

文章编号: 1002-0640(2017)10-0167-05

装备研制项目风险网络节点重要度评估*

段雄义¹, 汪 送^{1*}, 王文静²

(1. 武警工程大学装备工程学院, 西安 710086; 2. 武警山东总队网管中心, 济南 250000)

摘要: 装备研制过程充满了各种不确定性因素, 导致风险丛生。为有效管理装备研制项目的风险, 确保装备研制项目的顺利完成, 需要不断创新风险管理方法和手段。通过提取装备研制项目风险因素, 采用解释结构模型法 (ISM) 构建风险网络结构, 基于网络结构确定各节点的节点度、聚类系数和介数, 基于 DEMATEL 方法确定节点中心度, 构成四维评估参数, 通过熵权集结上述参数, 实现对风险网络节点重要度的评估。从多维度考察风险因素的重要度, 能得到更为客观的评估结果, 研究结论为基于重要节点的杠杆式风险控制策略的制定提供了决策参考。

关键词: 装备研制, 风险网络, 节点重要度, DEMATEL, 熵权

中图分类号: O233; TP393

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1002-0640.2017.10.035

Importance Evaluation of Risk Network Node in Equipment Development Project

DUAN Xiong-yi¹, WANG Song¹, WANG Wen-jing²

(1. School of Equipment Engineering, Engineering University of Armed Police Force of China, Xi'an 710086, China;

2. Net Management Centre, Armed Police Shandong General Brigade, Ji'nan 250000, China)

Abstract: Equipment development project process is full of various uncertainty factors, leading to risk. In order to effectively manage the risk of equipment development project, to ensure the successful completion of the equipment development project, we need to constantly innovate risk management methods and means. By extracting equipment development project risk factors, using the structure model method (ISM) to construct the risk of network structure, the network structure determines the number of node degree, clustering coefficient and dielectric based on each node, based on the DEMATEL method to determine the node centrality. These data constitute four-dimensional evaluation parameters. The nodes importance of risk are evaluated through entropy aggregation of the parameters. It can get more objective evaluation results from the multi dimension study of the importance of risk factors, and the research conclusions provide the decision-making reference for the development of the lever type risk control strategy based on the important nodes.

Key words: equipment development, risk network, node importance, DEMATEL, entropy weight

0 引言

装备研制项目不确定影响因素众多, 由此而导致的技术风险、费用风险、进度风险等风险因素成为项目研制失败的主要原因, 风险失败带来的损失不容低估^[1], 即使是在美国, 新装备研制的成功率

也不超过 40%, 研制资源浪费现象非常普遍。研制项目中风险的动态演化, 如风险涌现、风险传递等行为使得风险管控变得异常困难, 一个风险若在开始没有得到规避, 将极有可能演化成更大的风险^[2]。因此, 现代工业已将风险作为与性能、费用、进度同等重要的要素进行管理^[3]。在装备研制中, 风险识

收稿日期: 2016-09-16

修回日期: 2016-10-17

* 基金项目: 国家自然科学基金(71401179); 武警工程大学基础研究基金资助项目(WJY201608)

作者简介: 段雄义(1993-), 男, 云南蒙自人, 硕士研究生。研究方向: 军事装备学。

* 通信作者: 汪 送(1984-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 讲师。研究方向: 装备系统工程。

别与控制成为影响装备研制成功率的关键因素^[4], 辨识装备研制项目重要风险因素, 并予以有效控制, 便显得迫在眉睫。

装备研制项目风险因素相互关联, 构成风险网络。风险网络中不同的节点具有不同的重要度, 在网络拓扑结构中核心节点产生的风险对研制项目的运行产生的威胁最大, 通过重点控制核心节点可以大大降低整个网络的风险威胁^[5]。汪送等^[6]利用熵权集结事网络节点的多维数据, 得到了事故网络节点重要度评估方法。杜纯等^[7]通过集成 DEMATEL/ISM 的结构模型方法研究复杂系统安全事故致因因素, 求得了致因因素间的综合影响关系, 构建了致因因素多级递阶结构模型, 并利用复杂网络节点度的概念分析出关键致因节点。宋春雳等^[8]采用熵权双基点法对装备研制的风险进行评估, 以此为依据控制装备研制项目的技术、计划、进度、费用等方面的风险。基于多维数据评估节点重要度能使评估结果更贴近客观实际, 本文通过专家经验和文献资料提炼装备研制项目风险因素, 利用 ISM 模型法构建风险因素网络, 基于熵权集结节点度、中心度、聚类系数和节点介数四维数据, 对风险因素进行重要度评估, 为装备研制项目关键因素杠杆式风险控制提供决策依据。方法流程如图 1 所示。

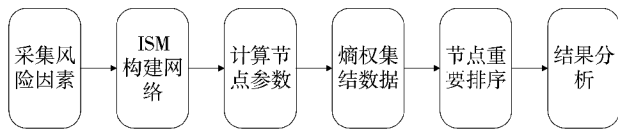


图 1 风险网络节点重要度评估流程图

1 风险网络构建

随着装备复杂度的增加, 装备研制项目中风险因素不断增多, 而且各种因素之间相互影响, 若不使用科学的管理方法, 很难对装备研制项目的风险进行客观全面的管控。本节给出基于 ISM 的构建风险网络结构的方法。

1.1 风险因素提炼

装备研制项目中风险因素的提取可以采用文献分析、专家咨询和问卷调查等形式进行, 也可以根据实际情况采用多种形式相结合进行, 目的就是使提取的因素贴于实际, 做到不多不漏。根据查阅资料, 对专家进行问卷调查, 列出 11 个风险因素, 得到表 1 所示的装备研制项目风险因素表。

1.2 基于 ISM 法确定风险网络结构

ISM 方法是一种以定性分析为主的方法, 可以分析系统的因素选择是否合理, 分析系统因素以及

表 1 装备研制项目风险因素

编号	风险因素
1	国防策略变化
2	国际局势影响
3	原材料市场波动
4	不可抗的自然因素
5	管理者的管理水平
6	项目进度安排
7	人员积极程度
8	研制人员技术能力
9	装备复杂程度
10	项目自主创新程度
11	资金需求不确定性

相互关系变化时对系统总体的影响等问题, 是定性表示系统构成要素以及它们之间存在着本质上相互依赖、相互制约的模型^[9]。

确定风险网络因素节点 $a_1, a_2, \dots, a_i \in A (i=1, 2, \dots, n)$, 其中 n 为风险因素的数目, A 为风险因素的集合。运用有向连接图来描述网络各因素之间的关系, 表示为有向线段从影响因素指向被影响因素。矩阵与有向图之间存在一一对应的关系, 设矩阵 $A=[a_{ij}]$, 在矩阵 A 中, 若 a_i 对 a_j 有影响, 则 a_{ij} 为 1, 否则为 0, 称 A 为邻接矩阵。若在 A 上加一单位矩阵 I , 即得: $A+I$, 若 $Ar=(A+I)^{-1}$ (若 $a_{ij} \geq 1$, 则 a_{ij} 取 1, 否则取 0), 则 Ar 称为可达矩阵, 它表明了各节点间经长度不大于 $n-1$ 的通路的可达情况, 即各风险因素间影响作用的情况。

计算得到可达矩阵 Ar 后, 将其元素分为可达集和先行集两个集合, 分别定义为 $R(e_i)={e_j|e_j \in S, m_{ij}=1}$, $A(e_i)={e_j|e_j \in S, m_{ji}=1}$ 。再将元素划分级别, 方法为, 将当前最底层单元 B 定义为: $B={e_i|e_i \in S, 且 R(e_i) \cap A(e_i)=A(e_i)}$, 从定义中可以看出, $R(e_i) \geq A(e_i)$, 即要素 e_i 可达的要素一定多于或者等于先行的要素, 且先行集中的要素一定为可达集中的要素。这样得到的共同集合一定是入度等于零或者入度与出度的差小于等于零的元素, 即源的集合。然后将最底层元素从矩阵中消除, 剩下的元素组成新的矩阵, 在新矩阵中利用前面找出底层元素的方法再找出新的底层元素。如此循环, 直至消除所有的元素, 根据元素之间的可达关系构成风险网络结构图。

2 风险网络节点重要度评估算法

在风险网络节点重要度的评估中,有多种参数对风险因素重要度进行描述,每种参数的评估侧重点不同。建立起网络模型后,就可以基于网络结构计算各节点的度、聚类系数、介数,并可利用 DEMATEL 方法来计算节点的中心度。本节在得到各个参数的基础上引入熵权集结的方法,使最终结果反映风险节点重要度的实际情况,利于客观地科学决策。

2.1 多维评估数据提取

2.1.1 节点度

节点 a_i 的度定义为与该节点连接的其他节点的数目,又称关联度,记为 D_i 。直观上看,一个节点的度越大就意味着这个节点在某种意义上越“重要”。在邻接矩阵 A 中,第 i 行所有数值相加记为 h_i ,第 i 列所有数值相加记为 l_i ,则节点度的计算公式为:

$$D_i = h_i + l_i \quad (1)$$

2.1.2 节点中心度

中心度的计算需基于综合影响矩阵,因此,先将矩阵 A 代入式(2)中得到规范化直接影响矩阵 C 。

$$C = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij}} A \quad (2)$$

式(2)中,分母为行和的最大值,通过规范化处理,使得 $0 < c_{ij} < 1$,此时规范化直接影响矩阵 C 对角线上的元素仍为 0。随后将矩阵 C 带入式(3)中得到综合影响矩阵 T 。

$$T = C + C^2 + \dots + C^n = \sum_{i=1}^n C^i \quad (3)$$

基于综合影响矩阵 T ,按行相加得到元素的影响度 f_i ,按列相加得到元素的被影响度 e_i ,则节点的中心度 M_i 为:

$$M_i = f_i + e_i \quad (4)$$

2.1.3 节点聚类系数

为了计算风险网络中各个节点的聚类系数,首先需要确定各个节点的邻集,而找出节点的邻集要确定邻集的范围。本文依据网络的平均节点度来确定节点邻集的范围。网络平均节点度即网络中所有节点的度的平均值,如式(5)。

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i \in A(i)} D_i}{n} \quad (5)$$

在网络图中,设节点 a_i 的邻集为 $N(a_i)$, $|N(a_i)| = k_i$,则节点 a_i 的聚类系数定义为这 k_i 个节点之间存在边数 E_i 与总的可能边数 $k_i(k_i-1)/2$ 之比,记为 C_i 即:

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)} \quad (6)$$

在网络中,某个节点的聚类系数表示该节点与其周围节点的聚集程度。聚类系数大,则表明该节点与其邻点间关系密切,对周围节点影响较大;聚类系数小,则表明该节点与其邻点间关系疏远,对周围节点影响较小。

2.1.4 节点介数

在介绍节点介数前,先对两节点间的最短路径进行介绍,最短路径是两个节点之间边数最少的路径,最短路径的长度称为两点间的距离,用 d_{ij} 表示。

节点的介数就是网络中通过该节点的最短路径的条数,记为 B_i 。反映了节点的作用和影响力。如果一对节点间共有 B 条不同的最短路径,其中有 b 条经过节点 i ,那么节点 i 对这对节点的介数的贡献为 b/B 。把节点 i 对所有节点对的贡献累加起来再除以节点对总数 N ,就可得到节点 i 的介数。

$$B_i = \sum_{x=1}^n \frac{b_x / B_x}{N} \quad (7)$$

式中, x 表示节点对数目。

2.2 熵权集结多维数据的节点重要度评估算法

以上给出了 4 种评估风险网络节点重要度的计算方式,在实际运用中将会产生 4 种不同的数据,若需要更加精确地评估节点的重要度,还可以加入更多的网络节点重要度评估数据,在此仅以上述 4 种数据加以结合叙述。

设某个风险网络中共有 n 个节点,采用上述 4 种方法对节点重要度进行排序,得到 n 行 4 列排序矩阵 $S = \{b_{ij}\}_{n \times 4}$,其中,4 列依次为 D_i 、 M_i 、 C_i 、 B_i 。为消除主观赋权的影响,采用熵权方法对多维数据进行集结,进而获得最终的节点重要度排序。

Shannon 定义了用不同方法得到的数据进行度量量的公式^[10]:

$$H_j = -K \sum_{i=1}^m \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \ln \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad (8)$$

式中: H_j 为第 j ($j=1,2,3,4$) 维数据的熵值, H_j 越大,则节点 i ($1 \leq i \leq m$) 的第 j 维数据中所占的权重越大; α_{ij} 为第 j 维数据下节点 i 的排序数值; K 为波尔兹曼常数, $K > 0$,一般取 $K=1/\ln m$, $m=n$ 。

第 j 维数据的熵权计算式为:

$$\omega_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} = \frac{1-H_j}{n-\sum_{j=1}^n H_j} \quad (9)$$

式中: ω_j 为第 j 维数据的熵权; g_j 为差异性系数。

$$\sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \omega_j \geq 0; j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

利用熵权法集结各个数据就可得到节点最终的重要度 I_i 。

$$I_i = \omega_1 D_i + \omega_2 M_i + \omega_3 C_i + \omega_4 B_i \quad (11)$$

根据所求得的 I_i 就可对各个节点代表的风险因素进行重要度分析。

3 实例分析

3.1 实例背景

装备研制既要采用先进的技术, 又要耗费大量的资金和时间。因此, 现代装备研制中风险网络分析是一个重要的课题。通过查阅文献及专家咨询等方法了解到, 装备研制必须有人力、财力和技术等资源要素支撑。而且这些资源的作用要在一定的组织管理下才能发挥作用。以上条件满足后, 要使项目顺利实施, 还必须有装备研制的组织流程, 及对科研技术人员组织管理、信息交互等因素。存在于这些方面的不同风险因素构成了装备研制项目的风险网络, 决定着装备研制项目的成功与否, 因此, 解决好这些风险因素可以让装备研制项目的风险损失大大降低, 节约成本, 增加研制成功率。

3.2 风险网络构建

通过向专家问卷调查, 统计分析之后确定了各个要素之间的影响关系, 并结合 1.2 节所介绍的 ISM 法得矩阵 A 。

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

考虑到矩阵 A 只反映了各个风险因素之间的直接影响关系, 并没有反映出在实际中存在的间接影响关系, 所以需要将邻接矩阵 A 转变为可达矩阵

Ar 。经计算 $(A+I)^2=(A+I)^3$, 所以邻接矩阵 A 的可达矩阵 Ar 为:

$$(A+I)^2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

根据可达矩阵 Ar 所给出的因素相互可达关系, 构建出装备研制的风险网络结构模型, 如图 2 所示。

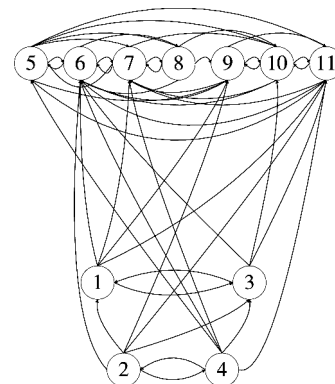


图 2 装备研制风险网络结构模型

3.3 评估参数计算

建立了风险网络的可达矩阵, 相当于在风险网络的研究中建立数学研究的基础, 此文的最终目的也是为装备研制项目风险网络的研究提供一种客观科学的数学研究方法。因此, 还需要在矩阵和模型的基础上进一步对风险因素参数进行计算。结合 1.3 节论述的 4 种因素节点参数计算方法对装备研制风险网络中的因素节点参数进行计算, 得到下页表 2 所示的装备研制项目风险因素评估参数。

3.4 节点重要度评估

为了消除经验赋权的影响, 利用 1.3 节论述的熵权集节点参数的方法, 对表 2 中 4 种数据进行集结, 最终获取装备研制风险因素重要度排序。利用式(8)~式(10)计算得到 D 、 M 、 C 、 B 4 种数据的熵值 H_j 和熵权 ω_j , 如下页表 3 所示。

最后, 根据表 3 所列熵权, 利用式(11)即可计算出装备研制各个风险因素的重要度 I_i , 计算结果如下页表 4 所示。

表 2 装备研制项目风险因素评估参数

节点编号	节点度	中心度	聚类系数	介数
1	7	3.062	0.357	0.246
2	7	3.602	0.250	0.200
3	7	3.235	0.179	0.210
4	7	3.507	0.464	0.180
5	10	5.758	0.256	0.197
6	13	6.723	0.500	0.417
7	12	6.743	0.464	0.197
8	7	4.691	0.179	0.192
9	9	4.595	0.236	0.192
10	10	5.727	0.464	0.242
11	11	4.926	0.214	0.394

表 3 参数熵权

节点参数	熵值(H_j)	熵权(ω_j)
D	0.973	0.132
M	0.931	0.338
C	0.959	0.201
B	0.933	0.328

表 4 节点重要度

节点编号	重要度(I_j)
1	2.111
2	3.257
3	2.122
4	2.262
5	3.382
6	4.226
7	4.021
8	2.609
9	2.852
10	3.428
11	3.289

3.5 结果分析与讨论

通过对最终所得节点重要度的观察,容易看出风险因素节点 6、节点 7 重要度较高,即项目进度安排和人员积极程度在装备研制风险网络中最为重要,影响最为突出。这个结果与实际情况相对符合,在实际装备研制中,管理层根据大局需要对项目进度的把握调整存在较大的变动,影响着装备研制的

系统规划。而装备研制人员的积极程度在主观因素方面起着较大作用,研制过程中存在许多困难阻力,需要研制人员积极发挥主观能动性解决困难,化解阻力,使装备研制项目取得预期结果。

4 结论

①风险因素对于装备研制项目失败的发生有着不同的贡献度,其中部分因素是关键因素,重要度较大。

②采用 ISM 方法构建风险因素网络,采用熵权集节点度、中心度、聚类系数和节点介数四维评估参数,提出了一种风险网络节点重要度评估方法。

③对处于风险网络底层的重要节点进行风险控制可以得到最大的风险控制效益。

参考文献:

- [1] 徐哲,冯允成,鲁大伟.武器装备研制项目的技术风险评估[J].系统工程与电子技术,2005,27(6):1123-1127.
- [2] 阮镰,章国栋.工程系统的规划与设计[M].北京:北京航空航天大学出版社,1991:307-308.
- [3] BROWNING T R. Modeling and analyzing cost, schedule, and performance in complex system product development [D]. Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1998.
- [4] 吕建伟,陈霖,郭庆华.武器装备研制的风险分析与风险管理[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [5] BROWNING T R, EPPINGER S D. Modeling impacts of process architecture on cost and schedule risk in product development [J]. IEEE Transaction on Engineering Management (S0018-9391), 2002, 49(4): 428-442.
- [6] 汪送,战仁军.熵权集结多维数据的事故网络节点重要度评估[J].中国安全科学学报,2014,24(5):26-31.
- [7] 杜纯,王瑛,汪送,等.集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统安全事故致因因素分析[J].数学的实践与认识,2012,42(22):143-150.
- [8] 宋春雳,冉伦,李金林.熵权双基点法在武器装备研制风险评估中的应用[J].北京理工大学学报(社会科学版),2003,48(5):77-88.
- [9] HOU J M, ZHOU D Q. Study on influence factors of distributed energy system based on DEMATEL and ISM [J]. International Journal of Nonlinear Science, 2011, 12(1): 36-41.
- [10] 刘国城,王会金.基于 AHP 和熵权的信息系统审计风险评估研究与实证分析 [J]. 审计研究, 2016, 32(1): 53-59.