可靠性强化试验定量评估方法

姚 军 曹心宽 姜同敏

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100083)

摘 要: 介绍了国外最新可靠性强化试验基本概念、各种应力极限分类和试验过程,阐述了强化试验的基础理论. 针对可靠性强化试验无法进行定量分析的问题,引入应力强度干涉模型理论,运用干涉模型分析了强化试验中的产品失效原因,即试验环境应力大于产品工作极限应力. 通过分析工作极限应力与产品实际使用环境应力的相互关系,推导了利用强化试验数据计算产品可靠度的相关公式,将定量分析引入强化试验中. 并举具体计算实例说明了该方法的可行性. 在此基础上,运用干涉模型和可靠度计算公式,分析了强化试验提高产品可靠性的 2 种基本途径:改进设计和提高工艺水平,进一步阐述了可靠性强化的基本原理.

关 键 词: 可靠性评估; 定量分析; 干涉模型; 可靠性强化试验

中图分类号: TB 114.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)01-0117-04

Quantitative assessment approach of RET based on interference model

Yao Jun Cao Xinkuan Jiang Tongmin

(Dept. of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: RET(reliability enhancement testing) is the most advanced technology in western countries. RET's concept, process and stress limit classification were introduced. The basic theory of RET was explained. Interference model was introduced into RET, to settle the problem that RET couldn't be analyzed quantitatively. The failure mechanism occurred in RET was analyzed by using interference model. Because the test stress was higher than the operation stress limit of product, almost all products in RET failed. By analyzing the interdependence between the operating stress found in RET and the stress in actual operation environment, the formula for reliable probability was deduced based on interference model. Then an example was given to explain this approach's feasibility. RET could improve the reliability of products by improving the quality of design and manufacturing process. By using the interference model and the deuced formula, two ways of improving the reliability of products were analyzed. And also the basic principle of RET was explained based on the model.

Key words: reliability estimation; quantitative analysis; interference model; reliability enhancement testing

可靠性强化试验 RET(Reliability Enhancement Testing)是一项新兴的技术,上世纪 90 年代初发源于美国[1,2]. 传统可靠性试验为环境模拟试验,其特点是尽可能地模拟产品的典型真实环境,再加上设计裕度来确保产品可靠性. 与传统可靠性试验的思路相反,可靠性强化试验是一种激发试验,它是用人为施加高试验应力的方法,加速激发产品潜在缺陷来达到提高可靠性的目的. RET 突破了传统可靠性试验的思路限制,试验时间短、费用低,顺应了日新月异的技术发展趋势,所以 RET 必将带来可靠性工程的一次新的技术飞跃[3,4].

收稿日期: 2004-11-12

作者简介: 姚 军(1971-),男,陕西西安人,副教授, yao2jun1@sina.com.

RET与可靠性增长试验同属于工程研制试验,但目前RET中没有增长模型,无法进行定量分析.应力强度干涉模型根据产品的应力和强度相互关系分析产品的失效,在传统可靠性工程中主要应用于机械产品可靠性分析,本文将这一模型理论运用于可靠性强化试验中,推导出了利用强化试验数据计算产品可靠度的相关公式,将定量分析引入RET中,解决了RET无法进行定量分析的问题.最后,根据干涉模型和推导的可靠度计算公式,分析了通过强化试验提高产品可靠性的2种基本途径.

1 可靠性强化试验介绍

1.1 应力极限分类

在可靠性强化试验中,涉及到多个应力极限,如图1所示,从低到高,其定义如下[3]:

1) 技术规范极限:由产品使用者或制造者规定的应力极限,产品预期在该极限内工作;

2) 设计极限:设计这种产品在该极限内工作不会失效.技术规范极限和设计极限之差称为设计余量;

3) 工作极限:实际产品在该极限内工作不会失效.工作极限可以通过可靠性强化试验测定;

4) 破坏极限:产品能在其范围内工作而不出现不可逆失效的应力极限.破坏极限可以通过可靠性强化试验测定;

5) ESS(Environment Stress Scanning)极限:ESS试验是在交付最终产品前的一个筛选过程.ESS极限可通过可靠性强化试验确定,而且通常处于工作极限之内;

6) RET极限:RET试验过程中施加的最大应力.RET显然不会超过破坏极限.

图1 产品的各种应力极限的定义

各种应力极限中,工作极限应力最受关注,因为一旦超出这一极限,产品就不能正常工作.对于研制阶段的产品,工作极限与破坏极限之间一般都有较大距离,RET主要通过提高工作极限缩短这段距离,最终达到提高产品可靠性的目的.

1.2 可靠性强化试验过程

RET采用步进应力方式给产品施加应力,施加的应力包括三轴六自由度振动、温度、湿度和电应力,或者是它们的组合[4].图2是典型步进应力试验示意图.

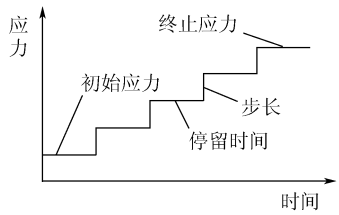


图2 典型步进应力试验示意图

图2中的应力可以是振动应力、温度应力等或其组合.试验从某一初始应力(一般低于技术规范极限应力)开始,以一定的步长进行,每步停留时间从几分钟到半小时不等.试验过程中实时连续监控产品,一旦出现故障立即将试验应力降至上一量级,如果产品恢复正常,判定产品出现故障时的应力为工作极限应力;如果在上一应力量级上,产品仍然无法正常工作,则判定为破坏极限应力.试验在下述3种情况下停止:1)全部零件都失效;2)应力等级已经达到并远远超过了为验证耐用产品设计所要求的水平;3)随着以更高的应力等级引入新的失效机理,不相关失效开始出现.

对于试验过程中出现的故障,试验工程师要与设计工程师共同进行故障分析,并决定是否采取改进措施,而改进后的产品将继续进行试验.不断重复"试验—改进—试验"的过程直到产品指标(主要是工作极限应力)达到预期值.

2 依据干涉模型计算产品可靠度

2.1 运用干涉模型分析产品的失效原因

根据1.1节中工作极限应力的定义,可知产品能否正常工作取决于产品的使用环境应力和工作极限应力的关系.当产品的工作极限应力大于使用环境应力时,能够正常工作;反之则不能正常工作.设产品的工作极限应力为S,使用环境应力为E,则产品能够正常工作的条件为

$$S > E \text{ 或 } S - E > 0$$

在实际工程中,产品实际使用环境应力和产品的工作极限应力都是随机变量,将两者在同一坐标系中表示(图3),横坐标表示应力,纵坐标表示应力分布的概率密度,函数$f(S)$和$h(E)$分别表示工作极限应力和使用环境应力的概率密度.

当 S 的均值大于 E 的均值时,在图中阴影部分表示的两者的干涉区就有可能发生工作极限应力小于使用环境应力的情况,即失效的情况[5].

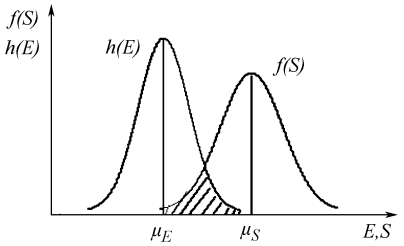


图 3　干涉模型

2.2　依据干涉模型推导可靠度的计算公式

根据可靠度的定义,产品可靠度 R 可表示为

$$R = P(S > E) = P(S - E > 0) \tag{1}$$

根据以上干涉模型计算在干涉区内 S 大于 E 的概率(可靠度). 如图 4 所示,当使用环境应力为 E_0 时,S 大于 E 的概率为

$$P(S > E_0) = \int_{E_0}^{\infty} f(S)\,\mathrm{d}S \tag{2}$$

应力 E_0 处于 $\mathrm{d}E$ 区间内的概率为

$$P\left(E_0 - \frac{\mathrm{d}E}{2} \leqslant E \leqslant E_0 + \frac{\mathrm{d}E}{2}\right) = h(E)\,\mathrm{d}E \tag{3}$$

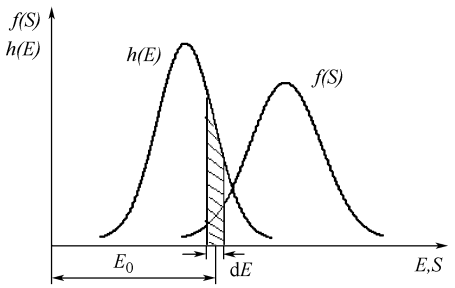


图 4　概率密度函数联合积分求可靠度

现假设($S>E_0$)与 $\left(E_0-\frac{\mathrm{d}E}{2}\leqslant E\leqslant E_0+\frac{\mathrm{d}E}{2}\right)$ 为 2 个独立事件,则 2 独立事件同时发生的概率为

$$\mathrm{d}R = h(E_0)\,\mathrm{d}E\int_{E_0}^{\infty} f(S)\,\mathrm{d}S \tag{4}$$

考虑整个应力区间的情况,S 大于 E 的概率(可靠度)为

$$R = \int \mathrm{d}R = \int_{-\infty}^{+\infty} h(E) \cdot \left[\int_{E}^{\infty} f(S)\,\mathrm{d}S\right]\mathrm{d}E \tag{5}$$

在工程实际中,产品使用环境应力和工作极限应力一般都符合正态分布,令安全余量 $Z = S-E$,则

$$R = P(S > E) = P(Z > 0) \tag{6}$$

由于 S 和 E 都符合正态分布,根据正态分布的和(差)仍为正态分布的性质,Z 也符合正态分布:

$$f(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Z}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-\mu_Z}{\sigma_Z}\right)^2} \tag{7}$$

其中　$\mu_Z = \mu_S - \mu_E$　　$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_E^2}$

可靠度为

$$R = P(Z > 0) = \int_0^{\infty} f(Z)\,\mathrm{d}Z = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Z}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-\mu_Z}{\sigma_Z}\right)^2}\mathrm{d}Z \tag{8}$$

将上式化为标准正态分布形式:

$$R = \int_0^{\infty} f(Z)\,\mathrm{d}Z = \int_{z_0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}z^2}\mathrm{d}z = 1 - \Phi(z_0) \tag{9}$$

其中

$$z = \frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z}$$

$$z_0 = -\frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = -\frac{\mu_Z - \mu_E}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_E^2}}$$

令 $\beta = -z_0 = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_S - \mu_E}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_E^2}}$ 则

$$R = \int_0^{\infty} f(Z)\,\mathrm{d}Z = \Phi(\beta) \tag{10}$$

由于受试验设备推力的限制,RET 目前一般只应用于体积和重量较小的产品,如板级和模块级产品[6],试件样本比较充分,因此可以根据试验数据估计出工作极限应力 S 分布参数:均值和方差. 另外根据对产品使用环境的分析,也可以得出使用环境应力分布参数估计值. 然后根据式(10),计算干涉区内 S 大于 E 的概率,就可以得出产品可靠度的估计值.

2.3　实例分析

某产品经分析认为其失效主要由振动应力引起,其使用环境承受振动应力大致符合 $N(20,5^2)$ 的正态分布,所以选择振动应力进行强化试验. 共 20 个样品进行试验,各样品的试验条件一致,RET 试验测得的各样品的振动工作极限应力如下(均方根值,单位:$\mathrm{m/s^2}$):26.3, 38.7, 27.1, 31.0, 34.1, 36.5, 34.5, 45.4, 44.7, 38.8, 35.6, 30.2, 32.2, 26.6, 32.8, 32.2, 45.5, 39.5, 35.4, 33.2.

可用样本均值估计总体均值:

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \frac{1}{20}\sum_{i=1}^{20} x_i = 35.0$$

用样本方差估计总体方差:

$$\hat{\sigma} = s^2 = \frac{1}{20-1}\sum_{i=1}^{20}(x_i - \bar{x})^2 = 5.8$$

结合使用环境应力分布参数,计算得

$$\hat{\beta} = \frac{35 - 20}{\sqrt{5^2 + 5.8^2}} = 1.958\ 8$$

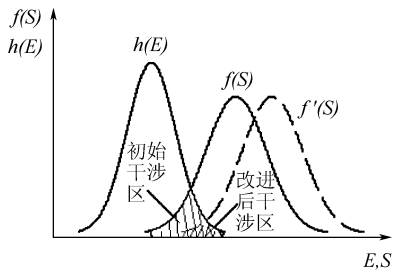
根据式(10),计算得

$$\hat{R} = \Phi(\hat{\beta}) = 0.975$$

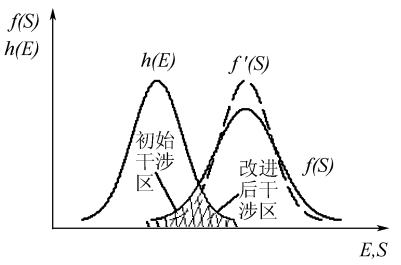
3 RET 提高产品可靠性的 2 种途径

RET 提高产品可靠性的基本的原理是:通过给产品施加高试验应力激发产品的各种缺陷,然后进行故障原因分析,采取改进措施,提高产品的工作极限应力或破坏极限应力(主要是工作极限应力),从而提高产品的可靠性.

由上述分析可知,产品发生失效的可能性与干涉模型中的干涉区面积相关,要提高产品可靠性,就要减小干涉区面积[7]. 产品的使用环境是确定的,所以要减小干涉区面积,就必须要改变产品的工作极限应力分布,具体途径有 2 条:一是将工作极限应力分布整体右移,即提高均值(图 5a);二是使工作极限应力分布变瘦,即减小方差(图 5b). 另外从推导的可靠度计算公式(式(10))可看出,要提高产品可靠性,就要提高工作极限应力的均值或者减小其方差.



a 提高 S 的均值



b 减小 S 的方差

图 5 RET 提高产品可靠性的 2 种途径

图 5 中虚线表示采取改进措施后产品工作极限应力的分布情况. 图 5a 对应提高均值的情况,图 5b 对应减小方差的情况. 在可靠性强化试验中出现的失效主要有 2 方面原因:一是产品设计;二是制造工艺. 对于设计问题,可改进设计,提高工作极限应力分布的均值;对于工艺问题,可改进工艺,提高生产制造过程的一致性水平,减小工作极限应力分布的方差.

4 结 束 语

在国外,可靠性强化试验提出后,相继在各工业部门推广应用,已取得显著效果. 但目前国内对此项技术的研究尚处于起步阶段. 本文将应力强度干涉模型引入强化试验中,根据干涉理论推导产品可靠度计算公式,将定量分析引入强化试验中,解决了强化试验无法进行定量分析的问题. 运用该模型直观、通俗地阐述了强化试验的基本原理,并分析了强化试验提高产品可靠性的 2 种途径. 这将有利于这一新技术在国内的推广和应用.

参考文献(References)

[1] 姜同敏. 可靠性强化试验[J]. 环境技术,2000(1):3~6
Jiang Tongmin. Reliability enhancement testing[J]. Environment Technology,2000(1):3~6(in Chinese)

[2] Robert W D, Edward O M. Reliability enhancement testing[A]. In: 1994 Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium[C],1994. 91~98

[3] Hobps K Gregg. Highly accelerated stress screens-HASS[A]. In: Proceedings-IES[C]. North Caroling: Inst of Environmental Sciences,1992. 3~18

[4] 陈 循,陶俊勇,张春华. 可靠性强化试验与加速寿命试验综述[J]. 国防科技大学学报,2002,24(4):29~32
Chen Xun, Tao Junyong, Zhang Chunhua. Reliability enhancement testing and accelerated life testing[J]. Journal of National University of Defense Technology,2002,24(4):29~32(in Chinese)

[5] 曾声奎,赵廷弟. 系统可靠性设计分析教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2001. 198~202
Zeng Shengkui,Zhao Tingdi. Design and analysis of system reliability[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2000. 198~202(in Chinese)

[6] Silverman M. Summary of HALT and HASS results at an accelerated reliability test center[A]. In: 1998 Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium[C], 1998. 30~36

[7] 贺国芳. 可靠性数据的收集和分析[M]. 北京:国防科学技术工业委员会,1995. 61~67
He Guofang. Gathering and analysis of the reliability data[M]. Beijing: Defense Science and Technology and Industry Committee,1995. 61~67(in Chinese)