

doi: 10.7690/bgzdh.2016.08.010

基于 Duane 模型的改进性维修效果评估方法

罗九林¹, 郭镇¹, 李爱民¹, 邓正春²

(1. 装甲兵工程学院技术保障工程系, 北京 100072; 2. 石家庄陆军指挥学院军事训练系, 石家庄 100072)

摘要: 为解决模糊综合评价法在改进性维修效果评价应用过程中主观性强、适用性差等实际问题, 基于可靠性增长评价的方法建立改进性维修效果评价模型。通过对 Duane 模型和 AMSAA 模型的分析, 针对装备在改进性维修过程中可靠性增长的特点, 选择以 Duane 模型为基础建立装备改进性维修效果评价模型, 并进行示例验证。验证结果表明: 该方法能直观准确地得到改进性维修效果的评价结果, 可为改进性维修效果评价提供理论支持。

关键词: 改进性维修; 效果评价; 可靠性增长**中图分类号:** TP391.92 **文献标志码:** A

Research on Effect Evaluation of Armored Equipment Corrective Maintenance Based on Duane Model

Luo Jiulin¹, Guo Zhen¹, Li Aimin¹, Deng Zhengchun²

(1. Department of Technical Repair Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China;

2. Department of Military Training, Shijiazhuang Army Command College, Shijiazhuang 100072, China)

Abstract: In order to solve the practical problems of fuzzy synthesis evaluation method in the application of corrective maintenance effect evaluation, such as subjectivity, poor applicability and so on, the effect evaluation model of corrective maintenance is established by using reliability growth evaluation. By comparing Duane model with AMSAA model, and watching the way of reliability growing in equipment corrective maintenance, the effect evaluation model was built on Duane model, and carry out verification by case. The results show that the method can accurately acquire intuitional evaluation conclusions. It provides theory basis for corrective maintenance effect evaluation.

Keywords: corrective maintenance; effect evaluation; reliability growth

0 引言

目前, 改进性维修效果的评价主要采用模糊综合评价法和利用可靠性增长模型进行。其中, 模糊综合评价法的人员主观性较强, 又由于评价人员知识结构和评价对象性能需求的不同, 故采用模糊综合评价的方法进行改进性维修效果评价, 在通用性和准确性上存在不足。

考虑到现役装备的改进性维修主要是围绕增长可靠性进行, 而对可靠性增长的评价研究已十分成熟; 因此, 基于可靠性增长评价方法建立装备改进性维修效果评价模型, 能够很好地解决模糊综合评价过程中存在的主观性强、准确度差的问题。同时, 该方法具有很强的通用性和适用性, 能为改进性维修效果的评价研究提供参考和思路。

1 改进性维修效果评价的模型选择

受试验经费、试验时间和试验样本等因素的限制, 如何利用有限的对改进性维修效果进行准确评价尤为重要。当前, 进行可靠性增长评价的模型较多, 其中工程实践中应用最广的为 Duane 模型

和 AMSAA 模型^[1]。

1.1 Duane 模型和 AMSAA 模型

1) Duane 模型概述。

Duane 模型是 1964 年由美国工程师 J.T.Duane 提出的一种经验确定模型, 他在近 600 万台试验数据的分析中发现, 在产品的不断改进过程中, 累积故障率与累积故障时间在双对数坐标纸上近似呈线性函数关系。

Duane 模型具有简洁易懂的物理意义, 在可靠性增长的评价实践中便于操作, 应用领域非常广泛, 特别在电子、机电及机械系统中都有广泛的应用。同时, Duane 模型具有广泛的适用性, 在使用阶段可靠性增长评价中具有良好的适用性。

2) AMSAA 模型概述。

AMSAA 模型, 又称 Crow 模型, 应用时需满足以下 2 个假设:

假设 H_1 : 产品在累积时间 t 内的累积故障次数 $N(t)$ 具有均值函数 $E[N(t)]=m(t)=at^b$ 和瞬时故障率 $\lambda(t)=dE[N(t)]/dt=abt^{b-1}$ 的非齐次泊松过程 (non-

收稿日期: 2016-04-13; 修回日期: 2016-06-06

作者简介: 罗九林(1966—), 男, 江西人, 副教授, 从事装备维修保障研究。

homogeneous poisson process, NHPP)。则记为强度为 $\lambda(t)=abt^{b-1}$ 的幂律过程或威布尔过程，即

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

其中： a 记为尺度参数； b 记为形状参数。

假设 H_2 ：产品在时刻 T 定型之后不再进行改进，故障规律服从指数分布，即

$$\lambda(t)=abT^{b-1} \quad (2)$$

有瞬时故障率表达式 $\lambda(t)=abt^{b-1}$ 可知：当 $0 < b < 1$ 时，故障时间间隔 t_i-t_{i-1} 随着 i 的增加而增加， $\lambda(t)$ 单调递减，产品可靠性增长趋势处于正增长阶段；当 $b > 1$ 时，故障时间间隔 t_i-t_{i-1} 随着 i 的增加而减小， $\lambda(t)$ 单调递增，产品可靠性增长趋势处于负增长阶段；当 $b=1$ 时， $\lambda(t)=a$ 为常数，产品可靠性即不增长也不降低。因此，形状参数 b 为判断模型可靠性增长趋势的关键参数。模型的参数估计和拟合优度检验，可由时间截尾数据和故障截尾数据进行 AMSAA 模型统计推断得出^[2]。

综上所述可知：AMSAA 模型具有简洁易懂的

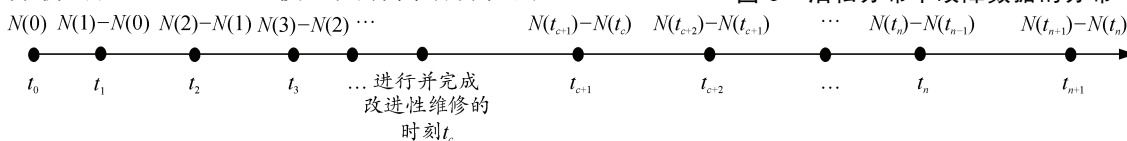


图 2 装备改进性维修前、后故障数据的分布

针对装备改进性维修前、后故障数据分布的特点，Duane 模型有良好的适用性，虽然 Duane 模型是经验确定模型，拟合优度检验精确度不高；但长期实践表明，Duane 模型的不足并不影响可靠性增长评价中的应用^[3]。

综上所述，选用 Duane 模型为装备改进性维修效果的评价模型。

2 改进性维修效果评价模型

2.1 Duane 模型的基本原理

Duane 模型描述的是在产品可靠性增长试验过程中，累积故障率与累积试验时间在双对数坐标纸上近似呈线性函数关系。

该线性函数关系记为：

$$\ln \lambda_2(t) = \ln a - m \ln t \quad (3)$$

其中： t 为累积试验时间； λ_2 为累积故障率。 $\lambda_2(t)$ 定义为产品在累积试验时间 t 内出现的累积故障次数 $N(t)$ 和累积试验时间 t 的比值，即

$$\lambda_2(t) = N(t)/t \quad (4)$$

a 记为尺度参数， $a > 0$ ， m 记为增长率， $0 < m$

物理意义，及在评价过程中具有较强的操作性，AMSAA 模型考虑到了试验过程中样本结果的随机性问题，可以给出模型参数及平均故障间隔时间 (mean time between failure, MTBF) 的点估计和当前 MTBF 的区间估计，进行模型拟合优度检验和可靠性增长趋势检验等，提供了较高的精确度和可靠性。

1.2 模型的选择

AMSAA 模型需要满足累积故障次数 $N(t)$ 具有非齐次泊松过程，即 $N(t+1) - N(t)$ 的增量符合泊松分布，如图 1 所示，对产品定型前的可靠性增长过程有很强的针对性。在装备改进性维修的研究过程中，对定型产品使用阶段的改进性维修效果的评价是改进性维修前、后试验数据的分析比较，如图 2 所示，数据特点不符合 $N(t+1) - N(t)$ 的泊松分布。

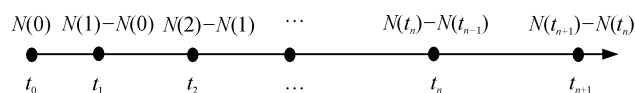


图 1 泊松分布中故障数据的分布

< 1 ； $1na$ 为直线在的纵轴上的截距， m 为直线的斜率，反映了可靠性增长的速率。

由式 (3) 转化为指数形式可得：

$$\lambda_2(t) = at^{-m} \quad (5)$$

将式 (4) 代入式 (5) 可得：

$$N(t) = at^{1-m} \quad (6)$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ ，可得时刻 t 的瞬时故障率 $\lambda(t)$ 为：

$$\lambda(t) = dN(t)/dt = a(1-m)t^{-m} \quad (7)$$

则，产品的累计 MTBF 为：

$$\bar{T}_{BF}(t) = 1/\lambda_2(t) = t^m/a \quad (8)$$

瞬时 MTBF 为：

$$\bar{T}'_{BF}(t) = 1/\lambda(t) = t^m/a(1-m) \quad (9)$$

式中尺度参数 a 和增长率 m 可以采用最小二乘法计算，得出极大似然估计^[4]：

$$\hat{m} = \frac{n \sum_{i=1}^n \ln \bar{T}_{BF}(t_i) \ln t_i - \left[\sum_{i=1}^n \ln \bar{T}_{BF}(t_i) \right] \cdot \sum_{i=1}^n \ln t_i}{n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2} \quad (10)$$

$$\hat{a} = \exp \left\{ \frac{1}{n} \left[\hat{m} \sum_{i=1}^n \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln \bar{T}_{BF}(t_i) \right] \right\} \quad (11)$$

Duane 模型的拟合优度检验利用 $\ln \lambda(t)$ 和 $\ln t$ 的经验相关系数估计量 \hat{r} 进行^[5],

$$\hat{r} = \frac{n \sum_{i=1}^n \ln \lambda_2(t_i) \ln t_i - \left[\sum_{i=1}^n \ln \lambda_2(t_i) \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n \ln t_i \right]}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n (\ln \lambda_2(t_i))^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln \lambda_2(t_i) \right)^2 \right]}} \quad (12)$$

根据给定的显著性水平 α , 对照相关系数表可得 $r_{n,\alpha}$, 当 $|\hat{r}| > r_{n,\alpha}$ 时, 接受 Duane 模型; 否则, 拒接 Duane 模型。

2.2 改进性维修效果评价模型

改进性维修效果评价的基本思路是通过改进性维修前、后试验数据的分析对比, 得出改进性维修效果的评价结论。在使用 Duane 模型对装备改进性维修效果进行评价的过程中, 应针对改进性维修前、后试验数据特点, 分段建立 Duane 模型, 通过求出的改进性维修前、后模型进行比较得出改进性维修效果的评价结论。为直观描述出评价结果, 可通过式 (9) 得出瞬时 MTBF, 并绘制改进性维修前、后的瞬时 MTBF 曲线。评价模型基本流程如图 3。

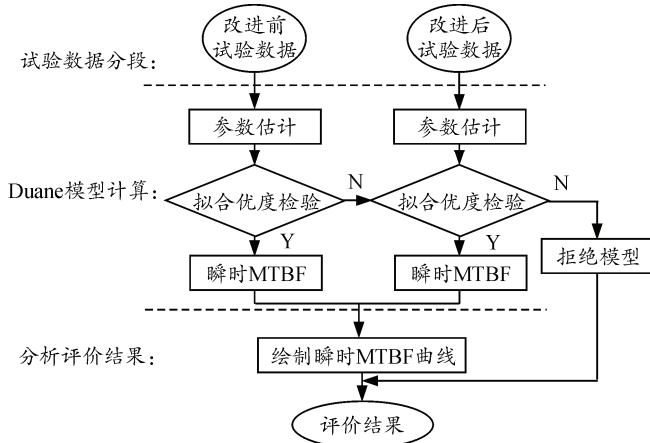


图 3 改进性维修效果评价模型基本流程

改进性维修效果评价模型的具体步骤如下:

1) 分段收集试验数据。按照改进性维修前、后的分段, 对试验数据 $(N(t), t)$ 进行记录收集。改进性维修前的试验数据记为 $(N(t), t)_1$; 改进性维修后的试验数据记为 $(N(t), t)_2$ 。

2) 计算累计故障率 $\lambda_2(t)$ 。按照式 (4), 分别求出改进性维修前的试验数据 $(\lambda_2(t), t)_1$ 和改进性维修

后的试验数据 $(\lambda_2(t), t)_2$ 。

3) 计算累计 MTBF。按照式 (8), 分别由 $(\lambda_2(t), t)_1$ 和 $(\lambda_2(t), t)_2$ 求出 $(\bar{T}_{BF}(t), t)_1$ 和 $(\bar{T}_{BF}(t), t)_2$ 。

4) 参数估计。根据最小二乘法最大似然估计, 由式 (10)、(11) 分别得出改进性维修前、后 Duane 模型的参数估计值 $(\hat{a}, \hat{m})_1$ 和 $(\hat{a}, \hat{m})_2$ 。

5) 拟合优度检验。由式 (12), 分别求出改进性维修前、后 $\ln \lambda_2(t)$ 和 $\ln t$ 的经验相关系数估计量 \hat{r} , 根据给定的显著性水平 α , 对照相关系数表查表可得 $r_{n,\alpha}$, 当 $|\hat{r}| > r_{n,\alpha}$ 时, 接受 Duane 模型; 否则, 拒接 Duane 模型。

6) 计算瞬时 MTBF。由式 (9), 代入参数估计值 $(\hat{a}, \hat{m})_1$ 和 $(\hat{a}, \hat{m})_2$ 分别求出改进性维修前、后的瞬时 MTBF, 记为 $(\bar{T}'_{BF}(t), t)_1$ 和 $(\bar{T}'_{BF}(t), t)_2$ 。

7) 绘制瞬时 MTBF 曲线。按照 $(\bar{T}'_{BF}(t), t)_1$ 和 $(\bar{T}'_{BF}(t), t)_2$ 分别绘制改进性维修前、后的瞬时 MTBF 曲线。

8) 分析评价结果。根据 2 条曲线的位置关系对改进性维修效果给出评价。

3 示例分析

现有某型装备的改进性维修试验的故障截尾数据, 见表 1, 试验进行到出现 30 次故障时停止, 以该试验数据为例对评价模型的有效性分析验证。

表 1 某型装备改进性维修试验故障截尾数据

试验分段	故障时间/h	截尾故障次数
改进性 维修前	16, 34, 54, 61, 67, 83, 89, 101, 223,	30
	239, 271, 275, 518, 551, 586, 614, 625,	
改进性 维修后	676, 691, 726, 887, 976, 989, 1 028, 1 136,	30
	1 196, 1 219, 1 322, 1 338, 1 417	
改进性 维修后	23, 48, 71, 66, 81, 113, 128, 145, 174,	30
	207, 271, 312, 524, 578, 623, 657, 686,	
	743, 774, 842, 941, 1 024, 1 056, 1 125, 1 331,	
	1 425, 1 560, 1 671, 1 758, 1 886	

建立改进性维修效果评价模型:

1) 将故障截尾数据转换成模型计算的标准形式 $(N(t), t)$, 结果如表 2 所示。

2) 由式 (4), 计算出累计故障率 $\lambda_2(t)$, 再由式 (8), 计算得出累计 MTBF, 并求出对应的 $\ln \lambda_2(t)$ 、 $\ln \bar{T}_{BF}(t)$ 和 $\ln t$, 计算结果见表 3 所示。

表 2 (N(t),t)形式试验数据

试验分段	试验数据
改进性 维修前	(1,16), (2,34), (3,54), (4,61), (5,67), (6,83), (7,89), (8,101), (9,223), (10,239), (11,271), (12,275), (13,518), (14,551), (15,586), (16,61), (17,625), (18,676), (19,691), (20,726), (21,887), (22,976), (23,989), (24,1028), (25,1136), (26,1196), (27,1219), (28,1322), (29,1338), (30,1417)
改进性 维修后	(1,23), (2,48), (3,71), (4,66), (5,81), (6,113), (7,128), (8,145), (9,174), (10,207), (11,271), (12,312), (13,524), (14,578), (15,623), (16,657), (17,686), (18,743), (19,774), (20,842), (21,941), (22,1024), (23,1056), (24,1125), (25,1331), (26,1425), (27,1560), (28,1671), (29,1758), (30,1886)

表 3 改进性维修效果评价计算数据

改进性维修前					改进性维修后				
N(t _i)	t _i	ln t _i	ln λ ₂ (t _i)	ln T _{BF} (t _i)	N(t _i)	t _i	ln t _i	ln λ ₂ (t _i)	ln T _{BF} (t _i)
1	16	2.772 6	-2.772 6	2.772 6	1	23	3.135 5	-3.135 5	3.135 5
2	34	3.526 4	-2.833 6	2.833 6	2	48	3.526 4	-3.178 1	3.178 1
3	54	3.989 0	-2.889 6	2.889 6	3	71	4.262 7	-3.164 1	3.164 1
4	61	4.110 9	-2.724 2	2.724 2	4	66	4.189 7	-2.803 4	2.803 4
5	67	4.204 7	-2.595 6	2.582 3	5	81	4.394 4	-2.785 0	2.785 0
6	83	4.418 8	-2.626 9	2.626 9	6	113	4.727 4	-2.935 6	2.935 6
7	89	4.488 6	-2.542 1	2.542 1	7	128	4.852 0	-2.906 1	2.906 1
8	101	4.615 1	-2.535 8	2.535 8	8	145	4.976 7	-2.897 3	2.897 3
9	223	5.407 2	-3.208 9	3.208 9	9	174	5.159 1	-2.961 8	2.961 8
10	239	5.476 5	-3.174 9	3.174 9	10	207	5.332 7	-3.030 1	3.030 1
11	271	5.602 1	-3.204 0	3.204 0	11	271	5.602 1	-3.204 2	3.204 2
12	275	5.616 8	-3.132 7	3.132 7	12	312	5.743 0	-3.258 1	3.258 1
13	518	6.250 0	-3.684 9	3.684 9	13	524	6.261 5	-3.696 5	3.696 5
14	551	6.311 7	-3.673 0	3.673 0	14	578	6.359 6	-3.720 5	3.720 5
15	586	6.373 3	-3.665 2	3.665 2	15	623	6.434 5	-3.726 5	3.726 5
16	614	6.420 0	-3.645 8	3.645 8	16	657	6.487 7	-3.715 1	3.715 1
17	625	6.437 8	-3.604 5	3.604 5	17	686	6.530 9	-3.697 7	3.697 7
18	676	6.516 2	-3.626 8	3.626 8	18	743	6.610 7	-3.720 3	3.720 3
19	691	6.538 1	-3.593 6	3.593 6	19	774	6.651 6	-3.707 1	3.707 1
20	726	6.587 6	-3.593 6	3.593 6	20	842	6.735 8	-3.740 0	3.740 0
21	887	6.787 8	-3.742 3	3.742 3	21	941	6.846 9	-3.802 4	3.802 4
22	976	6.883 5	-3.794 2	3.794 2	22	1024	6.931 5	-3.840 4	3.840 4
23	989	6.896 7	-3.759 3	3.759 3	23	1056	6.962 2	-3.826 7	3.826 7
24	1028	6.935 4	-3.759 3	3.759 3	24	1125	7.025 5	-3.847 5	3.847 5
25	1136	7.035 3	-3.816 7	3.816 7	25	1331	7.193 7	-3.974 8	3.974 8
26	1196	7.086 7	-3.830 4	3.830 4	26	1425	7.261 9	-4.003 8	4.003 8
27	1219	7.105 8	-3.812 2	3.812 2	27	1560	7.352 4	-4.056 6	4.056 6
28	1322	7.186 9	-3.853 8	3.853 8	28	1671	7.421 2	-4.089 0	4.089 0
29	1338	7.198 9	-3.830 4	3.830 4	29	1758	7.471 9	-4.104 6	4.104 6
30	1417	7.256 3	-3.853 8	3.853 8	30	1886	7.542 2	-4.141 0	4.141 0

3) 根据表 3 计算结果, 由式(10)、(11), 按照最小二乘法对参数值进行最大似然估计, 分别得出改进性维修前、后 Duane 模型的参数估计值 \hat{a} 和 \hat{m} 。

改进性维修前 Duane 模型的参数估计值为:

$$\hat{m} = \frac{n \sum_{i=1}^n \ln \bar{T}_{BF}(t_i) \ln t_i - \left[\sum_{i=1}^n \ln \bar{T}_{BF}(t_i) \right] \cdot \sum_{i=1}^n \ln t_i}{n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2} = \frac{30 \times 611.092 5 - 101.381 \times 176.036 7}{30 \times 1079.993 - (176.036 7)^2} = 0.346 1. \quad (13)$$

$$\hat{a} = \exp \left\{ \frac{1}{n} \left[\hat{m} \sum_{i=1}^n \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln \bar{T}_{BF}(t_i) \right] \right\} = \exp \left(\frac{0.346 1 \times 176.036 7 - 101.367 4}{30} \right) = 0.259 7. \quad (14)$$

改进性维修后 Duane 模型的参数估计值为:

$$\hat{m} = \frac{n \sum_{i=1}^n \ln \bar{T}_{BF}(t_i) \ln t_i - \left[\sum_{i=1}^n \ln \bar{T}_{BF}(t_i) \right] \cdot \sum_{i=1}^n \ln t_i}{n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2} = \frac{30 \times 650.233 3 - 105.669 8 \times 179.983 4}{30 \times 1125.578 - (179.983 4)^2} = 0.355 6. \quad (15)$$

$$\hat{a} = \exp \left\{ \frac{1}{n} \left[\hat{m} \sum_{i=1}^n \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln \bar{T}_{BF}(t_i) \right] \right\} = \exp \left(\frac{0.355 6 \times 179.983 4 - 105.669 8}{30} \right) = 0.249 3. \quad (16)$$

4) 拟合优度检验。由式 (12) 可得, 改进性维修前 $\ln \lambda(t)$ 和 $\ln t$ 的经验相关系数估计量 \hat{r}_1 为:

$$\hat{r}_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n \ln \lambda_2(t_i) \ln t_i - \left[\sum_{i=1}^n \ln \lambda_2(t_i) \right] \cdot \sum_{i=1}^n \ln t_i}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n (\ln \lambda_2(t_i))^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln \lambda_2(t_i) \right)^2 \right]}} = \frac{30 \times (-611.148) - (-101.381) \times 176.0367}{\sqrt{\left[30 \times 1079.993 - (176.0367)^2 \right] \left[30 \times 349.0566 - (-101.381)^2 \right]}} = -0.9331. \quad (17)$$

改进性维修后 $\ln \lambda(t)$ 和 $\ln t$ 的经验相关系数估计量 \hat{r}_2 为:

$$\hat{r}_2 = \frac{n \sum_{i=1}^n \ln \lambda_2(t_i) \ln t_i - \left[\sum_{i=1}^n \ln \lambda_2(t_i) \right] \cdot \sum_{i=1}^n \ln t_i}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n (\ln \lambda_2(t_i))^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln \lambda_2(t_i) \right)^2 \right]}} = \frac{30 \times (-650.2333) - (-105.6698) \times 179.9834}{\sqrt{\left[30 \times 1125.578 - (179.9834)^2 \right] \left[30 \times 377.9455 - (-105.6698)^2 \right]}} = -0.9963. \quad (18)$$

给定的显著性水平 $\alpha=0.05$ (通常取值为 0.05, 0.01 或 0.1), 对照相关系数临界值表可得 $r_{n,\alpha} = 0.3494$, 则 $\left| \hat{r}_1 \right| > r_{30,0.05}$, $\left| \hat{r}_2 \right| > r_{30,0.05}$, 即改进性维修过程试验数据符合 Duane 模型。

5) 由式 (9), 计算瞬时 MTBF。

改进性维修前的瞬时 MTBF 为:

$$\bar{T}'_{BF}(t) = t^{0.3461} / 0.2597(1 - 0.3461) = t^{0.3461} / 0.1698. \quad (19)$$

改进性维修后的瞬时 MTBF 为:

$$\bar{T}'_{BF}(t) = t^{0.3556} / 0.2493(1 - 0.3556) = t^{0.3556} / 0.1606. \quad (20)$$

6) 绘制瞬时 MTBF 曲线。

改进性维修前、后的瞬时 MTBF 曲线如图 4。

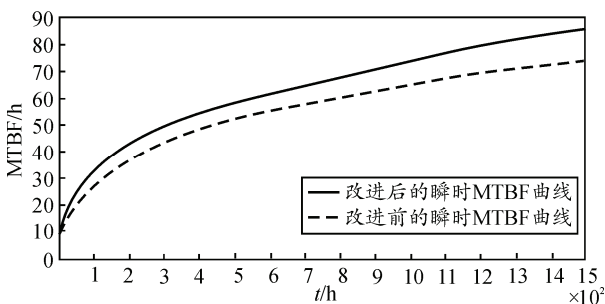


图 4 改进性维修前、后的瞬时 MTBF 曲线

7) 改进性维修效果评价分析。

由图 4 可知: 改进性维修后瞬时 MTBF 曲线明显优于改进性维修前, 同时, 在利用 Duane 模型对装备在 1 500 h 的瞬时 MTBF 进行预测, 改进性维修前 1 500 h 的瞬时 MTBF 为 $\bar{T}'_{BF}(1500)_1 = 74.0131$ h, 改进性维修后 1 500 h 的瞬时 MTBF 为 $\bar{T}'_{BF}(1500)_2 = 83.8834$ h, $\bar{T}'_{BF}(1500)_2 > \bar{T}'_{BF}(1500)_1$,

在 1 500 h 时刻改进性维修后的瞬时 MTBF 比改进性维修前提高了 13.34%, 改进性维修效果得到明显提高, 说明改进性维修方案有效可行^[6]。

综上所述: 改进性维修效果评价模型能够通过改进前、后试验数据的分析计算, 给出 2 种状态下瞬时 MTBF 的曲线, 直观地给出改进性维修效果的评价结论。该模型操作简单, 适用性强, 评价过程可行有效。

4 结束语

笔者首先对 Duane 模型和 AMSAA 模型 2 种经典的可靠性增长模型进行了比较和分析, 在此基础上, 确定了 Duane 模型为进行改进性维修效果评价的基础模型。然后对 Duane 模型进行可靠性增长评价的基本原理进行了研究, 结合使用阶段进行改进性维修的特点, 建立了改进性维修效果评价模型并明确了方法步骤。最后运用某型装备改进性维修前、后的故障截尾试验数据进行了示例分析, 验证了改进性维修效果评价模型的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 韩庆田, 卢洪义, 张毅. 系统可靠性增长评估模型研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(11): 2527-12531.
- [2] 梅文华. 利用 AMSAA 模型预测产品可靠性增长[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(2): 81-83.
- [3] 姜键, 马振龙, 姜悦岭. Duane 模型的推广[J]. 哈尔滨师范大学(自然科学学报), 1997, 13(5): 83-86.
- [4] 左国新, 任全玉, 谷亭亭, 等. 概率论与数理统计[M]. 武汉: 华中师范大学出版社, 2013: 102-107.
- [5] 王桂华, 张连祥. 采用 Duane 模型评估航空发动机平均故障间隔时间[J]. 航空发动机, 2006, 32(1): 29-31.
- [6] 张毅, 汪刘应, 曹继平, 等. 基于模糊综合评判的装备维修效能评估[J]. 兵工自动化, 2015, 34(9): 15-17.