

C2 组织决策实体配置问题建模与求解方法

张杰勇, 姚佩阳

(空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 针对指挥控制组织设计中决策实体的配置问题, 提出了一种问题的配置模型及其求解方法。在分析传统决策实体配置模型不足的基础上, 采用了作战任务执行时间来测度决策实体工作负载, 建立了以全部决策实体工作负载的均方根 (root mean square, RMS) 最小为目标函数的问题数学模型。提出了基于最小 RMS 合并规则的层次聚类方法的问题求解思路, 给出了该方法的具体步骤和流程。最后结合联合作战仿真算例中一个任务-平台的调度方案, 验证了所提方法的有效性和优越性。

关键词: 运筹学; 指挥控制组织; 决策实体配置; 层次聚类方法; 均方根

中图分类号: TP 391.9

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.04.18

Model and solving method for collocating problem of decision-makers in C2 organization

ZHANG Jie-yong, YAO Pei-yang

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: To solve the collocating problem of decision-makers (DM) in the design of command and control (C2) organization, a collocating model and its solving algorithm are presented. On the basis of analyzing the scarcity of traditional collocating models, the processing time of an operational task is used to measure DM's workload, and a mathematical model whose objective function features the munimization of root mean square (RMS) value of all the DM's workload is built. Then a hierarchical clustering algorithm based on min-RMS merge rule for solving the problem is introduced, and the detailed steps and flow of this algorithm are offered. Finally, the validity and superiority of this algorithm are illuminated by a scheduling scheme of a task-platform which is in a case of a joint campaign.

Keywords: operation research; command and control (C2) organization; decision-makers (DM) collocating; hierarchical clustering algorithm; root mean square (RMS)

0 引言

指挥控制 (command and control, C2) 组织设计中决策实体的配置问题就是依据任务-平台的调度方案 (即什么平台在什么时间去执行什么任务)^[1-4], 将平台聚合成多个互不重叠的分组, 并为每个分组配置一个决策实体, 该问题也就是确定决策实体和平台的关系问题。决策实体配置问题是三阶段组织结构方法^[5-6]中第二阶段需要求解的问题, 在一个确定的环境中, 通过优化设计决策实体和平台的关系, 做到任务在决策实体之间合理分工, 责任明确, 可以提高作战使命的完成效率, 甚至在大幅度减少 C2 组织成员的情况下所具有的性能仍然优于传统的兵力组织模式, 这一点在指挥控制适应性结构 (adaptive architectures for command and control, A2C2) 系列实验以其拓展实验中得到了验证^[7-9]。

决策实体配置问题实质是平台的聚类问题, 主要的求

解方法是层次聚类方法。文献^[6,10]建立了以最小化决策实体最大工作负载为目标函数的数学模型, 并使用了层次聚类方法对问题模型进行了求解, 在使用层次聚类方法时, 提出了两种平台分组的合并规则: 基于最小相异度的合并规则和基于最小工作负载的合并规则。

本文在分析传统决策实体配置问题模型不足的基础上, 采用决策实体处理任务的执行时间作为决策实体工作负载的测度标准, 建立以全部决策实体工作负载的均方根 (root mean square, RMS) 最小为目标函数的问题约束模型, 并在所建问题模型的基础上, 研究基于层次聚类方法的模型求解思路。

1 决策实体配置问题建模

1.1 决策实体配置问题的基本概念

为了下文描述的方便, 给出决策实体配置问题的相关

概念。

(1) 决策实体(decision-makers, DM)即指挥资源,是整个 C2 组织的核心模块,是具有信息处理、决策和控制能力的实体,是作战行动中的指挥官,其能力就是控制必要的平台去执行一定的任务。记 C2 组织中决策实体集合为: $DM = \{DM_m\} (m = 1, 2, \dots, D)$, D 表示决策实体的数量。本文假设 D 个决策实体都是相同的。

(2) 平台(platform, P)即平台资源,是决策实体用来执行任务的凭借。记 C2 组织中所有平台的集合为: $P = \{P_j\} (j = 1, 2, \dots, K)$, K 表示平台的数量。

(3) 任务(task, T)即作战任务,由使命分解产生的完成该使命所需要执行的任务序列,每个任务都需要由一个决策实体或者多个决策实体控制一定的平台来处理,记 C2 组织需要执行的任务集合为: $T = \{T_i\} (i = 1, 2, \dots, N)$, N 表示任务的数量。

1.2 决策实体配置问题的数学描述

对决策实体配置问题进行数学建模,可通过以下步骤来描述。

1.2.1 决策实体配置问题的变量定义

(1) 平台到任务的分配变量 $\omega_{ij} (i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, K)$

$$\omega_{ij} = \begin{cases} 1, & P_j \text{ 分配给 } T_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

通过任务-平台的调度方案,可以获取 ω_{ij} , 因此,在决策实体配置问题中,该变量是已知的。

(2) 平台到决策实体的配置变量 $x_{mj} (m = 1, 2, \dots, D; j = 1, 2, \dots, K)$

$$x_{mj} = \begin{cases} 1, & P_j \text{ 隶属于 } DM_m \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

x_{mj} 是决策实体配置问题需要求解的变量。

(3) 任务到决策实体的分配变量 $u_{mi} (m = 1, 2, \dots, D; i = 1, 2, \dots, N)$

$$u_{mi} = \begin{cases} 1, & T_i \text{ 分配给 } DM_m \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

由 ω_{ij} 和 x_{mj} 可以计算得出 u_{mi} , 假如存在 P_j , 使得 $x_{mj} = 1$ 且 $\omega_{ij} = 1$, 那么 $u_{mi} = 1$, 即

$$u_{mi} = \begin{cases} 1, & \exists P_j \text{ s. t. } x_{mj} = 1 \text{ 且 } \omega_{ij} = 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

因此,对于所有的平台而言,存在以下关系

$$u_{mi} \geq \omega_{ij} \cdot x_{mj}, \quad m = 1, 2, \dots, D; \\ i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, K \quad (1)$$

(4) 决策实体在任务上的协作关系 $y_{nmi} (m, n = 1, 2, \dots, D \text{ 且 } m \neq n; i = 1, 2, \dots, N)$

$$y_{nmi} = \begin{cases} 1, & DM_m \text{ 和 } DM_n \text{ 在 } T_i \text{ 上存在协作} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

显然可以得出

$$y_{nmi} = u_{mi} \cdot u_{ni} = \min(u_{mi}, u_{ni}), \\ m, n = 1, 2, \dots, D \text{ 且 } m \neq n; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

1.2.2 决策实体配置问题的约束条件

(1) 一个平台只能隶属于一个决策实体,即

$$\sum_{m=1}^D x_{mj} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

(2) 由式(2)可知,只有当 $u_{mi} = 1$ 且 $u_{ni} = 1$ 时, $y_{nmi} = 1$, 可以推出

$$y_{nmi} \geq u_{mi}, \quad m, n = 1, 2, \dots, D; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

综合式(1)和式(4)可得

$$y_{nmi} \geq \omega_{ij} \cdot x_{mj}, \quad m, n = 1, 2, \dots, D \text{ 且 } m \neq n; \\ i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

同理可得

$$y_{nmi} \geq \omega_{ij} \cdot x_{nj}, \quad m, n = 1, 2, \dots, D \text{ 且 } m \neq n; \\ i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, K \quad (6)$$

1.2.3 决策实体配置问题的目标函数和数学描述

为了对决策实体配置问题中决策实体的工作负载进行描述,定义两种决策实体的工作负载, DM_m 内部工作负载 $I(m)$ 和 DM_m 外部工作负载 $E(m)$ [6]。

在以往关于决策实体配置问题数学模型的研究过程中,将 DM_m 控制的平台数量作为 $I(m)$ 的测度,将 DM_m 与其他所有决策实体的直接协作处理的任务数量作为 $E(m)$ 的测度 [6,10-13]。以平台的数量来测度 $I(m)$,以任务的数量来测度 $E(m)$,而将 $I(m)$ 和 $E(m)$ 的加权和作为总的工作负载。这种关于决策实体工作负载的定义方法存在着不合理性,因为平台和任务属于两个不同的概念,不能将两个不同的概念以简单的方式进行数量上的相加,并且一个决策实体控制的平台数量的多少,执行的任务数量的多少,并不能直接反应该决策实体工作负载的大小。

针对以上问题,本文将任务的执行时间作为决策实体工作负载的测度标准,对决策实体的内部工作负载和外部工作负载的测度方法进行重新定义,具体定义如下:

(1) DM_m 内部工作负载 $I(m)$ 的测度方法

$I(m)$ 为 C2 组织中的决策实体管理操作隶属于它的平台而承担的工作负载。 $I(m)$ 数值上为 DM_m 所控制的平台的工作负载之和,即

$$I(m) = \sum_{j=1}^K [x_{mj} \cdot S(j)], \quad m = 1, 2, \dots, D \quad (7)$$

式中, $S(j)$ 表示平台 P_j 的工作负载,本文定义 $S(j)$ 为平台所处理的任务的执行时间之和,即

$$S(j) = \sum_{i=1}^N (\omega_{ij} \cdot t_i), \quad j = 1, 2, \dots, K \quad (8)$$

式中, t_i 表示任务 T_i 的执行时间。

综合式(7)和式(8),可以得出

$$I(m) = \sum_{j=1}^K [x_{mj} \sum_{i=1}^N (\omega_{ij} t_i)], \quad m = 1, 2, \dots, D \quad (9)$$

(2) DM_m 外部工作负载 $E(m)$ 的测度方法

$E(m)$ 是一种协作负载,是决策实体在某一任务执行时可能需要与其他决策实体进行协调而承担的工作负载。 $E(m)$ 数值上为 DM_m 与其他所有决策实体的协作负载之和,即

$$E(m) = \sum_{n=1, n \neq m}^D R(m, n), \quad m = 1, 2, \dots, D \quad (10)$$

式中, $R(m, n)$ 表示 DM_m 与 $DM_n (m \neq n)$ 的直接协作工作负

关系网中全部平台分组(决策实体)工作负载的 RMS 值,选择 RMS 最小的合并方案,本文将这一合并规则称为基于最小 RMS 的平台分组合并规则。显然,这一规则满足式(17)所建的问题模型的目标函数。

基于最小 RMS 的平台分组合并规则的操作流程如下:

步骤 1 任意选择两个平台分组进行合并

在平台分组合并前,假设存在的平台分组(决策实体)的数量为 D_{now} ,任意取出两个平台分组(决策实体) DM_h 和 DM_k ($1 \leq h, k \leq D_{\text{now}}$ 且 $h \neq k$), 合并 DM_h 和 DM_k 为新的平台分组(决策实体) DM_G , 则 DM_G 的工作负载 $CW(G)$ 为

$$CW(G) \leftarrow CW(h) + CW(k) - W^E \cdot (2R(h, k) + \sum_{m=1, m \neq h, k}^{D_{\text{now}}} \Delta(m, h, k)) \quad (18)$$

合并 DM_h 和 DM_k 后,协作关系网中其他平台分组(决策实体) DM_m ($1 \leq m \leq D_{\text{now}}$ 且 $m \neq h, k$) 的工作负载 $CW(m)$ 更新为

$$CW(m) \leftarrow CW(m) - W^E \cdot \Delta(m, h, k), m \neq h, k \quad (19)$$

式中, $\Delta(m, h, k) = \sum_{i=1}^N (u_{hi} \cdot u_{ki} \cdot u_{mi} \cdot t_i)$, 表示平台分组(决策实体) DM_m, DM_h 和 DM_k 三者共同协作处理的任务的执行时间之和。

步骤 2 平台分组合并后,计算合并后的 $D_{\text{now}} - 1$ 个平台分组(决策实体)工作负载的 RMS 值为

$$RMS_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{D_{\text{now}} - 1} (CW^2(G) + \sum_{m=1, m \neq h, k}^{D_{\text{now}}} CW^2(m))} \quad (20)$$

步骤 3 选择最佳的合并选项

在平台分组(决策实体)数量为 D_{now} 的情况下,所有平台分组合并方案的数量为 $D_{\text{now}} \cdot (D_{\text{now}} - 1) / 2$ 个,假设其中最佳的合并选项为 (r, s) , 则 (r, s) 为所有合并方案中 RMS 值最小的合并选项,即

$$(r, s) = \arg \min_{h, k} (RMS_{h, k}) \quad (21)$$

2.3 参数和变量的更新法则

将平台分组(决策实体) DM_r 和 DM_s 合并为新的平台分组(决策实体) DM_G 后,形成了新的组织协作关系,以下变量和参数需要进行更新:

(1) 平台到决策实体的隶属关系为

$$x_{Gj} \leftarrow \max(x_{rj}, x_{sj}) \quad (22)$$

(2) 任务到决策实体的分配关系为

$$u_{Gj} \leftarrow \max(u_{rj}, u_{sj}) \quad (23)$$

(3) 其他平台分组(决策实体)和 DM_G 之间的直接协作工作负载为

$$R(m, G) \leftarrow R(m, r) + R(m, s) - \Delta(m, r, s) m \neq r, s \quad (24)$$

3 算例分析

以文献[16]中联合作战的战役想定为仿真算例,在 Inter(R) Pentium(R) 4 CPU 3.00 GHz 计算机上进行仿真实验,对本文所提的方法进行验证。

该算例中任务的数量 $N=18$, 平台的数量 $K=20$, 设该作战想定中某一次规划的任务-平台调度方案的甘特图(决

策实体配置问题的输入,是已知的)如图 2 所示。由图 2 可知,平台到任务的分配变量 ω_{ij} ($i=1, 2, \dots, 18; j=1, 2, \dots, 20$), 任务 T_i ($i=1, 2, \dots, 18$) 的执行时间 t_i ($i=1, 2, \dots, 18$) 以及任务和平台其他属性的详细描述可参考文献[16]。

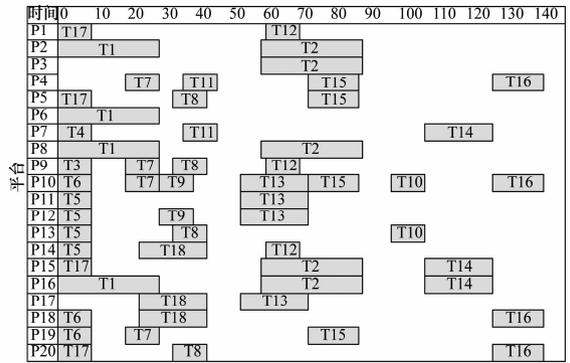


图 2 任务-平台调度方案甘特图

针对以上算例,作以下仿真实验:

仿真实验 1 当 $W^I = W^E = 1, D=5$ 时,分别使用基于最小相异度合并规则、基于最小工作负载合并规则以及基于最小 RMS 合并规则的层次聚类方法(有关基于最小相异度的合并规则、基于最小工作负载的合并规则的层次聚类方法的详细描述可参考文献[6, 10]),求解以上算例,得出了平台的聚类方案、 DM_m ($m=1, 2, \dots, 5$) 的工作负载和 5 个决策实体工作负载的 RMS 值,如表 1 所示。

由表 1 可得,当 $D=5$ 时,相比于其他平台分组合并规则的层次聚类方法,使用基于最小 RMS 平台分组合并规则的层次聚类方法得到的平台的聚类方案,使 C2 组织总的工作负载分布更加均衡,得到的决策实体配置问题的目标函数值更小,表明了本文所提方法的可行性和有效性。

表 1 3 种合并规则下的仿真结果 ($D=5$)

决策实体	基于最小相异度合并规则的层次聚类法		
	平台	DM 的工作负载	RMS 值
DM_1	$P_1, P_5, P_9, P_{13}, P_{20}, P_{18}$	315	
DM_2	P_2, P_3, P_{16}	250	
DM_3	P_4, P_{19}, P_{10}	275	271.974 2
DM_4	P_6, P_8, P_7, P_{15}	290	
DM_5	$P_{11}, P_{12}, P_{14}, P_{17}$	220	
决策实体	基于最小工作负载合并规则的层次聚类法		
	平台	DM 的工作负载	RMS 值
DM_1	$P_1, P_7, P_9, P_4, P_5, P_{20}$	310	
DM_2	P_2, P_3, P_6, P_8	240	
DM_3	P_{10}, P_{19}, P_{18}	270	263.476 7
DM_4	$P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{14}, P_{17}$	260	
DM_5	P_{15}, P_{16}	230	
决策实体	基于最小 RMS 合并规则的层次聚类法		
	平台	DM 的工作负载	RMS 值
DM_1	$P_1, P_9, P_5, P_{20}, P_{13}$	240	
DM_2	P_2, P_8, P_{16}, P_6	280	
DM_3	P_3, P_{15}, P_7	200	258.185 9
DM_4	$P_4, P_{10}, P_{19}, P_{18}$	330	
DM_5	$P_{11}, P_{12}, P_{17}, P_{14}$	220	

仿真实验 2 分别在 $W^I = 1, W^E = 1; W^I = 1, W^E = 2; W^I = 1, W^E = 3; W^I = 1, W^E = 4$ 这 4 种情况下, 决策实体的数量 D 的取值为 $D = 2, 3, \dots, 8, 9$, 使用基于最小相异度合并规则、基于最小工作负载合并规则以及基于最小 RMS 合并规则的层次聚类方法求解该算例, 得到的 D 个决策实体工作负载的 RMS 的变化曲线, 分别如图 3 ~ 图 6 所示。

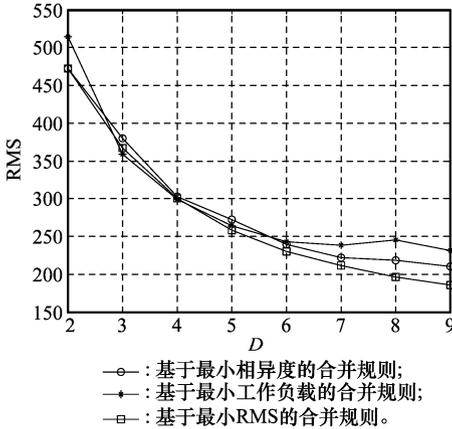


图 3 RMS 值随 D 值的变化曲线 ($W^I = W^E = 1$)

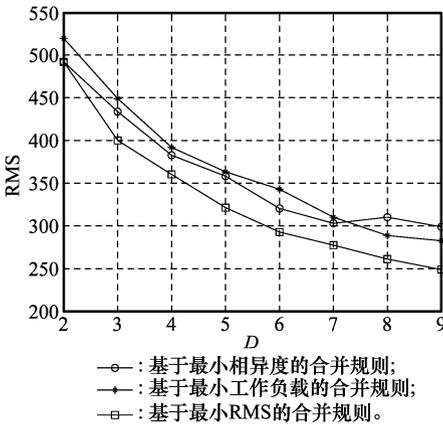


图 4 RMS 值随 D 值的变化曲线 ($W^I = 1, W^E = 2$)

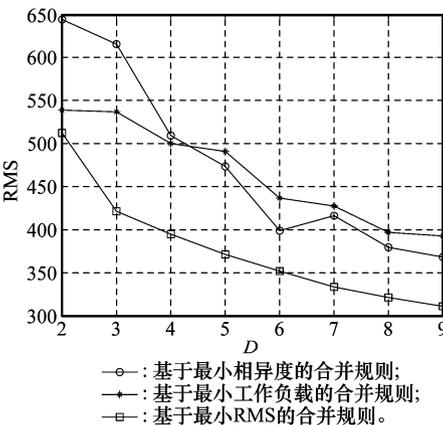


图 5 RMS 值随 D 值的变化曲线 ($W^I = 1, W^E = 3$)

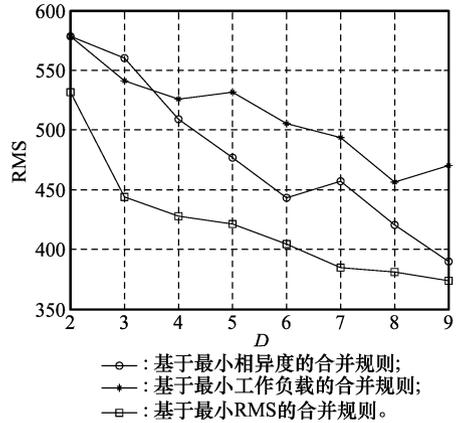


图 6 RMS 值随 D 值的变化曲线 ($W^I = 1, W^E = 4$)

由图 3 ~ 图 6 中曲线的变化可得, 在相同的设置条件 (设置条件包括工作负载的权重和决策实体的数量) 下, 本文所提的基于最小 RMS 合并规则的层次聚类方法所得到的平台的聚类效果要明显优于在其他两种合并规则层次聚类方法下所得的聚类效果, 充分体现了本文所提方法的优越性, 也充分表明了该方法适用于决策实体的配置问题的求解。

对比图 3 ~ 图 6 中曲线的变化, W^E 值与 W^I 值的比值越大, 本文所提的基于最小 RMS 合并规则的层次聚类方法所体现的优越性越明显, 这也表明了决策实体配置问题的求解方法主要是通过减小全部决策实体的外部工作负载之和来实现平台聚类的优化。

仿真实验 3 当 $W^I = W^E = 1$ 时, D 的取值为 $D = 2, 3, \dots, 18, 19$, 使用基于最小相异度合并规则、基于最小工作负载合并规则以及基于最小 RMS 合并规则的层次聚类方法求解该算例, 每种方法分别作 100 次仿真, 这 3 种层次聚类方法平均所耗时间的变化曲线, 如图 7 所示。

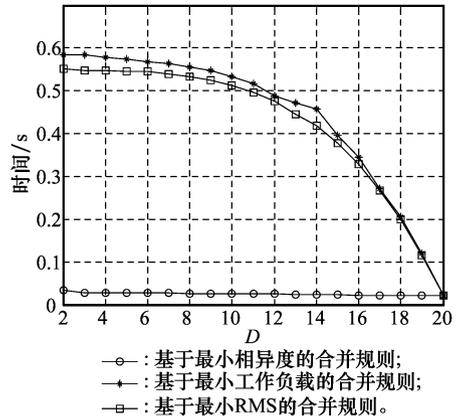


图 7 3 种合并规则平均耗时的变化曲线

由图 7 中曲线的变化可得, 与基于最小相异度合并规则的层次聚类方法相比, 基于最小 RMS 合并规则的层次聚类方法运算耗时较长, 但该方法的运算耗时与基于最小工作负载合并规则的层次聚类法的运算耗时基本相当。表明

了本文所提方法在算法运算耗时方面的有效性,该方法能够满足 C2 组织设计中决策实体配置问题求解的需求。

4 结论与讨论

本文提出了一种 C2 组织设计中决策实体配置问题的模型及其求解方法,通过采用任务的执行时间来测度决策实体的内部工作负载和外部工作负载,以及采用全部决策实体工作负载的 RMS 值作为问题的目标函数,建立了更为合理的决策实体配置问题数学模型,并针对所建的数学模型,提出了基于最小 RMS 平台分组合并规则的层次聚类方法的问题求解思路,算例的仿真结果说明了本文所提方法的可行性和优越性。

但是本文提出的模型存在两方面的不足:① 定义决策实体工作负载的测度方法只考虑任务的执行时间,而在实际作战中,还应该考虑任务和平台的其他属性对决策实体工作负载的影响,如平台的智能化水平,任务的对抗激烈程度^[17]等;② 本文设计的只是一个确定使命环境下决策实体配置问题的数学模型,并且在模型中假设全部决策实体都是相同的,而在实际作战中,应该考虑 C2 组织所处使命环境的不确定因素以及决策实体之间能力的差异性。这些将是本课题下一步的工作。

参考文献:

- [1] Bui H, Han X, Mandal S, et al. Optimization-based decision support algorithms for a team-in-the-loop planning experiment[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 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]// *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2010:2200 - 2207.
- [3] Mandal S, Han X, Pattipati K R, et al. Agent-based distributed framework for collaborative planning[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Aerospace Conference*, 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 Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 2002, 32(3): 346 - 359.
- [6] Levchuk, G M, Levchuk Y N, Luo J, et al. Normative design of organizations—part II: organizational structure[J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 2002, 32(3): 360 - 375.
- [7] Kemple W G, Kleinman D L, Berigan M C. A2C2 initial experiment: adaptation of the joint scenario and formalization [C]// *Proc. of the Command and Control Research and Technology Symposium*, 1996:837 - 846.
- [8] Levchuk Y N, Pattipati K R, Kleinman D L. Analytic model driven organizational design and experimentation in adaptive command and control [C]// *Proc. of the Command and Control Research and Technology Symposium*, 2005:1 - 11.
- [9] Hocoavar S P, Kemple W G, Kleinman D, et al. Assessments of simulated performance of alternative architectures for command and control; the role of coordination[C]// *Proc. of the Command and Control Research and Technology Symposium*, 1999: 1 - 22.
- [10] 阳东升, 张维明, 刘忠, 等. 指控组织设计方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010:161 - 189. (Yang D S, Zhang W M, Liu Z, et al. *Designing of command and control organization* [M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2010:161 - 189.)
- [11] 刘宏芳, 阳东升, 刘忠, 等. 兵力编成裁剪算法研究: 决策结点裁剪[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(5): 106 - 112. (Liu H F, Yang D S, Liu Z, et al. Research on algorithms of tailoring military force tailoring nodes of decision-making[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2007, 27(5): 106 - 112.)
- [12] 刘宏芳, 阳东升, 刘忠, 等. 兵力编成结构裁剪中指挥关系优化研究[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(4): 99 - 104. (Liu H F, Yang D S, Liu Z, et al. Research on optimize algorithms of command relationship in tailoring military force structure[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, 28(4): 99 - 104.)
- [13] 阳东升, 彭小宏, 修保新, 等. 组织协作网与决策树[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(1): 63 - 67. (Yang D S, Peng X H, Xiu B X, et al. Organizational collaboration net and decision-making tree[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(1): 63 - 67.)
- [14] Levchuk, G M, Levchuk Y N, Meirina C, et al. Normative design of project-based organizations—part III: modeling congruent, robust, and adaptive organizations[J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 2004, 34(3): 337 - 350.
- [15] Garey M R, Johnson D S. *Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness* [M]. San Francisco, CA: Freeman, 1979.
- [16] Yu F, Tu F, Pattipati K R. Integration of a holonic organizational control architecture and multiobjective evolutionary algorithm for flexible distributed scheduling[J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 2008, 38(5): 1001 - 1017.
- [17] 牟亮, 张维明, 陈涛, 等. 不确定条件下 C2 组织结构的“任务—平台”关系设计模型及算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(12): 2576 - 2583. (Mu L, Zhang W M, Chen T, et al. Task-platform relation design model and algorithm for C2 organization structure under uncertainty[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(12): 2576 - 2583.)