



中华人民共和国国家标准

GB/T 34986—2017/IEC 62506:2013

产品加速试验方法

Methods for product accelerated testing

(IEC 62506:2013, IDT)

2017-11-01 发布

2018-05-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义、符号和缩略语	2
3.1 术语和定义	2
3.2 符号及缩略语	3
4 加速试验方法概述	4
4.1 累计损伤模型	4
4.2 加速试验的分类、方法及类型	6
5 加速试验模型	8
5.1 A类:定性加速试验	8
5.2 B类及C类:定量加速试验方法	13
5.3 失效机理及试验设计	16
5.4 试验应力水平、剖面及综合应力的确定和试验-应力建模	17
5.5 多应力加速方法论——B类试验	17
5.6 单应力和多应力的B类加速试验	19
5.7 定量可靠性试验的加速	27
5.8 加速可靠性验证试验或评估试验	33
5.9 加速可靠性增长试验	34
5.10 加速试验指南	34
6 产品研发阶段的加速试验策略	35
6.1 加速试验抽样方案	35
6.2 试验应力和试验时间	36
6.3 多应力条件下的元器件试验	36
6.4 组件的加速试验	36
6.5 系统的加速试验	36
6.6 试验结果分析	37
7 加速试验方法的局限性	37
附录 A (资料性附录) 高加速极限试验(HALT)	38
附录 B (资料性附录) 加速可靠性符合性试验、增长试验设计	42
附录 C (资料性附录) 高加速极限试验和传统加速试验比较	55
附录 D (资料性附录) 估算激活能 E_a	56

附录 E (资料性附录) 加速寿命试验标准程序 57

附录 F (资料性附录) 经验因子评估示例 59

附录 G (资料性附录) 通过试验直至产品失效确定加速因子 63

参考文献 66

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准使用翻译法等同采用 IEC 62506:2013《产品加速试验方法》。

与本标准中规范性引用的国际文件有一致对应关系的我国文件如下：

——GB/T 5080.1—2012 可靠性试验 第 1 部分：试验条件和统计检验原则 (IEC 60300-3-5:2001, IDT)

本标准与 IEC 62506:2013 相比,做了下列编辑性修改：

- 原文 5.2.3.1.3 中“a minimum 30 000 h per year”有误,应为“每年不低于 3 000 h”；
- 原文 5.2.3.2.1 中“as the time compression may influence the stress acceleration”有误,应为“因为事件压缩可能会影响应力加速”；
- 原文 5.5 中“式(3)是一种描述产品在多应力作用下的整体失效率的相对准确的方程”有误,应为“方程(4)是一种描述产品在多应力作用下的整体失效率的相对准确的方程”；
- 原文 5.6.3.2 中“ n_1/N_1 ”“ l_1/L_1 ”和“ α_i 在第 i 个应力水平下的停留时间”有误,应为“ n_i/N_i ”“ l_i/L_i ”和“ α_i 在第 i 个应力水平的停留时间与应用载荷下寿命的比值”；
- 原文附件 B 中式(B.22)中 S 应该为 N_s ；
- 原文附件 F 中“One in this group failed after 700 cycles and 10 after 1 000 cycles.”和“In this second test group B, 4 failed after 300 cycles, 10 after 400 cycles, and additional 5 after 500 cycles”有误,应为“试验进行到 700 循环后有一个样品失效,1 000 循环后有 3 个样品失效”和“试验进行到 300 循环后有 5 个样品失效,400 循环后有 10 个样品失效,500 循环后另外 5 个样品发生失效。”；
- 原文附件 G 图 G.1 中的“265 V”有误,应为“25 V”；图 G.2 曲线拟合方程、式(G.1)和式(G.2)有误,作了更正。

本标准由中华人民共和国工业和信息化部提出。

本标准由全国电工电子产品可靠性与维修性标准化技术委员会(SAC/TC 24)归口。

本标准起草单位：工业和信息化部电子第五研究所、芜湖赛宝信息产业技术研究院有限公司、中国工程物理研究院电子工程研究所、总参第六十研究所、中国电子科技集团公司第二十九研究所、中兴通讯公司、深圳 TCL 新技术有限公司、海信集团有限公司、重庆电力科学试验研究院、中国电子科技集团公司第二十八研究所、上海工业自动化仪表研究院、中航工业 301 所。

本标准主要起草人：王学孔、胡湘洪、李锴、程德斌、高军、李劲、谢丽梅、刘雅智、朱亮、姜年朝、李焱、尤荣贤、樊伟齐、刘风雷、纪静、张英、李佳嘉、武月琴。

引 言

现在已有多种可靠性或产品失效分析的试验方法,目前大多数试验方法都在实际生产中得到了应用。以下试验方法用于确定产品的可靠性或确定产品潜在的失效模式,且已证明是有效的可靠性试验方法:

- 定时截尾试验;
- 序贯试验;
- 可靠性增长试验;
- 失效试验等。

这些可靠性试验方法虽然非常有用,但试验时间通常较长,特别是对可靠性水平高的产品。为了缩短产品上市周期、降低产品成本,满足人们对经济高效加速试验方法的需求,加速试验方法是有效的解决方法。该方法通过提高产品试验的应力水平或者增大交变应力施加的频度而缩短试验时间,并发现和减少产品的失效模式,以便快速评估产品的可靠性水平并使其得到增长。

有两种明显不同的途径来开展可靠性工作:

- 第一种途径是通过分析和试验来证实产品在预期的工作环境条件下和寿命期内没有潜在失效模式被激活;
- 第二种途径是评估产品在预期的工作环境条件下,某一时刻后有多少个故障发生。

加速试验适用于上述两种情况,但通常差别较大。第一种途径与定性加速试验有关,其目的是发现可能导致产品现场失效的潜在故障;第二种途径与定量加速试验有关,即根据加速模拟试验结果来评估产品可靠性,加速模拟试验条件则以产品使用环境和使用剖面为基础进行确定。

加速试验可应用于产品(硬件或软件)的多个方面。不同类型的可靠性试验,如定时截尾试验、序贯试验、成功率试验、可靠性验证试验或可靠性增长/改进试验,都可以运用加速试验方法。本标准在选择常用的加速试验类型提供指导。该标准应与统计试验方案标准(如 IEC 61123、IEC 61124、IEC 61649 和 IEC 61710)一起使用。

在选择某一具体的试验方法或几个试验方法的组合前,应组织产品设计团队(包括可靠性工程师)对用于评价指定系统(产品)的各种试验方法的优缺点及它们单独的或组合的适用范围进行评审。对于每一个试验方法,还应考虑试验时间、试验结果、试验结果的可信度、对有用数据的分析、寿命周期费用影响、分析的复杂性以及其他确定的因素。

产品加速试验方法

1 范围

本标准对各种加速试验技术的应用提供指导,用于评估或提高产品的可靠性,发现并减少产品在使用过程中可能出现的潜在故障模式,是确保产品可靠性的有效方式。

加速试验方法的目的是在短时间内找出产品潜在的设计薄弱环节,提供产品的可靠性信息,实现产品必要的可靠性/可用性增长。本标准论述可修复与不可修复系统的加速试验。该方法可应用于概率比序贯试验、定时截尾试验以及可靠性增长/改进试验,这些试验测定的可靠性度量值可能与产品失效发生的标准概率值不同。

本标准也进一步介绍加速试验或产品筛选方法,该方法用于识别由制造工艺导致的可危害产品可靠性的产品缺陷、产品因制造错误而引入的可能危害其可靠性的缺陷。

2 规范性引用文件

下列文件对于文本件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

IEC 60068(所有部分) 环境试验(Environmental testing)

IEC 60300-3-1:2003 可信性管理 第3-1部分:应用指南 可靠性分析技术 方法指导(Dependability management—Part3-1: Application guide—Analysis techniques for dependability—Guide on methodology)

IEC 60300-3-5 可信性管理 第3-5部分:应用指南 可靠性试验条件和统计试验原则(Dependability management—Part 3-5: Application guide—Reliability test conditions and statistical test principles)

IEC 60605-2 设备可靠性试验 第2部分:试验周期设计(Equipment reliability testing—Part 2: Design of test cycles)

IEC 60721(所有部分) 环境条件分类(Classification of environmental conditions)

IEC 61014:2003 可靠性增长大纲(Programmes for reliability growth)

IEC 61164:2004 可靠性增长 统计试验和评估方法(Reliability growth—Statistical test and estimation methods)

IEC 61124:2012 可靠性试验 恒定失效率和恒定失效密度的可靠性验证试验(Compliance tests for constant failure rate and constant failure intensity)

IEC 61163-2 可靠性应力筛选 第2部分:电子组件(Reliability stress screening—Part2: Electronic components)

IEC 61649:2008 威布尔分析(Weibull analysis)

IEC 61709 电子元器件 可靠性 转换用故障率和应力模型的参考条件(Electronic components—Reliability—Reference conditions for failure rates and stress models for conversion)

IEC 61710 幂函数型 拟合优度检验和估计方法(Power law model—Goodness-of-fit tests and estimation methods)

IEC 62303 辐射防护仪器 空气中氚的监测用设备(Radiation protection instrumentation—

Equipment for monitoring airborne tritium)

IEC/TR 62380 可靠性数据手册 电子组件、PCBs 和设备可靠性预计通用模型(Reliability data handbook—Universal model for reliability prediction of electronics components,PCBs and equipment)

IEC 62429 可靠性增长 在特定综合系统中的早期失效压力测试(Reliability growth—Stress testing for early failures in unique complex systems)

3 术语、定义、符号和缩略语

3.1 术语和定义

IEC 60050-191 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

产品 item

能够被单独考虑的任何零件、元件、器件、功能单元、设备、分系统或系统。

注：产品可以由硬件、软件组成或两者兼而有之，特殊场合也可以包括人。

3.1.2

步进应力 step stress

步进应力试验 step stress test

按照规定的应力步长逐步地对产品增加试验应力值，直到其发生故障或达到预先确定的应力水平的试验。

注 1：“步长”指应力施加量值、持续时间或试验序列数。

注 2：该项试验不应该改变基本的失效模式、失效机理或它们的相对比率。

3.1.3

加速因子 acceleration factor

产品在预期使用应力条件下与高应力条件下的失效分布特征(或可靠性水平)的比值。

注 1：对于有加速效果的试验，其加速因子大于 1。

注 2：当假定产品符合恒定失效率的泊松分布时，加速因子指产品在使用应力下的时间与在高应力下的时间的比值。

3.1.4

高加速极限试验 highly accelerated limit test

HALT

在规定的环境应力下，用于找出产品最有可能出现的失效模式的试验或试验序列。

注：HALT 有时作为高加速寿命试验的缩写。作为非指标考核性的加速试验，它不能得到产品的寿命信息，但可以得到产品设计应力极限值的信息。

3.1.5

高加速应力试验 highly accelerated stress test

HAST

为了缩短产品的试验时间而显著地增大施加在产品上的应力量值的试验。

3.1.6

高加速应力筛选 highly accelerated stress screening

HASS

为了激发出产品因制造工艺和控制差错而引入的潜在缺陷的试验。

3.1.7

高加速应力抽查 **highly accelerated stress audit**

HASA

在一个生产批次中随机抽取一个样品开展试验以便发现产品因制造而引入的缺陷的生产过程监测方式。

3.1.8

激活能 **activation energy**

E_a

用于因评估由绝对温度改变而产生加速能力的经验系数。

注：激活能以 eV/K 为单位。

3.1.9

事件压缩 **event compression**

模拟现场的应力,提高应力施加的频度。

3.1.10

时间压缩 **time compression**

通过剔除低应力量值或无应力损伤的试验时间,达到加速的目的。

3.1.11

故障析出筛选 **precipitation screen**

将潜在缺陷变成永久故障的筛选试验方法。

3.1.12

故障检测筛选 **detection screen**

检测间歇故障的低应力量值试验。

3.2 符号及缩略语

下列符号及缩略语适用于本文件。

符号/缩略语	描 述
$R(t)$	以时间为变量的产品可靠性指标; t 时刻产品正常工作的概率 注 1: IEC 60050-191:1990,定义 191-12-01 使用通用的 $R(t_1, t_2)$ 定义,时间也可以用循环数、间隔值等。
$\lambda(t)$	以时间为变量的产品失效率 注 2: 在可靠性增长试验中,通常用于表示瞬时失效率的符号 $\lambda(t)$ 也可用于表示可变的失效强度。
HALT	高加速极限试验
HASS	高加速应力筛选试验
HAST	高加速应力试验
HASA	高加速应力抽查
$\lambda(s)$	以应力为变量的产品失效率
UUT	受试产品
A	加速度,加速因子
A_{test}	整体加速
ADT	加速退化试验
DSL	产品设计极限
RTL	可靠性试验水平

SL	技术规范规定极限
DL	破坏应力极限
LDL	破坏应力极限下限
UDL	破坏应力极限上限
OL	工作应力极限
LOL	工作应力极限下限
UOL	工作应力极限上限
SPRT	序贯概率比试验
RG	可靠性增长
URTL	可靠性试验极限上限
LRTL	可靠性试验极限下限
THB	温湿度偏差试验
TTF	失效时间
MTBF	平均故障间隔时间
MTTF	平均故障前时间
AF	加速因子
FIT	单位时间失效数
CALT	定量加速寿命试验
t_0	确定产品剩余寿命的试验开始时刻
t_L	预先确定的持续时间,比如寿命

4 加速试验方法概述

4.1 累计损伤模型

任何类型的加速试验都基于加速损伤理论。产品在其寿命周期内所经历的应力可对其造成渐进的累积损伤。这种损伤有时可能造成产品现场失效,有时则不会。

任何类型的加速试验方法都是通过增加试验应力的方式,使其对产品造成损伤,该损伤应与产品寿命期内预期应力造成的累积损伤等效。产品破坏应力极限的确定(非可靠性评估)为评估破坏应力极限与产品规范规定的应力极限之间是否有足够的裕度提供信息,因此,该试验方法为产品在其寿命期内不发生与相关应力类型有关的失效提供保证。该方法不一定能确定产品寿命概率分布,但可以对产品强度进行必要的调整,以避免此类故障在产品使用过程中的发生。这种确定产品足够的应力裕度与其寿命概率分布无关的试验是一种定性试验。而定量试验是指为确定产品生存概率的试验,试验中的应力量值与产品在超过其预期寿命内应力量值的生存概率有关。

图 1 描述了定性与定量加速试验的累积损伤原理。为了方便起见,所有的应力(工作应力极限、破坏应力极限等)都用绝对值表示。产品技术规范规定的应力值通常给出上下两个极限值,因此,有技术规范规定的上限及下限(USL 和 LSL),同样有设计上限和下限(UDL 和 LDL)、工作应力上限和下限(UOL 和 LOL)、可靠性试验上限和下限(URTL 和 LRTL)。从基本原理上讲,负应力也可能以不同的故障机理对产品产生累积损伤,因此对于在负应力作用下产品规定限值与预期限值之间关系的描述方式可参考产品在正应力作用下的描述方式。例如,低温极限可能对产品产生与高温极限相同的失效模式。为了避免混乱,在图 1 中不区分正温度应力和负温度应力或者其他正负应力,因此,应力量值无论正负,都用上限或者下限的绝对值表示。

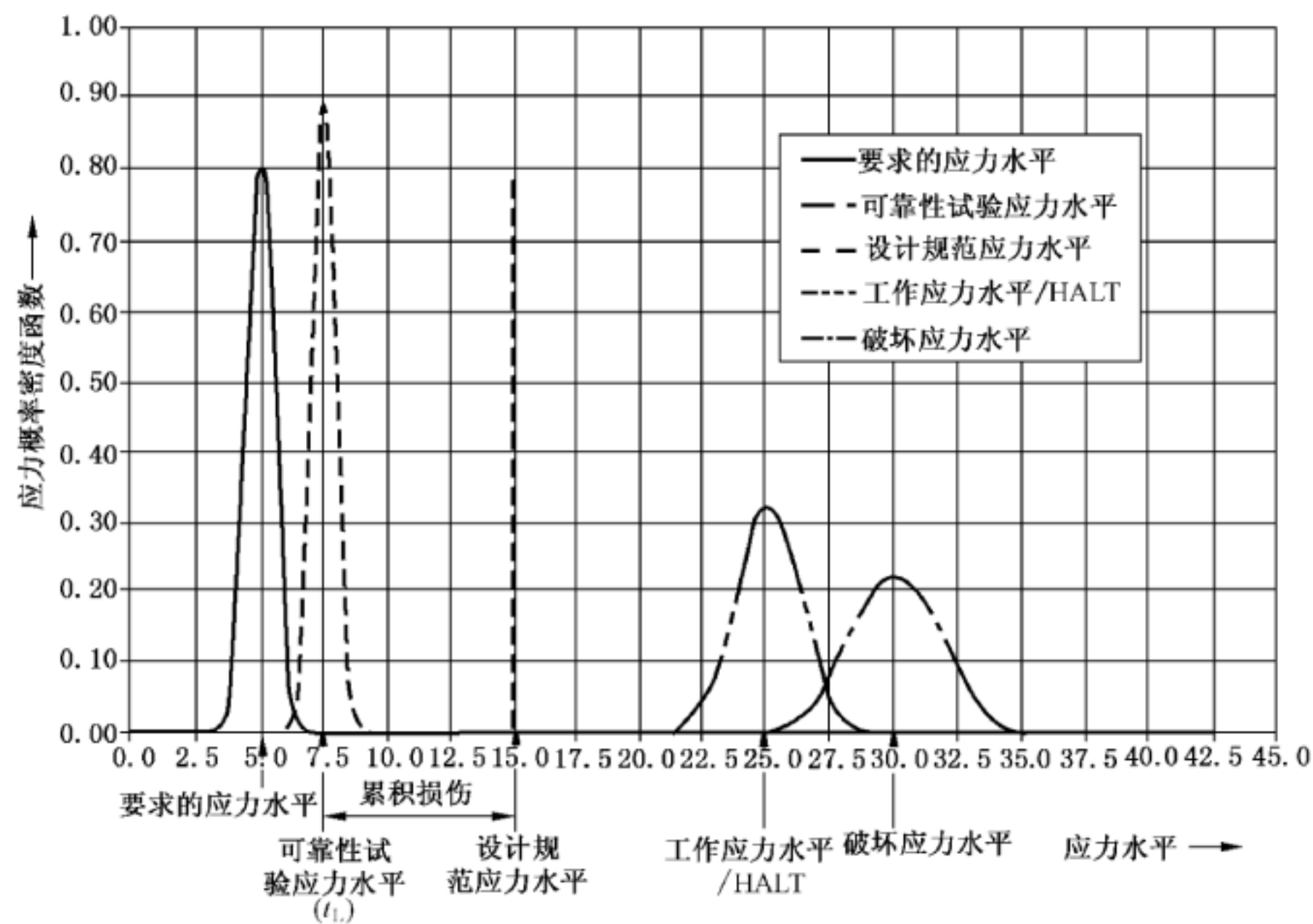


图1 累积损伤、退化的概率密度函数及试验类型

图1中的曲线表示了在产品全寿命周期内(从寿命开始时刻 t_0 到寿命终结 t_L)对应于某一应力的要求强度。试验中的产品强度和应力假设服从高斯分布。图1可做为一个概念模型,展现了不同的加速试验类型。

功能性试验是在产品需求说明书规定范围内的某一应力水平下开展的。在这个应力条件下,要求产品在整个试验过程不能发生故障。产品的设计需要验证以确保其在技术规范规定的上下应力极限内可正常工作。B类和C类加速试验(参见4.2.3、4.2.4),比如加速退化试验或累计损伤试验,可获取产品设计规范规定的应力水平与可靠性验证试验应力水平之间的间隔裕度。当产品的性能指标退化到低于其需求产品技术规定的值且这种状态定义为失效时,则产品判定为不合格。当在 t_0 时刻对产品进行测试时,若对产品施加的应力值小于等于设计规范规定的应力水平,则不应发生任何失效。

产品设计规范应考虑其寿命周期内所经受的应力累积损伤而引起的某些性能退化。为了提供必要的应力裕度,产品设计规范规定的应力极限应大于产品使用过程中要求的应力极限。当预期应力累积损伤导致产品性能退化后,可靠性试验提供了试验应力水平(剩余强度)与要求的应力水平之间的应力裕度信息。这个裕度值就是在规定的时间 t_L 内的可靠性水平值。

产品设计极限强度比设计规范规定的强度高得多,该极限强度由定性加速试验来确定。在产品寿命期内,随着产品性能退化,产品可能会暴露出一些设计缺陷,危及可靠性。定性加速试验的目的是找出产品的设计缺陷,因此,验证产品强度的定性加速试验的展开应在产品工作应力极限(OL)下。

产品的破坏应力极限(DL)大于产品的工作应力极限。在破坏应力极限作用下产品将发生永久性失效。如果产品的工作应力极限(或破坏应力极限)与其设计规范规定的应力极限接近,产品的工作应力极限或破坏应力极限分布的标准偏差大时,则定性加速试验就可以暴露产品设计的潜在薄弱环节,如图1所示。

产品的可靠性是时间的函数,一般情况下定义为寿命时间 t_L 的函数。

产品工作要求的强度与可靠性试验应力水平之间裕度(应力均值之差除以它们的标准差)的累积正态分布体现了产品的可靠性。试验应力水平及其持续时间的选择应考虑试验产生的累积损伤与产品寿命周期内因累积损伤而引起的性能退化效果相一致。确定产品要求的可靠性水平的计算值即是定量评

价值。

表 1 列出了上述试验的概述以及它们在产品寿命期内应用的分布图谱。

表 1 产品研发周期内各种试验类型分布

类型	设计	集成	确认	接收	制造	服务
A 定性	FMECA	HALT			HASS/HASA	
	成熟度建立		成熟度确认			
B&C 定量			可靠性增长 试验	可靠性鉴定 试验	可靠性验收试验	
	成熟度评估					
产品分解 结构时机	B类/C: 组件					
	A类: 元件	A类: 装配体 或子系统				
		B类/C类: 装配体	B类/C类: 系统			

表 1 为本标准的使用者提供产品整个开发周期内所开展的试验项目,目的是为了更好地理解不同试验方法在产品整个寿命周期内的运用。

4.2 加速试验的分类、方法及类型

4.2.1 概述

基于累积损伤模型、试验中获取的相关信息以及产品的使用状态假设,加速试验方法将被分成三种类型:

- A类(定性加速试验):用于发现故障模式和(或)故障现象;
- B类(定量加速试验):用于预计产品正常使用时的失效分布;
- C类(定量时间和事件压缩试验):用于预计产品正常使用时的失效分布。

注:其中B类和C类加速试验方法可以使试验时间缩短。B类加速试验需基于某一特定的失效机理,通常情况下,可应用于产品的寿命加速。针对C类加速试验方法需要在试验前对其使用方式进行研究并对其具体的使用条件进行假设,可应用于失效率加速。

4.2.2 A类:定性加速试验

A类加速试验用于发现产品潜在的设计缺陷及制造工艺导致的产品缺陷。因此,可以通过对产品施加比其工作应力极限(如图 1 所示)高得多的应力水平来找到这些缺陷。该类试验的目的不是确定产品可靠性定量指标值,而是在试验过程中激发产品全部的功能性能问题。产品在现场使用过程中,在其使用寿命期内,这些问题很可能会出现并会导致产品失效。产品设计或制造工艺的改进可以消除这些失效,制造出高质量、强耐力的产品,甚至可经受设计规范中描述的极端应力或重复应力的产品。

在产品研制过程中,使用这种试验方法在不验证可靠性指标及获取可靠性增长量的情况下,通过减少失效模式的数量和增强产品健壮性来提高其可靠性。该类试验一般在高应力水平下实施,理想情况

下,应比在设计规范规定的应力水平下更能易于发现产品的失效。该类试验的目的是确定产品的失效模式,产品设计的薄弱环节以及工作应力极限与设计应力极限(如图1所示)之间的裕度。产品规范规定的应力极限与工作应力极限之间的裕度应确保产品的缺陷可以在高加速极限试验中暴露出来,从而使产品在产品寿命周期内(t_L)不会发生失效。

4.2.3 B类:定量加速试验

B类试验是使用应力累积损伤方法确定产品预期寿命期的可靠性水平。产品预期损伤值与其使用时要求值之间的必要裕度决定了产品的可靠性水平。该类定量加速试验在比产品预期寿命短得多的时间内实现预期的累积损伤。B类加速试验使用基于具体失效机理(失效模式)确定的定量加速因子,该加速因子确定了产品在特定试验应力与其使用环境应力下所能经受的时间之间的关系。产品的失效或失效模式分布是通过收集各项加速试验的信息确定的。该试验信息为建立产品的使用寿命模型提供依据,可用于量化各种可靠性指标的加速性。在这种方式下,可通过在任何预期的应力水平下评估单个失效模式发生的概率或可靠度来评估整个产品的可靠性。如果需要使用其他试验类型(比如可靠性增长试验、可靠性验证试验)来分析数据时,已确定的加速因子可以用于重新计算加速试验中的失效次数以便表征产品在使用环境条件下的失效次数,并用于计算其可靠性。

从该类定量加速试验中获取信息的另一种方式是在特定的环境条件和失效模式下开展试验直至受试样品发生失效。这种方式可以确定合理的产品失效分布及合适的加速因子,可用于计算特定失效模式发生的概率。这些信息可用于随后的试验,包括威布尔试验(单参数威布尔,IEC 61649)。B类试验的应力水平比产品使用时要求的应力水平高,但低于加速极限试验所施加的应力水平,如图1所示。这个试验应力水平可以处于设计规范规定的应力极限与破坏应力极限之间。该类试验持续时间应足够长,以期引起的累积损伤比产品在寿命期内经受的预期应力而引起的累积损伤大并确保有一定的裕度。这个裕度可以用来确定产品在时间(t_L)内的可靠度 $R(t_L)$ 。

可以通过提高比特定使用应力(工作应力、环境应力)高的试验应力来缩短试验时间。试验应力水平产生了与产品预期寿命期内等同的累积损伤效应,但是可以很显著地缩短试验周期。

加速退化试验(ADT)是一种测试产品性能退化特性的方法,该退化特性是时间或应力循环数的函数。连续记录这种退化趋势,直至外推到产品性能参数达到不可接受的程度,即产品发生失效为止。这种方法对那些性能参数慢慢变差的失效是非常有用。在试验中施加的应力量值可以是在现场使用中遇到的正常的或者最坏情况下的工作应力极限值,或者按照本标准推荐的方法提高试验应力水平开展加速试验。

4.2.4 C类:定量时间或事件压缩试验

4.2.4.1 C类试验的应用

C类试验主要用于评估以耗损型为主要故障模式的部组件的寿命时间,比如开关、键盘、继电器、连接器或轴承等。从该类试验中获取的数据一般用威布尔分布分析,并通常以所谓“猝死测试”的形式出现(IEC 60605-2)。

C类时间压缩试验通常也用于确定:

- a) 系统集成问题(如软件与硬件集成或交互作用);
- b) 特定工作状态下的失效模式,如,任何机械或电气周期性动作历程的工作循环;
- c) 应力范围宽的特定环境条件下的失效模式,但需要确定一个阈值,目的是为了使产品经受低于阈值的应力以免对其造成显著的损伤。

对于时间压缩或事件压缩试验而言,应力水平的增加是通过延长应力施加的持续时间或频次而不是增加其应力量值来实现的。

上述每一个加速试验方法将在第 5 章进一步描述。

4.2.4.2 时间压缩试验

时间压缩试验是一种只能考虑(增加)试验持续时间的加速试验,此时试验产品应处于实际工作状态或者可出现标志性的损伤但能恢复的工作状态。这种加速试验适用于那些产品工作应力及其累积损伤明显高于其他工作模式(非工作状态或者备用状态)下的场合。为了应用上述原理,要求产品在较低的应力作用下产生的累积损伤与较高的应力作用下产生的累积损伤相差不大,这很难客观判断(详见 IEC 60605-2)。

4.2.4.3 事件压缩试验

当一种应力可是不断循环的,比如开/关循环,则这时可以通过增加应力重复频次来实现加速(即事件压缩)。这种加速试验对于无法通过增加应力量值来实现加速的情况特别有效用。在这种方式下,产品动作的次数应该与其实际使用时产生的累积损伤效果保持一致。必须注意,过高的应力重复频次不应产生在实际使用过程不会出现的故障模式。例如塑料零组件内部自加热,再次施加载荷之前振动没有减弱以及下一个信号到来之前软件序列还没有执行完成等情况。

5 加速试验模型

5.1 A 类:定性加速试验

5.1.1 高加速极限试验

5.1.1.1 概述

本标准介绍各类常用加速试验方法的优缺点和必要的应用注意事项。

A 类试验不仅仅指经典的高加速极限试验(HALT),还包括其他类型的高加速试验,例如高压试验、热冲击试验以及其它类型的定量加速试验。

图 1 中的模型描述了产品规范、设计极限以及高加速极限试验策略之间的关系。

注: 缩略语 HALT 以往被无意中译成了“高加速寿命试验”,由于 HALT 本质上是一种定性加速试验,不表征产品的寿命长短,虽然“寿命(life)”这个词意味着试验确保了 HALT 中发生的失效在受试产品的寿命中不会发生。试验其实是有效地测试了产品/单元的强度极限,因此,“极限 limit”用于缩略语 HALT 中更为合适。

当可靠性鉴定试验或可靠性增长试验被加速时,需要证明试验应力所产生的累计损伤与产品寿命期内或产品可靠性验证的预定时期内所产生的累积损伤之间的裕度。利用应力裕度的好处就是可通过应力-强度准则得到产品在预定时间内的可靠性水平。产品的强度可通过试验结果得知,而可靠性水平就是以应力-强度曲线交集以外的区域的大小来表示(两条曲线的重叠区域则代表发生失效的区域),如图 2 所示。

在图 1 中,产品的需求说明转化成了设计规范。该图进一步阐明产品设计裕度如何通过高加速极限试验得到验证的。

为了估计设计规范与受试产品之间的应力裕度,可使用 A 类试验方法通过增大试验应力直到产品发生失效的方式。这种高加速极限试验确定的裕度可以以工作应力极限(OL)和破坏应力极限(DL)的方式给出。这也表明材料特性变量 n 与生产过程中的制造工艺的裕度。

5.1.1.2 高加速极限试验的主要原理

高加速极限试验方法是通过促使产品快速失效的方式以发现并减少产品的设计薄弱环节,其目的是提升产品在现场使用过程中的健壮性。该类加速试验不是为了评估产品的可靠性,而是在现场应力

(载荷)-强度之间裕度最小的情况下消除其失效模式来提高产品的可靠性(图 2 和图 3)。该类加速试验仅仅发现产品潜在的失效模式以指导产品设计改进过程。从以往的高加速极限试验经验可知,大多数产品在其承受的应力下非常健壮的,但其内部一些组件或设计细节比其他部分明显的弱,而高加速极限试验的理念就是找出这些组件或设计细节,使其与产品其他部分一样健壮。

图 2 说明了产品强度-应力分布的交集,该图假设从不同使用条件、气候条件获得的实际应力可用应力分布模型来表示,图中的分布是正态分布。产品的强度则随着原材料和生产过程的变化而变化,可用强度模型来表示,如图 2 所示也是一个正态分布。

应力分布和强度分布的重叠区域表征了产品的失效概率。图 2 中的曲线表示了经典的设计裕度,即应力-强度准则,但在本章没有说明累计损伤模型;因此,不适用于测定产品设计最终强度的初期短时试验。同样,如果批量产品的质量控制能够保持在一个非常窄的强度分布内(这是一种费时费成本的方式),那么这两条分布曲线就不会重叠,这就意味着产品在现场不太可能出现某种特定失效模式的失效。

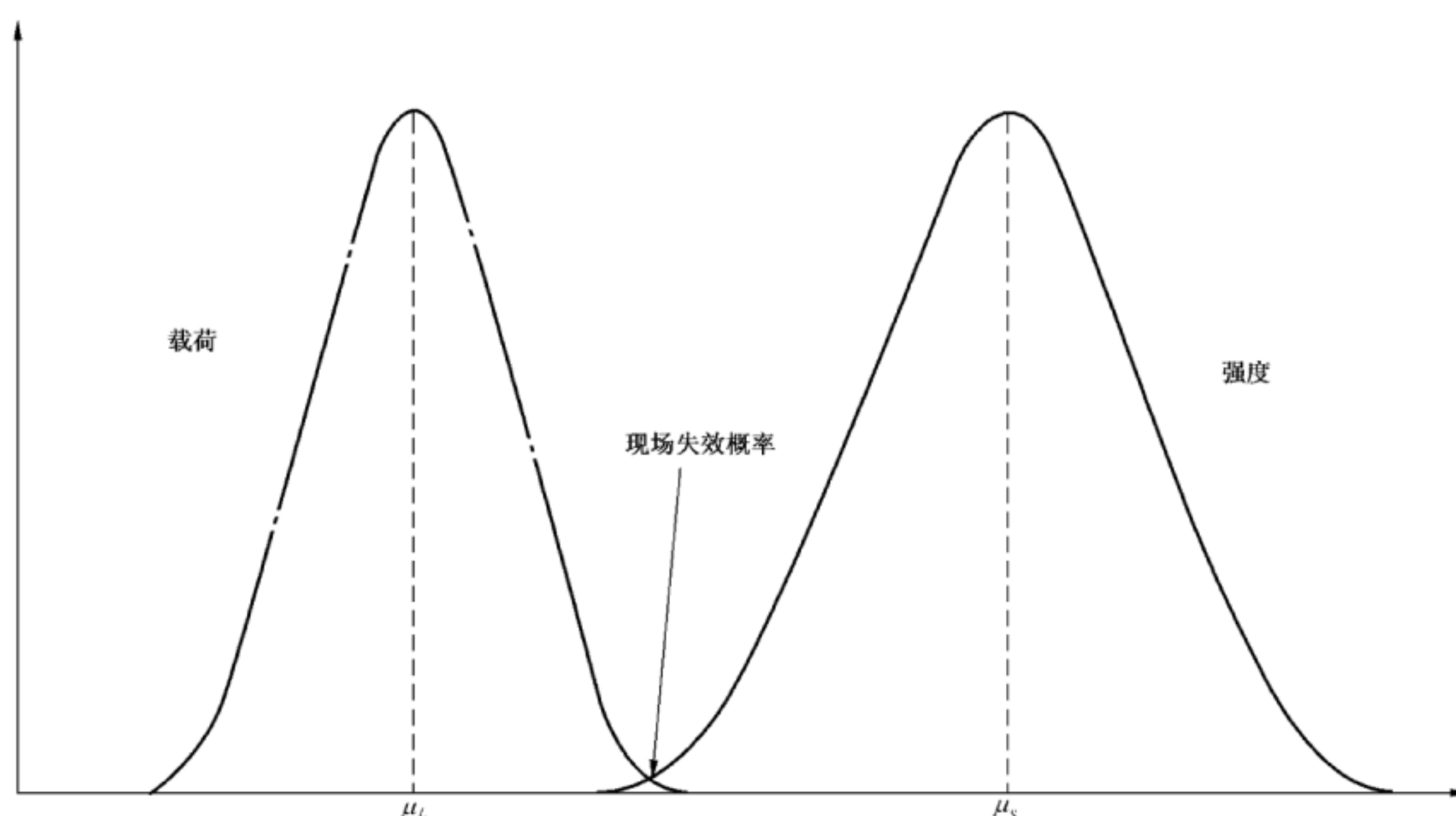


图 2 使用载荷和产品强度概率分布密度函数之间的关系

产品的生产过程,特别是受试组件初样产品的生产过程中,总是保持着严格的生产控制,但在后续产品的生产过程中,这样的方式难以保持。图 3 说明了受试样品通常都可以达到产品的平均强度甚至更高,因为它们通常是在一个投入了最大管理精力的特定原型生产线上所生产。一旦产品进入批生产,常规生产出的产品总是比初样产品的强度较弱,该原理如图 3 所示。如果精心生产的初样产品的概率分布是应力的函数,那分布曲线的左侧(即 $H1$ 的位置)则成为批生产产品所形成的新分布的均值位置。

初样产品强度分布的分散性较窄,使其远离预期的载荷分布。在这种生产方式下的所有产品将均能通过试验而不会发生失效。但在随后的大规模生产阶段,产品的强度均值会显著降低,所以产品强度分布曲线和应力分布曲线的重叠区域就会出现,这将导致生产管理状况较弱的产品在现场载荷的作用下会发生失效,这也意味着该试验不能充分发现批生产产品的潜在薄弱环节。如果试验的应力水平更高(均值接近图 3 中 $H3$ 应力水平),且产品强度分布中包括常规生产的产品,则该试验可以提供充足的裕度以确保产品薄弱单元的潜在失效能够被激发并减少。而在没有充足裕度的情况下,将会导致随后生产的产品在现场发生失效。

这就是应用步进应力和高加速极限试验的原理,以确保有合适的超过产品寿命期内预期应力的裕度。通过这种方式,这些试验所需的试验样品比传统试验所需试验样品少得多。

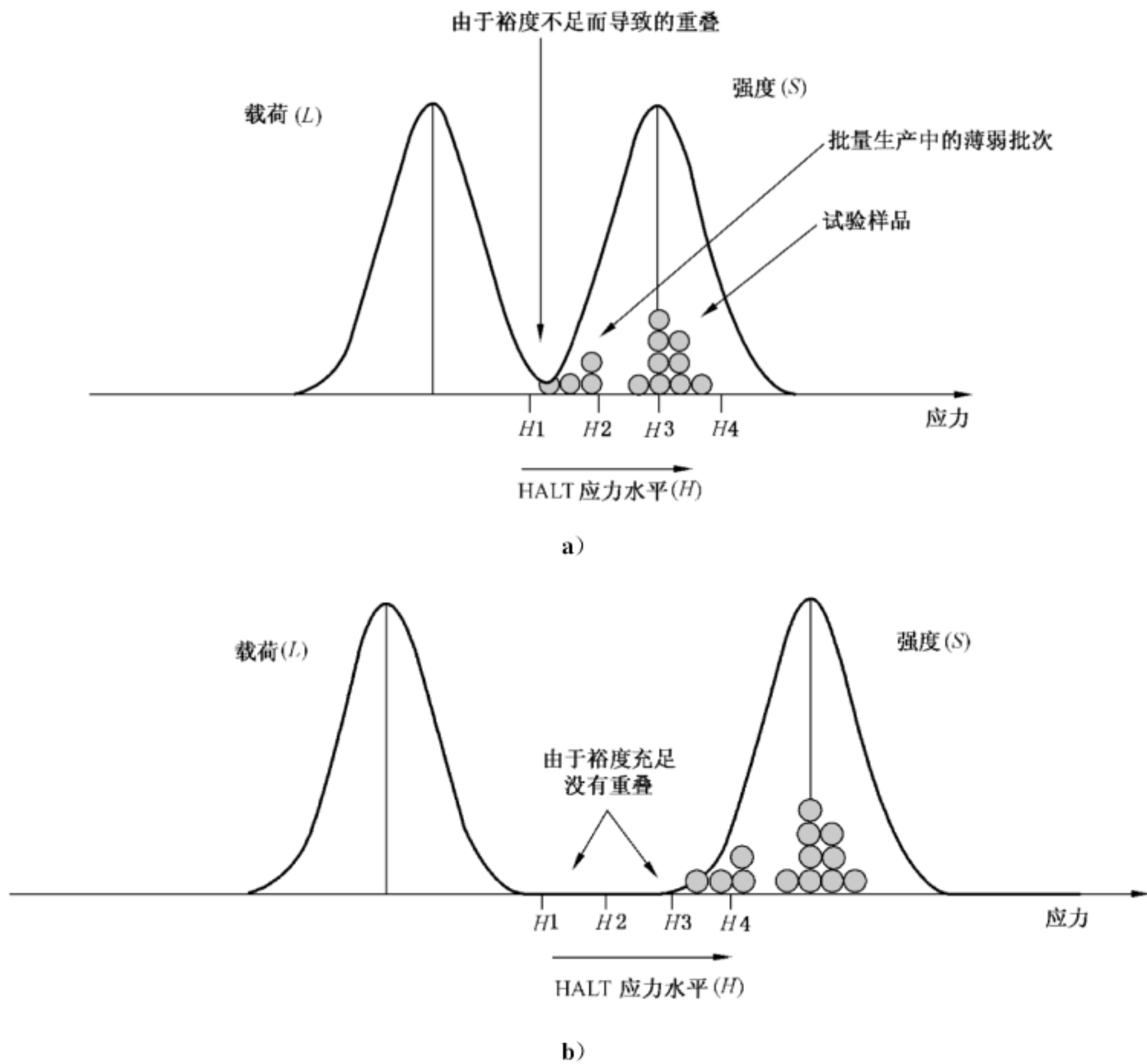


图 3 增加应力以检测批量生产中的薄弱批次并增加裕度

高加速极限试验是一种探索性质的、定性的设计改进试验,应该被接受。它可在相关的应力类型下识别产品设计中最薄弱环节的失效模式。如果这种失效模式与产品使用环境中的应力相关,则该应力水平需要根据应力与产品强度曲线之间的裕度以及因生产工艺、预期使用环境的变化而增加的额外裕度依靠工程经验来判断。高加速极限试验与传统的加速试验之间的比较见表 C.1。

随着高加速极限试验的开展,首先是最薄弱的环节失效,接着是第二、第三及其他相对薄弱环节失效,直到不再发生相关的失效模式或达到了受试产品技术极限为止。

高加速极限试验所施加的应力被设计成远远超出产品的使用环境应力和设计规范规定的应力。这种应力持续时间短,其目的就是促使产品的薄弱环节转化为失效,并在技术和经济方面都切实可行的情况下健壮产品。高加速极限试验是激发产品的失效模式,而不是确定产品的时间依赖性。

在试验过程中,必须监测受试产品的功能特性以便发现其是否存在功能缺失。如果无法对其进行连续监测,那么应在应力水平保持恒定的时刻对产品功能进行测试。典型的高加速极限试验步骤参见附录 A。

应力量值并不是高加速极限试验最关心的问题,一个有效的高加速极限试验规划真正关注的焦点在于产品改进工作和对产品失效的组织响应上。对产品持续地改进直至达到费效比平衡点为止,即产品设计的各个部分没有明显比其余部分薄弱,其目标是持续改进产品直至商业角度和费效分析技术所确定的合理水平为止。

产品的工作应力极限和破坏应力极限可在应力轴上绘制成分布曲线,如图 4 所示,有上限和下限这两种应力极限(工作极限下限 LOL、工作极限上限 UOL、破坏极限下限 LDL 及破坏极限上限 UDL)。

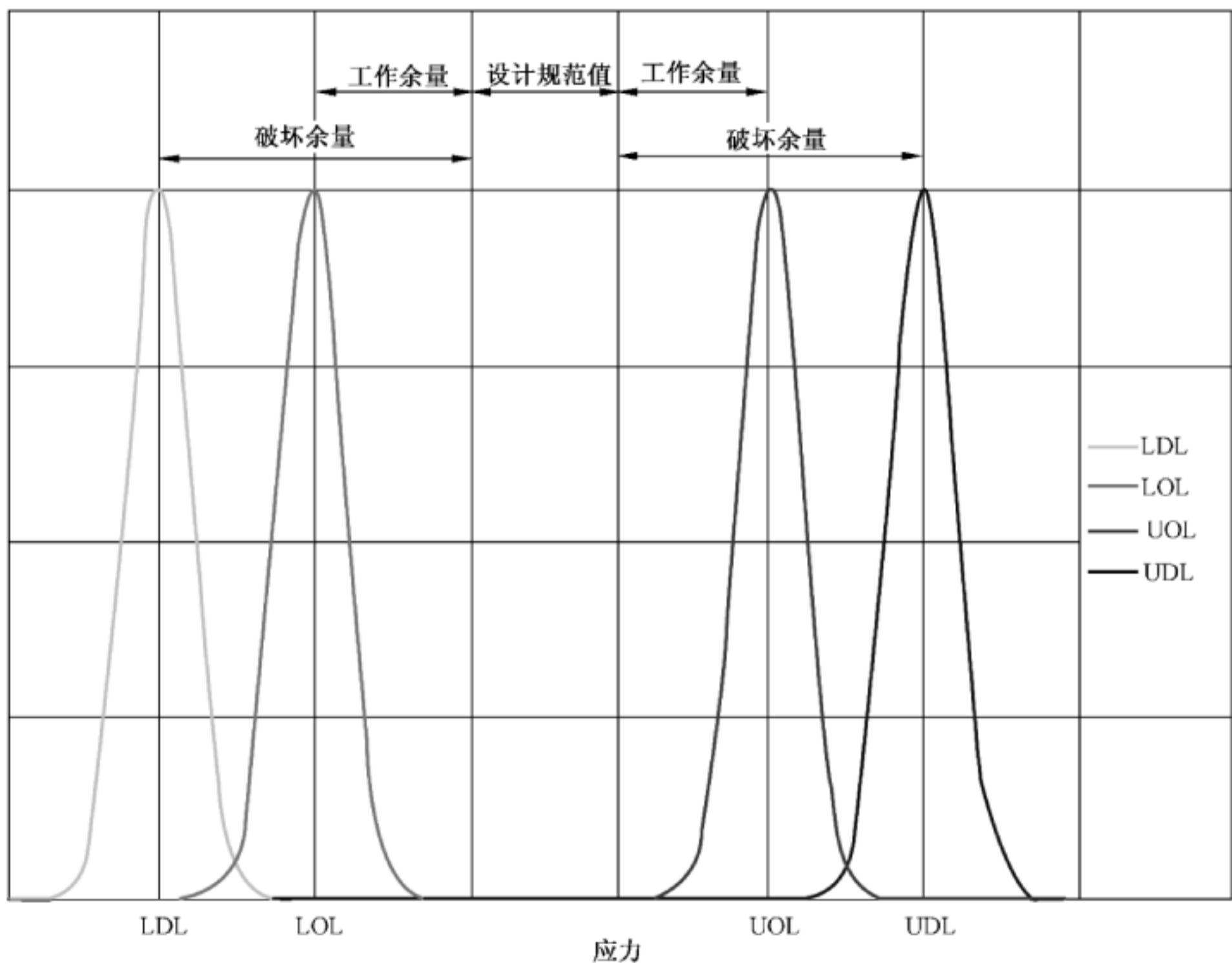


图 4 以应力概率密度函数表示的工作应力及破坏应力极限

图 4 是一个应力上下限都影响产品实例。例如温度应力,高温和低温都影响产品的性能。由于高温及低温极限与设计标称温度的距离不同,因此这些影响可能没有对称性。即使在可提供产品设计相关失效模式信息的初样品上进行试验也是如此。所有这些极限是如图 4 所示变化的分布曲线。这些分布可能具有不同标准偏差,确定开展高加速极限试验也就预示着产品有一定的应力裕度,这个裕度使最终产品适应现场各种应力的变化而不会发生失效。

除了温度应力,其他应力也可成功应用在高加速极限试验中。在其他应力类型的情况下,应力极限的下限可能不存在,如机械应力。但其他应力有可能存在,如电应力和湿度等。

5.1.1.3 应力类型及应用

在高加速极限试验中,主要的或典型的应力有:

- a) 温度;
- b) 热循环;
- c) 振动/冲击;
- d) 电压;
- e) 振动/冲击及热循环的综合应力。

在高加速极限试验中,也可应用其他特殊应力,如微处理器的时间脉冲频率、电压或电源波动、污染物或溶剂等,或上述这些特殊应力的综合应力。

通过高加速极限试验验证产品的应力裕度和对产品进行的改进有益于提高产品现场使用时的健壮性和可靠性。

附录 A 是一个典型应力水平的示例。理想状态下,可按照 5.1.1.2 所述的方式施加高加速极限试验应力直至达到预先确定的最大应力为止。最大应力可按以下几方面进行确定:

- a) 所用材料和组件的材料极限和技术极限;

b) 现有的方法和设备所能达到的最大应力。

需要注意的是,所施加的应力水平不得超过使材料的物理或化学特性可能发生变化的强度极限。

常见的是通常情况下,在受试产品中存在一些较脆弱的元器件,而这些元器件本身就不是为无法承受高加速极限试验中所施加的应力水平所设计的。因此,在可能的情况下,应在高加速极限试验过程中对这些较脆弱的元器件进行保护或在试验数据评估时将其予以剔除。例如,可对较脆弱的元器件施加冷却空气,或与冷空气隔离,或使元器件悬浮于受试产品的外部以便使其避免承受振动和冲击,甚至可将元器件移到高加速极限试验箱外并用延长的信号线将其与受试产品的其他部分相连接。

在高加速极限试验中发现的每一个失效应该进行调查并从根源上分析原因。若所发现的失效模式可能会在现场实际应用时出现(其应力水平低于高加速极限试验的水平),那么应从工程技术及产品管理的角度来决定采取相应的纠正措施。

5.1.2 高加速应力试验(HAST)

该类试验被界定为定性试验(A类)与定量试验(B类)之间过渡性质的试验。该类试验在电子元器件行业被广泛应用,因为该类试验相对于长时间的温湿度偏置试验而言是一个更有效的替代选择,如1 000 h的高压蒸煮试验。高加速应力试验所施加的应力通常包含温度和湿度,在这种环境下,芯片封装(金属导体)和薄膜电阻器中的微孔将会发生腐蚀。在试验中,组件通常需要对组件电压进行拉偏。即使这些试验无法得出可靠性评估值,它们也可作为再次质量鉴定试验中的有效手段,以确保组件的可靠性不会因组件的变化而受到影响,详见JESD22-A110^[23]。在电子组件行业中开展高加速应力试验时间通常约为100 h,而温度和湿度的应力水平通常分别为130℃和85%RH。

5.1.3 高加速应力筛选/抽查(HASS/HASA)

5.1.3.1 HASS/HASA 原理及范围

HASS/HASA并没有被分类为试验。因为它们都是使用加速应力来找出/筛选出产品的缺陷,所以被纳入在本标准中。高加速应力筛选是用显著高于预期使用或运输时的应力来对产品进行筛选,但应力水平比能显著降低产品现场寿命的应力水平要低,可基于高加速极限试验的结果确定。筛选试验可在所有的产品(100%)上或一个样品上进行。筛选的目的是为了发现产品在正常使用过程中可能出现的潜在缺陷。发现潜在缺陷后,应进行失效分析,并采取必要的纠正措施(通过专门设计的检测特定失效模式的试验进行验证),以降低故障的数量。这样,现场可靠性的提高是由于减少了现场组件制造工艺上的缺陷数量,而非产品固有可靠性的改变。

HASS/HASA中的应力水平用于缺陷析出筛选,该缺陷析出所采用的组合应力水平不应超过产品工作应力极限。该类筛选的目的,是为了激发可能导致间歇性或永久性失效的制造缺陷。为发现失效情况,建议在筛选期间监控受试产品的功能,因为受试产品的某些工作异常情况可能在后期的试验检测中无法发现,而且事先也不能确定在筛选期间间歇性功能失效何时发生。析出筛选可能结合了几种应力类型和应力水平。而在高加速极限试验中,间歇性失效可通过探测筛选法(见A.1中的第4步)进行验证。持续监测应尽可能覆盖产品所有功能,监测的覆盖率及有效性应在筛选开始前进行优化。监测过程有助于产品失效的根本原因的分析。

典型的析出筛选本身所要求的应力施加时间相对较短,约3 min至1 h,不包含试验设备和监测设备的设置时间。

高加速应力筛选试验(HASS)适用于试生产或扩大生产阶段,即适用于生产速率较低可顺利完成100%筛选的阶段。在正常的生产期间,对小批量生产的关键产品,仍可采用高加速应力筛选试验。

高加速应力抽查(HASA)是一种过程监测方法。进行这种试验时,可从生产批次中抽取样品,将之暴露于析出筛选应力下以探测可能存在的缺陷。通常情况下,高加速应力抽查(HASA)在生产批次交

付之前进行。在产品生产工艺成熟时,可用高加速应力抽查(HASA)代替高加速应力筛选试验。当生产控制达到稳定,HASA可以进一步减少甚至取消。

5.1.3.2 应力及其幅值的选择

开展试验前,应对试验应力进行选择,以保证产品的功能、材料特性、无缺陷的硬件的寿命不会受损,初始应力水平由高加速极限试验中获取的信息来确定。

因需在析出筛选过程中监测受试产品的功能,所以析出筛选的应力水平应略低于工作极限。典型的应力量值为工作应力极限减 5°C ,振动工作极限应力减 19.62 m/s^2 。在 HASS/HASA 中采取析出筛选之前,应验证析出筛选不会明显地降低产品的现场寿命,这个可以通过试验验证,比如将一个样品暴露在析出筛选应力中 10 次。

5.1.4 高加速极限试验及高加速应力筛选试验的工程应用

5.1.4.1 高加速极限试验及高加速应力筛选试验的优点

高加速极限试验及高加速应力筛选试验的优点如下:

- a) 为改进可靠性而选择性地增加并验证设计裕度;
- b) 确定特定失效模式的样品量少;
- c) 可迅速确定特定应激源及组合应力的主要失效模式(该试验持续时间一般为 3d);
- d) 可高效地权衡数据分析和确定必要的纠正措施;
- e) 快速验证纠正措施;
- f) 高效的短期生产筛选;
- g) 从总体中消除薄弱或有缺陷的组件(HASA)(质量及可靠性改进)。

5.1.4.2 高加速极限试验及高加速应力筛选试验的缺点

高加速极限试验及高加速应力筛选试验的缺点包括:

- a) 激发的失效模式一般不能在产品使用过程中观测到;
- b) 有对设计裕度过度改进的潜在可能(过设计);
- c) 不能得知试验后的可靠性;
- d) 试验结果的统计置信度有限(过高或过低估计设计裕度);
- e) 测试结果未涉及多种失效模式的耦合作用;
- f) 对于较大、较小以及具有多种脆弱性的产品不适用;
- g) 应力种类(主要是温度、振动及温度循环)数量有限;
- h) 不能评估受其他应力类型(除 HALT 试验应力类型之外)协同作用下的产品设计极限。

5.2 B类及C类:定量加速试验方法

5.2.1 定量加速试验的目的

定量加速试验的目的是为了估计一项或多项可靠性量值,例如,失效率、失效概率、可靠度、失效时间等。通常定量加速试验,是为了确定具有有限寿命(磨损)组件的使用寿命或是为了确定(量化)并提高系统及组件的可靠性,威布尔分析方法常用于该类试验(见 IEC 61649)。

5.2.2 B类定量加速试验方法的物理基础

5.2.2.1 概述

开展加速试验的目的是为了在较短的时间内评估产品的可靠性并验证产品可接受的可靠性水平。

因此,加速试验的目的是针对相关可重复应力和磨损失效机理加速其累积损伤速率(相关失效机理是指在寿命周期条件下会预期出现的失效机理)。

为了开展加速试验,有必要充分理解产品潜在的失效机理,以及产品或系统的工作应力及环境应力,也可通过对产品在预期的使用剖面下的失效模式分析来实现,例如 FMEA。随后采取的有效措施不仅可防止产品在预期寿命或使用应力下过早出现失效,还可使之在加速试验过程中得到有效地激发,进而对产品实施改进。加速的磨损或可靠性试验被公认为是对具有高可靠性水平的电子、机电及机械系统进行可靠性评估的有效手段。通常增加试验应力的目的有:

- a) 通过系统的步进应力试验,促使设计更加健壮,并改进生产工艺,通过采取纠正措施增加应力裕度(可靠性增长试验);
- b) 在试验室中进行加速寿命试验,以测量并证实使用过程中的可靠性。

加速程度,通常定义为加速因子(AF 或 A),指产品使用条件下的寿命与加速试验条件下的寿命之间的比率。这种具有一定置信度的加速因子,是定量推测产品从加速环境到使用环境的可靠性量值(例如,失效时间及失效率)所必需的。加速因子取决于受试产品的硬件参数(例如,材料特性、产品组成)、使用应力条件、加速试验应力条件以及相关失效机理。因此,受试产品中的每种相关失效模式(假设都是由一个失效机理引起的)均具有各自的加速因子,而试验条件(例如工作循环、应力水平、各应力施加时间、试验持续时间)则应根据这些加速因子进行剪裁。

失效物理意味着应对各种失效模式进行单独描述,对寿命裕度和可靠性裕度应分别进行验证。在某些情况下,还应对结果进行定性分析。通过这样的分析方式,各种失效模式就均有相应的失效分布和失效率。而在其他情况下,则是将分析结果整合在一起来评估整个产品的可靠性。

规划一个试验前,应先列出产品的潜在失效模式,然后计划试验的应力水平和持续时间,以便及时观察到产品的失效模式。为了该项试验计划,从历史产品、供应商、各种文献等途径得到的经验系数都可用于估算试验的加速因子。试验结束后,就可知道产品实际的失效模式,就可单独分析试验出现的每个失效模式。建议使用可以评估出产品经验加速因子的试验方法。详见附件 F 和附录 G。

通过增加诸如温度载荷(温度、温度循环、温度变化速度)、化学性质载荷(湿度、腐蚀性化学物质(酸、盐))、电气载荷(恒定或瞬间电压、电流、电源),机械载荷(准静态循环机械变形、振动、冲击、脉冲、撞击)等各种不同载荷的应力水平的方式来进行 B 类试验,加速环境包括上述所有载荷的组合。对组合应力试验结果的解释以及对寿命循环条件下的试验结果的外推,需要从不同应力的耦合作用以及各个应力对产品整个损伤的贡献大小这两个方面进行定量考虑。

5.2.2.2 B 类试验的优点

加速应力试验可对受试产品的可靠性提供定量信息:

- a) 该类试验可以用于:
 - 1) 在合理置信度下,评估特定的失效模式(来自于 FMEA)对产品整体可靠性的影响;
 - 2) 利用组合应力模拟各应力的耦合作用,并评估产品的实际可靠性。
- b) 有效地开展加速试验,可反映产品使用中的累积损伤。

5.2.2.3 B 类试验的缺点

B 类试验的缺点包括:

- a) 存在这样一种风险,即:应力加速可能超过所用材料的物理特性,并引起不可预见的破坏;
- b) 存在这样一种风险,即:组合应力的加速可能对产品造成额外的、不可预见的、在现场不可能出现的损伤;
- c) 当量化试验结果时需要考虑到:加速试验的基线不是单一应力而是依据使用者和使用环境而改变的多种应力的组合。

5.2.3 C类试验:时间(C1)和事件(C2)压缩

5.2.3.1 C1类试验

5.2.3.1.1 概述

通过增加“开机时间”和减少“停止时间”(例如,非工作时间)来压缩工作循环的方式实现时间压缩。此外,若将产品暴露于较宽的应力范围下,那么最大的应力(主应力)将会引起最大的损坏,与主应力相比,产品的某些使用应力对产品产生的损坏可忽略不计,则可假定产品暴露在低于指定损伤应力阈值的应力下所产生的损伤可忽略不计,就可从试验计划中剔除。机械疲劳更是如此,常用这样的方式进行结构疲劳的加速试验(见 IEC 60605-2)。

举例说明工作循环的压缩,当产品的试验持续时间为 24 h/d,然而其在实际使用环境中,产品每天仅工作 8 h,那么此时的时间压缩因子则为 3,所以每天的试验时间相当于 3 d 的实际使用时间。

5.2.3.1.2 时间压缩试验的优点

与日历时间相比,具有较小的或短的工作时间的产品,可在一个相对于使用期限较为合理的试验时间内完成试验(例如办公设备,汽车,收割机械等)。例如,吹雪机仅在一年中的冬季使用,且还要有一定的积雪量,即使使用,开机的平均时间只有 2 h~3 h,工作时有振动、电机应力、叶片磨损等几种主要的损伤应力。而在一年中的其他时间,该吹雪机则被闲置起来,且对其进行保护使其不受重大环境的影响。因此,要求寿命为 10 年的吹雪机,每年 3 个月中每个月使用 4 次,每次使用时间持续 2 h,那么其要求的使用时间则为 240 h。所以,进行一次约 300 h 的试验即可保证适当裕度,证明吹雪机的可靠性。

对于施加标称应力且试验时间相对较短的试验,无须增加应力。因此,无需确定试验的加速因子,否则会有对受试产品施加过应力的风险。

5.2.3.1.3 时间压缩试验的缺点

专注于产品的工作时间,意味着只考虑与工作环境相关的失效模式,而在“非工作”环境中出现的失效模式可能会被忽略不计。这些失效模式对产品的应力可能比产品在使用过程中所受的应力小很多,但施加的时间相当长,使其产生的累积损伤与产品使用应力所引起的相当或者更大,所以对产品造成的损害可能更加严重。

同样以吹雪机为例,在十年的时间的 87 600 h 内,其中约 20 000 h,吹雪机暴露于极低温度下,存在会导致材料脆变的故障模式;而暴露于极高温度的时间约为 6 000 h,会导致塑料组件、油漆、胶水等的老化;温度循环约 7 200 次时,会引起多个结构损坏;若每年的受潮期不低于 3 000 h,则会引起腐蚀。若仅在工作环境条件下进行试验,则忽略了这些非工作环境的影响。

对于工作时间小于停机时间的产品,有必要将工作期间与停机期间的加速试验结合起来进行,例如,腐蚀试验、湿度试验等。在某些情况下,在时间压缩试验之前,可施加停机期间的应力对产品进行预处理,例如,湿度、冷贮藏、太阳辐射、机械载荷(振动等),以模拟那些非工作环境条件。进行预处理的目的是模拟使用过程中的失效模式与贮藏状态下的预期失效模式(反过来对使用中的失效模式产生影响)之间的相互关系。例如,吹雪机的腐蚀可能会对产品结构的振动产生极大影响。

5.2.3.2 C2类试验

5.2.3.2.1 概述

事件压缩试验是指以高于产品实际使用时的频次对事件进行重复应用。例如,对上述单元(吹雪

机)的开/关循环,可通过重复进行开/关循环而将其压缩成几小时的试验,因此,对吹雪机十年寿命期内具有充分裕度的 120 次开/关循环的可靠性验证,就可在非常短的试验时间内完成。

C2 类试验可与时间压缩试验同时进行以实现更进一步地加速,这可能使“高可靠性”的试验验证时间很短,但在实施综合加速试验时,需要事先采取预防措施。例如,重复应力的快速施加可能以改变累积损伤的方式影响了试验结果。

事件压缩试验也可与应力加速试验结合起来进一步缩短试验时间。在准备这些试验时,必须格外谨慎,因为事件压缩可能会影响应力加速。例如,短时间内的快速开/关循环使受试产品无法适当地冷却,这可能会导致受试产品额外的热加速和失效发生。另外,此类加速,可能会忽视因非使用造成的失效,例如,材料退化等。

5.2.3.2.2 C2 类试验优点

C2 试验的优点是在短时间内增加应力的重复频次,可在与正常使用相比短得多的时间内,复现对产品所造成的累积损伤。

5.2.3.2.3 C2 类试验缺点

在此类试验中,因施加连续的应力,对产品产生一些负面影响,激发出常规使用不会出现的失效。例如,对于由于使用中的摩擦而产生磨损的机械零件,持续地摩擦会产生热量,进而激发出正常情况下会因冷却效应而延迟发生的失效。又例如,由于应力连续重复而未留出使材料恢复原状的时间可能会引起金属疲劳。

5.3 失效机理及试验设计

应重点强调正确失效分析的重要性。理解失效机理是成功设计和执行加速寿命试验或其他试验的必要前提,正如可靠性设计和预计方法(假设使用失效物理学方法完成预计)是以“失效物理学”为基础一样。为实现这一目的,一种合理的方法是利用科学的加速转换,使加速试验的结果与使用条件下的可靠度或失效率产生定量联系。应以相关失效模式物理学为基础,定量地确定在加速试验中实现的试验时间压缩量。加速寿命试验试图减少观察到失效所需的时间,在某些情况下,可以不用改变瞬时失效率的方程式,而达到此目的。但是,如果风险函数发生变化,将其定义为“比例风险模型”。从数学的角度来说,这二者之间的差异,可以在威布尔分布涉及的两个方程式中看出。在威布尔分布中, $H_{AL}(t)$ 是加速寿命的累积风险函数,而 $H_{PH}(t)$ 则是比例风险模型的累积风险函数; AF 是某些激发因素导致的加速因子,且 $(t/\eta)^\beta$ 是威布尔分布中未改变的累积风险(其中: t 指时间; η 指特征寿命, β 指形状参数)。

$$H_{AL}(t) = \left(\frac{AF \times t}{\eta} \right)^\beta \dots\dots\dots (1)$$

$$H_{PH}(t) = AF \times \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \dots\dots\dots (2)$$

$H_{AL}(t)$ 中,时间和加速因子是线性关系; $H_{PH}(t)$ 则是修改后的危险函数。重列 $H_{PH}(t)$ 的方程式,可以看出时间与 AF 是非线性关系。这两类加速试验的差异是 $H_{AL}(t)$ 要求知道试验时间与实际环境条件的日历时间(非加速时间)之间的比值,而 $H_{PH}(t)$ 要求知道 AF 作为参数 β 函数的变化规律。对于威布尔分布(指数分布为此类分布的特例)而言,两种试验条件中任何一种均还是威布尔分布。

式(1)通常是在通过增加重复应力的频次来完成加速时使用,如工作循环。式(2)则是受试产品处于物理加速时的首选,如热加速(布朗运动),而加速因子本身,则取决于分布状态。

总结上述原理可知,应力加速是通过增加应力水平使之超出正常使用中预期的应力水平,而减少了失效时间。

5.4 试验应力水平、剖面及综合应力的确定和试验-应力建模

5.4.1 概述

基于失效物理学去理解产生失效模式的工作应力和环境应力,同样重要。自加速发生起,这种应力模型就可作为一项基准点。在应力根据产品用途发生变化时,该如何处理这种基线就显得相当重要。

5.4.2 步骤

按照以下步骤进行:

- 从包括贮藏和运输在内的现场环境中确定相关应力因素(见 IEC 60721 系列);
 - 确定哪类应力必须进行加速,哪类应力是标称应力,哪类应力可忽略不计等;因为这些应力可能包含在其他试验内;
 - 确定是否同时施加应力,以将应力的相互作用包含在内,或是否有序地施加应力,例如,在一个试验周期内按顺序施加(见 IEC 60605-2);
 - 确定是否可以通过试验预计加速因子(A),或依据相关的加速方程式及相应的经验系数预计加速因子;
 - 确定样品数量(见 IEC 61649, IEC 61123 及 IEC 61124);
 - 进行试验(见 IEC 60300-3-5);
 - 进行失效分析;
 - 分析试验—各失效模式分别进行(见 IEC 61649, IEC 61710 及 IEC 61124)。
- 报告试验结果(见 IEC 60300-3-5)。

5.5 多应力加速方法论——B 类试验

在产品或零部件的寿命(可靠性)受两种或更多应力影响的情况下,可利用与这些应力相匹配的模型,通过增加各单一的应力来完成试验加速。在这些情况下,每个失效机理的失效率对产品各自加速,总体的可靠性(R)或失效概率(F)必须予以分别评估。这种情况一般可通过以下方程式表示,即:

$$R = \prod_{i=1}^{N_S} R_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

R_i ——单独应力作用下应力 i 对受试产品的可靠性的影响;

R ——受试产品的可靠性;

N_S ——代表独立应力的个数。

竞争风险的具体情况,见 IEC 61649:2008 附录 G。

若所有组件和产品的失效时间可用指数分布模型进行表示,则可简化为以下形式,即:

$$\lambda_{Item}(Stress) = \lambda_U + \sum_{i=1}^{N_S} \lambda(Stress_i) \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

λ_U ——未知的失效率。

若服从威布尔分布模型,且所有失效模式分布具有相同的形状参数,那么在复合应力作用下的特征寿命如下:

$$\frac{1}{\eta_{Item}^\beta(Stress)} = \frac{1}{\eta_U^\beta} + \sum_{i=1}^{N_S} \frac{1}{\eta_i^\beta(Stress_i)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

- β ——威布尔分布的形状参数;
- η_{Item} ——多种应力复合条件下的产品特征寿命;
- η_U ——基本特征寿命;
- η_i ——单一应力条件下的特征寿命。

若形状参数不同,最终分布状态可能与威布尔分布不同,而且其间关系的复杂程度,已超出了本标准的所述范围。

值得注意的是,威布尔原理仅在加速单一失效模式时才可以使用,因为失效时间具有其独立性;威布尔模型不适用于不同失效模式的混合形式。即便在同一个组件上,不同失效模式下的失效时间也不具有相关性。

式(4)是一种描述产品在多应力作用下的整体失效率的相对准确的方程。该方程式假设零部件失效率为两部分之和,一个是与零件固有缺陷有关的未知失效模式的失效率,还有一个是对特定应力敏感且受其加速影响的失效模式的失效率。而表示单一应力的失效率则可通过单一应力的试验进行确定,这样单一应力加速就可用于与这些单一应力相关的失效模式。

若每种类型的应力可加速多种失效模式,那么加速因子将会分别影响每种失效模式。在假设服从指数分布的情况下,对组件及系统的多重失效模式进行试验。产品的加速失效率为:

$$A \times \lambda_{Item} = \lambda_U + \sum_{i=1}^{N_S} A_i \times \lambda_{Item}(Stress_i) \quad \dots\dots\dots (6)$$

降低 λ_U , 所有失效模式的发生概率都小。需要注意的是:当有多种应力可加速同一失效模式时,等式(6)变为等式(7):

$$\lambda_A = A_{Test} \times \lambda_0 = \sum_{i=1}^{N_S} \left(\left(\prod_k A_k \right)_i \times \lambda_i \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

- λ_0 ——产品在使用条件下的失效率;
- λ_A ——加速试验,失效率;
- A_i ——试验中各增加应力的加速因子;
- $(\prod_k A_k)_i$ ——在应力 i 作用下的 k 个失效模式的加速因子的乘积;
- λ_i ——产品在特定应力下的相应失效率;
- N_S ——应力数量;
- A_{Test} ——将产品在使用条件下的失效率转换成加速试验下失效率的加速因子。

$$A_{Test} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} \left(A \left(\prod_k A_k \right)_i \times \lambda_i \right)}{\lambda_0} \quad \dots\dots\dots (8)$$

若失效率 λ_i 以在特定时间 t_0 内的可靠度 $R_i(t_0)$ 来表示,则可写成:

$$A_{Test} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} \left(A \left(\prod_k A_k \right)_i \times \left[-\frac{\ln(R_i(t_0))}{t_0} \right] \right)}{\lambda_0} \quad \dots\dots\dots (9)$$

若所有的应力影响所有的失效模式,将所有加速因子(A_i)连乘,即可得到多重复合环境应力修正基本失效率的便捷方法:

$$\lambda_{Item}(Stress) = \lambda_U \times \prod_{i=1}^{N_S} A_i \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(10)在工业界得到了广泛应用,其假设各施加的应力均能对基本失效率进行加速,且后一应力对前一应力加速后的总失效率进行加速,依此类推。这种简易的方法却可能导致对多应力的影响估计过

高,这是因为失效机理不同,有些失效率并不会被所有的应力加速。

对加速过高估计的结果,实际是对失效概率的过高估计,或使试验时间短得不合理且不充分。

计算实际试验加速的最佳方式,是调查清楚有哪些应力会相互协同地对同一失效模式产生影响。

5.6 单应力和多应力的 B 类加速试验

5.6.1 单应力加速方法

单应力加速试验中采用单一应力开展试验。该试验的模型为寿命应力模型,试验中单位时间内造成的损伤是通过增加应力的水平来加速的。

三种最常使用的模型如下:

- a) 逆幂律模型,当试验中存在除恒温应力的其他应力时(如电应力、机械应力、化学应力(腐蚀)及其他应力类型),可应用该模型;
- b) 阿伦尼斯反应率模型,用于恒定温度应力,该模型基于温度对失效机理的影响作用;
- c) 艾林模型,当加速应力为温度和湿度共同作用时采用,这种模式主要是从量子力学演化而来。

对于所有的加速模型,可通过已建立的解析模型对试验数据进行分析,进而确定加速寿命的特征参数。利用加速因子,可以确定实际使用环境等效的特征参数,并用于所需的可靠性设计。如果可能,加速模型可通过将试验数据绘图来进行验证。

5.6.1.1 逆幂律

逆幂律适用于:

- a) 动态应力,例如,冲击(脉冲型)和振动(正弦及随机);
- b) 气候应力,例如,温度循环、温度变化(温度冲击及热循环)、湿度、太阳辐射,及其他存在累积损伤的气候应力。

逆幂律模型很容易理解和使用,对各种失效分布具有很好的适应性。图估法(最直观)是最常用的解算方法。其参数也可使用极大似然估计的方法来确定^[10]。

在逆幂律模型中与时间相关的产品可靠性特征参数(如特征寿命、平均寿命、平均故障前时间等)可以表示如下:

$$L(S) = C^{-1} \times S^{-m} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中:

S ——应力大小;

C ——待定常数($C > 0$);

m ——与应力相关的待定参数;

$L(S)$ ——寿命或规定的时间周期(为应力的函数)。

当逆幂率模型转化为对数形式时,模型简化为一条以 m 为斜率、 C 为 Y 轴截距的直线,如下式所示:

$$\ln [L(S)] = -m \times \ln(S) - \ln(C) \quad \dots\dots\dots (12)$$

逆幂律适用于在可靠性中常用的所有分布类型。

试验加速因子为:

$$A_{(S_{IPL})} = \frac{L(S_{Use})}{L(S_{Test})} = \frac{C^{-1} \times S_{Use}^{-m}}{C^{-1} \times S_{Test}^{-m}} = \left(\frac{S_{Test}}{S_{Use}} \right)^m \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中:

$A_{S_{IPL}}$ ——逆幂律中的应力加速;

$L(S_{Use})$ ——实际寿命(与实际使用应力相关的函数);

$L(S_{Test})$ ——加速寿命(与试验应力相关的函数)。

在上述方程式中,下标“Test”和“Use”分别表示加速试验的条件和非加速的使用条件。

上式中约掉了加速试验中的参数 C ,但是需要根据产品及应力类型确定参数 m 值。

如该值不容易得到,则可以通过在不同应力水平下对相同元器件或产品进行试验来确定参数 m 的数值(详见附录 F)。通过对试验数据进行分析,以确定分布类型及分布参数。将与寿命相对应的分布参数绘制对数坐标图中,直线的斜率即为参数 m 的数值,而截距的负值则为常数 C 的值。

这个看起来相对简单的过程,在处理比单一元器件复杂的多的对象时会带来冗长的试验时间和巨大的样本量需求,使得该过程变得异常单调和枯燥。然而,采用不严谨的方式估计得到的加速因子可能会导致加速试验的设计出现较大的偏差。

在外推超出试验点的应力-寿命曲线时,由于特定失效模式的实际应力-寿命曲线的斜率可能偏低,故预测出的应力寿命曲线可能是一个偏保守的寿命估计值。

逆幂律通常适用于热冲击、电应力、机械应力(静态应力/动态应力)及湿度应力试验中。

使用特定应力对产品进行加速寿命试验时,应对失效进行充分的理解,并把相同的失效模式进行分组归类,以确保施加的应力保证相同的失效机理(确保失效机理不变性)。例如,对于以镍为电极的铁片陶瓷电容器的加速试验,随着电压的增加,可能会导致两种不同的失效机理,即:电介质击穿和氧空位迁移。这两种失效机理都会缩短陶瓷电容器的寿命且可能会导致同一种失效模式的发生,如果没有对此失效进行分析,就无法区分这两种失效机理。以上两种失效机理可以用双参数威布尔分布来表示(详见 IEC 61649)。

各种分布参数的置信度、寿命函数及可靠性可采用适宜的统计方法进行确定。详见 IEC 61649 中的示例。需要特别注意的是,由于样本量较小,在运用应力-寿命曲线进行统计分析时可能会导致外推的应力-寿命曲线不正确。

5.6.1.1.1 逆幂律模型的优点

逆幂律模型最大的优点在于假定各种失效模式容易区分时,模型简单化和参数确定的容易性。另一优点是它在工程中已经得到广泛的应用,其特征参数的值很容易在各种文献中找到。

5.6.1.1.2 逆幂律模型的缺点

逆幂率模型也存在一些不足:

- a) 模型过于简单,从不同分布中拟合与寿命有关的参数时容易出现错误;
- b) 由于时间及成本的限制,一般很难确定逆幂律参数,因此实际使用中常会选用通用的平均值,从而造成试验的误差;
- c) 对于寿命试验,为确保统计需要,各个应力水平下需要达到较大数量的失效样品。部件在较低应力下的试验时间较长,对可靠性较高的产品也是如此。所以逆幂律模型需要的样品量可能比较大,耗费的时间也比较长。

借用相似产品的参数 m 的假定值时需要特别谨慎。

5.6.1.2 阿伦尼斯模型

阿伦尼斯模型中,反应速率是器件类型、失效模式和绝对温度 T 的函数。该模型假设反应速率是绝对温度的指数函数。

反应率可用下式表示:

$$\rho(T) = K \times e^{-\frac{E_a}{k_B \times T}} \dots\dots\dots (14)$$

式中:

K —— 常量(与温度无关);

E_a —— 激活能,单位为电子伏特(eV);

k_B —— 波尔兹曼常数($8.617\ 385 \times 10^{-5}$ eV/K);

T —— 绝对温度,单位为开尔文(K);

$\rho(T)$ —— 反应速率,是绝对温度的函数。

可靠寿命可表示为温度的函数,即:

$$LT = C \times e^{\frac{D}{T}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

将上式两边取对数得到直线表达式:

$$\ln[L(T)] = \frac{D}{T} + \ln(C) \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中:

T —— 绝对温度,单位为开尔文(K);

D —— 直线的斜率 $\left(= -\frac{E_a}{k_B} \right)$;

$\ln(C)$ —— 直线在 Y 轴上的截距。

加速因子是两种不同试验环境下的反应速率之比:

$$A = \frac{\rho(T)}{\rho(T_0)} = \frac{K \times e^{-\frac{E_a}{k_B \times T}}}{K \times e^{-\frac{E_a}{k_B \times T_0}}} = e^{\left[\frac{E_a}{k_B} \times \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad \dots\dots\dots (17)$$

失效率是绝对温度 T 的函数,见下式:

$$\lambda(T) = C \times e^{-\frac{E_a}{k_B \times T}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

给定绝对温度 T_0 下的失效率 λ_0

$$\lambda_0(T_0) = C \times e^{-\frac{E_a}{k_B \times T_0}} \quad \dots\dots\dots (19)$$

式(18)和式(19)相除可以得到以下关系:

$$\lambda(T) = \lambda_0(T_0) \times e^{\left[\frac{E_a}{k_B} \times \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中:

T_0 和 T —— 分别是使用环境和试验环境下的绝对温度。

一个使用阿伦尼斯模型的例子是,在 25 °C (298 K) 时的失效率为 1×10^{-8} /h, 确定试验中的失效率 λ , 该失效率是绝对温度 T 的函数, 如图 5 所示。

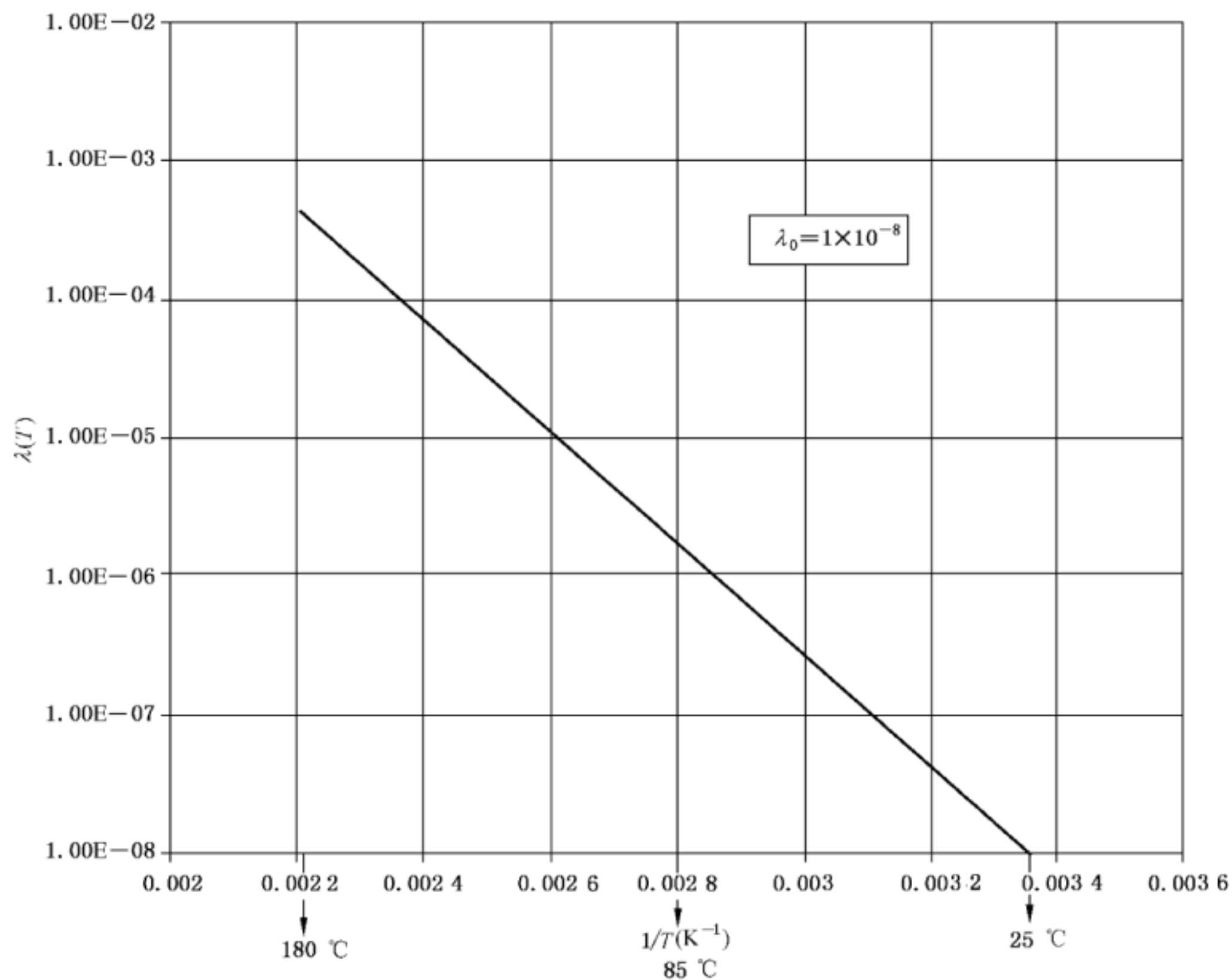


图 5 阿伦尼斯反应模型的线形图

在运用阿伦尼斯模型时应该获得参数 E_a (激活能) 的值。可按附录 D 的方法对激活能进行估计，但是这种方法非常耗时。器件生产商在验证某项新的产品技术时，常根据相应的失效模式对激活能进行估计，该估计通常是以试验结果为基础，而不是以功能部件为基础，并将估计的激活能应用于该项经认证的技术所生产的所有器件。因此，器件供应商一般能够给出给定器件主要失效模式对应的激活能。

可通过求解下列方程式来确定图 5 中的激活能 E_a ，如下：

$$E_a = k_B \times \frac{\{\ln [\lambda(T)] - \ln(\lambda_0)\}}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}} \dots\dots\dots (21)$$

$$E_a = k_B \times \text{斜率}$$

- 式中：
- λ_0 —— $1 \times 10^{-8} / \text{h}$ ；
 - $\ln(\lambda_0)$ —— -18.421 ；
 - T_0 —— $25^\circ\text{C} = (25 + 273) \text{ K} = 298 \text{ K}$ ；
 - $\ln[\lambda(T)]$ —— $-7.764 5$ ；
 - T —— $180^\circ\text{C} = (180 + 273) \text{ K} = 453 \text{ K}$ ；
 - E_a —— 0.8 eV 。

$$\text{斜率} = \frac{\ln [\lambda(T)] - \ln(\lambda_0)}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}}$$

图 6 表示的是激活能的确定方法。

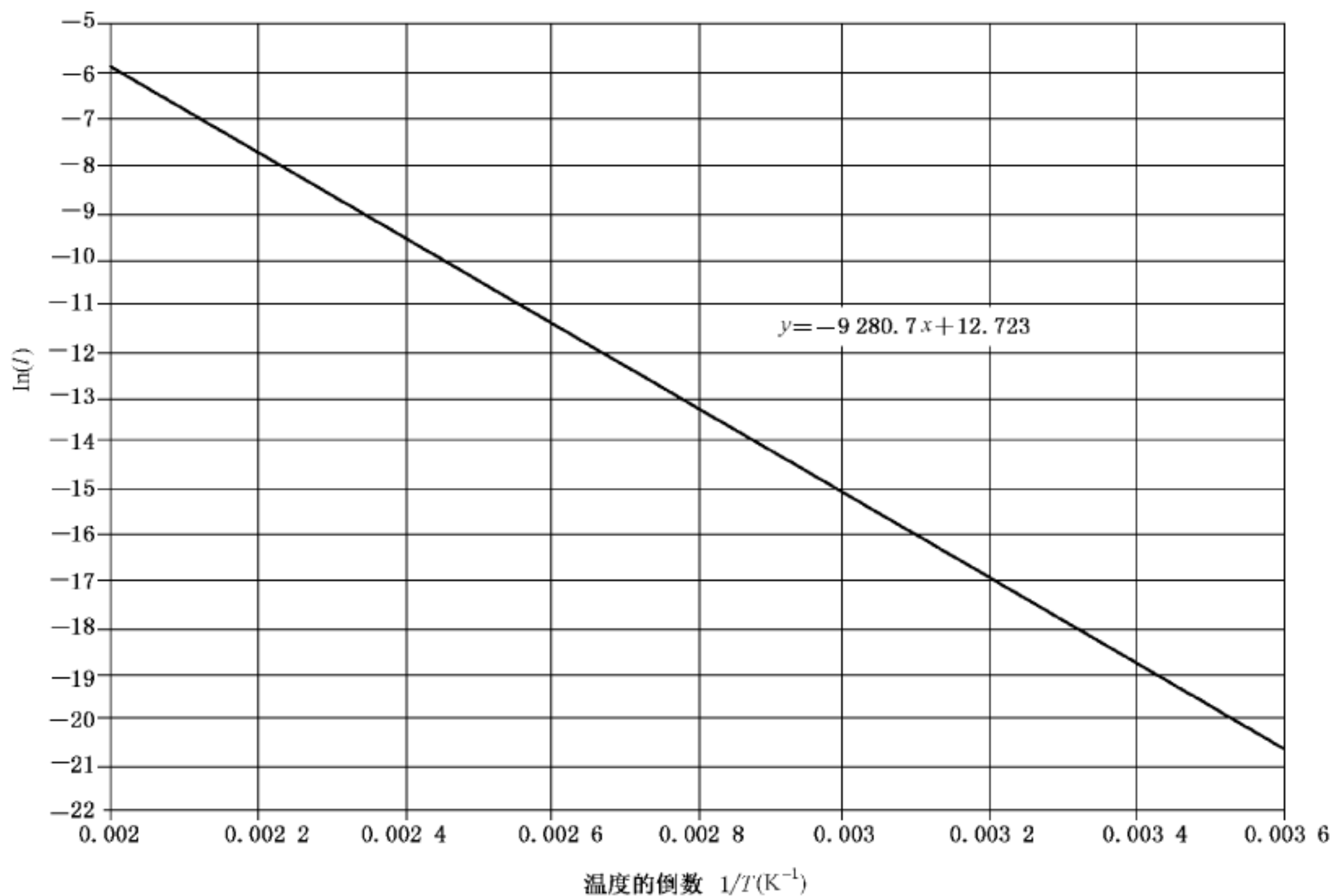


图 6 激活能的测定线形图

阿伦尼斯方法适用于在可靠性分析中使用的大多数统计分布。
通过适当统计方法可确定参数的置信限、各分布的寿命函数及可靠性。

5.6.1.2.1 模型适用性

本模型适用于长时间高温暴露的环境,在这种环境中,长时间的高温会引起材料发生累积损伤而改变其物理特性,材料物理特性的改变又有可能导致电学特性或者其他特性发生变化。
本模型不适用于由于低温所引起的破坏。对于低温引起的破坏,建议进行失效试验来建立特定的模型。

5.6.1.2.2 模型的优点

阿伦尼斯模型的使用很简单。当失效模式仅取决于绝对温度时,可使用阿伦尼斯模型来设计有效的加速试验。

5.6.1.2.3 模型的缺点

本模型易于失效率仅取决于温度的单一部件,对于不同的电子部件及机械部件的组成的产品,由于其具有多个不同的失效模式,从而具有不同的温度激活能,故本模型难以应用(详见 JESD85^[27] 和附录 G 部分的 IEC 61649:2008)。

5.6.1.3 艾林模型

与阿伦尼斯模型类似,艾林模型主要用于当热应力是加速过程的因素,但与阿伦尼斯模型不同的是,艾林模型还可以用于除温度之外的其他应力,如:湿度、某些化学反应。
寿命预测函数如下:

$$L(S_E) = \frac{1}{S_E} \times e^{-\left(A - \frac{B}{S_E}\right)} \quad \dots\dots\dots (22)$$

式中:

A 和 B ——待定的函数参数,可通过试验或参考文献的数值进行确定,比如,IEC60605-7^[11]。参数

B 有可能是一个常数,但更多时候它是某些应力的函数,通常是温度;

S_E ——在本模型中使用的应力[通常指绝对温度,单位为开尔文(K)];

$L(S_E)$ ——寿命的计量,如,MTTF、特征寿命、半衰期等。

该模型的加速因子是:

$$A_{S_E} = \frac{L(S_{E_Use})}{L(S_{E_Test})} = \frac{\frac{1}{S_{E_Use}} \times e^{-\left(A - \frac{B}{S_{E_Use}}\right)}}{\frac{1}{S_{E_Test}} \times e^{-\left(A - \frac{B}{S_{E_Test}}\right)}} = \frac{S_{E_Test}}{S_{E_Use}} \times e^{B\left(\frac{1}{S_{E_Use}} - \frac{1}{S_{E_Test}}\right)} \quad \dots\dots\dots (23)$$

式中:

S_{E_Use} 和 S_{E_Test} ——分别指使用或试验中的应力;

B ——待定的常数,可通过试验或参考文献的数值进行确定(见参考文献[10])。

艾林模型可适用于在可靠性分析中使用的所有分布。

可用适当的统计方法确定各种分布参数、寿命函数及可靠性水平的置信限。

5.6.1.3.1 模型的优点

本模型相对来说比较简单,且不只适用于热应力。若已知参数 B ,则可以获得较精确的加速试验。

5.6.1.3.2 模型的缺点

与阿伦尼斯模型类似,参数 B 的确定对于正确的试验加速至关重要。由于不同器件及材料具有不同的常数 B 值,故对于相对较复杂的产品,精确的试验加速可能不真实。

5.6.2 时间函数变化的应力模型—B 类试验

5.6.2.1 概述

为了缩短试验时间,通常选用随时间变化的应力模型来激发某些故障模式。这些模型可用来表示产品的使用剖面,同时也是累积损伤或累积暴露模型。

5.6.2.2 步进应力模型

步进应力模型是最常用的模型,在该模型中,在预定时间及预定应力水平条件下,连续增长的应力施加在受试产品上(见参考文献[13],[7])。

在各个时间段,应力水平恒定不变。

对于某一假设的分布,使用寿命特征的数字形式表示本模型。如,步进应力的数字表达式可表示为如下这种形式。

若试验持续时间为 t ,且应力为 S ,服从威布尔分布,那么受试产品的可靠性为:

$$R(t, S) = e^{-\left(\frac{t}{\eta(S)}\right)^\beta} \quad \dots\dots\dots (24)$$

式中:

$R(t, S)$ ——用时间和应力表示的可靠度函数;

β ——威布尔分布的形状参数;

$\eta(S)$ ——与应力 S 相关的尺度参数。

那么失效的概率则为:

$$F(t, S) = 1 - R(t, S) \quad \dots\dots\dots (25)$$

在上述方程式中,以逆幂律模型为例,特征寿命则为:

$$\eta(S) = C^{-1} \times S^{-m} \quad \dots\dots\dots (26)$$

对于连续性的应力(应力水平) S_i , 式中 i 为 1, 2, 3...

$$F_i(t, S_i) = 1 - e^{-(C \times S_i^m \times t)^\beta} \quad \dots\dots\dots (27)$$

选用合适的分布(以上述的威布尔为例)对数据进行分析,使用累积暴露模型可在两个连续应力水平的失效分布间建立一定的联系。在每个应力台阶上受试产品的失效分布仅在该台阶适用;但是,在每个台阶的起始时刻应与该台阶之前的总累积试验时间刚好吻合。

将某一等量的老化时间表示为 τ , 以说明在前一应力水平时的老化情况,即:

$$\tau_i = (t_i - t_{i-1}) \times \left(\frac{S_i}{S_{i-1}} \right)^m + \tau_{i-1} \quad \dots\dots\dots (28)$$

在各段 i 下的失效概率为:

$$F_i(t, S_i) = 1 - e^{-(C \times S_i^m \times (t - t_{i-1}) + \tau_{i-1})^\beta} \quad \dots\dots\dots (29)$$

分布参数可由极大似然估计法或其他方法进行确定。

也可对失效概率、可靠度或产品的其他寿命参数设定置信限,设置置信限时应参考相应的标准中有关置信限的说明,这主要取决于已经建立的分布。

5.6.2.2.1 模型的优点

该方法可在一个短的时间内发现产品中的潜在薄弱环节。相应的数学解算方法并不十分复杂,因此,可以计算出与特定应力相关的产品寿命特征参数。

5.6.2.2.2 模型的缺点

本方法并不考虑当前应力之前的应力施加时产生的受试产品老化情况,也没有给出与时间相关的失效模式如磨损、蠕变、高周疲劳等发生的时间。最基本的驱动力是应力强度。此外,该方法也未考虑由于重复应力导致的潜在疲劳或材料变化,与正常没有疲劳因素时相比,这种潜在的疲劳可能激发失效模式更早出现,从而错误地使预计的失效时间偏早。应力的影响通常表现为对数形式,因此,切不可使用可能导致受试产品立即发生失效的应力水平。

对于如何处理和解释出现与施加应力无关的失效模式,本方法也没有提供任何建议。

使用该方法时要注意的是不能超过受试产品的短时破坏极限。

5.6.3 施加重复应力的应力模型——疲劳模型

5.6.3.1 概述

疲劳,即产品的材料或结构受到重复载荷的影响而发生逐渐变质。这些载荷可以是机械载荷、动态载荷、热循环、电压循环等。采用循环载荷(如热循环、弯曲及其他因素),疲劳与多个参数成比例,如:经常与重复载荷的极限数量(极限之间的差异)成比例,以及与变化速率成比例。

为了表示载荷重复次数及载荷水平间的关系,应在不同的应力水平下,对大量产品进行一系列的试验。根据所施加外力循环次数或未出现故障应力水平来描绘产品的极限应力,会发现随着应力水平的降低,相应的应力循环次数将会增加。当应力持续降低到某个足够低的点时,产品能够承受“无限次”的循环,则在该点的应力值即为疲劳极限。并非所有的材料都有疲劳极限,如有些铝合金、塑料等就没有疲劳极限。

5.6.3.2 依据 Miners 法则计算寿命

用 Palmgren-Miner 线性疲劳累积损伤定律(Miners 法则)来计算合成凹陷或者弯曲疲劳对齿轮寿

命的影响,这种齿轮承受的载荷不是常数,其量级在很宽的范围内变化。依据 Miners 法则失效发生在:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \cdots + \frac{n_i}{N_i} \cdots + \frac{n_m}{N_m} = 1 \quad \text{.....(30)}$$

式中:

n_i ——在第 i 个应力水平下循环数;

N_i ——在第 i 个应力水平下产品失效时循环数;

$\frac{n_i}{N_i}$ ——在第 i 个应力水平的损伤率。

将上式的循环次数用寿命来表示:

$$\frac{l_1}{L_1} + \frac{l_2}{L_2} + \cdots + \frac{l_i}{L_i} \cdots + \frac{l_m}{L_m} = 1 \quad \text{.....(31)}$$

式中:

l_i ——在第 i 个应力水平下的停留时间;

L_i ——在第 i 个应力水平下的产品寿命;

$\frac{l_i}{L_i}$ ——在第 i 个应力水平的损伤率。

如果每一个应力水平的停留时间可以用该时间除以总时间 L 表示:

$$\begin{aligned} l_1 &= \alpha_1 \times L \\ l_2 &= \alpha_2 \times L \\ l_i &= \alpha_i \times L \end{aligned} \quad \text{.....(32)}$$

式中:

α_i ——在第 i 个应力水平的停留时间与应用载荷下寿命的比值;

L ——在实际载荷下的产品失效寿命。

如果将相同的寿命比例表示为循环比例:

$$\begin{aligned} \frac{a_1 \times L}{L_1} + \frac{a_2 \times L}{L_2} + \cdots + \frac{a_i \times L}{L_i} + \cdots + \frac{a_m \times L}{L_m} &= 1 \\ L &= \frac{1}{\frac{a_1}{L_1} + \frac{a_2}{L_2} + \cdots + \frac{a_i}{L_i} + \cdots + \frac{a_m}{L_m}} \end{aligned} \quad \text{.....(33)}$$

载荷通常可以用时间比例 α_i 和载荷比例 β_i 以及额外的速率比例 ω_i 来定义,这些比例是计算许可寿命 L_i 的依据。

其中:

β_i ——瞬时载荷和基本载荷之间的比例;

ω_i ——瞬时速度/额定载荷。

根据疲劳试验,可绘制应力-循环数图,即 S-N 曲线。假设应力水平符合逆幂律模型,根据一组 S-N 曲线就可确定 5.6.1.1 条中模型参数 m 值。

5.6.4 其他加速模型:时间及事件压缩

5.6.4.1 概述

其他相关加速模型可以参考 IEC 61163-2 及参考文献[17]。

5.6.4.2 事件压缩及时间压缩试验的实施步骤(C 类试验)

第 1 步:确定哪些因素可以进行事件压缩,以及在不改变失效模式的前提下能压缩的程度;

- 第2步:确定任务剖面中哪些时期可以进行时间压缩及程度(见 IEC 60605-2);
- 第3步:评估潜在失效模式的加速因子(见 5.2.2.1);
- 第4步:确定样品量(见 IEC 61649);
- 第5步:进行试验(见 IEC 60300-3-5);
- 第6步:试验后的失效分析;
- 第7步:根据各失效模式分别分析试验结果(见 IEC 61649);
- 第8步:完成试验报告(见 IEC 60300-3-5)。

5.7 定量可靠性试验的加速

5.7.1 可靠性要求、目标及使用剖面

5.7.1.1 概述

可靠性要求、目标及使用剖面在其他可靠性标准和文献中已经进行了详细探讨,但出于完整性考虑,在本标准中做简要说明。

5.7.1.2 产品及组件的使用剖面

制造商通常会选择模拟实际环境应力开展加速试验对产品进行测试,通过试验以验证之前的试验(如:高加速极限试验)已将在寿命周期中可能出现的失效模式完全暴露,同时达到评估产品现场可靠性的目的。在某些情况下,由于受到空间或者性能的约束,产品的一个或者几个器件没有进行足够的降额设计,导致没有足够应力-强度裕度。对于这类情况,产品的可靠性在很大程度上取决于使用方式、工作环境和工作应力以及它们的综合作用或者施加的先后顺序。

产品使用剖面包含以下方面,即:

- a) 工作及环境应力,应力幅度及施加顺序;
- b) 相应顺序的剖面段持续时间及次数。

产品使用剖面,可从以下三种评估环境中进行选择,即:平均使用剖面、频繁使用剖面,以及使用剖面条件的范围。

这些工作应力及施加顺序,乃至装配、关键组件,和那些可能受加速可靠性试验影响的组件都应该了解。

5.7.1.3 可靠性目标或要求

整体可靠性目标应该以企业或消费者能接受和理解方式表示。这一目标可表达为某一特定时期(如:保证期)或多个时期结束时失效产品占整体的百分比。也可表达为一种担保或维修费用。有时也可表达为平均故障前时间(MTTF)或平均故障间隔时间(MTBF)。

不管这个目标如何界定,都必须明白可靠性目标与产品的使用方式有关。使用剖面(工作应力作用的场合)不同,即使“失效数”或“可靠性参数”相同,表示的产品可靠性也不一样。相反地,产品的MTTF或MTBF是代表各种特定应力综合作用下的平均值。由于这个原因,产品的任何可靠性参数值都应给出有关预期使用方式和相应严酷程度的说明。

在对由多个部件构成的产品施加两种或多种应力时,可以通过增加各种单一的应力、并使用这些应力相应的模型来完成试验加速。在这种情况下,若仅对某一失效机理的失效率单独进行加速,那么整个部件的可靠性(R)或失效概率(F)将必须分别予以估计。这可以用 n 个独立应力结合的形式表示为:

$$R_{\text{equipment}} = \prod_{i=1}^n R_i \quad \dots\dots\dots (34)$$

则设备的失效概率为:

$$F_{equipment} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i) \quad \dots\dots\dots (35)$$

竞争风险的问题,见 IEC 61649:2008 的附录 G 中的说明。

如果某个产品由 m 个部件构成,产品的各部分在任何特定时间都受到 n 个应力作用,且这些应力同时影响所有的失效模式,那么在各个时间段 t_k 中该产品的可靠性(部分使用剖面由具体的应力组合而成)则为:

$$R_{Item}(Stress, t_k) = \prod_{j=1}^m \left[\prod_{i=1}^n R_p(Stress_i, t_k) \right]_j \quad \dots\dots\dots (36)$$

若产品的整个使用剖面由 w 段组成,每一段具有不同的应力组合,那么该产品的寿命期中总可靠度或其他规定时间 t_0 内的总可靠度则为:

$$R_{Item}(Stress, t_0) = \prod_{k=1}^w \left\{ \prod_{j=1}^m \left[\prod_{i=1}^n R_p(Stress_i, t_k) \right]_j \right\} \quad \dots\dots\dots (37)$$

式中:

$$t_0 = \sum_{k=1}^w t_k \quad \dots\dots\dots (38)$$

以上方程式得到的结果都偏保守,也就是说,该可靠度估计值远远低于设备实际的可靠度。

此类产品的总平均失效率也与施加的应力和使用剖面有关,即:

$$\lambda_{a_Item}(Stress, t_0) = - \frac{\ln[R_{Item}(Stress, t_0)]}{t_0} \quad \dots\dots\dots (39)$$

对于任何其他的应力条件或使用剖面,产品的平均失效率将会有所不同。

可修产品的可靠性要求的考核应充分考虑预防性维修相关规定,这也就是说,产品的组成部分,应分别就其可靠性和做好相应需求准备的持续时间进行评估,同时应制订相应的要求,使之与预期的维修时间相对应。

5.7.2 可靠性验证或寿命试验

5.7.2.1 适用的试验类型

实际上,大多数试验均可进行加速以缩短试验的时间。包括:可靠性验证试验、可靠性增长试验或保证试验(assurance tests),可以是:

- 成功率试验,定时试验;
- 有失效试验,定时试验;
- 失效暴露试验(通常适用于部件、小装配件、单一失效模式);
- 可靠性增长试验,通常用于规定的时间期限;
- 概率比序贯试验(SPRT)。

对于失效模式不确定的产品,通常可以实施工程评估试验。如果已经知晓了这些试验项、预期的失效模式或不确定的失效模式的加速因子,工程评估试验也可以进行加速。

5.7.2.2 产品的可靠性试验—累积损伤模型

若根据某种具体使用剖面制订可靠性试验程序,那么这种试验程序所产生的结果仅对这种既定的使用剖面有效。如果对同一产品的其他使用剖面进行可靠性估计,就需要进行其他试验或通过对新使用剖面下的试验结果建立数学模型以调整试验结果。若已知试验中施加的应力和使用剖面之间的关系,则可以建立数学模型以验证新调整过的使用剖面(详见 IEC 61709)。

若在两种使用剖面之间存在多种差异,那么在对新的剖面调整可靠性评估值时容易使模型产生偏差。这些偏差会随着受评估系统的复杂程度的增长而快速增长。

与工作应力及环境应力相关的产品和器件可靠度可以表示为规定时间(寿命期) t_0 内的函数,如下所示:

$$R(t_0) = R_U(t_0) \times \prod_i R_{S_i}(t_0) \times \prod_i R_{E_i}(t_0) \quad \dots\dots\dots (40)$$

上式中, $R_E(t_0)$ 表示时间 t_0 内与环境应力相关的产品可靠度;而 $R_S(t_0)$ 则表示与工作应力有关的可靠度。 $R_U(t_0)$ 因子表示各个环境及工作应力间未知的相互作用或协同作用,这通常以单一应力持续时间与应力量值的独立性假设来确定。在很多情况下,这可能是一个无效的假设。

式(40)可以写成以下通用形式,即:

$$R_{Item}(t_0) = \prod_{i=1}^{N_S} R_{Stress_i}(t_i) \quad \dots\dots\dots (41)$$

若 $R_{Item}(t_0)$ 是产品的可靠性目标或产品的可靠性要求,而这种可靠性目标或要求需要通过试验来进行验证,那么应将可靠性量值以产品各个可靠性乘积的形式分配到上式中。出于简化说明的目的,可以将所分配的可靠性假设为同一值。

$$\begin{aligned} R_{Item}(t_0) &= (R_{Stress_i}(t_i))^{N_S} \\ R_{Stress_i}(t_i) &= \sqrt[N_S]{R_{Item}(t_0)} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (42)$$

对应于各应力的可靠性分配值,可能会有所不同。这取决于产品的预期用途、使用剖面和对特定环境的敏感程度。除预期在实际使用中的应力值外,其累积效应也影响着产品的可靠性。这种试验的持续时间,可按照各种应力在实际使用时的持续时间来进行计算。而加速试验,可通过增加各应力值或通过加速时间来完成。

若试验的目的是为了评估现场的可靠性,那么在这种情况下,应当使用平均的使用应力剖面,这种剖面可以估计特定的气候条件,如:中欧(见 IEC 60721)。地理位置不同,对应的主导应力或者极限应力也不同。有些国家,像北斯堪的纳维亚、加拿大、俄罗斯,低温就是高应力之一。而在新墨西哥、非洲、印度,则温度较高;新加坡和日本最显著的应力是湿度,新德里则是大气污染。考虑到使用方式的不同,试验可以模拟平均的使用条件或极端条件(如:当少于1%的客户给产品施极端负载)。这很难将一种试验结果从一个环境和使用剖面转移到另一个环境和使用剖面。因此,许多公司对现有的试验施加额外的环境试验,以确定产品是否能够承受那些在实际使用中并不频繁出现但会影响产品长期可靠性的极端负荷。通常对产品施加循环应力,使产品暴露在多重或者按先后顺序施加的应力之下。理想状态下,应施加组合式应力并保持一定的间歇性,以尽可能逼真的模拟现场的条件。但是在实际应用中,这种可能性较小。为了以一种最佳的方式使用试验设备,并使之能够轻易地确定导致失效的应力类型和等级,通常可使用一个试验周期来进行这种试验,如1周时间。

在本文以下内容中,假定产品在各个预期的应力、工作应力及环境应力下进行试验;必须牢记这些应力在实际使用时的水平和累积持续时间,以及相应的总使用期限 t_0 。

如果应力造成的累积损伤与应力的持续时间成正比。那么各应力下的可靠度可表示为:

$$R_i(k, \mu_{L_i}) = \phi \left[\frac{k \times \mu_{L_i} - \mu_{L_i}}{\sqrt{(a \times k \times \mu_{L_i})^2 + (b \times \mu_{L_i})^2}} \right] \quad \dots\dots\dots (43)$$

式中:

- R_i ——表示各个应力作用下产品的可靠度;
- k ——表示实际应力持续时间的倍数,假定是累积损伤模型;
- μ_{L_i} ——表示实际使用中载荷(应力)的平均持续时间;
- a 和 b ——表示可生成强度和载荷均值标准差的偏差系数;
- ϕ ——表示累积正态分布。

对上式简化平均载荷,式(43)可简化为以下表达式,即:

$$R_i(k, \mu_{L_i}) = \phi \left[\frac{k - 1}{\sqrt{(a \times k)^2 + b^2}} \right]$$

.....(44)

对于给定数值的 a 和 b , 可以绘制关于 k 的函数曲线; 产品的可靠度是关于 k 的函数, 如图 7 所示。
在式(43)中, 假定各应力服从正态分布。最好使用准确的分布信息(因子 a 和 b)。若现场并不具备精确的分布信息, 那么可认为最大的标准差为平均值的 10%。则式(43)可简化为:

$$R_i(k) = \phi \left[\frac{(k - 1) \times 10}{\sqrt{k^2 + 1}} \right]$$

.....(45)

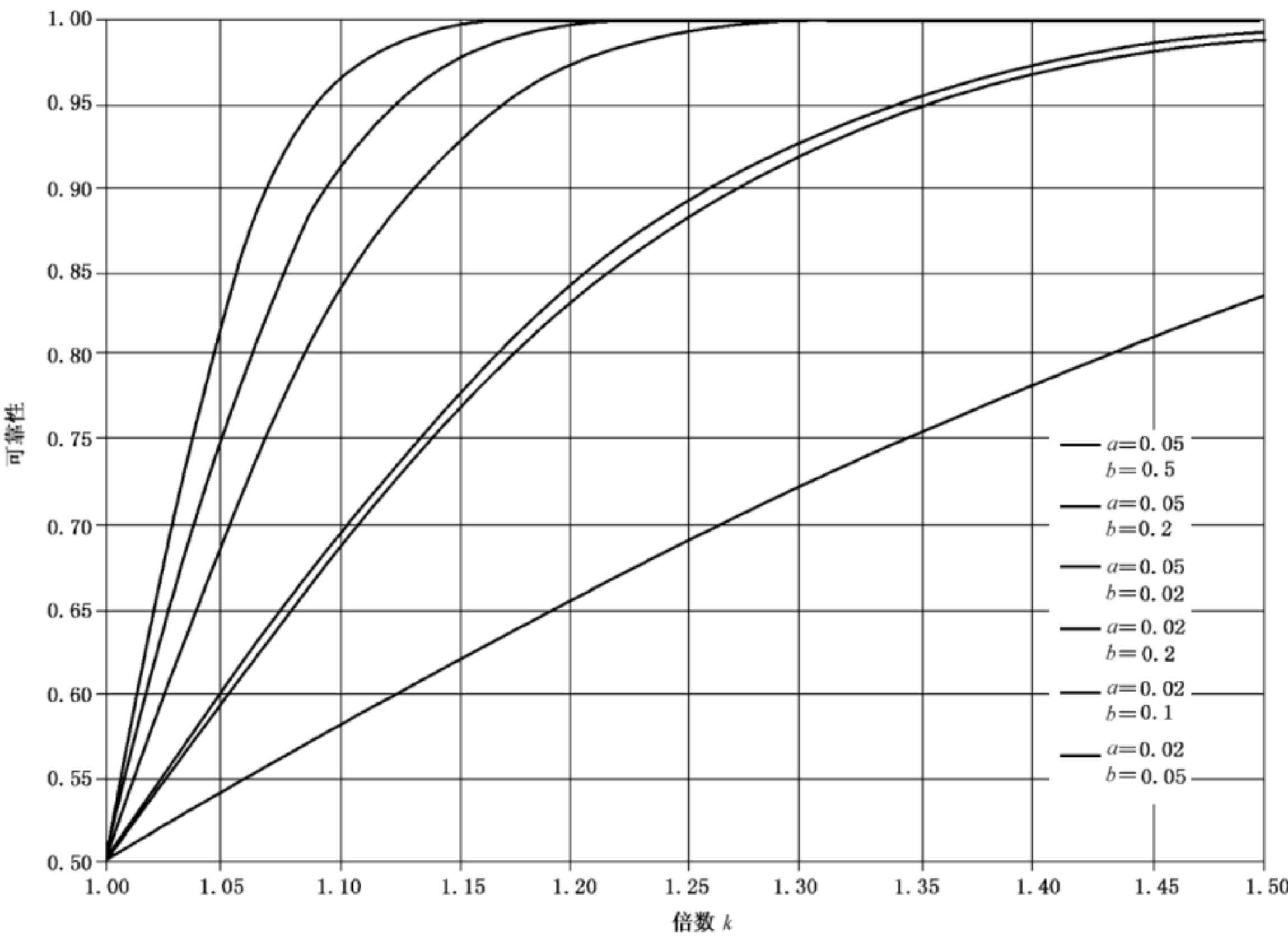


图 7 可靠性增长试验中可靠性指标和试验应力持续时间倍数 k 的关系曲线

对于特定值 $a=0.1, b=0.1$ 时可靠性与 k 之间的关系, 如图 8 所示。

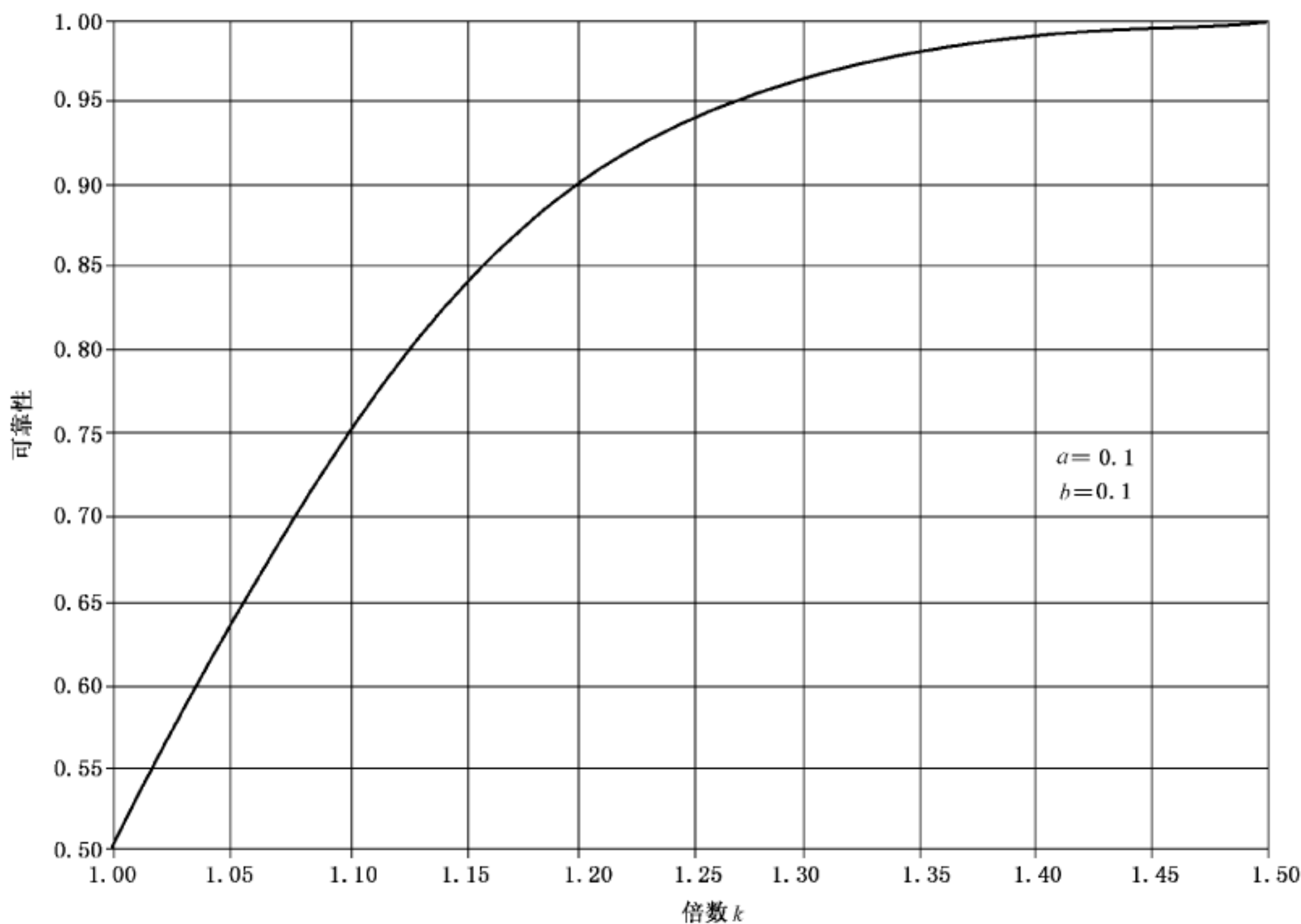


图 8 应用载荷的持续时间与期望可靠性的关系曲线

根据上述方法确定的各应力应用的持续时间比实际应力作用持续时间要长(大约为 1.4 倍或 1.5 倍的实际应力持续时间)。若要进行试验,需要选择适当的加速因子对各个应力水平进行加速。需要确定应力加速类型以及对各个不同应力的具体加速因子。这可以通过既定元器件在不同应力水平作用下的失效试验获得这些数据(参见附录 F 和附录 G)。

以上方案可有几种不同的形式,即:

- a) 成功率试验,无失效数发生;
- b) 允许存在一定失效数的试验;
- c) 定时试验,但无可靠性要求,产品的可靠性应根据试验的失效次数进行估计;
- d) 基于假定的增长率进行可靠性增长或改良试验。

若是一项成功率试验,那么结果比较简单,且很容易进行解释。在不发生失效的情况下,该类试验可以采用实际的置信区间验证可靠性要求。

若试验允许一定数量的失效,那么失效的允许数也就决定了试验的持续时间,此时试验则变成了“定数截尾”试验。

若试验是可靠性增长试验,那么必须根据试验失效数“ r ”确定总的试验持续时间(或考虑到累积试验时间,则指样品数量)。应牢记施加应力的总持续时间,要求的置信度和要求验证的可靠性(见 IEC 62429)。

5.7.3 元器件的可靠性测定试验

大批量生产的电子产品往往通过加速应力试验来确定其在使用应力下的可靠性度量(失效率或其他参数)。为确定正确的加速因子,需要在各种应力水平下对新元器件的工艺实施寿命试验,同时可以确定加速模型的失效模式和经验系数。相关证明方法在 JESD47^[26]有比较详细的描述。应力类型及其大小的选取取决于元器件预期的失效模式。

小批量生产的较大型元器件通常使用加速试验的方法和相应的统计工具(如 IEC 61649 或 IEC 61124)进行可靠性试验。按照特定分布的参数比率(例如:威布尔分布的特征参数),可确定特殊应力的加速因子,进而用于预测同一应力类型的其他应力水平作用下的可靠性。若对于同一应力的不同应力水平有多个不同的分布参数,那么说明其物理特性可能发生了改变。如威布尔分布中特征寿命及形状参数在不同的应力水平时各不相同,则说明所施加的应力水平可能太高,改变了产品的物理特性或发现产品的生产工艺存在缺陷。如果在元器件的额定等级内出现,则意味着需要重新评估元器件的等级。

元器件试验的通用环境如下:

- a) 温度;
- b) 振动;
- c) 湿度;
- d) 温循;
- e) 盐雾。

部分工作应力,诸如:

- a) 电压;
- b) 电流;
- c) 外力;
- d) 摩擦。

元器件的加速试验的样例,如附录 B 所示。

加速试验时间与产品的估计寿命相关。寿命试验可提供一些颇有意义的结果,而无失效的试验,仅当试验时间接近具有裕度的产品寿命时可以提供一些信息。在预计某一器件在超过实际试验时间时的可靠度时,传统上多个元器件的总累计试验时间(总的试验时间是所有单一产品上累积的时间总和)可能会提供一些毫无意义的结果。如:对于行走了 32 000 km 路程、且不产生任何失效的 100 个轮胎,往往会得到一个错误的结论,即:36.8%的轮胎可能会行走 3 490 000 km 路。计算的失效率仅对试验中的 32 000 km 路程有效。虽然对超过试验时间之外的失效率的估计,可通过威布尔分析法实现,但通常需要知道威布尔斜率(见 IEC 61649)。

对于上面的轮胎例子,其结果对其他元器件并不明显。通常生产商对电子产品进行的试验往往持续 1 000 h,且经常采用 77 个样品。如果对该试验进行加速,那么可以提供归一化后的使用水平下的时间(等效寿命)。对多个产品进行的试验,其结果只是提高了置信度,并不能提高试验结果(见 JESD47 和 JESD85^{[27]、[28]})。

5.7.4 元器件及系统/组件的可靠性参数

5.7.4.1 电子元器件

对于电子产品最佳的可靠性参数,是在标准的剖面条件确定的瞬时失效率(见 IEC 61709)。

这里允许根据产品实际使用剖面中的应力对瞬时失效率进行重新计算。在进行重新计算时应使用适宜的加速模式(见 IEC 61709)。

此处所提供的信息主要从依据给定的温度、环境和其他特定的应力而获得的。

所谓的额定失效率,通常是产品使用寿命内的平均失效率,其前提条件是假设失效时间服从指数分布。但是,有些电子及机电元器件,只有有限的寿命(磨损)。对于这些元器件,需要估计它们的使用寿命。这些元器件包括:功率管、光耦合器、LED、激光二极管、电解电容器、变阻器、灯泡、继电器、开关、连接器及电池(见 IEC/TR 62380)。

5.7.4.2 机械零件

机械零件最佳的可靠性参数是在标准的剖面条件下确定的失效百分比。通常将给定失效百分比表示为工作时间,如,10% (通常指 B10 或 L10 寿命)或 1%失效(通常指 B1 或 L1 寿命)。对于评估的方法详见 IEC 61649。

允许对产品在使用剖面中的实际应力下的可靠性指标重新进行计算。计算时,应使用适宜的加速模型。

若以失效率表征其可靠性,则通常根据未失效概率的评估获得的等效失效率来计算产品失效率,这对于特定的应力也有效。但是,这种方法并未对元器件的预期寿命提供任何信息。

5.7.4.3 组件及系统(产品)

若产品的元器件组成(电子类、机械类,包括软件)更加复杂,则可用生存概率或失效概率来表示,这样就综合了不同的失效分布,若包含软件,则更为合适。

5.8 加速可靠性验证试验或评估试验

可靠性验证试验,概率比序贯试验(SPRT)和定时截尾试验的使用前提是假设产品的失效率恒定,因为产品复杂且其失效模式可能不会适应任何其他分布,除非所进行的试验是出于判定具有独特失效模式的产品可靠性,该失效模式大多发生在元器件(零件)级。

考虑到产品较高的可靠性指标(或 MTTF/MTBF),这些传统试验通常要耗费大量的时间和费用,因此需要进行加速。由于有维修或更换的产品试验设计与非维修件一样,所以在这个单元用 MTBF 和 MTTF 均可。

在参考文献中对数学偏差、图形拟合和试验类型的解释都有描述。但是在实际的试验中,对于其组成结构、所施加的应力以及其背后的原理等,尚未给予详细说明。应明白,试验仅是反映应力所表现的一切。需要进行验证的产品可靠性的基本原理,与式(37)中所示的定时截尾试验相同,且试验中应力持续时间(不加速)需要与式(38)中所示一致。

需要通过试验验证的平均失效率可由合适的可靠性方程式进行确定。假设失效前时间服从指数分布,失效率用最简单的形式表示为:

$$\lambda_0 = -\frac{\ln[R(t_0)]}{t_0} \dots\dots\dots (46)$$

式中:

t_0 ——预期工作时间

然后,对各所用环境使用恰当的加速因子对失效率进行加速,那么失效率则变为:

$$\lambda_A = A_{Test} \times \lambda_0 = \sum_{i=1}^{N_S} (A(\prod_k A_k)_i \times \lambda_i) \dots\dots\dots (47)$$

式中:

λ_0 ——产品在使用条件下的失效率;

λ_A ——加速试验时的失效率;

A_i ——试验中各增加应力下的加速因子;

λ_i ——相对于特定应力的产品的失效率;

N_S ——应力数量。

那么总的等效加速试验因子则为(恒定失效率[10]的 Krasich 加速模型):

$$A_{Test} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} (A(\prod_k A_k)_i \times \lambda_i)}{\lambda_0} \dots\dots\dots (48)$$

$$A_{Test} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} \left(A \left(\prod_k A_k \right)_i \times \left[-\frac{\ln(R_i(t_0))}{t_0} \right] \right)}{\lambda_0} \dots\dots\dots (49)$$

式(46)中加速失效率的倒数,将获得 MTBF,而式(50)中的 m_0 ,可通过试验确定。

$$m_0 = \frac{1}{\lambda} = -\frac{t_0}{\ln(R_0(t_0))} \dots\dots\dots (50)$$

概率比序贯试验中的其他参数以及定时截尾试验,可按照普通的序贯试验的设计方法进行应用(鉴别比、生产方及使用方风险等)。

加速可靠性的符合性和传统试验的主要差异在于最小试验时间。这个最小试验时间,不得小于加速试验所确定的最小试验时间。反过来,这个最小的试验时间是要求的可靠性水平、施加的应力和试验加速的函数。因此,样品的数量必须予以限制,使得最小试验时间对应于可接受时的零失效,与可靠性指标验证加速试验的时间相等或更长。

概率比序贯试验的设计方法与非加速试验的设计方法相同,且接收标准和拒收标准也已经确定;必须按照生产方和使用方可接受的风险、鉴别比来制订试验计划。但例外的是,最小的试验 MTTF 是加速失效率的倒数。另外一个例外是环境因素以其在定时截尾试验中应用的方式进行加速和应用。

对于概率比序贯加速试验的详细案例见附录 B。

5.9 加速可靠性增长试验

当可靠性增长试验加速时,在产品寿命期内预期出现的各个应力,应当按照加速的标准进行加速。各个应力可以单独施加,此时建议各个应力分布在一个试验周期内以便于模拟累积的效应。最佳的方式是同时施加尽可能多的应力,以便将所有可能的耦合作用包含在内。

各施加应力的持续时间,应能表示其对可靠性验证而言所必须的裕度寿命(如定时截尾试验)。失效前时间是试验时间乘以适当的加速因子。当同时施加多个应力时,最重要的是要确定失效的原因,以确定失效前的正确时间。再次计算使用时间时,失效时间以递增的顺序排列,然后选用某种分析方法对可靠性增长试验进行分析(见 IEC 61164)。

当用这种方式进行分析时,失效是按照出现的“实际时间”进行重新计算的,故应力应用的顺序不会歪曲试验结果。

可靠性增长试验的加速、数据分析的举例及加速试验指南参见附录 B。

5.10 加速试验指南

5.10.1 多重应力下和已知的使用剖面的加速试验

当多种复合应力的组合作为加速试验的应力时,最大程度的模拟实际使用状态就变得很重要。

应力,包括环境应力和工作应力,经常不是以它们在寿命周期出现的方式施加的,而是以特定的组合以及各自独特的顺序施加。在进行试验时,可能对试验应力进行组合,之后可按一项单独的应力进行操作。热循环和热暴露能够很容易与其他的操作循环、电压变化、施加的声功率等结合到一项试验中。振动试验,也可以与热循环组合,但是与热循环相比,振动的持续时间短,而其暴露存在技术困难。有些试验,如坑洞冲击、噪声、粉尘聚集、危险或爆炸性化学品及润滑剂,则很难与其它试验进行组合。在这种情况下,环境暴露是分散性的,以便于有序的引起累积损伤。将某些试验的持续时间分成两至三段或者改变这些应力施加的顺序可实现这一目的。

5.10.2 加速应力的水平

一个合理的通用原则是,加速应力不应超过使试验样品的物理或化学特性发生改变的水平。

对于为了了解产品的应力极限的试验项目,此原则不适用。由于超出固有假设条件的加速模型的

不准确性,因此并不建议将这些试验的结果与可靠性验证的数值联系在一起。步进应力试验、失效模式敏感性研究试验均属于此类试验。

5.10.3 加速可靠性试验及验证试验

有时会将产品性能试验与加速可靠性验证试验混淆。而客户则经常在提出可靠性要求的同时,也会提出相关要求,有些甚至认为若进行规定好的试验,那么可靠性要求一定会得到满足。

验证试验专门设计用以验证产品在具有充分的耐久性和可靠性前提下,按照既定的环境极限进行工作时的能力。如果一个特定的可靠性验证试验对试验的设置、时间长度和样品数量有特殊要求,在试验成功通过(无失效)的情况下,它经常不能代表一个真实的可靠性试验,且不能说明任何可靠性指标。即使这些试验可以代表寿命周期的一段时间,也并不能证明性能验证和产品的可靠性有什么关系。

确认验证试验可以说明产品符合设计规范的要求,所以当产品承受所列出的极限应力时,产品仍能工作。对于可靠性验证试验或可靠性健壮试验验证产品可靠性变化,样品数目适应生产变化并不充分,且小样本量的样品容易受到有限的试验顺序的影响,而这一事实并不能对产品使用过程中预期经历的所有应力的可靠性做出任何说明。

6 产品研发阶段的加速试验策略

6.1 加速试验抽样方案

对于定性加速试验(A类试验),样本量的大小取决于应力类型的数量以及需要确定的故障模式数。当某个样本做到其破坏应力极限或需要对其进行失效分析时必须停止试验。在某些情况下,样本是可以修复并继续试验的,因此在高加速极限试验(HALT)中应提供必要的更换备件。但是很多情况下是难以修复的。因此,在定性加速试验中每种应力类型下至少有一个样本。对于典型的HALT,这意味着在低温加速试验、高温加速试验、振动加速试验、快速温度循环试验以及综合环境应力试验中各需要一个样本,即典型HALT中至少需要5个样本。考虑到在试验过程中有可能出现多个故障模式,因此需要额外准备2~5个样本,即推荐的总样本量为7~10个。如果不能提供这么多样本,则在实验过程中出现故障就需要进行维修。

对于定量加速试验(B类或C类试验)样本量的大小主要取决于试验的目的:即是为了评估产品的平均恒定失效率(假定其失效为指数分布)或是为了评估产品的失效时间即寿命。

指数分布的优点在于:由于累积试验时间等于样本量与单个样本试验时间的乘积,故累积试验时间随样本量的增加而增加。在这种情况下假设一个样本试验1 000 h等价于1 000个样本试验1 h。但是实际上并不如此。因此,为了更好地刻画失效模式(不同失效模式发生的时间)以及试验中不同样本的应力强度,需要确定样本量的大小和试验时间。对于1 000 h的样件加速试验,一般需要77个样本(详见JESD47B^[26])。对于指数分布的情况,试验方案标准如IEC 61123、IEC 61124都可以采用。如果产品的寿命服从何种分布不确定,就需要大样本量从而保证至少有一个样本在试验中以高概率失效。可以用累积试验时间与估计的加速因子的乘积来评估实际使用中的时间。平均失效率可以用IEC 60605-6来评估。

对于试验目的是为了评估失效时间(寿命)的加速试验,为了评估发生不同失效模式的时间需要足够长的试验时间。每一个失效模式发生的时间需要单独计算(详见IEC 61649和IEC 61710)。至少需要出现5~10个样本失效才能用威布尔分布进行试验后的分析。由于威布尔试验一般要有1/3样本失效才能停止试验,因此,需要的样本量应该为15~30个。如果出现了一个以上的失效模式,则样本量还需要乘以相应的失效模式数。如果对于产品寿命服从何种分布不是很确定,则需要大样本量从而保证至少有一个样本在试验中以高概率失效。例如,如果要求5%的样本量失效,则至少需要30个样本进行试验。为了缩短试验时间以及减少失效(破坏)的样本数,允许在试验的过程中使用突然死亡试验(详

见 IEC 61649)。

6.2 试验应力和试验时间

通常使用 IEC 60068 系列标准中的试验方法进行试验。这些标准给出了不同的试验严酷度等级,但没有给出什么情况下选用哪一种严酷度等级的试验。在 IEC 60721 中可以找到一些指导。

由于用户的不同、气候条件各异等原因,很难模拟真实的现场环境条件。因此在试验中通常选择有代表性的或更恶劣的环境条件。有些试验在“严酷条件”下进行,这种所谓的“严酷条件”是用户定义的,因此只有很低的比例(如 1%等)的产品在高应力条件下运行。

为了充分考虑应力-强度中变量的分布以及确保可靠性评估结果的可信性,在寿命试验如 C 类试验中,试验时间或循环次数往往要比实际使用中的要长。这就是所谓的应力持续时间或寿命比的倍乘(详见 5.7.2.2 或附录 B)。

由于用户的不同,所处的地理位置随时间也可能会变化,产品的使用条件各异,因此在试验条件应被简化。在实际试验操作过程中,不同的应力类型通常是按照一定的顺序施加,而不是同时施加到试验件上。如果不同的应力类型施加在不同的样本上,那么试验就发现不了不同应力之间相互作用的影响。因此建议条件允许的情况下最好在同一样本上施加综合应力,然而这一般需要复杂昂贵的试验设备。对于按一定顺序施加应力(如周期为一天或一周)的试验,在试验循环中施加综合应力尤为重要。这种试验循环就是重复所需要的试验次数,也就是常说的试验的复现性好,也方便试验设备的安排。例如在产品的跌落试验中,如果使产品每次都以相同的角度跌落,试验的复现性就很好,但是这就不能模拟产品跌落角度是随机的实际情况。

6.3 多应力条件下的元器件试验

通常情况下,多个元器件分别在不同的试验应力下进行试验(详见 JESD47B^[26]),然而在某些情况下,为了获得不同应力的交互影响,也会在同一个元器件上施加综合应力。例如对试验样件做预处理,使它们暴露在 3 倍焊接剖面温度循环中。尽管这些元器件并没有在这样的温度剖面下焊接,但是这样的温度循环条件会使样件内部产生类似的影响。再如在湿度敏感等级试验后施加热循环试验,以此分析元器件是否会发生分层传播(详见 JEDEC JESD-A113^[23]以及 JEDEC STD A104-B^[28])。为了验证产品不存在某种失效模式或验证产品的失效时间是可接受的,通常情况下会针对某一特定的失效模式来进行试验。为了减少试验工作量及验证样件批生产的技术水平,元器件试验一般在试验装置上进行,而非在元器件所在的功能组件上进行。如果不需要对产品失效的根本原因进行分析,一般推荐采用 B 类或 C 类样件加速试验,否则,采用 A 类加速试验。

6.4 组件的加速试验

组件的加速试验一般是将各个应力类型分开施加。但是由于与单个的元器件相比,组件内部有许多关联性,因此,对于组件的加速试验更有必要施加综合应力。因为 HALT(高加速极限试验)运用在小样件(如元器件)或大样件(如大系统)上的效果不是很好,所以对于 HALT,组件具有合适的尺寸和功能。A 类、B 类或 C 类试验都适用于组件的加速试验,对于 B 类或 C 类试验,所施加的最大可接受应力一般由组件中得最薄弱元器件决定。

6.5 系统的加速试验

系统的加速试验一般选用 B 类或 C 类试验,通常在一个循环中施加综合应力。如果各个元器件或组件事先已经完成了相应的加速试验,则系统级的试验主要是考核集成后的元器件或组件可靠性水平。一般而言,对于系统中的嵌入式软件在试验的过程中也需要考虑(详见 IEC 62429)。由于样本量小、试验中没有失效或只有极少数失效,很多时候一般假设失效时间是指数分布。系统的加速试验一般用于

可靠性增长试验(详见 IEC 61014, IEC 61164 及 IEC 62303)。

6.6 试验结果分析

对于定性加速试验(A类试验),试验结果是失效模式以及激发该失效模式的应力条件。如果由于现场应力和强度分布的变化使某失效模式在低应力水平下发生,则需要对该失效模式做一个彻底的分析以找到失效根本原因并作出工程评估(详见 5.1.1.2 条)。HALT 试验的目的是找到产品的薄弱环节,以便提出改进措施提高整个产品的健壮性。A类试验不能给出产品寿命或失效率的评估值。

定量加速试验(B类或C类试验)需要评估其加速因子,利用加速因子将试验时间转化为产品实际使用条件下的工作时间。应该分别对每一个失效模式进行分析。因此,应对所有故障进行失效分析。首先对发现的每一个失效模式进行评估获得其失效概率以及失效时间,然后用这些评估值来获得产品的失效概率,该失效概率是时间的函数(详见 5.2.2.1)。可以使用统计工具包括 IEC 61123、IEC 60605-6、IEC 61124 及 IEC 61649 来进行分析。

7 加速试验方法的局限性

加速可靠性试验方法的局限性主要如下(并非详尽):

- a) 加速因子的确定非常复杂,需要耗费很大的时间和成本。因此,获得的加速试验时间和可靠性指标(主要依赖于加速因子)的精度有限。
- b) 有时很难推断出综合应力中哪一个应力导致了某一特定的失效模式发生以及对该失效模式的影响程度。因此试验过程中可能高估或低估加速因子的综合影响。
- c) 试验样本有可能过大或者太昂贵。这些情况下,样本量不能满足试验要求,使得试验的置信水平不高。
- d) 试验设备特别是那些自动测试、监控设备由于太复杂以至非常昂贵或不易管理。
- e) 由于样本中大的热质量块(large thermal masses)或者应力比的局限性,一些加速试验手段可能无法实现。因此,由于缺乏有效的加速,试验也要耗费巨大的时间和成本。
- f) 在 HALT 试验中,试验样本量一般只有一个,不能代表所有产品的平均强度水平;而且个体的破坏性极限也不相同,小样本量试验有可能得出错误的结论。也有可能试验样本的强度要高于产品的平均水平。
- g) 在元器件的试验中,一般是基于失效时间确定其失效曲线,而这些曲线又用于确定加速试验条件以及为元器件的可靠性评估提供信息。当元器件很小且在试验中完全被破坏时(烧毁或其物理性能遭到了极大的改变),通常无法确定是哪一种失效模式导致其失效。因此试验结果拟合得到的分布可能是错误的,从而提供了错误的可靠性信息。
- h) 加速试验得到的信息与试验中的应力及各应力组合有关,因此,如果该产品以不同的方式或在不同的环境中使用时,试验结果不能用于评估其可靠性,必须重新进行试验。
- i) 由于产品可能与试验应力不同的应力水平下使用,通过加速试验得到的量化评估结果有可能不能用于预计单个产品的可靠性。

附 录 A
(资料性附录)
高加速极限试验(HALT)

A.1 HALT 试验过程

HALT 的典型试验步骤如下:

- 第 1 步 确定极限应力水平,如果到达该极限应力试验样件仍没有失效则停止试验。
- 第 2 步 安装:将受试产品安装在 HALT 试验箱中,并进行必要的电连接、信号输入/输出连接、监测设备连接等。使用传感器(如温度传感器、加速度传感器等)监测施加在受试产品上的应力水平。应该注意的是各种连接应能够承受住试验过程中的应力。在某些试验中,受试产品的某一部分不用施加高应力,从而将此部分放在试验箱外,即没有对这一部分进行 HALT 试验;受试产品应安装在 HALT 振动夹具上从而保证振动或冲击剖面能顺利的施加到试验件上。紧固夹具不应改变试验箱内空气的快速流动。在某些情况下,可能有必要拆除机箱外壳,从而使箱内气流能进入到试验件内部。如果受试产品的塑料外壳不能承受高温或高振动加速度,试验过程中有必要将其拆除。
- 第 3 步 初始化试验:受试产品在 HALT 试验前进行功能测试。监控设备也需要进行测试以确保其功能正常。连接到受试产品上电缆等也需要检查以确保其在高应力(比如高的空气流动)下的完整性和正常工作。
- 第 4 步 增加试验应力到规定的应力水平。如果受试产品是连续监控的,则应力水平可以持续增加。如果不能连续监控,则应力水平要逐步增加,保证受试产品在每一应力水平下稳定后再进行功能测试,收集可能的失效信息(如果有故障发生)。减小应力,检测试验件的功能是否能够恢复。如果功能可以恢复,则使受试产品失效的应力水平就是产品的工作应力极限(OL)。
- 第 5 步 继续增加应力水平,直到受试产品的功能失效,即使降低应力水平也不能恢复。则该应力水平就是产品的破坏应力极限(DL)。在某些情况下,即使出现了一个永久性损坏(如裂纹),当应力消除时产品的功能仍然可以恢复。此时可以在产品上施加一个小振动量级,运用检测筛选(detection screen)对产品进行功能测试来发现或激发间歇故障。找到产品的破坏应力极限后,将其从试验箱中移除,以便能够收集更多的失效信息,确定其失效模式,并找到其失效的根本原因。在某些情况下,进行失效分析的受试产品将不再继续试验。这种情况下,需要用新的受试产品继续进行试验。如果可能的话,出现的故障应该及时修复,并加强产品薄弱部位的设计(如增加支撑或填充材料)或进行保护(如在高温试验中引入冷空气或低温试验中隔绝冷空气等)。在某些情况下,高应力试验中可以对设计的薄弱部分进行保护或将此部分移除试验箱,并保持与试验箱内的其余部分的相关连接。这样可以继续进行试验寻找下一个薄弱环节。
- 第 6 步 继续进行试验直到找到步骤 1 中确定的极限应力。
- 第 7 步 施加另一类型的应力(如高温)重复步骤 2 至步骤 6。
- 第 8 步 在工作应力极限范围内重复步骤 2 至步骤 6 进行循环试验。
- 第 9 步 对于传统的 HALT 试验,重复步骤 2 至步骤 5 进行振动/冲击试验。
- 第 10 步 对于传统的 HALT 试验,将步骤 8 中的温度循环与步骤 9 中的振动/冲击试验结合,进行综合应力试验。

- 第 11 步 重复步骤 2 至步骤 5 进行综合应力试验。
- 第 12 步 进行故障分析,以确定在实际使用中低应力下可能出现哪一种失效模式,评估设计裕度要考虑最严酷的现场条件和制造过程的变更。
- 第 13 步 完成试验报告。当实施了设计改进措施后试验件应重新进行试验,从而证明改进措施的有效性(详见 IEC 60300-3-5/IEC 60300-3-5)。
- 根据产品的类型及其对应力的敏感性,试验应力的施加顺序可以适当变化。

A.2 案例一:DC/DC 转换器的 HALT 试验结果(见表 A.1)

该 DC/DC 转换器是安装在飞机上的一个产品。

表 A.1 DC/DC 转换器 HALT 试验结果

试验条件	试验结果	故障现象	可能的故障原因	采取的改进措施
低温	LOT:−70 ℃(启动) LOT:−76 ℃(工作) 没有找到其 LDT	启动不稳定	5 V 和 3.3 V 电源不能在低温 条件下正常启动	无 受技术条件的限制
高温	UOT:125 ℃ 没有找到其 UDT	12 V 电源无输出	产品内部极限温 度使其突然关闭	在软件中设置阈值
振动	OVL:29.43 g r.m.s 588.6 m/s ² r.m.s VDL:588.6 m/s ² r.m.s	螺钉松动; 电压不稳定	螺钉太松了; 手工焊接失效	运用 Loctite 理论 改进焊接工艺
−70 ℃~125 ℃ 的温度循环: 4 min~10 min 停留时间	20 个循环后没 有发现故障	—	—	—
振动和温度的组合 试验:40 g r.m.s., 50 g r.m.s., 60 g r.m.s. −70 ℃~+125 ℃	—	印制电路板上 掉了三个组件; 5 V 直流电源故障	—	重新查看生产过程; 需要进一步查找故障 原因,研究改进措施

A.3 案例二:医疗产品的 HALT 试验结果(见表 A.2)

该产品为医疗诊断的专用设备。

表 A.2 DC/DC 转换器 HALT 试验结果

试验条件	试验结果	故障现象	可能的故障原因	采取的改进措施
低温	LOT:−35 ℃(模块温度) LOT:−0 ℃(PC) 没有找到其 LDT	−20 ℃时输出不稳定; −35 ℃时系 统停止运行	—	没有找到故障原因但 是在 10 ℃时产品出 现同样的故障

表 A.2 (续)

试验条件	试验结果	故障现象	可能的故障原因	采取的改进措施
高温	UOT:59 ℃; 60 ℃ 70 ℃; 没有找到其 UDT; 60 ℃ 70 ℃; 没有找到其 UDT	切换任务后系统停止运行; 风扇不能正常启动; 3.3V 电源短路; 键盘故障	—	振荡器故障; 器件失效原因待分析
振动	OVL:49.05 m/s ² r.m.s OVL:196.2 m/s ² r.m.s OVL:490.5 m/s ² r.m.s VDL:294.3 m/s ² r.m.s	键盘故障; 输出不更新; 屏幕出现线; 键盘无响应; 前段终止模块故障	—	器件在 70 ℃时重新工作 电容器和电缆松动; 晶体缺陷; 过滤器中的 4 个 传感器短路
温度循环: -20 ℃~85 ℃; 停留时间 10 min	6.5 个循环后没有发现故障	—	—	—
振动和温度的组合试验: 30 g,40 g, 50 g r.m.s; -20 ℃~85 ℃	98.1 m/s ² r.m.s 和温度循环; 294.3 m/s ² r.m.s 和温度循环; 294.3 m/s ² r.m.s 加+80 ℃试验; 490.5 m/s ² r.m.s 加-20 ℃试验; 490.5 m/s ² r.m.s 和温度循环; 490.5 m/s ² r.m.s 和温度循环	模块停止运行; 键盘故障; 模块停止运行; 语言转换不能启动; 两个功能不稳定	—	排除故障; 组件和复位失效; SW—电池 模块缺陷; 过滤器失效; 需要进一步检查

将实际使用中经常发生的前 10 个故障与 HALT 试验中发现的故障相比,可以发现除了一个故障,其他所有的故障都在 HALT 试验中激发了。那个未被激发的故障是由于发生该故障的模块没有在 HALT 试验箱中进行试验。

A.4 案例三:音响设备模块的 HALT 试验(见表 A.3)

该模块用在国内某音响设备中。

表 A.3 某音响设备模块的 HALT 试验结果

试验条件	试验结果	故障现象	可能的故障原因	采取的改进措施
低温	LOT:-55 ℃; 没有找到其 LDT	噪声在收音机和 CD 的传递过程中发生变化	—	无
高温	没有找到 UOT, 没有找到 UDT	由于测试电缆故障, 试验在 110 ℃时停止	—	无
振动	OVL:245.25 m/s ² r.m.s; 294.3 m/s ² r.m.s VDL:343.35 m/s ² r.m.s	5 个组件 1 组件	—	改善组件安装情况

表 A.3 (续)

试验条件	试验结果	故障现象	可能的故障原因	采取的改进措施
温度循环： -55℃~100℃， 停留时间：30 min， 10 个循环	—	大质量组件的焊点 初始应力状况 (10 个循环后不 是很严酷)	—	焊点分析
综合环境： 振动量级(r.m.s)： 10 g, 20 g, 30 g， 40 g, 50 g； 温度：-55℃~110℃	—	在低温条件下 CD 机出现故障	—	改善这 2 个器件 的安装情况

注：更多详细信息参见文献[15]。

附录 B

(资料性附录)

加速可靠性符合性试验、增长试验设计

B.1 使用环境确定

在加速可靠性试验方案制定之前,应充分分析产品的使用环境、环境剖面、工作剖面及产品的功能,以准确制定加速可靠性加速可靠性试验方案。相关的应力加速方法已在其他文献中作了详细阐述(详见参考文献[3,4,6,8,9,10,12,13])。所有方法都是基于一个假设:加速试验能反映产品的环境应力和工作应力,以及受试样品是否确实发生了相关的失效(成功/寿命试验)。通过加速试验,可以改进产品设计,促使产品具备承受相关应力的能力——这就是可靠性增长试验。该方法将在 B.2 做简要的介绍,相关数据分析方法将在 B.8 详细说明。

B.2 技术参数确定

假设产品在自然环境应力和工作应力下都是可靠的,产品全寿命周期的可靠度就可以表达为各个应力水平下的可靠度的乘积。对于某一寿命时刻 t_0 ,产品的可靠性可以用以下表达式表示:

$$R_{Item}(t_0) = \prod_{i=1}^S R_{Stress,i}(t_i) \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

上式中, $R_{Stress,i}$ 表示各应力对应的可靠度(工作应力或环境应力)。环境应力包括气候条件(如热暴露、热循环、湿度、温变率等)、机械应力(如振动,包括随机振动和正弦振动或两者兼有;冲击,如车辆的颠簸,运输过程中遇到的冲击,关门时产生的冲击等)。这些应力的选用及量值取决于产品实际使用中的环境条件,取平均值或极限值。另一种应力与产品实际工作有关,以工作应力的形式体现,取决于产品的任务剖面。例如,启动/断开循环过程中产生的应力、电应力、电压的变化等。

产品的可靠度是通过分配落实到每个单元中。根据产品预期的任务剖面及其对特定环境应力的敏感性,各个应力下可靠度的分配值略有不同。在可靠度分配的过程中也要考虑各种因素的交互作用。试验中各个应力作用的时间是通过累积损伤模型和应力/强度标准计算获得。因此,试验中的等效损伤发生在各个应力量值逐渐增大的过程中,但是所有的应力都在产品的设计极限范围之内。

在加速可靠性试验中,为了模拟产品的实际使用环境,所有的测试单元在整个试验过程中都要经受每个应力的作用。

在可靠性验证试验中,通常用应力平均持续时间 μ_{S_i} 来描述各个应力所需的持续时间,该参数也是最终衡量产品强度的因素之一。这里的负载和应力量级与产品实际使用过程中的量级一样,但是持续时间是产生等量累积损伤来衡量的,并不是实际使用中的作用时间。

在假设条件——试验中的应力水平与实际使用中的应力水平一样——成立的条件下,损伤累积量取决于各个应力的作用时间。对于某个应力 S_i 而言,可靠度可以用下式表示:

$$R_i = \Phi \left[\frac{S_i \times \mu_{S_i} - S_i \times \mu_{L_i}}{\sqrt{(S_i \times \mu_{S_i})^2 + (S_i \times \mu_{L_i})^2}} \right] \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

简化可得:

$$R_i = \Phi \left[\frac{\mu_{S_i} - \mu_{L_i}}{\sqrt{(\mu_{S_i})^2 + (\mu_{L_i})^2}} \right] \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

为了更便捷的得到施加的应力,其持续时间通常被认为是实际预期载荷作用时间的倍数,用变量 k

表示。如果没有获得更精确的数据信息,持续时间的标准偏差可以假定是各个实际应力持续时间平均值的倍数。

$$R_i(t_0) = \Phi \left[\frac{\mu_{S_i} - \mu_{L_i}}{\sqrt{(a \times \mu_{S_i})^2 + (b \times \mu_{L_i})^2}} \right] \dots\dots\dots (B.4)$$

简化可得:

$$R_i(t_0, k, \mu_{L_i}) = \Phi \left[\frac{k - 1}{\sqrt{(a \times k)^2 + (b)^2}} \right] \dots\dots\dots (B.5)$$

为了研究可靠度与因子 k (持续时间的倍数) 的关系, 方程(B.5) 中三种不同的假设条件下的情况见图 B.1。

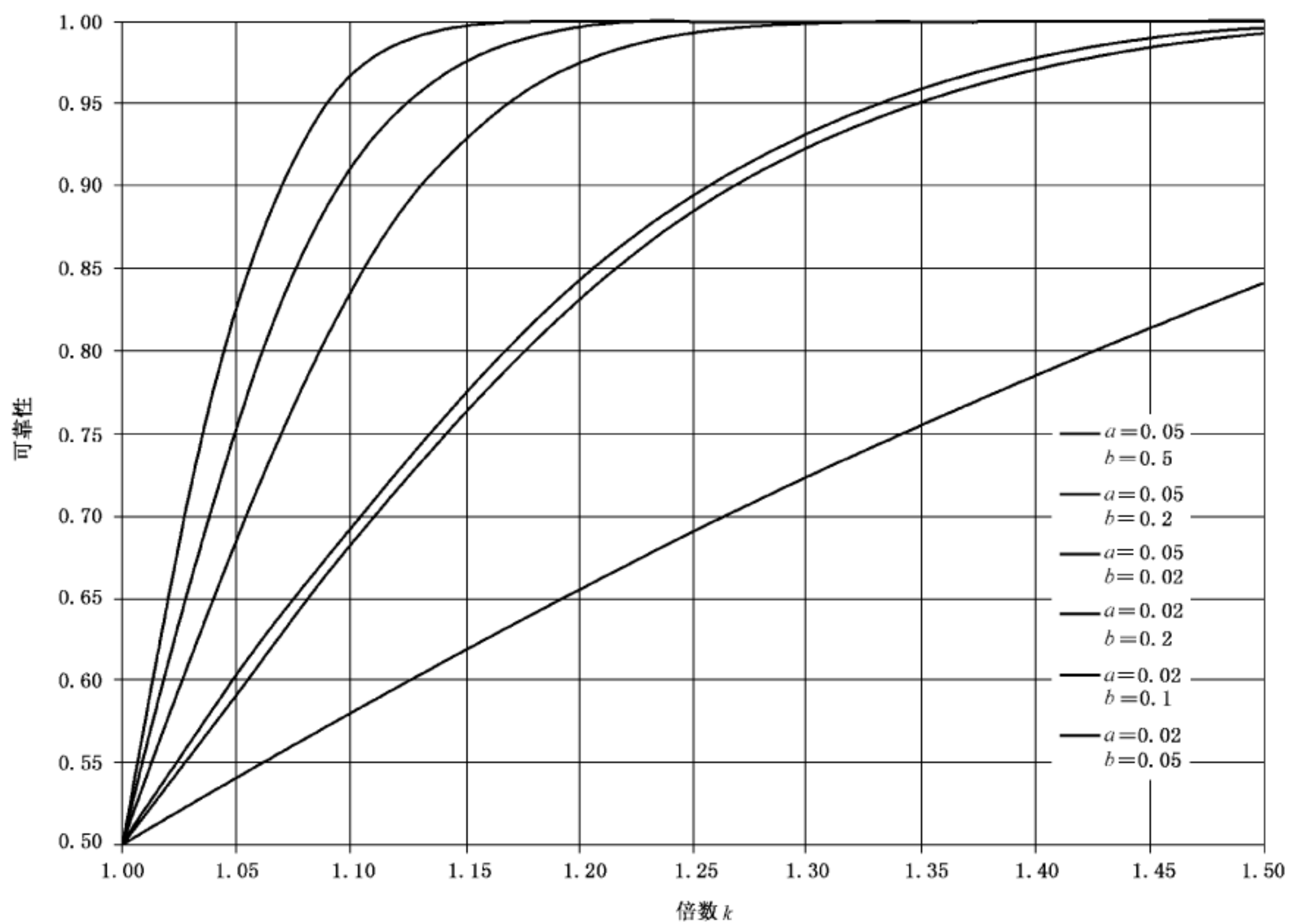


图 B.1 a 与 b 各组合下可靠度与 k 之间的关系

图 B.1 给出了某个特定应力下的可靠度 $R_i(t_0)$, 为了描述整个产品的可靠性, 就必须根据每一个应力水平的不同来进行可靠度的分配。为了获得分配的可靠度, 放大倍数 k 增大了试验中每个应力作用的持续时间。

图 B.2 是当 $a=0.1$ 、 $b=0.1$ 时可靠度与放大倍数 k 之间的关系。

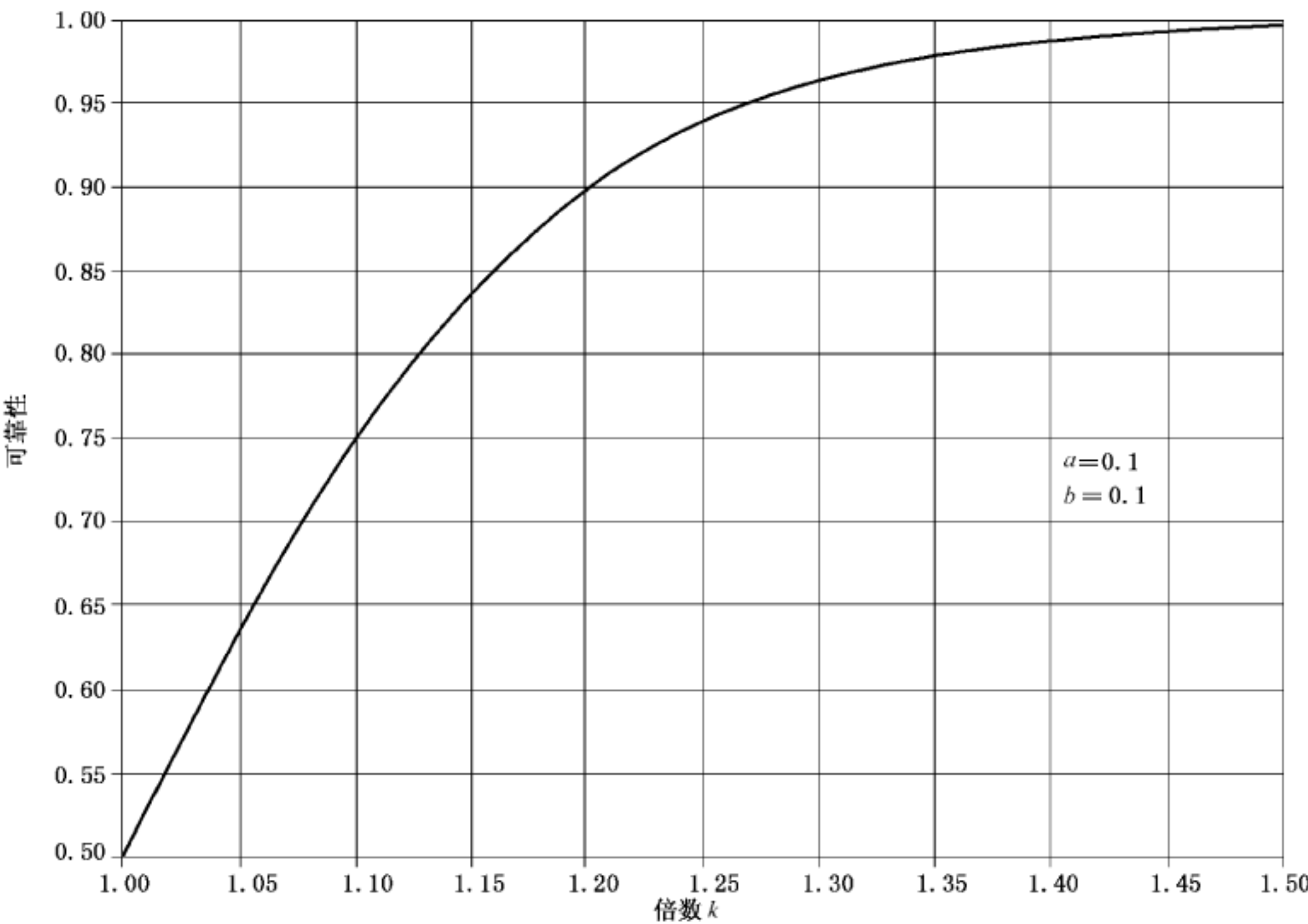


图 B.2 放大倍数 k 的确定

可靠性试验在产品实际使用剖面的基础上进行的。表 B.1 列出了试验中常用的一些参数,但仅是一些基本应力参数的一个案例。在这个案例中,所有的参数都是以常数出现,因此,此表并没有给出实际剖面中所有参数的使用情况。

表 B.1 某汽车电子设备的环境应力条件

参数	符号	参数值
寿命	t_0	10 y=87 600 h
可靠度	$R_0(t_0)$	0.8
工作时间	t_{ON}	2 h/d=7 300 h
工作时温度	T_{ON}	65 ℃
非工作时间	t_{OFF}	22 h/d=80 300 h
非工作时温度	T_{OFF}	35 ℃
温度循环	ΔT_{Use}	45 ℃,每天两个循环
总循环次数	N_{Use}	7 300
温变率	ϵ	1.5 ℃/min
随机振动	W_{Use}	16.68 m/s ² r.m.s
相对湿度	RH_{Use}	50 %
激活能	E_a	1.2 eV

B.3 整机加速可靠性试验

可靠性验证的主要原理取决于失效率加速因子：

$$\lambda_A = A_{Test} \times \lambda_0 = \sum_{i=1}^{N_S} (A(\prod_k A_k)_i \times \lambda_i) \dots\dots\dots (B.6)$$

式中：

λ_0 ——实际使用条件下的失效率；

λ_A ——加速失效率；

A_i ——每个应力下的加速因子；

λ_i ——每个应力水平下的失效率；

N_S ——应力水平数；

$\prod_k A_k$ ——在应力 i 作用下各失效模式加速因子的乘积。

因此，总的等效加速因子为：

$$A_{Test} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} (A(\prod_k A_k)_i \times \lambda_i)}{\lambda_0} \dots\dots\dots (B.7)$$

$$A_{Test} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} \left(A(\prod_k A_k)_i \times \left[-\frac{\ln(R_i(t_0))}{t_0} \right] \right)}{\lambda_0} \dots\dots\dots (B.8)$$

根据假设对上式进行简化，得到每个应力水平下的可靠度为：

$$R_i(t_i) = R_S(t_0) = \sqrt[N_S]{R_0(t_0)}$$

$$\lambda_i = \lambda_S = \text{const} \dots\dots\dots (B.9)$$

$$\lambda_0 = N_S \times \lambda_S$$

$$A_{Test} = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} \left(A(\prod_k A_k)_i \times \left[\frac{1}{N_S} \times \frac{\lambda_0 \times t_0}{t_0} \right] \right)}{\lambda_0} \dots\dots\dots (B.10)$$

因此，总的加速因子可以表示为：

$$A_{Test} = \frac{1}{N_S} \times \sum_{i=1}^{N_S} (A(\prod_k A_k)_i) \dots\dots\dots (B.11)$$

B.4 可靠性验证试验设计案例

B.4.1 概述

可靠性验证试验是基于恒定的失效率(或失效强度)的假设条件上的。试验初期用平均故障前时间(MTTF)或平均故障间隔时间(MTBF)来衡量产品的可靠性，因此，这些试验分别适用于无备件的试验(MTTF)和使用备件修复故障件或修复试验单元(MTBF)。

在各种情况中，试验中都要考虑可靠性的需求或目标、生产者及客户的风险或对试验结果的置信度。表 B.1 是汽车电子装置使用环境的一个例子。

为了尽可能确保不同应力之间的相互作用，在试验设备或设施允许的前提下，通常在同一个试验中

施加多重应力。因此试验中经常会出现热循环与热暴露、工作循环以及电应力相结合。这些情况下,应力分布在整个试验过程中。这样的试验就不可能与其他试验如湿度、振动等同时进行。通常会假设试验中的应力是均匀分布的,这样就能保证应力单元的累积损伤与实际使用中的一致性。

在表 B.1 中的例子中,10 年的可靠度是 0.8,相应的 MTBF 值为:

$$\theta_0 = -\frac{t_0}{\ln(R_0(t_0))} = 392\,000\text{ h} \quad \dots\dots\dots(\text{B.12})$$

试验时间的长短取决于试验中允许出现多少个故障。例如 IEC 61124 标准中 SPRT 方法第 8 章 (SPRT Method A8):假设试验时间(θ_1 的倍数)等于 5,那么试验总时间 $T=2\,000\,000\text{ h}$ 。如果有 50 个试验样件,则需要连续试验 50 000 h(这对试验花费和时间上都是难以承受的)。

根据表 B.1 所给的应力条件,考虑每个应力作用下的产品的可靠度为:

$$R_i(t_0) = [R_0(t_0)]^{1/4} = 0.946 \quad \dots\dots\dots(\text{B.13})$$

假设常数 a、b 的值分别为 0.05 和 0.2,则根据图 B.2 的曲线可以得到放大倍数 $k=1.5$ 。

B.4.2 热循环

$$\begin{aligned} \Delta T_{Use} &= 45\text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_{Test} &= 105\text{ }^{\circ}\text{C} \\ \Delta T_{Test} &= 105 - (-20) = 125\text{ }^{\circ}\text{C} \\ \xi_{Use} &= 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min} \\ \xi_{Test} &= 10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min} \\ m &= 2.5 \\ N_{Test} &= N_{Use} \times k \times \left(\frac{\Delta T_{Use}}{\Delta T_{Test}}\right)^m \times \left(\frac{\xi_{Use}}{\xi_{Test}}\right)^{1/3} \\ N_{Test} &= 452 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(\text{B.14})$$

B.4.3 热暴露,热浸

将关机温度的持续时间折算至开机条件:

$$\begin{aligned} t_{ON-N} &= t_{ON} + t_{OFF} \times \exp\left[-\frac{E_a}{k_B} \times \left(\frac{1}{T_{OFF} + 273} - \frac{1}{T_{ON} + 273}\right)\right] \\ t_{ON-N} &= 8\,754\text{ h} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(\text{B.15})$$

计算所需的加速试验时间:

$$\begin{aligned} t_{T-Test} &= t_{ON-N} \times k \times \exp\left[-\frac{E_a}{k_B} \times \left(\frac{1}{T_{ON} + 273} - \frac{1}{T_{Test} + 273}\right)\right] \\ t_{T-Test} &= 168.1\text{ h} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(\text{B.16})$$

考虑应力间的交互作用,将热暴露试验与热循环试验相结合,并将热暴露施加到热循环中的高温阶段,确定高温持续时间:

$$t_{TD} = \frac{t_{T-Test}}{N_{Test}} = 0.37\text{ h} = 22.2\text{ min} \quad \dots\dots\dots(\text{B.17})$$

由于设备的温变率是 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、高温、低温阶段稳定时间为 5 min,因此可以得到热循环持续时间为:

$$t_{TC} = 2 \times (\text{温变时间}) + (\text{稳定时间} + \text{热浸时间}) + \text{冷浸时间}$$

$$t_{TC} = 2 \times \frac{125}{10} + 22.3 + 5 = 52.3 \text{ min} = 0.875 \text{ h}$$

.....(B.18)

B.4.4 湿度

试验条件: $RH_{Test} = 95\%$, 温度 $T_{RH} = 85^\circ\text{C}$ (试验箱内温度 65°C + 产品内部温升 20°C)。

以工作时间为基准, 对湿度暴露时间进行归一化处理:

$$t_{RH_Test} = t_{ON_N} \times \left(\frac{RH_{Use}}{RH_{Test}} \right)^h \times \exp \left[-\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{ON} + 273} - \frac{1}{T_{RH} + 273} \right) \right]$$

.....(B.19)

上式中参数 h 为湿度加速因子的幂指数, $h = 2.3$ 。则 $t_{RH_Test} = 300 \text{ h}$ 。

B.4.5 振动试验

十年所需的行车里程是 240 000 km, 也就是每个轴向以 1.7 g r.m.s 的强度振动 150 h。

$$W_{Use} = 1.7 \text{ g r.m.s.}$$

$$W_{Test} = 3.2 \text{ g r.m.s.}$$

$$k = 1.5$$

$$t_{Vib_Test} = k \times t_{Vib_Use} \times \left(\frac{W_{Use}}{W_{Test}} \right)^\omega \quad \text{.....(B.20)}$$

上式中, $\omega = 4$, 则 $t_{Vib_Test} = 18 \text{ h/轴}$ 。

振动加速试验中的应该与不加速振动中的剖面一致(具有相同的振动频率)。如果两者的剖面不同, 则该加速是没有意义的。

B.4.6 加速试验小结及整机加速试验

对于上述的四种加速试验, 加速因子可以通过下式获得:

$$A_{TC} = \left(\frac{\Delta T_{Test}}{\Delta T_{Use}} \right)^m \times \left(\frac{\zeta_{Test}}{\zeta_{Use}} \right)^{1/3} = \frac{k \times N_{Use}}{N_{Test}} = 24.2$$

$$A_{TD} = \left[-\frac{E_a}{k_B} \times \left(\frac{1}{T_{Test} + 273} - \frac{1}{T_{ON} + 273} \right) \right] = \frac{k \times t_{ON_N}}{t_{T_Test}} = 52.1$$

.....(B.21)

$$A_{RH} = \left(\frac{RH_{Test}}{RH_{Use}} \right) \times \exp \left[-\frac{E_a}{k_B} \times \left(\frac{1}{T_{ON} + 273} - \frac{1}{T_{RH} + 273} \right) \right] = \frac{k \cdot t_{ON_N}}{t_{RH_Test}} = 43.7$$

$$A_{vib} = \left(\frac{W_{Test}}{W_{Use}} \right)^\omega = \frac{k \times t_{vib_Use}}{t_{vib_test}} = 12.6$$

为了得到整机的加速因子, 通常会作如下假设: 振动和热循环应力会激发相同的失效模式, 而热辐射及湿度会激发另外一种失效模式。则整机加速因子为:

$$A = \frac{A_{TC} \times A_{Vib} + A_{RH} \times A_{TD}}{N_S} = 645 \quad \text{.....(B.22)}$$

应当注意的是这种方法与直接将所有加速因子相乘的常规做法之间的区别, 后者可能会高估整机加速试验因子:

$$A_{SP} = A_{TC} \times A_{Vib} \times A_{RH} \times A_{TD} = 6.92 \times 10^5 \quad \text{.....(B.23)}$$

从上式结果可以很直观的看出: 这种常规做法很不切实际, 可能会导致极其错误的可靠性结论。

加速试验可以得到以下结论:

$$\lambda_0 = -\frac{\ln[R_0(t_0)]}{t_0} = 2.54 \times 10^{-6}$$
$$\lambda_{Test} = -\frac{\ln[R_0(t_0)]}{t_0} \times A = 1.64 \times 10^{-3}$$

.....(B.24)

或者用 MTBF 表示：

$$\theta_0 = 3.93 \times 10^5 \text{ h}$$
$$\theta_{Test} = 608.7 \text{ h}$$

根据实际需要,可以用验证试验验证上述的 MTBF 指标。然而,试验并不验证其最高指标即 $\theta_0 = 3.93 \times 10^5 \text{ h}$,而是验证该指标值的 1/600,即 $\theta_{Test} = 609 \text{ h}$ 。如果非加速试验需要 2 000 000 h,则加速试验仅需要 3 000 h 就能达到同样的效果。

B.5 加速可靠性增长试验数据分析案例

B.5.1 概述

本案例中,使用到的试验样件参数如表 B.2 所示：

表 B.2 产品使用的参数

应力/要求/样品属性	符号	单位
产品寿命	t_0	h
工作时间	t_a	h/d
工作时内部温度	T_{ON}	℃
不工作时内部温度	T_{OFF}	℃
温度变化量	ΔT_{Use}	℃
温变率	ζ_{Use}	℃/min
热循环次数	c_T	次/d
高出环境温度量	ΔT	℃
相对湿度	RH_{Use}	%
产品行程	D	km
运行振动量级	W_{Use}	g
操作循环(开/断)	c	次/d

为了达到不同应力对试件产生共同作用,通常在同一个试验中施加多重应力。因此,试验中经常会出现热循环与热暴露、操作循环以及电应力相结合。在这些情况下,应力施加会贯穿在整个试验过程中。因为这样的试验不可能与湿度、振动等其他试验同时进行,所以可以假设试验中的应力是均匀分布的,这样就能保证应力单元的累积损伤与实际使用中的一致性。

B.5.2 加速试验及数据分析

下面就使用标准的加速方法进行加速试验的设计。

可靠性增长试验数据分析中必不可少的信息就是失效时间。试验中每个应力的持续时间表示寿命

周期中各个应力作用下的寿命,试验单元在各个应力下的试验时间(以循环次数或时间表示)都要转换为相应的寿命时间。这可以通过试验的“减速”以及将试验次数转化为实际持续时间来实现。下面将以主要的应力试验作说明。

B.5.3 热循环

在表 B.2 中,热循环次数以每天 n 次循环的形式给出。在本例中假设该循环次数是汽车的冷启动次数 c_T (一般假设 $c_T = 2$)。当产品的寿命是以小时给出且热循环次数以“次/d”给出时,则每一个热循环对应的小时数为: $24/c_T$ 。

热循环试验一般通过增大试验温度变化量 ΔT_{Test} 与实际温度变化量 ΔT_{Use} 之比来实现加速。因此,热循环加速因子为:

$$A_{TC} = \left(\frac{\Delta T_{Test}}{\Delta T_{Use}} \right)^m \quad \dots\dots\dots (B.25)$$

也可以通过增大试验温变率 ζ_{Test} 与实际温变率 ζ_{Use} 之比来实现进一步的加速:

$$A_{\text{温变率}} = \left(\frac{\zeta_{Test}}{\zeta_{Use}} \right)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (B.26)$$

因此,试验中总的热循环次数为:

$$N_{TC_Test} = \frac{N_{TC_Use} \times k}{A_{TC} \times A_{\text{温变率}}} \quad \dots\dots\dots (B.27)$$

这就是说,通过 x 个循环次数的加速试验可以推出产品实际使用寿命为(注意的是一个热循环所需的时间为 $24/n$):

$$t_{TC_x} = x \times A_{TC} \times A_{\text{温变率}} \times \frac{24}{c_T} \quad \dots\dots\dots (B.28)$$

B.5.4 热辐射试验、热浸时间

根据所处位置、操作等的不同,在实际使用的过程产品中会暴露在多个不同温度下。为简单起见,假设产品只处在如下温度条件下(见表 B.1):一个是产品工作时的内部温度(t_a h/d,则共 $t_a \times \frac{t_0}{24}$ h),另一个是产品不工作时的温度,时间为: $(24 - t_a)$ h/d,总时间为 $(24 - t_a) \times \frac{t_0}{24}$ h。

为了确定热循环加速试验,根据高温下的工作时间,将产品非工作时间进行等效的归一化处理:

$$t_{TD_Use} = t_a \times \frac{t_0}{24} + (24 - t_a) \times \frac{t_0}{24} \times \exp \left[-\frac{E_a}{k_B} \times \left(\frac{1}{T_{OFF} + 273} - \frac{1}{T_{ON} + 273} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (B.29)$$

则试验温度下的热加速因子:

$$A_{TD} = \exp \left[\frac{E_a}{k_B} \times \left(\frac{1}{T_{ON} + 273} - \frac{1}{T_{Test} + 273} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (B.30)$$

热辐射试验的总试验时间为:

$$t_{TD_Test} = \frac{t_{TD_Use} \times k}{A_{TD}} \quad \dots\dots\dots (B.31)$$

如果某个失效发生在热浸试验中 y 时刻,则产品在其寿命周期中相应的失效时间为:

$$t_{TD_y} = A_{TD} \times \frac{t_0}{t_{TD_Use}} \times y \quad \dots\dots\dots (B.32)$$

通常情况下,热浸(thermal dwell)分布在热循环过程中(N_{TC_Test}),每个循环下极限温度的持续时

间为:

$$t_{St} = \frac{t_{TD_Test}}{N_{TC_Test}} \quad \dots\dots\dots (B.33)$$

上式中, t_{St} 为试验中极限温度的作用时间。

则总的热循环试验时间为:

$$t_{TC_Test}(h) = \frac{(T_{Test} - T_{Amb})}{\xi_{Test} \times 60} + t_{St} + \frac{t_{TD_Test}}{N_{TC_Test}} + \frac{(T_{Test} - T_{Low})}{\xi_{Test} \times 60} + t_{Test_Low} + \xi \times \frac{(T_{Amb} - T_{Low})}{\xi_{Test} \times 60} \quad \dots\dots\dots (B.34)$$

为了保证试验循环中的温度变化能产生累积损伤,试验中必须有低温停留时间 T_{Test_Low} 。低温停留时间应该不小于试验件温度稳定时间。

在加速热循环试验中,若试验数据以失效时间的形式给出,且该失效时间与热辐射量 z 有关(这在实际使用中是很常见的一种情况),意味着热停留(thermal dwell)总时间应该与辐射时间相关 t_z :

$$t_{TD_z} = \frac{z(h)}{t_{TC_Test}(h)} \times \frac{t_{TD_Test}}{N_{TC_Test}} \times A_{TD} \times \frac{t_0}{t_{TD_Use}} \quad \dots\dots\dots (B.35)$$

B.5.5 湿度试验

湿度加速试验是通过增大相对湿度以及试验温度的方式进行加速的。与热浸试验类似,热加速试验也是通过将工作温度持续时间 T_{TD_Use} 进行等效归一化处理。湿度试验的加速因子为:

$$A_H = \left(\frac{RH_{Test}}{RH_{Use}} \right)^h \times \exp \left[\frac{E_a}{k_B} \times \left(\frac{1}{T_{ON} + 273} - \frac{1}{T_{H_Test} + 273} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (B.36)$$

则湿度加速试验的总时间为:

$$t_{H_Test} = \frac{t_{TD_Use}}{A_H} \quad \dots\dots\dots (B.37)$$

若某个与湿度相关的失效发生在试验中的 w 时刻,则产品在其寿命周期中相应的失效时间为:

$$t_{H_w} = A_H \times \frac{t_0}{t_{TD_Use}} \times w \quad \dots\dots\dots (B.38)$$

B.5.6 振动试验

对于振动试验, D 公里行程等同于产品寿命为 t_0 小时。通常,在非加速试验中,汽车上 1 h 的振动表示该汽车大概运行了 1 600 km。

振动加速试验持续时间(h/轴向):

$$t_{Vib_Test} = \frac{D}{1\,600} \times \left(\frac{W_{Use}}{W_{Test}} \right)^M \quad \dots\dots\dots (B.39)$$

$$A_{Vib} = \left(\frac{W_{Test}}{W_{Use}} \right)^M$$

其中,参数 M 为振动加速幂指数,为一常数。如果试验中无法得到其具体值,可以假设其值为 4。

与振动有关的故障可能发生在试验中的 v 时刻(任一轴向振动),则产品在其寿命周期中相应的失效时间为:

$$t_{vib_v} = v \times A_{Vib} \times \frac{t_0 \times 1\,600}{D} (h) \quad \dots\dots\dots (B.40)$$

B.5.7 工作循环

当操作循环次数以 c 次/d 的形式给出时,则一个操作循环需要的时间为 $24/c$ h。

当应力水平不能再提高时,操作循环加速通过压缩时间来加速(time compression)。因此,若某一故障发生在第 o 个操作循环中,则实际失效时间为:

$$t_{oc_o} = \frac{24}{c} \times o(h) \dots\dots\dots (B.41)$$

B.6 试验数据分析

B.6.1 概述

可靠性增长试验的数据分析中必不可少的信息是失效时间。试验中设计每个应力的持续时间等同于寿命周期中各个应力作用下的时间,试验单元在各个应力下的试验时间(以循环次数或时间表示)都要转换为相应的寿命时间。这可以通过试验的“减速”以及将试验次数转化为实际持续时间来实现。基本的应力试验操作如下。

在使用可靠性增长寿命试验中出现的失效来计算实际使用中相应的失效时间时,一般按照升序排列并根据可靠性增长模型进行分析。通常首选 AMSAA/Crow 模型,在只有少量试验失效时,推荐选用杜安模型。

在以下的案例中,为了简化分析,选用的计算模型是杜安图解模型。

B.6.2 试验数据分析案例

如果在加速方程中嵌入了数据表格,则数据分析相对而言就会容易的多。

表 B.3 是给定使用概况下汽车电子设备的试验案例。

当失效时间是以加速试验时间的形式给出时,可以编制工作表来计算产品实际使用中的失效时间以及寿命,见表 B.4。该例中假设除了开/关循环外,故障可能发生在每个试验应力下。

表 B.3 产品的使用剖面

参数/要求/使用	参数值
设计寿命	10 y
工作时间(开启)	2 h/d
总的行驶距离	240 000 km
平均热偏差/每天	45 °C
电子设备安装部位的随机振动	9.81 m/s ²
温变率	1.5 °C/min
每天的热循环次数(汽车冷启动次数)	2
汽车行驶时产品内部温度	55 °C
汽车非工作时产品内部温度	25 °C
使用中的平均相对湿度	50%

表 B.4 确定实际使用失效时间的工作表

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	t_0	t_a	T_{ON}	T_{OFF}	E_a	k_a	n	k	m	c_r	h	
2	hours	H/day	°C	°C	eV	eV/K						
3	87 600	2	55.00	25	0.8	8.62E-0.5	24	1.5		2	3.5	
4	Thermal cycling											
5	ΔT_{Use}	ΔT_{Test}	m	c_T	$N_{TC_{Use}}$	A_{TC}	$N_{TC_{Test}}$	$24/c_T$				
6					$=B3 * (\$A$ $\$3/24)$	$= (B7/$ $A7) \cdot D7$	$= E7 (* \$$ $H \$3) / F7$	$= 24 / D7$				
7	45	120	2.50	2	7 300	7.11	818.16	12				
8	ζ_{Use}	ζ_{Test}	g	$A_{Ram p_rate}$								
9				$= (B10/$ $A10) \cdot C10$								
10	1.5	10	0.33	1.88								
11	Example: failure within $x=36$ test cycles											
12	x		$t_{TC_x} h$									
13			$= A14 * F7 * D10 * H7$									
14	36		57 81.73									
15	Thermal dwell		$T_{high_chamber}$	ΔT	T_{high}	$T_{low_chamber}$	T_{room}					
16			85.00	20	105	-40	25					
17	t_{TD_Use}					t_0 / t_{TD_Use}	A_{TD}					
18	$= (B3/24) * A3 + ((24 - B3)/24) * A3 * EXP(-(E3/F3) * ((1/(D3 + 273)) - (1/(C3 + 273))))$					$= A3 / A19$	$= EXP((E3/F3) * ((1/(C3 + 273)) - (1/(E16 + 273))))$					
19	11 951.94					7.33	42.21					
20	t_{TD_test}											
21	$= A19 * \$H \$3 * EXP(-(E3/F3) * ((1/(C3 + 273)) - (1/(E16 + 273))))$											
22	424.705 712											
23	Example: failure occurs 60 h in the thermal dwell h of dwell added											
24	y		$t_{TD_y} h$									
25			$= A26 * G19 * F19$									
26	60		18 563.44									
27	When time to failure recorded as time in thermal cycling:											
28	Temperature cycle duration(h)			t_{St}	T_{Test_low}							
29			1 test cycle(h)	0.25	0.25							
30			$= 2 * (C16 - F16) / (B10 * 60) + ((A22/G7) + E29) + (F29)$									

表 B.4 (续)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
31			1.19									
32												
33	Example; failure occurs within 212 h of thermal cycling											
34	z (h)		t_{TD_Z}									
35			$= (A36/C31) * (A22/G7)$ $* G19 * (A3/A19)$									
36	212		28 713.96									
37	Humidity											
38	RH_{use}	RH_{test}	t_{TD_use}	T_{H_test}			A_H					
39			$= (B3/24) * A3 + ((24 - B3)/24)$ $* A3 * \text{EXP}(-(E3/F3)$ $* ((1/(D3 + 273)) - (1/(C3 + 273))))$				$= ((B40/A40) * K3) * \text{EXP}((E3/F3) *$ $((1/(C3 + 273)) - (1/(D40 + 273))))$					
40	50	95	11 951.94	70			32.59					
41												
42	Example											
43	Failure in humidity at $w = 16$ h											
44	w h		t_{H_w} h									
45			$= A46 * G40 *$ $(A3/A19)$									
46	16		3 821.33	Life								
47	Vibration											
48	D											
49	150 000											
50	W_{Use}	W_{Test}	M	A_{Vib}	t_{Vib_test}							
51				$= (B54/A54) * C54$	$= A51$ $/D54$							
52	14.715	29.43	4.00	16	9 375							
53												
54	Example											
55	Failure in vibration at $v = 3$ h											
56	v (h)		t_{H_v} h									
57			$= A58 * D52 *$ $(A3 * 1\ 000)/A49$									
58	1.5		14 016.00	Hours of life								
59	N_{OC_ues}	c		1 cycle								
60		Cycles/day		$= 24/B61$								
61		8		3.00								

然后将失效时间值按照升序排列。需要注意的是由于在另一份报告中使用了热循环中的另一个值作为案例分析,因此这里只用了热浸试验中的一个值来进行可靠性计算(热浸时间)。

利用表 B.5 的数据就可以进行杜安图解法分析。

表 B.5 可靠性增长数据分析

故障序号	失效时间 h	累积失效时间 $n=24$	$\theta(t)$	$\text{Log}(t)$	$\text{Log}[\theta(t)]$
1	3 821.33	91 711.92	91 711.92	4.96	4.96
2	5 781.33	138 751.92	69 375.96	5.14	4.84
3	14 016	336 384	112 128	5.53	5.05
4	18 563.44	445 522.56	111 380.64	5.65	5.05
$t_0 * k$	131 400	3 153 600	788 400	6.50	5.90

通过对表 B.5 最后两列数据进行分析可以得到增长率 a 的值,见图 B.3。

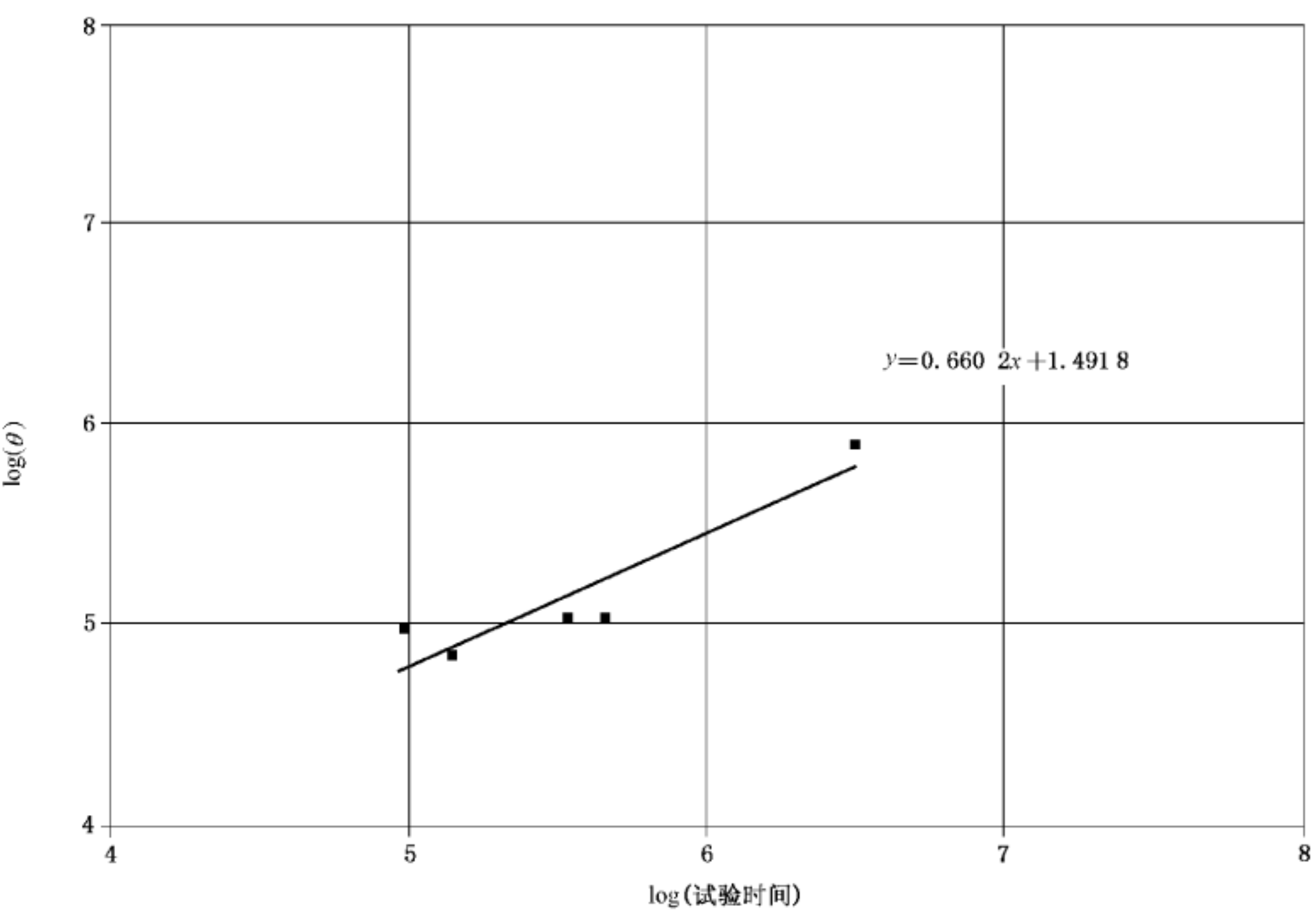


图 B.3 可靠性增长率的确定

从表 B.5 及图 B.3 可以得到如下结论:

增长率: $a=0.66$;

最终 MTBF 试验值: $\theta_{Final}=1\,431\,964\text{ h}$;

$t_0=87\,600\text{ h}$ 时刻的可靠度: $R(t_0)=0.999\,97$ 。

附 录 C
(资料性附录)

高加速极限试验和传统加速试验比较

表 C.1 高加速极限试验和传统加速试验比较

试验类型	样品数量	试验时间	失效数	分析
传统试验	大(一般 30~60)	非常长(月级)	0 或少数失效 (一般小于 5)	设计的试验中,所有观察到的失效应与现场相关
高加速极限试验	小(一般 10)	非常短(天级)	一些失效 (一般 10 或者更多)	应分析每一种失效,以评价是否与现场相关

附录 D
(资料性附录)
估算激活能 E_a

以下实例说明了如何依据试验来估算元器件的激活能。

为了评估典型元器件,比如功率放大器(尺寸为 5 mm×5 mm×2 mm),其在工作环境条件下典型失效率为 90(FIT)的激活能,供应商需要开展试验获取支撑数据。例如:

在 100 °C 的条件下对 500 个元器件开展 1 年的试验并发现 1 个失效,则失效率为 228 FIT。

在 125 °C 的条件下对另外 300 个元器件开展 1 年的试验并发现 3 个失效,则失效率为 1 146 FIT。

在 140 °C 的条件下对另外 300 个元器件开展 1 年的试验并发现 9 个失效,则失效率为 3 425 FIT。

如果所有的失效都由相同的失效模式引起,则这三个失效率可以绘制在线性-对数坐标中。如果这三个点通过工程近似可绘制一条阿伦尼斯等式适用的直线,则激活能 E_a 就是图 D.1 所示直线的斜率。

$$E_a = k_B \times \frac{\ln [\lambda(T)] - \ln [\lambda(T_0)]}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}} \dots\dots\dots (D.1)$$

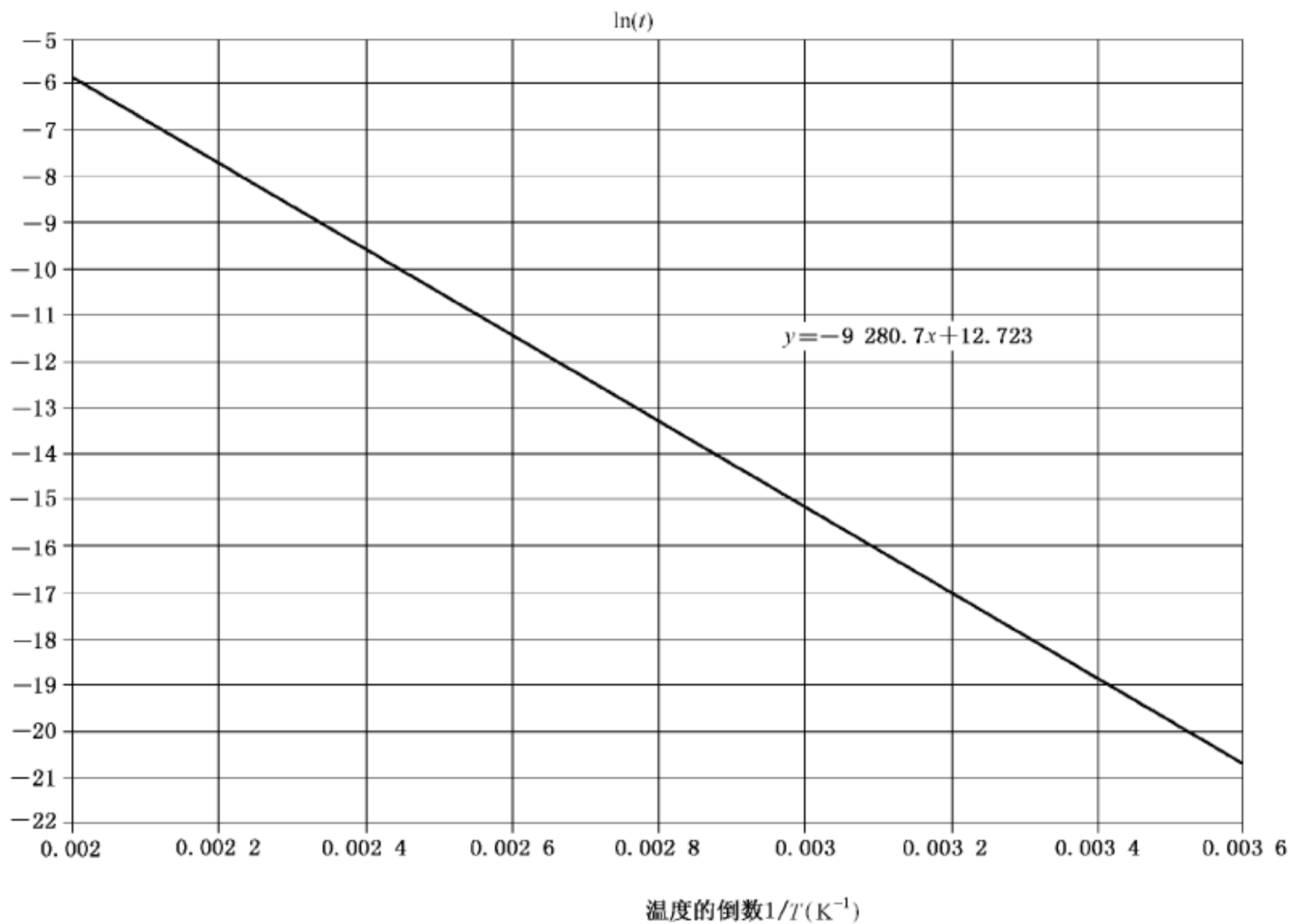


图 D.1 估算激活能 E_a 的失效率与温度的关系图

从这个例子,我们很清楚地看到估算激活能非常耗费时间和资源。而且元器件每一种重要的失效模式都应估算其激活能。因此通常只对新的元器件技术评估其不同失效模式的激活能。这种评估试验通常是针对测试结构而不是功能性元器件。估算出来的激活能被用于所有使用该项元器件技术制造的元器件;因此元器件的使用者应该从其制造商获取元器件主要失效模式的激活能信息。

附 录 E
(资料性附录)
加速寿命试验标准程序

E.1 试验目的

标准化的加速寿命试验验证的目的是评估基于三种加速试验得到的产品可靠性或寿命时间。该试验步骤来自于 GMW8758。目前存在支持该方法的商业软件。

E.2 试验的实施

- 第 1 步 通过工程评估确定试验中施加的最大应力量值,该应力量值不应导致产品立刻失效,或者很短时间就失效,或者产生现场不会出现的失效模式。该试验应力量值将比正常应力量值高且超过产品规范规定的应力量值。
- 第 2 步 选定一个试验应力量值,例如,选定第 1 步中确定应力量值的 90%。这是一个高的应力量值。
- 第 3 步 选取至少两个产品施加第 2 步中确定的应力量值开展试验并记录每一个产品失效前试验循环数或者试验时间。
- 第 4 步 对第 3 步出现的失效进行失效分析。如果所有的产品以同一种失效模式失效,则转到第 5 步继续试验。如果出现多于一种失效模式,则转到第 5 步继续试验以期确定主要失效模式,而非主要失效模式作为暂缓分析项(详见 IEC 61649)。
- 第 5 步 减小第 2 步选定的试验应力量值,例如,减小 10%。这是一个中等的应力量值。
- 第 6 步 选取至少两个产品施加第 5 步中确定的应力量值开展试验并记录每一个产品失效前试验循环数或者试验时间。
- 第 7 步 确定主要失效模式,并判断其是否与现场预期失效有关。
- 第 8 步 在威布尔坐标中绘制第 3 步和第 6 步试验中发现到的失效分布曲线并确定两个试验样品的特征寿命(详见 IEC 61649)。只绘制主要失效模式,把非主要失效模式作为暂缓分析项。如果在试验过程中发现主要失效模式不止一种时,应分别对每种失效模式进行分析。
- 第 9 步 将两个特征寿命绘制在以应力量值为横坐标的坐标图中,如果预期的曲线特性符合阿伦尼斯模型时,则坐标图为对数-线性坐标,如果预期的曲线特性符合逆幂模型,则坐标图为对数-对数坐标。
- 第 10 步 在上述坐标图中外延通过上述两点的直线,直到预期的现场应力量值。
- 第 11 步 需要权衡以下两种因素来选择尽量接近现场预期应力的应力量值:一方面,为了降低外推风险,这个应力量值尽量接近现场预期最坏的工作环境条件。另一方面,这个应力量值应尽可能地高以便缩短试验时间。选择的应力量值就称作低应力量值。
- 第 12 步 选取至少两个产品施加第 11 步中确定的应力量值开展试验并记录每一个产品失效前试验循环数或者试验时间。如果可以获得更多的样品,建议在该应力水平下对其全部进行试验。
- 第 13 步 确保三种应力量值的试验出现的主要失效模式是相同的。其他的失效模式作为暂缓分析项。如果不止一种主要失效模式,则应该分别进行分析。
- 第 14 步 在威布尔坐标中绘制第 12 步发现到的失效分布曲线并确定试验样品的特征寿命(详见

IEC 61649)。只绘制主要失效模式,把非主要失效模式作为暂缓分析项。如果在试验过程中发现主要失效模式不止一种时,分别对每个失效模式进行分析。

- 第 15 步 将三个特征寿命都绘制在第 9 步制作的坐标图中并添加通过这三个点的最优线性回归直线。外延该直线至现场预期的应力量值。
- 第 16 步 读取在现场预期应力量值下的预期特征寿命。
- 第 17 步 基于第 14 步确定的回归直线来估算加速模型的经验因子。
- 第 18 步 使用相关的加速模型方程,将第 8 步和 14 步获得的数据点的循环数/失效时间转变成预期现场应力作用下的循环数/失效时间。则对于每一个数据点将有不同的经验因子。
- 第 19 步 在接下来的分析中,将第 18 步中确定的数据点绘制在威布尔坐标图中,好像所有的产品都是在现场预期应力量值下开展试验的。即产品失效时间/失效循环次数就是第 18 步确定的失效时间/失效循环次数并且样本数量是包括暂缓分析产品在内的总的试验产品数量。
- 第 20 步 将置信限添加到第 19 步绘制的威布尔曲线中并读取受试产品在预期现场应力量值下的相应可靠性/失效时间。

附录 F
(资料性附录)
经验因子评估示例

某一元器件类型开展了温度冲击试验。A组22个样品开展了 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度冲击试验。试验进行到700循环后有一个样品失效,1 000循环后有3个样品失效。第二组(B组)21个样品开展了 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度冲击试验。试验进行到300循环后有5个样品失效,400循环后有10个样品失效,500循环后另外5个样品发生失效。所有的示例中的失效模式为同一类型。相同的失效模式表明威布尔分布可应用于数据分析。

试验数据的分析使用图解分析方法,其目标是试验数据能拟合成直线,直线的斜率确定形状参数值,直线的截距确定尺度参数值。图解分析方法的推导来源于失效概率密度

$$F(c) = 1 - e^{-\left(\frac{c}{\eta}\right)^{\beta}} \quad \dots\dots\dots (\text{F.1})$$

其中:

c ——温度循环数(变量);

β ——形状参数;

η ——尺度参数。

根据 IEC 61649 的规定,将产品失效前的循环次数绘制在威布尔坐标图中(如图 F.1 所示)。两个威布尔曲线相互平行且形状参数值近似为4。这也表明在两个试验中具有相同的失效模式。

失效概率分布通过推导最终变成一条直线的方程式如下:

$$\begin{aligned} 1 - F(c) &= e^{-\left(\frac{c}{\eta}\right)^{\beta}} \\ \frac{1}{1 - F(c)} &= e^{\left(\frac{c}{\eta}\right)^{\beta}} \\ \ln\left[\frac{1}{1 - F(c)}\right] &= \left(\frac{c}{\eta}\right)^{\beta} \quad \dots\dots\dots (\text{F.2}) \\ \ln\left\{\ln\left[\frac{1}{1 - F(c)}\right]\right\} &= \beta \times \ln(c) - \beta \times \ln(\eta) \end{aligned}$$

$F(c)$ 由失效个数的中位秩确定:

$$F(c) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4}$$

式中:

i ——在所观察的试验循环中的累积失效数;

n ——受试产品总数量。

两组试验数据详见表 F.1 所示。

表 F.1 试验 A 与试验 B 的失效概率分布

C	$F_A(c)$	$F_B(c)$
300	—	0.200 935
400	—	0.668 224
500	—	0.808 411
700	0.031 25	—
1 000	0.120 536	—

绘图用数据详见表 F.2。

表 F.2 威布尔曲线绘制用数据

$\ln(c)$	$\ln\{\ln[1/(1-F_A(c))]\}$	$\ln\{\ln[1/(1-F_B(c))]\}$
5.703 782	—	-1.494 712 949
5.991 465	—	0.098 301 371
6.214 608	—	0.502 230 487
6.551 08	-3.449 903 552	—
6.907 755	-2.052 272 793	—

威布尔曲线图如图 F.1 所示。

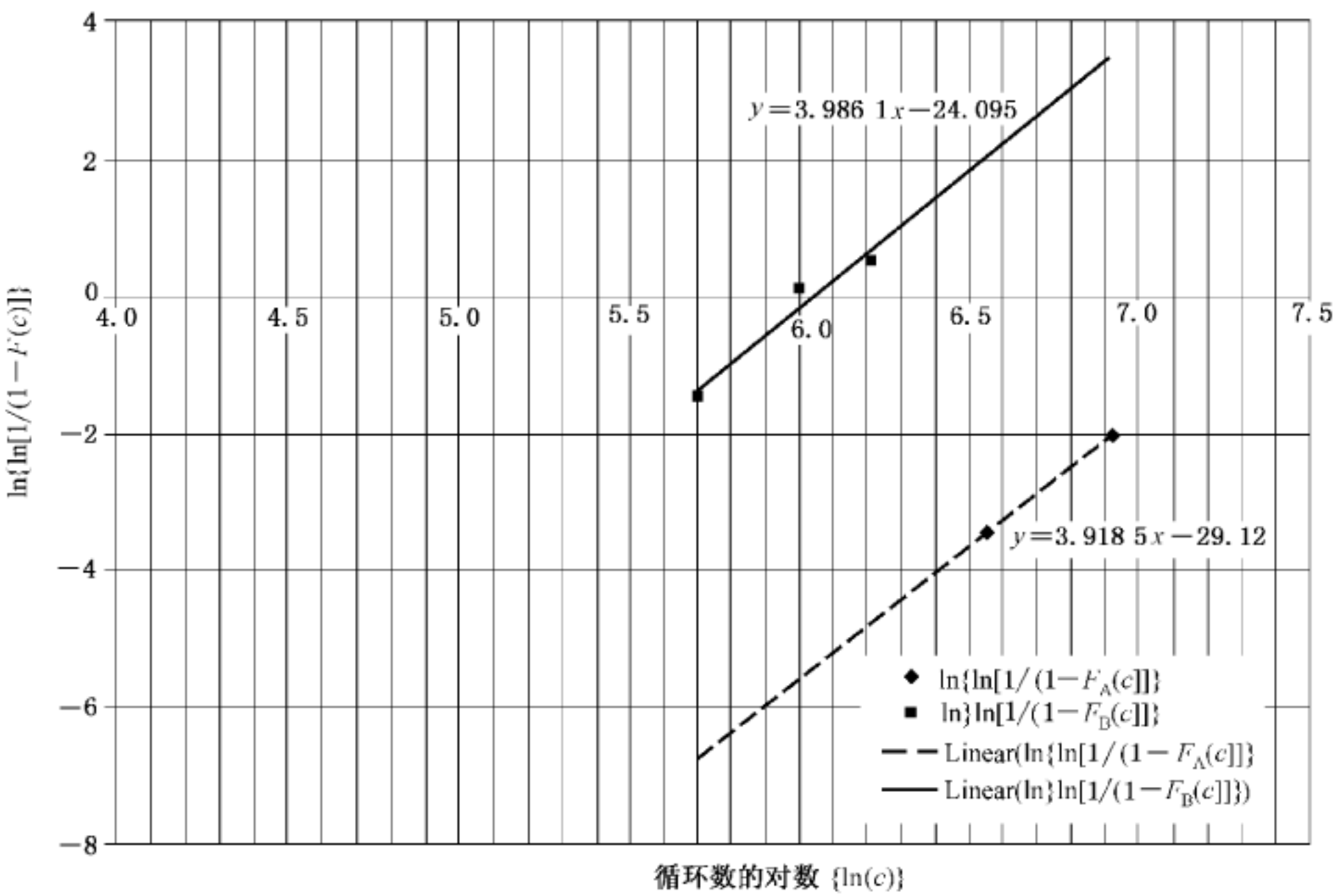


图 F.1 威布尔图解数据分析

数据线性拟合方程式的斜率代表了形状参数，截距是尺度参数的对数值与形状参数乘积的负数。
两个试验数据拟合而成的两条直线的斜率值非常相近，表明两个试验的失效模式确实是一致的。
形状参数的值一般假设为：

$$\beta=0.95$$

此时，可得出尺度参数值：

$$\begin{aligned} \beta \times \ln(\eta) &= -\text{截距} \\ \eta &= e^{-\frac{\text{截距}}{\beta}} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (F.3)$$

从等式(F.3)可推出两个试验的尺度参数分别为：

$$\begin{aligned} \eta_A &= 1\,690 \text{ 循环周期} \\ \eta_B &= 422 \text{ 循环周期} \end{aligned}$$

温度循环加速因子， $\Delta T_B=190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $\Delta T_A=125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的加速因子 A_{190_125} 为：

$$A_{\Delta T_B \Delta T_A} = \left(\frac{\Delta T_B}{\Delta T_A}\right)^m = \frac{\eta_A}{\eta_B} \quad \dots\dots\dots (F.4)$$

求解受试产品特征值,指数 m 得:

$$m = \frac{\ln\left(\frac{\eta_A}{\eta_B}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}\right)} \dots\dots\dots (F.5)$$

在这个示例中,参数 m 的值为:

$$m = 3.31$$

确定任何温度循环的温度范围 ΔT 的尺度参数值:

$$\eta(\Delta T) = \eta_B \times \left(\frac{\Delta T_B}{\Delta T_A}\right)^m \dots\dots\dots (F.6)$$

以温度循环的温度变化范围为变量的尺度参数函数曲线如图 F.2 所示。以 $\Delta T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为变量计算与温度循环有关的尺度参数:

$$\eta(50) = 422 \times \left(\frac{190}{50}\right)^{3.31} = 35\,026.45 \dots\dots\dots (F.7)$$

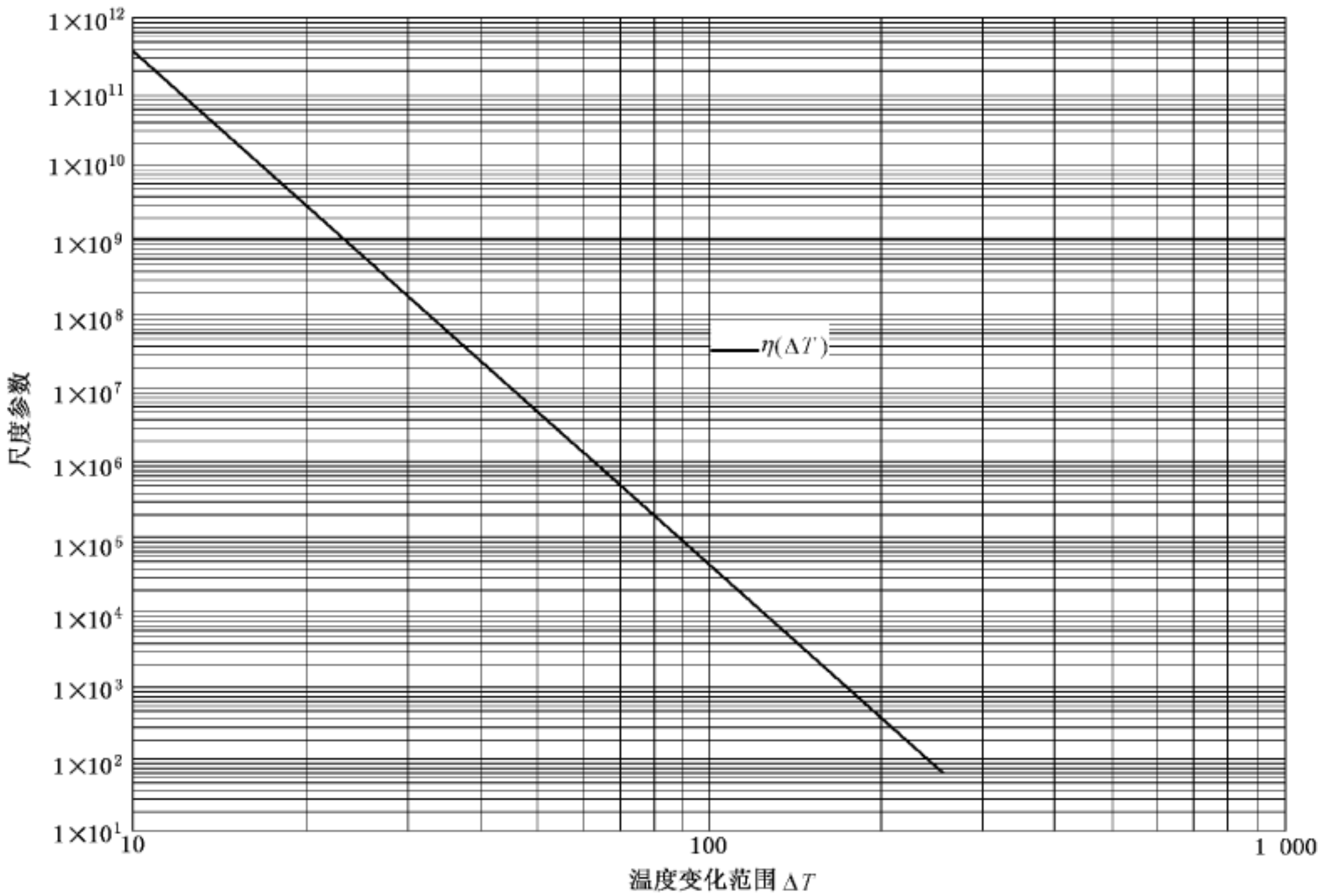


图 F.2 以温度变化范围为变量的尺度参数函数曲线图

当温度循环范围为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,则以温度循环数为变量的产品失效概率函数曲线如图 F.3 所示。

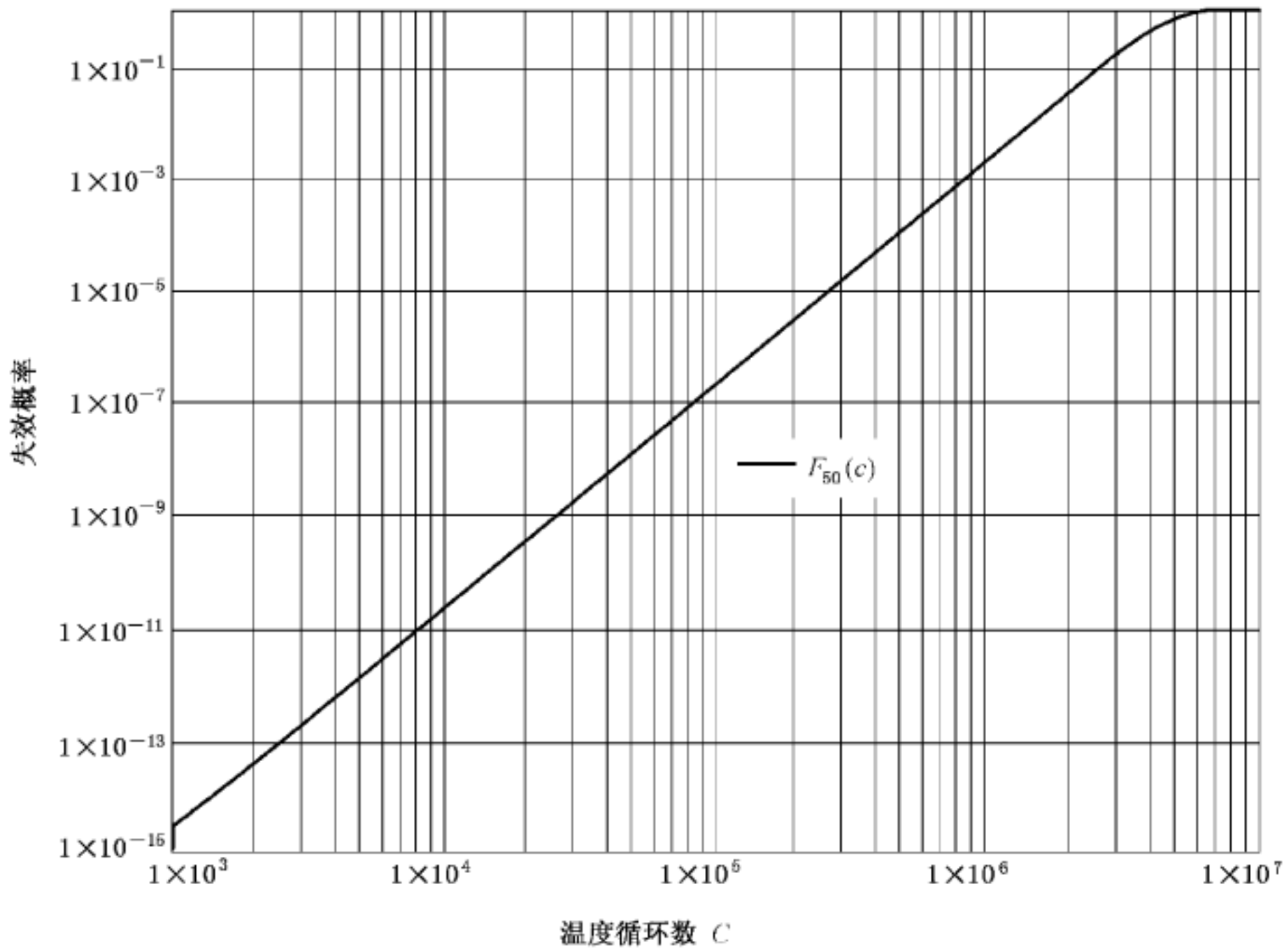


图 F.3 以温度循环数为变量的产品失效概率分布函数曲线图($\Delta T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$)

如果产品处在温度变化范围为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,则其在经历 100 万次循环后的失效概率约为 1×10^{-3} ,也就是说产品经历 100 万次循环后,1 000 个产品中可能有一个会失效。

附录 G
(资料性附录)

通过试验直至产品失效确定加速因子

G.1 失效模式和加速因子

当描述一个失效模式的加速过程时,单一的加速因子是非常有意义的。从一个应力组合到另一个应力组合的整体加速因子可按照 5.5 描述的方式确定。

单一应力类型一般在几组元器件上分别施加几种应力量值(至少三种)。试验持续时间由元器件失效情况确定,例如,试验进行至所有的元器件或大多数元器件失效为止。记录所用应力量值下每一个元器件的失效时间并构建合适的失效分布。作图得到每个应力量值下的尺度参数,再将这些尺度参数拟合成一个函数,这个函数是以应力量值为变量的函数值的最佳拟合。尺度参数的比率与应力量值的比率确定了加速因子。

G.2 确定加速因子的示例

在三种电压之下的试验,确定半导体器件(功率晶体管)电压加速因子,见表 G.1。

表 G.1 威布尔分布的电压试验失效数据

失效产品数	失效时间	$F(t)$	$\ln(t)$	$\ln(\ln(1/(1-F(t))))$
1	100	0.07	4.61	-2.66
2	180	0.16	5.19	-1.72
3	240	0.26	5.48	-1.20
4	290	0.36	5.67	-0.82
5	335	0.45	5.81	-0.51
6	377	0.55	5.93	-0.23
7	420	0.64	6.04	0.03
8	450	0.74	6.11	0.30
9	470	0.84	6.15	0.59
10	485	0.93	6.18	0.99
1	600	0.07	6.40	-2.66
2	1 100	0.16	7.00	-1.72
3	1 580	0.26	7.37	-1.20
4	2 030	0.36	7.62	-0.82
5	2 430	0.45	7.80	-0.51
6	2 810	0.55	7.94	-0.23
7	3 160	0.64	8.06	0.03
8	3 460	0.74	8.15	0.30

表 G.1 (续)

失效产品数	失效时间	$F(t)$	$\ln(t)$	$\ln(\ln(1/(1-F(t))))$
9	3 710	0.84	8.22	0.59
10	3 910	0.93	8.27	0.99
1	1 800	0.07	7.50	-2.66
2	3 500	0.16	8.16	-1.72
3	5 000	0.26	8.52	-1.20
4	6 300	0.36	8.75	-0.82
5	7 450	0.45	8.92	-0.51
6	8 450	0.55	9.04	-0.23
7	9 300	0.64	9.14	0.03
8	10 080	0.74	9.22	0.30
9	10 730	0.84	9.28	0.59
10	11 330	0.93	9.34	0.99

这些数据绘制成威布尔分布曲线并绘制各组数据的趋势线,如图 G.1 所示。直线拟合度好表明产品失效时间是威布尔分布并且失效过程是相同的(形状参数非常相似),意思就是失效机理相同

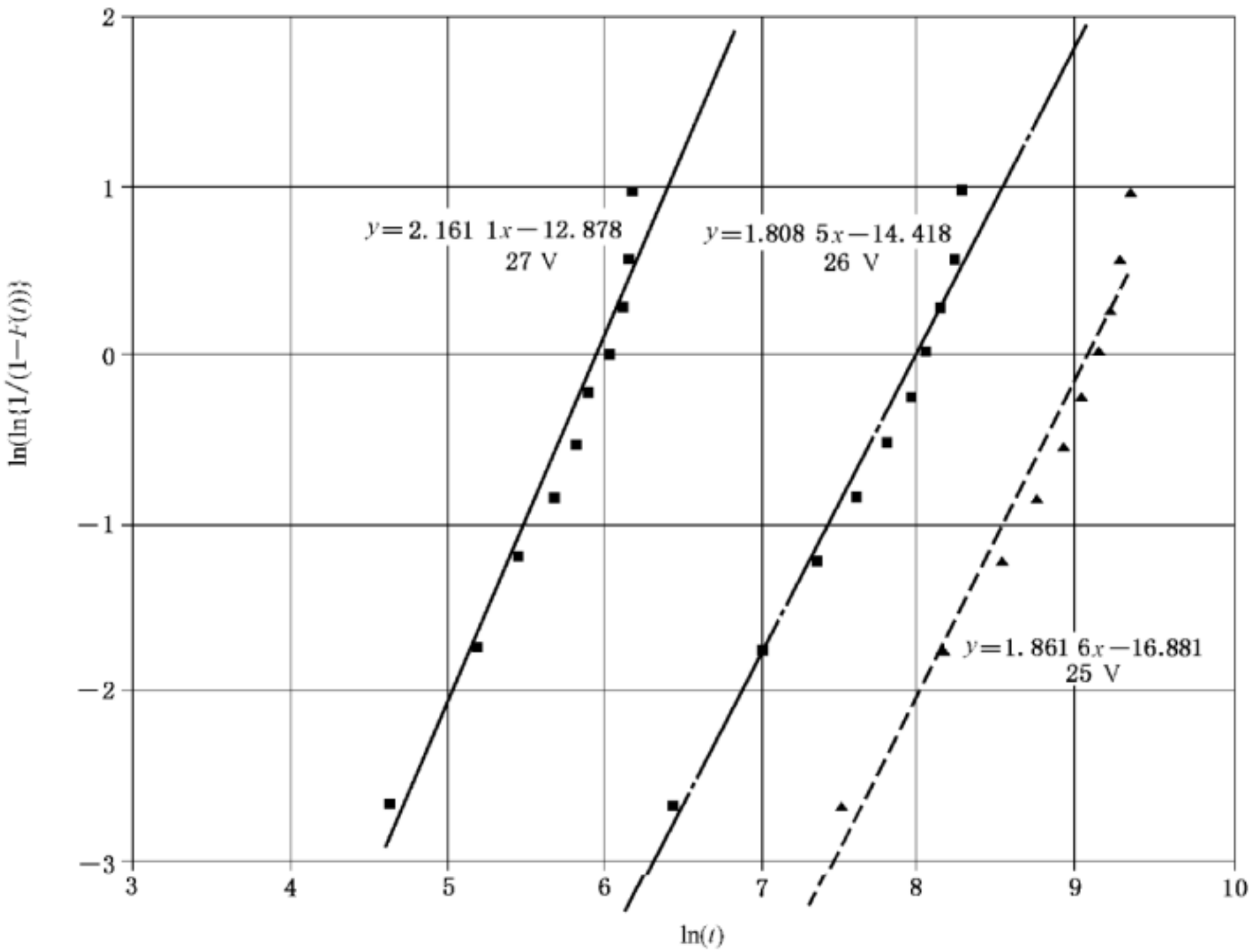


图 G.1 三组数据威布尔曲线图

三个尺度参数的值可由图 G.1 中的公式确定,并绘制成曲线如图 G.2 所示。

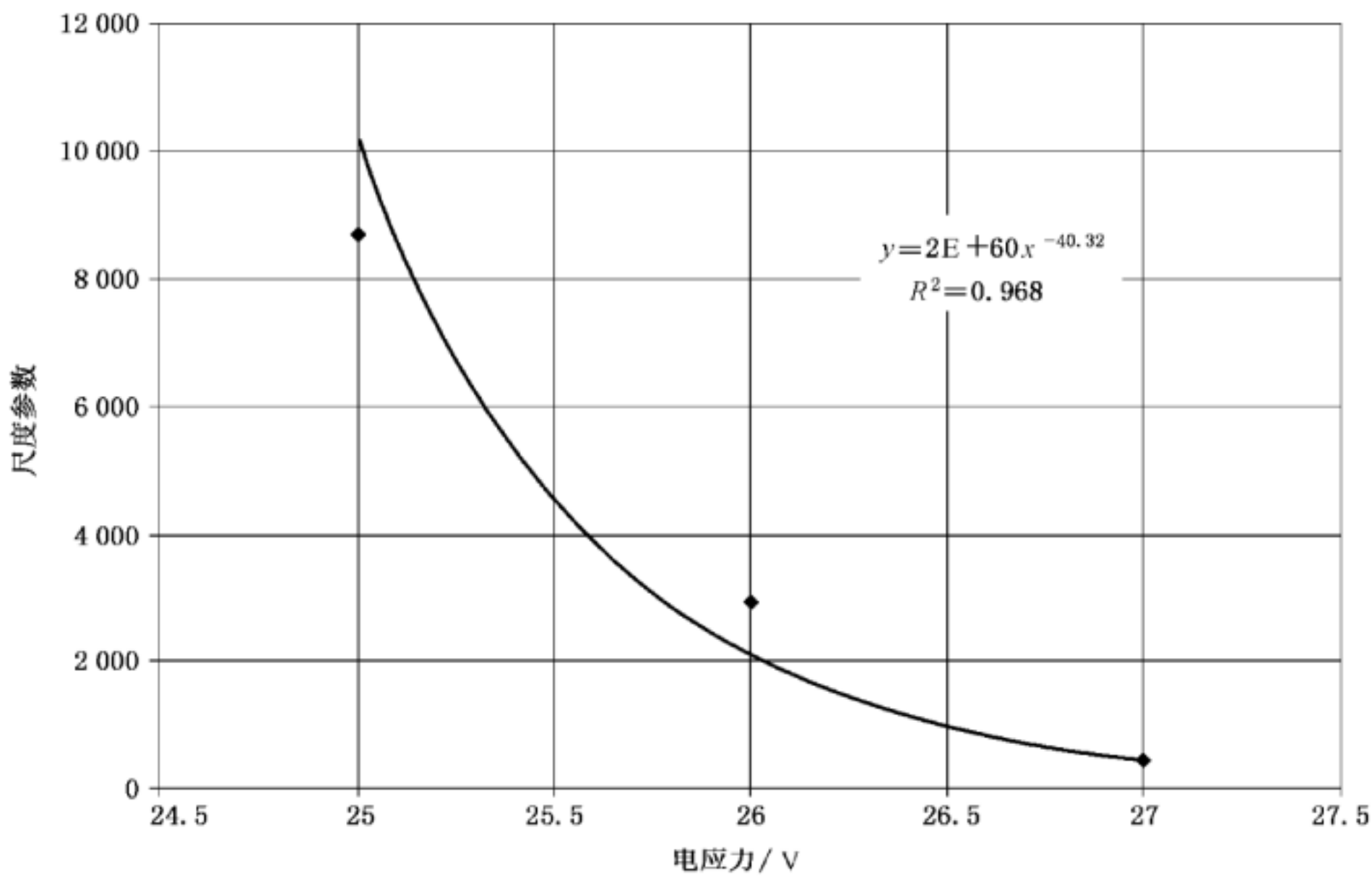


图 G.2 尺度参数值拟合的指数曲线

此时,指数曲线方程提供了以电压为变量的尺度参数函数值,即:

$$\eta(V) = A \times 10^B \times V^{-m} \dots\dots\dots (G.1)$$

此时的加速因子为:

$$A(V) = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^m \dots\dots\dots (G.2)$$

参 考 文 献

- [1] IEC 60050-191:1990 International electrotechnical vocabulary—Chapter 191: Dependability and quality of service.
- [2] IEC 60812, Analysis techniques for system reliability—Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA).
- [3] HU, J.M., BARKER, D., DASGUPTA, A., ARORA, A., The Role of Failure Mechanism Identification in Accelerated Testing, Journal of the Institute of Environmental Science, pp.39-45, July 1993.
- [4] NELSON, Wayne, Accelerated testing: statistical methods for reliability data, John Wiley and Sons, Inc. New York, 1990, 2004.
- [5] GHOSH, B.K. and SEN, P.K., Handbook of Sequential Analysis, Marcel Dekker, Inc., New York.
- [6] Accelerated Life Testing Analysis, ALTA, Reference, ReliaSoft Publishing, Tucson, Arizona, 2007.
- [7] PUNCH, J. and LOLL, V. Graphical Analysis and Guidelines for Step-Stress Testing, RAMS 2003.
- [8] KRASICH, M. Accelerated Testing for Demonstration of Product Lifetime Reliability, Reliability and Maintainability Symposium 2002.
- [9] KRASICH, M., Accelerated Reliability Growth Testing and Data Analysis, Reliability and Maintainability Symposium 2008, Las Vegas, Nevada.
- [10] KRASICH, M., How to design Reliability Demonstration and Assurance Tests and Analyze Test Data Using Physics of Failure Principles, Reliability and Maintainability Symposium 2010.
- [11] IEC 60605-7:1978, Equipment reliability testing—Part 7: Compliance test plans for failure rate and mean time between failures assuming constant failure rate (withdrawn 1999).
- [12] KRASICH, M. 2009, Realistic Reliability Requirements for Stresses in Use, Journal of the IEST, 52 (2): 00-00.
- [13] KRASICH, M. 2007, Accelerated Reliability Growth Testing and Data, Journal of the IEST, 50 (2): 98-117.
- [14] SALMELA, Olli; ANDERSSON, Klas; PERTTULA, Altti; SÄRKKÄ, Jussi, and TAMMENMAA, Markku, Re-calibration of Engelmaiers Model for leadless, Leadfree Solder Attachments, QRE 2007 Vol. 23:415-429.
- [15] OTTO, Susanne: HALT & HASS—when and how is it relevant?, -SPM-169-June 2004 www.delta.dk/spm.
- [16] GMW8758, Calibrated Accelerated Life testing (CALT)-General Motors Corporation October 2004.
- [17] CARUSO, H. and DASGUPTA, A., A Fundamental Overview of Accelerated Testing Analytic Models, RAMS 1998.
- [18] KRASICH, M. 2004, Accelerated Testing for Demonstration of Product Lifetime Reliability, Journal of the IEST, 47 (2): 48-58.
- [19] SILVERMAN, M, 2010, How Reliable is Your Product? 50 Ways to Improve your

Product Reliability. Superstar Press, 2010.

- [20] MIL-HDBK-189, Reliability growth testing.
 - [21] MIL-HDBK-781, Reliability test methods.
 - [22] IEC 61125:1992, Unused hydrocarbon-based insulating liquids—Test methods for evaluating the oxidation stability.
 - [23] JESD22-A110, Highly Accelerated Temperature and Humidity Stress Test (HAST).
 - [24] JEDEC JESD-A113, Preconditioning of Nonhermetic Surface Mount Devices Prior to Reliability Testing.
 - [25] JESD47B, Stress-Test-Driven Qualification of Integrated Circuits.
 - [26] JESD74, Early Life Failure Rate Calculation Procedure for Electronic Components.
 - [27] JESD85, Methods for Calculating Failure Rates in Units of FITs.
 - [28] JEDEC JESD A104-B, Temperature cycling.
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准

产品加速试验方法

GB/T 34986—2017/IEC 62506:2013

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址: www.spc.org.cn

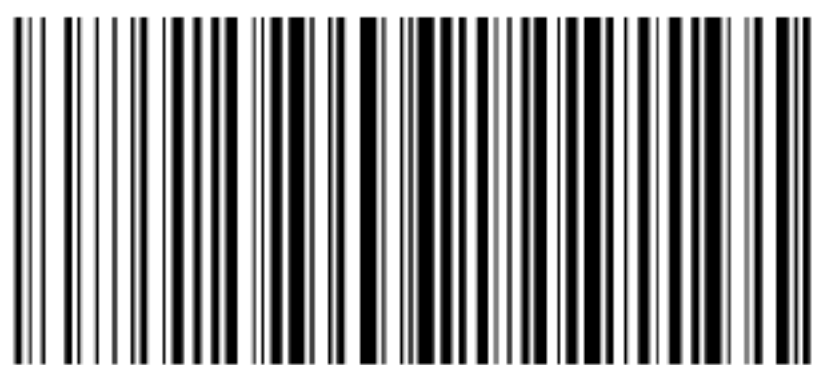
服务热线: 400-168-0010

2017年11月第一版

*

书号: 155066 • 1-57878

版权专有 侵权必究



GB/T 34986-2017