

Holonic – C2 组织决策分配及演化方法*

王 勋^{1,2}, 张杰勇², 万路军³, 焦志强²

(1. 国防科技大学 信息通信学院, 陕西 西安 710106;

2. 空军工程大学 信息与导航学院, 陕西 西安 710077; 3. 空军工程大学 空管领航学院, 陕西 西安 710051)

摘要: 为了有效发挥指挥控制(Command and Control, C2)组织集中式决策和协作式决策的决策优势, 对具有决策权限动态变化能力的 Holonic – C2 组织的决策分配问题进行研究。针对群决策中专家固定权重的主观性太强的缺点, 提出基于专家权威性和意见一致性相结合的专家组选择方法, 提高了决策分配过程中多属性决策的客观合理性; 针对决策分配的动态演化问题, 提出基于多阶段决策的决策模式演化机制, 在考虑属性前后阶段的变化的基础上, 给出相邻阶段决策模式跃迁方法。仿真结果表明, 所提方法能够给出相对客观的决策模式的优劣排序以及多阶段的演化路线, 从而证明了方法的可行性和有效性。

关键词: 决策分配; 指挥控制组织; 多属性决策; 一致性检验; 决策模式演化; Holonic

中图分类号: E072 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001 – 2486(2020)06 – 157 – 10

Holonic – C2 organization decision allocation and evolution method

WANG Xun^{1,2}, ZHANG Jieyong², WAN Lujun³, JIAO Zhiqiang²

(1. College of Information and Communication, National University of Defense Technology, Xi'an 710106, China;

2. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

3. Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to effectively play the decision-making advantage of C2 (command and control) organization's centralized decision-making and collaborative decision-making, the decision-making assignment problem of Holonic – C2 organization with dynamic ability of decision-making authority was studied. In view of the shortcomings of the subjectiveness of expert fixed weights in group decision making, an expert group selection method based on the combination of expert authority and opinion consistency was proposed. This method improves the objective rationality of multi-attribute decision making. In view of the dynamic evolution of decision allocation, a decision-making evolution mechanism based on multi-stage decision making was proposed. The change of attributes in the front and back stages was considered in this method, and the decision mode transition mode in the adjacent stage was given. The simulation results show that the proposed method can give the ranking of the relatively objective decision-making modes and the multi-stage evolutionary route, which proves the feasibility and effectiveness of the method.

Keywords: decision allocation; command and control organization; multiple attribute decision; consistency test; decision model evolution; Holonic

指挥控制(Command and Control, C2)组织是在作战使命驱动下, 各个作战资源实体通过各种关系有机关联而成的作战力量合理运用的组织^[1-3]。Holonic – C2 组织是一种组织关系弱耦合的、具有灵活决策方式的 C2 组织^[4-5]。

Holonic – C2 组织的决策分配旨在发挥组织集中与分布决策的优势, 将组织中决策单元的决策权限进行合理划分, 达到组织决策效能最优的目的。目前, 由于 C2 组织具备严格的层级指挥关系, 且下层单元的任何行为均要对上级负责, 集中式决策仍是 C2 组织不可或缺的决策方式。然

而, 权力边缘化的分布式决策是 C2 组织的重要发展方向。Alberts 指出^[6], 信息时代的指挥控制须由集中式向分布式过渡, 在网络中心战体系下, 战役级指挥控制向结构扁平化、权利边缘化方向发展, 以减少层级信息传递造成的时间延迟, 强化组织末端的自主性, 适应快速的作战节奏。Cares 指出^[7], 分布式指挥控制能够有效避免集中式指挥控制的“烟囱”结构, 通过建立分布式单元的协作关系, 可赋予各火力单元的自主决策能力, 发挥其敏捷适应能力, 增强体系作战的灵活性、适应性。唐苏妍等^[8]指出, 分布式无中心的网络化结

* 收稿日期: 2019 – 06 – 01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61573017, 61703425); 航空基金资助项目(20175796014)

作者简介: 王勋(1990—), 男, 山东临朐人, 讲师, 博士, E-mail: wxkgdxy@163.com

构将是防空导弹体系发展的必然趋势,针对防空导弹动态拦截联盟形成问题,其提出了基于集中式和分布式相结合的指挥控制方式,实现了网络化防空导弹体系整体效能的有效提升。为了将集中式与分布式决策相协调,并发挥各自的优势,本文对 Holonic - C2 组织决策分配问题展开研究,期望能够提供有效的决策分配机制,提高组织决策的灵活性。

Holonic - C2 组织决策分配方法属于多属性决策理论^[9-11]。邹启杰等^[12]通过多属性决策理论对未知环境下的无人系统自主等级进行了评估,实现了混合主动交互的可变自主等级确定方法;刘跃峰等^[13-14]对智能指挥控制系统的决策分配问题进行了研究,针对属性值无法准确测度的问题,采用不确定性语言型多属性决策方法确定人机系统决策功能的自动化等级;钟贇等^[15]对有人机与无人机协同作战过程中的决策分配问题进行了研究,针对属性值和专家建议的不确定性,提出了采用直觉模糊多属性决策方法确定决策等级;何大义等^[16]利用最小叉熵准则对主客观权重进行了集成,考虑了所有决策者的不同意见,提供了一种基于信息熵的可行权重集成方法;曾守楨等^[17]针对属性之间具有关联关系的直觉模糊多属性决策问题进行研究,提出了 Zhenyuan 积分平均算子,对属性之间的相互关系进行了全面度量,改进了直觉模糊多属性决策奇异积分算子的缺陷。现有的对决策分配问题的研究大多集中在人机系统的功能分配方面,通过相应的方法实现人与机器之间的权限分配,但对 C2 组织层面上下级的决策分配问题研究较少。本文在分析 Holonic - C2 组织决策结构的基础上提出了组织决策模式的划分方法,并针对多属性决策方法过于主观的缺陷,提出了基于群决策的多属性决策

理论进行求解,重点对专家权威度和意见一致性进行讨论,提高了决策分配的客观合理性。

1 Holonic - C2 组织的决策分配问题

1.1 决策分配的概念

Holonic - C2 组织是一种柔性组织,能够针对各类因素变化进行自主适应^[18]。这种自适应能力主要体现在其决策方式的动态变化上,Holonic - C2 组织的决策分配是将 C2 组织中的某些决策权限进行合理分配,发挥组织中不同决策主体的决策优势,使得 C2 组织具备与运行环境相适应的决策模式。

目前,按决策节点的不同,决策方式主要分为两类:集中式决策和分布式决策。在集中式决策方式下,区域指控中心集中负责区域内的侦察探测、态势评估、资源调度、应急管理等活动。在分布式决策方式下,各个前沿指挥机构自主或协同完成探测跟踪、威胁评估、目标分配、火力运用等活动^[19]。集中式和分布式决策的优缺点如表 1 所示。

对于战役级指挥控制而言,Holonic - C2 组织具有明确的层次结构,如图 1 所示。战术 Holon 的行为需对战役 Holon 整体使命任务的顺利完成负责。虽然 Holonic - C2 组织中战役决策 Holon 的某些决策权限逐步下放到了战术决策 Holon,但完全脱离战役决策 Holon 的决策是不可行的,因此,Holonic - C2 组织中的分布式决策更偏向于一种具有上下级交互的协作式决策。本文着重研究 Holonic - C2 组织的集中式与协作式决策之间的决策分配问题。如图 2 所示,集中式决策的决策主体在战役决策 Holon,战术决策 Holon 仅执行对平台的指挥控制;协作式决策的决策主体在战术决策 Holon,战役决策 Holon 提供冲突消解、共享信息服务。

表 1 集中式决策与分布式决策的优劣比较

Tab.1 Comparison between centralized and distributed decision making

决策方式	优点	缺点
集中式决策	1) 决策流程和关键算法复杂度不高,易于实现; 2) 具备全局信息,对资源调度等优化问题,有能力获得整体最优解; 3) 计算能力强,对复杂性任务具备较好的处理能力	1) 对中心节点与分布节点的通信质量要求较高; 2) 处理大规模问题时,决策的实时性不足; 3) 指控中心需实时掌控全面信息,需具备较强的信息处理能力; 4) 决策能力较集中,受损后代价较大
分布式决策	1) 能根据及时获得的信息快速做出反应,实时性好; 2) 信息传输节点较分散,通信的可靠性高; 3) 单个单元的损毁不会导致组织的整体瘫痪,鲁棒性强	1) 仅具备局部信息,优化问题无法获得全局最优解; 2) 对分布式节点之间的信息交互较为复杂

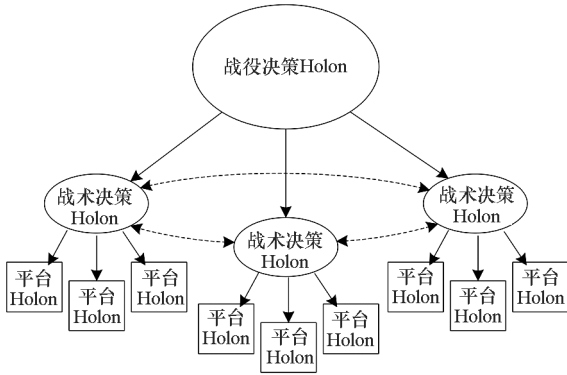
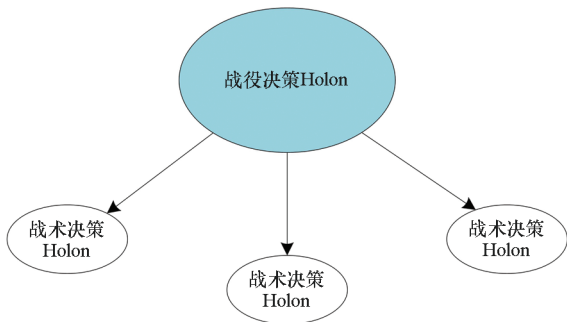
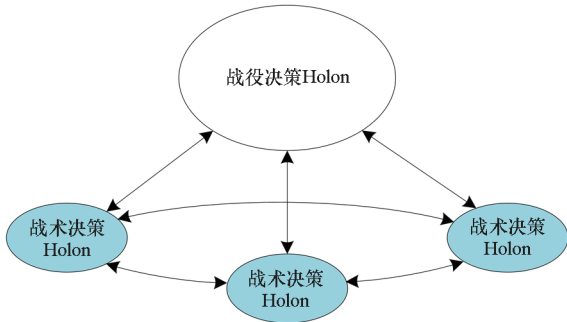


图 1 Holonic - C2 组织决策单元的层次结构
Fig. 1 Hierarchical structure of decision-making units in Holonic - C2 organization



(a) 集中式决策结构

(a) Centralized decision structure



(b) 协作式决策结构

(b) Collaborative decision structure

图 2 Holonic - C2 组织基本决策结构

Fig. 2 Decision structure of Holonic - C2 organization

1.2 决策分配的划分

对于 C2 组织而言,决策权限涉及的内容广泛,本文着重从资源调度计划的制定与调整角度出发,对决策权限分配问题进行研究。将决策权限分为计划制定权限和计划调整权限:计划制定权限是指 Holonic - C2 组织针对使命任务信息制定平台调度计划的权限;计划调整权限是指 Holonic - C2 组织为应对组织运行过程中出现的突发事件而对任务计划进行调整的权限。

结合集中式决策和协作式决策间决策方式的

不同,本文将 Holonic - C2 组织的决策分配划分为集中决策模式 (M_1)、混合类决策模式 (M_2 、 M_3)、协作决策模式 (M_4) 四种模式,决策模式集合表示为 $M = \{M_1, M_2, M_3, M_4\}$ 。集中决策模式是指 Holonic - C2 组织资源调度计划的制定与调整权限均集中于战役决策 Holon。协作决策模式是指 Holonic - C2 组织资源调度计划制定与调整权限均分布于各战术决策 Holon。混合类决策模式分为两种:一种是战役决策 Holon 拥有计划制定权限、各战术决策 Holon 拥有调整权限的决策模式(记为 M_2 模式);另一种是战术决策 Holon 拥有计划制定权限、战役决策 Holon 拥有调整权限的决策模式(记为 M_3 模式)。每一种决策模式均处于相应的属性空间内,如图 3 所示。

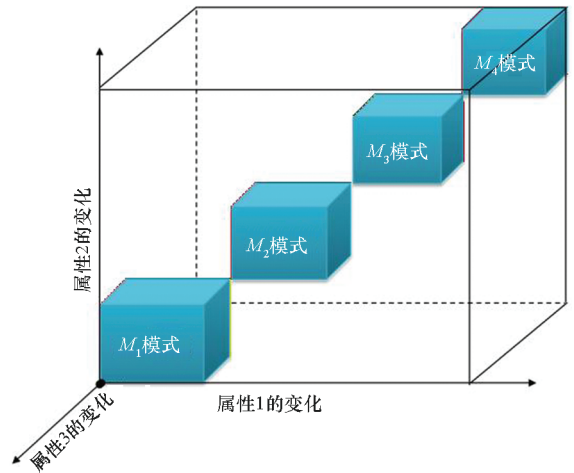


图 3 Holonic - C2 组织的决策模式划分

Fig. 3 Decision-making mode division of Holonic - C2 organization

1.3 影响决策分配的属性

1.3.1 属性的区间数表示

由于 Holonic - C2 组织运行环境的动态不确定,决策过程中涉及的元素复杂性、模糊性不断增强,基于实数的多属性决策通常不能有效表达 Holonic - C2 组织所面临的不确定性,因此,本文采用正闭区间来表达影响决策分配的属性模糊度,这种方法合理且符合人们的思维习惯,较容易被决策者接受。

区间数^[20]的基本定义如下:令 $\tilde{a} = [a^L, a^U] = \{x | a^L \leq x \leq a^U, a^L, a^U \in \mathbf{R}\}$ 表示实数轴上的闭区间,则 \tilde{a} 是一个区间数。若 $\tilde{a} = \{x | 0 \leq a^L \leq x \leq a^U \leq 1\}$,则 \tilde{a} 是一个归一化的区间数。为便于运算,本文采用归一化区间数来表征属性值的区间大小。

1.3.2 影响属性分析

Holonic - C2 组织的决策分配是一个系统性、复杂性的过程,影响决策分配的因素涉及范围极其广泛,需要在 Holonic - C2 组织充足运行经验的基础上系统地分析给出。本文仅从以下 5 个方面为例,分析影响 Holonic - C2 组织决策分配的属性。

1) 战役决策 Holon 的工作负担 (S_1): 战役决策 Holon 作为战役级指挥控制的最高决策单元,承担着对所有战术决策 Holon 以及平台的指挥控制,当前战役决策 Holon 的工作负担越大,则决策分配时决策权越倾向于战术决策 Holon。

2) 战役决策 Holon 与战术决策 Holon 之间通信的质量 (S_2): 战役决策 Holon 与战术决策 Holon 之间的通信质量越好,组织的决策权则越倾向于能获取全局最优的战役决策 Holon。

3) 战术级组织活跃度 (S_3): 指战术决策 Holon 和平台的作战状态,组织活跃度越低,则战术决策 Holon 需将更多的资源投入到自身活跃度的提升上,决策分配时决策权越倾向于战役决策 Holon。

4) 作战环境的不确定性 (S_4): 战役决策 Holon 拥有全局的掌控能力,能够应对环境中的任何不确定性,环境不确定程度越高,战役决策 Holon 相较于战术决策 Holon 的决策可靠性越好。

5) 使命任务的复杂度 (S_5): 战役决策 Holon 相较于战术决策 Holon 具有更强的任务处理能力,使命任务越复杂,战术决策 Holon 间协作决策的成本越高,决策分配时决策权越倾向于战役决策 Holon。

以上内容阐述了 5 种属性的变化与集中式、协作式决策方式倾向性关系,这种关系并不是绝对的,具体属性值与决策模式之间的对应关系由大量的实践经验给出。

2 基于多属性群决策的决策分配方法

2.1 决策模式判断矩阵

定义 1 决策模式判断矩阵是根据 Holonic - C2 组织大量实践经验给出的各个决策模式运行时最合适的属性值矩阵,主要用来表示决策模式与各属性之间的量化关系。假设有 I 种决策模式、 J 种属性,决策模式判断矩阵表示形式如式(1)所示。

$$P = M_i \begin{bmatrix} S_1 & \cdots & S_j & \cdots & S_J \\ \bar{s}_{i1} & \cdots & \bar{s}_{ij} & \cdots & \bar{s}_{iJ} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{s}_{i1} & \cdots & \bar{s}_{ij} & \cdots & \bar{s}_{iJ} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{s}_{i1} & \cdots & \bar{s}_{ij} & \cdots & \bar{s}_{iJ} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\bar{s}_{ij} = [s_{ij}^L, s_{ij}^U]$ 表示 M_i 决策模式下属性 S_j 的最优区间值, s_{ij}^L 为区间数的下限, s_{ij}^U 为区间数的上界。

2.2 决策矩阵的计算

定义 2 决策矩阵用来表征 Holonic - C2 组织运行过程中实际属性值与判断矩阵属性值之间的贴近程度,是判断应采取何种决策模式的直接依据,决策矩阵中的元素称为实际属性下的效用值,效用值越大,贴近程度越好。

定义 3 假设两个区间数分别为 $\bar{a} = [a^L, a^U]$ 和 $\bar{b} = [b^L, b^U]$, 区间数 \bar{a} 和 \bar{b} 的相离度^[21]如式(2)所示:

$$d(\bar{a}, \bar{b}) = \frac{|a^U - b^U| + |a^L - b^L|}{a^U - a^L + b^U - b^L} \quad (2)$$

本文用相离度来表征两个区间数之间的贴近程度,相离度越小则贴近程度越大,故区间数的相离度为成本型指标。为了能够直观表达决策矩阵的效用值,将其取负数转化为效益型指标表征属性效用值的大小,假设各个属性的实际值为 $\bar{s} = [\bar{s}_1^*, \dots, \bar{s}_j^*, \dots, \bar{s}_J^*]$, 决策模式判断矩阵为 P , 构建的决策矩阵如式(3)所示。

$$D = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1j} & \cdots & y_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{i1} & \cdots & y_{ij} & \cdots & y_{iJ} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & \cdots & y_{nj} & \cdots & y_{nJ} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $y_{ij} = -d(\bar{s}_j^*, \bar{s}_{ij})$ 为实际属性值 \bar{s}_j^* 在模式 M_i 下的效用值。

2.3 基于一致性检验的专家权重集结

Holonic - C2 组织决策分配的过程属于多属性决策内容,各个属性的权重由专家给出。多属性决策中专家赋权法虽然可解释性好,但也存在主观随意性过高的缺点^[22]。为了有效克服这一缺点,引入多位专家为属性赋权,利用群决策方法对属性权重进行集结,提高属性权重的客观准确性。为了避免不同专家意见分歧较大时,对各个专家给出的属性权重进行加权求和获得的折中结果可能背离所有专家想法的问题,本文在保证专

家组权威度的基础上,利用一致性检验方法,保留权威度高且一致性好的专家意见。

2.3.1 专家权威度矩阵

专家权威度是衡量专家组中各个专家给出的属性权重向量权威程度的指标。一般而言,专家的权威度由一维向量表示,但 Holonic - C2 组织的决策分配是一个系统性、综合性的问题,涉及的属性范围广泛且专业性较强,这就要求在选择咨询专家时,专家需具备综合的专业知识,而实际中的专家通常是在某一专业领域具有权威性,多数情况下很难以评判不同领域专家的权威性。因此,为了更加科学地评价专家的权威性,本文给出各个属性下专家的权威度向量以及专家权威度矩阵。

假设有 K 位专家,专家集合为 $Z = \{z_1, \dots, z_k, \dots, z_K\}$,在属性 S_j 方面各个专家的权威度向量表示为 $Q_j = [q_{j1}, \dots, q_{jk}, \dots, q_{jK}]$,其中 q_{jk} 为属性 S_j 方面专家 z_k 的权威度值, $q_{jk} \in [0, 1]$ 且 $\sum_{k=1}^K q_{jk} = 1$,专家权威度矩阵如式(4)所示。

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_j \\ \vdots \\ Q_J \end{bmatrix} = S_j \begin{bmatrix} q_{11} & \cdots & q_{1k} & \cdots & q_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{j1} & \cdots & q_{jk} & \cdots & q_{jK} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{J1} & \cdots & q_{Jk} & \cdots & q_{JK} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, K 为专家个数, J 为属性个数。

2.3.2 专家赋权的属性权重

专家 z_k 给出的各个属性的权重向量表示为 $W_k = [w_{k1}, \dots, w_{kj}, \dots, w_{kJ}]$,其中 w_{kj} 为专家 z_k 认为属性 S_j 的权重值,且 $\sum_{j=1}^J w_{kj} = 1$ 。所有专家给出的属性权重向量构成的属性权重矩阵如式(5)所示。

$$W = \begin{bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_k \\ \vdots \\ W_K \end{bmatrix} = z_k \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1j} & \cdots & w_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{k1} & \cdots & w_{kj} & \cdots & w_{kJ} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{K1} & \cdots & w_{Kj} & \cdots & w_{KJ} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.3.3 专家权重的集结

为了有效避免由于专家之间意见分歧过大可能造成的属性赋权不合理的问题,本文采用权威度评定和一致性检验的方法,从专家集合中找出权威度较高且一致性较好的部分专家,将这些专

家的意见作为属性赋权的依据。

专家集合 Z 中的所有元素个数为 K ,由 Z 中元素构成的子集个数为 2^K ,专家集合 Z 的所有子集构成的集合为 $E = \{e_1, \dots, e_\lambda, \dots, e_{2^K}, \forall e_\lambda \subseteq Z\}$,将集合 E 中的元素按权威度由大到小排序。

专家权重集结的步骤:

步骤 1:初始化参数, $\lambda = 1$ 。

步骤 2:专家组 $e_\lambda = \{z_{\lambda_1}, \dots, z_{\lambda_k}, \dots, z_{\lambda_\kappa}\}$,其中 κ 为 e_λ 中专家的数量,该组专家给出的属性权重矩阵如式(6)所示。

$$W = \begin{bmatrix} W_{\lambda_1} \\ \vdots \\ W_{\lambda_\kappa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{\lambda_1 1} & \cdots & w_{\lambda_1 j} & \cdots & w_{\lambda_1 J} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{\lambda_\kappa 1} & \cdots & w_{\lambda_\kappa j} & \cdots & w_{\lambda_\kappa J} \end{bmatrix} \quad (6)$$

将属性权重矩阵 W 中每一行转化为定序尺度的向量,即根据属性值的大小进行排序,矩阵 W 中的属性权重值替换为对应的序号,获得定序尺度矩阵 W' ,如式(7)所示。

$$W' = \begin{bmatrix} w'_{11} & \cdots & w'_{1j} & \cdots & w'_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w'_{\kappa 1} & \cdots & w'_{\kappa j} & \cdots & w'_{\kappa J} \end{bmatrix} \quad (7)$$

步骤 3:根据式(8)计算完全秩评定的 Kendall 协系数^[23](该系数越接近 1,意见的一致性越好)。

$$\omega = \frac{12 \sum_{j=1}^J R_j^2 - 3\kappa^2 J(J+1)^2}{\kappa^2 J(J^2 - 1)} \quad (8)$$

其中, R_j 为 κ 个专家给出的属性 S_j 的权重值序号之和。

步骤 4:判断 $\omega > \omega^*$ 是否成立(ω^* 为给定的阈值,大于该阈值则专家意见一致性较好),若是,转至步骤 5,否则,令 $\lambda = \lambda + 1$,转至步骤 2。

步骤 5:根据集合 e_λ 中的专家提供的数据确定各个属性的权重,属性 S_j 的权重计算公式如式(9)所示。

$$w_j = \sum_{k \in \{\lambda_1, \dots, \lambda_\kappa\}} q_k w_{kj} \quad (9)$$

其中,初次决策分配时, $q_k = \sum_{j=1}^J q_{jk}$,多阶段决策时根据主因属性选择权威度向量 Q_j ,具体会在第 3 节讨论。

2.4 决策模式综合效用的计算

根据计算的属性权重和决策矩阵,决策模式 M_i 的综合效用值计算方法如式(10)所示。

$$Y_i = \sum_{j=1}^J w_j \cdot y_{ij} \quad (10)$$

决策模式综合效用向量如式(11)所示。

$$Y = [Y_1, \dots, Y_i, \dots, Y_J] \quad (11)$$

2.5 Holonic - C2 组织决策分配流程

综上所述, Holonic - C2 组织初次决策分配步骤如下。

步骤 1: 参数初始化, 输入决策模式判断矩阵 P 、实际的属性值 \bar{s} 、专家权威度矩阵 Q 、专家给出的属性权重矩阵 W 。

步骤 2: 根据决策模式判断矩阵 P 和实际的属性值 \bar{s} 计算决策矩阵 D 。

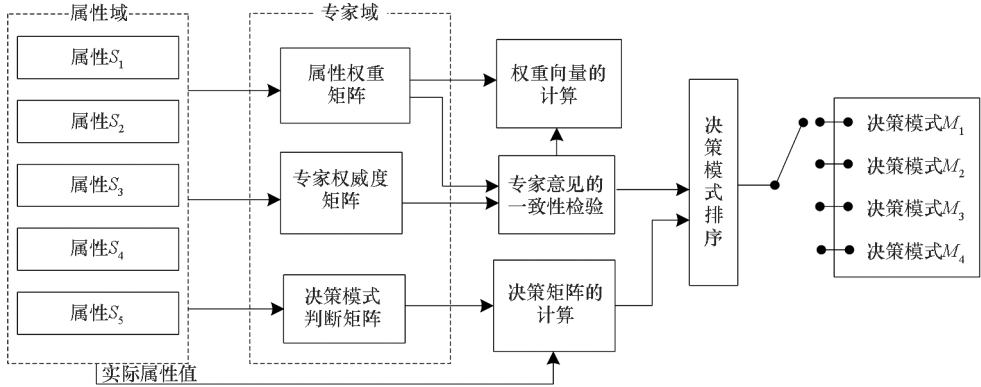


图 4 Holonic - C2 组织决策分配过程

Fig. 4 Decision allocation process of Holonic - C2 organization

3 Holonic - C2 组织决策分配动态演化

组织的运行环境是动态时变的, 各类属性值会随着作战过程的不断推进而发生较大幅度的波动, 因此, 为了充分发挥组织的决策效能, Holonic - C2 组织运行过程中的决策模式不会一成不变, 决策模式会随着影响属性的变化而动态跃迁。Holonic - C2 组织决策分配的动态演化是一个持续自主适应的过程, 组织需根据当前属性信息选择最优的决策模式, 因此, 本文采用多阶段决策方法对决策分配动态演化问题进行讨论。

专家权威度的计算应根据实际属性的变化幅度来确定各属性下权威度向量的权重, 属性的变化幅度越大, 则该属性下的专家权威度权重越大。本文利用区间数的相离度来表征实际属性值前后阶段的变化幅度, 然后加权计算各专家权威度向量的权重。假设前一阶段的实际属性值为 $\bar{s}_0 = \{\bar{s}_{01}^*, \dots, \bar{s}_{0j}^*, \dots, \bar{s}_{0J}^*\}$, 现阶段的实际属性值为 $\bar{s} = \{\bar{s}_1^*, \dots, \bar{s}_j^*, \dots, \bar{s}_J^*\}$, 根据式(2)计算获得的相离度向量为 $Ds = [d_1, \dots, d_j, \dots, d_J]$, $d_j = d(\bar{s}_{0j}^*, \bar{s}_j^*)$, 属性 S_j 下的专家权威度向量的权重如式(12)所示。

$$qs_j = d_j / \sum_{j=1}^J d_j \quad (12)$$

步骤 3: 根据专家权威度矩阵 Q 计算专家权威度均值向量, 根据专家权重集结方法计算各属性的权重。

步骤 4: 计算每一种决策模式的综合效用值, 获得决策模式综合效用向量 Y 。

步骤 5: 对综合效用值由大到小排序, 给出决策模式的优劣排序。

Holonic - C2 组织决策分配各模块流转关系如图 4 所示。

专家 z_k 的综合权威度向量 $q = [q_1, \dots, q_k, \dots, q_K]$, 其中,

$$q_k = \sum_{j=1}^J q_{jk} \cdot qs_j \quad (13)$$

Holonic - C2 组织决策分配动态演化过程如图 5 所示。组织不断监测阶段内各个属性信息, 通过属性值的变化判断决策分配演化的主要因素, 然后, 从专家权威度矩阵中选择主因属性下的权威度向量, 并执行决策分配过程, 最后确定当前最优决策模式。通过各个阶段决策模式的不断跃迁, 实现决策分配的动态演化, 如图 6 所示。

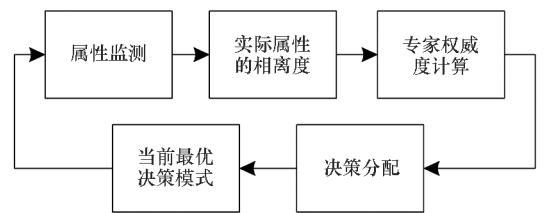


图 5 Holonic - C2 组织决策分配演化步骤

Fig. 5 Holonic - C2 organization decision allocation evolution steps

4 仿真实验

为了验证本文所提 Holonic - C2 组织决策分

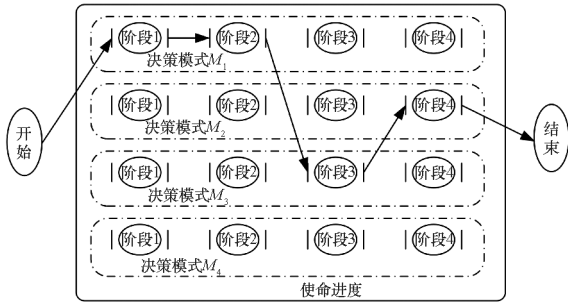


图 6 Holonic - C2 组织决策分配动态演化效果

Fig. 6 Holonic - C2 organization decision allocation dynamic evolution

配及演化算法的有效性,在 Inter (R) Core (TM) i3 - 4150 CPU 3.50 GHz 计算机上使用 MATLAB R2009a 进行仿真实验。

仿真实验的基本设定为: Holonic - C2 组织有 4 种决策模式 $M = \{M_1, M_2, M_3, M_4\}$, 考虑 5 种影响属性 $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ 、8 个专家 $Z = \{z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6, z_7, z_8\}$ 的属性权重意见。决策模式判断矩阵信息如表 2 所示, 各属性下的专家权威度信息如表 3 所示, 各位专家给出的属性权重矩阵信息如表 4 所示。

表 2 决策模式判断信息

Tab. 2 Decision mode judgment information

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
M_1	[0.00, 0.30]	[0.00, 0.30]	[0.00, 0.30]	[0.00, 0.30]	[0.00, 0.30]
M_2	[0.23, 0.53]	[0.47, 0.77]	[0.23, 0.53]	[0.47, 0.77]	[0.23, 0.53]
M_3	[0.47, 0.77]	[0.23, 0.53]	[0.47, 0.77]	[0.23, 0.53]	[0.47, 0.77]
M_4	[0.70, 1.00]	[0.70, 1.00]	[0.70, 1.00]	[0.70, 1.00]	[0.70, 1.00]

表 3 各属性下的专家权威度信息

Tab. 3 Expert authority information under each attribute

	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	z_7	z_8
S_1	0.189 6	0.037 1	0.273 7	0.124 7	0.067 4	0.145 3	0.118 6	0.043 5
S_2	0.005 7	0.038 1	0.250 7	0.018 6	0.122 2	0.247 3	0.219 1	0.098 3
S_3	0.256 4	0.045 8	0.007 3	0.145 6	0.058 1	0.277 9	0.127 6	0.081 4
S_4	0.126 1	0.159 4	0.248 6	0.080 9	0.000 8	0.081 6	0.161 3	0.141 5
S_5	0.165 0	0.085 4	0.058 8	0.193 9	0.253 3	0.195 5	0.041 3	0.006 8

表 4 各专家给出的属性权重信息

Tab. 4 Attribute weight information given by each expert

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
z_1	0.112 1	0.127 8	0.365 7	0.161 0	0.233 4
z_2	0.085 9	0.129 6	0.273 6	0.277 5	0.233 4
z_3	0.049 1	0.255 6	0.294 8	0.065 5	0.335 0
z_4	0.087 5	0.100 8	0.192 6	0.266 7	0.352 4
z_5	0.054 4	0.129 6	0.245 0	0.322 0	0.249 1
z_6	0.181 8	0.097 9	0.202 2	0.249 0	0.269 0
z_7	0.067 1	0.164 0	0.261 6	0.205 9	0.301 5
z_8	0.206 6	0.094 3	0.234 5	0.212 4	0.252 2

$[0.555 7, 0.603 6], [0.468 1, 0.743 1] \}$, Kendall 协和系数阈值 $\omega^* = 0.85$ 。

步骤 1: 根据式(2)、式(3)计算决策矩阵

$$D = \begin{bmatrix} -0.508 4 & -1.510 0 & -2.701 0 & -2.469 3 & -1.584 8 \\ -0.477 6 & -1.086 8 & -1.817 2 & -0.724 2 & -0.773 3 \\ -0.477 6 & -0.669 3 & -0.932 9 & -1.128 5 & -0.043 5 \\ -0.710 5 & -2.385 0 & -0.136 5 & -1.553 8 & -0.850 1 \end{bmatrix}$$

步骤 2: 经过一致性分析, 专家组 $\{z_1, z_4, z_6, z_7, z_8\}$ 的权威度较高且意见的一致性较好, 权威度为 0.658 7、Kendall 协和系数为 0.856 0, 专家组属性权重集结后获得的属性权重向量为 $w = [0.148 6, 0.073 1, 0.167 8, 0.112 7, 0.100 4, 0.189 5, 0.133 6, 0.074 3]$ 。

步骤 3: 计算各个决策模式的综合效用值为 $Y = [1.260 1, 0.675 5, 0.419 4, 0.650 2]$ 。

步骤 4: 对 Y 中的元素由大到小排序, 获得决策模式排序结果为

4.1 仿真实验 1

假设属性区间向量的实际值为 $\bar{s} = \{[0.017 7, 0.866 3], [0.391 7, 0.451 1], [0.749 0, 0.976 9],$

$$M_3 > M_4 > M_2 > M_1$$

从实验结果来看,在随机给出的属性区间内, M_3 模式下的效用值最大,因此,Holonic - C2 组织采用 M_3 模式会达到最好的决策效果,证明本文提出的决策分配算法能够获得有效的决策模式的排序。

4.2 仿真实验 2

为了验证方法的合理性,将表 2 中的决策模式判断信息作为当前属性实际值的输入,进行 4 次仿真实验,验证在各个模式最理想的属性区间下,利用本文所提的方法能否获得相应的最优决策模式,实验结果如表 5 所示。

从仿真实验的结果中可以看出,在 4 种决策模式的理想属性区间内,4 组实验的仿真结果均能获得与判断矩阵相一致的决策模式,由此证明了该决策分配方法在理想属性区间下的合理可行性。

4.3 仿真实验 3

目前对多属性决策方法的研究大多具有特定的应用场景,直接与其比较合理性不足,因此,本文与最典型通用的属性加权法^[24] 进行比较,验证本文所提方法的优越性。假设属性区间向量的实

际值为 $\tilde{s} = \{ [0.682\ 1, 0.773\ 9], [0.474\ 9, 0.502\ 3], [0.218\ 4, 0.975\ 7], [0.698\ 3, 0.897\ 2], [0.323\ 2, 0.881\ 9] \}$, Kendall 协和系数阈值 $\omega^* = 0.85$ 。属性加权法所用权值为表 3 和表 4 的均值。

利用本文所提方法获得的排序结果为:

$$M_4 > M_2 > M_3 > M_1$$

属性加权法获得的结果为:

$$M_2 > M_4 > M_3 > M_1$$

两种方法获得的结构排序基本相同,区别主要在前两位。将属性的实际值与判断矩阵的区间值相比较,属性 S_1 、 S_4 倾向于 M_4 模式,属性 S_2 倾向于 M_2 模式,属性 S_3 、 S_5 倾向性不明显,整体而言, M_4 模式略优于 M_2 模式,本文所提的方法获得的结果更加合理,避免了一些专家的主观因素对结果的影响,证明了所提方法的优越性。

4.4 仿真实验 4

为了验证决策分配演化方法的有效性,将 Holonic - C2 组织运行阶段划分为 10 个,每个阶段随机生成实际属性区间值,10 个阶段的实际属性信息如表 6 所示。

表 5 实际属性值为理想区间时的实验结果

Tab. 5 Experimental results when the actual attribute value is the ideal interval

实验序号	实际属性值					仿真结果
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	
仿真实验 I	[0.00,0.30]	[0.00,0.30]	[0.00,0.30]	[0.00,0.30]	[0.00,0.30]	$M_1 > M_2 > M_3 > M_4$
仿真实验 II	[0.23,0.53]	[0.47,0.77]	[0.23,0.53]	[0.47,0.77]	[0.23,0.53]	$M_2 > M_3 > M_1 > M_4$
仿真实验 III	[0.47,0.77]	[0.23,0.53]	[0.47,0.77]	[0.23,0.53]	[0.47,0.77]	$M_3 > M_2 > M_4 > M_1$
仿真实验 IV	[0.70,1.00]	[0.70,1.00]	[0.70,1.00]	[0.70,1.00]	[0.70,1.00]	$M_4 > M_3 > M_2 > M_1$

表 6 10 个阶段的实际属性区间值

Tab. 6 Actual attribute interval value of 10 stages

阶段	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
1	[0.000 0,0.300 0]	[0.000 0,0.300 0]	[0.000 0,0.230 0]	[0.000 0,0.300 0]	[0.000 0,0.300 0]
2	[0.463 8,0.909 9]	[0.591 8,0.646 6]	[0.855 8,0.864 5]	[0.650 1,0.679 6]	[0.360 1,0.465 0]
3	[0.291 8,0.395 6]	[0.271 6,0.731 3]	[0.010 5,0.860 8]	[0.485 9,0.986 7]	[0.085 8,0.607 7]
4	[0.897 2,0.947 7]	[0.498 2,0.533 8]	[0.463 9,0.939 8]	[0.297 6,0.343 0]	[0.387 0,0.654 4]
5	[0.744 0,0.982 4]	[0.355 1,0.478 1]	[0.552 1,0.667 9]	[0.736 8,0.973 1]	[0.797 6,0.917 7]
6	[0.453 5,0.701 5]	[0.551 5,0.743 4]	[0.737 5,0.991 1]	[0.478 7,0.801 9]	[0.181 9,0.750 8]
7	[0.648 1,0.845 9]	[0.312 2,0.790 1]	[0.465 3,0.693 3]	[0.501 0,0.918 3]	[0.140 8,0.769 2]
8	[0.324 0,0.614 9]	[0.408 8,0.818 9]	[0.347 8,0.964 3]	[0.698 0,0.934 8]	[0.660 8,0.900 1]
9	[0.098 4,0.304 6]	[0.350 9,0.892 4]	[0.531 8,0.539 1]	[0.413 4,0.920 1]	[0.045 3,0.119 8]
10	[0.602 1,0.869 2]	[0.450 2,0.779 8]	[0.196 2,0.241 2]	[0.514 5,0.541 8]	[0.110 0,0.245 7]

10个阶段决策分配演化阶段的专家组如表7所示,在不同的阶段从专家集合中选择的专家组是不同的,每个阶段选择了权威度较高、一致性较好的专家意见,这在一定程度上可以避免固定的专家组主观性太强的缺点,提高了决策分配的客观准确性。

表7 10个阶段中经过一致性检验的专家组

Tab.7 Expert group with consistency check in 10 stages

阶段	专家组
1	$\{z_1, z_4, z_6, z_7, z_8\}$
2	$\{z_1, z_4, z_6, z_7, z_8\}$
3	$\{z_1, z_4, z_6, z_7, z_8\}$
4	$\{z_1, z_3, z_4, z_7\}$
5	$\{z_1, z_4, z_6, z_7, z_8\}$
6	$\{z_1, z_4, z_6, z_7, z_8\}$
7	$\{z_1, z_4, z_6, z_7, z_8\}$
8	$\{z_1, z_4, z_6, z_7, z_8\}$
9	$\{z_4, z_5, z_6, z_7, z_8\}$
10	$\{z_1, z_4, z_6, z_7, z_8\}$

10个阶段的决策模式演化结果如图7所示。Holonic - C2 组织的决策模式随着运行阶段的变化而不断自适应调整,能够获得与当前阶段相匹配的决策模式,说明该决策分配的动态演化方法有效可行。

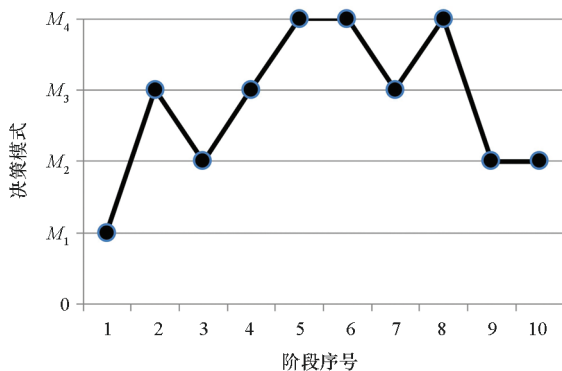


图7 决策模式演化图

Fig.7 Decision mode evolution map

5 结论

针对 Holonic - C2 组织决策分配问题,利用基于群决策的多属性决策方法进行了研究:针对专家权重主观性太强的缺点,提出了权威度优先、一致性检验的专家组动态选择方法和属性权重的集结方法,提高了决策分配的客观合理性;针对决

策分配的动态演化问题,利用多阶段决策方法进行了研究,考虑了前后阶段实际属性的变化情况,给出了各专家权威度向量的权重计算方法,最终获得多个阶段决策模式的演化路线。仿真实验表明,该多属性决策方法能够根据当前实际属性值对决策模式进行有优劣排序,决策模式的动态演化方法能够有效获得各个阶段最佳的决策模式。

本文提出的决策分配算法也存在一些局限性:首先,本文的动态演化过程是基于前一阶段先验知识对后一阶段进行的决策分配,这种分配方式存在一定的滞后性,采用概率估计方法预测下一阶段的属性值区间可以解决滞后性的问题,但也存在实际属性值预测方法的准确性问题;其次,该方法适用于专家人数较少的一般情况,专家数量过多时构建的专家组集合会出现组合爆炸问题,需采用优化的方法进行求解。

参考文献 (References)

- [1] 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.
YANG Dongsheng, ZHANG Weiming, LIU Zhong, et al. Designing of command and control organization[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [2] 牟亮,张维明,修保新,等. 基于滚动时域的C2组织决策层结构动态适应性优化[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(1): 125 - 131.
MU Liang, ZHANG Weiming, XIU Baoxin, et al. C2 organization decision-layer structure dynamic adaptive optimization based on rolling horizon procedure[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(1): 125 - 131. (in Chinese)
- [3] 乔士东,黄金才,修保新,等. 基于NSGA - II多目标优化的C2组织设计[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(5): 64 - 69.
QIAO Shidong, HUANG Jincai, XIU Baoxin, et al. Organizational design of C2 by NSGA - II multi-objective optimization algorithm[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(5): 64 - 69. (in Chinese)
- [4] Wang X, Yao P Y, Zhang J Y, et al. Dynamic resource scheduling for C2 organizations based on multi-objective optimization[J]. IEEE Access, 2019, 7: 64614 - 64626.
- [5] Wang X, Zhang J Y, Wan L J, et al. Holonic - C2 organization structure generation method based on clustering optimization algorithms[J]. IEEE Access, 2019, 7: 118459 - 118471.
- [6] Alberts D S. Power to the edge: command and control in the information age[M]. Washington: CCRP Press, 2003.
- [7] Cares J. Distributed networked operations: the foundations of network centric warfare[M]. Newport: Alidade Press, 2005.
- [8] 唐苏妍,朱一凡,李群,等. 多Agent系统任务分配方法综述[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(10): 2155 - 2161.
TANG Suyan, ZHU Yifan, LI Qun, et al. Survey of task allocation in multi Agent systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(10): 2155 - 2161. (in Chinese)

- [9] Zanakis S H, Solomon A, Wishart N, et al. Multi-attribute decision making: a simulation comparison of select methods[J]. *European Journal of Operational Research*, 1998, 107(3): 507 - 529.
- [10] Siregar D, Nurdianto H, Sriadhi S, et al. Multi-attribute decision making with VIKOR method for any purpose decision[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1019(1): 12 - 34.
- [11] 刘靖旭, 谭跃进, 蔡怀平. 多属性决策中的线性组合赋权方法研究[J]. *国防科技大学学报*, 2005, 27(4): 121 - 124.
LIU Jingxu, TAN Yuejin, CAI Huaiping. The study of the methods of the linear combination weighting for multiple attribute decision-making[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2005, 27(4): 121 - 124. (in Chinese)
- [12] 邹豪杰, 张汝波, 唐平鹏, 等. 基于多属性决策的自主等级评估算法[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(增刊 II): 382 - 384.
ZOU Qijie, ZHANG Rubo, TANG Pingpeng, et al. Evaluation algorithm for autonomy level based on multi-attribute decision making[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition)*, 2011, 39(Suppl. II): 382 - 384. (in Chinese)
- [13] 刘跃峰, 陈哨东, 孔繁峨. 基于 ULMADM 的智能指挥控制系统决策分配方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(5): 1339 - 1344.
LIU Yuefeng, CHEN Shaodong, KONG Fane. Decision allocation method of intelligent command and control system based on ULMADM[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2014, 34(5): 1339 - 1344. (in Chinese)
- [14] 陈晓栋, 刘跃峰, 陈哨东. 有人/无人机编队指挥控制系统决策分配[J]. *电光与控制*, 2013, 20(5): 31 - 36.
CHEN Xiaodong, LIU Yuefeng, CHEN Shaodong. Decision allocation of manned/unmanned aerial vehicle formation command and control system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2013, 20(5): 31 - 36. (in Chinese)
- [15] 钟赞, 姚佩阳, 孙昱. 有人机/UCAV 编队协同作战决策分配方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(11): 2984 - 2992.
ZHONG Yun, YAO Peiyang, SUN Yu. Decision-making allocation method in manned/unmanned combat aerial vehicle cooperative engagement[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2016, 36(11): 2984 - 2992. (in Chinese)
- [16] 何大义, 陈小玲, 许加强. 多属性群决策问题中基于最小熵的权重集成方法[J]. *控制与决策*, 2017, 32(2): 378 - 384.
HE Dayi, CHEN Xiaoling, XU Jiaqiang. Weight aggregation method based on principle of minimum cross-entropy in multiple attribute group decision-making [J]. *Control and Decision*, 2017, 32(2): 378 - 384. (in Chinese)
- [17] 曾守桢, 穆志民. 基于 Zhenyuan 积分的直觉模糊多属性决策方法[J]. *控制与决策*, 2018, 33(3): 542 - 548.
ZENG Shouzheng, MU Zhimin. Method based on Zhenyuan integral for intuitionistic fuzzy multiple attribute decision making [J]. *Control and Decision*, 2018, 33(3): 542 - 548. (in Chinese)
- [18] Wang X, Yao P Y, Zhang J Y, et al. Distributed tasks-platforms scheduling method to Holonic - C2 organization[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2019, 30(1): 110 - 120.
- [19] 唐苏妍. 网络化防空导弹体系动态拦截联盟形成机制与方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
TANG Suyan. Research on dynamic interception coalition formation mechanism and method in networked air defense missile systems [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [20] 刘秀梅, 赵克勤. 区间数决策集对分析[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
LIU Xiumei, ZHAO Keqin. Interval number decision set pair analysis[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [21] 杨春玲, 张传芳, 许文翠. 基于区间数贴近度的不确定多属性决策模型[J]. *数学的实践与认识*, 2010, 40(21): 148 - 154.
YANG Chunling, ZHANG Chuanfang, XU Wencui. A model based on similarity degree of interval number for uncertain multi-attribute decision-making[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2010, 40(21): 148 - 154. (in Chinese)
- [22] 孙昱, 姚佩阳, 万路军, 等. 基于权重集结和相对优势关系的多属性决策方法[J]. *控制与决策*, 2017, 32(2): 317 - 322.
SUN Yu, YAO Peiyang, WAN Lujun, et al. Multiple attribute decision making method based on weights aggregation and relative dominance relation [J]. *Control and Decision*, 2017, 32(2): 317 - 322. (in Chinese)
- [23] 易丹辉, 董寒青. 非参数统计: 方法与应用[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
YI Danhui, DONG Hanqing. Nonparametric statistics: methods and applications [M]. Beijing: China Statistics Press, 2009. (in Chinese)
- [24] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
YUE Chaoyuan. Decision theory and method [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)