



# 基于DAG和AHP-TOPSIS算法的多乘员协同任务分配方法研究

李欣颜<sup>1</sup>, 初建杰<sup>2\*</sup>, 苏瑾<sup>1</sup>, 李飞龙<sup>2</sup>

1. 中国北方车辆研究所, 北京 100072;

2. 西北工业大学工业设计与人机工效工信部重点实验室, 西安 710072

\* E-mail: [cjj@nwpu.edu.cn](mailto:cjj@nwpu.edu.cn)

收稿日期: 2022-10-20; 接受日期: 2023-05-08; 网络版发表日期: 2023-07-19

**摘要** 提出了一种基于有向无环图(direct acyclic graph, DAG)以及层次分析法结合逼近理想解排序法(analytic hierarchy process-technique for order preference by similarity to an ideal solution, AHP-TOPSIS)的多乘员协同任务动态分配方法. 基于列表调度算法的思想, 对乘员任务进行分解, 并以任务划分层级, 通过广度遍历, 对每层任务进行排序, 再逐个分配. 综合考虑乘员脑力负荷、个人能力、时间成本和任务相关度. 对单个任务采用AHP-TOPSIS算法确定最佳分配对象, 并实时更新乘员状态, 进行下一个任务的分配, 直至所有任务分配完成. 本方法实现了随战场态势、作战任务、乘员状态等实时变化时乘员协同任务的合理分配与动态调整, 可有效解决非预期事件下协同作战效率不高、乘员负荷不均衡以及任务分配不合理等问题.

**关键词** 动态任务分配, 多乘员协同, DAG分解, AHP-TOPSIS

## 1 引言

坦克装甲车辆随着无人化、智能化技术不断发展, 其乘员逐渐减少, 而无人机等智能装备的搭载, 却使得乘员作战任务增加. 因此, 坦克装甲车辆的多乘员任务分配相较于传统坦克单平台的车长、炮长、驾驶员三乘员任务分配方案发生了较大变化, 乘员作战任务不仅多样化, 而且向多任务并行处理、多人协同趋势发展. 未来战场的协同作战, 不仅需要基于预先作战方案进行协同, 还要根据战场态势的变化, 实时调整原有作战方案, 根据乘员状态及作战环境对任务进

行动态分配<sup>[1]</sup>. 面向未来复杂地面突击作战环境, 在保证乘员负荷均衡的前提下, 随着作战情景实时变化, 如突发任务、某乘员脑力负荷过高、某乘员失效等, 多乘员如何高效协同完成所分配的任务, 这需要一套有效的分配方法作为指导. 研究多乘员协同对于提高作战效能, 应对复杂战场环境具有重要意义.

目前对于多乘员协同作战研究较少, 以往基于预先作战方案的作战形式, 限制了对协同任务粒度的进一步划分, 鲁棒性低, 大大降低了任务分配的效能. 毛明等人<sup>[2]</sup>针对信息化条件下坦克两乘员负荷进行了深入分析, 提出了降低坦克两乘员任务负荷的措施.

引用格式: 李欣颜, 初建杰, 苏瑾, 等. 基于DAG和AHP-TOPSIS算法的多乘员协同任务分配方法研究. 中国科学: 技术科学, 2023, 53: 1465-1475  
Li X Y, Chu J J, Su J, et al. Task assignment method of multicrew cooperative display control based on DAG and AHP-TOPSIS algorithm (in Chinese).  
Sci Sin Tech, 2023, 53: 1465-1475, doi: [10.1360/SST-2022-0342](https://doi.org/10.1360/SST-2022-0342)

Mitchell<sup>[3]</sup>基于Imprint工具研究了添加特定附加技术对于作战人员工作量和作战效率的影响. 聂俊峰等人<sup>[4]</sup>基于多资源理论从脑力负荷的角度提出了一种任务分配方案的优选方法, 较好地考虑了乘员脑力负荷对于多乘员任务分配的影响. 但以上研究主要还是集中于对已得到的分配方案进行优选和调整, 对于具体如何分配没有详细的研究, 同时考虑的乘员特性因素较少, 没有从乘员角度考虑到任务的关联性、时间成本、乘员情景意识等对于任务分配的影响. Hassin和Nathaniel<sup>[5]</sup>基于阈值策略和动态博弈提出了一种自选择的任务分配方法, 但是分配原则更倾向于社会工作层面.

目前任务分配的研究, 主要集中于人机功能分配<sup>[6-11]</sup>、多智能体的任务分配<sup>[12-15]</sup>以及计算机任务调度<sup>[16-19]</sup>等方面. 人机功能分配主要包括静态和动态两种类型, 静态功能分配是从功能特性和需求分析入手, 通过比较人和系统在完成该功能上的能力优势或绩效优劣, 决定该功能分配给人还是系统. 动态功能分配方法则是在静态人机功能分配的基础上, 当动态触发机制响应时, 允许系统在运行阶段根据情况的变化将功能在人与系统之间动态地重新分配, 提高整体的工作效率. 多智能体的任务分配是指在作战开始前, 指挥中心通常会根据已掌握的战场信息, 对己方作战单元进行任务预分配. 但随着战场情景变化以及突发情况的出现, 预分配方案可能会使得执行任务的效能降低, 多智能体如何调整自身任务, 使得执行任务的效能保持最大是其研究的主要内容. 计算机任务调度研究的是将任务动态地调用给各个虚拟机并提供给用户使用, 怎样合理地将任务分配给不同的虚拟机, 进而提升整个系统的性能是其研究的重点. 以上分配原则对于多乘员分配有很好的参考价值, 但舱室乘员间任务分配时, 主要考虑到人的特性, 需要以人的理论基础来加以研究<sup>[4]</sup>.

针对实际作战过程中, 乘员应对非预期事件效率低下的问题, 本文提出了一种多乘员协同动态任务分配方法. 在非预期事件触发时, 对任务进行有向无环图(direct acyclic graph, DAG)分解及分层, 根据乘员脑力负荷、乘员能力、任务相关度以及时间成本4个因素, 按照一定的任务分配顺序, 基于AHP-TOPSIS方法进行乘员的优选, 实时更新乘员状态, 并以此为依据进行下一任务的分配. 任务分配过程可实现随乘员状

态变化而动态调整, 达到负荷均衡、效能最优, 从而将多任务分配问题简化为单个任务的多属性决策问题.

## 2 基于DAG的任务分解与层级划分

### 2.1 多乘员实时任务分配问题描述

非预期事件触发时, 简单任务只需要进行乘员的优选. 如果非预期任务较为复杂, 则需要按照一定的原则对任务进行分解. 多乘员任务分解, 是在明确任务目标和任务主体(多个乘员)的前提下, 依据一定的任务关系, 以及任务本身特点, 把任务分解成多个子任务, 然后由多个乘员按照时序关系协同完成.

### 2.2 任务分解

面对非预期事件, 如出现突发任务、某乘员脑力负荷过高或失效等, 首先需要对突发任务或失效乘员的剩余任务重新分解. 作战任务分解则是在已知当前作战任务的目标和属性的基础上, 依据任务的层次关系、时序关系、逻辑关系和关联关系将目标任务分解成一定数量的子任务<sup>[20]</sup>. 逻辑关系指: 上一层任务执行完才能执行下一级任务, 任务之间有执行顺序. 关联关系指: 后续任务的完成是否需要前置任务的知识积累.

首先, 基于DAG对作战任务进行分解. DAG是一个没有环、有方向的图, 可以对关联任务的完成过程进行详细的描述, 通过任务节点和有向线段表示其子任务间的关系. 作战任务根据任务的相关程度, 将任务分为相关任务和独立任务. DAG图只能用来描述相关任务的完成过程, 可引入虚拟入节点和出节点的概念, 将独立任务加入DAG图中, 使得DAG图能描述整个作战任务的完成过程. DAG图可以表示为一个元组  $G = \langle T, E, M \rangle$ , 其中  $T = \{t_i | i = 0, 1, \dots, n-1\}$  表示  $n$  个任务,  $t_i$  表示第  $i$  个任务的预期完成时间;  $E = \{e_i | i = 0, 1, \dots, n-1\}$  表示任务的类型,  $e_i \in (E_1, E_2, \dots, E_k)$ , 表示共有  $k$  种任务类型;  $M$  表示关联关系的集合,  $md(i, j)$  表示任务  $i$  与任务  $j$  的相关度.

### 2.3 任务层级划分

基于列表的广度遍历的思想<sup>[19]</sup>, 按DAG中入口任

务节点至出口任务节点的顺序, 将DAG进行分层, 分层完成后, 除入口任务节点与出口任务节点外, 其他所有子任务都与其直接前驱任务节点和直接后继任务节点的距离相同, 相同任务层中的各个任务之间无任何执行次序先后的相关关系<sup>[21]</sup>. 考虑到作战任务阶段性的特点, 本文按照任务阶段将DAG任务进行水平分层, 未分层DAG图及分层DAG图如图1所示.

### 3 任务分配因素

多乘员协同作战需要以乘员为中心, 以任务完成效果为标准, 对多个乘员进行任务分配. 所以需要选取对乘员执行任务影响程度大且可测量的因素作为多乘员协同任务分配的标准. 本文基于文献研究以及行业专家建议选取乘员脑力负荷、乘员能力、任务相关度和时间成本作为坦克装甲车辆任务分配的关键影响因素, 乘员情景意识目前还没有合理的计算方法, 只能依靠实验获得实时数据<sup>[22]</sup>, 所以不适合用于任务的提前分配.

#### 3.1 乘员脑力负荷

乘员脑力负荷与任务有关, 包括初始脑力负荷值与完成任务累加的脑力负荷值, 即某一项任务的完成需要多少脑力负荷. 多乘员协同动态任务分配, 需要根据乘员的实时状态值, 按照一定的原则进行分配, 即所选取的乘员指标能够根据任务完成情况进行实时

计算或预测, 进而更新乘员状态. 在近几年的研究中, 脑力负荷预测方法较为多样, 包括认知任务负荷(cognitive task load, CTL)模型<sup>[6]</sup>、多资源理论<sup>[4,23]</sup>、多指标脑力负荷预测方法<sup>[24]</sup>、信息熵<sup>[25,26]</sup>等, 但是这些方法较为复杂且需要通过较多的主观评价来确定, 在实际运用中会干扰乘员的正常操作. 陆旭等人<sup>[27]</sup>以任务需求负荷(task demand load, TDL)和乘员负荷能力(staff workload capacity, SWC)对脑力负荷进行了量化, 可以较好地评估任务需求负荷和乘员剩余脑力负荷. 其中所提乘员负荷能力的计算依据反应时间来确定, 然而作战任务的任务绩效的衡量标准多样, 且需要任务完成才可获得. 为实现任务的提前分配, 本文采取任务需求负荷来近似代表乘员的脑力负荷值以实现任务分配中脑力负荷的实时计算问题.

TDL指任务内容的复杂度及其紧迫程度, TDL的表达式为

$$TDL(i) = \frac{H_{tdl}(i)}{T_{tdl}(i)}. \quad (1)$$

TDL(i)代表任务i的TDL,  $H_{tdl}(i)$ 代表任务i的复杂度, 其计划最长完成时间为 $T_{tdl}(i)$ . 然而任务复杂度<sup>[28,29]</sup>目前还没有定量的计算方法, 陆旭等人<sup>[27]</sup>所提信息熵理论对于特定界面的侦察和监督任务是适用的, 但无法适用其他任务, 所以本文主要依据车长的主观经验利用模糊贝叶斯<sup>[30]</sup>来确定任务复杂度. 在执行任务前, 需要通过专家确定任务复杂度及其父节点的条件概率,

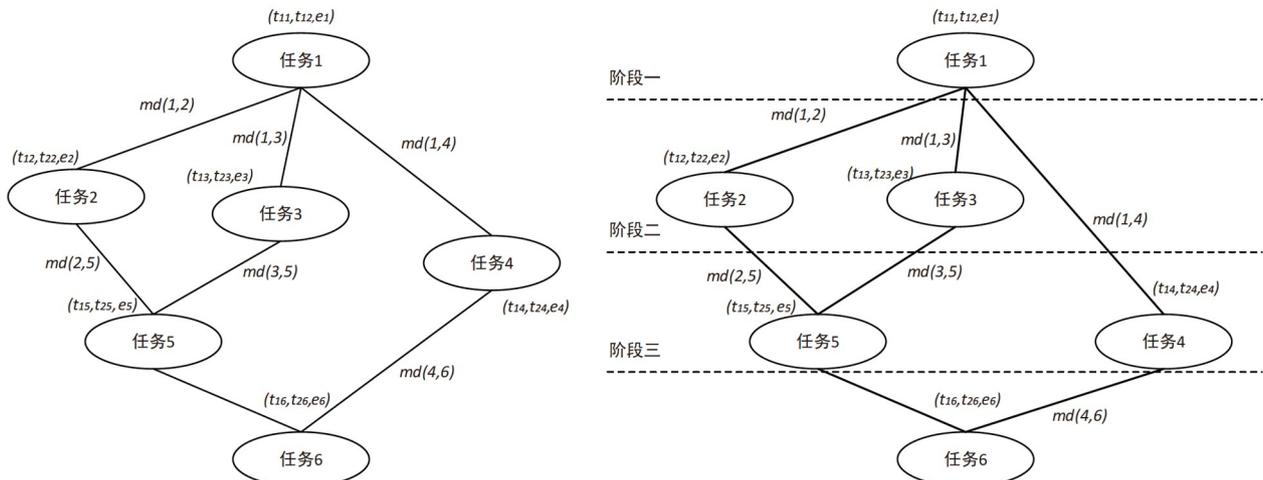


图1 未分层DAG图(左)及分层DAG图(右)  
Figure 1 Unstratified DAG plot (left) and stratified DAG plot (right).

根据父节点对任务复杂度的影响程度设定评语集 $W=\{非常低, 低, 较低, 中等, 较高, 高, 非常高\}$ , 将评语集量化为三角模糊数, 如表1所示.

设 $P_{i,k} = (l_{i,k}, r_{i,k}, m_{i,k})$ 表示第 $k$ 位专家对父节点 $i$ 条件概率评价的三角模糊值. 对专家评判结果进行加权平均, 则模糊均值表示如下:

$$P_i = \frac{(a_1 \times P_{i,1}) \oplus (a_2 \times P_{i,2}) \oplus \dots \oplus (a_n \times P_{i,n})}{n} \quad (2)$$

采用面积均值法将得到的三角模糊值进一步转换为明确的值:

$$P_i = \frac{l_{i,k} + 2r_{i,k} + m_{i,k}}{4} \quad (3)$$

假设当前该乘员需要操控无人机进行区域1的敌情侦察任务, 需要确定该任务的复杂度. 在执行任务前, 依据专家评价, 利用式(2)和(3), 获得专家对任务复杂度与其父节点的条件概率如表2所示. 在实际作战时, 车长根据任务情况及作战经验给出任务难度及任务工作量的主观评语, 为“较低”和“较高”, 根据式(2)和(3), 确定任务难度及任务工作量的先验概率, 进而确定任务复杂度如表3所示, 为0.46. 即实际作战时, 车长输入任务难度及任务工作量的主观评语, 输出任务复杂度的值.

### 3.2 乘员能力

各个乘员按照其原有的工作分工, 或者个人特性, 对于不同任务有不同的能力表现<sup>[31]</sup>. 技能-规则-知识模型(skill-rule-knowledge, SRK)<sup>[32]</sup>将乘员行为划分为技能型行为、规则型行为、知识型行为, 同时也对应三个阶段的乘员能力, 如表4所示. 多个乘员完成同一类任务时, 在相同条件下, 熟练度越高的乘员所消耗脑力负荷值越小且完成效果越好, 而熟练度越低的乘员需要花费的脑力负荷越高且完成效果越差. 面对相同的任务类型, 如果只需要技能型行为来解决, 说明该乘员经验丰富; 如果需要知识型行为来完成, 说明乘员对该任务类型较为生疏. 本文采用模糊评价法, 在作战前, 参照表1及式(2)和(3), 根据专家意见确定各乘员在各任务类型下的能力值, 建立乘员能力矩阵. 设有 $n$ 种作战任务类型, 每种任务类型乘员都有不同的能力水平, 则单个乘员的能力矩阵应为 $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ,  $t_i$ 代表乘员在第 $i$ 项任务类型下的能力值.

表1 评语集及对应三角模糊数

Table 1 Set of comments and corresponding triangular fuzzy numbers

序号	语言变量	三角模糊数	值
1	非常低	(0, 0, 0.1)	0.025
2	低	(0, 0.1, 0.3)	0.125
3	较低	(0.1, 0.3, 0.5)	0.3
4	中等	(0.3, 0.5, 0.7)	0.5
5	较高	(0.5, 0.7, 0.9)	0.7
6	高	(0.7, 0.9, 1.0)	0.875
7	非常高	(0.9, 1.0, 1.0)	0.975

表2 任务复杂度及其父节点的条件概率

Table 2 Task complexity and the conditional probabilities of its parent node

任务难度	任务工作量	任务复杂度	条件概率
高	大	高	0.782
		低	0.218
	小	高	0.674
		低	0.326
低	大	高	0.374
		低	0.626
	小	高	0.266
		低	0.734

表3 任务复杂度计算

Table 3 Task complexity calculation

车长评价		先验概率		任务复杂度	
任务难度	较低	难度高	0.3	复杂度高	0.46
		难度低	0.7		
任务工作量	较大	工作量大	0.7	复杂度低	0.52
		工作量小	0.3		

表4 乘员能力等级表

Table 4 Occupant ability scale

乘员能力等级	能力水平
技能型	高
规则型	中
知识型	低

### 3.3 任务相关度

任务相关度<sup>[19]</sup>考虑的是前置任务执行获得的知识对于后续任务的影响,也可描述为后续任务对于前置任务的依赖度.前置任务对于执行后续任务的影响不能忽略,执行前置任务的乘员如果继续执行后续相关性大的任务,在乘员其他条件一致的情况下,可使得任务具有较好的连贯性,执行效果会更好.任务相关度可凭借专家经验利用1~9级标度法来获得,在任务分配时进行实时调用.

本文只考虑相连任务的任务相关度,以图1中任务5为例,在进行任务5的分配时,只考虑任务2和任务3与任务5的相关性,如果乘员1和乘员2分别执行任务2和任务3,则由乘员1和乘员2执行任务5相比于其他乘员执行具有更好的连贯性.

### 3.4 时间成本

任务分配还需要考虑到任务完成效率,将时间成本考虑在内可避免因某个乘员能力强或脑力负荷值低而把较多任务分配给一个人,使得花费较多时间才能完成当前阶段的任务,不满足战场任务紧迫性的需求.本文以每一任务阶段内完成时间最短为目标,使得乘员完成任务时间尽可能短.

## 4 基于AHP-TOPSIS算法的任务分配方法

### 4.1 基于列表排序算法的任务分配策略

列表排序算法的核心思想在于DAG的分层的广度遍历,将任务按照任务属性和任务关系生成DAG图,并对节点进行分层.为了使得多乘员协同任务分配具有较高的粒度,遍历每一层的任务节点,对同层的任务按照一定的原则逐个分配,分配完成后再进行下一层任务的分配.同层之间的任务节点都是独立的,分配时需要考虑谁先分配的问题,即确认任务的分配顺序.为了计算任务相关度的影响,对于同一层内的任务,如果存在父子任务关系,则应优先进行父任务的分配,直到所有任务无相关关系,再比较脑力负荷及时间成本的指标权重.如果脑力负荷的指标权重较大,则按照任务需求负荷的大小顺序进行分配;若时间成本的指标权重较大,则按照任务的预期完成时间长短顺序进行分配.

分配过程中,只在理想情况下任务数等于乘员数,但更多条件下,任务数多于或者少于乘员数.无论哪种情况,均可采用轮询的方式.对于乘员来说,每分配一次任务,乘员脑力负荷和任务时间成本都会发生变化,所以哪个任务先分配对于最终结果有明显的影 响.首先需要在战前,通过层次分析法,针对可能出现的非预期事件进行分类评估,确定不同情况下各因素的权重,建立因素权重库.然后在实际作战时,根据战场情况对各因素权重实时调用,对各阶段待分配任务进行优先级排序后,按照任务分配顺序采用TOPSIS法进行逐个分配.每分配一个任务,分配到任务的乘员的脑力负荷、任务相关度和时间成本都会发生变化,根据分配完以后新的乘员状态,对其他任务进行分配,直到所有任务都分配完成.所以任务分配的核心问题便简化为单任务在多乘员中分配时的多目标决策问题.

### 4.2 基于层次分析法确认因素权重

对各层次元素的重要性进行两两比较,建立判断矩阵,并根据1~9标度法标出具体数值,确定各层次指标的权重,并经过一致性检验以及偏差修正后得出权重,最后将所有专家的权重进行数据统计与计算,并取平均值,然后得到各指标权重,最后还需进行一致性检验.

本文中任务分配有4项评价指标:乘员脑力负荷、乘员能力值、任务相关度和时间成本.两两比较,得判断矩阵 $\mathbf{B}$ ,如式(4)所示:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中,元素 $b_{ij}$ 表示第 $i$ 个评价特征与第 $j$ 个评价特征的重要性比较结果,比较结果通常采用1~9标度法标记.

由于判断矩阵 $\mathbf{B}$ 受决策者主观判断的影响,难免存在一定的误差,必须进行一致性校验,一致性比例 $CR$ 定义如式(5)所示:

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (5)$$

式(5)中 $CI$ 为一 致性指标,其可按式(6)求得; $RI$ 为平均随机一致性指标,对于4阶矩阵,取 $RI=0.9$ .

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (6)$$

式中,  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵  $\mathbf{B}$  的最大特征根, 当  $CR < 0.1$  时, 判断矩阵的一致性满足要求, 否则重新构造判断矩阵.

判断矩阵  $\mathbf{B}$  通过一致性校验后, 其最大特征根  $\lambda_{\max}$  对应的特征向量  $\mathbf{U}$  如式(7)所示, 各评价指标的权重系数可通过式(8)求得:

$$\mathbf{U} = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T, \quad (7)$$

$$w_i = \frac{u_i}{\sum_{i=1}^n u_i}. \quad (8)$$

### 4.3 基于TOPSIS确定任务分配的最优解

TOPSIS方法先确定一个最优解和一个最劣解, 根据有限个评价对象与最优解、最劣解的距离来进行排序, 若评价对象最靠近最优解同时又最远离最劣解则为最优, 其原理如下.

特征集为  $z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ , 构建特征矩阵  $\mathbf{Z}$  如式(9)所示:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{m1} & z_{m2} & \dots & z_{mn} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

由式(8)可得评价对象的4项特征权重, 形成评价特征权重系数矩阵  $\mathbf{W}$ . 计算加权之后的特征矩阵  $\mathbf{Z}'$ , 如式(10)所示:

$$\mathbf{Z}' = \begin{bmatrix} z'_{11} & z'_{12} & \dots & z'_{1n} \\ z'_{21} & z'_{22} & \dots & z'_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z'_{41} & z'_{42} & \dots & z'_{4n} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

依托加权后的评价矩阵, 找出每一列的最佳值, 形成最优解  $Y^+ = \{y_1^+, y_2^+, \dots, y_n^+\}$ , 找出每一列的最劣值, 形成最劣解  $Y^- = \{y_1^-, y_2^-, \dots, y_n^-\}$ .

按式(11)和(12)计算各待评价对象与正负理想解之间的欧氏距离.

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_j^+)^2}, \quad (11)$$

式中,  $d_i^+$  为第  $i$  个待评价对象与最优解之间的欧氏距离.

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_j^-)^2}, \quad (12)$$

式中,  $d_i^-$  为第  $i$  个待评价对象与最劣解之间的欧氏距离.

最后得出评价对象评分值  $X_i$ , 如式(13)所示:

$$X_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \quad (13)$$

式中,  $X_i$  为第  $i$  个待评价对象的评分值, 评分值越高表示评价对象越优.

## 5 案例分析

以协同侦察打击任务为例, 进行多乘员任务分配方法的验证. 任务描述: 现有作战车辆一辆, 可执行任务的候选乘员3名, 原本执行在A区域的侦察打击任务, 然而执行过程中发现B区域有敌方威胁, 需要先进行B区域的侦察及打击任务. 该任务为突发任务, 在原有任务计划外, 需要对该任务进行分解和分配. 为了保证后续A区域任务的执行, 任务完成时间尽可能短, 且乘员负荷尽可能均衡, 根据战场情况调用因素权重如式(14)所示. 对该突发任务进行DAG分解, 并按照作战任务阶段进行层级划分, 如图2所示. 任务类型可分为4类, 即驾驶任务、侦察任务、决策任务、打击任务, 可根据第3.2节的乘员能力计算方法, 获得3名乘员的能力得分如表5所示. 同时车长根据主观经验, 获得各任务的难度及任务工作量的评语和预期完成时间, 通过式(2)和(3), 确定任务工作量的先验概率, 进而获得各任务的复杂度及任务需求负荷如表6所示. 根据专家经验, 各任务的复杂度如表7所示.

$$w = \begin{bmatrix} 0.2701 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2506 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1441 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3352 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

按照任务阶段, 当阶段内有任务节点存在子节点时, 需要进行优先分配, 对其余任务按照权重最大因素的值的顺序分配. 当单人分配到多个任务时, 按照任务执行的先后顺序排队执行. 假设当前三位乘员执行任务累计脑力负荷值为(0.286, 0.436, 0.312), 以侦察阶段为例, 按照时间成本大小, 得任务分配顺

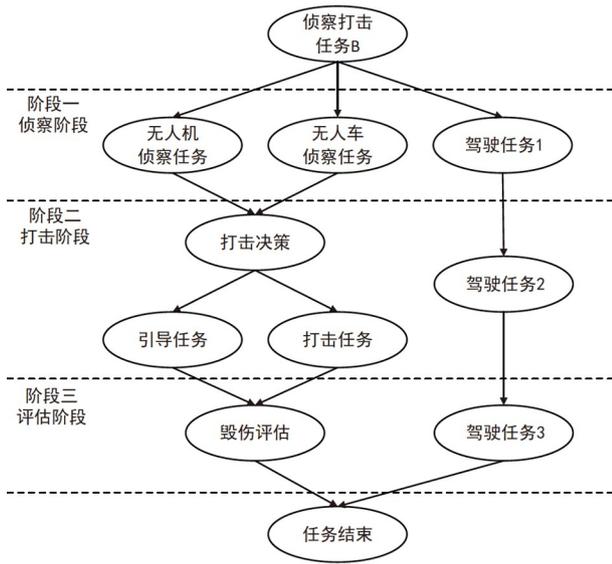


图2 作战任务DAG分解  
Figure 2 Operational mission DAG breakdown.

表5 乘员能力表  
Table 5 Occupant ability scale

乘员	驾驶任务	侦察任务	决策任务	打击任务
乘员1	0.8	0.7	0.7	0.9
乘员2	0.6	0.9	0.8	0.7
乘员3	0.7	0.6	0.9	0.8

序为: 任务3、任务2、任务1.

分配任务3时, 当前三位乘员的特征矩阵如式(15)所示:

$$Z = \begin{bmatrix} 0.286 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0.436 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0.312 & 0.7 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

脑力负荷值及时间成本值越小时, 乘员越适合执行该任务; 而乘员能力值及任务相关度值越大时, 乘员越适合执行该任务. 由式(9)~(13)可得三位乘员的能力得分为1, 0, 0.6664, 所以任务3分配给乘员1. 更新乘员1的脑力负荷值及时间成本分别为0.2997和30. 同理可计算得任务2及任务1分别分配给乘员3、乘员2, 最终侦察阶段各任务的乘员得分及分配结果如表8所示.

当执行下一阶段任务时, 上一阶段任务已全部完成, 将乘员的时间成本清零, 按照如上分配步骤继续进行分配, 最终获得其余任务的乘员得分及分配结果如表9所示.

最终, 该分配方案下各阶段任务预期用时为30, 15, 30 min, 共75 min, 各乘员脑力负荷值为0.3378, 0.6177, 0.5685. 本文所选分配因素, 其中乘员脑力负荷、乘员能力及任务相关度主要影响乘员完成任务的效率, 而时间成本只影响任务完成的速度. 各因素权重的选择取决于实际作战情况, 任务紧迫性越高, 时间成本的权重越高; 任务完成效果越重要, 则乘员脑力负荷、乘员能力以及任务相关度的权重越高; 乘员的负荷均衡越重要, 乘员脑力负荷的权重越高. 所以面向战场非预期任务, 如突发紧急任务、乘员失效以及乘员脑力负荷超载等情况, 本文所提动态任务分配方法均能有效应对. 针对突发复杂任务, 进行DAG分解并进行层级划分, 按照一定的原则进行任务优先级排序,

表6 子任务信息  
Table 6 Sub-task information

任务	编号	任务类型	任务难度	任务工作量	任务复杂度	预期完成时间 (min)	任务需求负荷
无人机侦察	1	侦察任务	中等	中等	0.52	15	0.0347
无人车侦察	2	侦察任务	较高	中等	0.61	20	0.0305
驾驶任务1	3	驾驶任务	低	高	0.41	30	0.0137
打击决策	4	决策任务	非常高	低	0.68	5	0.136
引导任务	5	打击任务	较高	中等	0.61	10	0.061
打击任务	6	打击任务	非常高	中等	0.72	8	0.09
驾驶任务2	7	驾驶任务	低	中等	0.37	15	0.025
毁伤评估	8	决策任务	高	非常低	0.63	5	0.126
驾驶任务3	9	驾驶任务	低	高	0.41	30	0.0137

表 7 任务相关度

Table 7 Task relevance

任务相关度	值	任务相关度	值
$md(1, 4)$	0.6	$md(3, 7)$	0.2
$md(2, 4)$	0.6	$md(5, 8)$	0.5
$md(4, 5)$	0.8	$md(6, 8)$	0.7
$md(4, 6)$	0.8	$md(7, 9)$	0.2

表 8 阶段一任务的乘员得分及分配结果

Table 8 Crew scores for Stage 1 tasks and allocation results

任务	序号	乘员1得分	乘员2得分	乘员3得分	分配结果
驾驶任务1	3	1	0	0.6664	乘员1
无人车侦察	2	0.4302	0.6078	0.6227	乘员3
无人机侦察	1	0.4302	0.6078	0.3846	乘员2

表 9 剩余任务的乘员得分及分配结果

Table 9 Crew scores and allocation results for the remaining tasks

阶段	任务	序号	乘员1得分	乘员2得分	乘员3得分	分配结果
阶段二	打击决策	4	0.4830	0.3908	0.8393	乘员3
	驾驶任务2	7	1	0.3429	0.2747	乘员1
	引导任务	5	0.5024	0.5030	0.4462	乘员2
	打击任务	6	0.5024	0.2806	0.5811	乘员3
阶段三	驾驶任务3	9	1	0.1987	0.2747	乘员1
	毁伤评估	8	0.3790	0.6315	0.6210	乘员2

调用合适的权重矩阵, 基于TOPSIS方法将任务依次分配. 当某乘员脑力负荷值过高时, 可调整所调用的各因素权重, 增加乘员脑力负荷对任务分配的影响, 将更多的任务分配给脑力负荷低的乘员; 面对某个乘员失效, 则在乘员列表中去掉该乘员, 对任务进行重新分配; 面向乘员受伤或其他情况导致乘员执行各任务的能力受限但仍能执行任务的情况, 则根据乘员实际状况, 调整乘员的能力矩阵值, 再进行任务分配. 因此该分配方法能较好地应对多种复杂战场情景, 具备较好的适用性和鲁棒性.

## 6 结论

乘员舱室多乘员协同任务分配问题的研究对提高多乘员协同作战效率具有重要的现实意义. 本文基于列表的调度思想, 结合DAG以及AHP-TOPSIS算法, 提

出了一种多乘员协同任务动态分配方法. 选取乘员脑力负荷、乘员能力、任务相关度以及时间成本四个影响因素, 在满足作战时间要求的基础上, 尽可能地保证了乘员脑力负荷均衡, 同时考虑了乘员能力差异以及任务的相关度对任务完成效果的影响. 根据非预期任务的实际情况, 实时调用各项因素的权重, 满足不同情况下的任务需求. 基于分层的广度遍历的算法思想, 结合DAG和AHP-TOPSIS算法将任务分配问题简化为多属性决策问题. 本方法更多地从人的角度考虑任务动态分配, 且适用性、鲁棒性更强, 可有效解决非预期事件下协同作战效率不高、乘员负荷不均衡以及任务分配不合理等问题, 具有一定的创新性.

随着乘员舱室智能化的发展, 乘员与智能化系统、乘员与乘员之间如何高效合理地协同成为了新的研究重点. 本文提出的方法具有通用性, 为各兵种多人协同任务分配研究提供研究思路, 并结合地面突击作

战多乘员典型协同任务分配进行了验证, 方法有效可行。但验证的任务场景有限, 且未充分考虑所有非预期事件对作战过程及多乘员协同的影响, 后续将通过

各种任务场景, 根据作战任务、系统状态、乘员状态、非预期事件等作战情景变化对多乘员协同任务分配进行进一步研究与验证。

## 参考文献

- Mao M, Liu Y, Hu J J. Research on the overall design of integrated electronic information system for tanks and armored vehicles (in Chinese). *Acta Armament*, 2017, 38: 1192–1202 [毛明, 刘勇, 胡建军. 坦克装甲车辆综合电子信息系统的总体设计研究. *兵工学报*, 2017, 38: 1192–1202]
- Mao M, Xie F, Hu J J, et al. Analysis of workload of tank crew under the conditions of informatization. *Defence Tech*, 2014, 10: 17–21
- Mitchell D K. Workload Analysis of the Crew of the Abrams V2 Sep: Phase I Baseline IMPRINT Model. Technical Report. Adelphi, USA: Army Research Laboratory, 2010
- Nie J F, Liu W P, Liu X X, et al. Optimal selection of task allocation schemes for the multi-crew cabin based on mental workload prediction technology (in Chinese). *Trans Beijing Inst Tech*, 2017, 37: 30–36 [聂俊峰, 刘维平, 刘西侠, 等. 基于脑力负荷预测技术的多乘员舱任务分配方案优选方法. *北京理工大学学报*, 2017, 37: 30–36]
- Hassin R, Nathaniel A. Self-selected task allocation. *Manuf Serv Oper Manag*, 2021, 23: 1669–1682
- Zhang A, Ren W, Tang Z L, et al. Dynamic function allocation for cockpit based on CTL model and task performance (in Chinese). *Fire Control Command Control*, 2018, 43: 151–156 [张安, 任卫, 汤志荔, 等. 基于CTL模型和任务绩效的驾驶舱动态功能分配方法. *火力与指挥控制*, 2018, 43: 151–156]
- Fu Y Z, Guo J L. A dynamic method of man-machine system function allocation based on non-cooperative game theory (in Chinese). *Fire Control Command Control*, 2021, 46: 30–34 [付亚芝, 郭进利. 基于非合作博弈的动态人机系统功能分配法. *火力与指挥控制*, 2021, 46: 30–34]
- Du H. Research on man-machine function distribution allocation of high-speed train speed control task (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020 [杜昊. 高速列车速度控制任务的人机功能分配研究. 硕士学位论文. 北京: 北京交通大学, 2020]
- Atashfeshan N, Saidi-Mehrabad M, Razavi H. A novel dynamic function allocation method in human-machine systems focusing on trigger mechanism and allocation strategy. *Reliab Eng Syst Saf*, 2021, 207: 107337
- Gutzwiller R S, Lange D S, Reeder J, et al. Human-Computer Collaboration in Adaptive Supervisory Control and Function Allocation of Autonomous System Teams. Berlin: Springer International Publishing, 2015
- Bindewald J M, Miller M E, Peterson G L. A function-to-task process model for adaptive automation system design. *Int J Hum-Comput Studies*, 2014, 72: 822–834
- Zhang K W, Zhao X L, Li Z Z, et al. A review of multi-UAV reconnaissance mission assignment methods (in Chinese). *Electron Opt Control*, 2021, 28: 68–72, 82 [张可为, 赵晓林, 李宗哲, 等. 多无人机侦察任务分配方法研究综述. *电光与控制*, 2021, 28: 68–72, 82]
- Niu Y F, Liu J Y, Xiong J, et al. Research on guidance method of cooperative tracking ground multi-target using UAV group (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 403–422 [牛轶峰, 刘俊艺, 熊进, 等. 无人机群协同跟踪地面多目标导引方法研究. *中国科学: 技术科学*, 2020, 50: 403–422]
- Kong F S, Gao T Y, Li H M, et al. Research on human-robot joint task assignment considering task complexity (in Chinese). *J Mech Eng*, 2021, 57: 204–214 [孔繁森, 高天宇, 李惠敏, 等. 考虑任务复杂性的人机联合任务分配问题研究. *机械工程学报*, 2021, 57: 204–214]
- Tao X L, Zheng Y B. Multi-Agent task allocation method based on capability and mission requirement (in Chinese). *Comput Appl Softw*, 2012, 29: 181–184 [陶雪丽, 郑延斌. 基于能力及任务需求的多Agent任务分配方法. *计算机应用与软件*, 2012, 29: 181–184]
- Chen X, Mao Y C, Jie Q, et al. Related task scheduling algorithm based on task hierarchy and time constraint in cloud computing (in Chinese). *J Comput Appl*, 2014, 34: 3069–3072 [陈曦, 毛莺池, 接青, 等. 云计算中基于任务分层和时间约束的关联任务调度算法. *计算机应用*, 2014, 34: 3069–3072]
- Zhang Q, Niu W W, Xing C Z, et al. A scheduling algorithm of related tasks based on DAG graph in grid (in Chinese). *J Chin Comput Syst*, 2012, 33: 971–975 [张千, 牛伟伟, 邢常振, 等. 一种基于DAG图划分的网格关联任务调度算法. *小型微型计算机系统*, 2012, 33: 971–975]
- Zhang Q, Liu C. A migration algorithm of related tasks based on T-RAG graph in grid (in Chinese). *Microelectron Comput*, 2010, 27: 57–60, 65

- [张千, 刘昶. 网络环境下一种基于T-RAG图的关联任务迁移算法. *微电子学与计算机*, 2010, 27: 57–60, 65]
- 19 Ma J Q, Wang X C, Li J J. Research on list task scheduling technology by hierarchical sort (in Chinese). *J Commun*, 2018, 39: 6 [马金全, 王学成, 李建军. 分层排序的列表任务调度技术的研究. *通信学报*, 2018, 39: 6]
- 20 Du W W, Chen X W. Operational task hierarchical decomposition (in Chinese). *Acta Armament*, 2021, 42: 2771–2782 [杜伟伟, 陈小伟. 作战任务层次化分解方法. *兵工学报*, 2021, 42: 2771–2782]
- 21 Wang W, Liu F X. Operation task decomposition optimization based on cooperative correlation degree (in Chinese). *Fire Control Command Control*, 2017, 42: 107–110 [王伟, 刘付显. 基于协同相关度的作战任务分解优化. *火力与指挥控制*, 2017, 42: 107–110]
- 22 Jin H B, Zhu G L, Mu X M, et al. Research progress of situation awareness in aviation safety (in Chinese). *J Chongqing Jiaotong Univ (Nat Sci)*, 2019, 38: 6 [靳慧斌, 朱国蕾, 穆晓萌, 等. 航空安全领域的情境意识研究进展. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2019, 38: 6]
- 23 Liu W P, Nie J F, Liu X X. Cognitive modeling for crew's information processing based on multi-resource theory (in Chinese). *Acta Armament*, 2017, 38: 1215–1222 [刘维平, 聂俊峰, 刘西侠. 基于多资源理论的乘员信息处理作业认知行为建模研究. *兵工学报*, 2017, 38: 1215–1222]
- 24 Xiao X, Wanyan X, Zhuang D, et al. MWL prediction based on attentional resource allocation and information processing. *Bio-Med Mater Eng*, 2015, 26: S871–S879
- 25 Li X, Fang W N, Zhou Y W. Mental workload prediction model based on information entropy. *Comput Assisted Surg*, 2016, 21: 116–123
- 26 Zhang X, Qu X, Xue H, et al. Modeling pilot mental workload using information theory. *Aeronaut J*, 2019, 123: 828–839
- 27 Lu X, Wang T B, Wang X, et al. Study on quantitative evaluation model of surplus mental workload in flight task (in Chinese). *J Beijing Univ Aeronaut Astronaut*, 2023, 49: 1184–1192 [陆旭, 王天博, 王鑫, 等. 执飞任务中剩余脑力负荷量化评估模型研究. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49: 1184–1192]
- 28 Heiligers M, Holten T V, Mulder M. Factors that influence pilot task demand load during area navigation approaches. *J Aircraft*, 2011, 48: 975–994
- 29 Bedny G Z, Karwowski W, Bedny I S. Complexity evaluation of computer-based tasks. *Int J Hum-Comput Interaction*, 2012, 28: 236–257
- 30 Chen D K, Zhang X, Zhu M Y, et al. Comfort evaluation method of FTA-FBN for manned closed cabin (in Chinese). *J Harbin Inst Tech*, 2023, 55: 100 [陈登凯, 张献, 朱梦雅, 等. 载人密闭舱室FTA-FBN舒适度评估方法. *哈尔滨工业大学学报*, 2023, 55: 100]
- 31 Niu K, Fang W N, Guo B Y, et al. Cognitive work analysis in design of complex man-machine system: A review of theory, technology and research development (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2018, 48: 596–615 [牛可, 方卫宁, 郭北苑, 等. 复杂人机系统设计中认知工作分析理论、技术与应用研究进展. *中国科学: 技术科学*, 2018, 48: 596–615]
- 32 Rasmussen J. Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, 1983, SMC-13: 257–266

# Task assignment method of multicrew cooperative display control based on DAG and AHP-TOPSIS algorithm

LI XinYan<sup>1</sup>, CHU JianJie<sup>2</sup>, SU Jin<sup>1</sup> & LI FeiLong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China;

<sup>2</sup> Key Laboratory of Industrial Design and Ergonomics, Ministry of Industry and Information Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

In this study, we propose a multicrew cooperative display and control task dynamic allocation method based on a direct acyclic graph (DAG) and an analytic hierarchy process-technique for order preference by similarity to an ideal solution (AHP-TOPSIS) algorithm. Based on a list scheduling algorithm, the crew tasks are decomposed and divided into levels by tasks. Through breadth traversal, the tasks at each level are sorted and then assigned one by one. The AHP-TOPSIS algorithm is used to determine the best assignment object for a single task according to the mental load, personal ability, time cost, and task correlation of the crew, and then the crew status is updated in real time for the next task assignment until all the tasks are assigned. This method realizes reasonable allocation and dynamic adjustment for the crew cooperative display control tasks when the battlefield situation, combat tasks, and crew status change. It also resolves the issues of inefficiency and poor robustness in dealing with unexpected events under the original task allocation mechanism and can effectively improve the efficiency of multicrew cooperative combat.

**dynamic task allocation, multicrew cooperation, DAG decomposition, AHP-TOPSIS**

doi: [10.1360/SST-2022-0342](https://doi.org/10.1360/SST-2022-0342)