

体系能力多维度评估建模方法

任天助¹, 辛万青², 严晔隽¹, 赵鸿宇³

(1. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 2. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076;
3. 北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)

摘要: 针对当前各领域体系能力评估难以全面、客观和可信的问题, 提出了一种改进的体系能力多维度评估建模方法, 从效能、灵活性、鲁棒性和经济性这四大维度建立评估模型. 以多个映射矩阵统一表示体系各维度, 并创新性地采用矩阵范数计算各个维度下的能力评估值与贡献度值. 以海上救援体系作为研究案例, 建立评估模型并计算能力评估值与贡献度. 仿真结果表明, 该体系能力多维度方法能够对实际问题进行多方面的评估建模, 相比传统的多维度评估方法量化程度有较大地提升, 可得出更有助于优化体系组成的评估结论.

关键词: 体系; 体系贡献度; 多维度评估

中图分类号: N945

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2021)05-0709-12

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2021.05.011

Modeling method for multi-dimensional evaluation of system-of-systems capability

Ren Tianzhu¹, Xin Wanqing², Yan Xijun¹, Zhao Hongyu³

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;

2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

3. Beijing Institute of Precision Mechatronics and Controls, Beijing 100076, China)

Abstract: In view of the difficulty of comprehensive, objective and credible system-of-systems(SoS) capability assessment in various fields, an improved multi-dimensional evaluation and modeling method of system capability is proposed, which evaluates the SoS capability from four dimensions: effectiveness, flexibility, robustness and economy. Matrix norm is used to calculate the capability evaluation value and contribution rate. Finally, the simulation analysis is carried out with the maritime search and rescue model. The simulation results show that the multi-dimensional method of SoS capability proposed in this paper can evaluate and model the practical problems in many aspects. Compared with the traditional multi-dimensional evaluation method, the quantitative degree of this method is greatly improved, and the evaluation and analysis results can draw evaluation conclusions that are more helpful to optimize the composition of the SoS.

Key words: system-of-systems; systems-of-systems contribution rate; multi-dimensional evaluation

1 引言

随着科技发展, 在交通^[1]、电力^[2]、航空航天^[3]和军事^[4]等领域出现了大量规模庞大、组成系统庞杂的复杂系统. 这类系统具有自主、演化、异构、多地分布和功能涌现等特性, 被称为体系(systems-of-systems), 即系

收稿日期: 2020-07-01; 修订日期: 2021-07-06.

统之系统. 相对于系统工程而言, 研究体系的方法与技术被称为体系工程, 包括对体系的设计、评估和优化等等. 在体系工程中, 体系能力评估是一项重要的工作, 通过对体系方案的各方面开展评估, 分析比较体系方案的优劣. 特别评估体系中各个组成系统对体系整体的贡献率, 以此来对体系的组成进行权衡决策, 提升体系能力.

近些年, 国内外的体系工程研究者以指标聚合、仿真推演和网络分析等方法开展了大量体系能力评估方面的研究. 例如, 简平^[5]提出了一种基于算子的武器装备体系效能评估框架, 构建具有算子化的评估模型、可重组的评估流程和可扩展的评估解算流程, 但该文献只实现了对体系效能的高效评估, 没有涵盖体系的其它方面. 范云龙^[6]等建立了防空预警体系贡献度评估指标体系, 对评估指标给出了详细的计算方法. 周鼎^[7]则分析了天基对地武器的评估指标体系, 并对作战过程进行了仿真分析, 验证了方法的有效性. 赵丹玲^[8]则以作战环网络分析的方法开展体系贡献度的评估, 引入了能力需求满足度的概念来衡量体系作战能力. 但以上这些研究往往只考虑一部分效能指标, 对体系的分析不够全面, 得出的结论往往是仍然是以系统工程思维中面向某一类系统的部分能力要素, 而忽视了体系中各个系统在各种任务条件下相互作用带来的其它影响. 对于体系的能力评估来说, 仅仅分析体系整体在任务中的效能而不考虑各个组成系统的影响, 则无法保证体系能力在各种条件下的有效发挥.

随着体系研究的不断深入, 许多研究者开始将对体系的评估从单一维度投向多个维度. 美国普渡大学的 De Laurentis^[9]提出从系统类型、相关性和控制三个维度去选择具体的评估方法. 美国密苏里科技大学的研究团队以多维度的方法开展了许多体系评估优化研究^[10]. 以 Pape^[11]为代表的学者们认为: 体系的能力评估的关键属性除了效能外, 还应包括体系的灵活性, 鲁棒性, 经济性等. Agarwal^[12]则选取效能、网络中心性、经济性、鲁棒性和模块化程度开展了体系的评估与优化.

但目前体系多维度评估方法, 尚有以下几点问题需要解决: 1) 体系多维度评估方法指出了能力之外的其它维度, 为体系评估问题拓展了思路. 然而在文献[11]中, 对于灵活性、鲁棒性等维度仅给出了模糊的评价标准, 没有给出建立评估框架的步骤和进行定量化计算的方法. 2) 体系贡献度评估是装备体系评估的一个重要方面. 传统多维度评估方法尽管从宏观上实现了对体系各个维度的评估, 但是尚不能从微观角度分析某一类系统对体系各方面提升情况, 导致这些方法评估量化程度低, 评价体系缺乏数学化描述, 以至于难以进一步支撑体系方案决策.

本文选取体系效能、灵活性和鲁棒性和经济性四方面作为体系能力评估的主要维度. 在文献[11]的基础上, 通过 DoDAF 体系视图分析能力—任务—系统的映射关系, 搭建评估框架, 使得评估的指标来源具有可追溯性. 在指标计算方法上没有采用传统的指数法、ADC 方法和 SEA 方法等分析计算方法, 而是创新性的以矩阵范数作为评估综合计算的工具体, 替代了文献中基于模糊规则的评价标准, 提升了各个维度评估的量化水平, 使得评估结果更有说服力. 此外, 通过引入贡献度的概念, 实现对某一系统对体系能力贡献度水平的评估. 通过评估某一特定系统对体系的各个维度的贡献, 以此分析体系中系统组成的优劣, 为优化体系中的系统组成提供决策依据. 并以海上搜救体系作为应用案例, 验证了评估方法的合理性.

2 多维度体系能力评估的概念

2.1 体系能力评估的概念

能力是体系工程中的核心要素, 在文献[12]中, 将能力定义为特定对象在规定条件下, 使用相关资源要素执行一系列任务并达到预定标准, 实现目标的本领. 体系能力评估的意义在于能够有效的指导资源分配、需求规划、体系结构设计及组成优化. 这一工作在体系开发中有着重要地位, 在体系进行设计论证时能够通过评估方案来帮助设计人员理解各方的需求关切, 在体系开发时能够帮助相关人员找到体系组成的最佳方案, 在体系运行维护时通过评估任务的完成情况来更改具体的实施方案.

体系能力贡献度是一种分析体系部分系统与整体之间关系的增量式度量指标, 即分析体系中引入某一

系统与否对整个体系能力的影响. 目前学界关于体系贡献度还没有各方都能满意的定义, 一般来说主要指一系统在加入体系或替换体系中相关系统后, 体系整体评价指标的变化, 即体系贡献度 G_n 可表示为

$$G_n = (E_n - E_0)/E_0,$$

其中 E_0 表示体系中不含系统 n 时的整体评估值, E_n 表示体系中含系统 n 时的整体评估值.

2.2 体系能力评估框架的多维度选择

在前人研究基础上, 本文选取体系效能、体系鲁棒性、体系灵活性和体系经济性四个方面. 下面对这四个维度评估给出定义, 以及对如何评估各个维度上的贡献度给出解释.

1) 体系效能

效能的概念起源于武器装备领域, 一般用于评价武器系统完成预期规定的作战任务的程度, 对于非军事领域的系统则是评价体系中某系统执行特定功能任务的能力效果度量.

体系效能贡献度表示某一系统加入体系或替换体系中原有系统后, 体系综合效能或指标效能的变化. 依靠建立基于任务-能力的评估框架, 分析系统在各项任务中, 评估该系统对体系各项能力的提升情况.

2) 体系灵活性

体系灵活性表示体系开发过程中实现体系中的某一项能力所能配置资源的多寡. 如果体系内的某项能力只有依靠体系中的某一个系统才能实现, 则体系的灵活性很差; 反之若其可由多个系统来实现, 则灵活性较好.

体系灵活性贡献度立足于评估系统对体系中各项任务的参与度, 一个系统参与的任务越多, 给予体系组成不同可行方案的能力越强, 则对体系灵活性贡献度越大. 例如查打一体无人机既能参与侦查任务, 又能执行火力打击任务, 比单纯的侦查型无人机的灵活性贡献度强.

3) 体系鲁棒性

体系鲁棒性表示体系在其组成系统失去能力或组成系统间的链路连接中断时所能运行的水平称之为体系的鲁棒性. 如果当体系中一个系统被移除后, 整个体系能力大幅度下降, 主要指标只能达到体系正常时的 20% 以下^[11], 则说明体系的鲁棒性很差.

体系鲁棒性贡献度评估面向体系的组织结构, 当系统和系统间的联系受损的情况下体系维持原有效能的水平. 增加一个系统后, 体系在执行任务的鲁棒性越强, 则该系统的鲁棒性贡献度越大.

4) 体系经济性

体系经济性表示在满足体系最低能力要求的条件下, 所节约的预算成本值. 开发和运行体系中所有系统及保持其各方面的联系与交互的总成本越低, 则体系的经济性越好.

体系经济性贡献度评估整个生命周期下体系开发和维护的成本, 针对总的预算分配, 引入一个新系统相较之前节约其开发和维护的成本越多, 则该系统对体系的经济性贡献度越大.

3 多维度体系贡献度评估建模方法

在文献[11]中, 对体系各个维度给出了定义之后, 结合情报侦察监视(ISR)体系这一具体问题, 给出了较为模糊的评估标准. 其效能维度只提了一个总的评估指标, 每日监测成功率. 对于鲁棒性来说, 以失去一个系统之后的, 体系监测成功率下降的百分比作为评估指标. 灵活性评估指标则为体系中能力来源于单一系统的数目. 而经济性评估指标为装备的总成本. 以上的评估指标定性的反映了体系各个维度的优劣, 但是没有建立一套定量的评估方法. 因此本文在此基础上, 提出一套结合矩阵范数计算的评估建模方法, 使得评估过程更具操作性, 也使评估更有说服力. 并且从评估单一系统的角度, 进行了贡献度评估, 分析各个系统对体系各个维度的作用, 为体系组成决策提供参考.

在体系设计中, 美国国防部 DoDAF 框架是体系领域最常用来开展能力分析的框架, 其采用各类视图以

图形化的建模语言, 分析体系中任务-能力-系统之间的关联关系. 如图 1 所示.

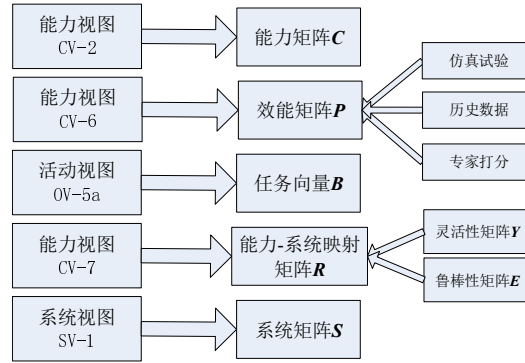


图 1 体系设计视图到体系评估矩阵关系

Fig. 1 Relationship between SoS design view and SoS evaluation matrix

利用 DoDAF 中部分能力视图、作战视图和系统视图信息作为体系评估方法的输入. 通过 DoDAF 模型视图, 获取体系的要素信息, 以数学矩阵的方式构建体系任务-能力-系统关系, 并建立体系效能评估矩阵 P 、灵活性评估矩阵 Y 和鲁棒性评估矩阵 E . 接下来将介绍具体建模方法.

3.1 体系评估模型的任务-能力-系统建模

被评估体系 SoS 需考虑 q 类任务场景, 任务场景用任务向量 B 表示, 即 $B = [b_1, b_2, \dots, b_q]^T$. 某一具体任务场景可用变量 b_k 来表示, $k = 1, 2, \dots, q$.

设被评估体系 SoS 中, 具备 n 种能力, 用 $\bar{c}_i$ 表示第 i 种能力. 体系所具备的能力及能力组合关系, 可用能力关系矩阵 C 来表示, 即

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{12} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix}.$$

若能力 $\bar{c}_{i_2}$ 是能力 $\bar{c}_{i_1}$ 的一部分, $c_{i_1 i_2} = 1$, 否则 $c_{i_1 i_2} = 0$, $i_1, i_2 = 1, 2, \dots, n$. 这里能力的一部分表达是一种包含关系, 例如“雷达探测能”是“探测能力”的一部分.

SoS 由 m 个分系统组成, 用 $\bar{s}_j$ 表示第 j 个系统; 体系中的系统要素及之间的关系, 可用系统关系矩阵 S 来表示, 即

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1m} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mm} \end{bmatrix}.$$

若系统 $\bar{s}_{j_2}$ 是系统 $\bar{s}_{j_1}$ 的一部分, $s_{j_1 j_2} = 1$, 否则 $s_{j_1 j_2} = 0$, $j_1, j_2 = 1, 2, \dots, m$. 这里一个系统是另一个系统的一部分的含义是系统之间的组成关系, 例如“侦查卫星”是“探测系统”的一部分

3.2 体系的效能建模

根据能力视图 CV-6 确定“任务-能力”的映射关系后, 可对 SoS 建立体系效能评估矩阵

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1q} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nq} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

这里定义在某一任务条件 b_k 下, 其中一项能力 $\bar{c}_i$ 的效能评估值为 $p_{ik} = f_{c_i}(b_k, S)$, 其中 f_{c_i} 为能力 C_i 的效能计算函数, 具体选用何种方法, 该方法属于解析计算的形式还是仿真、经验等取决于具体研究问题的能力种类.

体系能力评估的目的在于比较评估对象二者的好坏, 当评估的维度不止一个时, 如果试图分析一个系统对整个体系能力的影响就需要一个数学工具, 比较其加入后各个维度上的能力变化. 范数是衡量多维向量以及多维集合的大小关系的度量. 通过计算范数把各个维度上的值统一起来, 将评估值的改变量变为矩阵形式下的范数大小, 实现了抽象评估问题的数学公式化. 常用的矩阵范数有列范数、行范数和 F 范数等. 列范数和行范数求的都是最大值, 如果采用这两种计算方法的话, 在其中一项较小的评估值出现变化时范数不会变化, 无法全面反映体系评估的一些特征.

因此, 选择 F 范数计算各类评估值 $\|P\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^q |p_{ik}|^2}$, 则系统 $\bar{s}_j$ 对 SoS 的总效能贡献度为 $G_{P_{\bar{s}_j}} = \frac{\|\tilde{P}\|_F - \|\tilde{P}_{\bar{s}_j}\|_F}{\|\tilde{P}\|_F}$, 其中 $\tilde{P}_{\bar{s}_j}$ 代表体系中含有系统 $\bar{s}_j$ 的体系效能评估矩阵, $\tilde{P}$ 代表不含有系统的基准体系效能评估矩阵.

除此之外, 对体系的效能贡献度可以进一步细分为系统对某一能力的贡献度和某一任务的贡献度. 即可以取矩阵 P 中的第 i 行作为行向量 $P^{C_i} = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iq}]$, 计算 $\|P^{C_i}\| = \sqrt{p_{i1}^2 + p_{i2}^2 + \dots + p_{iq}^2}$ 可得到能力 $\bar{c}_i$ 的效能评估值, 取矩阵 P 中的第 k 列作为列向量 $P^{b_k} = [p_{1k}, p_{2k}, \dots, p_{nk}]^T$, 计算 $\|P^{b_k}\|$ 可得到任务 b_k 的效能评估值. 这样可以更加全面的评估系统对体系某一项任务或某一项能力的贡献.

系统 $\bar{s}_j$ 对能力 $\bar{c}_i$ 的贡献度为 $G_{P_{\bar{s}_j}^{C_i}} = \frac{\|\tilde{P}^{C_i}\|_2 - \|\tilde{P}_{\bar{s}_j}^{C_i}\|_2}{\|\tilde{P}^{C_i}\|_2}$, 系统 $\bar{s}_j$ 对任务 b_k 的贡献度为 $G_{P_{\bar{s}_j}^{b_k}} = \frac{\|\tilde{P}^{b_k}\|_2 - \|\tilde{P}_{\bar{s}_j}^{b_k}\|_2}{\|\tilde{P}^{b_k}\|_2}$.

3.3 体系的灵活性建模

体系的灵活性可由体系能力和组成系统的映射关系矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

若能力 $\bar{c}_i$ 的作用由系统 s_j 实现, $r_{ij} = 1$, 否则 $r_{ij} = 0$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$. 这里能力的作用由系统实现表达了一种能力和系统之间的映射关系, 例如“探测能力”由“侦查卫星”实现.

由前文关于体系灵活性的定义可知, 形成一项能力对应可选择的系统组合方案越多, 则该体系的灵活性越强. 有些能力只需要单一的系统就能实现, 有些则需要不同系统的组合, 因此在设计灵活性评估矩阵时, 将需要对由不同系统组合所构成的能力进行解耦, 保障能力分解到对应的系统都至少能独立支撑一项基本能力.

将解耦后映射矩阵重新组织成 h 项基本能力, 此时灵活性评估矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{h1} & y_{h2} & \cdots & y_{hm} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

若能力 $\bar{c}_i$ 的作用由系统 $\bar{s}_j$ 独立实现, $y_{ij} = 1$, 否则 $y_{ij} = 0$, $i = 1, 2, \dots, h$, $j = 1, 2, \dots, m$. 这里能力的作用由系统独立实现表达了一种能力和系统之间的唯一映射关系, 例如“伤员转运能力”由“救援直升机”独立实现, 而与体系内其它系统无关.

通过计算矩阵 $\mathbf{Y}$ 的 F 范数分析体系的灵活性, 即各行的数值“1”越多组合方案越多. 则系统 $\bar{s}_j$ 对体系 SoS 的灵活性贡献度为

$$G_{Y_{\bar{s}_j}} = \frac{\|\tilde{\mathbf{Y}}\|_F - \|\tilde{\mathbf{Y}}_{\bar{s}_j}\|_F}{\|\tilde{\mathbf{Y}}\|_F},$$

其中 $\tilde{\mathbf{Y}}_{\bar{s}_j}$ 代表体系中含有系统 $\bar{s}_j$ 的体系效能评估矩阵, $\tilde{\mathbf{Y}}$ 代表不含有系统的基准体系效能评估矩阵.

3.4 体系的鲁棒性建模

根据前文鲁棒性的概念, 整个体系的鲁棒性由各种能力的鲁棒性构成, 最直接的计算方法应该是把体系内各个系统进行组合, 分别计算体系在各种系统故障组合下每种能力的效能评估值, 除以所有系统的组合数得到平均效能评估值. 但是这种计算方法实现起来并不容易, 计算开销比较大. 实际情况下, 可通过进一步简化能力和系统映射关系矩阵来求解.

对于矩阵 $\mathbf{Y}$, 将能力只对应一个系统, 即每行都是只有一个元素“1”, 其它元素都是“0”的行去掉. 因为这样的能力一旦对应的系统故障, 则能力无法发挥, 无需再进行其它计算. 将简化后的矩阵设为 $\mathbf{E}$, 简化后的系统个数设为 $\bar{m}$.

体系的鲁棒性由各种能力的鲁棒性构成, 需要计算各能力在所支持系统的所有的排列条件下, 即所有可能的故障情况, 效能的平均值. 对于 $\bar{c}_i$ 在 b_k 下效能的鲁棒性为

$$\hat{p}_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^{\bar{m}} \bar{e}_{ij} f_{c_i}(b_k, \hat{S}(\bar{s}_j)) + \sum_{j_1=1}^{\bar{m}-1} \sum_{j_2=j_1+1}^{\bar{m}} \bar{e}_{ij_1} \bar{e}_{ij_2} f_{c_i}(b_k, \hat{S}(\bar{s}_{j_1}, \bar{s}_{j_2})) + \cdots + f_{c_i}(b_k, \hat{S}(\bar{s}_1, \dots, \bar{s}_m)) \prod_{j=1}^{\bar{m}} \bar{e}_{ij}}{\sum_{j=1}^{\bar{m}} \bar{e}_{ij} + \sum_{j_1=1}^{\bar{m}-1} \sum_{j_2=j_1+1}^{\bar{m}} \bar{e}_{ij_1} \bar{e}_{ij_2} + \cdots + \prod_{j=1}^{\bar{m}} \bar{e}_{ij}},$$

其中 $\hat{S}(\bar{s}_j)$ 代表体系内去掉系统 $\bar{s}_j$ 后体系的组成.

由此得到鲁棒性测试之后的效能矩阵

$$\hat{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} \hat{p}_{11} & \hat{p}_{12} & \cdots & \hat{p}_{1q} \\ \hat{p}_{21} & \hat{p}_{22} & \cdots & \hat{p}_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{p}_{m1} & \hat{p}_{m2} & \cdots & \hat{p}_{mq} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

这里同样可以用归一化后的鲁棒性效能评估矩阵的 F 范数表示, 用鲁棒性测试后的效能值比正常状态下的评估值得到鲁棒性评价指标

$$T = \|\hat{\mathbf{P}}\|_F \left(\|\bar{\mathbf{P}}\|_F \right)^{-1}, \quad (5)$$

其中 $\bar{\mathbf{P}}$ 为包含全部系统均工作正常的体系的效能矩阵.

系统 $\bar{s}_j$ 对体系 SoS 的鲁棒性贡献度 $G_{R_{\bar{s}_j}} = (T_{\bar{s}_j} - T) / T$, 其中 $T_{\bar{s}_j}$ 代表体系中含有系统 $\bar{s}_j$ 的体系鲁棒性评估值, T 代表含有系统的基准体系效能评估值.

3.5 体系的经济性建模

体系的总成本可由各个系统带来的成本叠加而成. 设系统 $\bar{s}_j$ 的成本为 U_{s_j} , 总成本为 $U_{\text{SoS}} = \sum_{j=1}^m U_{s_j}$.

经济性贡献度可由除了系统 $\bar{s}_j$ 的体系成本占体系总成本的百分比来表示, 即该系统给其它系统留下的预算空间越多, 则该系统对体系的经济性贡献度 G_U 越大, 其计算公式为 $G_U = \frac{U_{\text{SoS}} - U_{\bar{s}_j}}{U_{\text{SoS}}}$.

3.6 与传统多维度方法的比较

相对于文献[11]中的多维度评估方法, 本文提出的方法从评估的量化程度有较大提升. 特别是通过引入贡献度的概念, 实现了对系统面向体系各个维度作用程度的分析. 二者不同之处可写成表格的形式如表1所示.

表 1 与传统多维度评估方法的对比
Table 1 Compare of traditional multi-dimensional evaluation method

	传统多维度方法的评估结果	本文方法得出的评估结果
体系效能评估	体系效能的评估值	1. 体系效能评估矩阵及评估值 2. 各组成系统的效能贡献度
体系灵活性评估	体系灵活性的模糊评估结果, 如“优”、“良”、“中”和“差”等	1. 体系灵活性评估矩阵及评估值 2. 各组成系统的灵活性贡献度
体系鲁棒性评估	“体系体系鲁棒性的模糊评估结果, 如“优”、“良”、“中”和“差”等	1. 体系鲁棒性的评估矩阵及评估值 2. 各组成系统的鲁棒性贡献度
体系经济性评估	1. 体系经济性评估值 2. 各组成系统的成本消耗	1. 体系经济性评估值 2. 各组成系统的成本消耗

4 海上搜救体系能力评估案例分析

本文以海上搜救体系作为案例开展分析. 海上搜救体系是应对海上突发情况, 监测海上遇险船只与人员, 协同海陆空各方力量开展搜救活动与伤员救治的复杂体系. 这里将海上救援体系中的主要载具装备作为贡献度评估对象, 各系统的参数部分根据经验和常识确定, 以此验证多维度评估方法的有效性.

4.1 海上搜救体系的体系想定设计

本文中想定的海上搜救体系的任务-能力-系统组成如表 1 所示. 考虑体系中的任务包括在日间和夜间由救援指挥中心组织海上和空中的救援力量, 海上救援力量包括两艘搜救快艇和一艘医疗救援船. 搜救快艇主要负责转运伤员, 海上的医疗救援船能在海上及时给予伤员医疗救治. 空中包括两架无人机、一架固定翼飞机负责搜索遇险者的位置, 以及一架直升机负责快速转运重伤员. 本文的海上搜救体系重要面向搜救装备, 暂不考虑搜救人员训练水平对体系能力的影响.

根据其关联及交互关系, 可利用 Rhapsody 软件工具, 建立如图 2~图 4 的基于 DoDAF 的视图模型. 为了将体系中的任务-能力-系统的关系描述清楚, 同时又避免篇幅冗长, 只展示 CV-2, OV-5a 和 SV-1.

4.2 海上搜救体系多维度效能仿真评估计算

4.2.1 体系效能计算

根据式(1)简化部分全为 0 的行和列之后, 得到效能评估矩阵 P 的计算形式为

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & p_{14} & p_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{24} & p_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{37} & p_{38} & 0 \\ 0 & p_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{53} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{76} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

其中各个效能评估指标意义如表 3 所示.

表 2 体系能力-任务-系统组成要素
Table 2 SoS capability-task-system component

体系任务活动	体系能力	体系组成系统
日间定位遇险位置 B_1	海上救援 C_1	空中救援力量 S_1
夜间定位遇险位置 B_2	伤员转运 C_2	救援指挥中枢 S_2
通报遇难人员位置 B_3	医疗处理 C_3	海上救援力量 S_3
转运伤员 B_4	快速到达 C_4	无人机 S_4
医疗急救 B_5	海上搜索 C_5	无人机 S_5
分配救援任务 B_6	指挥控制 C_6	固定翼飞机 S_6

续表 2

Table 2 Continues

体系任务活动	体系能力	体系组成系统
救援任务规划 B_7	海上通信 C_7	直升机 S_7
搜索遇险人员 B_8	陆海通信 C_8	信息通讯系统 S_8
救援伤员 B_9	通信传输 C_9	指挥决策系统 S_9
指挥救援 B_{10}		搜救快艇 S_{10}
海上救援活动 B_{11}		医疗救援船 S_{11}
		搜救快艇 S_{12}

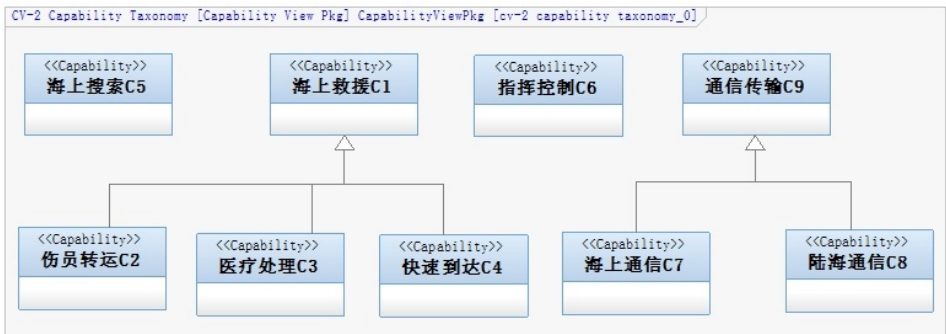


图 2 CV-2: 能力分类视图

Fig. 2 CV-2: Capability hierarchies

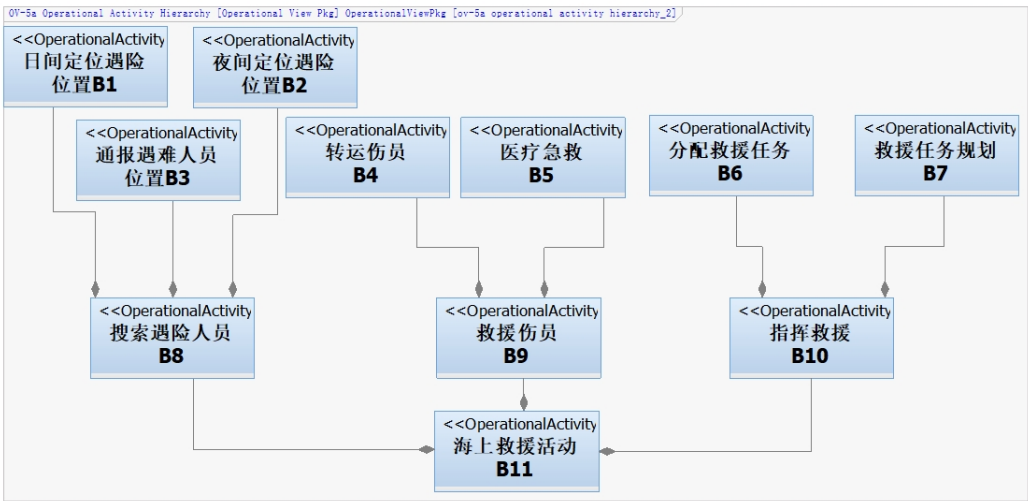


图 3 OV-5a: 作战活动分解树

Fig. 3 OV-5a: Operational activity hierarchy

表 3 体系效能评估矩阵各要素含义

Table 3 Element meaning of SoS effectiveness evaluation matrix

效能变量 P	任务活动 B	体系能力 C	效能评估指标
p_{14}	日间定位遇险位置 B_1	快速到达 C_4	日间救援力量到达遇险位置时间
p_{15}	日间定位遇险位置 B_1	海上搜索 C_5	日间救援队伍发现遇险人员时间
p_{24}	夜间定位遇险位置 B_2	快速到达 C_4	夜间救援力量到达遇险位置时间
p_{25}	夜间定位遇险位置 B_2	海上搜索 C_5	夜间救援队伍发现遇险人员时间
p_{37}	通报遇难人员位置 B_3	海上通信 C_7	发现遇险人员第一时间接收到遇险人员位置信息节点数
p_{38}	通报遇难人员位置 B_3	陆海通信 C_8	由指挥中心通报遇险人员位置信息节点数

续表3

Table 3 Continues

效能变量 P	任务活动 B	体系能力 C	效能评估指标
p_{42}	转运伤员 B_4	伤员转运 C_2	所有伤员转运到安全位置时间
p_{53}	医疗急救 B_5	医疗处理 C_3	为伤员进行紧急处理的平均时间
p_{66}	分配救援任务 B_6	指挥控制 C_6	救援任务动用资源数量, 即出动总飞机架次与船舶次数
p_{76}	救援任务规划 B_7	指挥控制 C_6	任务决策分配所需时间

以体系中各个系统建立多 Agent 体系仿真模型, 通过仿真实验得到效能计算值. 这里将遇险人员的位置和人数设置在一个特定范围内随机出现, 根据仿真计算结果得到效能评估矩阵

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 6.48 & 3.39 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 23.92 & 10.50 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.83 & 3.17 & 0 \\ 0 & 25.72 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 24.00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.68 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.98 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

4.2.2 体系灵活性计算

$$\text{由式(2)可得能力和系统映射关系矩阵 } R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \text{根据矩阵 } C \text{ 和 } S \text{ 中的交互}$$

关系, 取第2项能力到第8项能力, 第4个系统到第12个系统, 由式(3)简化得到灵活性矩阵

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

经计算可得, $\|Y\|_F = 4.36$.

4.2.3 体系鲁棒性计算

$$\text{经进一步简化鲁棒性矩阵 } E, \text{ 可得 } E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

需进行鲁棒性计算的效能值包括 $p_{14}, p_{15}, p_{24}, p_{25}, p_{37}$ 和 p_{42} , 这些评估值用正常状态下的效能评估值除以故障状态下的值进行归一化. 其它效能值均完全依赖某一个系统, 因此置为0, 由式(4)可得鲁棒性效能

值矩阵

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.60 & 0.63 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.58 & 0.63 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.64 & 0 & 0 \\ 0 & 0.51 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

由式(5)计算可得, $U = 0.5649$.

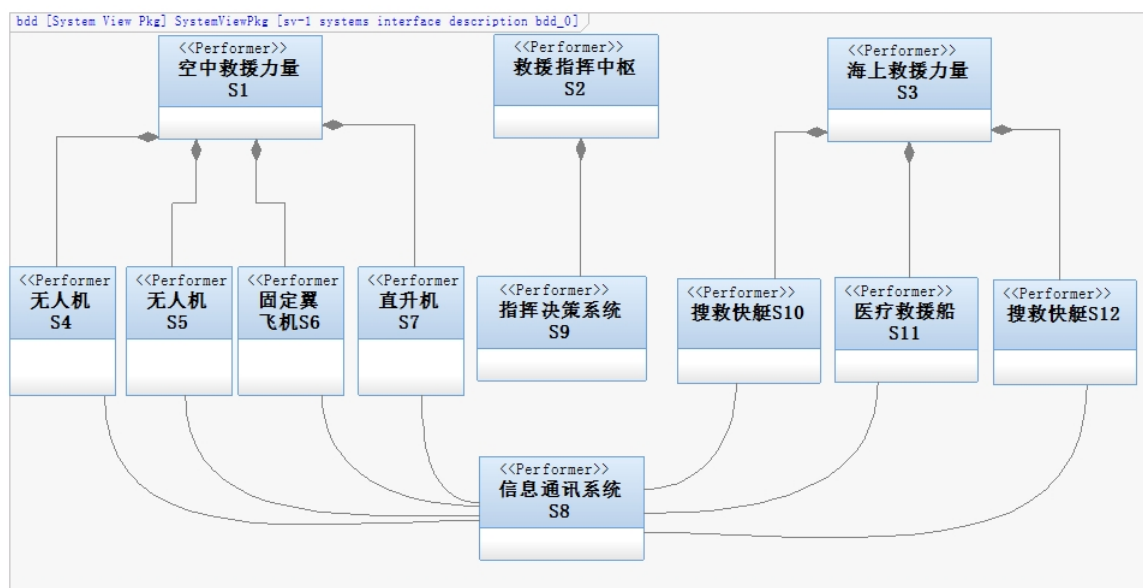


图4 SV-1: 系统接口描述

Fig. 4 SV-1: Systems composition and interface identification

4.2.4 体系经济性计算

体系中系统的成本计算分为两部分,一部分是系统的开发购置投入成本,一部分是系统的使用维护成本.为了更贴近实际,在本文构建的场景中,除了计算各个系统的先期一次性购置成本之外还计算每一次救援行动所花费的成本,各系成本如图5所示.

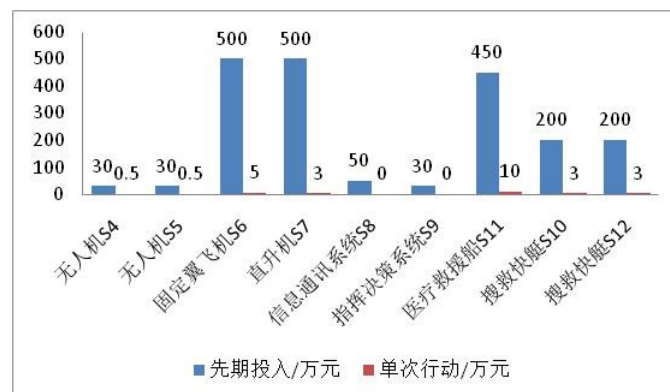


图5 体系中各系统消耗成本

Fig. 5 The costs of systems in SoS

对于整个海上救援装备体系来说,目前的方案一次性购置成本 $U_{\text{SoS}}^1 = 1\,990$, 一次救援行动所花费的成本 $U_{\text{SoS}}^2 = 25$.

4.3 多维度贡献度评估分析结果

本文选取体系中无人机、固定翼飞机、直升机和搜救快艇这四种主要的救援装备对海上搜救体系的贡献度开展评估.效能部分除了总效能贡献度之外,还对几种重点能力的体系贡献度开展了评估,评估结果如图6所示:

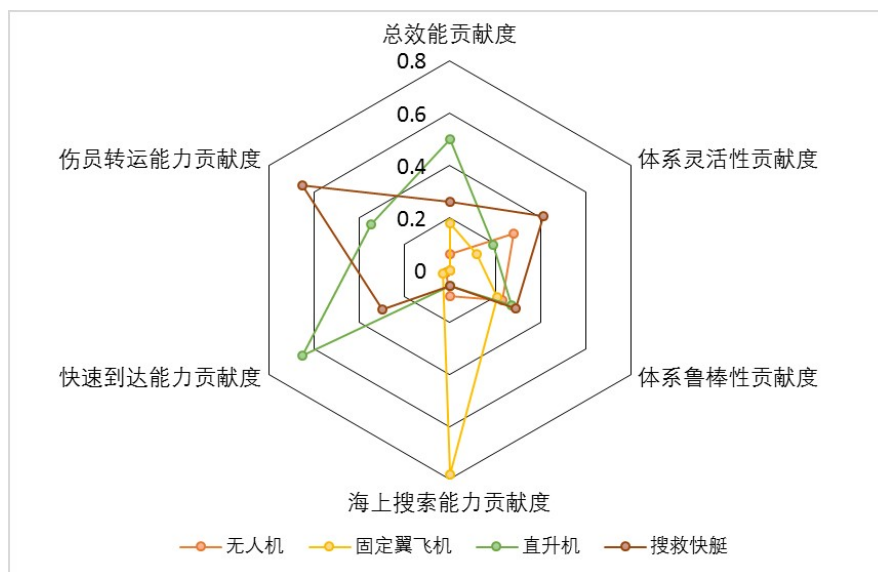


图6 多维度体系贡献度评估结果

Fig. 6 Evaluation results of multidimensional SoS contribution rate

从总的效能维度上看,直升机的贡献度是最高的,其次是搜救快艇,再次是固定翼飞机,最后是无人机.这几个装备的能力侧重存在较大差距,搜救快艇的伤员转运能力贡献度是直升机的两倍以上,但快速到达能力上,直升机是搜救快艇的两倍,在其它能力方面也均有贡献,可见这二者是海上救援体系装备的核心力量.相比较而言,无人机和固定翼飞机的效能贡献度就相对较低.无人机在各个维度的体系能力贡献度均较其它几类救援装备均较低.如果采用传统的单一维度的体系能力评估方法,无人机在整个海上搜救体系中属于多余的装备.但是通过多维度的评估结果,可以看出无人机对体系的灵活性和鲁棒性均有帮助,并且成本相比其它救援装备来说很低.也就是说,通过引入无人机,可以使得执行救援任务有更多的可行方案,并且可以在其它装备发生故障时保障体系能力依然能维持在比较高的水平.而同样从经济性维度上来说,固定翼的投入较大,但对体系来说只在搜索能力上获得了提升,不如其它救援装备经济划算.

从以上的评估分析可以得出如下的优化建议:

- 1) 无人机尽管成本较低,对体系效能的贡献度不大,但无人机是提高体系鲁棒性和灵活性的重要系统,应当适当投入更多成本改进无人机的性能,使其在效能上发挥更大的作用;
- 2) 尽管先期投入的成本较大,但从各方面来看,直升机在海上救援体系中发挥及其重要的作用,应考虑在不影响直升机整体效能的情况下节约其每次执行任务的成本;
- 3) 目前固定翼飞机在海上搜索能力上发挥重要作用,但其它方面作用不大,可以考虑选取性价比更高的搜救一体直升机替代,既能完成搜索任务,又能转运部分伤员,提升体系的鲁棒性.

从上述实例可以看出,相比较传统的效能贡献度分析,多维度体系贡献度除了能比较各个装备的效能贡献多少,同时还能发现在保证方案的灵活性,保障运行鲁棒性以及经费成本上的作用,给出更加全面合理的优化建议.

5 结束语

针对体系评估研究中对多维度评估方法缺乏量化手段的问题,本文在传统多维度评估方法基础上,结合 DoDAF 中任务-能力-系统之间的关系,构建了包含效能、灵活性、鲁棒性和经济性这四重维度下的体系能力评估方法框架,提出基于矩阵映射的体系能力评估模型,并以矩阵范数作为工具计算能力评估值,并引入了贡献度的概念,使得该方法可以分析引入各个系统对体系带来的变化。本研究中以海上救援体系为实例开展了评估,分析了无人机、固定翼飞机、直升机和搜救快艇四种救援装备,从仿真结果中可以看出不同装备对救援体系效能、鲁棒性、灵活性的贡献度大小,相比传统的体系多维度评估方法,量化程度更高,得出更全面更有价值的装备优化建议,为后续开展体系方案设计奠定了基础。目前的研究对各维度之间的相关性以及如何根据评估结果在各维度的评估间进行取舍尚未深入。未来将对体系各个维度之间的关系进行综合分析,进一步提高多维度体系能力评估方法的有效性。

参考文献:

- [1] Fang Z, Moolchandani K, Chao H, et al. A method for emission allowances allocation in air transportation systems from a system-of-systems perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 226: 419–431.
- [2] Mohammadi A, Safdarian F, Mehrtash M, et al. A System of Systems Engineering Framework for Modern Power System Operation: From Smart Power Grids to Intelligent Transportation Networks. Cham: Springer, 2019: 217–247.
- [3] Ruiwen Z, Bifeng S, Yang P, et al. Improved method for subsystems performance trade-off in system-of-systems oriented design of UAV swarms. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2019, 30(4): 720–737.
- [4] 杜永浩, 王 凌, 邢立宁. 空天无人系统智能规划技术综述. *系统工程学报*, 2020, 35(3): 416–432.
Du Y, Wang L, Xing L N. Intelligent planning technologies for unmanned aerospace system: A literature review. *Journal of Systems Engineering*, 2020, 35(3): 416–432. (in Chinese)
- [5] 简 平, 齐 彬, 陈阳阳. 基于算子的武器装备体系效能评估方法及系统. *指挥控制与仿真*, 2020, 283(1): 76–82.
Jian P, Qi B, Chen Y. Operator-based effectiveness evaluation method and system for weapon system of systems. *Command Control & Simulation*, 2020, 283(1): 76–82. (in Chinese)
- [6] 范云龙, 俞志强, 蒋 伟, 等. 防空预警体系雷达装备能力提升贡献度评估研究. *空军预警学院学报*, 2017(6): 436–441.
Fan Y L, Yu Z Q, Jiang W, et al. Evaluation on contribution of radar equipment capability enhancement of air defense early warning system. *Journal of Air Force Early Warning Academy*, 2017 (6): 436–441. (in Chinese)
- [7] 周 鼎, 张 安, 李杰奇, 等. 天基对地武器体系贡献度评估建模与仿真. *电光与控制*, 2017, 24(12) : 5–10.
Zhou D, Zhang A, Li J Q, et al. Evaluating system-of-systems contribution of space-based weapons: Modeling and simulation. *Electronics Optics & Control*, 2017, 24(12): 5–10. (in Chinese)
- [8] 赵丹玲, 谭跃进, 李际超, 等. 基于作战环的武器装备体系贡献度评估. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(10): 2239–2247.
Zhao D, Tan Y J, Li J C, et al. Armament system of systems contribution evaluation based on operation loop. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(10): 2239–2247. (in Chinese)
- [9] De Laurentis D A, Crossley W A, Mane M. Taxonomy to guide systems-of-systems decision-making in air transportation problems. *Journal of Aircraft*, 2011, 48(3): 760–770.
- [10] Curry D M, Dagli C H. A computational intelligence approach to system-of-systems architecting incorporating multi-objective optimization. *Procedia Computer Science*, 2015, 44: 86–94.
- [11] Pape L E. A domain independent method to assess system of system meta-architectures using domain specific fuzzy information. Missouri: Missouri University of Science and Technology, 2016.
- [12] Agarwal S, Pape L E, Dagli C H. A hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization with type-2 fuzzy sets for generating systems of systems architectures. *Procedia Computer Science*, 2014, 36: 57–64.

作者简介:

任天助(1992—), 男, 北京人, 博士生, 研究方向: 体系设计与效能评估, Email: fatianbao@buaa.edu.cn

辛万青(1965—), 男, 江西万载人, 博士, 研究员, 研究方向: 飞行器设计, Email: xinwq1965@163.com

严晔隽(1974—), 男, 山西运城人, 博士, 研究员, 研究方向: 装备体系设计与效能评估, Email: yanxj2003@sina.com

赵鸿宇(1992—), 女, 天津人, 硕士, 工程师, 研究方向: 系统工程与控制理论, Email: 13161120042@163.com