

文章编号:1006-1630(2005)06-0048-03

# 基于及时修正策略的成败型产品可靠性增长分析

刘 飞,张为华

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410008)

**摘 要:**针对及时修正试验策略,根据 Fries 可靠性增长模型和 Duane 学习曲线特性,基于不同的失败类型对模型进行了扩展。用进化算法对似然函数求极值,获得了参数极大似然估计,以及最终研制阶段可靠性点估计。对某固体火箭发动机可靠性增长实例的分析结果表明,与经典评估方法相比,本文模型更具优越性。

**关键词:**固体火箭发动机;可靠性增长;进化算法;极大似然估计;可靠性点估计

**中图分类号:**TB114.3 **文献标识码:**A

## Reliability Growth Analysis for Success-Failure Products Based on Correction Strategy in Time

LIU Fei, ZHANG Wei-hua

(College of Aerospace and Material Engineering, NUDT, Changsha Hunan 410008, China)

**Abstract:** According to the test strategy of correction in time, the reliability growth model for various failure categories was extended based on the Fries's reliability growth model and Duane's learning-curve property in this paper. The extreme value of likelihood was calculated through evolutionary algorithm. The maximum likelihood estimation of the parameters and reliability point estimator of the last development stage were obtained. The analysis result of reliability growth for some solid rocket engine showed that the method in this paper had more advantages than the classical estimation.

**Keywords:** Solid rocket engine; Reliability growth; Evolutionary algorithm; Maximum likelihood estimation; Reliability point estimation

## 0 引言

在成败型产品研制过程中,可靠性和性能参数一般都不能直接达到规定指标,而必须经历试验-改进-再试验的过程,不断暴露产品设计、制造工艺和操作方法中的缺陷,通过分析和修正使产品的可靠性和性能不断提高,此即可靠性增长过程。

建立可靠性增长模型是实现这一目标的重要方式。选取模型适当,就可较好地跟踪产品可靠性增长过程。一般,成败型产品可靠性增长试验包括延缓修正和及时修正两种策略。延缓修正采用试验-暴露缺陷-再试验的规划方式,在阶段试验结束时对

缺陷进行集中统一修正;及时修正则对试验中暴露的可归因失效立即进行修正,采用试验-修正-再试验的规划方式。试验修正策略不同,选取的可靠性增长模型也不同。延缓修正的可靠性增长试验策略主要用离散 AMSAA 模型进行分析,而对及时修正的可靠性增长试验策略的研究较少<sup>[1]</sup>。1993年,文献[2]针对及时修正试验策略提出了一参数型可靠性增长模型,描述了采用及时修正策略的可靠性增长过程。

本文引入文献[2]的可靠性增长模型,根据 Duane 学习曲线特性,基于不同的失败类型对模型进行了扩展。

## 1 可靠性增长模型

20世纪60年代,根据各种产品失效数据的统计分析,DUANE 获得了一近似函数关系(学习曲线

收稿日期:2005-05-25;修回日期:2005-07-26

基金项目:国防预研基金资助项目(41328010504)

作者简介:刘 飞(1976—),男,博士生,主要研究方向为固体火箭发动机可靠性设计与评估。

特性)为

$$E\{K(T)\} = \lambda T^\beta, \quad (1)$$

式中: $\lambda, \beta$ 分别为形状和尺寸参数,两者均为正值; $T$ 为累计试验时间; $K(T)$ 为累计失效次数<sup>[3]</sup>。

用累计试验次数  $N$  替代式(1)中的累计试验时间  $T$ ,可得离散型学习曲线特性为

$$E\{K(N)\} = \lambda N^\beta. \quad (2)$$

1993年,FRIES针对及时修正试验策略提出了试验假设:

- a)每一阶段的试验量未知;
- b)每一阶段的失败数为1(最后试验阶段除外);
- c)每次失败后对产品进行修正,且改进成功。

此时,每阶段的试验数  $n_i$  服从几何分布,累计试验数  $N_i$  为随机量。令  $K(N) = i, N = E\{N_i\}$ , 式(2)可修正为

$$E\{n_i\} = \lambda^{-1/\beta} i^{1/\beta}. \quad (3)$$

记  $\lambda' = \lambda^{1/\beta}, \beta' = 1/\beta$ , 则有

$$E\{n_i\} = \lambda'^{-1} [i^{\beta'} - (i-1)^{\beta'}]. \quad (4)$$

由此可得一新的可靠性增长模型

$$R_i = 1 - 1/E\{n_i\} = 1 - \lambda' [i^{\beta'} - (i-1)^{\beta'}]^{-1}, \quad (5)$$

式中: $R$ 为可靠性; $0 < \lambda' < 1; \beta' > 1$ 。

需说明的是,实际试验中,最后阶段的试验一般无失败,此时式(5)仍能适用。

设产品研制过程中经历的失败为  $c-1$  次,若以成功试验截尾,则可划分为  $c$  个试验阶段。此时用极大似然法估计参数  $\lambda', \beta'$ , 似然函数  $L$  为

$$L = \left[ \prod_{i=1}^{c-1} R_i^{n_i-1} (1-R_i) \right] R_c^{n_c}. \quad (6)$$

若以失败试验截尾,则可划分为  $c-1$  个试验阶段。此时用极大似然法估计参数  $\lambda', \beta'$ , 似然函数  $L$  为

$$L = \prod_{i=1}^{c-1} R_i^{n_i-1} (1-R_i). \quad (7)$$

## 2 模型扩展

根据文献[4],产品可靠性增长试验中出现的系统性失效可分为A型和B型两类。其中,一般称A型失效为本质失效,B型失效为可归因失效。因经费、时间和技术等限制,对A型失效不作修正,而仅对B型失效进行修正。

式(5)适于B型失效,要求出现的系统性失效均可修正。当存在A型失效时,需对式(5)进行修

改。具体为:每一试验阶段B型失效数为1,即以B型失效划分试验阶段。令A型失效概率为  $P_0$ , 其值在所有试验阶段中不变,则式(5)变为

$$R_i = 1 - P_0 - \lambda' [i^{\beta'} - (i-1)^{\beta'}]^{-1}. \quad (8)$$

试验结果包括成功、A型失效和B型失效三种情形,且最后试验阶段不存在B型失效。此时,模型的似然函数  $L$  为

$$L = \left\{ \prod_{i=1}^{c-1} \left[ \frac{(n_i-1)!}{f_i!(n_i-f_i-1)!} P_0^{f_i} (1-P_0-R_i)^{n_i-f_i-1} \right] \right\} \times \left\{ \frac{n_c!}{f_c!} P_0^{f_c} R_i^{n_c-f_c} \right\}, \quad (9)$$

式中: $n_i, f_i$ 分别为第  $i$  试验阶段的试验次数和A型失效数; $n_c, f_c$ 分别为第  $c$  试验阶段的试验次数和A型失效数。

## 3 增长趋势检验

在获得可靠性增长试验数据后,需先对试验数据进行增长趋势检验,验证其可靠性是否增长。本文采用Laplace检验。Laplace检验与所选可靠性增长模型无关,是一种无争检验。Laplace检验统计量  $\mu$  可表示为

$$\mu = \left( \sum_{j=1}^M i_j / (MJ) - 0.5 \right) \sqrt{12M}, \quad (10)$$

式中: $i_j$ 为至第  $j$  次失败时的累计试验次数; $J$ 为试验终止时的累计试验次数; $M$ 为与累计失败次数  $f$  和截尾方式有关的量,失败截尾时  $M = f-1$ ,成功截尾时  $M = f$ 。

若  $-\mu_\alpha < \mu < \mu_\alpha$  (此处,  $\mu_\alpha$  为  $\mu$  的临界值,可由文献[3]的表查得),则以显著性水平  $\alpha$  表明可靠性无明显的变化趋势;若  $\mu \leq -\mu_\alpha$ , 则以显著性水平  $\alpha$  表明可靠性有明显的增长趋势;若  $\mu \geq \mu_\alpha$ , 则以显著性水平  $\alpha$  表明可靠性有明显的降低趋势(即可靠性退化)。

## 4 极大似然估计

用式(5)~(7),(9)求  $\hat{\lambda}', \hat{\beta}', \hat{P}_0$  的极大似然估计方法有两种:一是求解似然方程,另一是直接对似然函数求极值<sup>[5]</sup>。因似然函数结构复杂,且多为多峰函数,用求解似然方程法求  $\hat{\lambda}', \hat{\beta}', \hat{P}_0$  的极大似然估计较难,因此一般采用直接对似然函数求极值法。对多峰函数,一般的求极值法无法获得全局极值点,且对初值敏感。因此,本文选取进化算法求解,其流程如图1所示<sup>[6]</sup>。

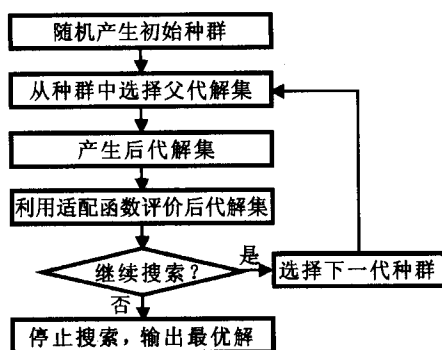


图1 进化算法流程

Fig.1 Evolutionary algorithms flow

## 5 算例

某固体火箭发动机地面试验 20 台, 15 次成功, 试验成败结果见表 1。表中, “√”表示试验成功; “×”表示试验失败。在 a) 失败均为 B 型失效, 都进行故障分析、修正; b) 第四次失败为 A 型失效, 其他均为 B 型失效两种情况下, 分别用本文方法分析研制试验结束时产品的可靠性。

表 1 试验结果

Tab.1 Test outcomes

| 试验序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 试验结果 | √ | × | √ | × | √ | × | × | × | √ | √  | √  | √  | ×  | √  | √  | √  | √  | √  | √  | √  |

### a) 增长趋势检验

由表 1 数据可知, 试验成功截尾时  $M=5$ ,  $J=20$ , 可算得检验统计量  $\mu = -1.3943$ ,  $\alpha = 0.2$ ,  $\mu_\alpha = 1.282$ 。这样, 有  $\mu < \mu_\alpha$ , 以显著性水平  $\alpha = 0.2$  表明可靠性有明显增长趋势。

### b) 极大似然估计

对情况 a), 以 B 型失效划分研制试验可分为 6 个阶段, 其中, 试验 1 与 2、3 与 4、5 与 6、7、8~13、14~20 分别为第一至第六阶段。此时  $c=6$ , 各阶段的试验数  $n$  分别为 2, 2, 2, 1, 6, 7。根据以上数据和式(5), 由式(6)可优化解得参数的极大似然估计为  $\hat{\lambda}' = 0.6274$ ,  $\hat{\beta}' = 1.53586$ 。这样, 算得研制试验结束时产品可靠性为  $\hat{R}_c = 0.8361$ 。

对情况 b), 因第四次失败为 A 型失效, 故研制试验可分为 5 个阶段, 其中, 试验 1 与 2、3 与 4、5 与 6、7~13、14~20 分别为第一至第五阶段。此时,  $c=5$ ;  $n_1 \sim n_3 = 2$ ;  $n_4, n_5 = 7$ ;  $f_1 \sim f_3, f_5 = 0$ ;  $f_4 = 1$ 。根据以上数据和式(8), 由式(9)可优化解得参数

的极大似然估计为  $\hat{\lambda}' = 0.57937$ ,  $\hat{\beta}' = 1.70941$ ,  $P_0 = 0.05$ 。这样, 算得研制试验结束时产品可靠性为  $\hat{R}_c = 0.8333$ 。

### c) 传统估计法

根据 GB 4087.1—1983 数据的统计处理 and 解释——二项分布参数的点估计, 研制试验结束时使用全阶段可靠性增长试验数据, 所得产品可靠性估计值  $\bar{R}_c = (20 - 5)/20 = 0.75$ 。

可见, 有  $\hat{R}_c > \hat{R}_c > \bar{R}_c$ , 由可靠性增长模型获得的产品可靠性估值大于传统方法的可靠性结果。这是因为可靠性增长模型充分考虑了研制过程中产品可靠性增长的动态变化, 而传统估计法则忽略了这些增长因素, 无差别地对待各阶段试验数据, 所得的可靠性估计偏保守。另外, 还有  $\hat{R}_c > \hat{R}_c$ , 这是因为对 A 型失效无法采取有效修正措施予以消除, 影响了可靠性增长。

## 6 结论

针对及时修正策略的特点, 本文引入了 Fries 可靠性增长模型, 根据失效类型将其扩展为一般情形, 并在此基础上获得了最终研制阶段可靠性点估计。用进化算法解决了复杂多峰似然函数的极值求解, 得到模型参数极大似然估计。研究结果表明, 对可靠性增长试验数据不宜采用经典评估法。本文可靠性增长模型给出的产品可靠性估计优于传统估计法, 可更适当地反映产品可靠性增长过程, 为及时修正策略的可靠性增长分析提供了一种实用方法。

### 参考文献

- [1] 张军科, 李长福, 冯欣. 成败型可靠性增长模型研究[J]. 质量与可靠性, 2002, (6).
- [2] FRIES A. Discrete reliability-growth models based on a learning-curve property[J]. IEEE Trans. Reliability, 1993, 42(2): 303~306.
- [3] FRIES A, SEN A. A survey of discrete reliability-growth models[J]. IEEE Trans. Reliability, 1996, 45(4): 582~604.
- [4] 周源泉, 翁朝曦. 可靠性增长[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [5] HALL J D, WESSELS W R. An automated solver to determine ML estimations for the AMSAA discrete reliability growth model[C]. Proc. Ann. Reliability and Maintainability Symp., 2001.
- [6] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.