

doi: 10.7690/bgzd.2025.09.017

基于效用约束功能依赖网络的体系效能评估方法

刘子稳^{1,2}, 任天助³, 方哲梅^{1,2}, 秦肖臻^{1,2}

(1. 华中科技大学人工智能与自动化学院, 武汉 430074; 2. 华中科技大学多谱信息处理技术国家级重点实验室, 武汉 430074; 3. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 针对目前体系效能评估方法在复杂依赖关系表征上的不足, 引入功能依赖网络分析法 (functional dependency network analysis, FDNA) 进行效能评估。针对现有 FDNA 相关方法的若干基础性缺陷, 立足效用理论, 提出基于虚拟节点的、满足效用约束的 FDNA 改进方法, 使该方法结构更清晰、逻辑更严谨。防空反导案例验证结果表明, 该改进 FDNA 方法在体系效能评估中具备可行性与有效性。

关键词: 体系; 功能依赖网络; 效能评估; 效用

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Effectiveness Evaluation Method of System of Systems Based on Utility Constraint Function Dependency Network

Liu Ziwen^{1,2}, Ren Tianzhu³, Fang Zhemei^{1,2}, Qin Xiaozhen^{1,2}

(1. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Multi-spectral Information Processing, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Aiming at the deficiency of current system-of-systems effectiveness evaluation methods in the characterization of complex dependencies, the functional dependency network analysis (FDNA) is introduced to evaluate the effectiveness. In view of the basic defects of the existing FDNA methods, based on the utility theory, an improved FDNA method is proposed, which is based on virtual nodes and satisfies the utility constraints, making the structure of the method clearer and the logic more rigorous. Through the case of air defense and anti-missile, the results show that the improved FDNA method has feasibility and effectiveness in the effectiveness evaluation of the system of systems are verified.

Keywords: system-of-systems; functional dependency network; effectiveness evaluation; utility

0 引言

效能表征的是在特定作战条件下完成规定作战任务有效程度的评定和度量, 其反应的是体系执行作战任务的效果, 深刻影响着装备研制方向和指控策略制定, 是构建联合作战能力的重要环节^[1]。

常用的效能评估方法包括层次分析法、概率分析法、影响图法、网络分析法、系统效能分析等^[2-5]。为了捕捉体系 (system of systems, SoS) 的复杂依赖关系, 近些年提出了复杂网络、机器学习、功能依赖网络分析 (FDNA) 等新方法^[6-10]。其中, FDNA 方法^[11]因其简洁、直观的依赖关系表征能力, 在深空探索任务体系^[12]、海上防空反导体系^[13]等领域得到了诸多应用。

FDNA 方法最初用来建模和度量系统功能失效

或退化对整个系统能力产生的涟漪效应, 由 Garvey 等^[11]提出。FDNA 可用于对各种系统的依赖关系建模, 如投入产出经济学领域、关键基础设施风险分析和非平稳时间依赖性分析问题^[14-17]。

Guariniello 等^[12, 18-19]将 FDNA 方法引入体系架构分析并提出基于依赖强度、依赖关键度和依赖影响度的系统操作性依赖分析法, 用于分析和评估深空探索等任务架构。张旺勋^[20]将 FDNA 用于武器装备体系的安全性分析并在 Guariniello 的工作基础上为每条依赖关系引入 1 个健康指数 (health index, HI) 来表示依赖关系的完整情况。浣顺启等^[13, 21]则拓展了 FDNA 方法的依赖关系, 钟庆等^[22-23]提出了若干 FDNA 中关键参数确定方法。

现有研究成果体现了 FDNA 方法在捕捉体系复

收稿日期: 2024-09-18; 修回日期: 2024-10-28

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (62103158)

第一作者: 刘子稳 (1997—), 男, 安徽人, 硕士。

通信作者: 方哲梅 (1986—), 女, 浙江人, 博士。

杂依赖关系上的优势,但仍然存在着诸多问题,如:依赖参数确定仅考虑一对一的单对关系,功能节点自身效能表征的数学严谨性不足,基线操作水平内涵不清晰等。笔者从效用理论出发,通过虚拟节点和受限权重的方式改进现有 FDNA 类方法,使其具有更为清晰的结构和数学逻辑,使该方法更有效地用于作战体系效能评估。

1 FDNA 方法

FDNA 方法采用有向网络表示系统功能及依赖关系,如图 1 所示。其中, $N_1, N_2, \dots, N_h$ 为供给节点, N_j 为接受节点,接受节点依赖于 1 个或多个供给节点,不依赖于其他供给节点的节点称为叶子节点。

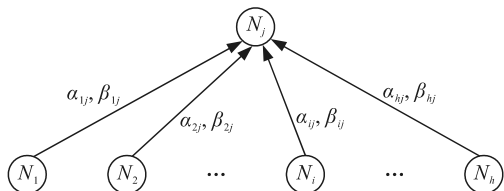


图 1 多供给节点的单层功能依赖网络

FDNA 基于效用理论、偏好理论和风险管理,依据冯·纽曼-摩根斯坦 (Von Neumann-Morgenstern, VNM) 效用的可加性、单调递增和边际效用递减性,将系统功能的性能度量转换为非功能的“可操作性水平”度量,以效用币单位 (util) 在 0~100 util 区间来测算能力效用值。同时,采用 2 个参数来表征接受节点对供给节点的依赖强度 (strength of dependency, SOD) 和依赖关键度 (criticality of dependency, COD)。一对一关系 (如图 1 中的 N_i-N_j 对),接受节点的可操作水平通过式(1)给出。

$$P_j = \text{Min}(\text{SODP}_j, \text{CODP}_j) = \text{Min}(\alpha_{ij}P_i + 100(1 - \alpha_{ij}), P_i + \beta_{ij}) \quad (1)$$

式中: P_i, P_j 分别为节点 N_i, N_j 的可操作性水平; α_{ij}, β_{ij} 分别为节点 N_j 对节点 N_i 的依赖强度和依赖关键度,且有 $0 \leq \alpha_{ij} \leq 1, 0 \leq \beta_{ij} \leq 100, 0 \leq P_i \leq 100, 0 \leq P_j \leq 100$ 。定义接受节点的基线可操作水平 (baseline operability level, BOL) 为 $\text{BOL}_j = 100(1 - \alpha_{ij})$,指的是当供给节点完全不可操作时,接受节点的可操作性水平。

参数 α_{ij} 描述的是在依赖关系作用下,接受节点 N_j 的可操作性水平随着供给节点 N_i 的可操作性水平的增加程度, α_{ij} 值越大则说明接受节点对供给节点的依赖越强,供给节点对接受节点的贡献越大。SOD 捕获了供给节点与接受节点之间依赖关系的影响,

在 BOL 的基础上,提高了接受节点的可操作性水平。参数 β_{ij} 描述的是接受节点 N_j 的可操作性水平受到供给节点 N_i 的制约或牵制, β_{ij} 越小表示供给节点对接受节点的制约作用越强,供给节点对接受节点的依赖关键度越高。在这种制约下,即使其他的供给节点均正常工作,由于 COD 的存在,接受节点 N_j 的可操作性水平受到了限制。COD 决定了接受节点的可操作性水平受到了哪些供给节点的制约,从而下降到 BOL 以下。

在多对一的关系 (如图 1 所示) 下,接受节点的可操作水平计算如式(2)所示,此时接受节点 N_j 。

$$\left. \begin{aligned} \text{BOL}_j &= 100(1 - \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h \alpha_{ij}) \\ P_j &= \text{Min}(\sum_{i=1}^h (\alpha_{ij}P_i + 100(1 - \alpha_{ij})) / h, \text{Min}_{i=1,2,\dots,h} \{P_i + \beta_{ij}\}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

从式(2)可以看出:FDNA 方法的核心思想是“受限平均”,对于多对一的关系来说,式(2)前半部分求取所有供给节点所提供效能的平均值,式(2)后半部分求取制约作用最强的供给节点,之后再从两者选取较小值,体现的是风险管理中的最弱链规则。

2 基于效用理论的 FDNA 探讨与改进

现有的 FDNA 相关方法普遍存在 3 个基础性问题: 1) 假设不同“供给节点-接受节点对”的依赖关系独立,不符合实际运行逻辑; 2) BOL 的概念不清晰; 3) 功能节点自身效能的表达欠缺,且目前提出的一些自身效能表示方法违背了效用理论的约束,笔者将从这 3 方面进行改进。

2.1 问题剖析

2.1.1 依赖强度参数约束以及 BOL 的问题

以图 2 所示的 3 节点功能依赖网络进行说明,其中 N_j 为接受节点, N_i, N_h 为供给节点。

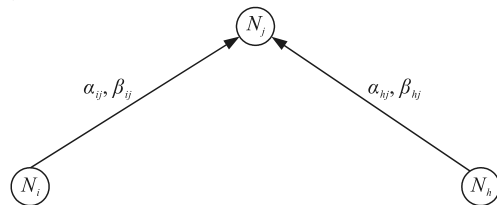


图 2 3 节点 FDNA 网络

接受节点 N_j 效能的计算如式(3)所示,可见描述 SOD 影响下的可操作性函数采用取均值的方式,并未考虑多个供给节点对接受节点效能贡献的比重高低之分,以及比重之间的关系,同时依赖强度参数 α_{ij}, α_{hj} 的取值并没有考虑其他供给-接受节点对。

$$P_j = \text{Min}((\alpha_{ij}P_i + \alpha_{hj}P_h)/2 + \text{BOL}_j, P_i + \beta_{ij}, P_j + \beta_{hj}) \Big\} \circ (3)$$

$$\text{BOL}_j = 100(1 - (\alpha_{ij} + \alpha_{hj})/2)$$

选取 $\alpha_{ij}=0.7$, $\alpha_{hj}=0.9$, $\beta_{ij}=40$, $\beta_{hj}=35$, 接受节点效能 P_j 与 2 个供给节点效能 P_i , P_h 的关系曲面如图 3 所示。

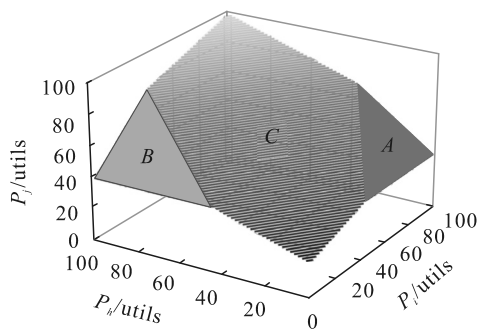


图 3 3 节点 FDNA 网络的效能变化关系

图 3 中, A 部分区域, 节点 N_h 效能较低, 此时节点 N_j 的效能受到节点 N_h 的制约; B 部分区域, 节点 N_i 效能较低, 此时节点 N_j 的效能受到节点 N_i 的制约; C 部分区域则表示此时效能为 2 个供给节点 N_i 和 N_h 所提供效能的平均值。当供给节点 N_i 、 N_h 的效能 N_i 和 P_h 均为 0 时, N_j 的效能 P_j 为 20, 这是由 N_j 的基线运行水平、依赖关键度 β_{ij} 和 β_{hj} 三者中的最小值决定的, 在本示例中即 N_j 的基线运行水平。倘若节点 N_j 完全依赖于供给节点 N_i 和 N_h , 那么当 2 个供给节点的效能值 P_i 、 P_h 为 0 时, 则 P_j 也应当为 0, 而不是 20。另外, 接受节点 N_j 基线运行水平的计算式为 $\text{BOL}_j=100(1-(\alpha_{ij}+\alpha_{hj})/2)$, 仅与依赖参数 α_{ij} 和 α_{hj} 有关, 却未关联到接受节点自身的能力, 若是供给节点数目增多或依赖强度参数值发生变化, 则 N_j 的 BOL 随之发生变化, 这与实际情况不甚符合。从单对供给-接受节点考虑, BOL 应当是自身效能, 但在计算过程中, 却脱离了功能节点自身的特性。笔者考虑将 BOL 从接受节点中剥离出来, 直接构建为节点自身效能, 避免含义的混沌。

2.1.2 现有自身效能表达方式的缺陷

由于原 FDNA 分析的是依赖关系造成的可操作性水平变化以及产生的级联效应, 并未考虑接受节点自身效能变化产生的影响。为此, Guariniello 等^[19]引入了节点自身效能 (self-effectiveness, SE) 参数来表示不考虑任何依赖关系时, 节点自身的效能水平。自身效能 $\text{SE}_j=100$ 表示接受节点自身完美, 没有受到任何损失; $\text{SE}_j=0$ 表示接受节点完全损坏, 此时接受节点效能完全来自于供给节点。一对一关系下

(如图 1 中的 N_i-N_j 对), Guariniello 提出的改进 FDNA 公式如式(4)所示。张旺勋则认为接受节点是整个依赖关系的根本与基础, 他提出的改进自身效能的 FDNA 公式如式(5)所示。

$$P_j = \text{Min}(\alpha_{ij}P_i + \text{SE}(1-\alpha_{ij}), P_i + \beta_{ij}); \quad (4)$$

$$P_j = \text{Min}([\alpha_{ij}P_i + 100(1-\alpha_{ij})]\text{SE}\%, P_i + \beta_{ij}) \circ (5)$$

改进类方法通过引入自主效能, 使得 FDNA 方法能够分析体系中系统自身性能退化、故障、误操作等内部因素以及干扰、攻击等外部因素导致的体系能力变化。

然而, 引入 SE 参数后使得接受节点的效能值范围存在歧义, 对 FDNA 计算结果的理解产生了混淆。以单对供给-接受节点(如图 1 中的 N_i-N_j 对)为例, 选取 $\alpha_{ij}=0.5$, $\beta_{ij}=60$, $\text{SE}_j=80$, 分别采用式(1), (4)和(5), 计算接受节点效能, 绘制接受节点效能-供给节点效能变化的曲线, 如图 4 所示。

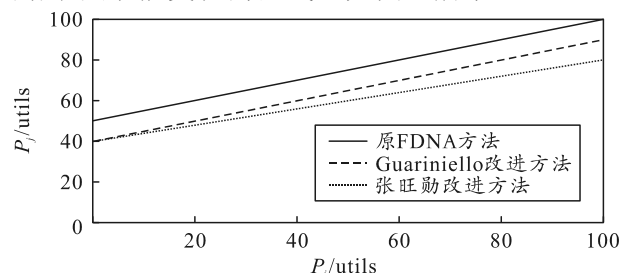


图 4 接受节点效能随供给节点效能变化关系

由图 4 可以看出: Guariniello 和张旺勋所提出的改进 FDNA 方法, 当供给节点效能达到最大值 100 时, 接受节点的效能依然无法达到 100。从效用理论的角度来看, 这意味着即使供给节点提供的效能达到完美, 接受节点的效能仍然达不到最满意的水平。依据 VNM 理论, 任何 FDNA 节点的可操作性水平都应该落在 $[0, 100]$ 区间。究其原因, 是因为 Guariniello 和张旺勋所提出的改进方法中均将 SE 作为结构参数, 这便存在着从根本结构上无法达到满意值的问题。此外, 2 种改进方法将 SE 作为结构参数的同时, 在后续分析实验中, 仍然多次改变 SE 的数值, 这意味着功能依赖网结构的不稳定。为了避免目前的 SE 表达方式导致的结构参数和输入参数相混淆, 笔者考虑将 SE 参数和叶子节点的效能值作为 FDNA 方法的输入。

2.2 改进方法

2.2.1 考虑自身效能的 FDNA

笔者将 BOL 从接受节点中剥离出来, 直接构建节点的自身效能, 将其作为 1 个单独的虚拟的叶子

节点,从而划分了 FDNA 方法中结构参数与输入参数,分析自身效能这一虚拟叶子节点引入功能依赖网络的变化。

对于功能依赖网络中的非叶子节点,依据效用可加性,每个节点的效能可以分为:1) 接受节点自身的效能;2) 供给节点以及依赖关系所提供接受节点的效能。这 2 部分效能无直接关系,互相不会产生影响,二者在数值以及依赖关系的作用下共同决定了接受节点的最终效能。

考虑一对一关系下(如图 1 中的 N_i-N_j 对),引入虚拟节点后的功能依赖网络如图 5 所示。节点 N_j^v 为表示节点 N_j 自身效能的虚拟节点,其效能 SE_j 为接受节点的自身效能,并且有 $0 \leq SE_j \leq 100$ 。当 $SE_j=0$ 时, N_j 自身效能为 0,代表接受节点完全损坏,当 $SE_j=100$ 时,表示接受节点是完美的,并没有遭受任何损伤。

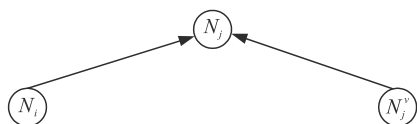


图 5 一对一关系下引入虚拟节点后的功能依赖网络

当功能依赖网络中涉及多节点时,处理的方式与单对供给-接受节点类似,以图 1 所示的多供给节点单层功能依赖网络为例进行说明,将接受节点的自身效能单独作为 1 个供给节点,新的功能依赖网络如图 6 所示,其中虚拟节点 N_j^v 为表示接受节点 N_j 的自身效能的虚拟节点,其效能 SE_j 表示 N_j 的自身效能。

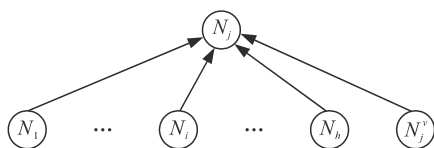


图 6 多对一关系下引入虚拟节点后的功能依赖网络

2.2.2 依赖强度约束的 FDNA

如前文分析,原 FDNA 方法假设不同“供给节点-接受节点对”的依赖关系独立,不符合实际运行逻辑,因此需要改进 FDNA 方法中 SOD 部分的可操作性函数。

以图 2 所示的 3 节点 FDNA 网络进行说明,当节点 N_i 和节点 N_h 对接受节点的效能均没有制约作用时,此时接受节点 N_j 的效能来源于 2 个供给节点,当两者对接受节点的贡献程度相同时,接受节点 N_j 的效能为 $P_j = \text{SODP}_j = P_i/2 + P_h/2$,当二者对贡献程度存在高低差异时,接受节点的实际效能可以按照式

(6)来计算,其中 w_{ij}, w_{hj} 为非负权重,分别代表供给节点 N_i 和 N_h 对接受节点效能贡献的重要程度,取值范围为 $0 \sim 1$,并且有 $w_{ij} + w_{hj} = 1$ 。

$$P_j = \text{SODP}_j = w_{ij}P_i + w_{hj}P_h. \quad (6)$$

式中的 w_{ij}, w_{hj} 与原 FDNA 中依赖强度概念有所相似但是又有不同。依赖强度 α_{ij} 表示接受节点 N_j 对供给节点 N_i 的依赖强度,取值范围为 $0 \sim 1$,但是 α_{ij} 参数的制定只与接受节点 N_j 和供给节点 N_i 有关,并没有考虑 N_j 的另外 1 个供给节点 N_h ;而 w_{ij} 和 w_{hj} 的含义是 2 个供给节点对效能贡献的重要程度,是综合考虑所有供给节点的结果,这也是式(6)中存在约束 $w_{ij} + w_{hj} = 1$ 的原因。

至于 COD 部分,笔者依然遵循原 FDNA 的最弱链原则,最终得到图 2 所示的 3 节点网络的效用函数如式(7)所示:

$$P_j = \min(w_{ij}P_i + w_{hj}P_h, P_i + \beta_{ij}, P_h + \beta_{hj}). \quad (7)$$

式(7)的核心思想是“受限加权平均”,前半部分求取供给节点提供效能的加权平均值,后半部分依然求取制约作用最强的供给节点,之后再从两者选取较小值。图 7 展示了式(7)所示的接受节点 N_j 的效能 P_j 随供给节点效能 P_i, P_h 变化的关系,其中 $w_{ij}=0.44, w_{hj}=0.56, \beta_{ij}=40, \beta_{hj}=35$ 。

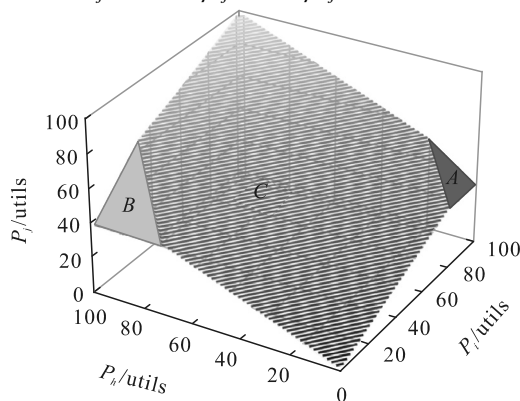


图 7 3 节点 FDNA 网络效能变化关系

根据图 7 所示, A 区域的节点 N_h 效能较低,此时节点 N_j 的效能受到节点 N_h 的制约; B 区域的节点 N_i 效能较低,此时节点 N_j 的效能受到节点 N_i 的制约; C 区域则表示此时效能为 2 个供给节点 N_i 和 N_h 所提供效能的平均值。由于笔者改进的方法在形式上杜绝了 BOL 的存在,因此可以看到当供给节点的效能均为 0 时,接受节点的效能为 0。

2.2.1 节,介绍了用虚拟节点表示节点自身效能的方法,在这里说明如何采用受限权重的 FDNA 方法计算节点效能。对于图 5 所示的功能依赖网,依据式(7)可以得出节点 N_j 的效能如式(8)所示:

$$P_j = \text{Min}(\omega_{ij}P_i + \omega_{jj}^v \text{SE}_j, P_i + \beta_{ij}, \text{SE}_j + \beta_{jj}^v). \quad (8)$$

式中： ω_{ij} 、 ω_{jj}^v 分别为供给节点提供的效能、接受节点自身效能对接受节点最终效能的贡献程度； SE_j 为虚拟节点 N_j^v 的效能，即接受节点 N_j 的自身效能； β_{ij} 为节点 N_j 自身效能对 N_j 最终效能的制约，并且有 $0 \leq \omega_{ij}, \omega_{jj}^v \leq 1$ ， $\omega_{ij} + \omega_{jj}^v = 1$ ， $0 \leq \beta_{ij}, \beta_{jj}^v \leq 100$ 。式(8)的含义是接受节点的效能等于供给节点效能以及自身效能的加权和，此外还受到供给节点效能以及自身效能的制约。相较于FDNA方法，笔者提出的方法可通过参数 β_{jj}^v 来表现节点自身效能对最终效能的制约程度。

对于图6所示的多对一关系下，节点 N_j 的效能的计算如式(9)所示，其中 $\sum_{i=1}^h w_{im}P_i + w_{jj}^v = 1$ 。

$$P_j = \text{Min} \left(\sum_{i=1}^h w_{im}P_i + w_{jj}^v \text{SE}_j, \text{Min} \{P_i + \beta_{im}\}, \text{SE}_j + \beta_{jj}^v \right). \quad (9)$$

3 示例分析

3.1 单舰队防空反导体系

参考美军的海军综合火控-防空(naval integrated fire control-counter air, NIFC-CA)系统^[24]，构建单航母舰队防空反导体系。典型作战场景为：2架F-35战斗机利用其隐身能力深入到敌方空域利用传感器收集情报、监视和侦察数据；当F-35探测到目标时，将目标航迹传递给E-2D预警机，以及F/A-18战斗机；E-2D通过协同作战能力(cooperative engagement capability, CEC)网络将信息送给CVN航母和DDG驱逐舰；EA-18G电子战飞机利用干扰器进行远程干扰降低敌方预警雷达的能力；多个F/A-18对任务目标进行协同战略打击；UCLASS无人飞机利用空中加油来延伸F/A-18的打击能力。

3.2 构建功能依赖网络

依据文献[13, 20]所提出的解决FDNA网络中环形依赖的方法，将防空反导体系中的各装备依据功能进行分解，分为探测(S)、打击(I)、指控(D)、保障(A)等功能节点，以及能力节点(Cap)，建立如图8所示的功能依赖网络。考虑各节点自身效能，在图8中引入虚拟节点，新的功能依赖网络如图9所示，对应的各节点的信息如表1所示。

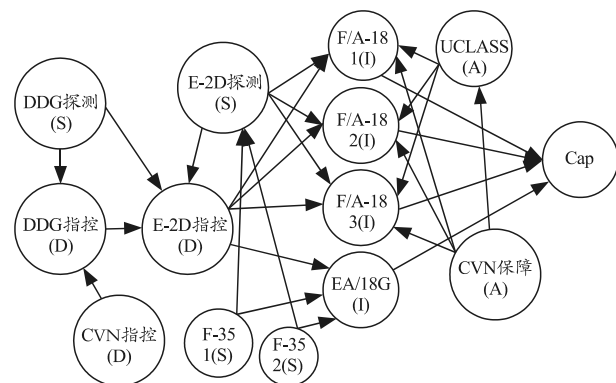


图8 单舰队航母体系功能依赖网络

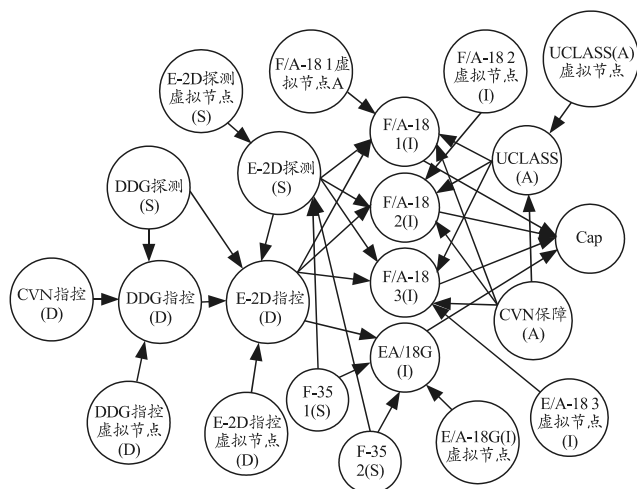


图9 引入虚拟节点后的功能依赖网络

表1 图9所示的功能依赖网络中的节点信息

编号	节点名称	节点含义
1	CVN 指控	航母指控功能节点
2	CVN 保障	航母保障功能节点
3	UCL 保障虚拟节点	UCL 保障节点自身效能
4	DDG 探测	驱逐舰探测功能节点
5	DDG 指控虚拟节点	驱逐舰指控节点自身效能
6	E2D 探测虚拟节点	预警机探测功能节点自身效能
7	E2D 指控虚拟节点	预警机指控功能节点自身效能
8	EA-18G 打击虚拟节点	电子战飞机打击节点自身效能
9	F/A-18 打击 1 虚拟节点	第1架 F/A-18 打击节点自身效能
10	F/A-18 打击 2 虚拟节点	第2架 F/A-18 打击节点自身效能
11	F/A-18 打击 3 虚拟节点	第3架 F/A-18 打击节点自身效能
12	F-35 探测 1	第1架 F-35 探测功能节点
13	F-35 探测 2	第2架 F-35 探测功能节点
14	UCL 保障	UCL 保障功能节点
15	DDG 指控	驱逐舰指控功能节点
16	E2D 探测	预警机探测功能节点
17	E2D 指控	预警机指控功能节点
18	EA-18G 打击	电子战飞机打击节点
19	F/A-18 打击 1	第1架 F/A-18 打击节点
20	F/A-18 打击 2	第2架 F/A-18 打击节点
21	F/A-18 打击 3	第3架 F/A-18 打击节点
22	Cap	体系的总能力

FDNA方法中的依赖参数可以通过历史数据或者专家经验来获得^[25]，图9所示网络的SOD以及COD矩阵，分别如下所示。

[illegible]

3.3 验证分析

以表 1 中编号 22 节点效能值作为整个作战体系的效能，在多种场景下，验证该方法的合理性与可行性。

1) 假设叶子节点的效能值为 100，其余所有节点的自身效能 SE 也均为 100。此时计算体系效能值为 100，与 2.2.1 节的分析结果保持一致，该方法将 SE 参数作为输入参数时，体系的最大效能值为 100，为最理想的场景。

2) 引入节点自身效能后，可以采用 FDNA 方法分析体系中关键节点。假设网络中叶子节点的效能值为 80，其余节点的自身效能为 100，此时体系效能值为 92.82。分别计算各节点失效即自身效能 SE 降为 0 时，作战体系效能(节点 22 的效能值)下降的幅度，结果如图 10 所示。

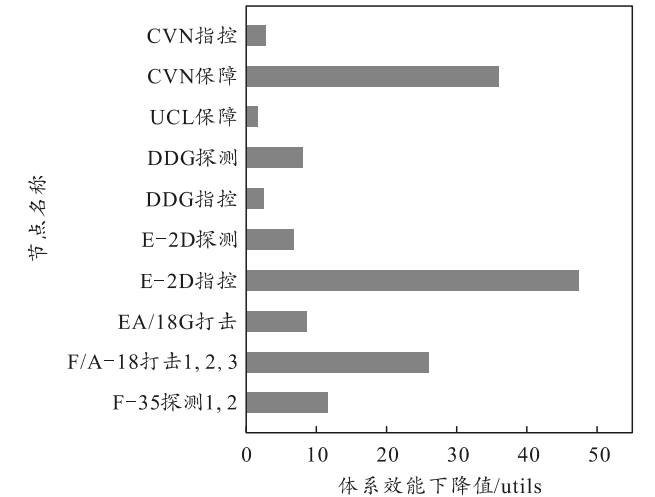


图 10 各节点失效时，体系效能下降的绝对值

从图 10 可以看出：当功能依赖网络中节点失效时，使得体系效能下降最大的节点为 E-2D 指控节点，下降的最大值为 47.38，这主要是由于 E-2D 指控节点直接与 3 架战斗机 F/A-18 以及电子战飞机 EA/18G 连接，因此当 E-2D 指控节点失效时，体系中的 4 个打击节点效能降低，从而导致体系总的效能值降低。除此之外，CVN 保障节点、F/A-18 打击、F-35 探测等节点在作战体系中也属于较为关键的节点。

3) 在分析 2) 中得知该体系的关键节点为 E-2D 指控节点，分析该节点对应系统遭受打击导致功能降级时，对体系内其他节点效能的影响。假设网络中叶子节点的效能值为 80，其余节点的自身效能为 100，此时体系效能值为 92.82。当系统 E-2D 的自主效能降低时(即节点 6、7 的自主效能同时降

低时)，体系内节点 18，节点 19(节点 20、21)与节点 22 效能值(体系最终效能)的变化如表 2 所示。

表 2 E-2D 自身效能改变时，相关节点的效能值 utils

E-2D 效能	节点 18 效能	节点 19(20,21)效能	节点 22 效能
0	53.00	44.00	45.44
10	63.00	54.00	55.44
20	73.00	64.00	65.44
30	83.00	74.00	75.44
40	86.00	84.00	84.39
50	88.49	87.24	87.44
60	89.29	88.37	88.52
70	90.29	89.50	89.59
80	90.89	90.62	90.67
90	91.70	91.75	91.74
100	92.50	92.88	92.82

由表 2 可以看出：当系统 E-2D 预警机功能降级时，对节点 19、20、21 的影响最大，并通过节点 19、20、21 影响了体系的最终效能。

从上述分析可知，笔者所提出的改进方法在提升数学严谨性的同时，依然具有在防空反导体系效能评估中的有效性和适用性。

4 结论

体系效能评估是决策者对于体系能力满意度的综合测评，是装备体系论证设计、集成、服役等阶段的核心问题。FDNA 方法因其直观性和简洁性，在体系效能评估领域得到不少应用，然而该方法依然存在诸多问题和不足。笔者深入剖析当前 FDNA 类方法中存在的若干基础性问题，并为此从效用理论的角度提出基于虚拟节点和受限加权平均的改进 FDNA 方法，以缓解 BOL 概念不清、违背效用理论等问题。同时，通过单航母舰队防空反导案例验证该方法在防空反导体系效能评估中的有效性。

在后续工作中，将进一步从效用和生产函数的角度探索 FDNA 可操作性函数模型，以更好地表征体系中错综复杂的依赖关系和聚合效应。同时，将构建性能指标、效能指标、效能聚合的一体化评估模型，将 FDNA 改进方法真正落实于仿真和评估模型中，以切实解决体系效能评估难题。

参考文献：

[1] 胡晓峰, 杨镜宇, 司光亚, 等. 战争复杂系统仿真分析与实验[M]. 北京: 国防大学出版社, 2008.

[2] HAN S Y, DELAURENTIS D. Development interdependency modeling for system-of-systems(SoS) using Bayesian networks: SoS management strategy planning[J]. Procedia Computer Science, 2013, 16: 698-707.

[3] SUN J, GE B, LI J, et al. Operation network modeling with degenerate causal strengths for missile defense

- systems[J]. IEEE Systems Journal, 2016, 12(1): 274-284.
- [4] 杨建, 董岩, 边月奎, 等. 联合作战背景下的体系效能评估方法[J]. 科技导报, 2022, 40(4): 106-117.
- [5] 张弛, 殷璐嘉. 指挥信息系统的 SEA 效能评估方法[J]. 信息化研究, 2016, 42(2): 13-16.
- [6] FANG Z. System-of-Systems Architecture Selection: A Survey of Issues, Methods, and Opportunities[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(3): 4768-4779.
- [7] 刘德胜. 基于复杂网络分析方法的作战体系评估研究综述[J]. 军事运筹与系统工程, 2020, 34(3): 66-73.
- [8] KANG B G, SEO K M, KIM T G. Communication analysis of network-centric warfare via transformation of system of systems model into integrated system model using neural network[J]. Complexity, 2018(6): 1356.
- [9] 李妮, 李玉红, 龚光红, 等. 基于深度学习的体系作战效能智能评估及优化[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(8): 1425-1435.
- [10] LI J, ZHAO D, JIANG J, et al. Capability Oriented Equipment Contribution Analysis in Temporal Combat Networks[J]. Man, and Cybernetics, 2021, 51(2): 696-704.
- [11] GARVEY P R, PINTO C A. Introduction to functional dependency network analysis[C]// Second International Symposium on Engineering Systems. Massachusetts: MITRE, Cambridge, 2009.
- [12] GUARINIELLO C, GRANDE M, BRAND C, et al. Quantifying the impact of systems interdependencies in space systems architectures[C]//International Astronautical Congress. IEEE, 2019.
- [13] 浣顺启, 方哲梅, 王剑波. 基于功能依赖网的体系效能评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(7): 2191-2200.
- [14] COSTA A, MCSHANE M K, PINTO C A. Investigating interbank contagion with agent-based modeling and functional dependency network analysis (fdna)[J]. delete, 2015(26): 8937.
- [15] TATAR U, SANTOS J R, THEKDI S A. Managing Physical and Economic Risk for Systems with Multidirectional Network Interdependencies[J]. Risk Analysis, 2022, 42(5): 1106-1123.
- [16] DRABBLE B. Information propagation through a dependency network model[C]//International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS). IEEE, 2012: 266-272.
- [17] GARVEY P R, PINTO C A, SANTOS J R. Modelling and measuring the operability of interdependent systems and systems of systems: advances in methods and applications[J]. International Journal of System of Systems Engineering, 2014, 5(1): 1-24.
- [18] GUARINIELLO C, DELAURENTIS D. Dependency Analysis of System-of-Systems Operational and Development Networks[J]. Procedia Computer Science, 2013, 16: 265-274.
- [19] GUARINIELLO C, DELAURENTIS D. Supporting design via the System Operational Dependency Analysis methodology[J]. Research in Engineering Design, 2017, 28: 53-69.
- [20] 张旺勋. 基于复杂交互网络的武器装备体系安全性分析方法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- [21] LUO A M, YI S, LIU J, et al. An Improved Functional Dependency Network Model for Information Systems Effectiveness Analysis[C]//Proceedings of the International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks. IEEE, 2020: 56-59.
- [22] 钟庆, 周剑雄, 秦肖臻, 等. 体系效能的功能依赖网络分析[J]. 兵工自动化, 2017, 36(6): 52-55.
- [23] 孙丽杰, 王剑波, 罗云峰, 等. 体系功能依赖网络参数获取及应用[J]. 兵工自动化, 2018, 37(1): 40-44, 54.
- [24] GRAY F, L'HOMMEDIEU W. A Combat-Effectiveness Approach to Information Assurance[C]//US Air Force T&E Days. IEEE, 2010: 1748.
- [25] 浣顺启. 基于改进 FDNA 方法的体系效能评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.