改进的风险优先数(RPN)分析方法

陈政平 付桂翠 赵幼虎

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对工艺故障模式影响分析(PFMEA,Process Failure Modes and Effects Analysis)中风险优先数(RPN,Risk Priority Number)分析方法存在的缺陷,在分析导致这些缺陷的原因的基础上,提出了一种基于费用及发生概率的定性与定量相结合的 RPN 分析方法. 该方法中定性分析部分以传统 RPN 分析方法中的严酷度等级评价为基础,对工艺故障模式的严酷度等级进行评价;定量分析部分以故障模式发生后导致的费用损失的期望值作为 RPN 值. 改进后的 RPN 分析方法中,定量化的数据使得风险排序更为客观、准确. 最后,使用改进后的 RPN 分析方法对相控阵雷达中某组件的滤波器装配工艺进行了 PFMEA 分析,取得了良好的效果.

关 键 词: 风险优先数; 工艺故障模式影响分析; 费用; 概率

中图分类号: V 46

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)11-1395-05

Improved analysis method of risk priority number

Chen Zhengping Fu Guicui Zhao Youhu

(School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at the defect of traditional risk priority number(RPN) method in process failure modes and effects analysis(PFMEA), the reasons of the defect thoroughly were analyzed, and a new RPN ranking method based on cost and probability was presented which is combined qualitative analysis with quantitative analysis. In the qualitative analysis , which is based on the estimation of severity ranking in the traditional risk priority number method, the severity ranking of the process failure mode was estimated. In the quantitative analysis, it used the expected cost caused by the failure mode as the risk priority number. The improved RPN method uses the quantitative numbers to make the ranking result of the RPN more objective and accurate. Finally, the new RPN method was applied to the PFMEA of the filter assemblage of a module in the modern radar, and a great result is obtained.

Key words: risk priority number; process failure modes and effects analysis; cost; probability

产品的固有可靠性是在设计中被赋予、在工艺制造过程中被实现的,相同设计规范的产品在不同的工艺系统中生产制造,其固有可靠性会有较大的差异. 因此,开展工艺系统的可靠性研究有着重要意义.

工艺故障模式影响分析是工艺系统可靠性分析中最常用的一种定性分析方法,其目的是在假定产品设计满足设计要求的前提下,针对产品在生产过程中每个工艺步骤可能发生的故障模式、原因及其对产品造成的所有影响,按故障模式的风险优先数值的大小,对工艺薄弱环节制定改进措施,并预测或跟踪采取改进措施后的 RPN(Risk Priority Number)值,直到 RPN 值达到可以接受的水平[1],从而保证工艺系统的可靠性. 传统 RPN 分析方法的 RPN 值是根据工艺故障模式的严酷度等级(S)、发生概率等级(O)和被检测难度等

收稿日期: 2010-07-02; **网络出版时间**: 2011-11-23 15:05; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111123.1505.004
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111123.1505.004.html
作者简介: 陈政平(1985 -),女,湖北荆州人,助理工程师,czp126@gmail.com.

级(D)的乘积确定的,S,O,D 的评分等级范围为 1~10,通过专家评估的方式确定,RPN 值越大,潜在工艺故障模式的设计风险越大. 这种 RPN 分析方法操作简单,易于理解,在工程应用上也比较成熟,并已形成了标准,但从技术方法的角度上来看,这种将 3 个取值范围为 1~10 的 3 个参数简单相乘得到 RPN 值的方法存在着严重的缺陷,计算得到的 RPN 值存在较大的误差,进而影响 PFMEA(Process Failure Modes and Effects Analysis)分析结果的正确性.

文献[2-4]利用模糊集理论、基于最大信息熵理论等数学方法,将传统 RPN 分析方法中的 3 个参数相互之间的关系以及对 RPN 值影响的权重反应在最终的 RPN 值计算结果中,以此来提高传统 RPN 排序的可信性,但此类数学处理方法的输入参数仍然是采用传统 RPN 分析方法得到的 3 个参数值,因此仍存在一些本质的不足;文献[5]深入剖析了传统 RPN 方法存在的问题,并提出以费用期望值作为风险排序的依据,但未提出具体的实现方法;文献[6-8]对基于费用成本的 FMEA 方法进行了探索,但未对工艺过程的 FMEA 分析中基于费用损失期望值的 RPN 排序法进行深入的论述.

本文提出了一种基于费用损失和工艺故障模式发生概率的定性和定量相结合的 RPN 分析方法,该方法在定性分析的基础上,使用可完全定量化的参数来代替传统 RPN 分析方法中定性参数,解决了排序不客观、不精确等问题,而且易于操作. 本文将改进后的方法应用到相控阵雷达中某组件的滤波器装配工艺的 PFMEA 分析中,找出了装配工艺中的关键工艺和薄弱环节,取得了良好的效果.

1 传统 RPN 分析方法存在的缺陷

1.1 RPN 值的不连续性

传统 RPN 分析方法中,S,O,D 3 个参数的取值范围是 1~10,则计算出的 RPN 值覆盖的范围是 1~1 000. 但实际上 RPN 值并不是连续的,存在大量的空白区域,因为有很多数字(例如,数字 11,22,33 等 11 的倍数)都是无法得到的[5]. 根据 RPN 的计算公式,不难计算出,RPN 值实际只有 120 个取值,也就是说,在 1~1 000 的数字中,有 88% 的数字无法得到. RPN 值越大,该故障模式的关键程度越大,越需要提出改进措施,但是 RPN 值的不连续性很难解释 RPN 值的差值所代表的意义. 例如,若 RPN 值为 64,由于 65,66,67,68,69 都无法通过 3 个 1~10 的数的乘积得到,那么 63 和 64 之间的差值与 64 和 70 之间的差值所代表的意义是否相同,或者有所区别.

1.2 RPN 值的重复性

S,O,D 3 个参数的具体组合有 1 000 种,但是它们的乘积只有 120 个不同的数字,所以这里面存在着大量的重复[5],相同的 RPN 值对应着 3 个参数的多种不同组合,这些不同的组合在 RPN 分析方法中并没有被区分开. 例如 $64 = 1 \times 8 \times 8 = 2 \times 4 \times 8 = \cdots = 8 \times 8 \times 1$. 虽然,RPN 值是完全相同的,但是严酷度等级最低可以是 1,最高能达到 8,如果在具体分析中把这两种情况同等对待的话,显然是不合适的.

1.3 RPN 值的灵敏度

RPN 值的灵敏度主要表现在 S,O,D 3 个参数中某一个参数的微小的变化,可能会对最终的 RPN 值带来很大的影响,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. 例如,RPN 为 $7 \times 4 \times 8 = 224$,如果在进行等级评估时,发生度等级评低了一级的话,那么 RPN 为 $7 \times 3 \times 8 = 168$,RPN 值减少了 56. 而在传统 RPN 分析方法中,S,O,D 3 个参数的取值由分析人员评级打分得出,这个过程受主观因素的影响比较大,不同的团队给出的评分可能会有一些差异,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.

通过上述分析可知,传统 RPN 分析方法存在着严重的缺陷,最根本的原因是由于 RPN 值是 3 个独立参数相乘的结果,它们等级的评估只是在定性分析的基础上进行,受主观因素影响较大,彼此之间没有主次之分. 而实际上这 3 个参数是相互关联的,各自对 RPN 值的影响程度也不尽相同,而传统的 RPN 方法只是简单将 3 者同等对待,根据它们简单相乘得到的 RPN 值来进行风险排序,显然存在较大的误差.

2 定性定量相结合的 RPN 分析方法

2.1 改进方法的思路

传统 RPN 方法存在诸多缺陷的主要原因是确定 RPN 值的 3 个参数值都是由定性分析以及专家打分得到的,受主观因素影响较大. 所以在改进的方法中,从参数定量化的角度出发,将传统 RPN 分析方法中不能定量描述的 S 和 D 这两个参数以工艺生产线上能收集到的客观实际的数据

来替代,这将显著降低 RPN 值排序的主观性,使得 PFMEA 分析的结果更为准确.

通过分析实际生产线上收集到的各种数据,在改进的方法中,利用故障模式产生后导致的各种经济损失之和(即费用 C)来替代传统 RPN 分析方法中的参数 S 和 D. 使用费用损失来衡量故障模式对于环境、人员或产品造成的影响不仅易于理解,且更为直观. 而费用也从另一个角度反映了故障模式的被检测难度等级. 如果故障模式很难被检测出,带有缺陷的产品很可能会在下一道工序,或最终产品检验时才被发现,此时造成的费用损失比故障模式在本道工序结束后检验时被发现所花费的费用要大得多.

RPN 分析方法的目的是为了得到一个可信的风险排序,以此为基础找出工艺过程中的薄弱环节,进而提出改进预防措施. 考虑到有些故障模式所产生的影响是难以用费用来量化的,比如造成重大安全事故或对环境造成重大损害等. 因此改进的 RPN 分析方法中采用定性与定量相结合的方式,即在传统 RPN 分析方法中严酷度等级分析的基础上,加入新的定量分析内容. 改进后的 RPN 分析方法的实施步骤如图 1 所示.

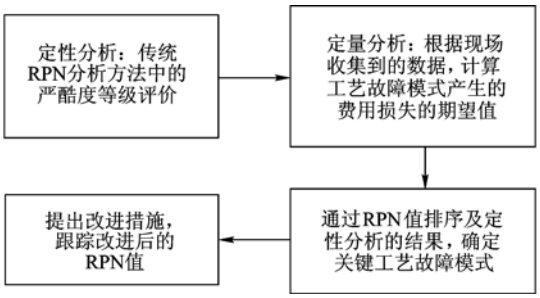

图 1　改进后的 RPN 分析方法实施步骤

2.2　定性分析

在进行定量分析之前,首先按照传统 RPN 分析方法中的严酷度等级评价标准对产品加工、装配过程中的各个工艺故障模式影响的严酷度进行评价. 其中对于严酷度等级为 9 和 10 的故障模式不需要进行定量化分析,而直接作为工艺过程中的关键故障模式,应通过工艺设计上的措施或产品加工、装配过程控制或预防改进措施等手段,以满足降低该风险的要求.

2.3　定量分析

对于严酷度等级低于 9 的故障模式,将采取定量分析的方法来计算其 RPN 值. 在这种方法中,影响 RPN 值的因素主要包括两方面,一是故障模式发生后可能导致的各个故障事件发生的概率,二是由这种故障模式导致的费用损失.

2.3.1　故障事件发生的概率

故障事件发生的概率的确定以每道工序的不合格率为基础. 对于某道具体的工序,假设其不合格率为 a,针对这些不合格产品,进行故障模式的识别,故障发生的原因及其造成的影响等分析工作. 并通过实际工艺线上的统计数据分析得到各类故障模式发生的概率值. 如图 2 所示,假设经分析共有 n 种故障模式,其中由于第 i 种故障模式发生而导致的产品工艺不合格占所有不合格产品的比例为 P_i. 而每一种故障模式的出现可能会导致 m 个影响各不相同的故障事件发生,若在这种特定的故障模式出现后,第 j 个故障事件发生的概率值为 $P(E_j)$. 则在这道工序中,由于第 i 种故障模式导致的故障事件 j 发生的概率值为

$$P(C_j) = a \times P_i \times P(E_j) \tag{1}$$

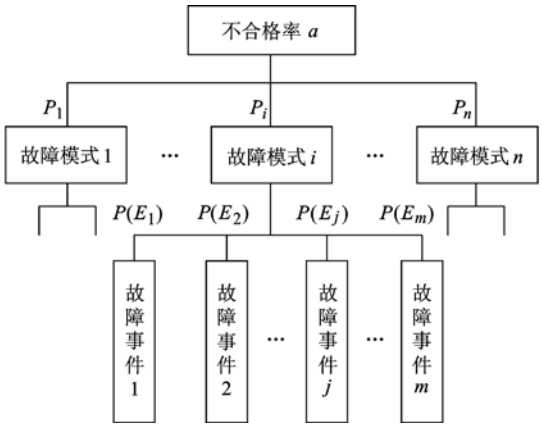

图 2　故障事件发生概率计算示意图

2.3.2　故障事件导致的费用损失

在确定了第 i 种故障模式所导致的各故障事件的概率值之后,需要确定各故障事件所导致的费用损失. 针对工艺系统而言,发生某一故障事件 C_j 后的费用损失包括两部分:直接导致的经济损失和对产品或工艺设备进行维修的损失.

$$W(C_j) = W_1(C_j) + W_2(C_j) \tag{2}$$

式中,$W(C_j)$ 为该事件导致的总费用损失;$W_1(C_j)$ 为由该故障事件直接导致的经济损失;$W_2(C_j)$ 为对产品或工艺设备进行检测和维修的费用.

$$W_1(C_j) = W_{j,\text{reject}} + t_j \times e + W_{j,\text{others}} \tag{3}$$

式中,$W_{j,\text{reject}}$ 为已报废产品(成品或半成品)以及原材料的总价值;$t_j \times e$ 为发生该事件造成生产停止,直到生产恢复之前这段时间内所造成的损失,其中 t_j 为事件发生导致生产停止的时间,e 为单位时间内的损失,这部分费用主要指人工费用损失等;$W_{j,\text{others}}$ 是除以上各项外其他可能的损失.

$$W_2(C_j) = W_{j,\text{check}} + W_{j,\text{repair}} + W_{j,\text{material}} \tag{4}$$

其中

$$\left.\begin{aligned} W_{j,\text{check}} &= t_{j,\text{check}} \times e_{j,\text{check}} \\ W_{j,\text{repair}} &= t_{j,\text{repair}} \times e_{j,\text{repair}} \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

式中，$W_{j,\text{check}}$为检测故障的费用；$W_{j,\text{repair}}$为导致工艺设备非计划维修所需的费用及导致产品维修的费用之和；$W_{j,\text{material}}$为维修过程中可能需要的材料的总价值(比如工艺设备更换零件)；$t_{j,\text{check}}$，$t_{j,\text{repair}}$为检测和维修故障的时间；$e_{j,\text{check}}$，$e_{j,\text{repair}}$为单位时间内检测和维修故障所需的费用，主要是指人工费用.

2.3.3 计算 RPN 值

改进后的 RPN 值的计算公式如式(6)，为特定故障模式下可能发生的各个故障事件的发生概率与相应的费用损失的乘积之和，即某种故障模式发生后其损失费用期望值. 使用损失费用的期望值作为各工艺故障模式风险排序的依据，不仅易于理解，而且非常直观.

$$W_{\text{RPN}} = \sum_{j=1}^{n} (W(C_j) \cdot P(C_j)) \tag{6}$$

2.3.4 确定关键的工艺故障模式

在通过上述方法得到 RPN 值后，通过专家评审确定 RPN 值的门限值，确定工艺过程中需要提出改进措施的关键工艺故障模式.

最后，针对定性和定量分析得出的所有关键工艺故障模式提出改进措施，并跟踪改进措施后的 RPN 值，直到达到可接受的范围内.

3 案例应用

基于改进后的 RPN 分析方法，以相控阵雷达中某组件的滤波器装配工艺的 PFMEA 为例，对滤波器装配工艺中的各工艺故障模式的 RPN 值进行排序，具体分析过程如下.

1) 滤波器装配工艺流程如图 3 所示，每道工序的内容及所使用的仪器设备如表 1 所示.

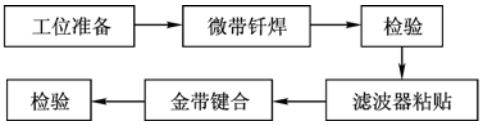

图 3 滤波器装配工艺流程图

表 1 滤波器装配工艺流程

工序号	工序名称	工序内容简述	专用仪器、仪表及工艺设备
1	工位准备	按图纸领取微带电路片、载体、各类待装配器件.	
2	微带钎焊	用 AuSn 焊料将微带电路片与载体钎焊在一起.	超声波清洗机、加热台、拨针、镊子
3	检验	检查陶瓷微带钎焊方向、位置是否与图纸一致，陶瓷微带不能有裂纹、破损等缺陷，并检查焊接面.	显微镜
4	滤波器粘贴	用导电胶粘贴滤波器芯片.	防静电腕带、烘箱
5	金带键合	确认无多余导电胶后，先键合电路端，然后键合芯片端，键合金带有一定的弧度.	点焊机
6	检验	严格对照图纸检查装配器件是否正确、焊点是否规范，并进行外观检查.	

2) 定性分析. 根据传统 RPN 方法中的严酷度等级分析，得到金带键合工艺中的“芯片焊盘脱落”故障模式的严酷度等级为 10，直接作为关键工艺故障模式，需要提出改进预防措施.

3) 定量分析. 通过与生产工艺人员交流和现场数据收集，根据改进后的方法对收集到的数据进行分析处理，最后得到滤波器装配工艺中各个故障事件的发生概率和费用损失，进而计算出各工艺故障模式的 RPN 值，由于篇幅关系，这里以“钎焊工装压力不够”故障模式为例，介绍使用改进后的 RPN 分析方法计算 RPN 值的过程.

① 通过现场调研得到的统计数据，填写如表 2 所示的 PFMEA 工作表格，钎焊工装压力不够所导致的故障事件为“形成焊接空洞”.

② 将表 2 中的各项数据代入到改进方法中的计算公式(5)中，即可得到该故障模式的 RPN 值为 0.6225.

对于分析中的其他各项故障模式，根据现场收集到的相关统计数据，按照同样的方法填写 PFMEA 工作表格，计算其对应的 RPN 值.

4) 通过定量分析得到各项故障模式的 RPN 值后，通过专家会议，确定 RPN 门限值为 0.5，将 RPN 值大于 0.5 的故障模式对应的工序列为重要工序，加上严酷度等级为 10 的故障模式对应的工序，共 3 项，见表 3.

5) 最后针对各重要工序的关键工艺故障模式进行重点分析，提出相应的改进措施，并预测跟踪采取改进措施的 RPN 值，直到达到可接收的水平为止.

在某组件滤波器装配工艺的 PFMEA 分析中，应用改进后的 RPN 分析方法，实现了各故障模式风险值的排序，找出了工艺过程中的关键工艺故障模式，而且得到的关键工艺故障模式与实际生产过程中的情况相符合，验证了其可行性.

表 2　PFMEA 工作表格

代码	工艺/工序	故障模式	故障模式对应的各故障事件	发生概率	直接经济损失 $W_1(C_j)$/元			检测和维修的费用 $W_2(C_j)$/元			总费用 $W(C_j)$	W_{RPN}	备注
					$W_{j,reject}$	$t_j \times e$	$W_{j,others}$	$W_{j,check}$	$W_{j,repair}$	$W_{j,material}$			
01	微带钎焊	钎焊工装压力不够	形成焊接空洞	0.000 75	450	60	20	100	0	200	830	0.622 5	

表 3　重要工序清单

代码	工序名称	故障模式	故障对产品造成的影响	W_{RPN}
01	微带钎焊	钎焊工装压力不够	形成焊接空洞	0.622 5
		钎料和基板钎焊面的润湿性不良	影响焊料流动形成焊接空洞	1.245
02	滤波器粘贴	导电胶和粘贴面的润湿性不良	芯片粘贴不牢,无法通过振动试验	1.725
03	金带键合	芯片焊盘脱落	芯片电气功能失效	

4　结 束 语

本文在总结 PFMEA 分析方法中传统的 RPN 分析方法存在的缺陷的基础上,提出了一种基于费用和发生概率的定性与定量相结合的 RPN 分析方法,改进后的方法,解决了传统 RPN 方法中存在的 RPN 值不连续、同一个 RPN 值有多重含义、RPN 值灵敏度较高等问题,得到的 RPN 值更加客观、准确. 而且,该方法操作简单方便,不需要通过专家评审的方式来确定参数值,现场工作人员在收集到相关数据充足的情况下,就可以完成这项工作,节省人力、物力,缩短工作周期. 案例应用表明该方法具有较强的工程实用性.

参考文献(References)

[1] GJB/Z1391-2006　故障模式、影响及危害性分析指南[S]
GJB/Z1391-2006　Guide to failure mode, effects and critically analysis[S](in Chinese)

[2] 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,2009,33(9):1683 – 1690
Wang Guibao, Huang Hongzhong, Zhang Xiaoling. Risk possib-ility number—a dew model for risk evaluation and priorit-ization based on maximum entropy theory[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 33(9): 1683 – 1690(in Chinese)

[3] Childs Joseph A. Turning multiple PFMECA results into an optimal action plan[C]// Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. Fort Worth, USA: IEEE, 2009: 412 – 416

[4] Kai Meng Tay. On fuzzy inference system based failure mode and effect analysis (FMEA) methodology[C]// 2009 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition. Ayer Keroh, Malaysia: IEEE, 2009: 329 – 334

[5] Bowles John B. An assessment of RPN prioritization in a fail-ure modes effects and criticality analysis[C]//Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. Tampa Flor-ida: IEEE, 2003: 380 – 386

[6] 胡玺良,张代胜. 探析基于寿命成本的 FMEA [J]. 现代机械,2007(1):4 – 7
Hu Xiliang, Zhang Daisheng. The exploration of FMEA based on life cost[J]. Modern Machinery, 2007(1): 4 – 7(in Chinese)

[7] Kmenta Steven, Kosuke Ishii. Scenario-bases FMEA: a life cycle cost perspective[C]// 2000 ASME Design Engineering Technical Conferences. Baltimore, Maryland: ASME, 2000: 10 – 14

[8] Niu Yumei. The optimization of RPN criticality analysis meth-od in FMECA [C]// International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis (ICACIA2009). Chengdu, China: IEEE, 2009: 166 – 170

[9] 康锐. 石荣德. FMECA 技术及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2006:88 – 101
Kang Rui, Shi Rongde. FMECA technique and application [M]. BeiJing: National Defense Industry Press, 2006: 88 – 101(in Chinese)

[10] 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. Singapore: IEEE, 2007: 999 – 1003

(编　辑:娄　嘉)