

文章编号:1000-6893(2009)09-1683-08

风险可能数——一种基于最大信息熵理论的风险度量和风险排序新方法

王贵宝^{1,2}, 黄洪钟¹, 张小玲¹

(1. 电子科技大学 机械电子工程学院, 四川 成都 610054)

(2. 中国人民解放军驻三七二厂军事代表室, 江西 景德镇 333002)

Risk Possibility Number—A New Model for Risk Evaluation and Prioritization Based on Maximum Entropy Theory

Wang Guibao^{1,2}, Huang Hongzhong¹, Zhang Xiaoling¹

(1. School of Mechatronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(2. PLA Representative Office Stationed at Factory 372, Jingdezhen 333002, China)

摘要: 分析了风险优先数(RPN)方法中严重性 S 、发生率 O 和探测度 D 这3个评价指标的离散性与得分主观性不足。基于信息熵定理和最大信息熵推论,指出了RPN方法在评价风险不确定程度时,存在函数方差的依赖性和未能均衡各种风险要素的不合理性。针对多维信息的不确定性问题,分析了如何合理选取风险评价指标和权重分配。为了实现对风险程度的一致性测量,基于公理化的假设条件,给出了一种区别于RPN的风险可能数(RPoN)的定义和计算方法,并证明了RPoN方法能够一致性地用于风险的不确定程度评价。实验数据结果表明:RPoN方法用于风险的定量计算以及进行风险排序的效果优于RPN方法。

关键词: 风险优先数; 信息理论; 多元控制系统; 熵; 测量; 风险可能数

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Abstract: This article analyzes the deficiencies of discreteness and subjectivity of the current method of risk priority number (RPN) in dealing with the three key information factors of severity, occurrence and detection of failure. Based on information entropy theory and maximum entropy inference, it demonstrates that when being used to evaluate the degree of uncertainty of risks, the substantial irrationalities of the RPN method are its dependency on the mean and the variance of the RPN function so that it cannot integrate the risk factors in proper proportion. Meanwhile, considering the uncertainty of multi-dimensional information, the problem of how to select the indexes for risk evaluation and allocate their weights for forecasting risk events is analyzed. For the realization of measuring the degree of risks consistently, a new definition and calculation by the name of the risk possibility number(RPoN)is proposed, which is different from the RPN. The formulation of the RPoN is based on and deduced from the continuity, monotonicity, and additivity assumptions of axioms of information entropy theory. The property of consistency of the RPoN approach is also proved when it is used to evaluate the degree of risks in the process of statistical decision-making. Experimental results suggest that the RPoN approach is better than the RPN method on quantitative calculation and prioritization of risks.

Key words: risk priority number; information theory; multivariable control system; entropy; measurements; risk possibility number

近年来,随着科学技术的发展,武器装备的性能日趋先进,但同时使用与保障的费用不断增加。可靠性和维修性学科已经从传统的可靠性预计转向了风险管理。在可靠性工程领域中,风险优先

数(Risk Priority Number, RPN)^[1-2]方法是进行风险管理和产品故障危害程度判定的一种基本方法。RPN方法可以看做是一种定性的定量方法。这是由于RPN方法是通过影响故障模式危害性等级的3个关键要素,即对故障的严重性 S 、发生率 O 和探测度 D 进行风险识别,给出定性的 S, O, D 相对程度得分,然后通过三者得分的乘积得到定量的RPN值。其公式为^[3]

收稿日期:2008-07-24; 修订日期:2008-10-21

基金项目:国家自然科学基金(50775026);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20060614016);四川省科技支撑计划(07GG012-002)

通讯作者:黄洪钟 E-mail: hzhuang@uestc.edu.cn

$$RPN = S \times O \times D$$

按 RPN 值的大小,可以实现对各种故障模式的危害性等级进行排序^[4]。由于 RPN 方法形式简单,实施和计算方便,目前已在失效模式及影响分析(FMEA)和失效模式、影响及危害程度分析(FMECA)等工作中得到广泛的应用。

但是,RPN 方法在实际工程应用过程中还存在一些不足。这些不足直观表现为评定指标的离散性和不完整性,非对称信息环境下对于风险要素(S,O,D)专家评分的主观性等。虽然将模糊隶属度函数等方法引入到 RPN 的评估体系中来,建立基于模糊多属性决策的 RPN 评估模型^[5-6],可以保证各评价指标的连续性和 RPN 函数的连续性。但是,采用模糊隶属度函数的 RPN 方法实际上未脱离 RPN 方法的评价体系,也不能消除专家评分存在主观性的不足^[7],从而并未从本质上解决 RPN 方法本身的缺陷。这就导致 RPN 方法对风险识别和危害性等级排序通常与实际的风险程度并不能取得很好的一致性。J. B. Bowles^[2]指出 RPN 方法促使人们进行人为的确定一个较低的可以接收的 RPN 阈值,在产品的设计过程中仅仅关注正确性设计,而未能将重点放在产品的质量 and 可靠性方面。同时在文献^[8]中又指出:一个风险因素可能失效的概率反映了失效模式和其可能带来的影响。因此,故障模式的危害度数代表失效模式的对数,可表示为

$$\Pr\{\text{failure}\} = 1 - \exp(-C_m)$$

其中: C_m 为故障模式的危害度数。该公式能够表示 RPN 方法进行风险度量的基本原理。但是,这种方式也存在不足,即采用对数方式的风险度量要求失效率保持不变^[9]。一般来说,对于电子产品而言失效率保持不变是适用的,而对于机械产品这种假设并不一定成立。以上对 RPN 方法的众多研究表明:RPN 方法在数学构成上和实际应用中还存在一些本质上的不足,这些不足使得该方法在进行风险不确定程度评定时难于满足一致性要求。

信息熵是信息不确定程度的度量。C. E. Shannon^[10]提出的信息熵定理是信息理论的基础。信息熵理论提供了一种能够衡量系统混乱程度的统计量。应用信息理论可以分析出 RPN 方法不足产生的本质原因:RPN 方法组合误差的依赖性以及 S,O,D 这 3 种风险指标用于风险评定时非均衡性。本文将在信息熵定理和最大熵推论的

基础上,对 RPN 方法的这两个本质上的不足进行深入的分析。然后结合随机变量概率等可靠性数理方法,给出风险度量函数应满足的公理性假设,定义风险可能数(Risk Possibility Number, RPoN)的概念和计算方法,并对 RPN 方法与 RPoN 方法在函数性质及应用效果等方面进行比较。

1 RPN 方法的不足

1.1 RPN 方法组合误差的依赖性

风险分析中关键的工作是要事先确定各种风险因子的概率分布类型并进行参数估计。然而,由于实测资料以及所得信息的限制,往往难于通过统计分析的途径确定各种风险因子的后验概率分布,一般都需要根据所掌握的一些粗略的或模糊的认识,如分布的上下限、期望值、分布的形状等约束条件,对各种风险因子的先验概率做出人为判断或者假定。

应用信息熵概念和理论,将信息熵函数看做风险因子先验概率分布的泛函,可以根据最大熵原理来确定风险因子的先验概率分布。文献^[11]给出了以下证明:对于风险因子为离散型随机变量的情况,若满足概率归一化约束条件,由最大熵原理确定该风险因子的先验概率分布为等概率分布,而且它是最小偏差的概率分布。

在连续性随机变量的情况下,若已知其期望值 \bar{x} 和方差 S_x^2 ,即满足如下约束条件

$$\left. \begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx &= 1 \\ \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx &= E[x] = \bar{x} \\ \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx &= \text{Var}[x] + \bar{x}^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

则可得到概率分布为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_x} \exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2S_x^2}\right] \quad -\infty < x < \infty \quad (2)$$

根据最大信息熵理论可得出满足约束条件下的概率分布结论:在连续性随机变量的情况下,风险因子的先验概率分布为正态分布时为最小偏差的分布,此分布中有关参数 \bar{x} 和 S_x^2 的估计为

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= E[x] \\ S_x^2 &= \text{Var}[x] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

现根据以上的结论来分析 RPN 函数的分布规

律。在已知故障的严重性 S 、发生率 O 和探测度 D 为连续性随机变量的情况下,其期望值和方差即 $\bar{S}, \bar{O}, \bar{D}$ 与 S_s^2, S_o^2, S_D^2 为已知时,通过对 RPN 求导得到

$$\ln RPN = \ln S + \ln O + \ln D$$

因而可求其期望值

$$E(\ln RPN) = \ln E(S) + \ln E(O) + \ln E(D) \tag{4}$$

以及方差

$$\text{Var}[\ln RPN] = 2(\ln S_s + \ln S_o + \ln S_D) \tag{5}$$

由以上推导过程可知:具有最小偏差 $\ln RPN$ 的先验概率密度分布为正态分布,即 RPN 的分布为对数正态分布,此分布中有关参数 \overline{RPN} 和 S_{RPN}^2 的估计分别为

$$E[X] = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \tag{6}$$

$$\text{Var}[X] = [\exp(2\mu + \sigma^2)](e^{\sigma^2} - 1) \tag{7}$$

由式(6)~式(7)可知,RPN 函数的方差 S_{RPN}^2 取决于均值 μ 及方差 σ 的值,其值随时间变化。这种评价结果与客观风险评价标准要求不符。因此,从数学原理可知 RPN 函数并不能准确用于风险评价。

1.2 RPN 函数各指标权重选择的非均衡性

RPN 函数是将 3 个指标顺序尺度叠加相乘,这 3 个指标的等级数字大小没有实际意义,其结果经常与人们对风险程度的客观感觉不符合。RPN 方法并没有考虑在不同风险评价过程中指标的各自权重,这就造成该方法没有形成统一协调的评价指标。举例如下^[12]:某飞行装备的滑油压力监测报警系统,当滑油压力过低时会发出及时的警报。也就是说,其探测级别很低(易探测),如果发生率 O 得分也很低,将可能会得到一个较低的 RPN 值,即按 RPN 公式将会是一个很低的风险排序。但实际上一旦出现这种情况,其后果非常严重。由此说明现行的 RPN 方法并没有将 3 个指标进行统一协调。现假设有两组风险指标值,对应故障的严重性 S 、发生率 O 和探测度 D 数据如表 1 所示。

表 1 两组 RPN 数据的比较

Table 1 Comparison of two groups of RPN data

序号	S	O	D	RPN
事件 1	8	6	4	192
事件 2	6	6	6	216

由表 1 计算结果可知:事件 1 的 RPN 小于事件 2 的 RPN。由此得出的结论为:第 2 组数据对应事件的风险程度优先于第 1 组数据对应事件的风险程度。这与人们对风险程度的感觉并不符合:第 1 组数据的对应事件的风险程度应该优先于第 2 组数据对应事件的风险程度。实际上,由不等式的性质可得

$$S \times O \times D \leq \left(\frac{S+O+D}{3}\right)^3 \tag{8}$$

从而可知:RPN 公式在数学构成上存在本质上的缺陷,即在风险度量时对 S, O, D 这 3 个指标的权重选择均相同这一不足。在实际风险事件评价过程中,需要充分选择与风险事件相关的各种评价指标,并合理均衡分配各风险指标的权重。

2 RPN 的定义及应用

2.1 风险事件评价指标的选择及权重分配

风险事件一般是指一个由多因素指标共同作用的复杂随机事件,但可以按照其属性选择适当个数的指标共同来进行风险事件的描述和预测。三元必要和满足性定律表明^[13]:大量独特的关系分量决定关系的特征,不管这些分量有怎样的关系方式,复杂关系总是能由不多于三元关系的分量来表达,并且仅有 3 种基本类型的关系。因此,在进行风险评价过程中,选取风险最有代表性的严重性 S 、发生率 O 和探测度 D 这 3 个指标来进行风险程度评价是必要的。

进行风险评价的各指标大都是非独立变量,这些变量中任何一个量的改变均会引起除因变量以外的其他量的改变。因此,需要根据具体风险问题来分析各指标之间的关系,也就是要合理均衡各指标的权重,而不是固定不变。现将整个风险事件看做是一个一维的风险信息。由信息熵定理的可加性及最大熵推论^[10]可知:通过合理的信息分解与分形,整个风险事件将具有最大的信息熵。

图 1 是将一个事件按故障树分解的具体过程:首先将整个事件分解为含有事件 1 的相关事件与不含有事件 1 的无关事件。然后逐级将发生事件 1 的相关事件按概率等分为两个事件,直至分解至第 n 维,其中每次分解后均含有一个事件 1。即将相关变量分解至第 n 维时,每个事件将被分解为 n 个事件,共计 $n!$ 个事件,其中只含有一

个事件 1。现将每次发生事件 1 的概率作为随机变量,则非独立变量在每次分形形成的新的变量发生的概率为 $1/n!$ 。然后,将整个风险事件当成整体一个事件来考虑,计算经过 n 维分形后的所有事件中共含有事件 1 的个数,可以求解事件 1 的发生概率。

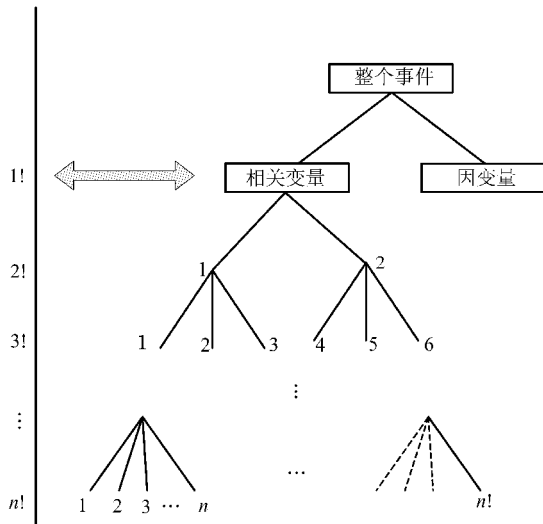


图 1 具有最大信息熵的风险事件故障树的分形图
Fig. 1 Fractal diagram of failure tree of risk event with maximum information entropy

假设事件 1 的个数等于 n_1 , 其在整个分形过程中发生 1 次的概率为 p'_1 , 则 n_1 和 p'_1 可表示为

$$n_1 = \frac{1}{0!} + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \dots + \frac{1}{n!} \quad (9)$$

$$p'_1 = \frac{1}{n_1} \quad (10)$$

很明显:当 n 趋于无穷时,整个风险事件由与风险事件 1 的因变量以及任何可分形的风险事件 1 相关变量共同组成。由于在整个分解及分形过程中所具有的最大的随机性和模糊性,在整个事件上对是否发生事件 1 这一问题具有最大的不确定性,因而具有最大信息熵。现将分解及分形过程当做一个整体事件来考虑随机变量 p'_1 。由大数定律可知:事件 1 共发生的个数为 $n_1 = e$, 其发生的概率 $p'_1 = 1/e$ 。这与信息熵定理是相一致的:由信息熵函数 $H = -P' \ln P'$ 的性质可知,当单一变量的概率 $P' = 1/e$ 时,信息熵 H 取得极大值。

从风险事件的分解与分形过程可知:选择合适的风险变量,并选择各指标权重,将可以满足风险事件最大信息熵的均衡条件。如可先确定

因变量并赋权重因子 $1/0!$ (0 对应其不可分解性),再选择合适的相关变量,这些相关变量权重因子分别赋值为 $1/1!, 1/2!, 1/3!, \dots, 1/n!$ 。通过计算权重后的所有因变量与相关变量的信息熵,就可以模拟风险事件的发生规律,达到风险事件准确预测的目的。

2.2 RPoN 的定义

将 S, O, D 这三个关键要素看做一维的风险信息,则在此基础上建立起来的风险事件的度量函数应满足信息熵定理的连续性、单调性和可加性等公理化假设^[10]。现在可以按照这三个基本的公理化假设条件,定义和推导一个新的风险度量函数。本文将按这种方法形成的风险度量函数命名为风险可能数,记为 $RPoN$, 它表示变量集合 $p_i = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 所对应风险事件发生的相对可能程度,其中 p_i 为概率场,它表示风险事件中的各种风险变量相对于其最大风险程度的比例。

基于上述考虑,设任一风险事件在一次发生过程中,所有可能导致风险事件发生的有穷变量集合,记为 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, 各变量发生程度的大小所对应的概率场为 $p_i = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 按各变量对风险影响的程度选取合适的加权系数,经加权后转化为满足概率归一化的概率场 $q_i = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ 。

定义 1 $RPoN$ 表示导致风险事件变量 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 的概率场 $p_i = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 共同作用对风险的影响程度,记为 $RPoN(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 。如果对于 $0 \leq p_i \leq 1$ 及 $n \geq 1$ 满足如下条件:

① 连续性 $RPoN(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 应是 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 的各个自变量的连续函数。

② 单调性 $RPoN(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 应是 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 的各个自变量的单调递增函数。当所有 $p_i = 0$ 时, $RPoN(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 应为 0。当固定所有除 p_i 之外的所有变量时, $RPoN(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 随 p_i 单调增加。当所有 $p_i = 1$ 时,事件的风险程度最大,相应的 $RPoN(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 亦为最大。

③ 可加性 当一个风险事件分成 n 个可能出现的子事件时,未分解之前的 $RPoN(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 应是分解之后各子事件 $RPoN$ 之加权和。为表示风险程度对风险的重要性, $RPoN$ 的可加性应满足风险变量的概率经加权后的指数递进关

系,并且 RPoN 函数之差可以用来表示风险程度的变化。

则 RPoN(p_1, p_2, \dots, p_n)存在,并可表示为

$$\text{RPoN}(p_1, p_2, \dots, p_n) = K \left[\sum_{i=1}^n (\lambda_i p_i) \right]^{1/\sum_{i=1}^n (\lambda_i p_i)} \quad (11)$$

式中:K 为正常数,一般取 $K=1$; λ_i 为 p_i 按概率值计算的加权系数, $\lambda_i = e p_i / \sum_{i=1}^n p_i$ 。

现证明以上 RPoN 公式能够满足风险度量函数所需要满足的公理化条件。首先由变量概率的连续性可知,式(11)满足连续性。下面证明 RPoN 公式满足定义 1 中的单调性与可加性条件。由 $y=x^{1/x}$ 函数在 $x \in [0, e]$ 时单调递增的性质可知,当 $x=e$ 时, y 取得最大值。又有

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i p_i = \sum_{i=1}^n \left[\frac{e p_i^2}{\sum_{i=1}^n p_i} \right] = \frac{e \sum_{i=1}^n p_i^2}{\sum_{i=1}^n p_i} \leq e \quad (12)$$

假设 $x = \frac{e(m^2 + n^2)}{(m+n)}$ 且 $m \geq n$, 由 x 对 m 求偏导得

$$\frac{\partial x}{\partial m} = \frac{e(m^2 + 2mn - n^2)}{(m+n)^2} > 0 \quad (13)$$

因而,式(11)满足定义 1 中的条件②与条件③。当所有 $p_i=1$ 时,事件的风险程度最大。代入式(11)可得最大 RPoN 的值为

$$\text{RPoN}_{\max} = e^{1/e} \quad (14)$$

同时,还可以求解 RPoN 和最大 RPoN 的比值。定义其比值为 ρ , 则有

$$\rho = \frac{\text{RPoN}}{\text{RPoN}_{\max}} = e^{-1/e} \times \text{RPoN} \quad (15)$$

2.3 RPoN 推论

RPoN 公式中的概率场 p_i 是利用概率加权关系转化为单一变量相对其最大风险程度的比例。下面给出 RPoN 公式的两个重要推论,并由这两个推论反映出 RPoN 公式与 RPN 公式在数学构成上存在本质区别。

推论 1 RPoN 定理。如果 $\sum_{i=1}^n p_i$ 保持不变,当所有 p_i 均相等时,RPoN 取得最小值,此时对事件的风险程度最小。

证明 由不等式的性质可知

$$\sum_{i=1}^n p_i^2 \geq n \left[\left(\sum_{i=1}^n p_i \right) / n \right]^2 \quad (16)$$

将式(16)代入式(11),由 $y = x^{1/x}$ 函数的单调性即可知推论 1 成立。

推论 2 采用故障的严重性 S、发生率 O 和探测度 D 这 3 个指标来描述和评价风险的 RPoN 公式。此时,RPoN 公式转化为

$$\text{RPoN} = x^{1/x} \quad (17)$$

式中: $x = \sum_{i=1}^3 (\lambda_i p_i)$, $\lambda_i = e p_i / \sum_{i=1}^3 p_i$, p_i 为经概率转换后的 S, O, D, 即将 RPN 方法中的 S, O, D 各自除以其对应的最大值 10。因而,RPoN 方法中的 S, O, D 取值均在 0 至 1 之间变化。

2.4 RPoN 的物理意义

RPoN 能够较好表达风险程度与不确定性程度之间的关系。在建立最大不确定程度测量基准的基础上,通过将各风险参数的概率加以权重转化为对应指标的可以测量的风险,并利用单调函数的性质反映各风险指标的可加性。这种转换关系提供了风险不确定性测量的一种新的基准。在实际生活中,风险事件是由多个随机变量综合作用而发生的,但又能够用各因素之间的均衡加权来表达。RPoN 公式的建立是与测不准原理和均衡理论相一致的,它们都是自然界的客观现象和基本定律。因而,RPoN 方法能够反映复杂系统风险的本质。RPoN 方法提供了一种简单的风险度量数学形式,它利用人们对风险的客观感觉来进行风险的量化和风险级别的综合评价。

由以上对 RPN 方法的不足分析和 RPoN 公式定义过程可知:RPoN 公式相比 RPN 公式能够更好地用于风险的定量测量和风险程度的评价。表 2 为 RPN 与 RPoN 方法的表达式、理论基础、函数特性以及适用范围的比较。其中,RPoN 公式采用 RPoN 公式的推论 2,其评定细则与 RPN 方法的规则相同。

当 S, O, D 之和一定且各变量取值均相同时, RPN 取得最大值,此时其基本函数为 $\text{RPN} = x^3$, 对应的 RPoN 的基本函数 $\text{RPoN} = x^{1/x}$ 。图 2 为 RPN 与 RPoN 的基本函数模型比较(为了增加可比性,图中将 RPoN 的基本函数乘以一给定系数以保证两函数在 $x=1$ 时的取值相同)。

并且从 RPoN 推论 1 得知:取某个风险指标变量 x 时,RPoN 曲线反映的是事件的风险程度在该曲线以上的取值,而 RPN 曲线反映的是事件的风险程度在曲线下方的可能范围。因此,采用基本函数为 $x^{1/x}$ 的 RPoN 方法来评定风险程度,可以促使在产品设计和制造过程将重点放在产品的可靠性改进,而不仅仅是设定一个可以接受的风险程度阈值上。

表 2 RPN 与 RPoN 方法的构成比较

Table 2 Constitution comparison of RPN and RPoN

构成	RPN	RPoN
表达式	$RPN = S \times O \times D$	$RPoN = x^{1/x}$
理论基础	模糊理论、概率论等	模糊理论、概率论、均衡理论和信息熵理论等
函数性质	S, O, D 之和一定,各变量取值相同时, RPN 取得最大值。当各变量取最大值 10 时, RPN 取得最大值 $RPN_{max} = 1\ 000$	S, O, D 之和一定,各变量取值相同时, RPN 取得最小值。当各变量取值均为 1 时, RPN 取得最大值 $RPoN_{max} = e^{1/e}$
适用范围	不能全面反映事件的风险程度,只能用于风险的定性评价	能够全面反映风险的整体意义和各变量关系,能够用于风险的定量测量

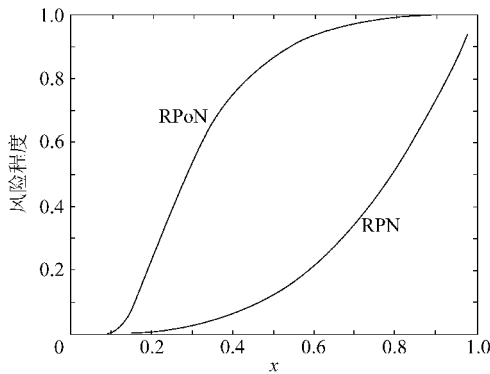


图 2 RPN 与 RPoN 的基本函数曲线

Fig. 2 Basic function curves of RPN and RPoN

2.5 RPoN 的一般计算流程

采用 RPN 方法和 RPoN 方法都需要 S, O, D 尽可能一致地得分,以此来提高危害性分析的有效性。在风险因素指标评价过程中,对专业性强的风险事件,需要进行专业技术审查讨论以确定 S, O, D 的得分。实际上 RPN 方法在工程应用中经常会用到专业审查方法,如二次 RPN 法就需要对 S, O, D 得分进行校准。最近,美国 NASA 对大型项目采用一种称为“一致评价组织支持系统”(CROSS)的多学科风险决策模型方法^[14],该

方法被认为是一种能够有效地减少决策主观性的风险识别方法和风险管理方法,其主要包括交互阶段、集成阶段和解释阶段 3 个环节。在该方法的集成阶段过程中,每个学科的风险决策成员使用系统的分析方法,对风险因素给定权重的结果进行校准,决策人员最后使用该模型的 Excel 表格程序 (Excel Program) 来计算他们各自对项目的得分,同时也使用最大一致启发式方法 (Maximize-agreement Heuristic) 来得到所有项目排序的一致结果。采用 CROSS 这种类型的最大一致启发式方法,可以有效地实现各得分的一致性和实现风险决策的理性选择。

依照以上对 RPoN 的定义,可以对 RPoN 的计算流程进行规划。其一般过程如图 3 所示。首先对所需要评价的风险事件的各指标进行风险识别,其中风险识别可通过历史资料分析、基于专家经验评估和头脑风暴评估等方法实现;再按照风险指标评定细则标准(同 RPN 方法),给出风险事件的 S, O, D 得分;然后使用最大一致启发式方法(如 CROSS 方法)等途径实现 S, O, D 得分的最大一致性结果;将 S, O, D 得分经概率转换得出各自的概率值,即将 RPN 方法中的 S, O, D 各自除以其对应的最大值 10;最后由 RPoN 公式来计算风险可能结果并实现风险的评价或风险排序。

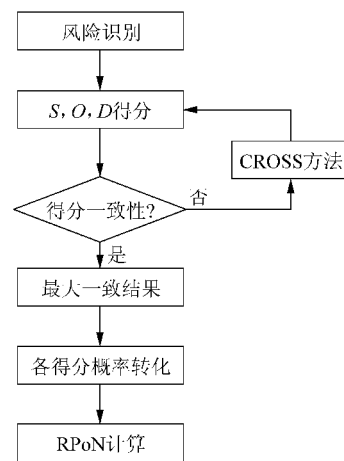


图 3 RPoN 的一般计算流程

Fig. 3 General computational procedure of RPoN

3 算例及分析

为了更好地进行 RPN 与 RPoN 方法的比较,现结合可靠性工程应用,选择 2 个典型实例进行分析。它们分别是压铸机铸模各种风险事件排序和故障模式危害性分析应用实例。

3.1 压铸机铸模各种风险事件排序

第1个实例为对一组压铸机铸模各种风险事件进行风险排序,其中 S, O, D 的部分数据来自文献[15]与文献[1]。 S, O, D 得分数据为应用评分准则与模糊语言变量得出的结果。各事件的风险度与 RPN 与 $RPoN$ 的计算过程如表3所示。由 RPN 值可知:事件1的风险程度优先于事件4的风险程度,而两事件 S, O, D 之和相同;事件3的风险程度优先于事件2的风险程度,两事件 S, O, D 之和也相同。而由 $RPoN$ 的计算结果可知:事件4的风险程度优先于事件1的风险程度;事件2的风险程度优先于事件3的风险程度。

表3 RPN与RPoN的风险排序

Table 3 Risk prioritization conducted by RPN and RPoN

序号	S	O	D	RPN	x	RPoN
事件1	6	8	6	288	1.848	1.394
事件2	3	7	5	105	1.504	1.312
事件3	5	5	5	125	1.359	1.253
事件4	3	9	8	216	2.093	1.423

以上计算结果表明:RPoN公式与RPN公式得出的结论不同。由各事件的 S, O, D 数据分析可知:RPoN方法的结论更能反映各事件的风险程度,而RPN方法在进行风险排序时却得到与人们的客观认识不相一致的结果。

3.2 故障模式危害性分析

第2个实例为风险评估的有效性分析。此例为某油压系统内的一件产品(部件)在两次FMEA实施过程中,分别采用RPN方法与RPoN方法进行故障模式危害性分析的比较。因为要求产品具有安全性,对该油压系统在最后设计阶段使用了可行性的FMEA。虽然根据FMEA的建议改正措施作了设计与工艺上的改进,但是,在批量生产初期的检查中,却发生了油压警告指示灯一直不亮这一重大故障。因此,为防止故障再次发生,再次实施FMEA以弄清故障机理。有关此例中两次FMEA实施的详细过程可参考文献[15]。

在FMEA实施过程中,由于故障模式和故障原因都是经过预测得到的,因而这种预测可能会在不同的场合得出不同的结论。不同的预测结论会造成危害性分析中 S, O, D 得分不一致的结果,同时会影响到FMEA工作的有效性。本例

中,两次FMEA给出的 S, O, D 得分分别为5,3,2与9,3,2。

两种风险分析方法都给出了故障的相对风险程度评价。表4为RPN与RPoN在产品FMEA实施效果方面的比较。采用RPN方法在第1次FMEA实施过程中得出优先数得分为30,对故障的危害性没有引起足够重视,因而没有及时发现故障原因;在第2次FMEA实施过程中对于出现的故障现象和故障模式进行了专业审查(可以认为是采用CROSS方法),将故障严重性的危害等级评分从5调整为9,并得出了故障原因的结论。专业审查得出故障产生的原因为此产品零件之一的柱塞开关与板极接触几次以后,板极的接触面出现氧化膜而造成绝缘。虽然第2次FMEA过程中得出了故障原因,并进行了设计改进(将开关的接触面改为球形;接触面全部镀银),但RPN得分为54,相对于最大风险的比值为0.054,这种得分依然不能引起对故障危害性的重视,从而故障原因的发现并不是由于RPN得分产生的结果。

表4 过程FMEA实施结果分析

Table 4 Analysis of implementation results of process FMEA

比较类别	第1次评估	第2次评估	设计改进
S	5	9	有
O	3	3	无
D	2	2	无
RPN	30	54	无建议
RPN级别	0.03	0.054	无建议
RPoN	1.032	1.390	有建议
RPoN级别	0.713	0.962	有建议

而采用本文中提出的RPoN方法,在第1次FMEA与第2次FMEA过程中的得分分别为1.032与1.390,其与风险最大值的比值分别为0.713与0.962。这2次得分均能够给出故障风险程度的建议,促使FMEA工作中故障模式的发现和处理。通过两者的实施过程可知:应用RPN方法在FMEA工作中并不能有效实现故障的风险评估,而采用RPoN方法较大提高了FMEA工作的有效性。

4 结论

介绍了在危害性分析工作中经常采用的RPN方法,指出了该方法的函数离散性、各指标得分的主观性和评价误差的依赖性不足,以及该方法不足产生的本质原因:未能均衡合理进行各种风

风险因素的权重分配。结合信息熵理论,给出了风险度量函数应该满足的公理性条件,在此基础上对RPN进行了定义,给出了RPN的计算公式,并证明了RPN在风险事件评定过程中满足统计推理的一致性要求。实验数据表明:RPN公式相比RPN公式能够更好地用于风险的测量和风险程度的评价。因而,RPN方法为风险度量评价和风险评价提供了一种新的基准,由于它能够反映风险事件的客观本质,相信将会在可靠性工程各个领域得到广泛应用。

参 考 文 献

- [1] 康锐,郑涛. 危害性分析中的模糊数学方法[J]. 北京航空航天大学学报, 1995, 21(4): 60-65.
Kang Rui, Zheng Tao. Fuzzy mathematics method in criticality analysis[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1995, 21(4): 60-65. (in Chinese)
- [2] Bowles J B. An assessment of RPN prioritization in a failure modes effects and criticality analysis[J]. Journal of the IEST, 2004, 47: 51-56.
- [3] GJB/Z 1391-2006. 故障模式、影响及危害性分析程序[S]. 2006.
GJB/Z 1391-2006. Failure mode, effects and critically analysis[S]. 2006. (in Chinese)
- [4] Onodera K. Effective techniques of FMEA at each life-cycle stage[C]//Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium. 1997: 50-56.
- [5] Iranmanesh H, Jalili M, Pirmoradi Z. Developing a new structure for determining time risk priority using risk breakdown matrix in EPC projects[C]//2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. 2007: 999-1003.
- [6] Braglia M, Bevilacqua M. Fuzzy modelling 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.
- [7] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: an analysis of decisions under risk [J]. Econometrica, 1979(47): 313-327.
- [8] Bowles J B. New SAE FMECA standard [C]//Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium. 1998: 48-53.
- [9] Agarwala A S. Shortcomings in MIL-STD-1629A guidelines for criticality analysis[C]//Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium. 1990.
- [10] Shannon C E. A mathematical theory of communication [J]. Bell System Technical Journal, 1948, 26(3): 379-423, 623-656.
- [11] 王栋,潘少明,吴吉春,等. 确定风险分析先验概率分布的最大熵方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006, 14(Sup): 318-325.
Wang Dong, Pan Shaoming, Wu Jichun, et al. Deriving the prior probability distribution of risk analysis with the use of the principle of maximum entropy (POME) [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2006, 14(Sup): 318-325. (in Chinese)
- [12] 杨毅,杨自春,陈国兵. 过程FMEA技术研究及一种新的评估准则[J]. 质量与可靠性, 2006(6): 9-13.
Yang Yi, Yang Zichun, Chen Guobing. Research on the technology and a new evaluating criterion of process FMEA [J]. Quality and Reliability, 2006(6): 9-13. (in Chinese)
- [13] Codd E F. A relational model of data for large shared date banks [J]. Communications of the ACM, 1970, 13(6): 377-387.
- [14] Tavana M. CROSS: a multicriteria group-decision-making model for evaluating and prioritizing advanced-technology projects at NASA [J]. Interfaces, 2003, 33(3): 40-56.
- [15] 盐见弘. 故障模式和影响分析与故障树分析的应用[M]. 许风璋,译. 北京:机械工业出版社,1987: 127-152.
Yan Jianhong. The application of failure mode, effects and critically analysis [M]. Xu Fengzhang, translated. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987: 127-152. (in Chinese)

作者简介:

王贵宝(1974—) 男,博士研究生,工程师。主要研究方向:信息熵理论,交叉熵方法。

Tel: 028-83207035

E-mail: wguibao@uestc.edu.cn

黄洪钟(1963—) 男,教授,博士,博士生导师。主要研究方向:可靠性,多学科设计优化。

Tel: 028-83206916

E-mail: hzhuang@uestc.edu.cn

(编辑:李铁柏,徐晓)