completion time under cost of changing project constraint, the paper introduces the achievements in scientific research of scholars at home and abroad about adaptive optimization for mission planning and adaptive measures, analyzes the necessity and measurement of the cost of changing project, defines the cost of changing project, presents the constraint, and establishes a mathematical model. The paper designs a multidimensional dynamic list scheduling and circulative genetic algorithm to solve the model. By so doing, these are advantageous to commanders in balancing the property with the price of changing project and making a decision. The experimental result shows that the validity and the applicability are verified for the algorithms.

Key words: command and control organization; mission planning; adaptive optimization; cost of changing project; MDLS/CG

未来战场环境复杂多变,如何科学配置和部署平台资源,以便合理有序地执行任务,迅速有效地完

成作战使命,这就是指挥控制领域的关键问题-任务计划问题^[1-4]。近年来国内外学者对该问题进行了

收稿日期:2015-09-02

基金项目:中国博士后基金(2014M562585)

作者简介:孙鹏(1972—),男,河北安平,副教授,主要从事指挥决策与通信指挥研究.E-mail:2517492668@qq.com

*通信作者:李锴(1991—),男,山东淄博人,硕士生,主要从事指挥控制组织设计、任务计划研究.E-mail:likai527328119@163.com

引用格式:孙鹏,李锴,姚佩阳,等.任务计划适应性改造优化建模及方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(1):90-95. SUN Peng, LI Kai, YAO Peiyang, et al. Modeling and Method of Adaptive Reform and Optimization for Mission Planning[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(1): 90-95.

广泛地研究。

Levchuk 等人将任务计划作为指挥控制 (command and control, C2) 组织设计的第一个阶段,提出了多维动态列表规划算法 (Multi-dimensional Dynamic List Scheduling, MDLS)^[5]。该算法的最大优势在于,针对某一具体作战使命,可以在最短的时间内得到一个接近最优的任务计划方案。以此算法为基础,该团队对动态使命环境中任务计划适应性优化问题进入了深入研究,提出了基于三阶段方法的任务计划适应性优化方法^[6-11]。该方法认为计划方案在适应性调整过程中需承担调整代价和各种风险,因此其最终目标是在方案优化程度和代价之间寻找平衡。修保新等针对任务计划适应性优化问题,分析了适应性代价,提出了基于粒度计算的组织结构适应性设计方法^[12]。

根据组织权变理论,没有普遍适用的最优方案和组织结构,只有在某一具体使命环境下适用于这一具体条件的最优方案^[13]。面对动态不确定的作战环境,如何设计一种可以随环境变化而不断进行方案自我调整的任务计划方法,使计划方案始终保持较好性能,这就是任务计划适应性优化^[14]。任务计划作为 C2 组织设计的第一个阶段,它的适应性优化属于 C2 组织资源层适应性优化^[15]。在复杂多变的作战环境下,如何才能让“计划”的速度紧跟“变化”的速度,是目前亟待解决的问题,也是我们研究任务计划适应性优化方法的目的。

本文分析了任务计划方案在进行适应性调整时所需的方案改造代价,建立了方案改造代价限制条件下的任务计划适应性优化 (adaptive optimization of Mission planning under cost of changing tasks project, AOMPPTP) 问题模型,设计了基于多维动态列表规划 (MDLS) 及循环遗传 (Circulative Genetic, CG) 的求解算法,最后通过案例验证所提算法的有效性和适用性。

1 代价分析及问题建模

本节首先分析适应性优化的代价,然后对 AOMPPTP 问题进行建模。

1.1 适应性改造代价

国内外很多机构和部门针对 C2 组织的适应性优化进行了深入研究,取得了很多理论和实验成果。其中,牵扯到决策实体 (即决策层) 的适应性优化方法认为当组织需要进行适应性调整时,需要对组织结构进行重构。因此将适应性代价归结为:结构重构代价和组织性能代价,并最终将这些代价落脚于

决策实体内、外部工作负载这个组织测度参数上^[16]。孙昱等则从作战使命层次和作战任务层次设计了指控效率、同步效率和页载效率等效能测度指标^[17]。

当资源层-任务计划进行适应性优化时,特别的,当决策者实体只有一个的时候,工作负载就不应该是我们需要关注的测度了。使命环境 M 和任务计划方案是 O 时刻是变化着的,在本文中使命环境 M 的变化主要指任务属性参数的变化。假设针对使命环境 M ,通过 MDLS 算法可以得到使命完成时间最短的任务计划方案 O 。那么当使命环境变化为 M^* 时,需要对方案 O 进行调整,任务和平台之间的对应关系随即发生了变化。对于某些平台来说,它们没有执行方案 O 中预定的任务,而是即将去执行另外的任务。由于各个任务所需资源能力数量、种类,所在地理位置,任务执行时间均有不同,这就需要它们对新任务进行额外的准备,同时它们对原先预定任务所作的准备也没有了作用。这就是“方案改选代价 (Cost of Changing Tasks, COCP)”,我们将 COCP 作为任务计划适应性代价。

1.2 问题要素

给出问题基本要素:

定义 1 任务是由作战使命分解所得子行动。所有任务组成任务集合 $T_s = (T_1, T_2, \dots, T_N)$, 其中 N 为任务的数目。任务 $T_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 的属性包括:

- 1) 任务开始时间 s_i ;
- 2) 在时刻 t 时所处使命环境 M 下的任务处理时间 $t_{i, M(t)}$;
- 3) 在时刻 t 时所处使命环境 M 下的任务资源需求向量 $\mathbf{TR}_{i, M(t)} = (tr_{i1, M(t)}, tr_{i2, M(t)}, \dots, tr_{iL, M(t)})$, 其中 L 是资源类型的数目;
- 4) 在时刻 t 时所处使命环境 M 下的任务所在地理位置 $(x_{i, M(t)}, y_{i, M(t)})$;

定义 2 平台是实际作战中提供资源能力以执行任务的物理载体。对于每个平台 $P_m (m = 1, 2, \dots, K)$, K 为平台的数目。它的主要属性包括:

- 1) 平台移动速度 v_m ;
- 2) 平台资源能力向量 $\mathbf{PR}_m = (pr_{m1}, pr_{m2}, \dots, pr_{mL})$, $pr_{ml} (l = 1, 2, \dots, L)$ 表示从平台 P_m 中可以得到的第 l 种类型的资源数量;
- 3) 平台所在地理位置 (X_m, Y_m) ;

1.3 问题变量

对问题各变量进行定义:

- 1) 任务-平台分配变量 ω_{im} ;

$$\omega_{im} = \begin{cases} 1, & \text{将平台 } P_m \text{ 分配给 } T_i \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

2) 平台在任务间的转移变量 x_{ijm} :

$$x_{ijm} = \begin{cases} 1, & \text{平台 } P_m \text{ 执行 } T_i \text{ 完分配给 } T_j \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (2)$$

当 $i = j$ 时, 转移变量为 0, 即 $x_{ijm} = x_{jim} = 0 (i, j = 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, \dots, K)$ 。同时设使命的起始和终止任务为虚拟任务 T_0 , 令 $x_{00m} = 0 (m = 1, 2, \dots, K)$ 。

3) 任务间的顺序变量 a_{ij} :

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & T_i \text{ 必须在 } T_j \text{ 开始前完成} \\ 1, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

4) 使命的完成时间 T :

$$T = \max_{i=1,2,\dots,N} (s_i + t_{i,M(t)}) \quad (4)$$

5) 方案改造代价 COCP: 假设在时刻 t , 任务计划方案由 O 变更为 O^* , 对于还未执行的任务, 其选用的平台组可能发生变化, 变化的数量越多, 付出的代价就越高。方案 O 到 O^* 的方案改造代价 $\text{COCP}_{O \rightarrow O^*}$ 可表示为:

$$\text{COCP}_{O \rightarrow O^*} = \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^K |\omega_{im} - \omega_{im}^*| \quad (5)$$

式中: ω_{im} 为方案的 O 分配变量; ω_{im}^* 为方案 O^* 的分配变量。

1.4 问题约束条件

考虑方案改造代价约束, 平台分配约束, 任务开始时间约束和任务资源需求能力约束等情况:

1.4.1 方案改造代价约束

设方案改造代价的上限为 COCP_{\max} , 实际战场环境中作战方案不可能进行过多调整, 这是由于战斗的紧迫性、通信条件限制等客观条件所决定的。因此, 方案改造代价不能大于其上限, 即:

$$\text{COCP} \leq \text{COCP}_{\max} \quad (6)$$

1.4.2 平台分配约束

当 $\omega_{im} = 1$ 时, 则平台 P_m 在分配给 T_i 之前肯定执行了某一任务(包括起始任务 T_0), 也将被分配执行下一任务(包括终止任务 T_0), 即:

$$\sum_{j=0}^N x_{jim} - \omega_{im} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, \dots, K) \quad (7)$$

$$\sum_{j=0}^N x_{ijm} - \omega_{im} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, \dots, K) \quad (8)$$

所有平台在起始任务开始执行使命, 在终止任务完成使命, 即:

$$\sum_{j=0}^N x_{0jm} = \sum_{i=0}^N x_{i0m} = 1 \quad (m = 1, 2, \dots, K) \quad (9)$$

1.4.3 任务开始时间约束

当 $a_{ij} = 0$ 时, 任务开始时间需满足下式:

$$s_j \geq s_i + t_{i,M(t)} \quad (10)$$

考虑任务 T_i, T_j 之间的顺序关系, 将式(10)转化为式(11), 得:

$$s_j \geq s_i + t_{i,M(t)} + x_{ijm} \frac{d_{ij,M(t)}}{v_m} \quad (i, j = 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, \dots, K) \quad (11)$$

其中, 在时刻 t 时所处使命环境 M 下的 $d_{ij,M(t)}$ 为 T_i, T_j 之间距离, 即:

$$d_{ij,M(t)} = \sqrt{(x_{j,M(t)} - x_{i,M(t)})^2 + (y_{j,M(t)} - y_{i,M(t)})^2} \quad (12)$$

当 $a_{ij} = 1$ 时, 任务开始时间需满足:

$$s_j \geq s_i + t_{i,M(t)} - T' \quad (13)$$

式中: T' 是所有任务完成时间上界, 满足 $T' \geq T$ 。

综合式(11)和式(13), 得到任务开始时间约束:

$$s_j \geq s_i + t_{i,M(t)} + x_{ijm} \left(\frac{d_{ij,M(t)}}{v_m} + a_{ij} T' \right) - a_{ij} T' \quad (i, j = 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, \dots, K) \quad (14)$$

1.4.4 任务资源需求约束

执行任务的平台组提供的资源能力之和应大于任务资源需求, 即:

$$\sum_{m=1}^K pr_{ml} \omega_{im} \geq tr_{il, M(t)} \quad (i = 1, 2, \dots, N; l = 1, 2, \dots, L) \quad (15)$$

1.5 问题模型

目标函数是极小化使命完成时间, 问题模型如下所示:

$$\begin{aligned} & \min T \\ & \text{s.t.} \\ & \left\{ \begin{array}{l} \text{COCP}_{\text{sum}} \leq \text{COCP}_{\max} \\ \sum_{j=0}^N x_{jim} - \omega_{im} = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, \dots, K) \\ \sum_{j=0}^N x_{ijm} - \omega_{im} = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, \dots, K) \\ \sum_{j=0}^N x_{0jm} = \sum_{i=0}^N x_{i0m} = 1 \quad (m = 1, 2, \dots, K) \\ s_j \geq s_i + t_{i,M(t)} + x_{ijm} \left(\frac{d_{ij,M(t)}}{v_m} + a_{ij} T' \right) - a_{ij} T' \\ \quad (i, j = 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, \dots, K) \\ \sum_{m=1}^K pr_{ml} \omega_{im} \geq tr_{il, M(t)}, \quad (i = 1, 2, \dots, N; l = 1, 2, \dots, L) \\ 0 \leq T \leq T'; s_i \geq 0; x_{ijm}, \omega_{im} \in \{0, 1\} \end{array} \right. \end{aligned}$$

2 问题求解

MDLS 算法的不足是当问题规模增大时, 容易陷入局部最优。相对的, 以遗传算法为代表的各类搜索算法具有全局搜索能力强的特点, 特别适合如

任务计划这类具有大搜索空间的组合优化问题。因此,针对 AOMPTP 问题,本文提出了基于 MDLS/CG 的求解算法,以达到充分利用 MDLS 算法的高效率和 GA 算法全局搜索能力强等特点的目的。算法的基本思想是:若战场环境和作战使命不发生变化,利用 MDLS 算法对初始使命进行求解,得出任务计划方案。若发生变化,指挥员根据当前作战条件设定合适的方案代价上限,即 $COCP_{max}$ 的值,运行 MDLS/CG 算法。若有可行解,形成新的任务计划方案并执行,否则适当提高 $COCP_{max}$ 的值,直到产生可行解为止。算法的整体流程图见图 1。

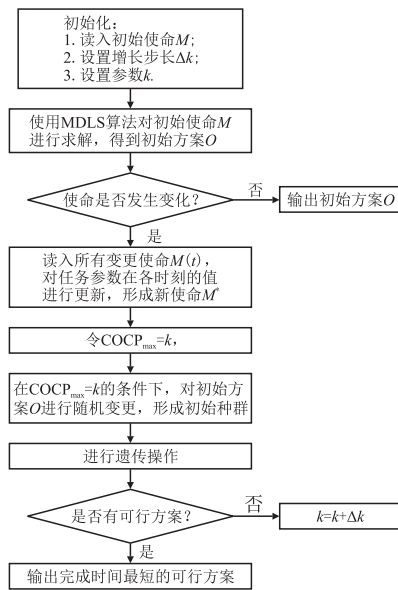


图 1 算法流程图

Fig.1 Algorithm flow chart

根据算法流程图简要介绍算法步骤:

步骤 1 初始化:根据初始作战使命 M 设置各项任务初始参数,设置增长步长 Δk 的值,设置参数 k 的值。

步骤 2 利用 MDLS 算法对初始使命 M 进行求解得到初始方案 O 。执行方案 O 直到作战使命发生改变或者整个使命完成。

步骤 3 假设在时刻 t 使命发生变化 $M(t)$,更新在时刻 t 所有变化的任务属性参数,更新变化后的任务就绪集合,形成新使命 $M^* = M \xrightarrow{t} M(t)$;正在初始方案中正在执行任务的平台组工作状态不变,直到执行的任务完成为止。

步骤 4 在 $COCP_{max} = k$ 的条件下,对初始方案 O 中在时刻 t 未执行的任务选用平台组情况进行随机变更,形成初始种群。

步骤 5 进行遗传操作。

步骤 6 检验最新一代个体是否有可行方案,即检验在方案改造代价不超过 $COCP_{max}$ 的条件下是

否有满足各约束的可行解,若有则输出最优个体,即完成时间最短的方案;若没有,令 $k = k + \Delta k$,转入步骤 4。

3 案例分析

本节以一次登陆战役为例说明适应性优化方法,案例中初始使命 M 中任务和平台的详细参数、任务序列图参见文献[5]。由于战场环境的动态不确定性,开始执行作战使命后,使命 M 发生的变化包括任务资源需求变化,任务位置变化,任务执行时间变化,新增任务(可出现在任务序列图中的任意位置)等[18]。

现假设使命 M 执行至时刻 30 时,我方通过对战场信息的收集和探测,将使命 M 更改为 M^* (除某些固定不变的参数外,使命 M^* 随机生成,假设使命 M^* 无新增任务),使命 M^* 的未执行任务参数变化情况见表 1,参数变化范围见文献[6]。

设参数 $k = 5, \Delta k = 1$ 。应用 MDLS/CG 算法对整个使命过程 $M \xrightarrow{30} M^*$ 进行求解,当 $k = 9$ 时可以得到可行方案 O^1 ,方案 O^1 甘特图见图 2;调整参数 $k = 23$,求得可行方案 O^2 ,方案 O^2 甘特图见图 3。

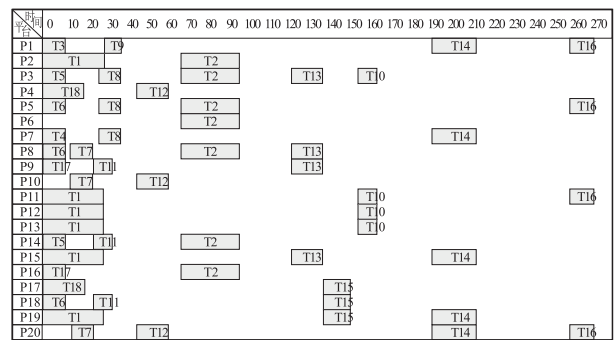


图 2 方案 O^1 甘特图

Fig.2 Gantt chart of project O^1

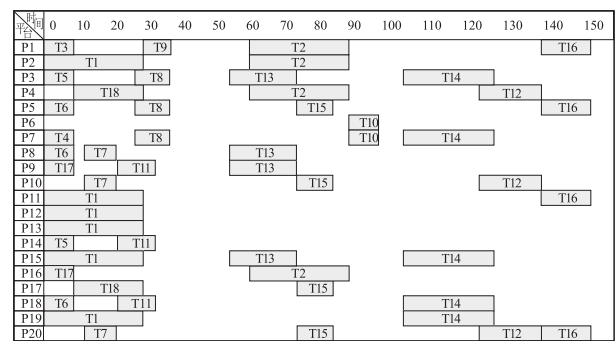


图 3 方案 O^2 甘特图

Fig.3 Gantt chart of project O^2

将图 2 与图 3 进行比较可知,2 个方案中在时刻 30 之前开始执行的任务所选用平台组以及执行

情况不变,但当参数 k 从 9 增加到 23 后,完成时间 T 由 271.2 降低为 152.7。使命完成时间 T 随参数 k 的变化曲线见图 4。

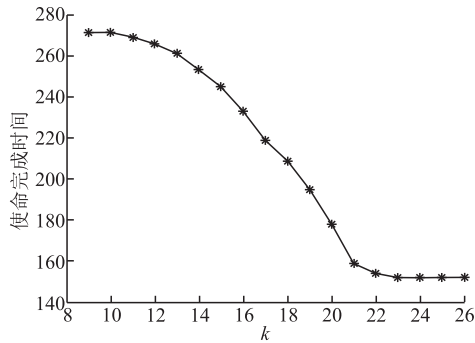


图 4 T 随参数 k 的变化曲线图

Fig.4 The graph of parameter k dependent on T

从图 4 中可以看出,当 $k \leq 8$ 时,无可行方案。随着参数 k 的增大,即方案改造代价的上限提高,所得使命完成时间最短的可行方案的完成时间逐渐下降,方案性能逐渐提高。性能提高的速度由慢到快,最后趋近于一个极值。这是由于参数 k 的值会直接影响方案中分配变量可变化数量的多少,值越大,分配变量可变化数越多,所能形成的可行方案呈指数增长;当参数 k 增加到 23 后,可以找到所有可行方案的最优解,此时, k 值若继续上升,完成时间不会缩短。

表 1 时刻 30 任务参数变化

Tab.1 Task parameters change at the moment 30

任务	资源需求								位置	执行时间
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8		
T_2	6.62	3.93	9.58	1.95	0.00	8.00	3.60	6.00	(62.50,77.32)	30.06
T_9	3.51	0.00	0.92	0.00	0.59	5.00	0.00	0.00	(24.97,72.47)	7.80
T_{10}	6.65	0.94	0.00	0.00	0.84	6.84	0.00	0.00	(25.51,80.03)	8.56
T_{12}	0.52	0.91	0.00	0.00	1.02	10.00	5.00	0.00	(5.00,95.00)	14.29
T_{13}	0.00	0.60	0.70	0.00	0.00	8.34	2.12	6.00	(25.00,45.00)	17.44
T_{14}	0.00	0.00	0.87	2.59	0.72	8.00	2.36	6.00	(5.00,95.00)	23.14
T_{15}	0.18	0.00	0.00	21.56	14.62	5.00	0.00	0.00	(25.00,45.00)	12.54
T_{16}	1.83	0.83	0.52	20.00	14.00	4.00	0.00	0.00	(5.00,95.00)	12.58

4 结论

本文通过研究 AOMPTP 问题,分析了方案改造代价;建立了以使命完成时间最短为目标的 AOMPTP 问题模型;设计了一种 MDLS/CG 求解算法;最后以一次登陆战役为例,对所提算法进行了验证和分析,得出了一系列具有启发性的结论:

- 1)当使命发生变化,需要及时调整方案,才能保证方案的性能,让“计划”的速度赶上“变化”的速度。
- 2)方案改造时需要付出代价,付出代价过少则得不到可行方案,过多则有可能造成浪费。
- 3)想要高性能的方案需要付出更高的代价,这就需要高层次指挥官对性能和代价这 2 个指标进行衡量,作出取舍。

参考文献 (References):

[1] Bui H, Han X, Mandal S, et al. Optimization-based Decision Support Algorithms for a Team-in-the-Loop Planning Experiment [C]//Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Systems, Man,

and Cybernetics, San Antonio, TX, 2009:4684-4689.
 [2] Park C, Pattipati K R, An W, et al. Quantifying the Impact of Information and Communication Structures via Distributed Auction Algorithm [C]//Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Istanbul, IEEE Press, 2010:2200-2207.
 [3] Mandal S, Han X, Pattipati K R, et al. Agent-Based Distributed Framework for Collaborative Planning [C]//Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Aerospace conference, Big Sky, MT, 2010:1-11.
 [4] Liao S H. Problem Structuring Methods in Military Command and Control [J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35(3):645-653.
 [5] Levchuk G M, Levchuk Y N, Luo J, et al. Normative Design of Organizations-Part I: Mission Planning [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2002, 32(3):346-359.
 [6] Levchuk G M, Levchuk Y N, Meirina C, et al. Normative Design of Project-Based Organizations-Part III: Modeling Congruent, Robust, and Adaptive Organi-

- zations[J].IEEE Transactionson SMC,2004,34(3):337-350
- [7] Levchuk G M, Levchuk Y N, Pattipati K R, et al. Mapping Flows onto Networks to Optimize Organizational Processes[C]//Proceedings of the 7th International Command and Control Research and Technology Symposium. Monterey, CA: IEEE Press, 2002:11-14.
- [8] Levchuk G M, Yu F, Pattipati K R, et al. From Hierarchies to Heterarchies: Application of Network Optimization to Design of Organizational Structures [C]//Proceedings of the 7th International Command and Control Research and Technology Symposium. Washington, DC, 2003:1-11.
- [10] Levchuk Y N, Pattipati K R, Kleinman D L. Designing Adaptive Organizations to Process a Complex Mission; algorithms and applications[C]//Proceedings of the 1998 Command and Control Research and Technology Symposium. Monterey, CA, 1998:1-8.
- [11] Levchuk Y N, Pattipati K R, Kleinman D L. Analytic Model Driven Organizational Design and Experimentation in Adaptive Command and Control[C]//Proceedings of 10th Command and Control Research and Technology Symposium. Arlington, VA, 2005:1-11.
- [12] 修保新,张维明,刘忠,等. C2组织适应性设计方法[J].系统工程与电子技术,2007,29(7):1102-1108. XIU Baoxin, ZHANG Weiming, LIU Zhong, et al. Adaptive Design of C2 Organizational Structure[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(7): 1102-1108.(in Chinese)
- [13] Pete A, Kleinman D L, Pattipati K R. Structural Congruence of Tasks and Organizations[C]//Proceedings of the 1994 Symp on Command and Control Research and Decision Aids, NPS, Monterey, CA, 1994: 168-175.
- [14] 姚佩阳,张杰勇,李巍,等. 适应性指挥控制组织研究进展(II)——组织适应性调整方法和测试方法综述[J].空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(3):54-59.
- YAO Peiyang, ZHANG Jieyong, LI Wei, et al. Advances in the Research of Adaptive C2 organization (II)-Review on the Methods of Organization Adaptive Adjusting and Organization Testing[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2012, 13(3):54-59.(in Chinese)
- [15] 牟亮,张维明,修保新,等. 基于滚动时域的C2组织决策层结构动态适应性优化[J].国防科技大学学报,2011,33(1):125-131.
- MU Liang, ZHANG Weiming, XIU Baoxin, et al. Dynamic Adaptive Optimization of C2 Organization Structure Based on Rolling Horizon[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(1):125-131.(in Chinese)
- [16] 阳东升,张维明,刘忠,等. C2组织的有效测度[J].自然科学进展,2005,15(3):349-356.
- YANG Dongsheng, ZHANG Weiming, LIU Zhong, et al. Effective Measures of C2 Organization[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(3): 349-356.(in Chinese)
- [17] 孙昱,姚佩阳,张杰勇. C2组织信息结构效能测度及综合评估[J].系统工程与电子技术,2015,37(6):1313-1318.
- SUN Yu, YAO Peiyang, ZHANG Jieyong. Measurement and Comprehensive Evaluation of C2 Organizational Information Structure Efficiency [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(6): 1313-1318.(in Chinese)
- [18] 姚佩阳,万路军,孙鹏. 基于RHP-IVFSA的多智能体编组任务分配动态优化[J].系统工程与电子技术,2014,36(7):1309-1319.
- YAO Peiyang, WAN Lujun, SUN Peng. Dynamic Task Allocation in Multiple Agent Groups Based on RHP-IVFSA[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(7): 1309-1319.(in Chinese)

(编辑:徐楠楠)