

doi: 10.7690/bgzd.2018.01.010

体系功能依赖网络参数获取及应用

孙丽杰, 王剑波, 罗云峰, 王明哲

(华中科技大学自动化学院, 武汉 430074)

摘要: 为获取功能依赖网络分析 (functional dependency network analysis, FDNA) 依赖强度参数 α 和依赖关键度参数 β , 提出一种基于邻接矩阵和可达矩阵的求解功能依赖网络中依赖强度和依赖关键度参数方法。在 Petri 网出现图的基础上, 给出定量求解依赖强度和依赖关键度参数的公式, 并通过体系效能依赖强度和依赖关键度的求解实例和体系效能敏感性分析进行验证评估。结果表明: 该方法是合理、可行的, 能弥补当前 FDNA 应用研究中的不足。

关键词: 功能依赖网络分析; Petri 网; 出现图; 依赖强度; 依赖关键度; 敏感性分析

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Acquisition and Application of Functional Dependency Network Parameters for System of Systems

Sun Lijie, Wang Jianbo, Luo Yunfeng, Wang Mingzhe

(School of Automation, Huazhong University of Science Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to acquire the functional dependency network analysis (FDNA) strength of dependency (SOD) parameter α and criticality of dependency (COD) parameter β , this paper proposed a method to analyze the SOD and COD parameters through adjacency matrix and reachability matrix. Based on the occurrence graph in Petri net, proposed formulas to calculate SOD and COD parameters, and the results are validated by the solving examples of the system of systems effectiveness SOD and COD parameters and its sensitivity analysis. The results show that the method is reasonable and feasible, which can make up the deficiency of the current FDNA application research.

Keywords: functional dependency network analysis; Petri net; occurrence graph; strength of dependency; criticality of dependency; sensitivity analysis

0 引言

体系 (system of systems, SoS) 作为当今复杂工程系统的一类主要研究对象, 体系效能评估方法研究已经成为近年来系统工程领域的一个热点议题。其中, 由美国迈特公司首席科学家 Paul R. Garvey 博士和老道明大学 Pinto 教授共同提出的一种面向体系效能评估的功能依赖网络分析法^[1-2]受到人们普遍关注。例如, 美国普渡大学航空航天学院的 Cesare Guariniello 博士等对功能依赖网络分析 (functional dependency network analysis, FDNA) 开展了应用研究^[3], 对原 FDNA 效能计算公式进行了改进^[4], 将自主效能这一概念加进原有公式中, 并分析某一组件系统可操作水平 (效能值) 下降后对体系效能的影响。Cesare Guariniello 博士还研究了开发依赖网络分析 (development dependency network analysis, DDNA) 的 FDNA 应用^[5], 以濒海作战体系开发演进为例, 分别从鲁棒性、韧性和适应性 3 个方面比较不同的体系方案能力。国内国防科技大学的张旺勋、李群等也对原 FDNA 效能计算公式进

行了改进^[6], 并在 FDNA 的基础上从体系的角度研究卫星导航系统安全性的建模方法^[7-8]。但他们对 FDNA 中的 SOD 参数 α 和 COD 参数 β 的分析和获取缺乏研究, 应用 FDNA 的文献^[3-4]中往往把 α 和 β 作为已知条件给出, 却并未指明给定的依据; 或者是根据系统运行原理、专家经验知识^[7]给出, 并没有给出主观判断的依据和步骤。因此, 通过模型仿真定量分析, 获取 SOD 和 COD 参数值以弥补当前 FDNA 应用研究中的不足, 成为研究的主题。笔者提出的基于体系结构仿真分析获取体系 FDNA 参数 α 和 β 的方法, 同样对于分析体系的容忍度、敏感性和韧性等方向研究都具有重要意义。

1 FDNA 简介

基于风险管理中的效用理论和最弱环规则的 FDNA 体系效能评估方法, 从构成体系 (SoS) 功能依赖网络 FDNA 模型的物理功能节点或虚拟非功能节点的可操作水平出发, 定义了影响和决定节点效能的 SOD 和 COD。其中, SOD 是接受节点的可操

收稿日期: 2017-09-27; 修回日期: 2017-11-02

基金项目: 国家自然科学基金 (61273207) 资助课题

作者简介: 孙丽杰 (1990—), 女, 河南人, 硕士, 从事系统建模、仿真与评价研究。

作水平依赖供给节点可操作水平的强度，反映供给节点对接受节点可操作水平的贡献。COD 是供给节点为接受节点实现其可操作水平目标贡献的关键程度，表示接受节点可操作水平受供给节点可操作水平的制约程度，体现“最弱环规则”。

图 1 为功能依赖网络的简单实例。文献[1]给出了 FDNA 的效能计算公式，考虑到节点自主效能的影响，文献[4]给出了改进后 FDNA 效能计算公式。

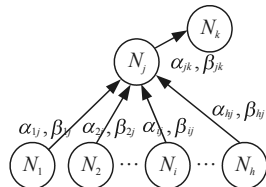


图 1 FDNA 依赖模型案例

针对图 1 中节点 N_j 的效能，用改进的 FDNA 效能计算公式如下：

$$O_j = \min(\text{SOD}_{O_j}, \text{COD}_{O_j}) \quad (1)$$

其中：

$$\text{SOD}_{O_j} = \text{Average}(\text{SOD}_{O_{j1}}, \text{SOD}_{O_{j2}}, \dots, \text{SOD}_{O_{jh}}) \quad (2)$$

$$\text{COD}_{O_j} = \min(\text{COD}_{O_{j1}}, \text{COD}_{O_{j2}}, \dots, \text{COD}_{O_{jh}}) \quad (3)$$

$$\text{SOD}_{O_{ji}} = \alpha_{ij} O_i + SE_j \times (1 - \alpha_{ij}) \quad (4)$$

$$\text{COD}_{O_{ji}} = O_i + \beta_{ij} \quad (5)$$

$$Q_i = SE_i (i=1, 2, \dots, h) \quad (6)$$

式中： α_{ij} 是节点 N_i 和节点 N_j 间的依赖强度，且 $0 \leq \alpha_{ij} \leq 1$ ； β_{ij} 是节点 N_i 和节点 N_j 间的依赖关键度，且 $0 \leq \beta_{ij} \leq 100$ ； O_i 和 O_j 分别为节点 N_i 和节点 N_j 的效能，且 $0 \leq O_i, O_j \leq 100$ ； SE_i 为节点 N_i 的自主效能，且 $0 \leq SE_i \leq 100, i=1, 2, \dots, 100$ 。

2 基于结构分析的 SOD 和 COD 参数估计

从式(1)–(6)可以看出：SOD 是各供给节点效能加权和，具有并行依赖关系特征，COD 取决于供给节点中最弱节点的效能，体现了链式依赖关系结构。所以，SOD、COD 与体系中组件系统的功能依赖关系结构紧密关联。为此，笔者试图通过体系结构视图模型建立可执行体系结构 Petri 网模型和体系功能依赖网络模型。进而由 Petri 网模型仿真得到的出现图(状态转移图)建立体系节点依赖关系矩阵。通过依赖关系矩阵的分析和仿真计算，能较客观地确定体系节点间的 SOD 和 COD 参数。

2.1 建立体系功能依赖网络

文献[1]中规定功能依赖网络中的节点为能力

节点或物理节点，笔者讨论功能依赖网络中的节点为物理节点的情况，提出体系功能依赖网络参数获取的简单步骤：1) 依据 DoDAF V2.0 框架视图^[9]中的系统视图规范功能依赖网络中节点的选取。系统视图模型 SV-1 描述体系结构中的组件系统，选择 SV-1 中的组件系统作为功能依赖网络中的节点。2) 依据 Petri 网的关联矩阵^[10]建立功能依赖网络中节点间的依赖关系。Petri 网中库所表示资源信息，变迁表示活动。根据系统视图的 SV-5b，将选取的物理节点与操作视图的 OV-5b 中作战活动即 Petri 网的关联矩阵相对应。3) 将关联矩阵按照节点进行行列变换和分块，根据分块好的关联矩阵中节点间库所交互判断节点间的依赖关系。4) 通过 Petri 网仿真，确定节点间的 SOD 和 COD 参数。下文以防空体系(air intruder, AI)为例，详细阐述 SOD 和 COD 参数的求取。

防空体系包括情报监视和侦察系统、指挥中心、控制系统和截击机。防空体系用于保卫特定区域、抵御敌方空中入侵，当敌机被侦测到，截击机将被派出执行拦截任务，其作战概念图如图 2 所示。

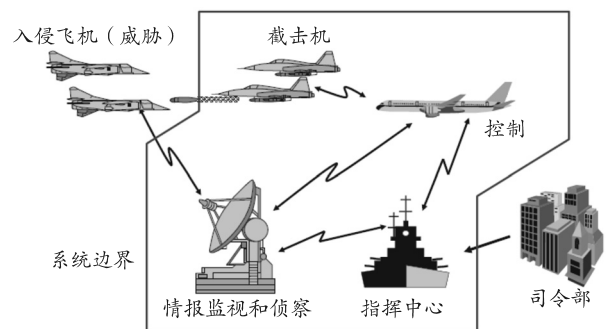


图 2 AI 作战概念

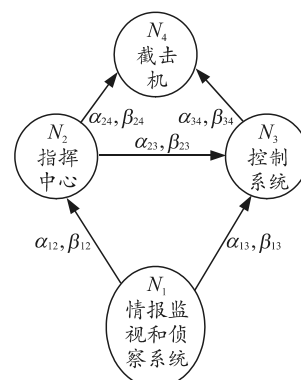


图 3 AI 功能依赖网络

首先确定体系的节点：情报监视和侦察系统节点为 N_1 、指挥中心节点为 N_2 、控制系统节点为 N_3 和截击机节点为 N_4 。从防空体系的可执行模型 CPN 中得到其关联矩阵并将其按上述节点进行行列变换

和分块，然后根据节点间库所的交互画出其功能依赖网络如图 3 所示。

2.2 出现图的邻接矩阵和可达矩阵

出现图^[11]包含了体系的初始状态、所有可达状态和可能的触发序列，它表示了体系中的资源信息在可能的触发序列下的所有可能状态。若只考虑这些可能状态是否连接，而不考虑这些连接关系的具体含义，由程序自动将 Petri 网模型的出现图(状态转移图)转换为一个邻接图 $C=(c_{ij})_{N \times N}$ 。其中： N 为体系状态数； c_{ij} 表示邻接图中状态 i 和状态 j 之间是否有直接相连，若直接相连，则 $c_{ij}=1$ ，否则 $c_{ij}=0$ 。然后通过邻接矩阵的幂乘即可得到所有可能状态的

可达矩阵 $R=C+C^2+C^3+\dots$ 。

现考虑出现图中状态间连接关系的含义。状态的改变是由一系列绑定单元的触发导致的，这些绑定单元反映到可执行模型 CPN 中是变迁及其约束，即活动支撑着体系中资源信息的流动。参照 FDNA 功能依赖网络模型，容易将邻接矩阵 C 和可达矩阵 R 按照 FDNA 节点分类，即对其进行行列变换和分块调整，得到直接反应体系节点依赖关系的邻接矩阵 $C^0=(C_{ij}^0)_{n \times n}$ 和可达矩阵 $R^0=(R_{ij}^0)_{n \times n}$ ，其中 n 表示功能依赖网络中节点的个数， C_{ij}^0 、 R_{ij}^0 分别表示节点 i 和节点 j 之间的邻接矩阵和可达矩阵。

以上述防空体系为例，其出现图如图 4 所示。

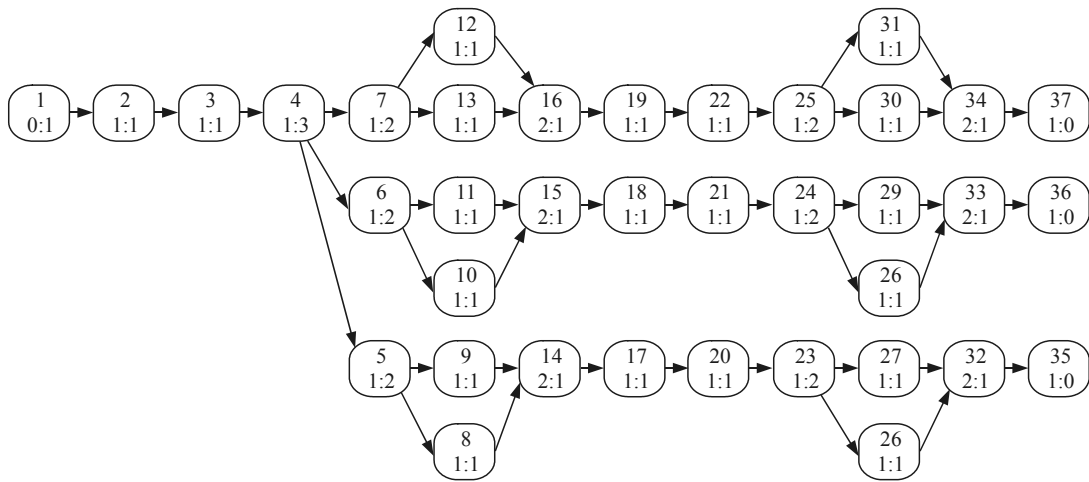


图 4 AI 出现图

由图 4 可以看出，该出现图的邻接矩阵是一个 37×37 的矩阵，表示如下：

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

矩阵 C 连续幂乘得到该出现图的可达矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

将图 4 中的出现图按照图 3 中功能依赖网络中

节点的活动进行划分，可得到出现图中的状态 1、2、3、14、15、16、17、18、19、32、33、34、35、36、37 为情报监视和侦察系统 N_1 节点的所有可能状态，状态 3、5、6、7、9、11、13、17、18、19、23、24、25、27、29、31 为指挥中心 N_2 节点的所有可能状态，状态 4、20、21、22 为控制系统 N_3 节点的所有可能状态，状态 5、6、7、8、9、10、11、12、13、23、24、25、26、27、28、29、30、31 为截击机 N_4 节点的所有可能状态。根据划分后的状态对邻接矩阵 C 和可达矩阵 R 进行行列变换和分块调整，可得到每个节点变换后的邻接矩阵 C^0 和可达矩阵 R^0 。其中，控制系统 N_3 节点和截击机 N_4 节点间的邻接矩阵 C_{34}^0 和可达矩阵 R_{34}^0 是一个 4×18 的矩阵，表示如下：

$$C_{34}^0 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}；$$

$$R_{34}^0 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}。$$

2.3 结构化分析 SOD 参数 α 和 COD 参数 β

α 表示供给节点 N_i 对接受节点 N_j 可操作水平(效能)的贡献。依据邻接矩阵和可达矩阵中的 C_{ij}^0 、 R_{ij}^0 ，分别将节点 N_i 中的作战状态分离出对接收节点 N_j 可操作水平(效能)有贡献的状态数目。节点 N_i 中的作战状态对节点 N_j 效能关联状态越多，则供给节点对接收节点的贡献度越大。

由此，根据划分后的邻接矩阵，由下式估算 SOD 参数：

$$\alpha = \frac{CN_{ij}}{CC_i} = \frac{CN_{ij}}{\sum C_{ii}^0}。 \quad (7)$$

式中： C_{ii}^0 表示节点 N_i 的分块矩阵； CN_{ij} 为供给节点 N_i 对接受节点 N_j 效能有贡献的状态数，可用程序从节点 N_i 和 N_j 的分块可达矩阵 R_{ij}^0 ，判断节点 N_i 中哪些状态对接受节点 N_j 效能有贡献， $CC_i = \sum C_{ii}^0$ 为供给节点 N_i 所有作战状态数。

所谓关键度 β 是供给节点 N_i 对接受节点 N_j 可操作水平的关键性度量，即接受节点 N_j 效能可能受到节点 N_i 贡献的因果链关系制约。如果接受节点 N_j 效能完全依赖于节点 N_i 的贡献，也就完全取决于节点 N_i 可操作水平(效能)，则在 FDNA 受限加权平均(LWA)计算中 $\beta=0$ (util)。如果供给节点和接受节点之间没有链式关系制约，则 $\beta=100$ (util)。

供给节点和接受节点间的这种受链式依赖关系制约表现在邻接矩阵和可达矩阵的连通路数数目上，由此给出 COD 参数 β 估算式如下：

$$\beta_{ij} = \frac{CC_{ij}}{SCC_{ij}} \times 100 = \frac{\sum C_{ij}^0}{SCC_{ij}} \times 100。 \quad (8)$$

式中 $CC_{ij} = \sum C_{ij}^0$ 是节点 N_i 对接受节点 N_j 效能有连接(路径)数， SCC_{ij} 为基于分块矩阵 C_{ij}^0 获得的节点 N_i 与 N_j 所有可能连接路径数。

以上述防空体系为例，根据划分后的邻接矩阵 C 和可达矩阵 R ，可得到图 3 中的 SOD 参数 α 和 COD 参数 β ，具体结果计算如下：

$$\alpha_{12} = \frac{CN_{12}}{CC_1} = \frac{CN_{12}}{\sum C_{11}^0} = \frac{9}{15} = 0.6；$$

$$\beta_{12} = \frac{CC_{12}}{SCC_{12}} \times 100 = \frac{8}{15 \times 16} \times 100 = 3.3。$$

同理可得：

$$\begin{aligned} \alpha_{13} &= 1, \beta_{13} = 6.25； \\ \alpha_{23} &= 0.625, \beta_{23} = 28.125； \\ \alpha_{24} &= 0.9375, \beta_{24} = 10.4； \\ \alpha_{34} &= 1, \beta_{34} = 3.125。 \end{aligned}$$

3 体系敏感性分析

敏感性分析^[12-13]就是假设模型表示为 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ (x_i 为模型的第 i 个属性值)，令每个属性在可能的取值范围内变动，研究和预测这些属性的变动对模型输出值的影响程度。将影响程度的大小定义为该属性的敏感性系数。敏感性系数越大，说明该属性对模型输出的影响越大。同样可通过邻接矩阵和可达矩阵的仿真对体系进行敏感性分析。

由上述 FDNA 效能计算公式可知，在确定了体系中的 SOD 和 COD 的参数后，影响接受节点效能的因素有节点的自主效能和供给节点的效能。

对图 1 中影响节点 N_j 效能的 2 个因素分别进行敏感性分析。确定节点 N_j 的自主效能对其效能的影响时，使供给节点 N_1, N_2, \dots, N_h 的效能分别从 0~100 变化，根据 FDNA 效能计算公式计算节点 N_j 的效能并将 N_j 效能的最大值和最小值的差求和，取其平均值为节点 N_j 自主效能的敏感性系数 S ，计算公式为：

$$S = \frac{1}{101} \sum_{SE_j=0}^{100} (\max O_j - \min O_j)。 \quad (9)$$

确定供给节点 N_1, N_2, \dots, N_h 中 N_i 节点的效能变化对接受节点 N_j 效能的影响时，除 N_i 节点外的其余 $h-1$ 个供给节点的效能在 0~100 内取某一定值，然后使得 N_i 节点的效能和接受节点 N_j 的自主效能分别服从 0~100 变化，根据 FDNA 效能计算公式计算出节点 N_j 的效能并将 N_j 效能最大值和最小值的差求和，取其平均值为供给节点 N_i 效能的敏感性系数，计算公式为：

$$S = \frac{1}{101} \sum_{O_i=0}^{100} (\max O_j - \min O_j)。 \quad (10)$$

以“地基中段导弹防御系统(ground-based midcourse defense, GMD)”体系为例，建立体系功能依赖网路，如图 5 所示。该体系由预警卫星(N_1)、C2BMC(N_2)、预警雷达(N_3)、FBX 雷达(N_4)、SBX 雷达(N_5)和 GBI(N_6)组成。图中的箭头表示他们之间存在信息和数据依赖关系：预警卫星发现目标，将目标信息发送给 C2BMC，C2BMC 引导 SBX 雷达跟踪目标，SBX 雷达引导 GBI 中制导，C2BMC

控制 GBI 发射制导，预警雷达和 FBX 雷达将探测到的目标信息发给 C2BMC。

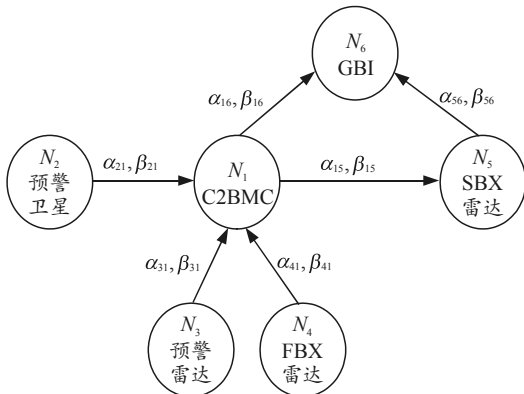


图 5 GMD 功能依赖网络

依据作战概念图 OV-1、作战活动模型 OV-5b、作战规则 OV-6a 和逻辑数据模型 DIV-2 建立可执行体系结构着色 Petri 网 (CPN) 模型，仿真得到 GMD 的出现图。通过程序读取得到其邻接矩阵和可达矩阵是 $1\ 125 \times 1\ 125$ 的矩阵，分别对其进行行列变换和划分。其中，每个节点的状态数目如表 1 所示。

表 1 各节点状态数目

节点	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6
状态数	110	125	258	135	363	151

根据式(7)和(8)即可得到图 5 中的 SOD 和 COD 参数，计算如下：

$$\alpha_{21} = \frac{CN_{21}}{CC_2} = \frac{CN_{21}}{\sum C_{22}^0} = \frac{79}{125} = 0.632;$$

$$\beta_{21} = \frac{CC_{21}}{SCC_{21}} \times 100 = \frac{278}{125 \times 110} \times 100 = 2。$$

同理可得：

$$\begin{aligned} \alpha_{31} &= 0.64, \beta_{31} = 29; \\ \alpha_{41} &= 0.59, \beta_{41} = 31.6; \\ \alpha_{15} &= 0.38, \beta_{15} = 60.2; \\ \alpha_{16} &= 0.43, \beta_{16} = 48.4; \\ \alpha_{56} &= 0.45, \beta_{56} = 51.3。 \end{aligned}$$

该方法给出了具体的 SOD 和 COD 参数求取方法，减少主观性，并通过程序读取出图，得其邻接矩阵和可达矩阵，减少工作量。

根据计算出的 SOD 和 COD 参数，利用 FDNA 效能计算式(1)–(6)和敏感性系数式(9)–(10)对 GMD 进行敏感性分析。对除了叶节点^[1] N_2 、 N_3 、 N_4 外的其余接受节点 N_6 ^[1](或接受供给节点 N_1 、 N_5 ^[1]) 的敏感性分析如表 2 所示。

表 2 各节点敏感性

节点	影响因子	敏感性系数	最大影响因子
N_1	SE_1	13.3	O_2
	O_2	51.7	
	O_3	18.4	
	O_4	16.2	
N_5	SE_5	62	SE_5
	O_1	38	
N_6	SE_6	24	O_1
	O_1	51.6	
	O_5	24.4	

1) 提高预警卫星的效能(如及时发现目标)对 C2BMC 的效能尤为重要。提高预警雷达和 FBX 雷达的效能对提高 C2BMC 的效能也有较大影响。

2) SBX 雷达效能的提高主要依赖于自身效能的提高(如提高识别精度、探测距离等)。

3) GBI 效能的提高主要依赖于 C2BMC 效能的提高。C2BMC 对 GBI 发射制导的控制是 GBI 能否击毁目标的重要影响因素。

4) 体系的效能只依赖于叶节点的效能和各个节点的自主效能。将 GBI 的效能作为体系的效能，则预警卫星的效能对其最为重要。

4 结论

笔者在 Petri 网出现图的基础上，给出一种基于邻接矩阵和可达矩阵的求解功能依赖网络中 SOD 和 COD 参数方法，定量求解 SOD 和 COD 参数的公式，弥补了当前 FDNA 应用的缺陷。但当模型比较复杂时可能会出现“状态空间爆炸”，出现图的节点过多影响该方法的使用。下一步，希望该方法可以和 Sweep-line^[14]结合放到一个平台使用，为 FDNA 关键参数的获取带来方便。

参考文献：

- [1] PINTO C A, GARVEY P R. Advanced Risk Analysis in Engineering Enterprise Systems[M]. Taylor & Francis Group: CRC Press, 2012: 177–249.
- [2] GARVEY P R, PINTO C A. Introduction to functional dependency network analysis[C]//Second international symposium on engineering systems, Cambridge. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- [3] GUARINIELLO C, DELAURENTIS D A. Maintenance and recycling in space: functional dependency analysis of on-orbit servicing satellites team for modular spacecraft[C]//AIAA Space Conference and Exposition. San Diego, CA, 2013.
- [4] GUARINIELLO C, DELAURENTIS D. Dependency analysis of system-of-systems operational and development networks [J]. Procedia Computer Science, 2013, 16: 265–274.

算^[7]。计算结果表明：该方法能够体现海军陆战队主战武器装备在不同作战环境条件下的效能差异，具备较好的实践效果。

参考文献：

[1] 阎文丽, 郝佳新. 指数方法在武器装备体系效能评估中的运用[J]. 计算机仿真, 2010, 27(4): 8-10, 35.

[2] 杨鹏, 赵志军, 倪小清. 多维作战空间陆战兵力作战仿真方法[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(2): 76-79.

[3] 张梦得, 戴明强. 海军装备保障物资战时运输路径优化方法[J]. 兵工自动化, 2017, 36(5): 33-36.

(上接第 44 页)

[5] GUARINIELLO C, DELAURENTIS D. Integrated analysis of functional and developmental interdependencies to quantify and tradeoffilities for system-of-systems design, architecture, and evolution[J]. Procedia Computer Science, 2014, 28: 728-735.

[6] ZHANG W X, WANG Y, LI Q. An Improved Functional Dependency Network Model for SoS Operability Analysis[C]//Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, 2014, 602: 3355-3358.

[7] 张旺勋, 李群, 侯洪涛, 等. 卫星导航系统的体系安全性分析方法[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(2): 92-98.

[8] WANG Y, ZHANG W X, LI Q. Functional dependency network analysis of security of navigation satellite system[C]//Applied Mechanics and Materials. Switzerland: Trans Tech Publications, 2014, 522: 1192-1196.

[4] 陈松辉, 杨鹏, 闻锐. 两栖作战环境下装甲突击车战斗效能指数计算[J]. 火力与指挥控制, 2011, 39(12): 175-177.

[5] 舰船知识杂志社. 海军陆战队武器识别概览[J]. 舰船知识, 2009(s): 21-30.

[6] 倪小清, 徐瑜, 杨鹏, 等. 基于兵力编组优化的海军陆战队岛礁进攻作战效能评估[M]. 北京: 海潮出版社, 2015: 56-77.

[7] 王希星, 尹键. 武器系统效能指数幂函数基本定理的修正[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(6): 42-48.

[9] DOD C I O. DOD Architecture Framework Version 2.02[J/OL]. DoD Deputy Chief Information Officer, Available online at http://dodcio.defense.gov/dodaf20/dodaf20_pes.aspx, accessed Nov, 2013.

[10] 廖晶静, 王明哲. 用关联矩阵特征值分析 Petri 网模型结构[J]. 应用科学学报, 2010, 28(4): 417-423.

[11] WOLF K. Generating Petri net state spaces[C]//International Conference on Application and Theory of Petri Nets. Springer Berlin Heidelberg, 2007: 29-42.

[12] 傅攀峰, 周经伦, 罗鹏程, 等. 武器装备体系效能敏感性分析方法[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(4): 57-60.

[13] 金镭, 张曙光, 孙金标. 现代战斗机空战能力评估及敏感性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2009 (1): 82-86.

[14] JENSEN K, KRISTENSEN L M, MAILUND T. The sweep-line state space exploration method[J]. Theoretical Computer Science, 2012, 429: 169-179.