

复杂设备可靠性增长中的一种精确分析方法

胡明祥 宋保维 邵成 (西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

Precise reliability growth analysis of complex equipment

HU Ming-xiang, SONG Bao-wei, SHAO Cheng

(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

【摘要】结合传统可靠性增长试验方式,以及复杂设备的实际情况,作了基于 Crow 扩展模型的可靠性增长分析。然后推导采用纠正有效性系数的加权平均,并引入环境折合系数,在此基础上给出了复杂设备可靠性增长中的一种精确分析方法。同时给出关键参数估计值的表达式,并用一组试验数据作为示例。

关键词: 可靠性增长; Crow 扩展模型; AMSAA 模型; 纠正有效性系数

【Abstract】Based on the traditional reliability growth testing, considering the practical condition of complex equipment, the Extended Crow Model is introduced into complex equipment reliability growth research. Then precise growth analysis and expression of estimate key parameters are given, adopting weighted average effectiveness factor and environment conversion factors. And a group of testing data are presented as an illustration.

Key words: Reliability growth; Extended crow model; AMSAA model; Effectiveness factor

中图分类号: TB114.3 文献标识码: A

1 引言

任何产品在设计初期,都存在某些设计缺陷,大量的实践经验和统计结果表明,新设计研制出来的整机,开始的平均故

障间隔时间(MTBF)通常只有预计值的10%~30%。特别是复杂设备,在研制阶段通过可靠性增长试验来提高其可靠性水平显得十分重要,同时还必须根据试验数据、针对不同的试验过程,对产品的可靠性状态作出精确的分析。这里将结合复杂设备的特殊可靠性增长试验过程,基于 Crow 扩展模型,给出复杂设

★来稿日期:2005-11-29

基于前面的三点假设,单个研磨体对物料的撞击频率:

$$f = \frac{w_6}{2\pi} = \frac{(1+i)w_5}{2\pi} \quad (7)$$

为了求出研磨体的粉碎功率,即单位时间内研磨体对物料的粉碎功。先求出单个研磨体的研磨功率:

$$N = E \times f$$

将(5)(6)(7)式代入,整理后得:

$$N = \frac{1}{4\pi} m w_5^3 ((2-i) \sqrt{i-1} r_m)^2 = \frac{1}{4\pi} m w_5^3 r_m^2 \quad (8)$$

由式(8)可以看出,研磨体的粉碎功率与研磨体的质量,转盘转速的立方,研磨体临界脱离处等效半径的平方成正比。所以,为了使研磨效率达到最大,要在许可的条件下使电机工作在最大转速下,并且选择合适的球磨机结构参数,偏心距,使等效半径最大。从上式还可以看出,从动力学角度来说, $i=2$ 时,球磨机的研磨效率最低,因此,在工程中应该尽量避免这种情况的出现。

对于不同的球磨机结构参数,都有一个不同的偏心 e 使等效 r_m 的取值最大,从而使研磨效率达到最大值。上例仅表明在选取偏心 e 值可改变球磨机的研磨效率。至于具体的偏心 e

值,应基于(8)式和实际生产中情况对球磨机结构参数进行选取,同时,可通过控制偏心距控制球磨机研磨效率。

4 结论

(1) 新型偏心式行星球磨机的动力学分析表明:偏心距 e 值在很大程度上影响了研磨体与筒壁脱离的位置和频率,从而影响研磨效率,因此,通过合理设计结构参数及偏心距可以使研磨效率大大提高。

(2) 在该新型偏心式行星球磨机中,研磨效率与转盘转速的立方成正比,且转速不影响研磨体和磨筒的脱离,因而使其能在尽可能较高的速度下工作,从而实现研磨效率的大幅度提高。

(3) 理想的研磨效率取决于球磨机的结构参数和偏心距选择,而文中推导的研磨效率表达式可为实现研磨效率的控制提供理论依据。

参考文献

- 1 陈振兴 特种粉体, 2004. 6, 化学工业出版社.
- 2 陈世柱 行星式高能球磨机工作原理研究. 矿业工程, 1997.
- 3 龚剑, 朱亮. Matlab 5. x 入门与提高. 清华大学出版社, 2000.
- 4 龚姚腾, 阙师鹏. 行星式球磨机动力学及计算机仿真. 南方冶金学院学报, 1997.

备可靠性增长中的一种精确分析方法。同时给出了预测故障强度等关键参数的表达式,并用一组试验数据作为示例。

2 模型理论基础

产品在开发期 $(0, t]$ 内的失效次数 $N(t)$ 是具有均值函数 $EN(t) = v(t) = at^b$ 及瞬时强度 $\lambda(t) = abt^{b-1}$ 的非齐次 Poisson 过程(NHPP):

$$P\{N(t) = n\} = \frac{[v(t)]^n}{n!} e^{-v(t)} \quad (n=0, 1, 2, 3, \dots)$$

设产品在 $(0, t)$ 内相继的失效时间为: $0 < t_1 < t_2 < t_3 < \dots < t_n \leq T$ 。当 $0 < b < 1$ 时, $\lambda(t)$ 严格单调下降, 产品处于可靠性增长之中(正增长); 当 $b > 1$ 时, $\lambda(t)$ 严格单调上升, 产品处于可靠性下降之中(负增长); 当 $b = 1$ 时, $\lambda(t) = a$ 为常数, 非齐次 Poisson 过程退化为齐次 Poisson 过程, 失效时间间隔 $t_j - t_{j-1}$ ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) 服从指数分布, 产品可靠性既不增长也不下降(零增长)。

3 复杂设备可靠性增长分析

3.1 常用的故障处理方式

通常将由于费用、技术、时间等因素的限制, 确定不列入设计或工艺纠正的系统性故障, 称为 A 类故障。反之, 确定进行设计或工艺纠正的系统性故障, 称为 B 类故障。在试验过程中, 当产品发生 B 类故障后, 通常采取以下两种不同的处置方式。

(1) 即时纠正方式: 对于试验过程中发生的 B 类故障, 立即进行失效分析, 找出失效原因, 并采取纠正措施, 然后对纠正后的产品继续进行试验。这种方式下, 可以采用 Crow(AMSAA)模型来描述和分析评估。设产品的可靠性增长试验在时刻 T 截尾, 产品的失效时间依次为 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ 。根据 Crow 模型, 可以得到形状参数 b 、尺度参数 a 和故障强度 λ 的无偏估计分别为

$$\hat{b} = (n-1) / \sum_{i=1}^n \ln \frac{T}{t_i}, \quad \hat{a} = \frac{n}{T^{\hat{b}}}, \quad \hat{\lambda}_T = \hat{a} \hat{b} T^{\hat{b}-1} \quad (1)$$

(2) 延缓纠正方式: 对于试验过程中发生的 B 类故障, 并不立即采取纠正措施, 仅进行简单修复, 立即继续试验。对所有 B 类故障进行失效分析, 找出失效原因, 试验结束后在产品中落实全部纠正措施。这种方式下, 可用可靠性增长的预测模型^[5]进行分析, 当引入全部延缓纠正措施后产品的失效强度

$$\hat{\lambda}_{\text{pr}} = \hat{\lambda}_A + \sum_{j=1}^M (1-d_j) \frac{N_j}{T} + \bar{d} \hat{h}(T) \quad (2)$$

试验过程中出现 M 种不同种类的 B 类故障; N_j 是第 j 种 B 类故障在试验过程中重复出现的次数; $\bar{d}$ 为平均纠正有效性系数:

$$\bar{d} = M^{-1} \sum_{j=1}^M d_j, \quad \hat{h}(T) = \hat{a} \hat{b} T^{\hat{b}-1}$$

3.2 特殊处理方式的分析

对于复杂设备, 其失效情况也十分复杂, 采用单一纠正方式往往不能经济有效地解决问题。试验过程中发生 B 类失效后, 对于易于纠正的失效, 采用即时纠正措施(为便于描述, 将这种失效记为 B_1 类失效); 而对于难度大的失效分析与纠正措施, 则采用延缓纠正(记为 B_{II} 类失效)。这样综合两种处置方法, 更符合实际情况合理地处置各类故障, 充分高效地利用试验设

备, 节约大量的试验时间和费用。

这样一来, 产品的可靠性在试验期间是增长率较低的平滑增长过程, 而在延缓纠正之后出现一个跳跃, 不符合 Crow(AMSAA)模型或传统的预测模型。根据文献^[5,6]充分考虑即时纠正和延缓纠正对可靠性增长所产生的作用, 从而得到基于 Crow 扩展模型^[6]的预计可靠性表达式:

$$\lambda_{\text{MAX}} = \lambda_T - \lambda_{B_{II}} + \sum_{j=1}^{K_{II}} (1-d_j) \lambda_j + dh(T|B_{II})$$

其试验过程中共有 K_{II} 种不同种类的 B_{II} 类故障; N_j 是第 j 种的 B_{II} 类故障在试验过程中重复出现的次数; $\bar{d}$ 为 B_{II} 类故障的平均纠正有效性系数。同(2)式, 其中 $h(T|B_{II})$ 是新的 B_{II} 类故障首次出现的概率函数。下面是预测故障强度的估计公式:

$$\hat{\lambda}_{\text{MAX}} = \hat{\lambda}_T - \hat{\lambda}_{B_{II}} + \sum_{j=1}^{K_{II}} (1-d_j) \frac{N_j}{T} + \bar{d} \hat{h}(T|B_{II}) \quad (3)$$

4 精确分析方法的应用

4.1 纠正有效性系数的加权平均

在(3)式中用的是平均纠正有效系数, 对于复杂设备, 由于不同的 B_{II} 类故障在试验中重复出现的次数往往都是不一样的, 各自所占的权重份量也不相同, 对整个系统的可靠性影响程度也不一样, 采用简单均值还不能够反映出这种差别, 所以在此引入有效性系数加权平均的概念:

开始时候, 受试产品由于 A 类及 B 类故障的失效概率分别为 P_A 及 P_B 。设受试产品中的 B 类故障共有 K 种, 记为 B_i ($i = 1, 2, \dots, K$), 与 B_i 相应的失败概率为 P_i ($i = 1, 2, \dots, K$), 则产品由于 B 类故障的失效概率为 $P_B = \sum P_i$ 。那么采取相应纠正措施以后, 故障 B_i 出现的概率降为 $(1-d_i)P_i$ 。对 B 类故障的总体来说, 纠正前 B 类故障的失效概率为 P_B , 改进后其失效概率降低到 $(1-d)P_B$ 或 $\sum (1-d_i)P_i$, 即

$$(1-d)P_B = \sum_{i=1}^K (1-d_i)P_i \Rightarrow d = P_B^{-1} \sum_{i=1}^K d_i P_i$$

这样得到的 d 是 d_i 的加权平均, d 的取值范围一般为 0.55~0.85, 其平均值为 0.70, 中位数为 0.71。当然, 个别系统的 d 值也可能有差异。不过在下面用到的是针对的 B_{II} 类故障, 其纠正有效性系数的加权平均如下:

$$\bar{d}_{II} = P_B^{-1} \sum_{i=1}^{K_{II}} d_i P_i = \left[\sum_{i=1}^{K_{II}} P_i \right]^{-1} \left[\sum_{i=1}^{K_{II}} d_i P_i \right] = \left[\sum_{i=1}^{K_{II}} \frac{N_i}{T} \right]^{-1} \left[\sum_{i=1}^{K_{II}} \frac{d_i N_i}{T} \right] \quad (4)$$

4.2 环境折合系数

前述基于 Crow 扩展模型的推导, 是假设在标准试验环境条件下, 当采用的不是标准试验环境的时候, 就要根据环境折合系数对试验数据进行折合。在获得相同试验效果下, 基准环境下的试验时间与某种试验环境下的试验时间之比, 定义为这种试验环境条件的环境折合系数 Z_k 。

对 $0 = t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < \dots < t_n < T$ 可折算为:

$$t'_0 = t_0; \quad t'_i = t'_{i-1} + Z_k(t_i - t_{i-1}) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

折算后的试验截尾时间: $T_z = Z_k T$

4.3 精确分析的表达式

设复杂设备的可靠性增长试验在时刻 T 截尾, 试验过程中的故障时间依次为 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_N$ 且

$$0 = t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < \dots < t_N < T$$

若试验过程中的 B_{II} 类故障时间依次为 $t'_1, t'_2, t'_3, \dots, t'_n$, ($n \geq K_{II}$), 统计出其中共有 K_{II} 种不同种类的 B_{II} 类故障, 它们首次出现的时间依次为

$$0 = t_0 < t_{I1} < t_{I2} < t_{I3} < \dots < t_{IK_{II}} < \dots < t_{IK_{II}} < T$$

记 N_j 是第 j 种的 B_{II} 类故障在试验过程中重复出现的次数, 则有 $n = \sum_{j=1}^{K_{II}} N_j$ 。综合(1)(3)(4)式子, 当所有的纠正措施都纳入之后, 可以达到的故障强度为:

$$\hat{\lambda}_{MIN} = \hat{a} \hat{b} T^{b-1} - \hat{\lambda}_{BII} + \sum_{j=1}^{K_{II}} (1-d_j) \frac{N_j}{T} + \bar{d}_w \hat{h}(T|B_{II}) \quad (5)$$

式中 $\hat{b} = (N-1) / \sum_{i=1}^N \ln \frac{T}{t_i}$; $\hat{a} = \frac{N}{T^b}$; $\hat{\lambda}_{BII} = n/T$, n 是 B_{II} 类故障出现的总数。如果需要采用环境折合系数, (5) 式则修正为:

$$\hat{\lambda}_{MIN} = \hat{a} \hat{b} T_z^{b-1} - \hat{\lambda}_{BII} + \sum_{j=1}^{K_{II}} (1-d_j) \frac{N_j}{T_z} + \bar{d}_w \hat{h}(T_z|B_{II})$$

式中 $\hat{b} = (N-1) / \sum_{i=1}^N \ln \frac{T_z}{t'_i}$; $\hat{a} = \frac{N}{T_z^b}$; $\hat{\lambda}_{BII} = n/T_z$ 。

最终得到在本试验阶段所有工作完成时候, 该设备达到的可靠性水平的精确分析表达式为:

$$\hat{\lambda}_{MIN} = \hat{a} \hat{b} T_z^{b-1} + \sum_{j=1}^{K_{II}} (1-d_j) \frac{N_j}{T_z} +$$

$$\left[\sum_{j=1}^{K_{II}} \frac{N_j}{T} \right]^{-1} \left(\sum_{j=1}^{K_{II}} \frac{d_j N_j}{T} \right) \hat{h}(T_z|B_{II}) - \frac{n}{T_z}$$

表 1 故障数据记录

Tab. 1 Failure data record

编号	时间	故障模式	编号	时间	故障模式
1	0.3	B1-1	19	47.4	* B2-6
2	1.5	B1-2	20	49.6	B2-2
3	3.6	* B2-1	21	54.5	B2-4
4	5.7	B1-3	22	56.2	B1-10
5	10.1	* B2-1	23	60.7	B2-3
6	13.1	B1-4	24	62.8	* B2-7
7	16.0	A	25	68.9	A
8	18.5	* B2-3	26	70.0	B2-2
9	20.7	B1-5	27	72.2	B2-4
10	23.3	B1-6	28	78.3	B2-4
11	26.9	B1-7	29	80.6	A
12	30.2	* B2-4	30	85.8	B2-5
13	33.5	* B2-5	31	87.7	B2-1
14	35.8	B1-8	32	91.5	B2-2
15	36.2	B1-7	33	94.0	B1-11
16	39.1	A	34	95.1	A
17	42.3	A	35	99.0	B2-6
18	43.1	B1-9	36	99.6	* B2-8

5 示例验证

某复杂设备可靠性增长试验的阶段试验数据如下, 试验时间 $T = 100h$, 标准试验环境, 试验过程中共有 $N = 36$ 次故障。

其中共有 $K_{II} = 8$ 种不同种类的 B_{II} 类故障, 首次出现的时间在表中用“*”标志, 对应的纠正有效性系数分别为: 0.71, 0.60, 0.76, 0.62, 0.70, 0.68, 0.74, 0.82。由(8)式可得: $d_w = 0.68$ 。

试验中采用标准环境条件, 数据不需要进行折算。数据通过 Cramér - Von Mises 检验法进行拟合优度检验 ($\alpha = 0.1$), 表明模型拟合是合适的。

经过计算可得该设备预测故障强度的精确估计值 $\lambda_{mix} = 0.236 h^{-1}$, 对应的 MTBF: $\hat{M}_{mix} = 1 / \hat{\lambda}_{mix} = 4.23 h$ 。

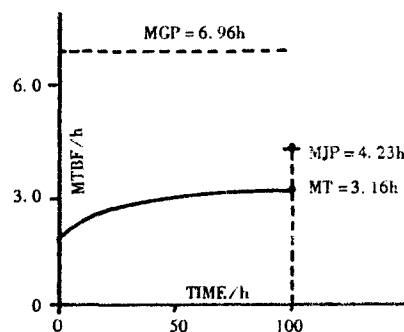


图 1 该试验阶段可靠性增长分析图

Fig. 1 Reliability growth research

同理, 可以根据前述推导出复杂设备的设计成熟度等其它相关参数。

6 结语

这里结合复杂设备的实际情况, 充分考虑到不同故障对整个设备的可靠性影响程度的差别, 同时考虑了试验环境的因素, 基于 Crow 扩展模型推导出一种精确的可靠性增长分析方法。该方法能够更加准确有效地获取相关参数, 给工程研制开发提供准确有用的信息。

由于这里的出发点是建立在经典的 Crow(AMSAA) 模型之上, 文中推导的精确分析方法具有广泛的适用性, 对于复杂设备可靠性增长分析也具有 general 性和实用价值。

参考文献

- 1 宋保维. 系统可靠性设计与分析. 西安: 西北工业大学出版社, 2000.
- 2 梅文华. 可靠性增长试验. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- 3 周源泉. 质量可靠性增长与评定方法. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1997.
- 4 Reliability Growth Management, Department of Defense Military Handbook 189, Naval Publications and Form Center, Philadelphia, 1981.
- 5 Larry H Crow. Reliability Growth Projection from Delayed Fixes, Proceedings 1983 Annual Reliability and Maintainability Symposium, Florida, USA, 1983.
- 6 Larry H Crow. Reliability Growth Projection from Delayed Fixes, Proceedings 2004 Annual Reliability and Maintainability Symposium, California, USA, 2004.