

文章编号: 1001-2486(2011)01-0125-07

## 基于滚动时域的 C2 组织决策层结构动态适应性优化\*

牟亮, 张维明, 修保新, 黄金才

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**针对 C2 组织决策层结构适应性优化问题, 定义了决策层结构与使命的适应性测度, 分析了影响 C2 组织决策层结构的不确定因素, 建立了决策层结构适应性优化模型。为了降低决策层结构适应性优化问题求解所面临的不确定性和减少决策层结构变化成本, 设计了基于滚动时域的动态适应性优化方法, 在提升决策层结构性能的同时控制了决策层结构变化成本。通过计算实验验证了滚动时域方法的有效性。

**关键词:** 决策层结构; 适应性优化; 不确定因素; 滚动时域

**中图分类号:** C394 **文献标识码:** A

## C2 Organization Decision-layer Structure Dynamic Adaptive Optimization Based on Rolling Horizon Procedure

MU Liang, ZHANG Wei-ming, XIU Bao-xin, HUANG Jin-cai

(College of Information Systems and Management, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Aiming at the adaptive optimization problem of command and control (C2) organization decision-layer structure, the mission adaptability measure of decision-layer structure was defined, uncertainty factors that affect C2 organization decision-layer structure were analyzed and the decision-layer structure adaptive optimization model was constructed. In order to reduce the solution uncertainty of the adaptive optimization problem and the change cost of decision-layer structure, a dynamic adaptive optimization approach based on the rolling horizon procedure (RHP) was designed. It is found that it improved the performance of decision-layer structure, and also controlled the change cost of decision-layer structure. The efficiency of RHP is confirmed by the computational experiments.

**Key words:** decision-layer structure; adaptive optimization; uncertainty factor; rolling horizon

指挥控制(Command and Control, C2)组织是战场环境中的作战实体在作战使命的驱动下形成的有序行为和结构关系<sup>[1]</sup>, 它能响应战场环境的使命需求, 依靠情报、侦察、通信和计算机技术将多个作战实体集成, 为完成作战使命提供能力。面对不确定使命环境, 不变的 C2 组织无法始终满足使命需求, 如何动态调整其结构以构建不确定使命环境下的高效 C2 组织, 是当前指挥自动化领域亟待解决的热点问题之一。

C2 组织结构适应性优化包括决策层结构适应性优化和资源层结构适应性优化, 当前研究主要采用组织结构整体优化的方式完成决策层结构适应性优化。文献[2]考虑了吞吐率、响应时间、平均备份数和负载均衡等参数, 研究了基于着色 Petri 网的 C2 组织结构适应性形变过程。文献[3]研究了任务资源需求向量变化、任务地点变更、任务处理时间变化和新增任务等不确定因素影响下

的 C2 组织结构适应性优化问题, 其适应性优化方法是在预先设计好的若干组织结构之间进行选择。文献[4]提出了综合考虑决策负载和结构变化成本的适应性优化模型及求解算法, 根据当前使命环境设计最优 C2 组织结构。文献[5]以多阶段的结构适应性变化序列为变量, 建立了多阶段适应性优化模型。文献[6]基于着色 Petri 网对使命动态变化下 C2 组织的决策负载和通信量进行了仿真评价。

上述研究仅考虑了与任务相关的不确定因素, 未考虑影响决策者的不确定因素; 并且采用面向使命期间的组织重构方式进行结构适应性优化, 所涉及的结构调整范围过大, 容易造成耗时过长和结构变化成本过高, 影响优化结果的适用性。为此, 本文研究了考虑决策单元损耗和任务决策负载强度变化等不确定因素的决策层结构适应性优化 (decision-layer structure adaptive optimization,

\* 收稿日期: 2010-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70701038; 70771109; 71001105)

作者简介: 牟亮(1982—), 男, 博士生。

DSAO)问题,提出基于滚动时域的动态适应性优化方法以实现决策层结构的动态调整。

## 1 C2 组织与组织决策层结构

### 1.1 C2 组织元素

Levchuk 等<sup>[7]</sup>根据 C2 组织的特点提出了任务、平台和决策者等组织元素的概念。

**定义 1** 任务是由使命分解得到的一系列活动,需要特定的资源能力和决策能力来完成。记包含  $N_T$  个任务的集合  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_{N_T}\}^{[7]}$ 。任务  $T_i$  的属性表示为三元组  $\langle ST_i, FT_i, DI_i \rangle$ ,其中  $ST_i$  和  $FT_i$  分别是  $T_i$  的开始时间和结束时间,记  $DT_i = FT_i - ST_i$  为  $T_i$  的执行时间, $DI_i$  是每个参与  $T_i$  的决策者在单位时间内所承担的决策工作量即任务决策负载强度。随着使命进展,组织面临的集合将发生变化,记  $t$  时刻任务集为  $T(t)$ ,任务决策负载强度为  $DI_i(t)$ 。

**定义 2** 平台是物理资源载体,提供武器装备、通信设施和侦察监视设备等资源以执行任务。记包含  $N_p$  个平台的集合  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_j, \dots, P_{N_p}\}^{[7]}$ 。

**定义 3** 决策者是负责信息处理并进行决策的实体,拥有信息处理、通信协作和管理下属决策者及平台的人员和设备。记包含  $N_{DM}$  个决策者的集合  $DM = \{DM_1, DM_2, \dots, DM_m, \dots, DM_{N_{DM}}\}^{[7]}$ 。决策者  $DM_m$  的属性表示为二元组  $\langle DA_m, DAB_m \rangle$ ,其中  $DA_m$  是  $DM_m$  拥有决策单元的数量,决策单元是决策工作所需的人员和设备等实体的统称, $DAB_m$  是  $DM_m$  正常工作所需的最少决策单元数。

### 1.2 C2 组织决策层结构

C2 组织结构是组织元素间关系的体现,包括决策者与平台间的控制关系  $R_{DM-P}$ 、决策者间的层级关系  $R_{DM-DM}$ 、平台与任务间的分配关系  $R_{P-T}$ 、任务间的顺序关系  $R_{T-T}$ 、决策者与任务间的执行关系  $R_{DM-T}^E$  和决策者与任务间的指挥关系  $R_{DM-T}^C$ ,在此只介绍根据本文研究需要所定义的决策者与任务间的指挥关系  $R_{DM-T}^C$ ,其它关系的定义见文献[7-8]。决策者与任务间的指挥关系定义为

$$R_{DM-T}^C(m, i) = \begin{cases} 1 & \text{如果存在 } DM_{m_1} \text{ 和 } DM_{m_2}, \text{ 满足} \\ & DM_m \in Path(m_1, m_2) \cap Cof(m_1, \\ & m_2) \text{ 且 } R_{DM-T}^E(m, i) \neq 1, R_{DM-T}^E \\ & (m_1, i) \cdot R_{DM-T}^E(m_2, i) = 1 \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $Path(m_1, m_2)$  是决策树中决策者  $DM_{m_1}$  和决策者  $DM_{m_2}$  之间的最短路径,  $Cof(m_1, m_2)$  是  $DM_{m_1}$  和  $DM_{m_2}$  的共同父节点集合。当多个决策者协作执行任务时,  $R_{DM-T}^C$  确定了管理各决策者之间协作的指挥决策者。

C2 组织结构分为资源层结构和决策层结构,资源层结构由  $R_{T-T}$  和  $R_{P-T}$  组成;决策层结构由  $R_{DM-P}$ 、 $R_{DM-DM}$ 、 $R_{DM-T}^C$ 、 $R_{DM-T}^E$  组成,为使命提供决策能力,记为  $G_{DLS} = (R_{DM-P}, R_{DM-DM}, R_{DM-T}^C, R_{DM-T}^E)$ 。

### 1.3 决策层结构与使命的适应性测度

决策层结构与使命环境的匹配或适应是对决策层结构为使命提供决策能力的性能度量,是决策层结构适应性优化的前提。Levchuk 等<sup>[3,9]</sup>提出了结构匹配主要的测度参数包括:决策者工作负载、交流和决策者个体间的依赖关系,并在 A2C2 实验<sup>[10]</sup>和适应性组织设计<sup>[4,11]</sup>中得到了成功的验证。但已有测度参数仅从决策者间关系的角度来度量决策层结构的性能,无法反映随使命进展不确定因素对决策层结构性能的动态影响。为此,本文定义了任务决策负载、任务决策收益和任务决策质量等面向任务的测度参数,并在此基础上提出决策层结构与使命的适应性测度。

**定义 4** 任务决策负载是所有参与该任务的决策者为完成任务而承担的任务执行、任务协作和任务指挥等工作负载总和。记  $t$  时刻任务  $T_i$  的决策负载为  $DW(i, t) = \sum_{DM_m \in DM(i)} DW(m, i, t)$ ,其中,  $DW(m, i, t) = DW_{exe}(m, i, t) + DW_{coo}(m, i, t) + DW_{cmd}(m, i, t)$  是参与任务  $T_i$  的决策者  $DM_m$  所承担的决策负载,它包含三个部分:一是任务执行负载  $DW_{exe}(m, i, t) = DT_i \cdot DI_i(t) \cdot R_{DM-T}^E(m, i)$ ,二是任务协作负载  $DW_{coo}(m, i, t) = DT_i \cdot DI_i(t) \cdot \sum_{m'=1, m' \neq m}^{N_{DM}} R_{DM-T}^E(m, i) \cdot R_{DM-T}^E(m', i)$ ,三是任务指挥负载  $DW_{cmd}(m, i, t) = DT_i \cdot DI_i(t) \cdot R_{DM-T}^C(m, i) \cdot \sum_{m'=1, m' \neq m}^{N_{DM}} R_{DM-T}^E(m', i)$ ,  $DM(i)$  是参与任务  $T_i$  的决策者集合。

**定义 5** 任务决策质量是所有参与该任务的决策者的决策质量均值,反映了完成该任务所需决策单元数量的满足程度。记  $t$  时刻任务  $T_i$  的决策质量为  $Q(i, t) = \sum_{DM_m \in DM(i)} q_m(t) / |DM(i)|$ ,其中,  $|DM(i)|$  为参与任务  $T_i$  的决策者数量,  $q_m(t)$  为  $t$  时刻决策者  $DM_m$  的决策质量,定义为

$$q_m(t) = \begin{cases} 1 & DAB_m \leq DA_m(t) \\ DA_m(t)/DAB_m & DAB_m > DA_m(t) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中  $DA_m(t)$  代表了  $t$  时刻  $DM_m$  拥有决策单元的数量。

**定义 6** 任务决策收益是所有参与该任务的决策者的有效工作负载,记  $t$  时刻任务  $T_i$  的决策收益为  $DG(i, t) = \sum_{DM_m \in DM(i)} q_m(t) \times DW(m, i, t)$ ,它是任务决策负载和任务决策质量的综合测度参数。

**定义 7** 决策层结构与使命的适应性测度是对决策层结构的性能度量,体现了决策层结构与使命环境的匹配程度。由定义 4~6 可得  $t$  时刻决策层结构与使命的适应性测度为

$$DP(G_{DLS}, t) = \sum_{T_i \in T(t)} DP(i, G_{DLS}, t) / |T(t)| = \sum_{T_i \in T(t)} [DW(i, t)]^2 / DG(i, t) \cdot |T(t)| \quad (3)$$

其中,  $[DW(i, t)]^2 / DG(i, t)$  是  $t$  时刻任务决策负载  $DW(i, t)$  与任务决策负载收益比  $DW(i, t) / DG(i, t)$  的乘积。该测度综合考虑了任务决策负载的最小化与任务决策收益的最大化,适应性测度值越小说明决策层结构的性能越好,与使命环境越匹配。

## 2 不确定使命环境下决策层结构适应性优化模型

C2 组织结构适应性优化由资源层结构适应性优化和 DSAO 两个递进部分组成,首先通过 MDLS 方法<sup>[7]</sup>完成资源层结构适应性优化,然后以优化后的资源层结构作为输入进行 DSAO,本文研究的是给定资源层结构的 DSAO 问题。

### 2.1 不确定因素分析

使命环境中的不确定事件导致组织元素属性值变化,在此主要考虑决策单元损耗和任务决策负载强度变化两类不确定事件对决策层结构的影响。

(1)决策单元损耗事件是指由于指挥所的战损或受干扰导致决策者包含的决策单元数量减少,部分决策工作无法完成的事件。记决策单元损耗事件集为  $E_{DUUE} = \{E_1, E_2, \dots, E_l, \dots, E_{N_{DUUE}}\}$ ,  $N_{DUUE}$  为事件类型数量,  $E_{DUUE}$  中每类决策单元损耗事件  $E_l$  的属性表示为四元组  $\langle LN_l, Ar_l, Afp_l, ALT_l \rangle$ ,其中:

1)  $LN_l$  是该类事件导致决策者损失的决策单元数量;

2)该类事件到达间隔  $Ar_l \sim \exp(\lambda_l)$ ,  $\lambda_l$  为事件到达率;

3)该类事件可预测的概率  $Afp_l \in [0, 1]$ ;

4)该类事件的预测信息提前到达时间  $ALT_l \sim \exp(Aft_l)$ ,  $Aft_l$  为预测信息提前到达时间的均值。

(2)任务决策负载强度变化事件是指由于作战计划时任务信息的不准确,导致任务执行过程需要实时决策干预以及频繁通信协调,从而引起任务决策负载强度变化的事件。任务  $T_i$  决策负载强度变化事件的属性表示为三元组  $\langle DI_i, Ifp_i, AIT_i \rangle$ ,其中:

1)任务负载强度  $DI_i \sim T(A_i, B_i, C_i)$ ,  $A_i, B_i, C_i$  分别是三角分布的下界、上界和具有最大概率密度的任务负载强度值;

2)事件的可预测概率  $Ifp_i \in [0, 1]$ ;

3)事件的预测信息提前到达时间  $AIT_i \sim \exp(Ift_i)$ ,  $Ift_i$  为预测信息提前到达时间的均值。

### 2.2 决策层结构适应性优化模型

DSAO 问题描述如下:由于决策单元损耗事件和任务决策负载强度变化事件的影响,在  $t$  时刻,决策层结构  $G_{DLS}$  与使命的适应性测度值高于特定门限,通过将当前决策层结构  $G_{DLS}$  调整为新结构  $G'_{DLS}$  以提升决策层结构性能。为此,以  $G'_{DLS} = (R'_{DM-P}, R'_{DM-DM}, R'_{DM-T}, R'_{DM-T})$  为变量,以决策层结构与使命的适应性测度最小为目标建立 DSAO 模型。

$$\begin{aligned} \min DP(G'_{DLS}, t) &= \sum_{T_i \in T(t)} DP(i, G'_{DLS}, t) / |T(t)| \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} G'_{DLS} = (R'_{DM-P}, R'_{DM-DM}, R'_{DM-T}, R'_{DM-T}) \\ \sum_{T_i \in T(t)} DW(i, t) / |T(t)| \leq \bar{W} \\ TC(G'_{DLS}, T(t)) \leq \bar{C} \\ R'_{DM-P}(m, j) \in \{0, 1\}, \\ m = 1, 2, \dots, N_{DM}, \quad j = 1, 2, \dots, N_P \\ \sum_{m=1}^{N_{DM}} R'_{DM-P}(m, j) = 1, \quad j = 1, 2, \dots, N_P \\ \sum_{j=1}^{N_P} R'_{DM-P}(m, j) \leq \bar{CN}, \quad m = 1, 2, \dots, N_{DM} \\ R'_{DM-DM}(m_1, m_2) \in \{0, 1\}, \quad m_1, m_2 = 1, 2, \dots, N_{DM} \\ \exists m' \in \{1, 2, \dots, N_{DM}\}, \sum_{m_1=1}^{N_{DM}} R'_{DM-DM}(m_1, m') = 0 \\ \forall m \neq m', \sum_{m_1=1}^{N_{DM}} R'_{DM-DM}(m_1, m) = 1 \end{cases} \end{aligned}$$

DSAO 模型具有如下约束:

$$(1) \text{平台隶属约束}^{[8]}: \sum_{m=1}^{N_{DM}} R'_{DM-P}(m, j) = 1, j = 1, 2, \dots, N_P.$$

$$(2) \text{决策者控制平台约束}^{[8]}: \sum_{j=1}^{N_P} R'_{DM-P}(m, j) \leq \overline{CN}, m = 1, 2, \dots, N_{DM}, \overline{CN} \text{ 为决策者控制平台数量的上限.}$$

$$(3) \text{决策树约束}^{[8]}: \text{有且只有一个根节点 } DM_{m'} \text{ 满足 } \sum_{m=1}^{N_{DM}} R'_{DM-DM}(m, m') = 0, \text{ 对于 } m'' \neq m' \text{ 都有 } \sum_{m=1}^{N_{DM}} R'_{DM-DM}(m, m'') = 1.$$

$$(4) \text{平均决策负载上限约束: } \sum_{T_i \in T(t)} DW(i, t) / |T(t)| \leq \overline{W}, \overline{W} \text{ 为 } |T(t)| \text{ 的平均决策负载上限.}$$

$$(5) \text{结构变化成本约束: } TC(G'_{DLS}, T(t)) \leq \overline{C}, \overline{C} \text{ 为结构变化成本上限. 结构变化成本为}$$

$$TC(G'_{DLS}, T(t)) = c_1 \cdot \sum_{m_2=1}^{N_{DM}} \sum_{m_1=1}^{N_{DM}} |R'_{DM-DM}(m_1, m_2) - R_{DM-DM}(m_1, m_2)| + c_2 \cdot \sum_{m=1}^{N_{DM}} \sum_{T_i \in T(t)} |R^{C'}_{DM-T}(m, i) - R^{C}_{DM-T}(m, i)| + c_3 \cdot \sum_{m=1}^{N_{DM}} \sum_{j=1}^{N_P} |R'_{DM-P}(m, j) - R_{DM-P}(m, j)| + c_4 \cdot \sum_{m=1}^{N_{DM}} \sum_{T_i \in T(t)} |R^{E'}_{DM-T}(m, i) - R^E_{DM-T}(m, i)| \quad (5)$$

其中  $c_1, c_2, c_3$  和  $c_4$  分别表示当前决策层结构中  $R_{DM-DM}, R^C_{DM-T}, R_{DM-P}$  和  $R^E_{DM-T}$  的单位调整成本。

### 3 基于滚动时域的决策层结构动态适应性优化方法

传统组织结构适应性优化<sup>[3-4,11]</sup>采用组织重构的方式得到  $t$  时刻面向时域  $[t, t_e]$  的最优结构,  $t_e = \max_{T_i \in T(t)} FT_i$ , 所得最优决策层结构显然无法适应时域  $[t, t_e]$  内不断变化的使命环境。滚动时域方法(Rolling Horizon Procedure, RHP)是用沿时间轴滚动进行的一系列小规模或有限时域的局部优化代替大规模或无限时域的单次全局优

化<sup>[12]</sup>。引进 RHP 动态求解 DSAO 问题不仅能通过时域分解降低求解面临的不确定性, 还由于优化目标满足“加性可分离”原则<sup>[13]</sup>, 通过多次子问题优化能实现时域  $[t, t_e]$  决策层结构性能的改善。动态生产调度领域的 RHP 采用缩短优化时域来减少每次子问题优化的工件数目<sup>[12]</sup>, 致使优化次数增加, 而 DSAO 必须兼顾决策层结构的稳定性, 避免追求子问题最优而导致结构变化成本过大, 由此, 本文应用 RHP 进行 DSAO 时, 设置滚动窗口与预测窗口大小相等以避免结构频繁变化。基于 RHP 的 DSAO 框架如图 1 所示, 在使命期间, 每当决策单元损耗事件或者任务的起止信息到达时, 都会引起预测窗口的更新, 当滚动触发条件满足时, 建立滚动窗口, 定义优化子问题并求解, 最后更新决策层结构。RHP 的基本要素包括预测窗口、滚动触发条件、滚动窗口、优化子问题和结果更新。

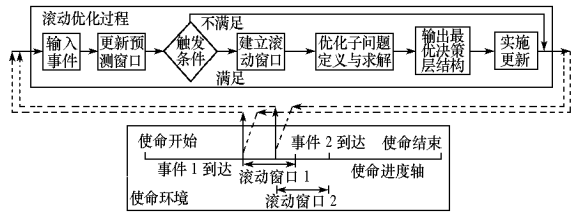


图 1 基于 RHP 的 DSAO 框架

Fig.1 DSAO framework based on RHP

(1) 预测窗口是从每一优化时刻起的一段预测时域内所有已知或预测的信息集合, 其所包含的已知或预测的信息规模的大小表征预测窗口的大小<sup>[12]</sup>。  $t$  时刻预测窗口定义为  $FW(t) = \langle T_{FW}(t), I_{FW}(t), \lambda(t) \rangle$ : 1)  $T_{FW}(t)$  是  $t$  时刻预测窗口中的任务集合; 2)  $I_{FW}(t)$  是  $t$  时刻已知的事件信息集合, 包含决策单元损耗事件信息集合  $AE_{FW}(t)$  和任务决策负载强度不确定性事件信息集合  $IE_{FW}(t)$ ,  $I_{FW}(t)$  随实时信息的获取而不断更新; 3)  $\lambda(t) = (\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_l(t), \dots, \lambda_{N_{DUUE}}(t))$  是  $t$  时刻所有类型决策单元损耗事件到达率的估计向量,  $\lambda_l(t)$  是对第  $l$  类事件的到达间隔样本, 采用平滑预测方法<sup>[14]</sup>得到的到达率估计值。  $T_{FW}(t)$  的设定规则如下: 记  $t$  时刻决策单元损耗事件的合成到达率为  $\tilde{\lambda}(t) = \sum_{l=1}^{N_{DUUE}} \lambda_l(t)$ , 事件造成可用决策单元的平均损失数量是  $LN = \sum_{l=1}^{N_{DUUE}} \lambda_l(t) \cdot LN_l / \tilde{\lambda}(t)$ 。若预测时域长度为  $t_{FW}$ , 则时域  $[t, t + t_{FW}]$  内各决策者的决策单元损耗事

件到达数量  $n_L$  服从均值为  $\tilde{\lambda}(t) \times t_{FW}$  的 Poisson 分布,损失决策单元数量的估计值是  $MN = LN \cdot \tilde{\lambda}(t) \cdot t_{FW}$ 。设  $t + t_{FW}$  时刻决策单元损失数量在估计范围之内的概率不小于  $\alpha$ ,可得关于  $t_{FW}$  的单调递减连续概率函数为

$$\begin{aligned}
 P(t_{FW}) &= Pr(n_L \cdot LN - MN \leq \Delta) \\
 &= Pr(n_L \leq (\Delta + MN) / LN) \\
 &= \sum_{n=0}^{\lceil \tilde{\lambda}(t) t_{FW} + \Delta / LN \rceil - 1} \frac{[\tilde{\lambda}(t) t_{FW}]^n e^{-\tilde{\lambda}(t) t_{FW}}}{n!} \geq \alpha
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

其中,  $\Delta$  是估计值  $MN$  的偏差上限,  $\lceil \cdot \rceil$  是向上取整符号。必然存在  $\bar{t}_{FW}$  使  $P(\bar{t}_{FW}) = \alpha$ , 所以设定  $t$  时刻预测窗口中的任务集合为  $T_{FW}(t) = \{T_i | t \leq ST_i < \bar{t}_{FW}\}$ , 预测窗口大小为  $|T_{FW}(t)|$ 。

(2) 滚动触发条件是引发一次子问题优化所需的条件, 触发优化的时刻称为决策点<sup>[12]</sup>。本文考虑基于任务完成数量和基于决策单元损耗事件两类触发条件: 1) 基于完成任务数的触发条件是当任务的完成数量  $n_m$  累计达到  $N_{TC}$  个时, 设  $n_m = 0$  并建立滚动窗口和优化子问题模型, 求解得到  $G'_{DLS}$ , 若  $G'_{DLS}$  能使滚动窗口内任务的平均决策负载降低  $IW_{TC}$  以上或者适应性测度值降低  $IP_{TC}$  以上, 则将决策层结构调整调整为  $G'_{DLS}$ ; 2) 基于决策单元损耗事件的触发条件是当决策单元损耗导致滚动窗口内任务的平均决策负载上升到  $DW_{TC}$  或者适应性测度值上升到  $DP_{TC}$  时, 设  $n_m = 0$  并建立优化子问题进行求解。

(3) 滚动窗口是按照一定规则从预测窗口中挑选的用于子问题优化的部分预测信息集合<sup>[12]</sup>, 本文设置滚动窗口和预测窗口大小相等, 即每次子问题优化都使用预测窗口中的全部信息。  $t$  时刻的滚动窗口记为  $RW(t)$ , 滚动窗口大小为  $|RW(t)|$ 。

(4) DSAO 子问题是原问题在  $RW(t)$  内的映射, 子问题所优化的任务集合即  $RW(t)$  中的任务集合  $T_{RW}(t)$ 。 DSAO 子问题是具有多变量的组合优化问题, 其求解采用嵌套模拟退火算法。

(5) 结果更新的原则是不影响当前已开始执行的任务所对应的结构关系。

## 4 案例分析

目前尚未有 DSAO 问题案例, 通过扩展 A2C2 实验的案例<sup>[7-8]</sup> 得到本案例。

### 4.1 DSAO 问题案例设置

初始时刻  $t = 0$ ,  $T(t)$  和  $R_{P-T}$  信息见文献<sup>[7]</sup>

的图 10, 初始决策层结构见文献<sup>[8]</sup> 的图 3(a) 和图 4,  $t = 0$  时,  $DAB_m = 2$ ,  $DA_m(0) = 4$ 。

(1) 不确定事件参数设置。决策单元损耗事件类型  $N_{DUE} = 4$ , 造成决策单元的损耗量分别是  $LN_1 = 0.2$ ,  $LN_2 = 0.4$ ,  $LN_3 = 1$ ,  $LN_4 = 2$ , 可预测概率分别是  $Afp_1 = 0.5$ ,  $Afp_2 = 0.25$ ,  $Afp_3 = Afp_4 = 0$ , 预测信息的提前到达时间  $ALT_1 \sim \exp(0.05)$ ,  $ALT_2 \sim \exp(0.05)$ 。为了比较不同的决策单元损耗事件到达率下 RHP 方案的性能, 设不同类型事件到达率参数之间的关系为  $\lambda_1 = 10\lambda_2 = 100\lambda_3 = 1000\lambda_4$ , 当使命时域长度为 135 时, 可得  $\lambda_1 = 0.03$  和  $\lambda_1 = 0.06$  两种设置方案。任务  $T_i$  的决策负载强度  $DI_i \sim T(0.5, 1.5, 1)$ , 任务决策负载强度变化事件的可预测概率  $Ifp_i = 0.5$ , 预测信息的提前到达时间  $AIT_i \sim \exp(0.05)$ 。  $t = 0$  时, 若  $T_i$  的决策负载强度变化事件的预测信息已到达, 则以该信息更新  $DI_i(0)$ , 否则  $DI_i(0) = 1$ 。

(2) 优化模型参数设置。设  $\bar{C} = 20$ ,  $\bar{W} = 4$ ,  $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 1$ ,  $\bar{CN} = 5$ 。

## 4.2 求解实验设计与结果分析

### (1) RHP 参数设置方案

RHP 参数设置方案记为  $RHP\_Pol = (PRW, I_{Para}, P_{Para})$ , 其中  $PRW$  是滚动窗口  $RW(t)$  的设置策略,  $I_{Para} = (N_{TC}, IW_{TC}, IP_{TC})$  和  $P_{Para} = (DW_{TC}, DP_{TC})$  分别代表了基于任务完成数量和基于决策单元损耗事件两类优化触发条件的参数, 在设置预测窗口  $FW(t)$  时, 令  $\alpha = 0.9$ ,  $\Delta = 1$ 。

1)  $PRW \in \{PRW_1, PRW_2, PRW_3\}$ ,  $PRW_1$  策略:  $|RW(t)| = 5$  即每次优化时选取将开始的 5 个任务进入  $RW(t)$ ;  $PRW_2$  策略: 设置  $|RW(t)| = \lfloor (|T_{WB}| + |T_{FW}(t)|) / 2 \rfloor$ ,  $|T_{WB}|$  是  $[t, t_{N_{TC}}]$  内新开始的 任务集合  $T_{WB} = \{T_i | t < ST_i < t_{N_{TC}}\}$  所包含的任务数, 其中,  $t_{N_{TC}}$  是从优化时刻  $t$  起累积完成  $N_{TC}$  个任务的时刻,  $\lfloor \cdot \rfloor$  是向下取整符号;  $PRW_3$  策略: 设置  $|RW(t)| = |T_{FW}(t)|$ 。

2)  $I_{Para} \in \{(3, 5, 5), (6, 15, 15), (9, 25, 25)\}$ , 其中 5 和 25 分别是  $RW(t)$  内任务的平均决策负载降低量  $IW_{TC}$  和适应性测度值的降低量  $IP_{TC}$  的下限估计和上限估计。  $I_{Para}$  三种取值对应基于任务完成数量的触发门限低、中、高的三种情况。

3)  $P_{Para} \in \{(15, 15), (30, 30), (45, 45)\}$ , 其中 15 和 45 分别是  $RW(t)$  内任务的平均决策负

载上升量  $DW_{TC}$  和适应性测度值的上升量  $DP_{TC}$  的下限估计和上限估计。 $P_{Para}$  三种取值对应基于决策单元损耗事件的触发门限低、中、高的三种情况。

由以上三种 RHP 参数的组合可得到 27 个 RHP 方案。

(2)RHP 方案的性能指标

每个 RHP 参数设置方案  $RHP\_Pol$  代表了一种动态适应性优化方法,  $RHP\_Pol$  性能为

$$P_{DSAO}(RHP\_Pol) = DP_{DSAO}(RHP\_Pol) / TC_{DSAO}(RHP\_Pol) \quad (7)$$

其中,  $DP_{DSAO}(RHP\_Pol)$  和  $TC_{DSAO}(RHP\_Pol)$  分别表示采用方案  $RHP\_Pol$  进行动态适应性优化时决策层结构的适应性测度变化值与变化成本。

(3)实验设计与结果分析

当  $\lambda_1 = 0.03$  或  $\lambda_1 = 0.06$  时,若对 27 个 RHP

表 1  $\lambda_1 = 0.03$  时 RHP 实验方案和结果

Tab.1 Scheme and solution of RHP experiment,  $\lambda_1 = 0.03$

列号 序号	$PRW$	$I_{Para}$	$P_{Para}$	$P_{DAOP}$
方案 1	$PRW_1$	(3,5,5)	(15,15)	0.1939
方案 2	$PRW_1$	(6,15,15)	(30,30)	0.2278
方案 3	$PRW_1$	(9,25,25)	(45,45)	0.2626
方案 4	$PRW_2$	(3,5,5)	(30,30)	0.2144
方案 5	$PRW_2$	(6,15,15)	(45,45)	0.2928
方案 6	$PRW_2$	(9,25,25)	(15,15)	0.1936
方案 7	$PRW_3$	(3,5,5)	(45,45)	0.3636
方案 8	$PRW_3$	(6,15,15)	(15,15)	0.2721
方案 9	$PRW_3$	(9,25,25)	(30,30)	0.3221
$K_1$	0.6842	0.7719	0.6596	
$K_2$	0.7008	0.7927	0.7642	
$K_3$	0.9578	0.7783	0.9190	
$\bar{K}_1$	0.2281	0.2573	0.2199	
$\bar{K}_2$	0.2336	0.2642	0.2547	
$\bar{K}_3$	0.3193	0.2594	0.3063	
极差	0.0912	0.0069	0.0865	
最优方案	$PRW_3$	(6,15,15)	(45,45)	

以表 1 中各 RHP 方案的决策层结构与使命的适应性测度为纵坐标,结构变化成本为横坐标,如图 2 所示标出各 RHP 方案。对使命期间未开展动态适应性优化的情况进行 50 次仿真,得到适应性测度平均值是 37.86,由图 2 可知:

(1)与未开展动态适应性优化的情况相比,各 RHP 方案都较大程度降低了适应性测度值,验证了基于 RHP 的动态适应性优化方法对决策层结构性能的优化作用。

(2)表 1 中 RHP 性能较优的方案 7、方案 9、方案 5、方案 8 和方案 3 都具有结构变化成本较低的

方案进行实验,将带来较大的计算负担,本文引进正交实验设计方法以规范求解实验设计并提高实验效率。适用于本实验的正交表是  $L_9(3^4)^{[15]}$ ,两组实验结果见表 1 和表 2。当  $\lambda_1 = 0.03$  时,由表 1 中 RHP 参数的极差可见,各参数对 RHP 性能的影响从大到小依次是  $PRW > P_{Para} > I_{Para}$ ,  $I_{Para}$  对 RHP 性能的影响不显著。最优的参数设置方案是  $(PRW_3, (6,15,15), (45,45))$ ,该方案不在表 1 之中,按该方案进行 50 次仿真,得到适应性测度平均值为 26.47,平均结构变化成本为 29,RHP 方案性能为 0.3928,优于表 1 中所有方案。可见,当使命环境不确定程度较低时,滚动窗口大小和基于决策单元损耗事件的优化触发门限设置对 RHP 性能的影响较大,应采用尽量大的滚动窗口,并适当提高基于决策单元损耗事件的优化触发门限以避免频繁优化。

表 2  $\lambda_1 = 0.06$  时 RHP 实验方案和结果

Tab.1 Scheme and solution of RHP experiment,  $\lambda_1 = 0.06$

列号 序号	$PRW$	$I_{Para}$	$P_{Para}$	$P_{DAOP}$
方案 1	$PRW_1$	(3,5,5)	(15,15)	0.1602
方案 2	$PRW_1$	(6,15,15)	(30,30)	0.1842
方案 3	$PRW_1$	(9,25,25)	(45,45)	0.2254
方案 4	$PRW_2$	(3,5,5)	(30,30)	0.1918
方案 5	$PRW_2$	(6,15,15)	(45,45)	0.2435
方案 6	$PRW_2$	(9,25,25)	(15,15)	0.1368
方案 7	$PRW_3$	(3,5,5)	(45,45)	0.3583
方案 8	$PRW_3$	(6,15,15)	(15,15)	0.2115
方案 9	$PRW_3$	(9,25,25)	(30,30)	0.2234
$K_1$	0.5698	0.7103	0.5086	
$K_2$	0.5721	0.6391	0.5994	
$K_3$	0.7932	0.5857	0.8272	
$\bar{K}_1$	0.1899	0.2368	0.1695	
$\bar{K}_2$	0.1907	0.2130	0.1998	
$\bar{K}_3$	0.2644	0.1952	0.2757	
极差	0.0745	0.0415	0.1062	
最优方案	$PRW_3$	(3,5,5)	(45,45)	

特点,而方案 1 和方案 4 虽然适应性测度值较低,但由于结构变化成本过高导致了它们的 RHP 性能较低。由此可知,要获得良好的 RHP 性能,不但要降低适应性测度值,还必须有效控制决策层结构变化成本,才能满足决策层结构优化的快速求解和在线实施的需求。

当  $\lambda_1 = 0.06$  时,由表 2 中 RHP 参数的极差可见,各参数对 RHP 性能影响从大到小依次是  $P_{Para} > PRW > I_{Para}$ ,最优的参数设置方案是  $(PRW_3, (3,5,5), (45,45))$ ,即表 2 中的方案 7,其 RHP 方案性能为 0.3583。这说明了当使命环

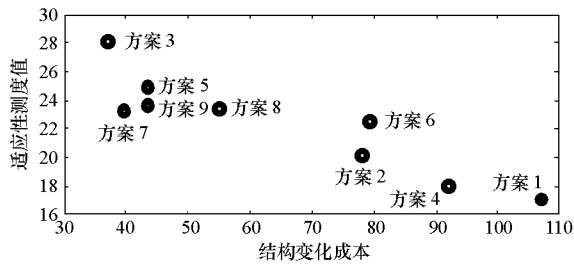


图2  $\lambda_1 = 0.03$  时,各 RHP 方案性能

Fig.2 Performance of each RHP scheme,  $\lambda_1 = 0.03$

境不确定程度较高时,设置滚动窗口大小和基于决策单元损耗事件的触发门限的原则与使命环境不确定程度较低时相同,区别在于设置基于任务完成数量的触发条件时采用较低的门限,这是由于使命环境不确定程度较高时决策层结构的性能下降更快,适当降低基于任务完成数量的优化触发门限,能够及时响应不确定因素对决策层结构的影响,避免决策层结构性能已经严重下降时才进行结构调整。比较  $\lambda_1 = 0.03$  和  $\lambda_1 = 0.06$  两种情况下的最优 RHP 方案可知,设置较大的滚动窗口并提高基于决策单元损耗事件的优化触发门限能够在降低决策层结构与使命的适应性测度值的同时有效控制结构变化成本。

综上所述,作为 RHP 在 C2 组织决策层结构适应性优化领域的首次应用,本文提出的方法具有传统适应性优化方法<sup>[3-4,11]</sup>所不具备的优势:不但能通过预测窗口的设置对不确定因素的影响进行预估,还能根据使命环境的不确定程度灵活设置滚动窗口大小以及优化触发条件,通过合理的时域分解降低了问题求解面临的不确定性和复杂性,多次短域内的子问题优化明显提升了决策层结构的性能,同时有效控制了决策层结构变化成本,满足了作战的实时性要求和成本有限性约束。

## 5 结论

研究了 C2 组织决策层结构适应性优化问题,考虑了影响决策者的不确定因素,提出了面向任务的决策层结构与使命的适应性测度,设计了基于 RHP 的动态适应性优化方法,该方法通过分解时域和灵活设置优化触发条件,能够在显著提升决策层结构性能的同时有效控制决策层结构变化成本,满足 DSAO 问题的快速求解和在线实施的

需求。下一步研究将考虑更贴近作战实际的不确定因素及其影响,提出更为有效的预测方法以提高预测精度。

## 参考文献:

- [1] 阳东升,张维明,刘忠,等. C2 组织的有效测度与设计[J]. 自然科学进展, 2005, 15(3): 349-356.
- [2] Perdu D M, Levis A H. Adaptation as a Morphing Process: A Methodology for the Design and Evaluation of Adaptive Command and Control Teams [J]. Computational & Mathematical Organization Theory, 1998, 4(1): 5-41.
- [3] 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.
- [4] 修保新,张维明,刘忠,等. C2 组织结构的适应性设计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(7): 1102-1108.
- [5] 杨春辉. 基于 CPN 的面向任务指挥控制组织建模、仿真及优化方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
- [6] 杨春辉,刘翔,陈洪辉,等. 动态使命环境下指控资源动态规划组织的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(1): 9-14.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Levchuk G M, Kleinman D L, Ruan S, et al. Congruence of Human Organizations and Missions: Theory Versus Data [C]// Proceedings of 8<sup>th</sup> International Command and Control Research and Technology Symposium, Washington, 2003.
- [10] Kleinman D L, Levchuk G M, Hutchins S G, et al. Scenario Design for the Empirical Testing of Organizational Congruence [C]// Proceedings of 8<sup>th</sup> International Command and Control Research and Technology Symposium, Washington, 2003.
- [11] 修保新,张维明,刘忠,等. 基于粒度计算和遗传算法的 C2 组织结构设计方法[J]. 自然科学进展, 2007, 17(5): 662-671.
- [12] 王冰. 滚动时域调度方法及其性能分析研究[D]. 上海交通大学, 2005.
- [13] 彭辉. 分布式多无人协同区域搜索中的关键问题研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
- [14] 谭跃进,陈英武,易进先. 系统工程原理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999.
- [15] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.