

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.09.001

# 面向电子系统间歇故障的改进 RPN 计算框架\*

吴虎胜<sup>1,2</sup> 盛 晟<sup>2</sup> 凌晓冬<sup>3</sup> 段东立<sup>1</sup>

(1. 武警工程大学装备工程学院 西安 710086; 2. 空军工程大学装备管理与安全工程学院 西安 710051;  
3. 中国卫星海上测控部 江阴 214400)

**摘要:**针对经典风险优先值(risk priority number, RPN)方法的数学缺陷、要素缺陷和研究对象缺陷,分析了经典 RPN 方法存在这些缺陷和不足的原因,提出了一种面向电子系统间歇故障的 RPN 改进计算方法。该方法采用五态 Markov 模型进行故障致损次数  $O$  的估算,采用 DEMATEL 方法进行故障位置、机理、模式的相关性/影响性分析,采用马氏距离对 RPN 一次排序结果中的相同序号进行二次排序,较好的解决了经典 RPN 方法取值不是连续整数、对 3 个主要要素  $S$ 、 $O$ 、 $D$  取值的微小变化敏感等问题。最后,采用某海基设备电子系统的间歇故障案例来力证了改进 RPN 计算框架的有效性,可清晰区分不同间歇故障的危险级且更为客观,取得较好效果。

**关键词:** 间歇故障; 电子系统; 风险优先值; 可靠性

**中图分类号:** TN707; TP277 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

## Improved RPN computing framework facing to intermittent fault of electronic system

Wu Husheng<sup>1,2</sup> Sheng Sheng<sup>2</sup> Ling Xiaodong<sup>3</sup> Duan Dongli<sup>1</sup>

(1. Materiel Engineering College, Armed Police Force Engineering University, Xi'an 710086, China;  
2. Materiel Management and Safety Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;  
3. China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214400, China)

**Abstract:** Aiming at solving the defects of risk priority number (RPN) in mathematics, ingredients and research object, classic RPN method is analyzed. And an improved RPN method facing to intermittent fault of electronic system is presented. This method estimates failure times  $O$  by five-state Markov mode, the correlation and influence analysis of fault location, mechanism and mode are carried out by DEMATEL method, and the results which have the same sequence number in RPN first sorting are sorted by Mahalanobis distance. This method solves the problems well, for instance, classic RPN value is not a continuous integer, RPN result is sensitive to fractional changes of three key information factor  $S$ ,  $O$  and  $D$ . The improved RPN computing model is applied to analyze intermittent fault case of a sea based equipment, which can get objective risks prioritization of different intermittent faults, and a good result is obtained.

**Keywords:** intermittent fault diagnosis; electronic system; RPN; reliability

## 0 引 言

科技发展日新月异,复杂的海基设备电子系统的可靠性直接影响着海基设备的正常运行与否,也直接关系

海上任务的顺利进行。当前,可靠性和维修性学科已从传统可靠性预计转向了风险管理<sup>[1]</sup>。在可靠性工程领域中,风险优先值(risk priority number, RPN)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。一般而言,影响分析的目的在于对产品/系统中的各类故障

进行优先级排序,从而可以把精力集中于优先级较高的故障方面,对其实施检测、监测、诊断和预测等。影响分析所采用的方法通常是计算各类故障的 RPN,通过比较各类故障 RPN 的大小来确定故障优先级。

当前,电子系统的各种形态故障已经越来越受到广大学者们的重视<sup>[2-3]</sup>。电子系统的故障,根据其发生的时间特征,可分为3类:永久故障(permanent failure)、间歇故障(intermittent failure)和瞬时故障(transient failure)<sup>[4]</sup>。其中,间歇故障指可由故障状态自行恢复正常的故障,通常会在首次发生后反复、同位置发生,其在时间上表现出时而发生时而不发生的间歇特征。间歇故障是导致运载火箭等电气系统机内测试故障检测率偏低和虚警率高的重要原因之一<sup>[5]</sup>。直接导致不必要的修理、低战备完好率、过早的系统更换等问题,由此造成了巨大的资源浪费。经过大量的理论研究以及故障模式影响分析(failure mode and effect analysis, FMEA)、故障模式、影响及危害性分析(failure mode effects and criticality analysis, FMECA)、故障模式、机理及危害性分析(failure mode, mechanism, and effect analysis, FMMEA)实践,现已针对一般故障发展出了种类繁多的 RPN 计算方法。但对于间歇故障,人们仍将主要的关注点放在间歇故障的故障模式、故障原因、故障机理、故障模型以及诊断/预测算法等方面,而关于间歇故障 RPN 计算方法的研究还比较少。本文在对经典 RPN 方法分析的基础上,分别从数学计算、故障严重性  $S$ 、故障发生可能性  $O$ 、故障险测难度  $D$  三要素合研究对象3个方面进行改进,提出一种面向间歇故障的 RPN 计算框架,而后基于某海基设备间歇故障案例验证了改进方法的可行性和风险评价效果。

## 1 经典 RPN 方法分析

### 1.1 经典 RPN 方法简介

RPN 方法最早见于 FMEA 方法中,FMEA 将 RPN 分解为3个要素: $S$ 、 $O$ 、 $D$ ,分别将  $S$ 、 $O$ 、 $D$  分为10个等级,通过确定  $S$ 、 $O$ 、 $D$  的等级并计算三者的乘积来确定 RPN 值的大小,从而排出故障优先次序。有非常多的文献介绍了经典 RPN 方法及其应用,这些文献中,其 RPN 值的具体计算有细微差别(计算公式均相同,主要差别在于  $S$ 、 $O$ 、 $D$  值的等级确定准则)<sup>[6-7]</sup>。

#### 1) 故障严重性 $S$

严重性用于描述故障对于产品/系统、人员等的影响程度,如表1所示。

#### 2) 故障发生可能性 $O$

可以统计概率的方法来描述故障发生的可能性,如表2所示。

表1 故障严重性的等级及其确定方法

Table 1 The grade of fault severity and its determination method

等级	影响程度	确定等级方法
1	无影响	无影响
2	很微弱	需对系统非常熟悉才能发现的,与设计规范不符的一些非实质性缺陷(如外观、颜色等)
3	微弱	对系统有一定了解才能发现的,与设计规范不符的一些非实质性缺陷(如外观、颜色等)
4	很低	大多数人均能发现的,与设计规范不符的一些非实质性缺陷(如外观、颜色等)
5	低	系统运行正常,但舒适/便捷水平有所下降
6	适中	系统运行正常,但舒适/便捷水平明显较差
7	高	系统运行正常,但整体性能明显下降
8	很高	系统运行异常,丧失一些主要功能
9	危险	有安全隐患且/或存在不合法规的地方,但有预兆
10	来不及反应的危险	存在安全隐患且/或存在不合法规的地方,无预兆或来不及反应

表2 故障发生可能性的等级及其确定方法

Table 2 The grade of fault possibility and its determination method

等级	故障发生可能性	确定等级的方法/准则
1	不可能	$\leq 0.00000667(1/1500000)$
2		$0.0000667(1/150000)$
3	低:相对较少	$0.000667(1/15000)$
4		$0.0005(1/2000)$
5		$0.0025(1/400)$
6	适中:偶尔发生	$0.0125(1/80)$
7		$0.05(1/20)$
8	高:反复发生	$0.125(1/8)$
9		$0.33(1/3)$
10	非常高:不可避免	$\geq 0.5(1/3)$

#### 3) 故障检测难度 $D$

故障检测难度能反映出产品/系统的可测性,如表3所示。

#### 4) RPN 的计算

RPN 计算时将所得的  $S$ 、 $O$ 、 $D$  等级相乘即可。

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

### 1.2 经典 RPN 方法的缺陷分析

经典 RPN 方法虽然为定量评估故障风险提供了解决思路,但其也存在一些缺点,归纳起来主要存在3个方面,即经典 RPN 方法的数学缺陷、要素缺陷和研究对象缺陷。

#### 1) 经典 RPN 方法的数学缺陷

几乎每一篇关于 RPN 的改进计算方法的文献都会提及经典 RPN 方法的如下4个缺点<sup>[8]</sup>。

表3 故障检测难度的等级及其确定方法

Table 3 The grade of fault detection difficulty and its determination method

等级	发生可能性	确定等级的方法/准则
1	确定	能确定地检测出故障模式并确定原因 (0.86 ~ 1)
2	极小	几乎确定地检测出故障并确定原因 (0.76 ~ 0.85)
3	小	能以大概率检测出故障并确定原因 (0.66 ~ 0.75)
4	低	能以高概率检测出故障并确定原因 (0.56 ~ 0.65)
5	较低	能以较高概率测出故障并确定原因 (0.46 ~ 0.55)
6	中等	能以中等概率测出故障并确定原因 (0.36 ~ 0.45)
7	较高	检测出故障并确定原因的概率较低 (0.26 ~ 0.35)
8	高	检测出故障并确定原因的概率很低 (0.16 ~ 0.25)
9	大	检测出故障并确定原因的概率极小 (0.06 ~ 0.15)
10	完全不确定	无法检测出故障和确定原因 (0 ~ 0.05)

(1) 采用了顺序度量值作为  $S$ 、 $O$ 、 $D$  的数值。依据表 1~3,  $S$ 、 $O$ 、 $D$  的取值均为 1~10, 但这些值只是相对值。例如: 并不能准确知道  $S=1$  和  $S=2$  之间的差别到底是多少, 而且也不能说  $S=2$  时产品/系统故障的严重性是  $S=1$  时的 2 倍。因此, 表 1~3 的取值方法, 对于乘法、除法是没有意义的, 而式(1)采用的就是乘法运算。另外, 该方法即使对于加法、减法也只是部分情况有意义, 因为加法和减法要求运算值具有等间隔的性质。

(2) RPN 的取值不是连续整数。由于  $S$ 、 $O$ 、 $D$  的取值仅限于 1~10 的整数, 所以经式(1)计算得出的 RPN 值并不能取遍 1~1 000, 而是有很多空缺, 且空缺占了绝大部分(88%)。例如, 像 11、13、17 这样的值是无法取到的。

(3) 不同的  $S$ 、 $O$ 、 $D$  取值对应相同 RPN 值的现象。与缺点(2)同源异象, 根据缺点(2)中所述,  $S$ 、 $O$ 、 $D$  共有 1 000 种组合取值, 而所得 RPN 值在 0~1 000 范围内却有 88% 的空缺, 反过来说即, RPN 只有 120 个可能的取值。

(4) 对  $S$ 、 $O$ 、 $D$  取值的微小变化可能会很敏感。主要原因是 3 个参数值相乘, 某一个参数的微小变化的影响会被放大。经典 RPN 分析方法中,  $S$ 、 $O$ 、 $D$  这 3 个参数常受到分析人员主观因素的影响, 造成评分上的差异, 而这些差异在乘积的过程中被放大, 导致最终得到的 RPN 值发生很大的变化。由此可见, 传统 RPN 分析方法很容易

造成 RPN 排序的混乱, 使得一些关键的故障模式无法被发现。

### 2) 经典 RPN 方法的要素缺陷

这里的要素指的是计算 RPN 所需的  $S$ 、 $O$ 、 $D$  三个要素。实际中, 经常会碰到  $S$ 、 $O$ 、 $D$  无法有效代表故障风险相关的因素的情况, 如需要以定量的形式来描述故障严重性, 则应该摒弃经典方法中的序数度量形式; 或在故障机理计算 RPN 时, 故障机理本身是不可检测的, 则需去掉要素  $D$ 。

### 3) 经典 RPN 方法的研究对象缺陷

经典 RPN 方法的研究对象是故障模式(在 FMMEA 中增加了故障机理), 而实际中, 故障位置、故障模式、故障原因、故障机理之间均存在相关关系, 涉及一种故障模式而不将其划定为“在特定故障位置, 由特定故障原因, 经特定故障机理而产生”是不全面、不深入的。

## 2 改进的 RPN 计算框架

针对经典 RPN 方法的缺陷, 大量学者进行了相关研究, 主要集中于 3 类: 1) 针对数学计算缺陷。经典 RPN 方法基于序数度量来分别给出  $S$ 、 $O$ 、 $D$  的值, 很多文献由此产生的缺陷进行了改进, 如采用层次分析法计算 RPN<sup>[9]</sup>、模糊 RPN 计算方法<sup>[10]</sup>、为 RPN 三要素赋权<sup>[11]</sup>、将 TOPSIS 引入 RPN 计算<sup>[12]</sup> 等。2) 针对三要素设计缺陷。实际情况复杂多样,  $S$ 、 $O$ 、 $D$  可能并不能有效代表风险相关的因素, 需要进行修正, 如文献[13]采用经济损失来计算 RPN, 文献[14]基于质量屋来确定更加合理的  $O$ 、 $D$  值等。3) 针对研究对象缺陷。可能是受约束于经典 RPN 方法的思维, 大量文献都是仅仅针对故障模式进行 RPN 计算, 或者在 FMMEA 中分别针对故障模式和故障机理进行 RPN 计算。文献[3]强调在 FMEA 中应将故障原因也考虑进来, 因而考虑了故障原因与故障模式的相关关系。

因此, 在实际涉及 RPN 方法的问题时, 需要同时避免经典 RPN 方法的数学缺陷和三要素中一些不合乎实际的因素, 并对 RPN 的研究对象作出修正。间歇故障由于其区别于一般故障的特点, RPN 的计算方法也应有所区别, 其计算框架, 如图 1 所示。

### 2.1 针对 $S$ 、 $O$ 、 $D$ 三要素的改进

1) 将故障严重性  $S$  替换为由故障带来的损失  $L$ 。以费用来表示  $L$ , 将  $L$  分解为间歇故障本身引起的直接损失  $L_0$  (备件费用  $C_0$  与停工费用  $C_{down}$  的和)、故障维修损失  $L_1$  (故障维修费用  $C_1$ ) 和其他损失  $L_2$  (其他费用  $C_2$ )。

2) 将间歇故障发生的可能性替换为故障致损次数, 仍用  $O$  来表示。由于间歇故障的特殊性, 这里的故障致损次数, 并不等于故障发生次数, 因为存在有故障发生但

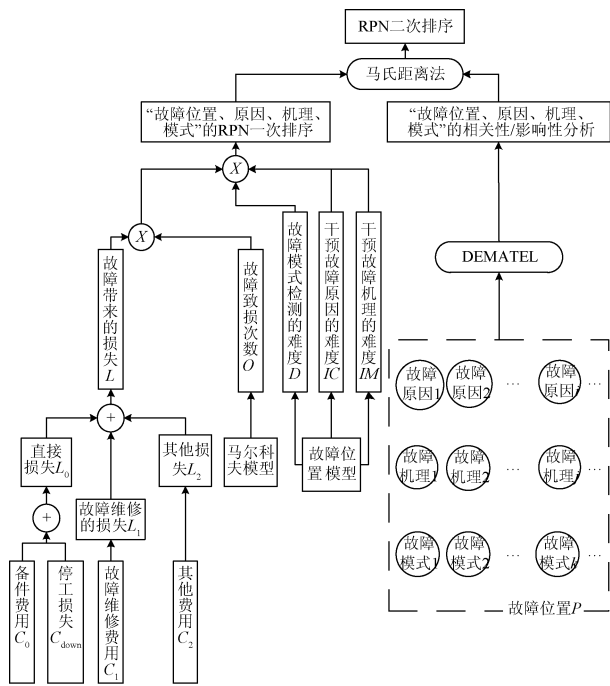


图1 面向间歇故障的RPN计算框架

Fig. 1 RPN computing framework facing to intermittent fault

未引起损失的现象。这里将采用五态马尔可夫方法对故障致损次数  $O$  进行估算。

3) 继续沿用故障模式的检测难度  $D$ ，但需要在故障位置信息的限制下来评估故障模式的检测难度；

4) 增加两个要素：对故障原因实施干预的难度  $I_C$ 、对故障机理实施干预的难度  $I_M$ 。与  $D$  一样， $I_C$ 、 $I_M$  也要在故障位置信息的限制下来进行评估；另外，对于  $I_C$ 、 $I_M$ ，也用类似  $D$  的 10 个评估等级。

2.2 针对研究对象的改进

对故障模式实施检测和维修可以达到消除故障现象的目的，对故障原因的相关因素加以干预可以达到对故障预防的目的，对故障机理的相关因素加以干预可以达到对故障抑制的目的，而实施 RPN 的目的就是为了通过采取相关措施以降低故障的影响。另外，采取何种措施还要受到故障位置的影响。

由此可见，将故障位置、故障原因、故障机理、故障模式四者联合起来作为 RPN 的研究对象更为妥当。图 1 中，对于一个故障件，以  $p, i, j, k$  分别表示故障发生的位置、故障原因、故障机理和故障模式。面向间歇故障的 RPN 计算框架中，不再单独计算某一故障原因或某一故障机理的 RPN 值，而是计算整个故障存在的通路“故障位置  $p \rightarrow$  故障原因  $i \rightarrow$  故障机理  $j \rightarrow$  故障模式  $k$ ”，记为  $F_{p,i,j,k} \notin \phi$ 。

2.3 数学计算方面的改进

针对经典 RPN 方法的缺陷，这里主要进行了 4 点

改进：

1) 以经济损失或等量经济损失（如考虑军事效益的经济损失）来衡量故障的严重性，从而实现定量评估；

2) 针对电子系统间歇故障的特点，引入故障致损次数，从而可实现故障的总损失的定量评估；

3) 采用 DEMATEL (decision making trial and evaluation laboratory) 方法给出“故障位置、原因、机理、模式”的相关性/影响性分析，从而避免纯粹依据 RPN 大小的排序，使故障风险的优先级排序更加客观；

4) 采用马氏距离方法对 RPN 值与 DEMATEL 的分析结果进行综合，从而得出最终的 RPN 排序。

2.4 面向间歇故障的改进 RPN 方法的各要素计算

面向间歇故障的改进 RPN 方法主要涉及到间歇故障损失  $L$ ，间歇故障致损次数  $O$ ，间歇故障模式检测难度  $D$ （同经典 RPN 方法中  $D$  值的估算），间歇故障原因干预难度  $I_C$ ，间歇故障机理干预难度  $I_M$  这 5 个值的估算，以及故障位置、原因、机理、模式的相关性/影响性分析和间歇故障的 RPN 二次排序。

1) 间歇故障损失  $L$  的估算。 $L$  主要由备件费用  $C_0$ （故障位置所属的可换单元价格）、停工费用  $C_{down}$ （常由停工时间与单位时间停工费相乘得到）、故障维修费用  $C_1$  和其他费用  $C_2$  求和进行估算。

2) 间歇故障致损次数  $O$  的估算。鉴于许多间歇故障最终都发展成为永久故障的事实，在经典二态马尔可夫方法的基础上，文献[15]在系统“正常态”、“故障态（间歇）”的基础上增加一个“永久故障态”给出了一种三态马尔可夫模型。文献[16]则给出了所给出了包括正常态、两种间歇态、永久故障态的一种四态马尔可夫模型。这里采用一种 5 态的 Markov 模型，如图 2 所示。图 2 中，“0”、“1”、“2”、“3”、“4”分别表示正常态、间歇故障态、永久故障态（但未影响系统使用）、致损态（故障影响系统使用）、故障态（其他永久或非永久故障，但不影响系统使用）。需要特别说明下的是  $P_{21}$ ，现实中永久故障向间歇故障的转移现象是存在的，比如永久短路故障，而短路的地方如果截面积很小（很细），在外界加大电流可能会烧断，而由于金属有生须的现象，可能会出现间歇故障<sup>[17]</sup>。

图 2 的 5 步 Markov 模型的一步转移概率矩阵如式 2 所示。

进一步地可得出其 2 步转移概率矩阵。根据有限 Markov 链遍历性相关定理，令  $P_i$  表示系统处于状态  $i$  的极限概率，可得到如式(3)所示的方程组。

$$\begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & 0 & 0 & 0 \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ 0 & P_{21} & P_{22} & P_{23} & 0 \\ 0 & P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ 0 & P_{41} & 0 & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix} \quad (2)$$

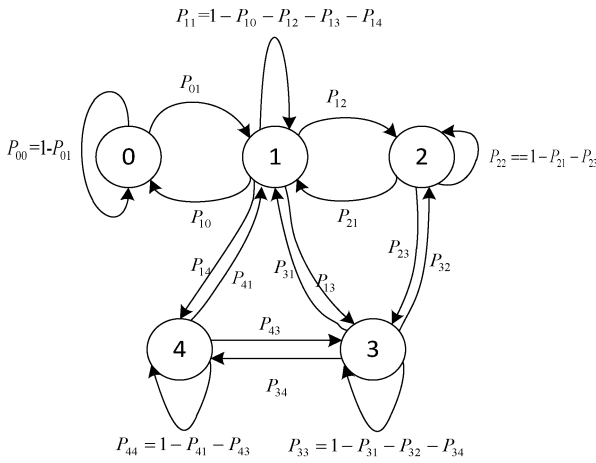


图2 五态 Markov 模型

Fig. 2 Five-state Markov model

此外,间歇故障机理干预难度  $I_M$  的估算与  $I_C$  的方法相同。

4) 基于 DEMATEL 的故障位置、原因、机理、模式的相关性/影响性分析的步骤如下:1) 设  $S_p C_i$  表示位于故障位置  $p$  的故障原因  $i$ ,  $S_p ME_j$  表示位于故障位置  $p$  的故障机理  $j$ ,  $S_p MO_k$  表示位于故障位置  $p$  的故障模式  $k$ 。2) 整理得出某系统的  $\{F_{p,i,j,k}\}$ ; 通过给出各  $S_p C_i$ 、 $S_p ME_j$ 、 $S_p MO_k$  ( $S_p C_i \in F_{p,i,j,k}$ ,  $S_p ME_j \in F_{p,i,j,k}$ ,  $S_p MO_k \in F_{p,i,j,k}$  两两间的关系(即确定  $M$  矩阵); 利用文献[19]所述的 DEMATEL 方法步骤即可给出  $S_p C_i$ 、 $S_p ME_j$ 、 $S_p MO_k$  的影响性/相关性值; 将与  $F_{p,i,j,k}$  相关的  $S_p C_i$ 、 $S_p ME_j$ 、 $S_p MO_k$  的影响性/相关性值相加, 即可得  $F_{p,i,j,k}$  的影响性/相关性。

5) 基于马氏距离的 RPN 二次排序。马氏距离方法用于综合评价, 考虑了不同属性之间的差别, 具有量纲无关性的特点<sup>[20]</sup>, 且可以克服要素间的相关性。因此, 将其用于间歇故障 RPN 的二次排序, 即将 RPN 一次计算值与 DEMATEL 的结果结合起来综合排序。

假设针对集合  $X$  有两种排序  $P_1$ 、 $P_2$ , 可定义  $X$  中的元素  $x_i$  到  $P_1$ 、 $P_2$  各自的马氏距离为:

$$d(x_i, P_1) = \sqrt{(x_i - \mu_1) \frac{1}{\sigma_1^2} (x_i - \mu_1)} \quad (6)$$

$$d(x_i, P_2) = \sqrt{(x_i - \mu_2) \frac{1}{\sigma_2^2} (x_i - \mu_2)} \quad (7)$$

式(6)和(7)中,  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  分别为  $P_1$ 、 $P_2$  的均值(而对于多变量/指标的情况, 为均值矩阵);  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  分别为  $P_1$ 、 $P_2$  的方差(而对于多变量/指标的情况, 为协方差矩阵, 式中的倒数也应改为矩阵求逆)。从而, 可给出如下判别准则:

$$\begin{cases} x_i \in P_1, & d(x_i, P_1) < d(x_i, P_2) \\ x_i \in P_2, & d(x_i, P_1) > d(x_i, P_2) \\ \text{待定,} & d(x_i, P_1) = d(x_i, P_2) \end{cases} \quad (8)$$

面向间歇故障的 RPN 的二次排序: 1) 以各个“故障位置、原因、机理、模式”组合为集合  $X$  的元素; 2) 以 RPN 一次排序结果为  $P_1$ , 以 DEMATEL 的影响性 ( $R-C$ ) 排序结果为  $P_2$ ; 3) 根据马氏距离得出各个“故障位置、原因、机理、模式”组合的排序值  $P(x_i)$ ; 4) 对于  $d(x_i, P_1) = d(x_i, P_2)$  的情况, 令  $x_i \in P_i$ ; 5) 得到所有的  $P(X)$  后, 对于可能存在的  $P(x_i) = P(x_j)$  的情况, 依照  $P_1(x_i)$ 、 $P(x_j)$  确定二者的新排序, 并插入  $P(X)$ 。

值得注意的是排序 4) 和 5) 中均依  $P_1$  (即 RPN 的一次排序结果) 作为出现“矛盾”情况的处理准则, 这是基于这一准则, 即: DEMATEL 方法的结果对于 RPN 的一次排序为辅助的作用。

$$\begin{cases} P_{00}P_0 + P_{10}P_1 = P_0 \\ P_{01}P_0 + P_{11}P_1 + P_{21}P_2 + P_{31}P_3 + P_{41}P_4 = P_1 \\ P_{12}P_1 + P_{22}P_2 + P_{32}P_3 = P_2 \\ P_{13}P_1 + P_{23}P_2 + P_{33}P_3 + P_{43}P_4 = P_3 \\ P_{14}P_1 + P_{34}P_3 + P_{44}P_4 = P_4 \\ P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

根据遍历性的定义, 可知:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P_{i3}(n) = P_3 \quad (4)$$

假设间歇故障的总发生次数为  $N$ , 则故障致损次数  $N_L$  为:

$$N_L = N \times P_{i3}(\infty) = N \cdot P_3 \quad (5)$$

式(5)中的  $N$  以及式(1)中一步转移概率可采用类似文献[18]中所述的实验手段获得。

3) 间歇故障原因干预难度  $I_C$  的估算。采用类似表 3 中故障检测难度的评估方法, 给出  $I_C$  的评估准则如表 4 所示。

表 4 间歇故障原因干预难度的等级及其确定方法

Table 4 The grade of intervene difficulty of intermittent fault cause and its determination method

等级	故障原因 干预难度	确定等级的方法/准则
1	确定	能确定地对故障原因实施干预(0.86~1)
2	极小	几乎能确定地对故障原因实施干预(0.76~0.85)
3	小	能以大概率对故障原因实施干预(0.66~0.75)
4	低	能以高概率对故障原因实施干预(0.56~0.65)
5	较低	能以较高概率对故障原因实施干预(0.46~0.55)
6	中等	能以较高概率对故障原因实施干预(0.46~0.55)
7	较高	可对故障原因实施干预的概率较低(0.26~0.35)
8	高	可对故障原因实施干预的概率很低(0.16~0.25)
9	大	可对故障原因实施干预的概率极小(0.06~0.15)
10	完全不确定	无法对故障原因实施干预(0~0.05)

### 3 案例应用

以某种海基设备电子系统为例对间歇故障 RPN 方法进行验证,如表 5 所示。

**表 5 某海基设备中的间歇故障案例**  
**Table 5 The intermittent fault case in a sea based equipment**

故障位置	故障原因	故障机理	间歇故障模式	$F_{p,i,j,k}$
线缆	机械力	机械过应力(导线)	断路	$F_{1,1,1,1}$
线缆	机械力	机械过应力(导线)	短路	$F_{1,1,1,2}$
线缆	温、湿度	PVC 老化(导线)	短路	$F_{1,2,2,2}$
线缆	温、湿度	化学腐蚀(焊点、插针)	断路	$F_{1,2,3,1}$
线缆	振动	摩擦腐蚀(焊点、插针)	断路	$F_{1,3,4,1}$
LED	温、湿度	化学腐蚀(焊点、引脚)	断路	$F_{2,2,3,1}$
LED	振动	摩擦腐蚀(焊点、引脚)	断路	$F_{2,3,4,1}$

#### 3.1 RPN 一次排序

以  $F_{1,2,2,2}$  为例进行各要素估算,并在末尾给出表 5 中所有故障的各要素估算值及 RPN 值。

1) 间歇故障损失  $L$  的估算。(1) 设直接损失  $L_0$  包括备件费用/元(用于替换故障线缆的备用线缆的费用)  $C_0 = 800$ , 停工时间/d(从发现故障到备件投入正常使用)  $T_{down} = 0.5$ , 单位时间停工费用/元(依统计或经验给出)  $C_{down} = 1\ 000$ ; (2) 维修损失  $L_1$  主要包括检测和维修费用、运费、人力费用、差旅费等,按 200 元计; (3) 其他损失  $L_2$ , 该故障不会引起次生故障或对人员造成伤害,故估计值为 0。

2) 故障致损次数  $O$  的估算。对于  $F_{1,2,2,2}$ , 即可能演变为永久短路故障,也可能因短路而发生起火,则导线可能因烧结而发生永久断路故障,因此,该类型的间歇故障存在五态马尔可夫模型中的状态“4”(图 2)。对  $F_{1,2,2,2}$  建立如图 2 所示的五态马尔可夫模型,可得一步转移概率矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 0.80 & 0.20 & 0 & 0 & 0 \\ 0.15 & 0.10 & 0.05 & 0.60 & 0.10 \\ 0 & 0.05 & 0.15 & 0.80 & 0 \\ 0 & 0.10 & 0.50 & 0.30 & 0.10 \\ 0 & 0.05 & 0 & 0.35 & 0.60 \end{bmatrix} \quad (9)$$

从而,依据式(3)可得:

$$\begin{cases} 0.80P_0 + 0.15P_1 = P_0 \\ 0.20P_0 + 0.10P_1 + 0.05P_2 + 0.10P_3 + 0.05P_4 = P_1 \\ 0.05P_1 + 0.15P_2 + 0.50P_3 = P_2 \\ 0.60P_1 + 0.80P_2 + 0.30P_3 + 0.35P_4 = P_3 \\ 0.10P_1 + 0.10P_3 + 0.60P_4 = P_4 \\ P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1 \end{cases} \quad (10)$$

解得,  $p_3 = 0.4472$ 。根据历史数据,在设备的寿命周期内,线缆因 PVC 绝缘老化引发的间歇短路故障总次数  $N = 8$ 。据式(4),故障致损次数  $N_L = 4$ 。

3) 故障模式检测难度  $D$  的估算。由于缺乏反射计之类的有效检测工具,该类间歇短路故障较难检测,根据表 3 将其确定为  $D = 8$ 。

4) 故障原因干预难度  $I_C$  的估算。对于  $F_{1,2,2,2}$ , 故障原因为温度、湿度。由于设备工作环境为开放式外场环境,且线缆完全暴露在外,对于温度,无法采用有效的温控手段,但可通过选用高低温特性好的导线和改良线缆外层保护套的方式来降低温度的影响;而对于湿度,可通过改良线缆外层保护套的方法来干预。因此,可确定其故障原因干预难度  $I_C = 3$ 。

5) 故障机理干预难度  $I_M$  的估算。采用如上所述干预故障原因的方法,同样对干预故障机理有效,因此,可确定  $I_M = 3$ 。

6) RPN 一次排序结果。

综上所述,可得  $F_{1,2,2,2}$  的 RPN 值为 432 000。表 5 中各故障的 RPN 值及对应各要素估算值如表 6 所示。

**表 6 某海基设备中的间歇故障的 RPN 值及对应各要素估值**

**Table 6 The RPN value and corresponding each elements assessment value of intermittent fault in a sea based equipment**

$F_{p,i,j,k}$	损失 $L$	O	D	$I_C$	$I_M$	RPN 值
$F_{1,1,1,1}$	1 400	5	5	3	6	63 000
$F_{1,1,1,2}$	1 500	3	8	3	6	64 800
$F_{1,2,2,2}$	1 500	4	8	3	3	43 200
$F_{1,2,3,1}$	1 700	1	6	4	4	163 200
$F_{1,3,4,1}$	1 700	3	6	8	8	1 958 400
$F_{2,2,3,1}$	4 000	1	6	4	4	384 000
$F_{2,3,4,1}$	4 000	1	6	8	8	1 536 000

表 6 中,对于液晶显示器,可更换备件为整个液晶模块,且更换液晶模块需要专门人员,因此停工时间较长,故与其相关的损失  $L$  值较高。

#### 3.2 故障位置、原因、机理、模式相关性/影响性分析

据 1.4 节所述进行基于 DEMATEL 的  $F_{p,i,j,k}$  分析:

1) 设  $S_p C_i$  表示位于故障位置  $p$  的故障原因  $i$ ,  $S_p M E_j$  表示位于故障位置  $p$  的故障机理  $j$ ,  $S_p M O_k$  表示位于故障位置  $p$  的故障模式  $k$ 。可整理得出  $\{F_{p,i,j,k}\} = \{F_{1,1,1,1}; F_{1,1,1,2}; F_{1,2,2,2}; F_{1,2,3,1}; F_{1,3,4,1}; F_{2,2,3,1}; F_{2,3,4,1}\}$ , 通过给出各  $S_p C_i$ 、 $S_p M E_j$ 、 $S_p M O_k$  ( $S_p C_i \in F_{p,i,j,k}$ ,  $S_p M E_j \in F_{p,i,j,k}$ ,  $S_p M O_k \in F_{p,i,j,k}$  两两间的关系(即确定  $M$  矩阵),则  $M$  矩阵如图 3 所示。

	$S_1C_1$	$S_1C_2$	$S_2C_2$	$S_2C_3$	$S_1ME_1$	$S_1ME_2$	$S_1ME_3$	$S_1ME_4$	$S_2ME_3$	$S_2ME_4$	$S_1MO_1$	$S_1MO_2$	$S_2MO_1$	$S_2MO_2$
$S_1C_1$					1	0	0	0						
$S_1C_2$					0	0.4	0.6	0		0				
$S_1C_3$		0			0	0	0	1					0	
$S_2C_2$									1	0				
$S_2C_3$							0		0	1				
$S_1ME_1$											0.6	0.4		
$S_1ME_2$											0	1		0
$S_1ME_3$								0			1	0		
$S_1ME_4$		0									1	0		
$S_2ME_3$													1	0
$S_2ME_4$													1	0
$S_1MO_1$														
$S_1MO_2$														
$S_2MO_1$		0						0						0
$S_2MO_2$														

图3 某海基设备电子系统的  $M$  矩阵  
Fig.3 The matrix  $M$  of a sea based equipment

2) 由关系矩阵  $M$ , 据式(11)得到直接相对重要度矩阵 (direct relative severity matrix)  $M'$ , 而后再据式(12)得到直接与间接相对重要度矩阵 (direct and indirect relative severity)  $M''$ 。

$$m'_{ij} = m_{ij}/\lambda; \lambda = \max_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^n m_{ij} \right\} \quad (11)$$

$$M'' = M'[I - M']^{-1} \quad (12)$$

3) 由矩阵  $M''$  计算  $R$  (行数值之和)、 $C$  (列数值之和), 得到  $R+C$  (表示相关性)、 $R-C$  (表示影响性), 如表7或可以  $R+C$  为横坐标, 以  $R-C$  为纵坐标画出。

表7  $R, C, R+C, R-C$  的值及对应排序

Table 7 The values and corresponding sorting of  $R, C, R+C$  and  $R-C$

次序	$R$	次序	$C$	次序	$R+C$	次序	$R-C$
$S_1C_1$	2	$S_2MO_1$	4	$S_2MO_1$	4	$S_1C_1$	2
$S_1C_2$	2	$S_1MO_1$	3.8	$S_1MO_1$	3.8	$S_1C_2$	2
$S_1C_3$	2	$S_1ME_1$	2.2	$S_1MO_2$	2.2	$S_2C_2$	2
$S_2C_2$	2	$S_1ME_4$	1	$S_1C_1$	2	$S_2C_3$	2
$S_2C_3$	2	$S_2ME_3$	1	$S_1C_2$	2	$S_1C_3$	2
$S_1ME_1$	1	$S_2ME_4$	1	$S_1C_3$	2	$S_1ME_2$	0.6
$S_1ME_2$	1	$S_1ME_3$	1	$S_2C_2$	2	$S_1ME_3$	0.4
$S_1ME_3$	1	$S_1ME_2$	0.6	$S_2C_3$	2	$S_1ME_1$	0
$S_1ME_4$	1	$S_1C_1$	0.4	$S_1ME_1$	2	$S_1ME_4$	0
$S_2ME_3$	1	$S_1C_2$	0	$S_1ME_4$	2	$S_2ME_3$	0
$S_2ME_4$	1	$S_1C_3$	0	$S_2ME_3$	2	$S_2ME_4$	0
$S_1MO_1$	0	$S_2C_2$	0	$S_2ME_4$	2	$S_1MO_1$	-3.8
$S_1MO_2$	0	$S_2C_3$	0	$S_1ME_3$	1.6	$S_1MO_2$	-2.2
$S_2MO_1$	0	$S_2MO_2$	0	$S_1MO_2$	1.4	$S_2MO_1$	-4
$S_2MO_2$	0	$S_2MO_2$	0	$S_2MO_2$	0	$S_2MO_1$	0

将故障通路上各节点的影响性、相关性相加, 即可得该故障通路的影响性、相关性, 如表8所示。

表8 各故障通路的  $R+C$  (相关性)、 $R-C$  (影响性)

Table 8  $R+C$  and  $R-C$  of each fault path

次序	$R+C$	次序	$R-C$
$F_{2,2,3,1}$	8	$F_{2,3,4,1}$	2
$F_{2,3,4,1}$	8	$F_{1,2,2,2}$	0.4
$F_{1,1,1,1}$	7.8	$F_{1,1,1,2}$	-0.2
$F_{1,3,4,1}$	7.8	$F_{1,2,3,1}$	-1.4
$F_{1,2,3,1}$	7.4	$F_{1,1,1,1}$	-1.8
$F_{1,1,1,2}$	6.2	$F_{1,3,4,1}$	-1.8
$F_{1,2,2,2}$	5.6	$F_{2,2,3,1}$	-2

### 3.3 RPN 二次排序

对表6的RPN值和表8的  $R-C$  值, 利用式(5)和(6), 得某海基设备各间歇故障的两个马氏距离如表9所示。

表9 某海基设备间歇故障的两种马氏距离

Table 9 The two Mahalanobis distances of intermittent fault in a sea based equipment

$F_{p,i,j,k}$	对于 RPN 的马氏距离	对于 $R-C$ 的马氏距离	序数
$F_{1,1,1,1}$	0.199 5	0.747 1	4
$F_{1,1,1,2}$	0.174 3	0.325 6	3
$F_{1,2,2,2}$	0.477 2	0.727 9	5
$F_{1,2,3,1}$	1.205 6	0.478 9	4
$F_{1,3,4,1}$	1.663 3	0.747 1	5
$F_{2,2,3,1}$	0.544 5	0.881 1	6
$F_{2,3,4,1}$	1.071 0	1.800 6	2

由表9,  $F_{1,1,1,1}$  与  $F_{1,2,3,1}$  序数相同,且  $F_{1,2,2,2}$  与  $F_{1,3,4,1}$  序数相同,需根据2.4节中基于马氏距离的RPN二次排序的算法,按RPN原排序插入。从而可得二次排序结果如表10所示。

表10 RPN二次排序结果

Table 10 The two sorting results of RPN

$F_{p,i,j,k}$	序数
$F_{1,1,1,1}$	3
$F_{1,1,1,2}$	2
$F_{1,2,2,2}$	6
$F_{1,2,3,1}$	4
$F_{1,3,4,1}$	5
$F_{2,2,3,1}$	7
$F_{2,3,4,1}$	1

$F_{p,i,j,k}$  表示故障位置  $p$  的故障原因  $i$ , 故障机理  $j$ , 的故障模式  $k$ , 表10的结果对比表5中的物理描述即可知道, 故障位置处于液晶显示器, 由于振动引起的焊点或引脚的摩擦腐蚀间歇断路故障的危险优先级最高, 需要进行更为严格的注意和隐患控制, 而这一RPN计算结果也是符合实际和经验认知的。

## 4 结论

通过对经典RPN计算方法的分析, 针对经典RPN的取值不是连续整数, 不同的  $S$ 、 $O$ 、 $D$  取值对应相同RPN值的现象, 对  $S$ 、 $O$ 、 $D$  取值的微小变化可能会很敏感等数学缺陷; 以及实际中, 经常会碰到  $S$ 、 $O$ 、 $D$  无法有效代表故障风险相关的因素的情况等问题。本文针对间歇故障的特点, 分别从RPN的数学计算方面、研究对象、要素估计等方面对其进行了改进, 提出了一种面向电子系统间歇故障的改进RPN计算框架。而后通过某种海基设备电子系统的间歇故障为例进行了算例可行性验证。此种改进RPN计算框架所得故障风险的优先级排序更为客观。同时该计算框架也应用于其他设备的间歇故障评级中, 具有较好的针对性, 相信将会在可靠性工程等各个领域得到广泛应用。

## 参考文献

[1] 王贵宝, 黄洪钟, 张小玲. 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[J]. 航空学报, 2009, 30(9): 1683-1690.  
WANG G B, HUANG H ZH, ZHANG X L. Risk possibility number: A new model for risk evaluation and prioritization based on maximum entropy theory[J]. Acta

Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2009, 30(9): 1683-1690.

- [2] 黄景德, 刘薇. 无先验信息的三态电子设备可靠性评定方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 77-83.  
HUANG J D, LIU W. Research on three-state electronic devices reliability evaluation method without priori information distribution [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(1): 77-83.
- [3] 张朝龙, 何怡刚, 袁莉芬, 等. 基于GMKL-SVM的模拟电路故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 1989-1995.  
ZHANG CH L, HE Y G, YUAN L F, et al. Analog circuit fault diagnosis based on GMKL-SVM method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9): 1989-1995.
- [4] PADALA S K, SHARMA P S, ELLENBOGEN K A, et al. Intermittent failure to capture: What is the mechanism? [J]. Heart rhythm Case Reports, 2016, 2(2): 178-182.
- [5] 权赫, 张鹏, 屈晨. 运载火箭电气系统BIT设计流程及方法研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(1): 61-64.  
QUAN H, ZHANG P, QU CH. Design process and method research of BIT for Launch vehicle electrical system[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(1): 61-64.
- [6] CHIN K S, WANG Y M, YANG J B. Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach[J]. Computers & Operations Research, 2009, 34(36): 1768-1779.
- [7] CHANG K H, CHANG Y C, TSAI I. Enhancing FMEA assessment by integrating grey relational analysis and the decision making trial and evaluation laboratory approach[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 45(31): 211-224.
- [8] 陈政平, 付桂翠, 赵幼虎. 改进的风险优先数(RPN)分析方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(11): 1395-1399.  
CHEN ZH P, FU G C, ZHAO Y H. Improved analysis method of risk priority number[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(11): 1395-1399.
- [9] ZHAO Y H, FU G C, WAN B. An improved risk priority number method based on AHP[C]. Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2013: 1-7.
- [10] MANDAL S, MAITI J. Risk analysis using FMEA: Fuzzy similarity value and possibility theory based



approach[J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 65(41): 3527-3537.

- [11] WANG C H. A novel approach to conduct risk analysis of FMEA for PCB fabrication process [C]. *IEEE International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management*, 2011: 1275-1278.
- [12] LIU H C, LIU L, BIAN Q H, et al. Failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning approach and grey theory[J]. *Expert Systems with Applications* 2011, 39(38) 4403-4415.
- [13] ZHAO Y H, FU G C, WAN B. An improved cost-based method of risk priority number[C]. *IEEE Prognostics & System Health Management Conference*, 2012: 1-4.
- [14] KO W C. Exploiting 2-tuple linguistic representational model for constructing HOQ-based failure modes and effects analysis[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2013, 12(64): 858-865.
- [15] LIU J X, ZHANG X. Detection method of intermittent faults in electronic systems based on Markov model[C]. *Proceedings of Fourth International Symposium on Computational Intelligence and Design*, 2011: 216-270.
- [16] SAGHAIE B, RAGEL R, PARAMESWARAN S, et al. A novel intermittent fault Markov model for deep sub-micron processors [C]. *Proceedings of the ACM International Conference on Great Lakes Symposium on VLSI*, 2013:13-18.
- [17] IP K H, TANG C P. Electrical behavior of flexible cables with intermittent faults [C]. *Proceedings of the fifty-second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Montreal QC, 2006: 63-68.
- [18] CORRECHER A, GARCIA E, MORANT F, et al. Intermittent failure dynamics characterization[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2012, 61(3): 649-658.
- [19] HOSSEINI S M, SAFAEI N, ASHARPOUR M J. Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision making trial and evaluation laboratory technique [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2006, 48(91): 872-881.
- [20] 谈恩民, 何正岭. 模拟电路故障重叠诊断方法研究[J]. *国外电子测量技术*, 2015, 34(6): 33-36.
- TAN EN M, HE ZH L. Study on the faults overlap diagnosis method in analog circuit[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2015, 34(6): 33-36.

## 作者简介



**吴虎胜**, 分别在 2008 年、2011 年于武警工程大学获得学士学位和硕士学位, 2014 年于空军工程大学获得博士学位, 现为武警工程大学讲师, 博士后, 主要研究方向为故障诊断、群体智能。

E-mail: wuhusheng@vip.163.com

**Wu Husheng** received B. Sc., M. Sc. from Armed Police Force Engineering University in 2008 and 2011, and Ph. D. from Air Force Engineering University in 2014, respectively. Now he is lecturer and post-Ph. D. in Armed Police Force Engineering University. His main research interest includes fault diagnosis and swarm intelligence.

**盛晟**, 分别在 2008 年、2011 年和 2014 年于空军工程大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为空军工程大学讲师, 主要研究方向为故障诊断、实验鉴定。

E-mail: afeusheng@126.com



**Sheng sheng** received B. Sc., M. Sc., and Ph. D. all from Air Force Engineering University in 2008, 2011 and 2014, respectively. Now he is lecturer in Air Force Engineering University. His main research interest includes fault diagnosis and experimental identification.

**凌晓冬**, 分别在 2000 年、2003 年、2009 年于国防科技大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为中国卫星海上测控部高级工程师, 主要研究方向为测试总体。

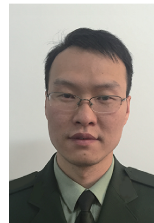
E-mail: lxd\_jlomag@sina.com



**Ling Xiaodong** received B. Sc., M. Sc., and Ph. D. all from National University of Defense Technology in 2000, 2003 and 2009, respectively. Now he is a senior engineer in China Satellite Maritime Tracking and Control Department. His main research interest includes fault diagnosis and swarm intelligence.

**段东立**, 2006 年于徐州空军学院获得学士学位, 分别在 2009 年、2012 年于国防科技大学获得硕士学位和博士学位, 现为武警工程大学讲师, 博士后, 主要研究方向为可靠性、复杂网络。

E-mail: mineduan@163.com



**Duan Dongli** received B. Sc. from Xuzhou Air Force Academy in 2006, M. Sc. and Ph. D. from National University of Defense Technology in 2009 and 2012, respectively. Now he is lecturer and post-Ph. D. in Armed Police Force Engineering University. His main research interest includes reliability and complex network.