

基于 N -best 策略的军事资源匹配方法

吴瑞杰, 孙 鹏, 李 锴, 孙 昱

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 对于军事任务与平台的匹配问题,传统算法中平台的分配顺序与任务优先级高低有关,这样容易产生局部最优,导致全局的任务完成精度降低。针对此问题,提出了一种基于 N -best 策略的军事资源匹配方法。该方法包括 2 部分内容,第 1 部分是根据决策空间划分理论而提出的最佳算法,该算法能够为决策者提供若干种可供选择的分配方案,克服了单一方案带来的局限性;第 2 部分是设计一种反馈策略,通过对若干种可行解进行组合,找到使全局任务完成精度最大的解。实验仿真结果表明,基于 N -best 的策略能够提高使命完成精度。

关键词 决策空间理论;反馈策略;任务完成精度;最佳算法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.02.016

中图分类号 TP391.9 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)02-0082-06

A Matching Method for Military Resource Based on N -best Strategy

WU Ruijie, SUN Peng, LI Kai, SUN Yu

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Aimed at some problems that the resource allocation and task with high priority are distributed with assets first, and task with low priority fails to get enough resource to accomplish a task, a matching strategy is proposed. This new method has two parts. One is a N -best algorithm based on decision space partitioning theory, and this can provide decision makers with several alternative plans to overcome the limit of a single plan. The other is a tradeoff strategy combined with N best plans to get the best solution, thus realizing the whole situation's optimization. The experiment results show that the N -best-based strategy can improve the whole situation's task accuracy.

Key words: decision space partitioning theory; tradeoff strategy; task accuracy; N -best algorithm

信息化战场环境下,兵力组织的优化设计在执行军事任务中具有十分重要的作用,在战役规划阶段,通过有效合理的部署,一方面提高了战场空间的各作战平台、作战系统的整体效能,获取战场对抗优势;另一方面减少了战场上冗余的资源,降低了作战成本及资源损耗,提高了作战效率。兵力组织的优化设计是一门作战工程学^[1-3],使用有效规划计算方

法,能够辅助战场指挥员迅速的形作战行动计划,保证任务的各项需求得到满足,使命能够完成。

典型的战场资源调度问题研究任务与平台的分配关系,根据任务列表中的时序安排,为任务分配适当的平台,使得使命的完成精度最大。任务的有效计划需要考虑平台的分配和任务的并行处理,这一问题经常出现在分布式资源调度^[4-8]、指派问题中。

收稿日期: 2015-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(61573017)

作者简介: 吴瑞杰(1992-),男,湖北枣阳人,硕士生,主要从事指控组织设计研究,E-mail: 328212740@qq.com

引用格式: 吴瑞杰,孙鹏,李锴,等. 基于 N -best 策略的军事资源匹配方法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(2):82-87. WU Ruijie, SUN Peng, LI Kai, et al. A Matching Method for Military Resource Based on N -best Strategy[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(2): 82-87.

这类任务规划问题一般都是 NP 难题,随着任务量的增加,计算复杂度呈指数增长。启发式算法能较好解决这类问题,其中有动态列表调度(Dynamic List Scheduling)^[9];Levchuk 在其三阶段组织设计^[10-12]中提出了多维动态列表算法(MDLS);以最小化使命时间为优化目标建立数学模型,针对 MDLS 算法在资源分配中又存在局部搜索和优先权函数的合理性问题,阳东升在文献[13]中提出了多优先级列表动态规划算法(MPLDS);对于有限时间条件下的任务平台关系设计,张杰勇在文献[14]中提出了基于循环 MDLS 的解决方法。然而以上问题均以使命时间为优化目标,在研究战前任务计划问题上,当作战指挥员事先做好任务时序关系,并且平台数量有限时不再适用。本文以最大化使命完成精度为优化目标,提出了一种基于 N-best 策略的匹配方法,改善了以往方法带来的局部最优缺陷,实现全局优化的目的。

1 基本定义与模型建立

1.1 基本定义

定义 1 资源(Resource, R):资源是兵力组织在作战活动中不可再分割的基本单位,不同类型的资源拥有不同的能力。通常,一个平台拥有一项或多项资源,执行一项任务需要一项或多项资源。

定义 2 任务(Task, T):使命是战役中需完成的目标,任务是使命分解得到的子行动,一项任务需要一种或几种资源协同完成,任务 $T_i (i = 1, \dots, I)$ 具有如下属性,其中 I 是任务的数量,属性包括:

- 1) t_{si} : 任务 T_i 的开始时间;
- 2) t_{pi} : 任务 T_i 的处理时间;
- 3) $R_i = (R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{il}, \dots, R_{iL})$: 任务的资源需求矢量,完成一项任务需要多种资源,其中 R_{il} 是任务 T_i 拥有的 $l (l = 1, 2, \dots, L)$ 类型资源的数量, L 为资源的种类数;
- 4) ρ_i : 任务 T_i 的优先级。

定义 3 平台(Platform, P):平台是资源的载体,是分配过程中的基本单元,对于每个类型为 j 的平台 $P_j (j = 1, 2, \dots, J)$, J 是平台种类数。平台属性包括:

- 1) $r_j = (r_{j1}, r_{j2}, \dots, r_{jl}, \dots, r_{jL})$: 平台的能力矢量,一个平台拥有多种资源,其中 r_{jl} 是平台 P_j 拥有的 l 类资源的数量;
- 2) n_j : 可利用的 j 类平台数量。

1.2 模型建立

图 1 表示任务-资源-平台三者之间的关系,一

项任务需要多种类资源,而不同的平台提供的资源类别也不尽相同,因此完成一项任务,需要一个或多个平台。

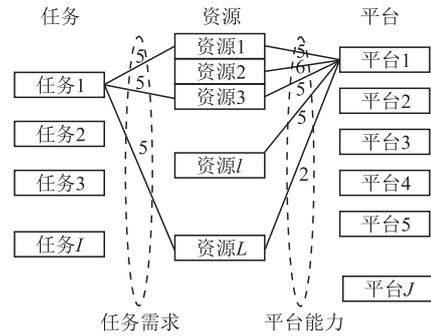


图 1 任务-平台-资源
Fig.1 Task-platform-resource

规划问题描述为如何为任务分配平台,即任务的资源需求与平台能力之间的匹配问题。首先介绍任务-平台之间的分配关系,任务 T_i 的分配方案为: $y_i = [y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ij}, \dots, y_{iJ}]^T, y_{ij} \in Z, y_{ij} \geq 0$ 式中: y_{ij} 表示任务 T_i 得到的平台 P_j 的数量, Z 表示整数。

为了解决这个匹配的问题,文中引入了任务完成精度的概念。任务的每种资源都有一个的满足度,计算任务 T_i 实际得到的 l 类资源数量与需求数量的比值,当这个比值大于等于 1 时,说明此类资源需求饱和,满足度为 1;反之,将其比值作为满足度,则为:

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

$$z_i = [z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{il}, \dots, z_{iL}]^T$$

z_{il} 表示 l 类资源的满足度,为了较好地表示任务完成精度,将各种资源的满足度相乘。

$$A_{cc}(i) = \prod_{l \in r(i)} z_{il} \tag{1}$$

式中: $A_{cc}(i)$ 表示任务 T_i 的完成精度; $r(i)$ 表示任务 T_i 的资源需求矢量中不为零的项。

采用这种定义任务完成精度的方式,有 2 点考虑:一是当某种资源缺失时,任务的完成精度为零,任务不能执行;二是当最小的资源满足度 z_{il} 提高时,能够使任务的完成精度提高最多。以上 2 点比较符合实际,所以将任务的资源满足度相乘,可以用来表述任务完成精度。

分配过程中的约束条件包括:①分配给每个任务的平台总数上限不超过 D ;②平台在任何时间只能被一项任务占用。对于单任务而言,任务完成精度最大化是优化目标,即:

$$\begin{cases} \max Acc(i) \\ 0 < \sum_{j=1}^J y_{ij} \leq D \\ y_{ij} \in Z, 0 \leq y_{ij} \leq n_j, \forall j \end{cases} \quad (2)$$

式中: n_j 代表可用的 j 类平台, 等于 j 类平台的总量减去当前时刻已经分配出去的平台数量。联立式(1~2)可得:

$$\begin{cases} \max \prod_{l \in \gamma(i)} z_{il} \\ z_{il} \leq \sum_{j=1}^J \frac{r_{jl} y_{ij}}{R_{il}}, z_{il} \leq 1 \\ 0 < \sum_{j=1}^J y_{ij} \leq D \\ y_{ij} \in Z, 0 \leq y_{ij} \leq n_j, \forall j \\ 0 \leq j \leq J, \forall j \in Z \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中的问题是一个整数非线性规划问题, 该问题在文献[5]中被证明是一个 NP 难题。采用拉格朗日松弛变量法^[15-16], 首先对该问题作对数运算, 然后加入拉格朗日松弛变量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_l, \dots, \lambda_L)$, 目标函数转变为:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{l \in \gamma(i)} -\log(z_{il}) + \sum_{l \in \gamma(i)} \lambda_l (z_{il} - \sum_{j=1}^J \frac{r_{jl} y_{ij}}{R_{il}}) = \\ & \min \left\{ \sum_{l \in \gamma(i)} (\lambda_l z_{il} - \log(z_{il})) - \sum_{l \in \gamma(i)} \sum_{j=1}^J \frac{\lambda_l r_{jl} y_{ij}}{R_{il}} \right\} \quad (4) \end{aligned}$$

对目标函数变形, 将原问题分解为 2 个子问题 f_1 和 f_2 。其中 f_1 是关于矢量 z_i 的函数, f_2 是关于矢量 y_i 的函数。

$$\begin{cases} \min f_1 = \min_{z_i} \sum_{l \in \gamma(i)} (\lambda_l z_{il} - \log(z_{il})) \\ \text{s.t } z_{il} \leq 1, l \in \gamma(i) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \max f_2 = \max_{y_i} \sum_{l \in \gamma(i)} \sum_{j=1}^J \frac{\lambda_l r_{jl} y_{ij}}{R_{il}} \\ \text{s.t } 0 \leq \sum_{j=1}^J y_{ij} \leq D, \\ y_{ij} \in Z, 0 \leq y_{ij} \leq n_j, \forall j \end{cases} \quad (6)$$

问题(5)是一元函数求极值问题, 问题(6)是简单的整数规划问题, 可利用分支限界法求解, 在 MATLAB 中容易实现。根据弱对偶理论^[17], 问题(4)是原问题(3)的拉格朗日对偶问题, 它的极大解是原问题可行解的下界, 可以通过减小对偶间隙的方法, 使对偶问题的目标值逼近原问题的目标值, 当对偶间隙趋近 0 时, 对偶问题的解即为原问题的最优解。通过这种方式, 最终求出任务 T_i 的平台分配方案 y_i 。

使命是由多项任务组成, 因此, 使命的完成精度是各任务的完成精度加权和。即:

$$A_{cc} = \max \sum_{i=1}^I \omega_i A_{cc}(i) \quad (7)$$

式中: A_{cc} 为使命完成精度; ω_i 为任务 T_i 的权重。

2 N-best 策略

N -best 策略包括 2 部分内容, 第 1 部分是基于决策空间划分理论而提出的 N -best 算法, 该算法旨在为任务生成若干种分配方案, 每种方案即为一组可行解; 第 2 部分是反馈策略, 通过对多个可行解的重新组合, 找到使使命完成精度最大的解。

2.1 决策空间划分理论

决策空间划分理论为生成多个最佳解提供了一个基本框架, 核心思想如下: ①根据当前最优解将原问题划分为若干个子问题; ②求解每个子问题, 将其置于候补集中; ③从所有生成的候补解中挑选使目标函数值最大的解, 将其作为下一个最优解。

2.2 N-best 算法

根据决策空间理论, 采用 N -best 算法生成 N 个优化解, N -best 算法如下:

步骤 1 对原问题求解, 得到 $y_1, i=1$;

步骤 2 将 y_i 作为第 i 个优化解, 根据 y_i 解的形式附加约束条件, 将原问题划分为若干个子问题;

步骤 3 求解每个子问题, 将解置于候补集中;

步骤 4 $i=i+1$, 从候补集中挑出使式(1)中目标函数最大的解作为 y_i , 并将 y_i 从候补集中删除。判断 i 是否等于 N , 若是, 则结束, 输出 N 个优化解; 否则返回执行步骤 2。

举例说明划分子问题的方法。

假设原问题解的是 $[2, 3, 1, 1]$, 即 $x_1=2, x_2=3, x_3=1, x_4=1$, x_1, x_2, x_3, x_4 为原问题的 4 个变量。4 个子问题附加的约束条件依次为: $[O, *, *, *], [I, O, *, *], [I, I, O, *], [I, I, I, O]$ 。其中 O : 该项取值与原问题同处的值不同; I : 该项取值与原问题同处的值相同; $*$: 没有限制。对 4 个子问题的附加约束条件为:

子问题 1: $x_1 \neq 2$;

子问题 2: $x_1=2, x_2 \neq 3$;

子问题 3: $x_1=2, x_2=3, x_3 \neq 1$;

子问题 4: $x_1=2, x_2=3, x_3=1, x_4 \neq 1$;

将这 4 个子问题的解置入候补解集中, 从候补集中挑选使式(1)最大的解, 该解即为更新后的当前最佳解, 并将其在候补集中删除; 依此循环, 直到生成 N 个优化解。

2.3 反馈策略

采用 WL (Weight Length, WL) 算法^[15] 对任务

进行优先级排序,生成任务序列 $\mathcal{K} = \{\mathcal{K}(1), \mathcal{K}(2), \dots, \mathcal{K}(I)\}$ 。由于一个平台在一段时间只能被一项任务使用,因此在对任务求解时,需要更新当前时间下的可使用平台数量。对于优先级低的任务,在计算其可使用的平台时,需要判断它的开始时间是否晚于优先级高的任务的结束时间,如果成立,则优先级低的任务可使用的平台数量不受限制;反之,则需要减去优先级高的任务占有的平台,任务的可用平台计算方法见图 2。

图 2 中其中 $Ava(i)$ 是任务 $\mathcal{K}(i)$ 可以使用的剩余平台矢量; $Ass(i)$ 是任务 $\mathcal{K}(i)$ 分配得到的平台矢量。 all 是初始化平台集矢量; T_s 为开时间, T_f 为完成时间。

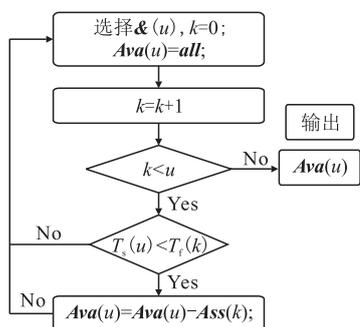


图 2 可用平台计算框图

Fig.2 Flowchart of available platform calculate

传统算法中高优先级的任务优先分配平台,这会对低优先级任务造成影响,导致局部最优。通过反馈策略,能够平衡高优先级任务与低优先级任务之间的关系。对高优先级任务生成 N 个最佳解,对低优先级的任务使用贪婪算法,让其获得尽可能多的资源,最后将这种影响反馈到高优先级任务。反馈策略的步骤可总结如下:

步骤 1 根据任务拓扑图,生成任务的优先级序列 $\mathcal{K} = \{\mathcal{K}(1), \mathcal{K}(2), \dots, \mathcal{K}(I)\}$;

步骤 2 对任务 $\mathcal{K}(i)$ 求解,调用 N -best 算法,生成 N 个优化解;

步骤 3 对优先级低于 $\mathcal{K}(i)$ 的任务使用贪婪算法,不附加任何约束条件,直接求最优解;

步骤 4 将 $\mathcal{K}(i)$ 的 N 个优化解与其他任务的解进行组合,找到使式(7)最大的解;

步骤 5 将该解作为 $\mathcal{K}(i)$ 的解;

步骤 6 $i = i + 1$; 判断 i 是否小于 I , 若是,返回执行步骤 2; 否则为任务 $\mathcal{K}(I)$ 求解。

3 案例与仿真分析

3.1 实验案例

本文使用的实验数据,来自美国海军研究生院

(NPS) 在美国国防部支持下开展的 MOC-1 实验^[18], 整个仿真在 Matlab 环境下运行, 实验任务对资源需求矢量见表 1, 平台能力矢量信息见表 2。

表 1 任务资源需求

Tab.1 Resource requirement for tasks

	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_1	5	0	5	0	0	0	0	0	5	0	0	10
T_2	5	0	12	14	10	0	0	0	12	0	4	0
T_3	3	0	8	8	7	0	0	0	6	0	4	0
T_4	2	0	0	0	0	12	0	0	0	5	0	0
T_5	7	0	9	0	0	0	0	5	0	4	0	0
T_6	5	0	10	0	8	10	6	0	5	5	0	0
T_7	2	0	0	0	8	0	0	0	0	5	0	0
T_8	2	5	5	0	0	0	8	8	0	0	2	3
T_9	2	6	0	0	10	0	0	0	0	0	0	5

表 2 平台能力

Tab.2 Resource capability of platforms

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}	Num
P_1	5	6	5	0	2	5	2	1	5	5	2	5	2
P_2	3	5	8	7	6	4	3	3	7	5	0	0	1
P_3	2	5	8	7	6	4	3	3	6	4	0	0	3
P_4	0	3	0	0	0	5	4	2	1	3	1	0	2
P_5	1	0	0	0	0	6	2	0	0	6	0	3	1
P_6	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	1
P_7	5	0	5	0	0	0	0	8	3	1	0	2	
P_8	3	0	0	0	0	0	0	0	1	6	3	1	
P_9	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	4	3	1
P_{10}	2	0	0	0	0	0	0	0	4	3	3	2	1
P_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	5	3
P_{12}	5	7	5	0	0	1	0	0	4	1	3	3	1

3.2 结果分析

使用 Matlab 对算法进行仿真, 初始化平台数量为 $[2\ 1\ 3\ 2\ 1\ 1\ 2\ 1\ 1\ 1\ 3\ 1]$, $N = 3$ 。

采用 N -best 策略改进后所得结果见表 3, 表 4 为改进前所得结果。采用 N -best 策略, 任务完成精度的最大值为 100%, 最小值为 75%, 平均值为 93.05%, 方差为 0.097; 改进之前, 任务完成精度的最大值为 100%, 最小值为 50%, 平均值为 84.7%, 方差为 0.368。比较 2 种方案, 任务完成精度的最大值不变, 最小值由 50% 增加到 75%, 平均值由 84.7% 增加到 93.05%, 增加了 8.35%, 方差由 0.368 减小到 0.097, 减小了 0.271。

通过实验数据对比, 采用 N -best 策略后, 使命完成精度有所提高, 新的方案调整了部分任务的分配结果, 减小了高优先级任务对低优先级任务的影响。条形图见图 3。

表3 N-best策略分配方案

Tab.3 Allocate scheme for N-best strategy

任务	t_s	t_p	平台1	平台2	平台3	精度/%
T_1	0	30	P_1	P_{11}		100
T_2	0	30	P_3	P_3	P_8	100
T_3	10	8	P_3	P_9	P_{10}	75
T_4	5	7	P_1	P_4	P_5	100
T_5	10	6	P_2	P_6	P_7	100
T_6	16	4	P_1	P_2	P_4	100
T_7	18	2	P_3	P_5		75
T_8	20	1	P_1	P_2	P_3	87.5
T_9	21	3	P_1	P_2	P_3	100
平均值						93.05

表4 改进前分配方案

Tab.4 Allocate scheme before improvement

任务	t_s	t_p	平台1	平台2	平台3	精度/%
T_1	0	30	P_1	P_{11}		100
T_2	0	30	P_2	P_3	P_8	100
T_3	10	8	P_3	P_{11}		50
T_4	5	7	P_4	P_4	P_5	50
T_5	10	6	P_1	P_3	P_6	100
T_6	16	4	P_1	P_3	P_5	100
T_7	18	2	P_2	P_7		75
T_8	20	1	P_1	P_3	P_3	87.5
T_9	21	3	P_1	P_3	P_3	100
平均值						84.7

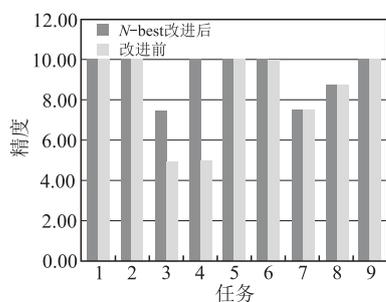


图3 任务完成精度比较图

Fig.3 Accuracy comparison for tasks

4 结语

本文设计了基于 N-best 策略的军事资源匹配方法,该方法首先对问题进行了建模分析,将军事背景下的任务分配问题转换成为数学规划问题。对每一个任务使用 N-best 算法后,会出现 N 个最佳解,为了避免优先级高的任务因为率先分配资源而导致低优先级任务完成精度下降,设计了一种反馈策略,让低优先级任务通过贪婪策略选择最好的解,反馈作用到高优先级,让高优先级不是直接从 N 个最佳解中选择最好的解,而是选择使全局任务完成精度

最大的解。该任务资源匹配模型属于集中式,而当前联合作战要求诸军兵种联合展开作战行动,但是由于每个单元拥有的作战力量有限,作战任务不尽相同,因此需要通过协同配合才能较好的完成任务。基于以上情况,下一阶段将着力研究分布式条件下的资源配置问题。

参考文献(References):

- [1] 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. The Development of Adaptive Organization for Command and Control (II)——The Summarize of Adjusting and Testing Methods for Organization Adaptability [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2012, 13(3): 54-59. (in Chinese)
- [2] ZHANG Jieyong, YAO Peiyang, ZHOU Xiangxiang, et al. A Review on the Method of C2 Organizational Design [C]//The 2011 International Conference on Computer Application and System Modeling. Xiamen, China, 2011: 1978-1981.
- [3] GROSSMANN I E. Review of Nonlinear Mixed-Integer and Disjunctive Programming Techniques [J]. Optimization Engineering, 2002, 3(3): 227-252.
- [4] PARK C, PATTIPATI K PAN W, et al. Quantifying the Impact of Information and Communication Structures via Distributed Auction Algorithm: Point-to-Point Communication Structure [J]. IEEE Transactions on Systems and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2012, 42(1): 68-86.
- [5] 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.
- [6] HAN X, MANDAL S, PATTIPATI K P, et al. An Optimization-based Distributed Planning Algorithm: A Blackboard-Based Collaborative Framework [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems, 2014, 44(6): 673-686.
- [7] FOO P H, Ng G W. Combining the Interacting Multiple Model Method with Particle Filters for Manoeuvring Target Tracking with a Multi Static Radar System [J]. Iet Radar Sonar & Navigation, 2011, 5(7): 697-706.
- [8] AN W, PARK C, HAN X, et al. Hidden Markov Model and Auction-Based Formulations of Sensor coordi-

- nation Mechanisms in Dynamic Task Environments [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2011, 41(6): 1092-1106.
- [9] SIH G C, LEE E A. A Compile-Time Scheduling Heuristic for Interconnection Constrained Heterogeneous Processor Architectures [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1993, 4(2): 175-187.
- [10] 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.
- [11] 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-Part A: Systems and Human, 2002, 32(3): 360-375.
- [12] LEVCHUK G M, LEVCHUK Y N, LUO J, et al. Kleinman. Normative Design of Project-Based Organizations-Part III: Modeling Congruent, Robust, and Adaptive Organizations [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics-Part A: Systems and Human, 2004, 34(3): 337-350.
- [13] 阳东升, 彭小宏, 张维明, 等. C2 组织结构设计: 平台-任务关系设计 [J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(3): 9-13.
YANG Dongsheng, PENG Xiaohong, ZHANG Weiming, et al. Command and Control Organization Design: Platform-Task Design [J]. Fire Control and Command Control, 2006, 31(3): 9-13. (in Chinese)
- [14] 张杰勇, 姚佩阳, 李凡. 使命完成时间限制下的任务-平台关系设计模型及算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(8): 1621-1629.
ZHANG Jieyong, YAO Peiyang, LI Fan. An Algorithm Task-Platform Relation Design under Mission Completion Time Constraint [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(8): 1621-1629. (in Chinese)
- [15] XU H, BUI H, MANDAL S, et al. Optimization-Based Decision Support Software for a Team-in-the-Loop Experiment: Asset Package Selection and Planning, [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics-Part A: Systems and Human, 2013, 43(2): 237-251.
- [16] BUI H, HAN X, Mandal S, et al. Optimization-Based decision Support Algorithms for a Team-in-the-Loop Planning Experiment [C] // International Conference on Systems Man and Cybernetics. San Antonio, TX: IEEE Press, 2009: 4684-4689.
- [17] BERTSEKAS D P. Nonlinear Programming [M]. Belmont, MA: Athena Scientific, 1999.
- [18] HUTCHINS S G, KEMPLE W G, KLEINMAN D L, et al. Maritime Headquarters with Maritime Operations Center: A Research Agenda for Experimentation [C] // Proceedings of the 14th International Command and Control Research and Technology Symposium. 2009: 1-32.

(编辑:徐楠楠)