

兵力组织适应性设计方法

孙 昱¹, 姚佩阳¹, 赵小欢², 杨凯陟³

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 92269 部队, 浙江舟山, 316099;
3. 94627 部队, 江苏无锡, 214141)

摘要 为建立信息化条件下的高效作战体系,从组织实体和组织结构两方面形式化描述了兵力组织的基本概念,在此基础上提出了一种系统的兵力组织适应性设计方法。该方法的思路是将兵力组织适应性设计这一复杂问题分解为行动计划设计、行动计划调整、指控结构设计和指控结构调整 4 个相对简单的子问题,通过解决这些子问题来实现兵力组织的构建与动态演化。详细分析了不同子问题对应子方法之间的耦合关系并界定了各子方法的输入输出信息,然后综合考虑任务完成时间和任务完成质量给出了组织行动计划的设计及调整方法,通过衡量负载水平与负载均衡程度给出了组织指控结构的设计及调整方法,最后指出了所提方法的下一步发展。

关键词 兵力组织,形式化描述,适应性设计,行动计划,指控结构

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.03.018

中图分类号 E917 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)03-0104-07

An Adaptive Design Method of Army Organization

SUN Yu¹, YAO Peiyang¹, ZHAO Xiaohuan², YANG Kaizhi³

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Unit 92269, Zhoushan 316099, Zhejiang, China; 3. Unit 94627, Wuxi 214141, Jiangsu, China)

Abstract: In order to build an effective operation system under conditions of information, this paper describes concept of army organization formally from two aspects of organizational entity and organizational structure, and proposes a systematic adaptive design method of army organization. The idea of the proposed method is to resolve such complex problems into four relatively simple sub-problems first, i. e. operation plan design problem, operation plan adjustment problem, command and control (C2) structure design problem and C2 structure adjustment problem, and then to solve these sub-problems for the achievement of construction and dynamic evolution of army organization. The coupled relations among sub-methods used to solve the sub-problems are analyzed in detail and the input/output information of the sub-methods is ruled. On the basis of this, the design method and adjustment method of operation plan are introduced with the comprehensive consideration of task completion time and task completion quality of army organization while the design method and adjustment method of C2 structure are presented with the measurement of load level and load balancing extent of army organization. Finally, the future development of

收稿日期: 2016-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(61573017)

作者简介: 孙 昱(1989—),男,江苏武进入,博士生,主要从事指挥控制系统建模与仿真研究. E-mail: suny. z@qq. com

引用格式: 孙昱,姚佩阳,赵小欢,等. 兵力组织适应性设计方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(2):104-110. SUN Yu, YAO Peiyang, ZHAO Xiaohuan, et al. An Adaptive Design Method of Army Organization[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition),2017,18(2):104-110.

the proposed adaptive design method is given.

Key words: army organization; formal description; adaptive design; operation plan; C2 structure

兵力组织是围绕一定的作战目的,由各作战单元有机组合而形成的一个作战整体。在信息技术日新月异的今天,战场环境中的兵力组织面临着严峻的挑战^[1]。这些挑战包括组织所处环境的不稳定性,组织作战使命的复杂性,组织作战资源的多样性和组织结构的松散性等等。为有效应对这些挑战,提高兵力组织的整体对抗优势,优化兵力组织的结构和模式成为信息化条件下作战指挥的必然选择^[2]。

兵力组织适应性设计问题^[3-5]研究如何科学合理地设计与战场环境相适应的兵力组织,它有两层含义,一是根据预先已知的战场环境信息,如何从无到有地构造一个与该环境相适应的兵力组织,二是当战场环境变化时,已经存在的兵力组织如何相应地动态调整演化。为解决这一问题,国内外许多学者提出了不同的兵力组织适应性设计方法,主要包括:基于三阶段思想的兵力组织适应性设计方法^[6-8],基于粒度计算的兵力组织适应性设计方法^[9-10]和基于扩展三阶段思想的兵力组织适应性设计方法^[11-13]。这些方法虽然能在一定程度上解决兵力组织适应性设计问题,但仍然存在一些不足,例如这些方法侧重于研究如何构造兵力组织,而对其动态演化讨论得还不够深入系统,再如这些方法构造出的兵力组织可能出现过多的指挥层级,与信息化条件下组织模式扁平化的趋势不符^[14-15]。

为克服当前研究存在的不足,本文提出一种新的兵力组织适应性设计方法。下面先形式化描述兵力组织的基本概念,然后在其基础上介绍该方法的具体内容,同时论证其可行性与合理性。

1 兵力组织的形式化描述

1.1 组织实体

兵力组织的实体是组成兵力组织的元单位。组织实体通常包括任务实体、平台实体和决策实体3类。

任务实体(Task, T)简称任务,是兵力组织为达成其作战目的而必须采取的行动。兵力组织的任务集合记为 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_N\}$, 其中 N 为 T 中任务的数量。 $\forall T_i \in T$, 其基本属性包括:①任务坐标位置 (x_{T_i}, y_{T_i}) ; ②任务持续时间 t_i ; ③任务的能力需求向量 $(dt_{i1}, dt_{i2}, \dots, dt_{iL})$, 其中若 $dt_{iL} > 0$, 则 dt_{iL} 表示任务 T_i 被处理时,需要的第 l 项作战能力的大小,若 $dt_{iL} = 0$, 则 dt_{iL} 表示处理任务 T_i 时并不需要第 l 项作战能力, L 是不同作战能力的数量。

平台实体(Platform, P)简称平台,是组织中的资源载体,是直接参与任务的作战力量的抽象,例如战机编队,步兵连等。兵力组织的平台集合记为 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_V\}$, 其中 V 为 P 中平台的数量。 $\forall P_j \in P$, 其基本属性包括:①平台初始的坐标位置 (x_{P_j}, y_{P_j}) ; ②平台的移动速度 v_{P_j} ; ③平台的能力向量 $(op_{j1}, op_{j2}, \dots, op_{jL})$, 其中若 $op_{jL} > 0$, 则 op_{jL} 表示平台 P_j 的第 l 项作战能力的大小,若 $op_{jL} = 0$, 则 op_{jL} 表示平台 P_j 不提供第 l 项作战能力。

决策实体(Decision-maker, DM)是组织中的指挥控制单元,例如各级指挥部。扁平化的兵力组织中通常含有一个战役决策实体(Operational Decision-maker, ODM)和多个战术决策实体(Tactical Decision-maker, TDM)。战役决策实体负责整个兵力组织的集中宏观控制,战术决策实体负责具体作战任务的执行。兵力组织的战役决策实体记为 ODM_1 , 其能同时指挥控制的战术决策实体的数量上限记为 D_{\max} , 战术决策实体的集合记为 $TDM = \{TDM_1, TDM_2, \dots, TDM_D\}$, 其中 D 为 TDM 中战术决策实体的数量,满足 $2 \leq D \leq D_{\max}$ 。

1.2 组织结构

兵力组织实体间的关系形成了兵力组织的结构,分为行动计划和指挥控制结构2个层次。

定义1 兵力组织的行动计划是兵力组织根据己方作战目的,制定的行动方案和资源调度方案,由二元组 $OP = (R_{T-T}, R_{T-P})$ 表示,其中 R_{T-T} 是任务间的时序约束关系、 R_{T-P} 是平台对任务的处理关系,见图1。

任务间的时序约束关系 R_{T-T} 可由矩阵 $M^{T-T} = (m_{ij}^{T-T})_{N \times N}$ 表示,若 T_i 是 T_j 的前导任务,则 $m_{ij}^{T-T} = 1$, 否则 $m_{ij}^{T-T} = 0$ 。平台对任务的处理关系 R_{T-P} 可由矩阵 $M^{T-P} = (m_{ij}^{T-P})_{N \times V}$ 表示,若平台 P_j 被分配处理任务 T_i , 则 $m_{ij}^{T-P} = 1$, 否则 $m_{ij}^{T-P} = 0$ 。由此,组织的行动计划也表示为 $OP = (M^{T-T}, M^{T-P})$ 。

定义2 兵力组织的指挥控制结构是兵力组织根据其行动计划,对组织内各决策实体所属的平台、任务,以及决策实体相互间关系作出的安排,由四元组 $CCS = (R_{ODM-TDM}, R_{TDM-TDM}, R_{TDM-P}, R_{TDM-T})$ 表示,其中 $R_{ODM-TDM}$ 是战役决策实体对战术决策实体的指挥控制关系, $R_{TDM-TDM}$ 是战术决策实体间的协作关系, R_{TDM-P} 是战术决策实体对平台实体的指挥控制关系, R_{TDM-T} 是战术决策实体对任务实体的执行关系,见图2。

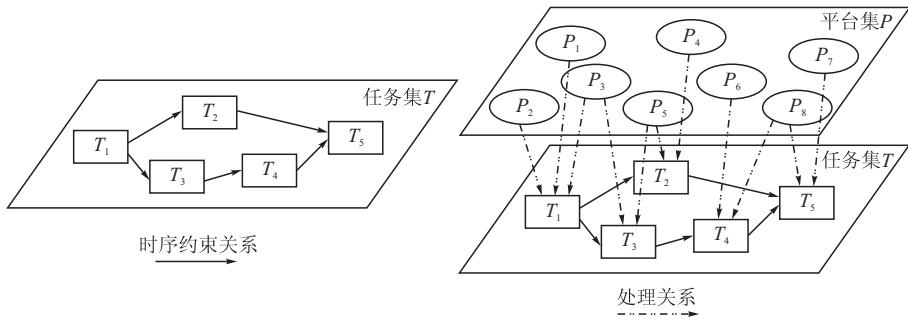


图1 兵力组织的行动计划

Fig. 1 Operational Plan of army organization

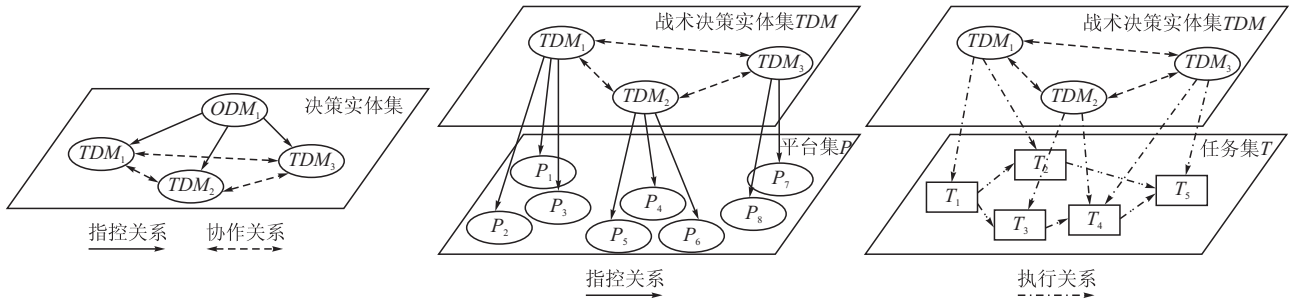


图2 兵力组织的指挥控制结构

Fig. 2 Command and Control Structure of army organization

战役决策实体对战术决策实体的指挥控制关系 $R_{ODM-TDM}$ 可由矩阵 $M^{ODM-TDM} = (m_{ij}^{ODM-TDM})_{1 \times D}$ 表示, 若 ODM_1 指挥控制 TDM_j , 则 $m_{1,j}^{ODM-TDM} = 1$, 否则 $m_{1,j}^{ODM-TDM} = 0$. 战术决策实体间的协作关系 $R_{TDM-TDM}$ 可由矩阵 $M^{TDM-TDM} = (m_{ij}^{TDM-TDM})_{D \times D}$ 表示, 若 TDM_i 与 TDM_j 保持协作, 则 $m_{ij}^{TDM-TDM} = 1$, 否则 $m_{ij}^{TDM-TDM} = 0$. 战术决策实体对平台实体的指挥控制关系 R_{TDM-P} 可由矩阵 $M^{TDM-P} = (m_{ij}^{TDM-P})_{D \times V}$ 表示, 若 TDM_i 指挥控制平台 P_j , 则 $m_{ij}^{TDM-P} = 1$, 否则 $m_{ij}^{TDM-P} = 0$. 战术决策实体对任务实体的执行关系 R_{TDM-T} 可由矩阵 $M^{TDM-T} = (m_{ij}^{TDM-T})_{D \times N}$ 表示, 若 TDM_i 执行任务 T_j , 则 $m_{ij}^{TDM-T} = 1$, 否则 $m_{ij}^{TDM-T} = 0$. 由此, 组织的指挥控制结构也表示为 $CCS = (M^{ODM-TDM}, M^{TDM-TDM}, M^{TDM-P}, M^{TDM-T})$

4 个子问题。

针对不同的子问题, 兵力组织适应性设计方法包含有相应的子解决方法, 这些子解决方法之间的耦合关系见图 3, 即指挥结构设计和行动计划调整都需要组织当前的行动计划作为其输入信息, 而指挥结构调整不仅需要组织当前的行动计划, 还需要组织当前的指挥结构作为其输入信息。

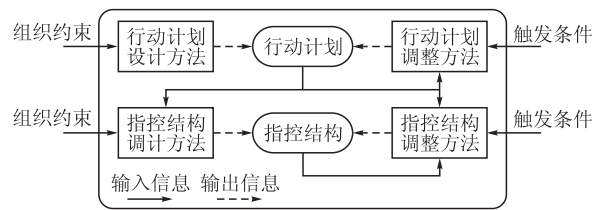


图3 子解决方法之间的耦合关系

Fig. 3 Coupling relationship among sub-methods

2 兵力组织适应性设计方法

兵力组织适应性设计问题需要解决组织构造和组织调整演化 2 个子问题。组织构造问题研究在已知兵力组织各个实体集合的基础上, 如何设计兵力组织的结构。组织调整问题研究当战场环境中出现诸如任务新增、平台损毁、决策实体遭破坏等突发事件时, 组织结构如何相应地调整演化。由于兵力组织的结构分为行动计划和指挥控制结构 2 个层次, 因此兵力组织适应性设计问题可以分解为行动计划设计、指挥结构设计、行动计划调整和指挥结构调整

2.1 兵力组织行动计划设计方法

兵力组织行动计划 $OP = (M^{T-T}, M^{T-P})$, 行动计划设计是在已知任务集 T 和平台集 P 的基础上, 构造矩阵 M^{T-T} (即设计 T 中任务的执行顺序) 和矩阵 M^{T-P} (为各个平台分配任务)。 M^{T-T} 通常由决策人员结合领域专家的经验进行构造, 属于军事行动过程问题, 因此 OP 的设计主要是设计矩阵 M^{T-P} 。

在设计矩阵 M^{T-P} 时, 希望达成的目标主要包括: ①兵力组织完成集合 T 中所有任务花费的时间最短; ②集合 T 中各个任务的完成质量较高。若任务 T_i 的开始时间为 st_i , 则其结束时间为 $et_i = st_i +$

t_i , 兵力组织完成所有任务花费的时间为:

$$AT = \max(et_1, et_2, \dots, et_N) \quad (1)$$

若矩阵 \mathbf{M}^{T-P} 已经确定, 则由 \mathbf{M}^{T-P} 可知处理任务 T_i 的平台集为 $S_{T_i}^P = \{P_j | m_{ij}^{T-P} = 1, 1 \leq j \leq V\}$, 任务 T_i 的完成质量定义为:

$$QT_i = \left(\prod_{l \in \varphi(i)} z_{il} \right)^{1/\|\varphi(i)\|} \quad (2)$$

式中: $\varphi(i)$ 是处理 T_i 时所需要的作战能力类型的集合, 即 $\varphi(i) = \{k | dt_{ik} > 0, 1 \leq k \leq L\}$; $\|\varphi(i)\|$ 是 $\varphi(i)$ 中元素的数量; $z_{il} = \min(\sum_{P_j \in S_{T_i}^P} op_{jl} / dt_{il}, 1)$ 是 T_i 的第 l 项作战能力需求被满足的程度。兵力组织完成所有任务的平均质量定义为:

$$QM = \left(\prod_{i=1}^N QT_i \right)^{1/N} \quad (3)$$

QM 越大, 兵力组织完成所有任务的质量越好。

由此, 矩阵 \mathbf{M}^{T-P} 的设计模型为:

$$\min AT, \max QT$$

$$\text{s. t. } m_{ij}^{T-P} \in \{0, 1\}, 1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq V \quad (4)$$

模型(4)的求解算法与具体应用案例可参考文献[16]。

2.2 兵力组织行动计划调整方法

作战过程中由于战场环境的不确定性, 任务集 T 中可能会临时增加新任务, 平台集 P 中也可能有平台被损毁, 这些突发事件将促使兵力组织调整矩阵 \mathbf{M}^{T-P} (即调整资源调度方案), 以便更好地完成其作战任务, 达成其作战目的。

在时刻 t , 兵力组织需要完成的任务集记为 $T(t) = \{T_{g_1}, T_{g_2}, \dots, T_{g_{N(t)}}\}$, 其中 $N(t)$ 为 $T(t)$ 中元素的数量, 兵力组织拥有的平台集记为 $P(t) = \{P_{h_1}, P_{h_2}, \dots, P_{h_{V(t)}}\}$, 其中 $V(t)$ 为 $P(t)$ 中元素的数量。此时平台实体与任务实体间的处理关系记为 $R(t)_{T-P}$, 对应的矩阵为 $\mathbf{M}(t)^{T-P} = (m(t)_{ij}^{T-P})_{N(t) \times V(t)}$, 其中若 P_{h_j} 被分配处理 T_{g_i} , 则 $m(t)_{ij}^{T-P} = 1$, 否则 $m(t)_{ij}^{T-P} = 0$ 。

若在时刻 t , 兵力组织遭遇任务新增、平台损毁等突发事件, 组织的任务集变化为 $T(t') = \{T_{d_1}, T_{d_2}, \dots, T_{d_{N(t')}}\}$, 其中 $N(t')$ 为 $T(t')$ 中元素的数量, 平台集变化为 $P(t') = \{P_{q_1}, P_{q_2}, \dots, P_{q_{V(t')}}\}$, 其中 $V(t')$ 为 $P(t')$ 中元素的数量。此时兵力组织需要调整矩阵 $\mathbf{M}(t)^{T-P}$, 调整后的矩阵记为 $\mathbf{M}(t')^{T-P} = (m(t')_{ij}^{T-P})_{N(t') \times V(t')}$, 其中若 P_{q_j} 被分配处理 T_{d_i} , 则 $m(t')_{ij}^{T-P} = 1$, 否则 $m(t')_{ij}^{T-P} = 0$ 。

为了保持组织的稳定性, 兵力组织在调整矩阵 $\mathbf{M}(t)^{T-P}$ 时通常遵循最小变更原则, 即只为以下 2 类任务重新分配平台: 一类是新增加的任务, 这类任务构成的集合为 $T^{\text{new}} = T(t') - T(t) \cap T(t)$; 另一类是因平台

损毁而导致完成质量将受影响的任务, 这类任务构成的集合为 $T^{\text{impact}} = \{T_{g_i} | P_{h_j} \in P^{\text{break}}, m(t)_{ij}^{T-P} = 1\} \cap T(t')$, 其中, $P^{\text{break}} = P(t) - P(t) \cap P(t')$ 是损毁的平台构成的集合。

矩阵 $\mathbf{M}(t)^{T-P}$ 调整后, 兵力组织完成所有任务花费的时间记为 AT' , 任务集 $T(t')$ 中任务 T_{d_i} 的完成质量记为 QT_i' , 由此, 矩阵 $\mathbf{M}(t)^{T-P}$ 的调整模型为

$$\begin{aligned} & \min AT' \\ \text{s. t. } & m(t')_{ij}^{T-P} \in \{0, 1\}, (T_{d_i} \in T(t')) \wedge \\ & (P_{q_j} \in P(t')) QT_i' \geq \delta_i, (T_{d_i} \in T^{\text{new}} \cup T^{\text{impact}}) \\ & m(t')_{ij}^{T-P} = m(t)_{kl}^{T-P}, (T_{d_i} \in T(t') - T^{\text{new}} - T^{\text{impact}}) \wedge \\ & (T_{d_i} = T_{g_k}) \wedge (P_{q_j} \in P(t') \cap P(t)) \wedge (P_{q_j} \\ & = P_{h_l}) \\ & m(t')_{ij}^{T-P}, (T_{d_i} \in T(t') - T^{\text{new}} - T^{\text{impact}}) \wedge (T_{d_i} = \\ & T_{g_k}) \wedge (P_{q_j} \in P(t') - P(t') \cap P(t)) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, 第 2 条约束表示新任务和受影响任务的完成质量不能低于一定的水平, 第 3 条和第 4 条约束表示处理未受影响任务的平台实体和原计划保持一致。模型(5)的求解算法和具体应用案例可以参考文献[17]。

2.3 兵力组织指控结构设计方法

兵力组织的指控结构 $CCS = (\mathbf{M}^{\text{ODM-TDM}}, \mathbf{M}^{\text{TDM-TDM}}, \mathbf{M}^{\text{TDM-P}}, \mathbf{M}^{\text{TDM-T}})$, CCS 的设计即在已知任务集 T 、平台集 P 和行动计划 OP 的基础上构造矩阵 $\mathbf{M}^{\text{ODM-TDM}}$ (即决定战役决策实体指挥哪些战术决策实体)、 $\mathbf{M}^{\text{TDM-TDM}}$ (即决定哪些战术决策实体之间建立协作)、 $\mathbf{M}^{\text{TDM-P}}$ (即决定各个战术决策实体控制哪些平台) 和 $\mathbf{M}^{\text{TDM-T}}$ (即决定各个战术决策实体负责执行哪些任务)。

兵力组织中战术决策实体都是战役决策实体的下属, 故矩阵 $\mathbf{M}^{\text{ODM-TDM}}$ 满足 $m_{1,j}^{\text{ODM-TDM}} = 1$ ($1 \leq j \leq D$)。为提高组织的协同性, 任意 2 个战术决策实体之间均需建立协作, 故矩阵 $\mathbf{M}^{\text{TDM-TDM}}$ 满足:

$$m_{ij}^{\text{TDM-TDM}} = \begin{cases} 1, & \text{if } i \neq j \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

因此, 构造矩阵 $\mathbf{M}^{\text{ODM-TDM}}$ 和 $\mathbf{M}^{\text{TDM-TDM}}$ 的关键在于确定战术决策实体的数量 D 。

在兵力组织中, 若战术决策实体 TDM_i 控制平台 P_k , 而 P_k 被分配处理任务 T_j , 则 TDM_i 是 T_j 的一个执行者, 于是矩阵 $\mathbf{M}^{\text{TDM-T}}$ 和 $\mathbf{M}^{\text{TDM-P}}$ 之间具有如下关系:

$$m_{ij}^{\text{TDM-T}} = \begin{cases} 1, & \text{if } (m_{jk}^{\text{TDM-P}} = 1) \wedge (m_{jk}^{\text{T-P}} = 1) \wedge (1 \leq k \leq V) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

换言之, 当矩阵 $\mathbf{M}^{\text{TDM-P}}$ 确定时, 矩阵 $\mathbf{M}^{\text{TDM-T}}$ 随之确定。由于 $\mathbf{M}^{\text{TDM-P}}$ 确定时, 战术决策实体的数

量 D 将被确定,故矩阵 $\mathbf{M}^{ODM-TDM}$ 和 $\mathbf{M}^{TDM-TDM}$ 也将被确定,由此可知,指控结构 CCS 的设计主要是矩阵 \mathbf{M}^{TDM-P} 的设计。

设计矩阵 \mathbf{M}^{TDM-P} 即需将兵力组织平台集 P 中的平台划分为 D 组,每组平台交由一个战术决策实体控制。良好的分组方式可以降低并均衡组织中各战术决策实体的工作负载,从而最大程度地提高组织的作战效能。因此在设计矩阵 \mathbf{M}^{TDM-P} 时,首先需要测度各战术决策实体的负载大小。

战术决策实体的负载可以分为局部负载和全局负载两部分。局部负载又称为任务负载,是战术决策实体在执行其作战任务时,控制平台实体,同时与其它战术决策实体进行局部协作而产生的负载。若任务 T_j 是战术决策实体 TDM_i 需要执行的一个任务,则 TDM_i 在执行 T_j 时控制的平台集为 $S_{TDM_i-T_j}^P = \{P_k | m_{ik}^{TDM-P} = 1, m_{jk}^{T-P} = 1, 1 \leq k \leq V\}$, 在 T_j 上与 TDM_i 进行局部协作的战术决策实体集为 $S_{TDM_i-T_j}^{TDM} = \{TDM_k | m_{kj}^{TDM-T} = 1, k \neq i, 1 \leq k \leq D\}$, TDM_i 执行 T_j 时的负载定义为:

$$W_{TDM_i}^T = \omega_{C2} \cdot \|S_{TDM_i-T_j}^P\| + \omega_{TC} \cdot \|S_{TDM_i-T_j}^{TDM}\| \quad (8)$$

式中: ω_{C2} 为指控负载系数, ω_{TC} 为局部协作负载系数; $\|S_{TDM_i-T_j}^P\|$ 为集合 $S_{TDM_i-T_j}^P$ 中元素的个数; $\|S_{TDM_i-T_j}^{TDM}\|$ 为集合 $S_{TDM_i-T_j}^{TDM}$ 中元素的个数。 TDM_i 总的任务负载为:

$$W_{TDM_i}^T = \sum_{T_j \in S_{TDM_i}^T} W_{TDM_i}^T \quad (9)$$

式中: $S_{TDM_i}^T = \{T_j | m_{ij}^{TDM-T} = 1, 1 \leq j \leq N\}$ 是 TDM_i 需要执行的任务构成的集合。

战术决策实体的全局负载是战术决策实体进行全局协作而产生的工作负载。战术决策实体 TDM_i 的全局负载定义为:

$$W_{TDM_i}^M = \omega_{MC} \cdot (D - 1) \quad (10)$$

式中: ω_{MC} 为全局协作负载系数。

战术决策实体 TDM_i 的总负载为 $W_{TDM_i} = W_{TDM_i}^M + W_{TDM_i}^T$ 。兵力组织中战术决策实体的负载均值和方差分别为:

$$W_{TDM}^{\text{mean}} = \frac{1}{D} \sum_{k=1}^D W_{TDM_k} \quad (11)$$

$$W_{TDM}^{\text{var}} = \frac{1}{D-1} \sum_{k=1}^D (W_{TDM_k} - W_{TDM}^{\text{mean}})^2 \quad (12)$$

由此,矩阵 \mathbf{M}^{TDM-P} 的设计模型为:

$$\min W_{TDM}^{\text{mean}}, \min W_{TDM}^{\text{var}}$$

s. t. $2 \leq D \leq D_{\max}$

$$m_{ij}^{TDM-P} \in \{0, 1\}, 1 \leq i \leq D, 1 \leq j \leq V$$

$$\sum_{j=1}^V m_{ij}^{TDM-P} \geq 1, 1 \leq i \leq D$$

$$\sum_{i=1}^D m_{ij}^{TDM-P} = 1, 1 \leq j \leq V \quad (13)$$

式中: D_{\max} 是战役决策实体能同时指挥的战术决策实体的数量上限,第 3 条约束表示各战术决策实体至少控制一个平台实体,第 4 条约束表示每个平台实体只能同时受一个战术决策实体的控制。模型(13)的求解算法和具体应用案例可以参考文献[18]。

2.4 兵力组织指控结构调整方法

出现以下 2 种情形时兵力组织的指控结构需要进行调整:

情形 1: 作战过程中兵力组织的行动计划发生了改变,组织中各战术决策实体的工作负载受到了影响,此时组织指控结构需要适当地调整从而保持组织的最佳作战效能;

情形 2: 兵力组织中的战术决策实体遭到破坏,其所属的平台和任务需由组织中的其它战术决策实体接替指挥和完成,此时组织指控结构也将进行适当调整。

由 2.3 节中的分析可知,矩阵 \mathbf{M}^{TDM-P} 确定时,组织的指控结构 CCS 也将确定,因此组织指控结构 CCS 的调整主要是矩阵 \mathbf{M}^{TDM-P} 的调整。

2.4.1 情形 1 中矩阵 \mathbf{M}^{TDM-P} 的调整

若在时刻 t ,兵力组织的行动计划完成了一次调整,此时组织的平台集记为 $P(t) = \{P_{h_1}, P_{h_2}, \dots, P_{h_{V(t)}}\}$, 其中 $V(t)$ 为 $P(t)$ 中元素的数量;战术决策实体集记为 $TDM(t) = \{TDM_{g_1}, TDM_{g_2}, \dots, TDM_{g_{D(t)}}\}$, 其中 $D(t)$ 为 $TDM(t)$ 中元素的数量;战术决策实体与平台实体间的指控关系记为 $R(t)_{TDM-P}$, 对应的矩阵为 $\mathbf{M}(t)^{TDM-P} = (m(t)_{ij}^{TDM-P})_{D(t) \times V(t)}$, 其中若 P_{h_j} 受 TDM_{g_i} 指控,则 $m(t)_{ij}^{TDM-P} = 1$, 否则 $m(t)_{ij}^{TDM-P} = 0$ 。由于组织的行动计划发生了调整变化,故矩阵 $\mathbf{M}(t)^{TDM-P}$ 也需进行相应调整,调整后的矩阵记为 $\mathbf{M}(t')^{TDM-P} = (m(t')_{ij}^{TDM-P})_{D(t) \times V(t)}$, 其中若 P_{h_j} 受 TDM_{g_i} 指控,那么 $m(t')_{ij}^{TDM-P} = 1$, 否则 $m(t')_{ij}^{TDM-P} = 0$ 。

矩阵 $\mathbf{M}(t)^{TDM-P}$ 调整的目的是降低并均衡组织中各战术决策实体的工作负载从而提高组织的整体效能,根据式(10)可知整个作战周期内各战术决策实体的全局负载相同,因此矩阵 $\mathbf{M}(t)^{TDM-P}$ 调整时只需降低并均衡各个战术决策实体的任务负载即可。由式(9)和调整后的矩阵 $\mathbf{M}(t')^{TDM-P}$ 可得 TDM_{g_i} ($1 \leq i \leq D(t)$) 在时刻 t 之后将要承受的任务负载,记为 $W(t^{\text{after}})_{TDM_{g_i}}^T$, 因此整个作战周期内 TDM_{g_i} 的总任务负载为 $W_{TDM_{g_i}}^T = W(t^{\text{after}})_{TDM_{g_i}}^T + W(t^{\text{before}})_{TDM_{g_i}}^T$, 其中 $W(t^{\text{before}})_{TDM_{g_i}}^T$ 是 TDM_{g_i} 在时刻 t 之前承受的任务

负载。兵力组织中战术决策实体任务负载的均方根为 RMS_{TDM} 越小,组织中战术决策实体任务负载的均值和方差都能维持在较低的水平^[19]。

$$RMS_{TDM} = \sqrt{\frac{1}{D(t)} \sum_{k=1}^{D(t)} (W_{TDM_{g_k}}^T)^2} \quad (14)$$

若矩阵 $\mathbf{M}(t)^{TDM-P}$ 调整前某个平台受 TDM_{g_i} 指控,而 $\mathbf{M}(t)^{TDM-P}$ 调整后该平台受 TDM_{g_k} 指控,则称该平台的控制权发生了转移。兵力组织指控结构调整时,控制权发生转移的平台数量为 $V(t)^{Tran} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{D(t)} \sum_{j=1}^{V(t)} |m(t')_{ij}^{TDM-P} - m(t)_{ij}^{TDM-P}|$,组织指控结构的调整代价可由控制权发生转移的平台数量来衡量^[10,13]。

由此,矩阵 $\mathbf{M}(t)^{TDM-P}$ 的调整模型为:

$$\begin{aligned} & \min \quad RMS_{TDM} \\ \text{s. t.} \quad & m(t')_{ij}^{TDM-P} \in \{0,1\}, 1 \leq i \leq D(t), 1 \leq j \leq V(t) \\ & \sum_{j=1}^{V(t)} m(t')_{ij}^{TDM-P} \geq 1, 1 \leq i \leq D(t) \\ & \sum_{i=1}^{D(t)} m(t')_{ij}^{TDM-P} = 1, 1 \leq j \leq V(t) \\ & V(t)^{Tran} \leq \sigma \end{aligned} \quad (15)$$

式中:第2条约束表示组织中的每个战术决策实体至少控制一个平台实体,第3条约束表示组织中的各平台实体只能同时受一个战术决策实体的控制,第4条约束表示组织的调整代价应小于一定的阈值。模型(15)的求解算法和具体应用案例可以参考文献[20]。

2.4.2 情形2中矩阵 \mathbf{M}^{TDM-P} 的调整

在时刻 t ,兵力组织的战术决策实体集记为 $TDM(t) = \{TDM_{g_1}, TDM_{g_2}, \dots, TDM_{g_{D(t)}}\}$,其中 $D(t)$ 为 $TDM(t)$ 中元素的数量;平台集记为 $P(t) = \{P_{h_1}, P_{h_2}, \dots, P_{h_{V(t)}}\}$,其中 $V(t)$ 为 $P(t)$ 中元素的数量;战术决策实体与平台实体间的指控关系记为 $R(t)_{TDM-P}$,对应的矩阵为 $\mathbf{M}(t)^{TDM-P} = (m(t)_{ij}^{TDM-P})_{D(t) \times V(t)}$,其中若 P_{h_j} 受 TDM_{g_i} 指控,则 $m(t)_{ij}^{TDM-P} = 1$,否则 $m(t)_{ij}^{TDM-P} = 0$ 。

若在时刻 t ,集合 $TDM(t)$ 中有一个战术决策实体被破坏,不妨假设该战术决策实体为 $TDM_{g_{D(t)}}$,因为总可以将被破坏的战术决策实体编号为 $TDM_{g_{D(t)}}$,而将其它战术决策实体编号为 $TDM_{g_1}, TDM_{g_2}, \dots, TDM_{g_{\lfloor D(t)-1 \rfloor}}$ 。此时矩阵 $\mathbf{M}(t)^{TDM-P}$ 将进行相应调整,也即集合 $S = \{P_{h_j} | m(t)_{ij}^{TDM-P} = 1, i = D(t), 1 \leq j \leq V(t)\}$ 中平台的控制权将发生转移。调整后的矩阵记为 $\mathbf{M}(t')^{TDM-P} = (m(t')_{ij}^{TDM-P})_{(D(t)-1) \times V(t)}$,其中若 P_{h_j} 受 TDM_{g_i} 指控,则 $m(t')_{ij}^{TDM-P} = 1$,否则 $m(t')_{ij}^{TDM-P} = 0$ 。

根据式(14)可得矩阵 $\mathbf{M}(t)^{TDM-P}$ 调整为 $\mathbf{M}(t')^{TDM-P}$

后组织中各战术决策实体任务负载的均方根,记为 RMS_{TDM} 。由此,矩阵 $\mathbf{M}(t)^{TDM-P}$ 的调整模型为:

$$\begin{aligned} & \min \quad RMS_{TDM} \\ \text{s. t.} \quad & m(t')_{ij}^{TDM-P} \in \{0,1\}, 1 \leq i \leq D(t)-1, 1 \leq j \leq V(t) \\ & \sum_{j=1}^{V(t)} m(t')_{ij}^{TDM-P} \geq 1, 1 \leq i \leq D(t)-1 \\ & \sum_{i=1}^{D(t)-1} m(t')_{ij}^{TDM-P} = 1, 1 \leq j \leq V(t) \\ & \sum_{i=1}^{D(t)-1} \sum_{j=1}^{V(t)} |m(t')_{ij}^{TDM-P} - m(t)_{ij}^{TDM-P}| = \|S\| \end{aligned} \quad (16)$$

式中:第2条约束表示组织中的每个战术决策实体至少控制一个平台实体,第3条约束表示组织中的各平台实体只能同时受一个战术决策实体的控制,第4条约束表示只有集合 S 中平台实体的控制权发生了转移。模型(16)的求解算法和具体应用案例可以参考文献[20]。

3 结语

本文研究了兵力组织适应性设计问题,提出了系统的兵力组织适应性设计方法。该方法依据系统工程原理将兵力组织适应性设计这一复杂问题分解成了具有耦合关系的若干子问题,然后再分别予以求解。该方法具有较好的可操作性,能有效指导组织的适应性设计工作。下一步是开展该方法的应用研究,并推动组织适应性设计由 C2(Command, Control)向 C3(Command, Control and Communication)的方向发展。

参考文献(References):

- [1] HAYES R E, ALBERTS D S. Power to the Edge: Command and Control in the Information Age[M]. Washington: DoD Command and Control Research Program, 2003.
- [2] DAVID S, KEVIN S. On Optimizing Command and Control Structures[C]//Proc. of the 16th International Command and Control Research and Technology Symposium, Quebec, Canada, 2011: 1-10.
- [3] 彭小宏, 阳东升, 刘忠, 等. 适应性兵力组织设计方法与应用研究[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(3): 12-15.
PENG X H, YANG D S, LIU Z, et al. A Methodology for Designing Adaptive Army Organization[J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(3): 12-15. (in Chinese)
- [4] 姚佩阳, 张杰勇, 李巍, 等. 适应性指挥控制组织研究进展(I)—组织建模方法与设计方法综述[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012, 13(2): 54-59.

- YAO P Y, ZHANG J Y, LI W, et al. Advances on the Research of Adaptive C2 Organization (I): Review on the Methods of Organization Modeling and Organization Designing[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2012, 13(2): 54-59. (in Chinese)
- [5] 姚佩阳, 张杰勇, 万路军, 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 P Y, ZHANG J Y, WAN L J, 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)
- [6] 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.
- [7] LEVCHUK G M, LEVCHUK Y N, LUO J, et al. Normative Design of Organizations - part II: organizational structure [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2002, 32(3):360-375.
- [8] LEVCHUK G M, LEVCHUK Y N, MEIRINA C, et al. Normative Design of Organizations - part III: Modeling Congruent, Robust, and Adaptive Organizations[J]. IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2004, 34(3): 337-350.
- [9] XIU B X, ZHANG W M, LIU Z, et al. A Novel Organizational Design Methodology Based on the Theory of information Granulation[C]//Proc of the 4th International Conference on Machine learning and Cybernetics. Guangzhou, China, 2005: 1-6.
- [10] 修保新. C2 组织结构设计及鲁棒性适应性分析[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- XIU B X. Design Methodology of C2 Organizational Structure and Its analysis of Robustness and Adaptivity[D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2006. (in Chinese)
- [11] 阳东升, 张维明, 刘忠, 等. 战场 C2 组织的描述与设计[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 20(6): 83-88.
- YANG D S, ZHANG W M, LIU Z, et al. Descriptions and Designing of C2 Organizational in Battlefields[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2005, 20(6): 83-88. (in Chinese)
- [12] 张杰勇. 网络化指挥控制组织设计关键技术研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2012.
- ZHANG J Y. Study on the Key Technologies of Networked C2 Organization Design [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [13] 牟亮. 不确定使命环境下 C2 组织结构动态适应性优化方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
- MU L. Dynamic Adaptive Optimization Methodology of C2 Organization Structure under Uncertainty Mission Environment[D]. Changsha: National university of Defence Technology, 2011. (in Chinese)
- [14] YU F, TU F, PATTIPATI K R. Integration of a Holonic Organizational Control Architecture and Multi-objective Evolutionary Algorithm for Flexible Distributed Scheduling [J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics - Part A: System and Humans, 2008, 38(5): 1001-1017.
- [15] HAN X, MANDAL S, PATTIPATI K R, et al. An optimization-Based Distributed Planning Algorithm: A Blackboard-Based Collaborative Framework [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: System, 2014, 44(6): 673-686.
- [16] 孙昱, 姚佩阳, 孙鹏, 等. 基于鲁棒多目标优化的智能体群组协同任务规划[J]. 控制与决策, 2016, 31(11): 2045-2052.
- SUN Y, YAO P Y, SUN P, et al. Cooperative Task Scheduling Method for Agent Group Using Robust Multi-Objective Optimization Approach[J]. Control and Decision, 2016, 31(11): 2045-2052. (in Chinese)
- [17] 孙昱, 姚佩阳, 张少华, 等. 含区间参数的战场资源动态调度模型及算法[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(4): 1080-1088.
- SUN Y, YAO P Y, ZHANG S H, et al. Dynamic Battlefield Resources Scheduling Model and Algorithm with Interval Parameters [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2017, 37(4): 1080-1088. (in Chinese)
- [18] 孙昱, 姚佩阳, 吴吉祥, 等. 兵力组织扁平化指挥控制结构设计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(8): 1833-1839.
- SUN Y, YAO P Y, WU J X, et al. Design Method of Flattening Command and Control Structure of Army Organization[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(8): 1833-1839. (in Chinese)
- [19] 张杰勇, 姚佩阳. C2 组织决策实体配置问题建模与求解方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(4): 737-742.
- ZHANG J Y, YAO P Y. Model and Solving Method for Collocating Problem of Decision-Makers in C2 Organization[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(4): 737-742. (in Chinese)
- [20] 孙昱, 姚佩阳, 李明辉, 等. 兵力组织指挥控制结构适应性调整方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(9): 2086-2092.
- SUN Y, YAO P Y, LI M H, et al. Adaptive Adjusting Method of Command and Control Structure of army Organization[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(9): 2086-2092. (in Chinese)