整机产品失效机理危害度定量分析方法

袁宏杰 张 泽 吴 浩

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对整机产品失效机理多而复杂、失效数据少、主失效机理分析为定性方法的现状,提出了一种基于 Bayes 的失效机理危害度定量分析方法. 首先利用 Dirichlet 分布描述产品的先验信息,结合现场失效数据确定失效频率的 Bayes 后验分布函数,然后通过 Slice 抽样方法获得失效频率的满条件分布,进而利用 Gibbs 抽样得到其 Bayes 估计,从而实现了各失效机理的定量分析. 最后在某型光纤连接器失效机理已分析清楚的前提下,分别用 FMMEA (Failure Modes, Mechanisms and Effects Analysis)及 Bayes 方法确定了其主失效机理,结果表明基于 Bayes 的失效机理危害度定量分析方法考虑了现场未出现的失效机理危害度,其确定的主失效机理比 FMMEA 结果更具有可信度.

关 键 词: 贝叶斯; 失效机理; Slice 抽样; 定量分析; 危害度

中图分类号: TP 202^{+}. 1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)09-1208-04

Quantitative analysis method for mechanism severity of whole product

Yuan Hongjie Zhang Ze Wu Hao

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

Abstract: Due to qualitative method was used to analyze whole products with characters of complex failure mechanism and small samples, Bayesian method was proposed for quantitative analysis of failure mechanism severity. Firstly, Bayesian posterior density function was determined by prior information described by dirichlet distribution and failure data. Then full condition distribution of failure frequency and Bayesian estimation were obtained by Slice samplings and Gibbs samplings separately. Furthermore, failure mechanism severity was analyzed quantitatively. Finally, under the premise of failure mechanisms of an optical fiber connector have been analyzed clearly, the main failure mechanisms were confirmed by failure modes, mechanisms and effects analysis(FMMEA) and Bayesian method respectively. The results showed that severity of the failure mechanism which did not appeared on site was considered by Bayesian quantitative analysis method, the main failure mechanisms were more credible than the results based on FMMEA.

Key words: Bayesian; failure mechanism; Slice sampling; quantitative analysis; severity

在高可靠性、长寿命的产品研制周期中,为了评估这些产品的可靠性,缩短产品研制周期,加速试验越来越受到人们的重视. 在加速试验中,加速应力范围的选取是否合理直接决定了试验结果,而加速应力范围又由整机产品的主失效机理所决定. 目前,开展加速试验前并未深入到失效机理层面分析,而是采用可靠性摸底试验或经验来的方法确定加速应力范围,这种方法将可能导致加速试验所激发的失效机理与外场的不一致,从而导致试验的评估结果不准确[1-2]. 如高大元通过试验表明温度加速应力当超过一定的范围,GI-920 寿命分布出现了明显变化,其失效机理也发生了变化[2]. 目前,针对具有多失效机理的整机产品,主要采用频率分析法结合 FMMEA (Failure

收稿日期: 2012-10-18; **网络出版时间**: 2013-01-23 09: 48

网络出版地址: www. cnki. net/kcms/detail/11. 2625. V. 20130123. 0948. 003. html

作者简介: 袁宏杰(1970-),男,河北阜城人,高级工程师,yuanhongjie@ buaa. edu. cn.

Modes, Mechanisms and Effects Analysis)方法定性地确定整机主失效机理[3-5]. 但这种以大数定理为基础的频率估计法在应用时会遇到分析精度低的问题. 如张金槐指出了这种方法对小样本的数据有可能导致忽略一些现场未出现的因素[6-8]. Bayes 方法能通过丰富的先验信息获得较准确的统计结果,一定程度上减小小子样数据对统计结果的影响,已广泛地被采用作为处理小子样数据的一种手段[9]. 本文提出了一种基于 Bayes 的失效机理危害度定量分析方法,并给出了一个应用案例. 结果表明该方法分析结果的准确度比传统方法高.

1　基于 Bayes 的失效机理危害度分析

1.1　失效机理危害度分析

失效机理危害度分析的目的是按照每一个失效机理的严重程度及该失效机理发生的频率所产生的综合影响,以便全面评价整机产品中各种可能出现的产品故障的影响,它是 FMMEA 的补充扩展. 按照风险优先数法,机理危害度公式[10]为

$$C = \alpha \times \beta \tag{1}$$

其中,C 为机理危害度;α 为失效机理频率比;β 为严酷度等级评分. C 值越大,代表该机理对产品的危害度越大.

1.2　失效机理发生频率估计

设整机产品有 n 个失效机理,失效数据 r. 则其似然函数为

$$L(p \mid r) = {p_1}^{r_1} \times {p_2}^{r_2} \times {p_3}^{r_3} \times \cdots \times {p_n}^{r_n}$$

$$\ln L(p \mid r) = r_1 \ln p_1 + \cdots + r_n \ln p_n$$

其中

$$\sum_{i=1}^{n} p_i = 1$$

为产生先验分布,对参数 p 做适当变换. 令

$$H_d = \sum_{d+1}^{n} p_{d+1} \qquad d = 1,2,\cdots,n-1 \quad H_0 \equiv 1$$

则有

$$\left.\begin{aligned} &1 \equiv H_0 > H_1 > \cdots > H_n \equiv 0 \\ &p_d = H_{d-1} - H_d \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

先验信息式(2)为顺序约束形式,文献[11]提出可采用 Dirichlet 分布来进行描述,即认为 $(H \mid I_p)$ 服从顺序 Dirichlet 分布:

$$\pi(H \mid I_p) = \frac{\Gamma(c)}{\prod_{d=1}^{n}(cq_d)} \prod_{i=1}^{n} (H_{i-1} - H_i)^{cq_i - 1} \tag{3}$$

其中,c 和 $q = (q_1, q_2, \cdots, q_n)$ 为先验分布参数;参数 q_d 为根据先验信息 I_p 确定的 p_d 估计值. 参数 c 反映了对 q_d 的确信程度,c 值越大则对先验信息的确信程度越高;I_p 表示先验信息.

现场失效数据的似然函数有

$$L(H \mid r) = {p_1}^{r_1} \times {p_2}^{r_2} \times {p_3}^{r_3} \times \cdots \times {p_n}^{r_n} = (H_0 - H_1)^{r_1} \times \cdots \times (H_{n-1} - H_n)^{r_n} \tag{4}$$

根据式(3)、式(4),由 Bayes 定理可知后验分布为

$$\pi(H \mid I_{all}) \propto \pi(H \mid I_p) \times L(H \mid r) \propto \frac{\Gamma(c)}{\prod_{d=1}^{n}(cq_d)} \prod_{i=1}^{n} (H_{i-1} - H_i)^{cq_i - 1} \times (1 - H_1)^{r_1} \times \cdots \times (H_{n-2} - H_{n-1})^{r_{n-1}} \times H_{n-1}^{r_n}$$

其中,I_{all} 为先验数据 I_p 与失效数据 r 的混合信息;$(H \mid I_{all})$ 为混合信息下 H 的真值.

结合后验分布的似然函数,可以估计出 $(H \mid I_{all})$. 若采用极大似然估计法 MLE,则很难直接求得;而对这种非常规的后验分布也很难直接使用 Gibbs 抽样方法来实现有效抽样. 因此,可以采用 Slice 抽样方法,引入一个辅助变量来实现边缘模拟抽样[12-13],进而利用 Gibbs 抽样的思想来估计 $(H \mid I_{all})$. 最后根据式(2)求得各失效机理发生概率 p_d 的估计值,其流程如图 1 所示.

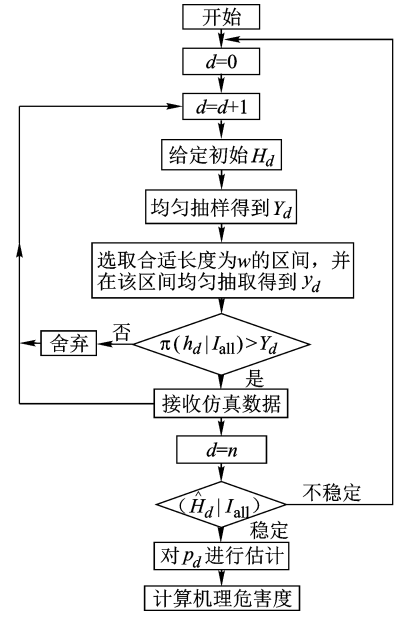

图 1　基于 Bayes 的失效机理危害度分析流程图

1.3　数据处理过程

基本步骤为:

1) 任意选取初值 $\{H_d \mid d = 1,2,\cdots,n\}$. 固定 H_d,在 $[0, \pi(H_d \mid I_{all})]$ 上均匀抽样得到 Y_d.

2) 任意选取包含 H_d 的长度为 w 的区间. 将该区间的左右两个端点分别向左向右延拓,端点的函数值应都小于 Y_d.

3) 在上述区间中均匀抽样得到 h_d,但是以一定概率接受它:若 $\pi(h_d \mid I_{all}) < Y_d$,则拒绝仿真值,

并将 $\pi(h_d \mid I_{all})$ 作为区间的新端点重新开始进行抽样；若 $\pi(h_d \mid I_{all}) > Y_d$，则接受. 此时，就获得了 H_d 满条件分布抽样.

4）利用 Gibbs 抽样思想，按照步骤 1）~3）开始进行迭代，最后 $\{H_d \mid d=1,2,\cdots,n\}$ 将收敛于后验分布 $(H \mid I_{all})$. 总共迭代 k 次，并每隔一定迭代次数计算一次 $(\hat{H}_d \mid I_{all})$，观测是否已经收敛. 当 $(\hat{H}_d \mid I_{all})$ 稳定后，将之前的 j 次迭代值舍弃，采用后面 $k-j$ 个数据进行估计，得到发生概率的 Bayes 估计：

$$(\hat{H}_d \mid I_{all}) = \frac{k}{k-j}\sum_{i=j+1}^{k} H_d^{(i)}$$

$$(\hat{p}_d \mid I_{all}) = (\hat{H}_{d-1} \mid I_{all}) - (\hat{H}_d \mid I_{all})$$

5）根据机理危害度公式，即式(1)计算各失效机理的危害程度，进而确定产品的主失效机理.

2 应用实例

2.1 问题假设

假设某型光纤连接器中光纤部分的潜在失效模式有光纤断裂、光纤屈曲、光纤凹陷、光纤凸出、光纤端面受损共 5 种，潜在失效机理有拉应力过大导致环氧树脂热膨胀、轴向压力累积导致环氧树脂硬化等 8 种. 现在需要分析这 8 种失效机理中哪些是光纤连接器光纤部分的主失效机理.

为了进行失效机理危害度的定量分析、找出该光纤部分的主失效机理，现收集了该产品的现场试验失效数据如表 1 所示.

表 1 现场失效数据统计

失效模式	失效影响	严酷度	失效机理	数据
光纤断裂	连接中断	7	拉应力过大导致环氧树脂热膨胀	5
			拉应力过大导致环氧树脂缺失	0
光纤屈曲	光耗损剧增	6	轴向压力累积导致环氧树脂硬化	3
光纤凹陷	端面间隙增大	3	压缩力过大导致端面对接力过大	5
			热应力疲劳导致热膨胀系数不匹配	3
光纤凸出	光纤端面擦伤	2	热应力疲劳导致热膨胀系数不匹配	2
端面受损	信号散射	5	硬颗粒挤压导致颗粒侵入	0
			腐蚀导致湿气/污染物渗入	3

同时，还收集了技术人员统计的历史失效数据，通过频率分析法得到了其先验分布参数：

$$q = (\hat{p} \mid I_p) =$$
$$(0.15\ 0.15\ 0.15\ 0.2\ 0.15\ 0.05\ 0.05\ 0.1)$$

对该先验信息的确信程度为 20，则 c=20.

2.2 失效数据处理

2.2.1 FMMEA 分析

1）首先通过频率分析法确定光纤连接器光纤部分的主失效模式.

2）通过 FMMEA 方法确定引起主失效模式的失效机理，从而确定主失效机理.

3）通过步骤 1）、2）处理表 1 数据，结果如表 2 所示.

表 2 现场失效数据统计

失效模式	失效频率比	失效模式危害度
光纤断裂	0.238	1.666
光纤屈曲	0.143	0.858
光纤凹陷	0.381	1.143
光纤凸出	0.095	0.19
端面受损	0.143	0.715

所以光纤断裂为产品的主失效模式，根据现场的失效数据可知失效机理 1——拉应力过大导致环氧树脂热膨胀为该产品的主失效机理.

2.2.2 基于 Bayes 的失效机理危害度分析

1）根据产品的先验分布参数 q 及式(2)，可求得：$(\hat{H} \mid I_p) = (1, 0.85, 0.7, 0.55, 0.35, 0.2, 0.15, 0.1, 0)$.

2）根据图 1 所示进行 Slice 及 Gibbs 抽样，迭代次数共 5 000 次，发现 3 000 ~ 5 000 次的抽样数据的 $(\hat{H} \mid I_{all})$ 已趋于稳定，故可认为这些抽样数据的边缘分布都是平稳分布 $(H \mid I_{all})$. 因此，采用后面的数据来得到后验估计值 $(\hat{H} \mid I_{all})$.

3）根据式(2)可求发生概率的估计为

$$(\bar{p}_d \mid I_{all}) = (\hat{H}_{d-1} \mid I_{all}) - (\hat{H}_d \mid I_{all})$$

4）根据机理危害度的公式计算该光纤连接器光纤部分各失效机理的危害度，结果见表 3.

表 3 失效机理的危害度分析结果

失效模式	失效机理	发生概率	机理危害度
光纤断裂	拉应力过大导致环氧树脂热膨胀	0.1894	1.3256
	拉应力过大导致环氧树脂缺失	0.0763	0.5339
光纤屈曲	轴向压力累积导致环氧树脂硬化	0.1557	0.9340
光纤凹陷	压缩力过大导致端面对接力过大	0.2332	0.6997
	热应力疲劳导致热膨胀系数不匹配	0.1161	0.3482
光纤凸出	热应力疲劳导致热膨胀系数不匹配	0.0594	0.1187
端面受损	硬颗粒挤压导致颗粒侵入	0.0199	0.0995
	腐蚀导致湿气/污染物渗入	0.1001	0.5006

对机理危害度数据进行归一化处理，其结果

如表 4 所示. 根据巴雷特法则[14-15],即认为累积机理危害度占据 80% 以上的失效机理为主失效机理,确定产品的主失效机理.

表 4　失效机理危害度归一化处理结果

失效模式	机理编号	失效机理	Bayes/%
光纤断裂	1	拉应力过大导致环氧树脂热膨胀	29.07
	2	拉应力过大导致环氧树脂缺失	11.71
光纤屈曲	3	轴向压力累积导致环氧树脂硬化	20.48
光纤凹陷	4	压缩力过大导致端面对接力过大	15.34
	5	热应力疲劳导致热膨胀系数不匹配	7.64
光纤凸出	6	热应力疲劳导致热膨胀系数不匹配	2.60
端面受损	7	硬颗粒挤压导致颗粒侵入	2.18
	8	腐蚀导致湿气/污染物渗入	10.98

通过表4 的分析结果可知:机理 1+机理 2+机理 3+机理 4+机理 8>80%. 因此,根据频率分析方法确定的主失效机理为机理 1、机理 3、机理 4、机理 8. 即:拉应力过大导致环氧树脂热膨胀、拉应力过大导致环氧树脂缺失、轴向压力累积导致环氧树脂硬化、压缩力过大导致端面对接力过大和腐蚀导致湿气/污染物渗入.

2.3　结果分析

分析上述所得到的结果可以得到如下结论:

1) 采用频率分析方法时,确定了主失效模式为光纤断裂,而其中拉应力过大导致环氧树脂缺失的失效机理在产品现场并未出现,认为其危害度为零;而采用基于 Bayes 的失效机理危害度分析方法,充分利用了有用的先验信息,将现场未出现的失效机理考虑在内,并且分析出这类机理存在一定的危害度.

2) Bayes 分析方法认为拉应力过大导致环氧树脂缺失从而导致光纤断裂的失效机理,虽现场未有失效数据,但根据先验信息可知其确有一定的概率发生且其机理危害度大. 通过巴雷特原则筛选后,将该机理纳入了该产品的主失效机理.

3　结　论

本文提出了一种基于 Bayes 的失效机理危害度量化方法,适用于多种失效机理共存、小子样失效数据的整机产品. 该方法能够定量分析出整机产品各失效机理的危害度,比传统的定性分析方法更加科学准确;Slice 抽样方法能够很好地解决非常规分布函数抽样问题,如本文的非常规后验分布函数;Bayes 方法能够结合有用的先验信息,更准确地量化整机各失效机理的危害度,为整机加速试验应力范围的选取提供有力依据. 应用案例表明,基于 Bayes 的失效机理危害度量化方法所得结果能够反映现场未出现的失效机理危害度,其分析结果比传统定性方法更具有可信度.

参考文献 (References)

[1] Tseng Sheng Tsaing, Huang Deng Yuan, Wu Tong You. A sampling plan for selecting the most reliable product under the arrhenius accelerated life test model[J]. Statistica Sinica, 1994(4): 233-237

[2] Gao Dayuan, He Bi , He Songwei, et al. Discussion on limitations of the arrhenius methodology[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2006, 14 (2): 132-135

[3] Zhang Tong, Chen Mei. Research on the reliability of the engine crank rod system based on fta-fmmea comprehensive analysis [J]. Journal of Engineering Graphics, 2010, 31 (5): 146-150

[4] Mathew S. Failure mechanisms based prognostics[C]//International Conference on Prognostics and Health Management. Denver, CO: [s. n.], 2008: 1-6

[5] Wang W, Das D, Osterman M, et al. Reliability integrated engineering using physics of failure[M]. Encyclopedia of Quantitative Risk Analysis and Assessment, 2008

[6] Daniele Fallin, Nicholas J. Achork. Accuracy of haplotype frequency estimation for biallelic loci, via the expectation-maximization algorithm for unphased diploid genotype data[J]. Am J Hum Genet, 2000, 67 (4): 947-959

[7] Huang Likun, Ye Ying, Wang Jintao, et al. The method of dynamic revised bayesian for the variance of shot firing dispersion[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2004, 32(8): 95-97

[8] Wang Jianhua, Yuan Li. Properties of hierarchical bayesian and e bayesian estimations of the failure probability in zero-failure data [J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics, 2010, 27(1): 78-84

[9] Li Pengbo, Xie Hongwei, Zhang Jinhuai. Bayesian estimation while considering the credibility of the prior information[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003, 25(4): 107-110

[10] Bowles John B. An assessment of rpn prioritization in a failure modes effects and criticality analysis[J]. Journal of the IEST, 2004, 47(1): 51-56

[11] Van Dorp J Rene, Mazzuchi Thomas A. A general bayes weibull inference model for accelerated life testing[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2005, 90(2): 140-147

[12] Tibbits Matthew M, Haran Murali, Liechty John C. Parallel multivariate slice sampling[J]. Statistics and Computing, 2011, 21(3): 415-430

[13] Chen Hongshu, Bakshi Bhavik R, Goel Prem K. Bayesian latent variable regression via gibbs sampling: methodology and practical aspects[J]. Journal of Chemometrics, 2007, 21(12): 578-591

[14] Scafetta Nicola, Picozzi Sergio, West Bruce J. Pareto's law: a model of human sharing and creativity [DB/OL]. 2008. http://wenku. baidu. com/view145f4c8313968011ca30091cc. html

[15] Hegyi G, Neda Z, Santos M A. Wealth distribution and pareto's law in the hungarian medieval society[J]. Statistical Mechanics and Its Applications, 2007, 380 (1): 271-277

(编　辑:娄　嘉)