

基于 MAS 和 FS 的多任务舰船作战效能评估方法

刘 旸¹, 孟 梅¹, 张 恒², 姚 军¹

(1. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 150001 哈尔滨; 2. 海军装备研究院, 100061 北京)

摘 要: 为解决舰船作战效能评估中评估任务多样化和度量指标间耦合关系问题, 提出一种基于多智能体系统 (multi-agent system, MAS) 的舰船综合作战效能评估方法. 该方法首先设计了一种能有效处理评估指标间耦合关系的复杂体系效能度量模型, 并在此基础上建立了舰船作战效能评估的分层递阶控制模型. 采用船舶工程分解结构 (SWBS) 理论建立了舰船评估任务分解机制, 提高了任务需求能力向量的准确性. 应用模糊集合论 (fuzzy set, FS) 解决了多任务联邦的并行生成问题, 针对评估任务建立柔性评估系统. 提出无偏好的联邦成员效用分配方法, 保证了指标权重获取的客观性. 算例分析验证了该方法求解舰船作战效能评估问题的可行性和有效性.

关键词: 舰船作战效能; 多智能体系统; 模糊集合论; 合同网协议; 船舶工程分解结构

中图分类号: U674. 7; U662. 3; O144; O213

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)02-0121-08

Effectiveness evaluation method of naval ship oriented to multi-mission base on MAS and FS

LIU Yang¹, MENG Mei¹, ZHANG Heng², YAO Jun¹

(1. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China;

2. Naval Academy of Armament, 100061 Beijing, China)

Abstract: To solve the problems of building diversity evaluation system for different task and coupling relationship between different measurement indexes, a multi-agent evaluation frame work about effectiveness of naval ship was proposed. The method of model construction about measure of effectiveness of complex system was presented firstly, which can deal with the problem of the coupling relationship between different targets. Then Hierarchical control model was built based on that model. Task breakdown mechanism based on ship work breakdown structure (SWBS) and application of fuzzy set theory to solve the issue of multi-task coalition parallel generation was presented. Agent which had the strongest ability was chosen to compose temporary federate. Utility allocation of federate software without preferences to evaluation effectiveness of naval ship was presented. The weight of index by the method was objective. At last the paper proved the feasibility and effectiveness of the method.

Keywords: force effectiveness of naval ship; MAS; fuzzy set; CNP; SWBS

舰船的综合作战能力是现代海战中决定战争胜负、敌我优势的关键因素, 也是衡量各类舰船及其装备性能优劣的综合性、整体性指标, 同时也是舰船战斗使用、设计论证和发展规划的主要性能

指标^[1]. 因此对舰船综合作战效能评估论证的客观性和准确性至关重要. 舰船的作战系统是由众多舰载武器及其配套设施组成的复杂体系, 其通过相互配合来完成作战任务. 在完成一项作战任务时需要调动多个武器系统, 而某个武器或武器系统可参与完成多项作战任务. 因此, 舰船作战系统中存在复杂的耦合关系, 舰船作战效能评估即是一个针对复杂体系效能的综合评估. 目前业界较为认同的系统效能定义是美国工业界武器效能

收稿日期: 2013-03-09.

基金项目: 国防科学技术工业委员会基础研究基金资助项目 (J010712042).

作者简介: 刘 旸 (1978—), 女, 讲师, 博士研究生;

孟 梅 (1961—), 女, 教授, 博士生导师.

通信作者: 刘 旸, qingtianrji@126.com.

咨询委员会(WSEIAC)对系统效能的定义:“系统效能是预期一个系统能满足一组特定任务要求的程度的度量,是系统的有效性、可信赖性和能力的函数”^[2].对多个系统交织在一起的复杂体系(complex system of systems, CSoS)进行效能评估是较为困难的,需要合理地解决以下问题:1)选择有效的效能度量指标筛选方法,以保障得到足够代表性、稳定性和敏感性的度量指标,对真实系统的反映能力强,且尽量减少人为偏好.2)度量指标中既有定性指标又有定量指标,确定的度量体系能够很好地解决指标间的不可公度性和耦合性,且合理确定层次关系和体系结构.3)根据效能评估的对象和方法,选取度量指标的权重确定方法,该方法应具有可操作性强、稳定性好、人为偏好小等特点.

在多任务舰船作战效能评估系统中,评估任务(对象)的多样性、效能指标需求的不确定性、复杂体系指标间的耦合关联性,以及评价过程的层次结构复杂性,是造成多任务复杂体系效能度量困难的主要原因.传统效能评估方法是一种假设评价指标不存在关联关系的刚性系统^[3-5],且具有一定偏好性,很难适应多目标多属性多层次多耦合的复杂系统多角度的效能评估要求.针对复杂系统效能评估问题应用 MAS 理论建立多任务评估框架模型的研究还未见报道.本文应用 MAS 和 FS 理论模拟评估过程中针对不同评估任务完成效能评价体系的生成过程和计算分析过程,应用 Agent 模拟系统中的信息资源和逻辑资源,通过模糊集算法将适合本次评估任务的 Agent 挑选出来,通过通信协议将其协调起来共同完成解构效能度量指标耦合关系、生成柔性评估体系并求解的过程,提高了评估效率和适用性.

1 复杂体系效能度量模型

求解复杂体系的效能评估问题,首先应对复杂体系进行抽象建模分析,继而建立复杂体系效能度量模型.模型建立的正确与否是体系效能评估结果准确度高低的因素.目前较常用的系统效能评估模型如图 1 所示,这种方法简单实用,在处理简单系统或体系中的底层指标效能度量是适合的,针对复杂体系的效能度量则存在很大弊端.例如,某舰艇指挥系统由 C³I 升级到 C⁴ISR 后,从实战经验中可知对空、反潜、反水面、多情报等多种作战能力均得到提升,而传统的评估模型很难准确反映指标具有耦合关系的系统(体系)效能评估.

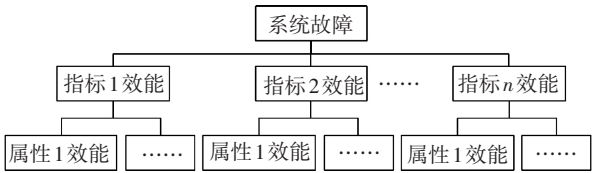


图 1 传统效能评估模型

以系统为分析对象,充分考虑复杂体系效能度量间的耦合关系问题,利用效能度量间的关联关系逐层分解,直至分解出能够独立影响度量指标的变量.这时的复杂体系综合效能 E_{OMOS} 可以看作是基于性能度量 MOP、性能值 VOP 和权重因子 w 的线性函数^[6],即

$$E_{OMOS} = g[V_{VOP_i}(M_{MOP_i})] = \sum_i w_i V_{VOP_i}(M_{MOP_i}). \quad (1)$$

如图 2 所示,可将复杂体系效能评估框架分为 5 层^[7-9]:第 1 层为复杂体系效能度量(measure of system of systems, MOS)层,对应于舰船作战综合效能(measures of force effectiveness, MOFE_s),指在某种作战环境中任务完成的程度.第 2 层为系统效能度量(measures of effectiveness, MOE_s)层,是系统完成其功能程度的定量化描述,对应于舰船作战效能体系表现为完成某项作战任务能力,如编队护航、独立作战等.第 3 层为子系统效能度量(measures of performance, MOP_s)层,是系统行为属性的定量化描述,或系统单个因素或属性对于整体能力贡献的数量化描述,对应于体系中子系统效能的度量,如对空作战能力、反潜作战能力等.第 4 层为子系统性能度量层,即系统参数(dimensional parameter, DP)层,表示系统固有的属性或特征,对应于影响子系统效能的性能设计变量,包括舰船各武器系统,如通信指挥控制系统、导弹发射装置等.第 5 层为变量参数(variables parameter, VP)层,表示影响子系统变量的参数指标,对应于影响舰船各武器系统效能的参数.根据体系的复杂程度,单项效能度量层可以有多层,直至分解到能够表征系统性能的原始数据层,它们最终决定着体系的属性或特征.

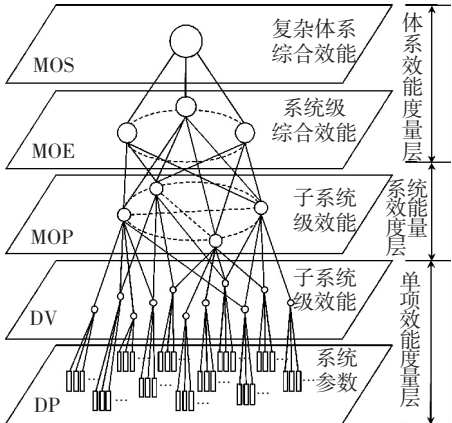


图 2 复杂体系效能度量层级模型

2 基于MAS的舰船作战效能评估方法

2.1 面向任务的舰船作战效能评估流程

考虑到不同类型舰船的作战体系组成和性能差别较大,效能度量指标也不尽相同,根据复杂体系效能评估建模方法,提出建立如图3所示的3级协商效能评估流程,将舰船作战效能评估分为评估任务分析、指标体系创建、效能计算与分析3个阶段^[10-11].第1阶段完成评估任务的分解、分析;第2阶段解决不同类型舰船效能度量指标选取问题;第3阶段完成舰船评价任务.

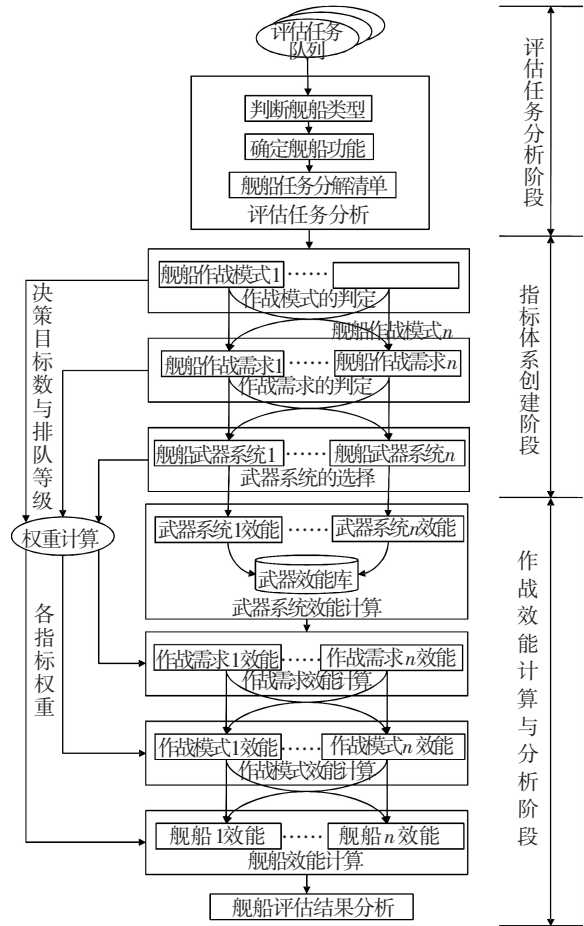


图3 面向任务的舰船作战效能评估流程

2.2 Agent分类与功能设计

基于MAS理论的多任务舰船作战效能柔性评估系统主要由5类Agent组成,包括任务管理、控制、联邦协调、成员、权重,如表1所示.

2.3 Agent结构设计

根据表1中不同Agent的功能分工,设计了两种Agent结构:改进慎思型Agent和改进反应型Agent,如图4、5所示.在传统慎思型和反应型Agent结构中增加了操作者对MAS系统运作人工干预的可能性,便于对系统运行过程的观察和控制及数据库的更新和管理.其中任务管理Agent、控制Agent、协调Agent作为管理者,属于慎思型

Agent;成员Agent、权重Agent属于反应型Agent.

表1 Agent类型与功能

Agent 类型	交互对象	功能
任务管理	控制 Agent	舰船评估任务的制定、分解与分配
控制	任务管理 Agent、联邦协调 Agent	控制和监督一组舰船评估任务的具体实施
联邦协调	任务管理 Agent、控制 Agent、成员 Agent	负责本联邦内的 Agent 协调,将协调结果传递给控制 Agent.有模式协调 Agent、需求协调 Agent、武器协调 Agent 3 类
成员	联邦协调 Agent	完成联邦协调 Agent 指派的任务.一个成员 Agent 即是一个评价指标
权重	控制 Agent、联邦协调 Agent	按照控制 Agent 传递来的各联邦内部决策目标数和排队等级赋予各联邦协调 Agent 相应的权重值

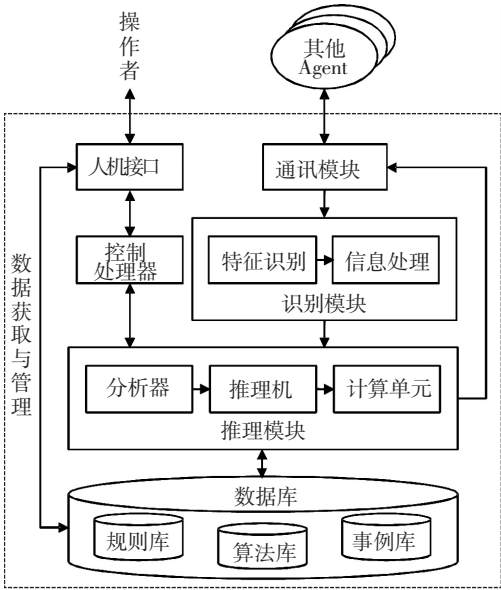


图4 改进慎思型 Agent

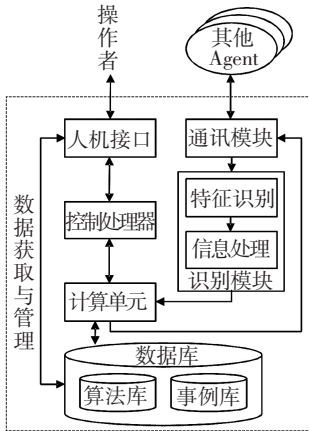


图5 改进反应型 Agent

2.4 基于 MAS 的效能评估分层递控模型

通过分析复杂体系效能度量层级模型和面向任务的舰船作战效能评估流程,提出并建立如图 6 所示的基于 MAS 理论的多任务舰船作战效能评估系统的分层递阶控制模型.模型将 MAS 分布式运算结构间的运作关系进一步明确,按照层级递进方式进行了划分,建立了分布式的 4 层递阶结构,分别为输入层、模式层、需求层和资源层.每层有 1 个控制 Agent,最上层控制 Agent 为总控 Agent,处于整个系统的中心控制与管理地位,通过全局协商策略来处理全局计划和协调任务.下 3 层控制 Agent 为联邦协调 Agent,除接受控制 Agent 的调控外,主要负责本层(本联邦)内的各成员 Agent 调控,通过局部协商策略与控制 Agent 共同完成各评估任务的效能计算需求.

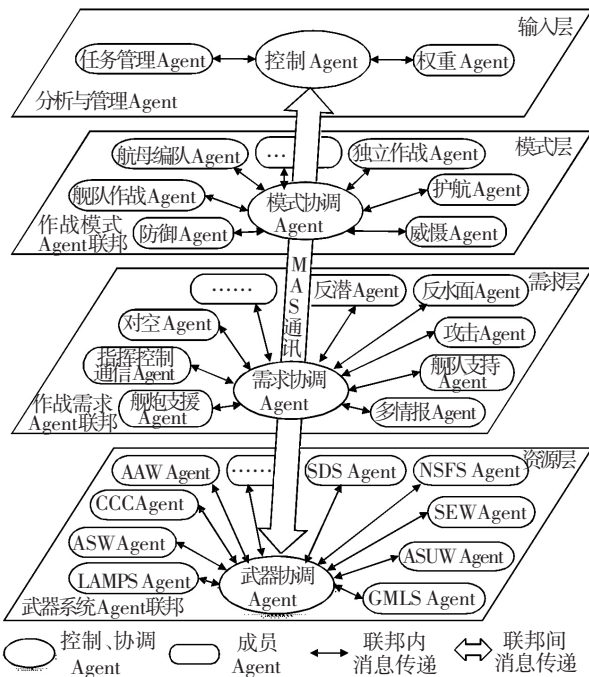


图 6 舰船作战效能评估系统分层递控模型

2.5 基于合同网协商机制的多 Agent 交互模型

合同网(contract network protocol, CNP)协商机制通过模拟人类社会活动中合同建立的过程来协商分布式系统的工作情况.合同网由 3 类节点组成:招标者、投标者、合同者.招标者是负责把任务分配给其他 Agent 的 Agent;投标者是具备一定完成任务能力的 Agent;合同者是评审通过后中标的投标者,它们独立或合作完成任务.设复杂体系效能评估协商模型为<控制 Agent 集,协商 Agent 集,任务集,协商机制,行为集>.控制 Agent 集包括全局和局部协调 Agent,负责全局规划、解决任务和 Agent 筛选,是协商的核心部分;协商 Agent 集是解决任务的 Agent 集合;任务集是需要进行

协商的子任务集合;协商机制是采用的协商规范,文中采用 CNP 协商机制来解决多任务舰船评估系统中多 Agent 协作问题;行为集是各 Agent 协商采用的行为规范,如招标、投标、中标、拒绝等.

多任务舰船作战效能评估过程实际上是各 Agent 间依靠分布运算和共同协商完成的临时联邦生成和成员效用分配的过程.在该系统中,多 Agent 间协商过程可分为全局主控协商和局部自主协商二级协商.全局协商发生在任务管理 Agent、控制 Agent 和联邦协调 Agent 之间,局部协商发生在各联邦协调 Agent 内部.

全局协调过程如下:1)在控制 Agent 的控制下任务管理 Agent 将子任务分配给相应的联邦协调 Agent;2)作战模式 Agent 联邦根据任务需求建立临时联邦;将临时联邦成员数量和排队等级报告给控制 Agent;3)作战需求 Agent 联邦根据任务需求建立临时联邦;将临时联邦成员数量和排队等级报告给控制 Agent;4)控制 Agent 将作战需求 Agent 联邦与相应的作战模式联邦成员 Agent 建立关联;5)武器系统 Agent 联邦根据任务需求建立临时联邦;将临时联邦成员数量和排队等级报告给控制 Agent;6)控制 Agent 将武器系统 Agent 联邦与相应的作战需求联邦成员 Agent 建立关联;7)控制 Agent 将各临时联邦成员数量和排队等级传递给权重 Agent,权重 Agent 计算后权重值传递给各临时联邦;8)临时联邦成员依次完成各自计算任务,将返回值传递给上层联邦协调 Agent,模式协调 Agent 将评估结果返回给控制 Agent;9)控制 Agent 向任务管理 Agent 发出任务结束信息,此评估任务消解.

联邦内局部协调过程如下:1)联邦协调 Agent 根据接收控制 Agent 传递来的子任务向本联邦内所有成员 Agent 发出招标信息;2)本联邦内成员 Agent 具备解决此任务能力的 Agent 返回投标信息,不具备解决此任务能力的 Agent 返回拒绝信息;3)联邦协调 Agent 对投标的成员 Agent 进行资格审查,能力强者中标,组成临时联邦;4)将中标的 Agent 数量和按能力高低将排序结果报告给控制 Agent;5)联邦协调 Agent 接收控制 Agent 传递来的权重值和临时联邦成员返回值完成控制 Agent 分配给联邦的任务.

3 基于 FS 的智能评估模型

不同类型的舰船由于作战需求和研制目标不同,其功能、作战能力相差较大.不同类型舰船作战效能评估体系应与其舰船自身功能相适应.上述问

题可以转化为针对一个评估任务,联邦协调 Agent 根据控制 Agent 发送来的子任务序列对具有解决该任务能力的本辖区各 Agent 进行考核,考核通过的各 Agent 组成临时联邦,任务完成后解散.考核标准是选出最少完成任务能力较强的 Agent 组成临时联邦,反对选用数量多而能力弱的 Agent 组成临时联邦,且允许单个 Agent 组成联邦和参加多个联邦.应用基于模糊集合论(fuzzy set, FS)^[12]的多任务联邦并行生成方法解决以上问题.

3.1 联邦生成的成员考核策略

步骤 1 建立任务能力需求矩阵. 设有任务集 $\{T_1, T_2, \dots, T_m\}$, 每个任务具有一个 r 维能力需求向量 $T_j = \langle b_j^1, b_j^2, \dots, b_j^r \rangle (j=1, 2, \dots, m)$, 其中 $b_j^k (k=1, 2, \dots, r)$ 是分析任务需求而得出的模糊评价. m 个任务具有 r 种能力需求的关系用 $m \times r$ 矩阵表示, 记为

$$T_{m \times r} = \begin{bmatrix} b_1^1 & b_1^2 & \dots & b_1^r \\ b_2^1 & b_2^2 & \dots & b_2^r \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_m^1 & b_m^2 & \dots & b_m^r \end{bmatrix}. \quad (2)$$

步骤 2 建立 Agent 能力向量矩阵. 设有 Agent 集合 $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, 每个 Agent 具有一个 r 维能力向量 $A_i = \langle a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^r \rangle (i=1, 2, \dots, n)$, 其中 $a_i^k (k=1, 2, \dots, r)$ 是分析 Agent 的第 k 种能力而得出的模糊评价. n 个 Agent 具有 r 种能力的关系用 $n \times r$ 矩阵表示, 记为

$$A_{n \times r} = \begin{bmatrix} a_1^1 & a_1^2 & \dots & a_1^r \\ a_2^1 & a_2^2 & \dots & a_2^r \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n^1 & a_n^2 & \dots & a_n^r \end{bmatrix}. \quad (3)$$

步骤 3 建立任务与 Agent 模糊关系矩阵. 每一个任务可看作是在 Agent 论域上得一个模糊集合, n 个 Agent 求解 m 个任务, 判断 Agent 求解任务的适合度, 即 Agent 对任务求解联邦的隶属程度, 以此生成多任务联邦. 关系矩阵 R 记为

$$R = \begin{bmatrix} \mu_{T_1}(A_1) & \mu_{T_2}(A_1) & \dots & \mu_{T_m}(A_1) \\ \mu_{T_1}(A_2) & \mu_{T_2}(A_2) & \dots & \mu_{T_m}(A_m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{T_1}(A_n) & \mu_{T_2}(A_n) & \dots & \mu_{T_m}(A_m) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

步骤 4 建立隶属函数. $A_i \otimes T_j = \langle a_i^1 b_j^1, a_i^2 b_j^2, \dots, a_i^r b_j^r \rangle = \langle a_{ij}^1, a_{ij}^2, \dots, a_{ij}^r \rangle$, 表示 A_i 对任务 T_j 的权能力向量. 隶属函数 $\mu_{T_j}(A_i) = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r e^{-(a_{ij}^k - b_j^k)^2 / S_k^2}$, 其中 $S_k^2 > 0$, 适当选定使

$\mu_{T_j}(A_i) \in [0, 1]$. S_k^2 的选取尽量使 $\mu_{T_j}(A_i)$ 较均匀地分布在 $[0, 1]$ 中.

步骤 5 建立 Agent 的联邦. 选取合适的阈值 $\lambda \in [0, 1]$, λ 的选取原则以能过滤掉隶属度较小的度量指标为准. 将矩阵 R 转换为矩阵 R' , 即

$$R' = \begin{bmatrix} \mu'_{T_1}(A_1) & \mu'_{T_2}(A_1) & \dots & \mu'_{T_m}(A_1) \\ \mu'_{T_1}(A_2) & \mu'_{T_2}(A_2) & \dots & \mu'_{T_m}(A_m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu'_{T_1}(A_n) & \mu'_{T_2}(A_n) & \dots & \mu'_{T_m}(A_m) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

其中: $\mu'_{T_j}(A_i) = \begin{cases} \mu_{T_j}(A_i), & \mu_{T_j}(A_i) \geq \lambda; \\ 0, & \mu_{T_j}(A_i) < \lambda. \end{cases}$

3.2 基于 SWBS 的任务能力需求分解策略

对评估任务的正确分析有利于建立有效的任务能力需求矩阵, 从而提高临时联邦生成的准确性. 本文提出依据船舶工程分解结构原理建立待评估任务的能力需求分解策略. 船舶工程分解结构(ship work breakdown structure, SWBS)是以目标任务为中心的一种层级体系, 是将目标任务划分为可完成的工作描述的一种方法. 作战性能需求(required operational capabilities, ROC_s)是以作战任务为中心基于 SWBS 进行的层级分解体系, 将作战任务划分为明确易行的子任务清单. 不同级别的任务分解清单对应不同级别的任务能力需求矩阵和 Agent 能力向量矩阵. 该策略在任务管理 Agent 内完成, 所有类型舰船 ROC_s 被整理集合在数据库中, 根据待评估舰船的作战需求选取适合的 ROC_s 分配给控制 Agent 处理.

3.3 联邦成员的效用分配策略

针对不同评估任务的临时联邦生成后, 接下来需要解决各成员 Agent 在本联邦内效用分配问题, 也就是各成员 Agent 在本联邦内作用发挥大小问题, 即各效能度量指标权重大小问题. 通过对一定样本数量的评估体系权重值统计分析, 其大小分布规律服从均值为零的高斯分布. 因此联邦成员的效用分配采用公式赋权法^[13]计算所得, 即

$$W_i = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{-2\ln\left[\frac{2(n-1)}{n}\right]}}{6}, & 1 < i \leq \frac{n}{2} + 1; \\ \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{-2\ln\left[\frac{2(n-1)}{n}\right]}}{6}, & \frac{n}{2} + 1 < i \leq n. \end{cases} \quad (6)$$

其中: W_i 为第 i 个指标的权重值, i 为排队等级, n 为决策目标数.

该方法只需获取参与评估的效能度量指标

数,即临时联邦的成员数量(以下称决策目标数)和重要程度排序(以下称排队等级)即可.由式(4)可知联邦成员 Agent 数量,即决策目标数,根据隶属度数值大小确定每个 Agent 对完成任务的重要度,即 Agent 排队等级.采用公式赋权法获取权重值简便易行,便于实现系统的智能化,同时最大限度地降低了权重评价过程中的人为偏好问题,使评估结果更显客观.

如果决策目标中存在排队等级相同的指标,即重要程度相同,则权重值也相同.设决策目标中存在 m 组重要度相等的指标组,组内指标数依次为 $l_1, l_2, \dots, l_m, l_1 + l_2 + \dots + l_m \leq n$, 则式(6)中的决策目标数 n 应被 $n - (l_1 + l_2 + \dots + l_m) + m$ 替换.权重值计算完成后,排队等级相同的指标通过复制对应组的权重值获得权重,归一化后与对应联邦成员建立联系.

4 算例分析

选取某防空型巡洋舰的 3 个设计方案作为算例,验证多任务舰船作战效能评估体系的适用性.

任务管理 Agent 完成对评估任务的分解,生成 ROC_s3 级分解清单,模式协调 Agent、作战协调 Agent 和武器协调 Agent 根据分解清单生成各自的任务能力需求向量,进而求得相应的临时联邦.

首先生成作战模式 Agent 联邦,作战模式任务集 $\{T_1\} = \{\text{防空型巡洋舰}\}$, 任务能力需求矩阵为

$$T_{1 \times 5} = [9 \quad 8 \quad 7 \quad 6 \quad 2]. \tag{7}$$

具备解决该任务能力的 Agent 集设为 $\{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6\} = \{\text{航母编队, 舰队作战, 防御, 护航, 独立作战, 威慑}\}$, 建立 Agent 矩阵,即

$$A_{6 \times 5} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0 & 0.8 & 0.7 & 0.2 \\ 0.8 & 0 & 0.8 & 0.7 & 0.2 \\ 0.5 & 0.5 & 0.6 & 0.9 & 0.2 \\ 0 & 0.9 & 0.5 & 0.6 & 0.2 \\ 0.8 & 0 & 0.8 & 0.6 & 0.2 \\ 0.3 & 0.5 & 0.3 & 0.3 & 0.9 \end{bmatrix}. \tag{8}$$

取 $S_k^2 = 8$, 建立任务与 Agent 模糊关系矩阵为 $R = [0.62 \quad 0.57 \quad 0.45 \quad 0.47 \quad 0.53 \quad 0.26]^T$. (9)

取阈值 $\lambda = 0.53$, 可得 R' , 即 $R' = [0.62 \quad 0.57 \quad 0 \quad 0 \quad 0.53 \quad 0]^T$. (10)

T_1 的联邦 $C_1 = \{A_1, A_2, A_5\}$, 决策目标数为 3, 排队等级: ① A_1 , ② A_2 , ③ A_5 . 同理, 可求得作战需求和武器系统的联邦成员、决策目标数和排队等级, 见表 2、3.

表 2 作战需求联邦、决策目标数及排队等级

联邦类型	集合描述	决策目标数	排队等级
航母编队作战	{对空, 反潜, 反舰, 指挥控制通信, 舰队支持, 攻击, 弹道导弹防御}	7	① 弹道导弹防御
			② 对空
			③ 指挥控制通信
			④ 反潜
			⑤ 反舰
			⑥ 攻击
			⑦ 舰队支持
舰队作战	{对空, 反潜, 反舰, 指挥控制通信, 舰队支持, 攻击, 弹道导弹防御}	7	① 通信指挥控制
			② 弹道导弹防御
			③ 对空
			④ 反潜
			⑤ 反舰
			⑥ 攻击
			⑦ 舰队支持
独立作战	{对空, 反潜, 反舰, 指挥控制通信, 攻击, 弹道导弹防御}	6	① 通信指挥控制
			② 对空
			③ 指挥控制通信
			④ 反潜
			⑤ 反舰
			⑥ 攻击

表 3 武器系统联邦、决策目标数及排队等级

类型	联邦类型	集合描述	决策目标数	排队等级
航母编队作战	弹道导弹防御	{AAW, CCC, GMLS}	3	① AAW, ② CCC, ③ GMLS
	对空作战	{AAW, CCC, GMLS, SDS}	4	① AAW, ② CCC, ③ GMLS, ④ SDS
	指挥控制通信	{CCC}	1	① CCC
	反潜作战	{ASW, LAMPS, CCC}	3	① ASW, ② LAMPS, ③ CCC
	反水面作战	{ASUW, LAMPS, NSFS, CCC, SDS}	5	① ASUW, ② LAMPS, ③ NSFS, ④ CCC, ⑤ SDS
	攻击作战	{GMLS, CCC}	2	① GMLS, ② CCC
	舰队支持作战	{LAMPS, CCC}	2	① LAMPS, ② CCC
舰队作战	指挥控制通信	{CCC}	1	① CCC
	弹道导弹防御	{AAW, CCC, GMLS}	3	① AAW, ② CCC, ③ GMLS
	对空作战	{AAW, CCC, GMLS, SDS}	4	① AAW, ② CCC, ③ GMLS, ④ SDS
	反潜作战	{ASW, LAMPS, CCC}	3	① ASW, ② LAMPS, ③ CCC
	反水面作战	{ASUW, LAMPS, NSFS, CCC, SDS}	5	① ASUW, ② LAMPS, ③ NSFS, ④ CCC, ⑤ SDS
	攻击作战	{GMLS, CCC}	2	① GMLS, ② CCC
	舰队支持	{LAMPS, CCC}	2	① LAMPS, ② CCC
独立作战	弹道导弹防御	{AAW, CCC, GMLS}	3	① AAW, ② CCC, ③ GMLS
	对空作战	{AAW, CCC, GMLS, SDS}	4	① AAW, ② CCC, ③ GMLS, ④ SDS
	指挥控制通信	{CCC}	1	① CCC
	反潜作战	{ASW, LAMPS, CCC}	3	① ASW, ② LAMPS, ③ CCC
	反水面作战	{ASUW, LAMPS, NSFS, CCC, SDS}	5	① ASUW, ② LAMPS, ③ NSFS, ④ CCC, ⑤ SDS
攻击作战	攻击作战	{GMLS, CCC}	2	① GMLS, ② CCC

各联邦生成后即得到防空型巡洋舰的作战效能度量模型,如图 7 所示,各效能度量指标的权重采用式(6)求得.该舰武器系统设计方案及各武器系统效能值如表 4 所示.

根据图 7 的作战效能度量模型和表 4 的武器系统效能值,代入到式(1)中,可求得该防空型巡洋舰 3 方案各种战斗能力的效能评测结果,如表 5 所示.

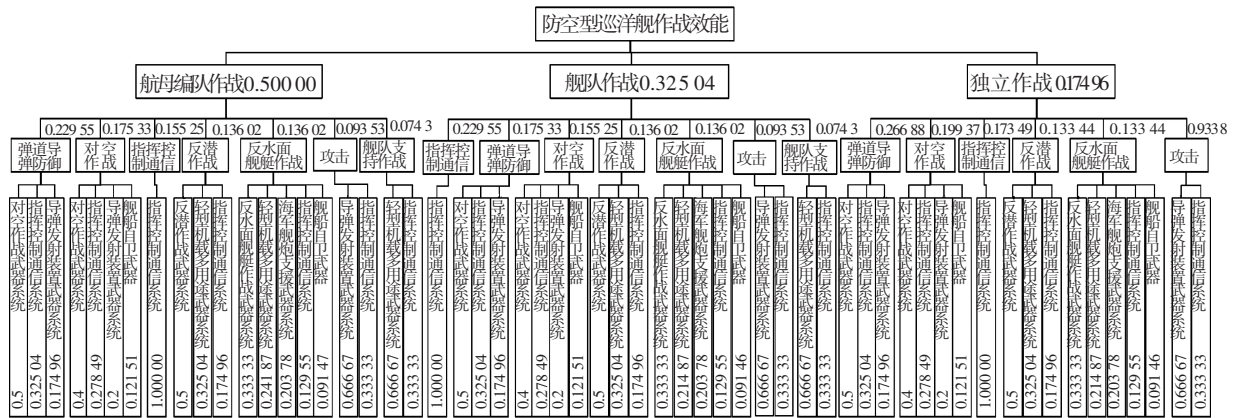


图 7 防空型巡洋舰作战效能度量模型

表 4 武器系统方案及效能

武器系统	方案号	武器系统方案	效能值
对空作战 AAW	1	4xSPY-1B 雷达,SPS-49 雷达,4xSPG-62 雷达,宙斯盾防御,MK 99 火控系统	0.743
	2	4xSPY-3 雷达,VSR 广域搜索雷达,宙斯盾防御,MK 99 火控系统	1.000
	3	2xSPY-3 雷达,VSR 广域搜索雷达,宙斯盾防御,MK 99 火控系统	0.824
反水面作战武器系统 ASUW	1	SPS-73(V) 12 雷达,MK160/34 舰炮火控系统	1.000
	2	SPS-73(V) 12 雷达,SPQ-9,MK86 舰炮火控系统	0.852
	3	SPS-73(V) 12 雷达,MK160/34 舰炮火控系统	1.000
反潜作战武器系统 ASW	1	SQS53D 舰壳声呐,SQQ89 综合反潜作战系统,ASROC 反潜火箭发射器,2xMK32 鱼雷发射管,NIXIE 鱼雷反制措施 SQR-19 被动拖曳阵声呐,MK116	1.000
	2	SQS53D 舰壳声呐,SQQ89 综合反潜作战系统,ASROC 反潜火箭发射器,2xMK32 鱼雷发射管,NIXIE 鱼雷反制措施 SQR-19 被动拖曳阵声呐,MK116	1.000
	3	SQS56 舰壳声呐,MK116,ASROC 反潜火箭发射器,2xMK32 鱼雷发射管,NIXIE 鱼雷反制措施,SQR-19 被动拖曳阵声呐,SQQ89 综合反潜战系统	0.872
海军舰炮支援武器系统 NSFS	1	MK45 5-64	1.000
	2	2 座 MK110 57 毫米口径火炮	0.842
	3	MK45 5-64	1.000
指挥控制通信系统 CCC	1	基本型 CCC	0.839
	2	增强型 CCC	1.000
	3	增强型 CCC	1.000
海军电子战系统 INT	1	ECM 电子干扰,SLQ32-V2 主动电子反制系统,MK36 超快速散离舰干扰系统	0.891
	2	ECM 电子干扰,SLQ-32-V3 主动电子反制系统,MK36 超快速散离舰干扰系统	1.000
	3	ECM 电子干扰,SLQ32-V2 主动电子反制系统,MK36 超快速散离舰干扰系统	0.891
轻型机载多用途武器系统 LAMPS	1	轻型机载多用途系统避难(飞行甲板)	0.603
	2	2 架轻型机载多用途系统 w/海鹰	1.000
	3	1 架轻型机载多用途系统 w/海鹰	0.901
舰船自卫武器系统 SDS	1	1 座 CIWS 海军近防密集阵	0.897
	2	2 座 CIWS 海军近防密集阵	1.000
	3	1 座 CIWS 海军近防密集阵	0.897
导弹发射装置武器系统 GLMS	1	128 发 MK41 和/或 MK57 舷侧配置垂直发射系统	0.674
	2	192 发 MK41 和/或 MK57 舷侧配置垂直发射系统	0.857
	3	224 发 MK41 和/或 MK57 舷侧配置垂直发射系统	1.000

表 5 防空型巡洋舰 3 方案作战效能

类型	效能值		
	方案 1	方案 2	方案 3
对空作战能力	0. 768 329	0. 971 400	0. 929 600
反潜作战能力	0. 842 791	1. 000 000	0. 903 821
反水面作战能力	0. 868 942	0. 918 470	0. 976 055
指挥控制通信	0. 839 000	1. 000 000	1. 000 000
舰队支持能力	0. 681 666	1. 000 000	0. 934 000
攻击能力	0. 728 999	0. 904 666	1. 000 000
弹道导弹防御能力	0. 762 132	0. 974 981	0. 912 000
航母编队作战能力	0. 791 574	0. 969 236	0. 946 213
舰队作战能力	0. 797 160	0. 971 170	0. 952 400
独立作战能力	0. 798 630	0. 967 840	0. 946 450
综合作战效能	0. 794 624	0. 969 619	0. 948 265

评价结果分析:对于反水面作战、攻击能力,方案 3 最优,方案 2 次之;对于其他作战能力方案 2 最优,方案 3 次之.对于综合作战效能,方案 2 最优,方案 3 其次,方案 1 最差.

5 结 论

1)对舰船作战效能评估方法进行了研究,在 MAS 的框架模型下引入了基于 FS 的多任务联邦并行生成算法、基于公式赋权法的联邦成员的效用分配算法和基于 SWBS 的任务能力需求分解策略,结合 CNP 协商机制,建立了一个面向舰船作战效能评估的分布式多层递阶控制复杂体系效能测度模型,详细给出了效能度量联邦形成方法与 Agent 交互机制.

2)建立的复杂体系测度模型一方面解决了针对评估对象多样化需建立多样化评测模型的问题,另一方面解决了传统效能测度方法由于无法解决效能度量耦合关联问题而将其作为独立变量最终导致评估结果偏差的问题.

3)面向任务的舰船作战效能评估以舰船各种作战任务的完成能力为目标构建指标体系,获取舰船各种作战效能快速而准确,消除了由于武器系统配合问题影响效能发挥而导致的评价结果误差.

4)将所提出的技术方法应用于舰船作战效能评估实践,通过对防空型巡洋舰 CG(X)3 个设计方案的评测,验证了该评估方法的灵活性和在处理耦合关系方面的准确性.

参考文献

[1] 吴启波,叶方超,万学军.武器系统效能度量理论研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2010,28(4):27-31.

[2] 张杰,唐宏,苏凯,等.效能评估方法研究[M].北京:国防工业出版社,2009.

[3] 吕建伟,王新磊,曾宏军.海军舰船设计方案的评估方法研究[J].中国舰船研究,2006,1(1):21-24.

[4] 李平.舰船研制指标体系与评估方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2003.

[5] 刘传云,马运义,许建,等.舰船总体效能量化评估方法研究[J].舰船科学技术,2009,31(3):51-55.

[6] 刘咏,孟梅,张恒,等.面向任务的驱逐舰作战效能评估方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2013,34(12):1479-1489.

[7] HOCKBERGER W A.Total system ship design in a super system framework[J]. Naval Engineers Journal, 1996, 108(3): 147-169.

[8] GREEN J M. Establishing system measures of effectiveness[J].Raytheon Naval & Maritime Integrated Systems,2001,1(3):1-5.

[9] SAGE A P, CUPPAN C D. On the systems engineering and management of systems of systems and federations of systems [J]. Information, Knowledge, and Systems Management, 2001, 2(4): 325-345.

[10] RAINS D A. Combatant ship design guidance through mission effectiveness analysis [J]. Naval Engineers Journal,1984,96(3):112-127.

[11] RAINS D A. Fleet mix mission effectiveness analysis [J].Naval Engineers Journal,1999,111(1):65-81.

[12] 夏娜.分布式智能系统中联盟机制研究[M].合肥:合肥工业大学出版社,2008.

[13] 蒋敏,由大德,张发强.基于公式赋权法的水面舰艇防空反导效能评估[J].舰船电子对抗,2009,32(5):11-14.

(编辑 魏希柱)