

结合解释结构模型与网络分析法于FMEA的应用

陈日光

(肇庆学院 经济与管理学院, 广东 肇庆 526061)

摘要: 引入解释结构模型法, 分析出控制措施之间的层次、顺序关系, 再用网络分析法考虑控制措施间的相依关系, 进行客观权重的计算, 作为FMEA中的新探测度, 再进行新RPN的计算。以回炉焊接制程提升为研究案例, 比较新方法与传统方法的差异, 发现优先改善项目与改善顺序的不同产生不同结果, 提升了改善的效果。

关键词: 失效模式与效应分析(FMEA); 解释结构模型(ISM); 网络分析法(ANP)

中图分类号: F402

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2020)04-0154-05

Application of Combining Interpretative Structure Model and Analytic Network Process with FMEA

CHEN Jihkuang

(Economics & Management College, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, China)

Abstract: Interpretative structural modeling (ISM) is introduced to analyze the level and sequence relationship between the control actions, and then the analytic network process (ANP) is used to consider the dependent relationship between the control actions, to calculate the objective weight as a new Detection values, and then the calculation of the new RPN is carried out. Taking the poor furnace welding process as a study case, the difference between the new method and the traditional method is compared, and the different results of priority improvement order are obtained and the effect improved.

Key words: failure mode and effect analysis(FMEA); interpretative structural modeling(ISM); analytic network process(ANP)

失效模式与效应分析(failure mode and effects analysis, FMEA)是一种预防性的可靠度设计分析技术, 它具备结构化的系统程序方法, 能辨识出设计上或制程上潜在的故障模式, 探究故障的影响并给予定性的评估, 然后再采取必要的矫正措施与预防对策。多年来, FMEA已被广泛运用于工业界与学术界, 近些年更被扩展地应用于其他领域, 如雷星晖等^[1]应用于知识产权流程管理模式构建; 朱宗乾等^[2]应用于ERP项目实施风险分析; 奉小斌^[3]应用于集群新创企业平行搜索风险; 王则灵等^[4]应用于高技术企业知识产权风险预警; 韩亚娟等^[5]应用于网购服务失误预防。

运用FMEA的决策依据, 传统上是依据风险优先数(risk priority number, RPN)的大小。RPN由每

项失效模式与效应的严重度、发生度与探测度依其等级打分(通常为1-10分)后, 三者乘积而成, 愈大者即为愈需要改善的项目。但Gilchrist^[6]及Bendaya等^[7]对RPN的求算方式提出许多质疑, 后续有些学者也提出一些新的方式来求取RPN值。如Liu等^[8]整理出过去学者提出的各种FMEA改进方法主要有: 1) 多目标决策法(MCDM), 包括AHP、TOPSIS、DEMATEL、VIKOR等; 2) 数学规划法, 如DEA; 3) 结合方法, 主要是结合各种模理论方法与灰色关联法; 4) 其他, 主要是整合其他工具, 如KANO模型、QFD、蒙地卡罗仿真等。国内以多目标决策法并结合各种模糊理论方法或灰色关联法为最多^[9-11]。然而, 这些方法在运用上较为困难, 难以在工业界推广。因此, 国外普遍应用多目标决策法

来改善,尤其是AHP/FAHP^[12-15],国内亦有相关运用^[16-17]。

采用AHP等方法,虽然能以较客观评分的方式得到较精确的结果,但有2点未考虑:一是控制措施之间可能并非独立关系,存在相依关系;二是控制措施之间可能存在层级、顺序关系。尤其常发生在制程FMEA上,因为许多制程的控制措施与制程机台参数设定有关。而实务上各机台参数的调整,相互间存在互相影响关系,更常常存在顺序关系。因此,若单独使用AHP法来改善FMEA,忽略了各项控制措施间可能存在的相互影响关系,以及可能存在的层级、顺序关系,研究结果仍会得到一个相对错误的改善顺序。

因此,本文引入解释结构模型(interpretative structural modeling method, ISM)法,通过ISM法分析出各项控制措施之间的层次、顺序关系,再用网络分析法(analytic network process, ANP)控制措施间的相依关系,进行客观权重的计算,从而得到最终各项控制措施的相对权重。最后把得出的权重作为FMEA中的新探测度(D),再进行新的RPN计算,以加强FMEA法的精确性。通过案例,比较此方法与传统方法的差异,以验证其可用性。

1 解释结构模型 (ISM)

ISM是Warfield^[18]所提出,主要用于把复杂的系统分解为若干子系统,并且通过多级递阶结构模型,进而为管理者提供决策支持。其ISM方法步骤如下。

1) 确定分析目标问题的组成要素。

若目标问题是由 n 个因素所构成的集合,以 S 表示,则

a) $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}, (s_i, s_j)$ 为要素 S_i 与 S_j 的顺序对(ordered pair);

b) 直积集合为 $S \times S = \{(s_i, s_j) | s_i, s_j \in S; \forall i, j\}$;

c) 集合 S 中各个要素之间的关系定义为二元关系(binary relation)。

2) 邻接矩阵的建立。

根据判断因素指标集合 S 中的任意2个因素 S_i 与 S_j 之间是否有直接的影响关系来确定邻接矩阵 Ad ,当因素 S_i 对因素 S_j 有直接影响时,矩阵中 S_{ij} 为1;当因素 S_i 对因素 S_j 无直接影响时,矩阵中 S_{ij} 为0,即可以建立的邻接矩阵 Ad 。

$$Ad = [a_{ij}]_{n \times n}, a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{因素 } S_i \text{ 直接影响因素 } S_j; \\ 0, & \text{因素 } S_i \text{ 不直接影响因素 } S_j. \end{cases}$$

3) 可达矩阵的求取。

可达矩阵是指用矩阵形式来描述有向连接图各节点之间,经过一定长度的通路后可以到达的程度。步骤如下。

a) 将邻接矩阵 Ad 与单元矩阵 I 相加得到新的矩阵 $N=Ad+I$ 。

b) 产生含有自己的因果关系矩阵 N 后,再将矩阵 N 重复以布尔(Boolean)代数运算法,计算至满足。 $(N) \neq (N)^2 \neq \dots \neq (N)^n = (N)^{n+1} = M$,矩阵 M 即为可达矩阵。

4) 递阶结构模型构建。

利用获得的可达矩阵 M ,得到每个因素的可达集合 $R(i)$ 和先行集合 $Q(i)$,其中,可达集合 $R(i)$ 指的是可达矩阵中要素 S_i 对应的行中,包含有1的矩阵元素所对应的要素的集合,代表要素 S_i 到达的要素;先行集合 $Q(i)$ 指的是可达矩阵中要素 S_i 对应的列中,包含有1的矩阵元素所对应的行要素的集合。

当满足 $R(i) \cap Q(i) = R(i)$ 时,则该元素为同一层元素,而后将它们从缩减可达矩阵中划去,再重复上述步骤,即可将因素划分层次,最终建立起递阶结构模型,并用多级梯阶结构有向图来表示模型的整个结构。

2 案例及结果分析

以一家东莞的电子厂的回炉焊接制程为研究案例。研究者与制程、质量工程师们组成评估团队,对工艺制程所造成的焊接不良进行FMEA分析。首先找出潜在失效的效应与影响,分别是断路和可靠性差。依此分析出其潜在失效的原因与控制措施,再以传统的FMEA方法,分别对严重度、发生率及检测度由1至10等级打分,然后将每项的严重度、发生率、检测度乘积而得到风险优先数(RPN),以此即可得到传统FMEA法的改善顺序。最优先改善的控制措施是“根据SOP最大限度地减少空气进入”,以降低焊点断路的潜在发生。详细分析如表1所示。

考虑控制措施之间可能具有层级、顺序的关系,因此,对各个控制措施进行编号,由评估团队进一步将控制措施间的影响关系做两两判断。综合

表 1 传统FMEA分析

Table 1 Traditional FMEA analysis								
失效模式	影响	严重度	原因	发生率	现行控制方法	代码	检测度	RPN
焊点不良	断路	9	焊锡混合过多的金属化合物	3	进料检验	Ca	5	135
			助焊剂的化学特性不适当	6	进料检验	Cb	3	162
			空气下沉现象	5	根据SOP最大限度减少空气进入	Cc	7	315
			冷却速度控制不当	3	根据SOP冷却速度控制	Cd	7	189
	可靠性差	5	PCB扭曲或弯曲	3	进料检验	Ce	5	75
			错误的对位位置	5	根据SOP操作控制位置	Cf	6	150
			零件Tray/Tube设计或装置不良	6	根据工程经验进行设计及SOP装置	Cg	3	90
			不正确的回焊炉温度	6	根据回焊炉SOP参数	Ch	3	90
			助焊剂太多或不足	7	根据焊盘尺寸控制焊剂量	Ci	3	105

团队的意见后，建立如下ISM邻接矩阵

$$Ad = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

将此邻接矩阵加上单元矩阵后，重复以布尔代数运算法，计算至满足 $(N) \neq (N)^2 \neq \cdots \neq (N)^n = N^{n+1} = M$ ，矩阵M即为可达矩阵。此案例中 $N^1 \neq N^2 = N^3$ ，故 $n=2$ 即可得到可达矩阵M。

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

通过可达矩阵，当满足 $R(i) \cap Q(i) = R(i)$ 时，对可达矩阵进行分解，如表2所示。

可发现Cd、Cf、Ci三项控制措施的 $R(i)=R(i) \cap Q(i)$ ，此三项控制措施即为第1层要素。接下来Cd、Cf、Ci三项删除后重复此步骤，直到将所有层级分解完毕。层级分解的结果，并依据控制措施间相互影响之关系，汇整如图1所示。

根据图1控制措施层级与网络关系图，由评估团队做ANP权重分析。首先从Ca角度，做Cb、Ce、

表 2 层级分解

Table 2 Hierarchical decomposition			
<i>i</i>	<i>R(i)</i>	<i>Q(i)</i>	<i>R(i) ∩ Q(i)</i>
Ca	Ca、Cc、Cd、Ch	Ca	Ca
Cb	Cb、Ci	Cb	Cb
Cc	Cc、Cd	Ca、Cc、Ch	Cc
Cd	Cd	Ca、Cc、Cd、Ch	Cd
Ce	Ce、Cf	Ce	Ce
Cf	Cf	Ce、Cf、Cg	Cf
Cg	Cf、Cg	Cg	Cg
Ch	Cc、Cd、Ch	Ca、Ch	Ch
Ci	Ci	Cb、Ci	Ci

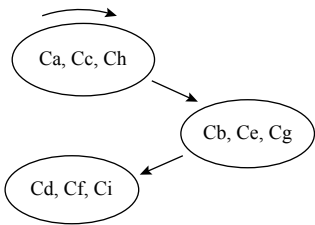


图 1 控制措施层级与网络关系

Figure 1 Hierarchy of control actions and network diagram

Cg的两两判断，如下所示。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \frac{1}{4} \\ 1 & 1 & \frac{1}{4} \\ 4 & 4 & 1 \end{bmatrix}。$$

将判断矩阵的每一列元素作归一化处理，用和积法计算其最大特征向量，即得到各项的权重，再执行一致性检定，确认结果无误。结果如表3所示。

重复相同步骤，依网络关系图各控制措施相关

表 3 从Ca角度对Cb、Ce、Cg的评估结果

Table 3 Evaluation of Cb、Ce、Cg from Ca perspective

Ca	权重	一致性
Cb	0.18	
Ce	0.18	CI=0.005
Cg	0.64	RI=0.009

结构做两两判断，求得其权重向量，并执行一致性检定，确保无误后，组合成未加权超矩阵，如下所示。

$$\begin{bmatrix} 0.30 & 0.21 & 0.24 & 0.21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.18 & 0.37 & 0.21 & 0.21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.22 & 0.21 & 0.39 & 0.21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.30 & 0.21 & 0.16 & 0.37 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.18 & 0.14 & 0.20 & 0.13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.18 & 0.14 & 0.20 & 0.13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.64 & 0.71 & 0.60 & 0.75 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.36 & 0.36 & 0.70 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.64 & 0.64 & 0.30 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

将此未加权超矩阵先进行归一化，得到加权超矩阵，连乘加权超矩阵，直至当 $W^{\infty}=\lim_{t\rightarrow\infty}W^t$, W^{∞} 即为极限超矩阵，其第j列就是元素j的极限相对排序向量。经过未加权超矩阵计算至8次方时得到收敛，可以得到各控制措施之最终权重向量为[0.239, 0.241, 0.259, 0.260, 0.162, 0.162, 0.676, 0.884, 0.634]^T。

将各控制措施的权重，视为新探测度(D)，代入计算后可得到新RPN值。传统FMEA方法与此系列方法所计算求得的各控制措施RPN值与其排序如表4所示。

表 4 RPN排序比较

Table 4 RPN sorting comparison

控制措施	原RPN	原改善顺序	新RPN	新改善顺序
Ca	135	5	6.45	8
Cb	162	3	33.05	1
Cc	315	1	11.66	5
Cd	189	2	7.02	7
Ce	75	9	2.43	9
Cf	150	4	22.10	3
Cg	90	7	20.28	4
Ch	90	7	7.23	6
Ci	105	6	22.19	2

用传统FMEA方法，根据RPN进行改善的顺序为：首先改善Cc(空气下沉现象)；然后改善Cd(冷却速度控制不当)；接下来改善Cb(助焊剂的化学特性不适当)和Cf(错误的对位位置)。运用ISM及ANP方

法，理清控制措施的层级、顺序关系，并考虑之间的相依性，以客观权重为新探测度后，依据新RPN进行改善的顺序变为：首先改善Cb(助焊剂的化学特性不适当)；其次改善Ci(助焊剂太多或不足)；接下来改善Cf(错误的对位位置)及Cg(零件Tray/Tube设计或装置不良)。

可以发现，采用不同的方法，优先改善的项目与改善顺序会产生不同的结果。虽然Cb(助焊剂的化学特性不适当)及Cf(错误的对位位置)仍排在改善顺序的前4位，但比原先认为的顺序提前，尤其是Cb(助焊剂的化学特性不适当)变为最需要控制与改善的项目。更重要的是，原先认为最大风险的项目是Cc(空气下沉现象)及Cd(冷却速度控制不当)，现在变为把Ci(助焊剂太多或不足)及Cg(零件Tray/Tube设计或装置不良)视为风险较高项目，进行优先控制与改善。因此，企业若未得到较精确的分析结果而进行控制与改善，不仅可能造成改善的效果有限，还会造成资源的错误配置与浪费，影响改善的及时性。

3 结论

在传统的FMEA中，计算RPN的大小是直接用严重度、发生率、检测度三者相乘计算。此方式忽略了要素间可能不具备独立性，是相互相依的关系。尤其在控制措施方面，各项控制措施包括检验项目、机台调整、参数设定以及作业流程等方面，很可能具有层级、顺序关系。因此以传统的FMEA评估各个控制措施的检测度方式，可能会造成太大误差。虽然有些学者在传统的FMEA中引入了AHP来计算权重，得出较客观的检测度，进而得到新的RPN，但此方法仍忽略了控制措施中可能存在的层次和顺序关系。所以本文提出用ISM法分析确定各项控制措施的层级、顺序关系，再引用能考虑因素间具有相依性的ANP分析法来计算各项控制措施的新检测度，求得新RPN值，以此为改善顺序的决策依据。

本文以回炉焊焊接工艺的焊接不良为分析案例，验证此系列方法的可行性。但由于仅有一个分析案例，且评估团队成员较少，是否具有广泛的适用性需待更长期与广泛的验证。此外，为提升评估精确性，进一步在团队意见汇整与ISN及ANP的评估中整合模糊理论，是未来进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 雷星晖, 莫凡. 基于FMEA方法的知识产权流程管理模式构建[J]. *科技管理研究*, 2010, 30(4): 202-204+178.
LEI Xinghui, MO Fan. Construction of intellectual property process management model based on FMEA method[J]. *Science and Technology Management Research*, 2010, 30(4): 202-204+178.
- [2] 朱宗乾, 罗阿维, 李艳霞, 等. 采用FMEA的ERP项目实施风险分析方法[J]. *工业工程*, 2010, 13(6): 1-5.
ZHU Zongqian, LUO Awei, LI Yanxia, et al. The risk analysis method is implemented using FMEA's ERP project[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2010, 13(6): 1-5.
- [3] 奉小斌. 集群新创企业平行搜索风险的识别、度量与控制——基于FMEA原理[J]. *技术经济*, 2015, 34(4): 42-50.
FENG Xiaobin. Identification, measure and control of parallel search risk of cluster-based new-generation enterprise—based on FMEA principle[J]. *Technology Economics*, 2015, 34(4): 42-50.
- [4] 王则灵, 尤建新. 基于FMEA方法的高技术企业知识产权风险预警研究[J]. *科学管理研究*, 2017, 35(1): 71-74+90.
WANG Zeling YOU Jianxin. Research on intellectual property risk early warning of high-tech enterprises based on FMEA method[J]. *Scientific Management Research*, 2017, 35(1): 71-74+90.
- [5] 韩亚娟, 尹纯, 彭运芳, 等. 基于FMEA的网购服务失误预防模型[J]. *工业工程与管理*, 2017, 22(5): 114-119+127.
HAN Yajuan, YI Chun, PENG Yunfang, et al. Error prevention model of online purchasing service based on FMEA[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2017, 22(5): 114-119+127.
- [6] GILCHRIST W. Modeling failure modes and effects analysis[J]. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 1993, 10(5): 16-23.
- [7] BEN-DAYA M. RAOUF A. A revised failure mode and effects analysis model[J]. *International Journal of Quality Reliability Management*, 1993, 13(1): 43-47.
- [8] LIU H C, LIU L, LIU N. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(2): 828-838.
- [9] 门峰. 模糊集理论与灰色关联理论的FMEA方法[J]. *工业工程*, 2008, 11(4): 109-112+117.
MEN Feng. FMEA method of fuzzy set theory and grey relational theory[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2008, 11(4): 109-112+117.
- [10] 刘胧, 刘虎沉, 林清恋. 基于模糊证据推理和灰色关联理论的FMEA方法[J]. *模糊系统与数学*, 2011, 25(2): 71-90.
LIU Long, LIU Huchen, LIN Qinglian. FMEA method based on Fuzzy evidence reasoning and grey relational theory[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2011, 25(2): 71-90.
- [11] 荆树伟, 温志芳, 阎俊爱. 基于FMEA和模糊VIKOR的煤炭开采企业风险识别[J]. *工业工程*, 2017, 20(2): 91-98.
JING Shuwei, WEN Zhifang, YAN Junai. Risk identification of coal mining enterprises based on FMEA and fuzzy VIKOR[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2017, 20(2): 91-98.
- [12] BRAGLIA M, BEVILACQUA M. Fuzzy modeling and analytical hierarchy processing as a means of quantifying risk levels associated with failure modes in production systems[J]. *Technology, Law and Insurance*, 2000, 5(3-4): 125-134.
- [13] CARMIGNANI G. An integrated structural framework to cost-based FMECA: The priority-cost FMECA[J]. *Reliability Engineering and Systems Safety*, 2009, 94(4): 861-871.
- [14] HU A H, HSU C W, KUO T C, et al. Risk evaluation of green components to hazardous substance using FMEA and FAHP[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(3): 7142-7147.
- [15] ZAMMORI F, GABBRIELLI R. ANP/RPN: a multi criteria evaluation of the risk priority number[J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2011, 28(1): 85-104.
- [16] 周红, 刘洋. 结合FAHP和频率分析的地铁工程FMEA 风险评价应用研究[J]. *工程管理学报*, 2015, 29(1): 53-58.
ZHOU Hong, LIU Yang. Application research on the risk assessment of subway project FMEA based on FAHP and frequency analysis[J]. *Journal of Engineering Management*, 2015, 29(1): 53-58.
- [17] 辛昱, 郑金忠, 张梁, 等. 基于AHP-FMEA 的航材仓库选址合理性评价研究[J]. *兵工自动化*, 2016, 35(6): 80-83+93.
XIN Yu, ZHENG Jinzhong, ZHANG Liang, et al. Research on rationality evaluation of air material warehouse location based on AHP-FMEA[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2016, 35(6): 80-83+93.
- [18] WARFIELD J N. On arranging elements of a hierarchy in graphic form[J]. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 1973, SMC-3(2): 121-132.

(责任编辑: 郑穗华)