

Willkommen Bienvenue

Welcome

yôkoso

welkom

Benvenuto

Bienvenida

tervetuloa

รับเสด็จ 欢迎



卢申林/Sammy/摩西/Mosch

XRELIABILITY服务领域



可靠性咨询



组织可靠性水平评估



失效分析



医疗产品寿命评估



可靠性培训



可靠性软件



可靠性设备



测试工装夹具



环境可靠性试验

年度付费公开培训主题

- 3月7-11：环境试验（T01）
- 4月11-12：高加速寿命试验、筛选、抽检（T02）
- 5月23-27：可靠性设计（D01）
- 6月27-28：环境应力筛选（T04）
- 7月18-19：全寿命周期成本分析（A01）
- 8月29-30：可靠性工程简介（R01）
- 9月19-21：可靠性数据分析（A02）
- 11月7-8：可靠性试验（T03）
- 12月12-16：可靠性设计（D01）

年度免费在线培训主题

- 1月17：环境试验简介（O07）
- 2月28：高加速寿命试验简介（O06）
- 4月24：可靠性工程简介（O01）
- 6月26：可靠性数据分析简介（O05）
- 8月21：可靠性试验简介（O08）
- 9月18：失效模式影响分析简介（O04）
- 10月23：降额设计简介（O03）
- 11月27：可靠性预计简介（O02）

产品可靠性试验简介

可靠性试验的5个关键参数

应力

- 失效机理
- 温度、湿度、振动、和疲劳等

03

时间

- 特定可靠性或者置信度水平的时间
- 全寿命、5年、10年或者20年

04

失效

- 功能失效
- 非功能失效

05

可靠性

- 时间T后功能失效的机率T
- 95% 或 99%

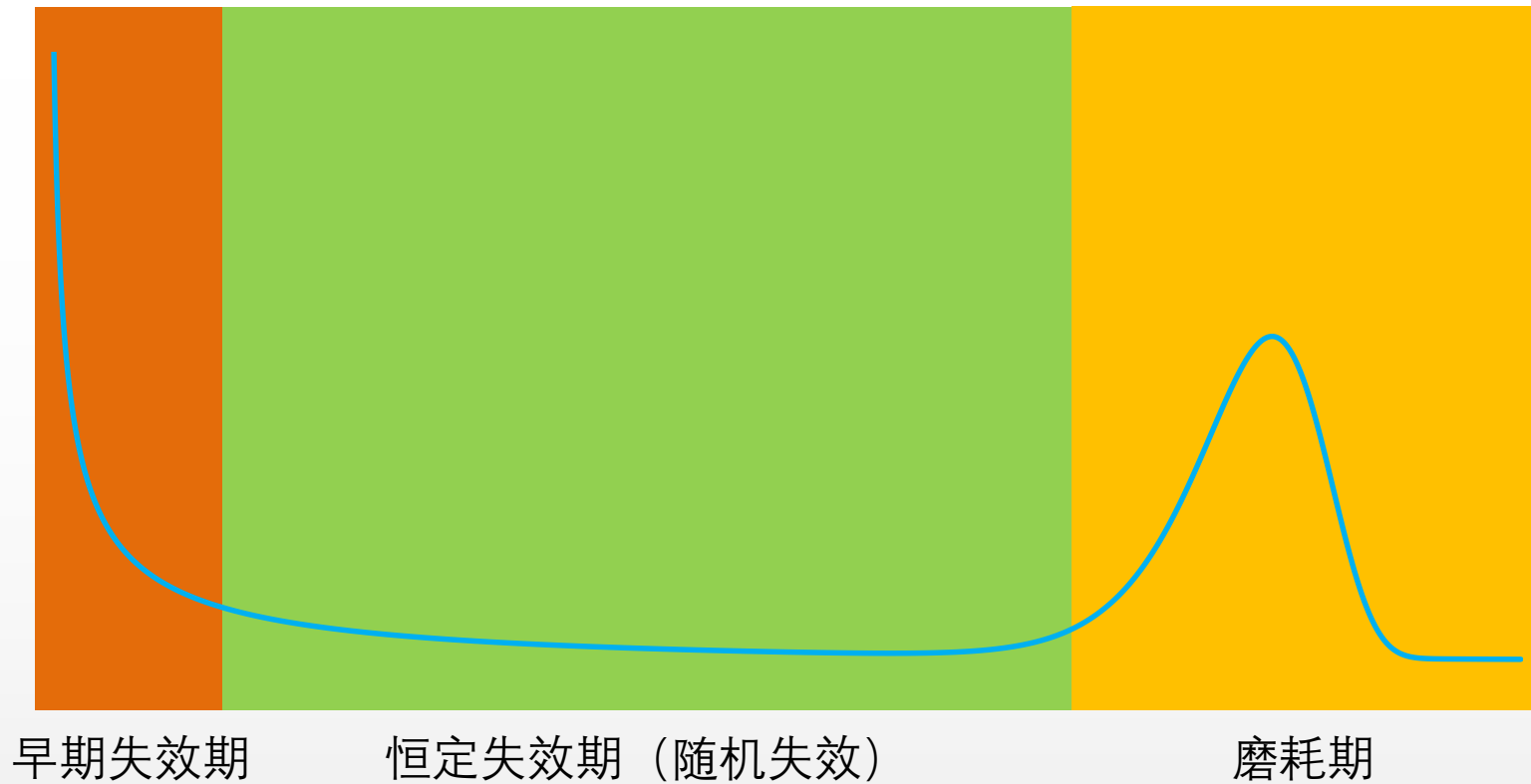
01

置信度

- 置信度水平
- 50%, 70%, 90% 或 95%

02

浴盆曲线



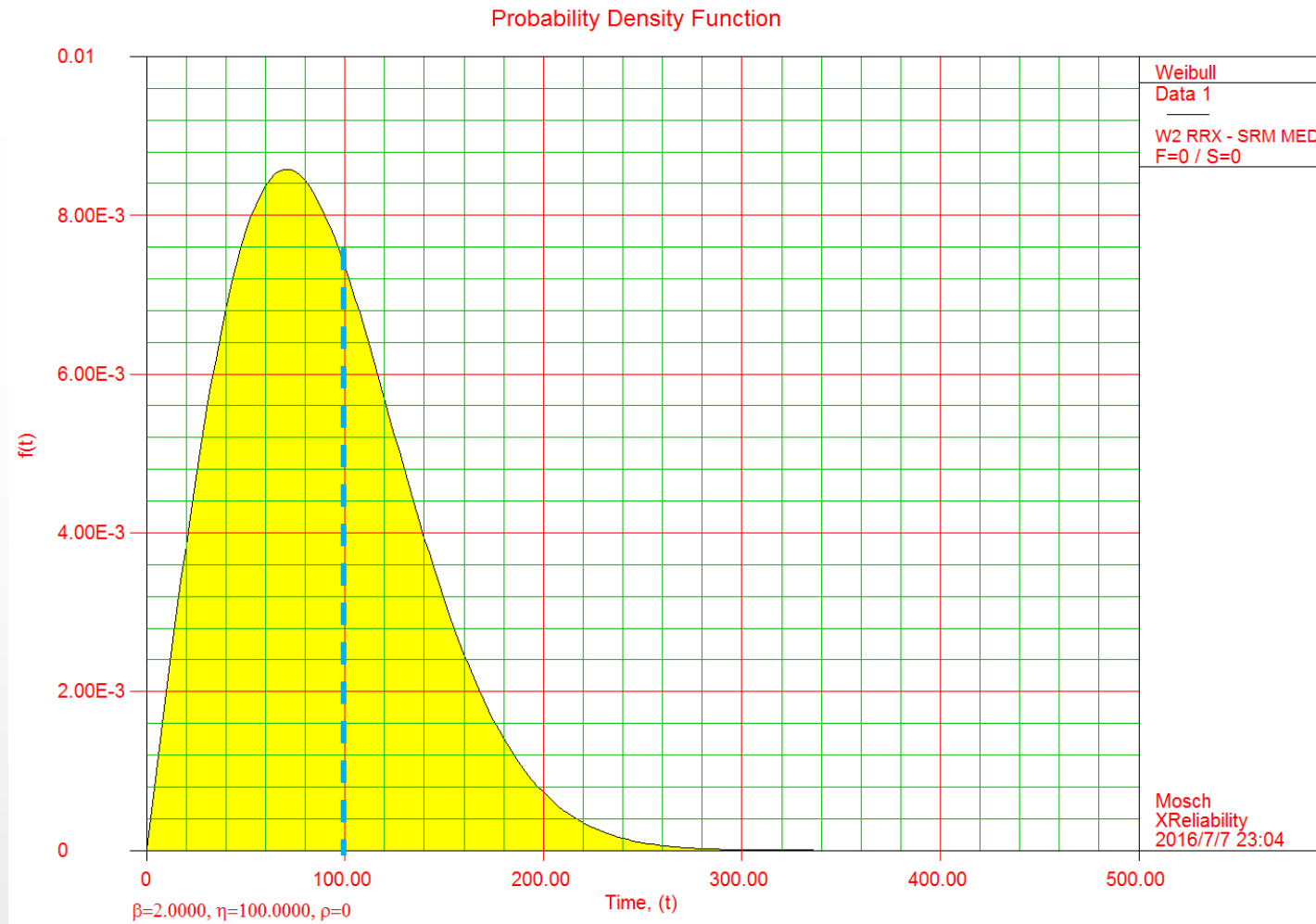
典型应力和失效

- 恒定温度：氧化、电子迁移、蠕变和扩散
- 温度循环：疲劳
- 湿度：短路和腐蚀
- 电压：绝缘击穿
- 电流：电子迁移、腐蚀和电磁辐射
- 机械振动：疲劳、磨损和松脱

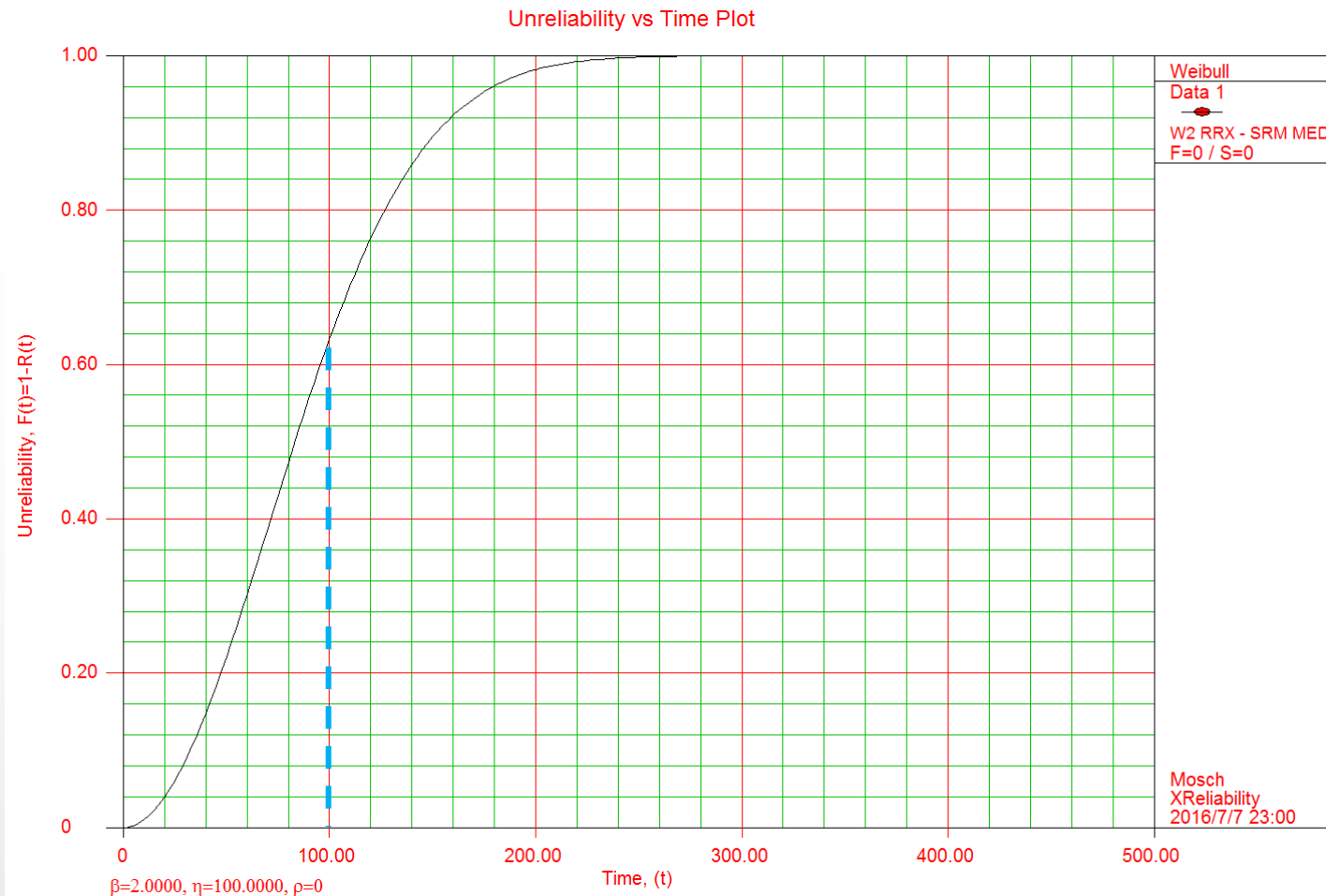
可靠性指标

- MTBF（平均故障间隔时间）
- MTTF（平均失效时间）
- B10/L10
- MTBSC（平均售后服务电话时间）
- FR（失效率）
- AFR（年失效率）
- 可用性
- FIT（每百万小时失效数）

MTBF=100



MTBF=100, 失效率=63%



产品可靠性试验简介

方法	风险	备注
对大样本试验数据进行统计分析	低	突然死亡试验
增加可能导致失效的应用频率	低	降低间隔时间，例如提高按键的开关频率
去除对失效没有影响的事件	中	间歇性工作
通过提高试验应力水平来降低试验时间	高	加速寿命试验

模型是对的吗？



所有的模型都是错的，但是当我们知道如何以及何时使用时，一些模型会有实用价值



寿命-应力模型

- 失效物理模型：当我们可以对材料或者零部件的失效和应力关系有深入了解时，可以建立相应的精确寿命-应力模型。但是这类模型通常比较复杂并且包含很多的影响因子。
- 拟合模型：广泛使用的多数是拟合模型，例如阿仑纽斯模型就属于拟合模型。这类模型主要针对特定的失效机理，正是因为其针对的是失效机理，相比于失效物理模型不会局限于特定元器件。
- 经验模型：如果对于产品的失效机理没有足够的了解，可以通过线性或者非线性回归分析，再基于试验或者现场数据来得出特定产品特定参数的经验模型。

典型失效物理模型

- 线性：

$$y = aX + b$$

- 指数：

$$y = be^{aX}$$

- 幂：

$$y = bX^a$$

- 对数：

$$y = a \ln(X) + b$$

多层固定容值陶瓷电容

失效机理：绝缘电阻退化

$$t = AV^{-n}e^{\frac{E_a}{kT}}$$

参数	描述	参数类型	数值	单位
t	失效时间	变量		小时
A	常数	常数	6.10E-08	无
V	电压	变量		伏特
n	电压应力指数	常数	2.46	无
k	伯朗兹曼常数	常数		无
T	温度	变量		开氏温度
E _a	活化能	常数	1.19	电子伏特

失效物理模型应用指南

关键参数

参数	描述
分布	电压和温度应力下的失效时间服从对数正态分布，标准差大约为0.5
绝缘电阻	高K多层陶瓷电容可靠性通过加速寿命试验进行评估。绝缘电阻的退化可以用电压（额定值的2到8倍）和温度来建立相应的模型（85-170°C）
失效标准	当电容的电流超过8毫安时即为失效

假设

类别	描述
失效机理	由于此类零部件的高介电强度（大于than 800 Vdc），加速寿命寿命提高了400 Vdc，在此应力条件下依然可以保证由热退化机理主导
失效标准	当此零部件电阻在试验温度下退化到低于稳定值的3到4个量级即为失效

应用限制

类型	描述
技术	模型在介电层厚度36.5毫米（1.4 mils）、0.22微法、额定电压为直流50伏和介电常数为6700的电容上进行实验

参数取值范围

应力类型	描述
温度范围	温度范围为358-443K
电压范围	电压范围为75-400V

参考文献

Published Status	Source Type	Title	Authors
Published	Article/Paper	Accelerated Life Testing and Reliability of High K Multilayer Ceramic Capacitors	William J Minford
Abstract/Summary			
<p>The reliability of high K multilayer ceramic capacitors was evaluated using accelerated life testing. The degradation in insulation resistance was characterized as a function of voltage (two to eight times rated) and temperature (85 to 170°C). The times to failure at a voltage-temperature stress conformed to a lognormal distribution with a standard deviation typically less than 0.5. A small infant mortality population was also observed for some samples.</p>			
Report #	Publication Name		Publisher Name
N/A	IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology		N/A
Publication Date	Pages	Source URL	Copyright Info
1982/9/1	297-300	http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1135974&tag=1	IEEE

煮饭加速

- 食品工业用高压锅：150C° 左右
- 家用高压锅：121C° 左右

电饭煲煮饭：45分钟
电压力锅煮饭：20分钟



电子产品可靠性试验

阿仑纽斯模型

$$\text{Life}(\text{Stress}) = \text{Constant} \times e^{\left(\frac{B}{\text{Stress}}\right)}$$

$$B = \frac{E_a}{K_{\text{Boltzmann's}}}$$

$$\ln(\text{Life}(s)) = B \left(\frac{1}{\text{Stress}} \right) + \ln(C)$$

$$\begin{aligned} AF &= \frac{\frac{C e^{\frac{B}{\text{Stress}_{\text{normal}}}}}{B}}{\frac{C e^{\frac{B}{\text{Stress}_{\text{accelerated}}}}}{B}} = \frac{e^{\frac{B}{\text{Stress}_{\text{normal}}}}}{e^{\frac{B}{\text{Stress}_{\text{accelerated}}}}} \\ &= e^{\left(\frac{B}{\text{Stress}_{\text{normal}}} - \frac{B}{\text{Stress}_{\text{accelerated}}} \right)} \\ &= e^{B \left(\frac{1}{\text{Stress}_{\text{normal}}} - \frac{1}{\text{Stress}_{\text{accelerated}}} \right)} \\ &= e^{\left(\frac{E_a}{K_{\text{Boltzmann's}}} \right) \left(\frac{1}{\text{Stress}_{\text{normal}}} - \frac{1}{\text{Stress}_{\text{accelerated}}} \right)} \end{aligned}$$

阿仑纽斯模型

$$AF = e^{\left\{ \frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{accelerated}} \right) \right\}}$$

- T_{use} 是产品使用温度 (K)
- $T_{accelerated}$ 是试验温度 (K)
- E_a 是活化能 (eV)
- k_B 是波尔兹曼常数, $k_B = 8.617385 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

注：

1. 用于化学反应或者弥散事件
2. 此模型不适用于低温导致的失效，活化能参考JEP 122 (JEDEC)

阿仑纽斯模型案例

Ea (活化能)

0.70

K (玻尔兹曼常数)

8.617E-05

产品现场工作环境温度 (C°)

50.00

加速试验温度 (C°)		加速因子
55	C°	1.47
60	C°	2.13
70	C°	4.33

典型失效活化能

失效机理	加速应力	活化能
Dielectric Breakdown	Electric Field, Temperature	0.2 - 1.0eV
Corrosion	Humidity, Temperature, Voltage	0.3 - 1.1eV
Electromigration	Temperature, Current Density	0.5 - 1.2eV
Au-Al Intermetallic Growth	Temperature	1.0 - 1.05eV
Hot Carrier Injection	Electric Field, Temperature	1eV
Slow Charge Trapping	Electric Field, Temperature	1.3eV
Mobile Ionic Contam	Temperature	1.0 - 1.05eV

Hallberg-Peck模型

湿度加速模型是基于Hallberg模型和Peck模型而发展出来的，详细的模型如下：

$$AF = \left(\frac{RH_t}{RH_a} \right)^n$$

AF：加速因子

RH_t ：试验湿度

RH_a ：使用环境湿度

n：常数（范围：2-2.5）

Hallberg-Peck模型案例

- 如果工作环境的相对湿度为50%，在相同温度下，95%相对湿度条件进行进行试验，其相对于工作环境的加速为多少？
- 模型中的因子取2

$$AF = \left(\frac{RH_t}{RH_a} \right)^n = \left(\frac{0.95}{0.5} \right)^2 = 3.61$$

温湿度加速模型

$$AF = e^{\left\{ \frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{\text{use}}} - \frac{1}{T_{\text{accelerated}}} \right) \right\}} \left(\frac{RH_t}{RH_a} \right)^n$$

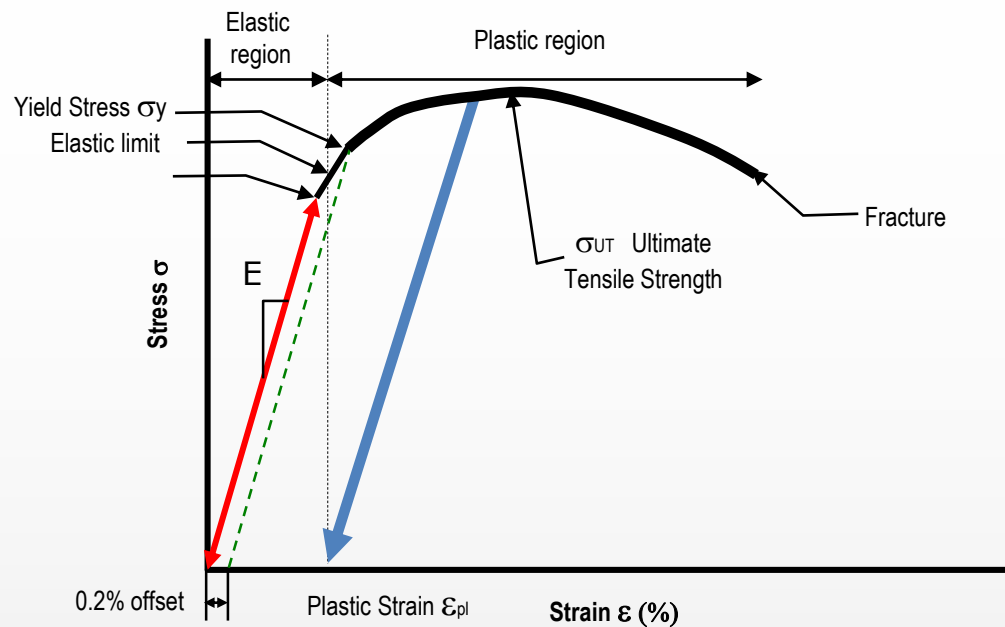
- T_{use} : 产品使用温度 (K)
- $T_{\text{accelerated}}$: 试验温度 (K)
- E_a : 活化能 (eV)
- k_B : 波尔兹曼常数, $k_B = 8.617385 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
- RH_t : 试验湿度
- RH_a : 使用环境湿度
- n : 常数 (范围 : 2-2.5)

温湿度加速案例

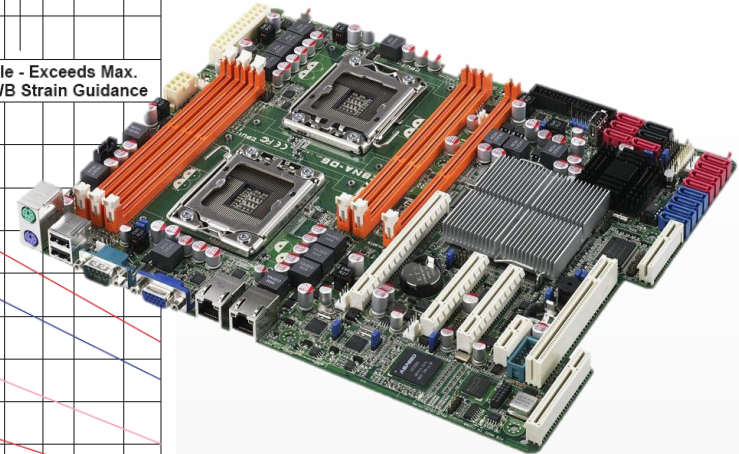
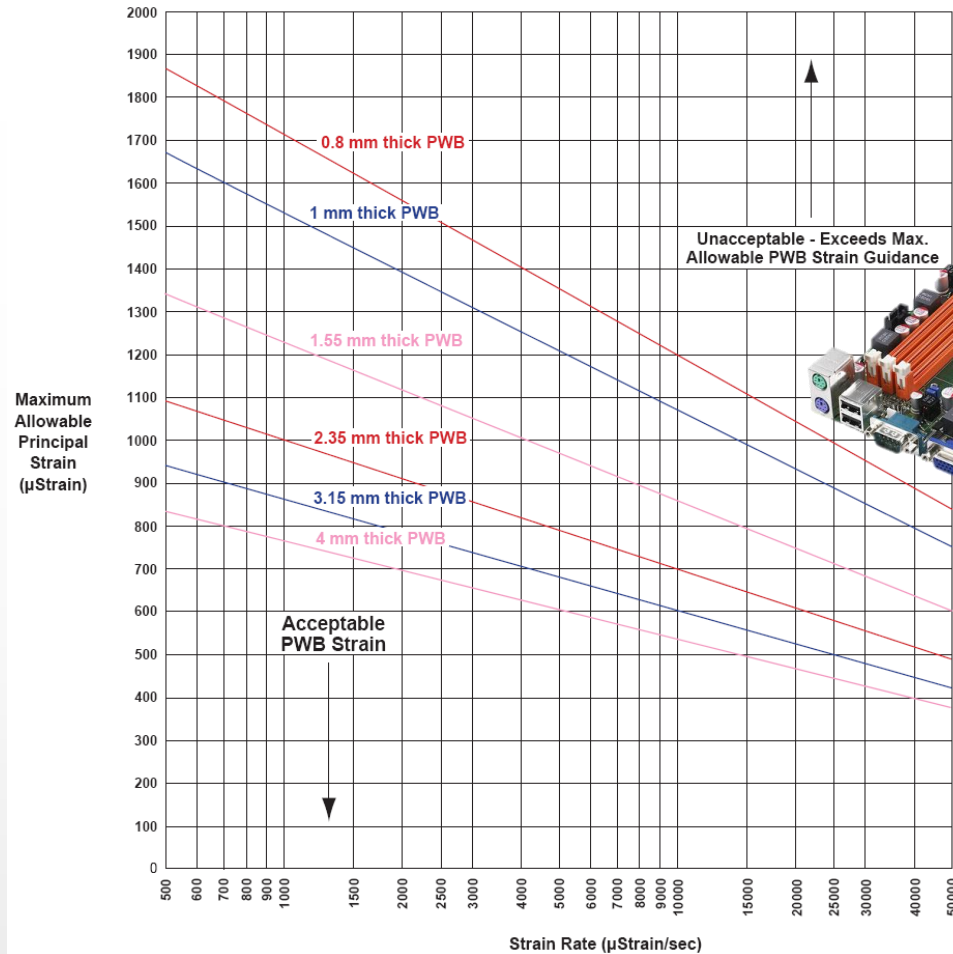
- 如果工作环境的温度为50度，相对湿度为50%，在相同70度温度下，95%相对湿度条件进行进行试验，其相对于工作环境的加速为多少？模型中活化能为0.7，湿度的因子取2。

$$\begin{aligned} AF &= e^{\left\{ \frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{accelerated}} \right) \right\}} \left(\frac{RH_t}{RH_a} \right)^n \\ &= e^{\left\{ \frac{0.7}{8.617385 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{50} - \frac{1}{70} \right) \right\}} \left(\frac{0.95}{0.5} \right)^2 \\ &= 2.13 \times 3.16 \\ &= 6.73 \end{aligned}$$

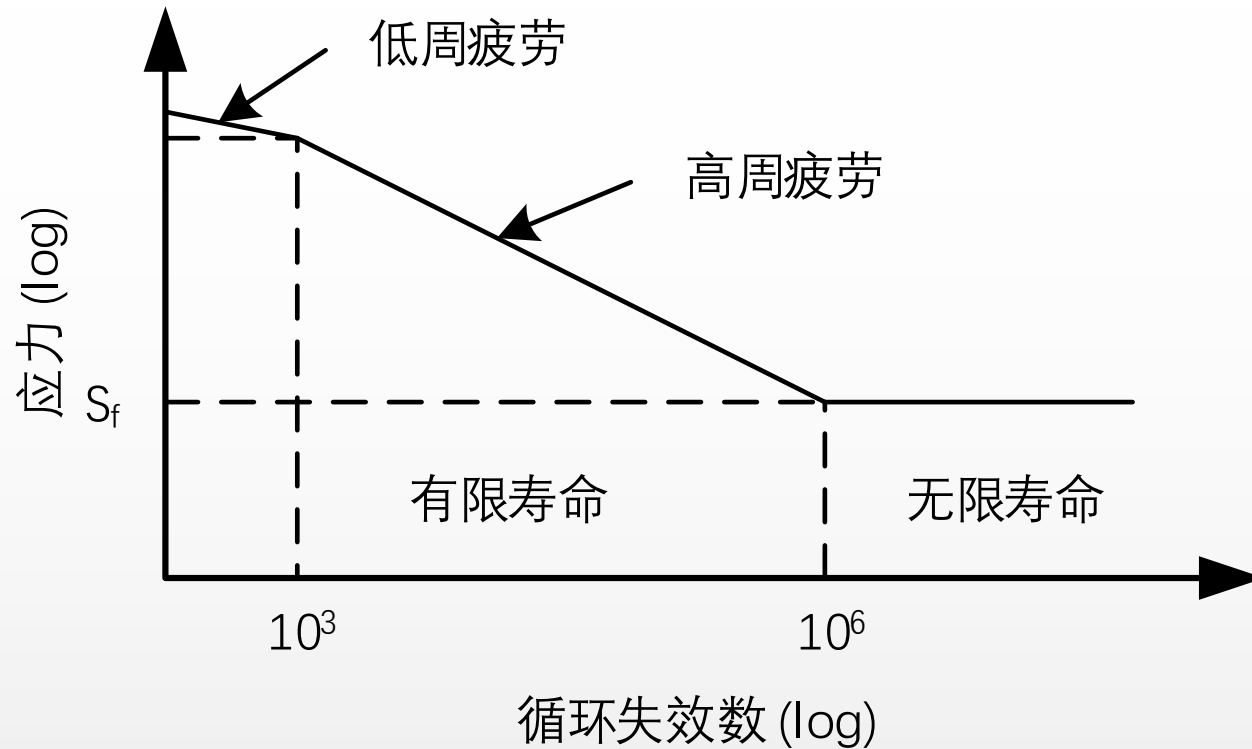
应力与应变的关系



应变值推荐



S-N曲线



疲劳强度理论

- 1842年Hood提出疲劳的“结晶”理论，认为金属疲劳的原因是反复应力作用下引起的结晶化。
- 1950年的德国工程师August Wohler在对金属疲劳进行系统研究后，设计出了第一台疲劳试验机（即沃勒疲劳试验机），用来进行全尺寸的机车车轴的疲劳试验。通过大量试验研究，1871年他系统论述了疲劳寿命与循环应力的关系，提出了S-N曲线和疲劳极限的概念，确定了应力幅是疲劳破坏的决定因素，奠定了疲劳研究的基础，开创了疲劳强度研究的新纪元。

逆幂律

$$\ln(Life) = -\ln(Constant) - m \ln(Stress)$$

$$\begin{aligned} AF &= \frac{Life_{normal}}{Life_{accelerated}} = \frac{\frac{1}{Constant \times Stress_{normal}^m}}{\frac{1}{Constant \times Stress_{accelerated}^m}} \\ &= \left(\frac{Stress_{accelerated}}{Stress_{normal}} \right)^m \end{aligned}$$

逆幂律

$$AF = \left(\frac{\textit{Stress}_{accelerated}}{\textit{Stress}_{use}} \right)^m$$

- $\textit{Stress}_{accelerated}$ 是加速试验应力
- \textit{Stress}_{use} 是现场实际使用应力
- “m” 是S-N曲线的斜率（对于钢，拉应力、弯曲应力和切应力时 $m=9$ ，接触应力时 $m=6$ ；对于青铜弯曲应力和切应力时 $m=9$ ，接触应力时 $m=8$ ）

注：此模型适用于机械应力、热疲劳、振动疲劳、电压、压力和真空

典型m值推荐

Material and Situation	Source of “m” Value	“m” Value
Aluminum	Steinberg	6.4
Copper	Blish Thermal Cycling =5, Steinberg vibration = 6.4	5-6.4
Steel – Low to Moderate Vibration	Experience From Different Industries Page 355 from <i>°Fatigue Testing and Analysis±</i> by Jwo Pan et-al	5-8
Steel – Highly Accelerated Vibration	“Automotive Component Vibration: A Practical Approach to Accelerated Vibration Durability Testing” by George A. Shinkle, SAE#840501 “MIL-STD-810F Annex B” , January 2000	5-7
Steel – Mechanically Applied Stress	Experience From Different Industries	6-8
Leaded Solder – Thermal Fatigue	Industry Consensus and Blish Summary	2.5
Lead-Free Solder – Thermal Fatigue	“An Acceleration Model For Sn-Ag-Cu Solder Joint Reliability Under Various Thermal Cycle Conditions” , N. Pan et al, Hewlett-Packard 2005	2.65
Leaded and Lead-Free Solder – Vibration	Steinberg	4
Fretting Corrosion in Connectors	Steinberg	4
Non-Filled Plastics	GE	3-4

米勒定律

疲劳损伤与机械应力的关系如下：

$$D \approx n\sigma^\beta$$

- D：Miner准则的疲劳损伤累计
- N：应力循环次数
- σ ：机械应力，即单位面积的作用力
- β ：疲劳试验确定的材料常数，其变化范围为8 ~ 12

上述机械应力可能有热膨胀、静载荷、振动、潮湿或任何其它导致机械应力的作用引起

温度变化率与温度循环次数的关系

- Smithson先生在1990年环境科学学会年会发表的论文中给出下表所列的不同温变率下的筛选结果。试验中共使用的400000个样本，每组用100000个样本以5°C/min ~ 25°C/min的温度范围和四种不同的温变率进行热筛选，持续试验知道认为全部薄弱环节（接近10%）出现故障。表中说明温度率为5°C/min下进行400个循环与温变率为25°C/min下进行1个循环的效果是一样的，两者所花的时间比为4400：1。

温变率 (°C/min)	循环次数40	温度循1环 (min/次)	筛选时间 t/h
5	400.0	66.0	440.0
10	55.0	33.0	30.0
15	17.0	22.0	6.0
18	10.0	22.0	3.0
20	7.0	18.3	3.0
25	4.0	16.5	1.9
30	2.2	13.2	0.9
40	1.0	8.0	0.1

Coffin Manson模型

Coffin Manson模型主要针对重复应力而导致的疲劳失效，在焊点疲劳评估领域有着广泛应用，具体模型如下：

$$AF = \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_t} \right)^{\beta_1}$$

AF：加速因子

β_1 ：常数（材料因子）

ΔT_t ：试验的温度差

ΔT_a ：使用环境的温度差

Coffin Manson修正模型

Coffin Manson模型主要针对重复应力而导致的疲劳失效，在焊点疲劳评估领域有着广泛应用，具体模型如下：

$$AF = \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_t} \right)^{\beta_1} \left(\frac{F_a}{F_t} \right)^{\beta_2} e^{\frac{E_a}{K} \times \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_t} \right)}$$

AF：加速因子

β_1 ：常数（材料因子）

β_2 ：常数（频率因子）

ΔT_t ：试验的温度差

ΔT_a ：使用环境的温度差

F_t ：试验的循环频率

F_a ：使用的循环频率

E_a ：电子跃迁所需的活化能

T_t ：试验温度（开氏温度）

T_a ：使用环境温度（开氏温度）

低周热疲劳模型：Coffin-Manson

产品类型	结构	有铅焊接的复杂电子产品	无铅焊接的复杂电子产品
M值范围	3 - 25 ¹⁾	2 - 3 ²⁾	2 - 3 ²⁾
典型推荐值	10	2.5	2.65 ³⁾ > 100 °C时采用Modified Norris Landzberg模型

注：

1) 对于结构材料的疲劳失效分布参考转动梁的数据

2) 基于同类失效模式的热疲劳等效数据

3) 仅建议焊点温度低于100°C是采用Coffin-Manson

修正的Norris-Landzberg模型

$$N_1 / N_2 = (\Delta T_2 / \Delta T_1)^{k_1} \cdot (t_2 / t_1)^{k_2} \cdot \exp [k_3 \cdot (1 / T_{1, \max} - 1 / T_{2, \max})]$$

- t_x : 高温条件下的时间
- $T_{x, \max}$: 高温条件

其中：

- 无铅焊接（SnAgCu）的典型推荐值为： $k_1 = 0.6$, $k_2 = 0.4$, $k_3 = 4,800$ K

当焊点温度高于100°C必须采用此模型

焊点可靠性模型

$$AF_{\text{leaded-solder}} = \left(\frac{\Delta T_{\text{test}}}{\Delta T_{\text{field}}} \right)^{2.5} \times \left[.768 \times (\text{dwell minutes})^{.0667} \right] \times \left[.80094 \times (\text{ramprate})^{.0964} \right] \times \left[e^{\left\langle 1414 \times \left(\frac{1}{T_{\text{field max}} + 273} - \frac{1}{T_{\text{test max}} + 273} \right) \right\rangle} \right]$$

$$AF_{\text{lead-free}} = \left(\frac{\Delta T_{\text{test}}}{\Delta T_{\text{field}}} \right)^{2.65} \times \left(\frac{\text{Dwell time}_{\text{test}}}{\text{Dwell time}_{\text{field}}} \right)^{.136} \times \left[1.22 \times (\text{ramprate})^{-.0757} \right] \times \left[e^{\left\langle 2185 \times \left(\frac{1}{T_{\text{field max}} + 273} - \frac{1}{T_{\text{test max}} + 273} \right) \right\rangle} \right]$$

Coffin Manson模型案例

- 某无铅制程PCBA正常工作每天会进行一次上下电，其温度差为40度，预计产品生命周期为5年。如果在实验室进行80度温度差的温度循环实验，需要测试多少循环来保证产品可以具有5年的寿命？
- 无铅制程的材料因子取2.5

$$T = \frac{1825}{AF} = \frac{1825}{\left(\frac{\Delta T t}{\Delta T_a}\right)^{\beta_1}} = \frac{1825}{\left(\frac{80}{40}\right)^{2.5}} = \frac{1825}{5.65685} = 323$$

Coffin-Manson模型指数

失效机理或材料	m	失效机理或材料	m
316 Stainless Steel	1.5	PQFP Delamination / Bonds Failure	4.2
316 SS, WaspAlloy, 4340 Steel	1.75	ASTM 2024 Aluminum Alloy	4.2
Solder (97Pb/3Sn) Crossing 30°C	1.9	Copper	5.0
Solder (37Pb/63Sn) Crossing 30°C	2.27	Au Wire Downbond Heel Crack	5.1
Solder (37Pb/63Sn) T < 30°C	1.2	ASTM 6061 Aluminum Alloy	6.7
Solder (37Pb/63Sn) T > 30°C	2.7	Alumina fracture-Bubble memory	5.5
Solder (37Pb/3Ag & 91Sn/9Zn)	2.4	InterLayer Dielectric Cracking	5.5 + 0.7
Cu & Leadframe Allows (TAB)	2.7	Silicon fracture	5.5
Al wire bonds	3.5	Si fracture (“cratering”)	7.1
Au4Al fracture in wire bonds	4.0	Thin Film Cracking	8.4

逆幂律案例

- 某电子元器件要开展电压加速试验。M值为8。正常使用电压为3V，加速试验的电压为5V。此产品的寿命要求是20,000小时。
- 需要在5V条件下开展多长时间的试验才能够证明此元器件可以满足3V工作20,000小时？

$$Life_{accelerated} = \frac{Life_{use}}{AF} = \frac{20,000}{\left(\frac{5}{3}\right)^8} = \frac{20,000}{59.5374} = 336 \text{ Hours}$$

逆幂律—正弦振动

$$AF = \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^m$$

- W_1 是现场工作的正弦振动峰值加速度
- W_2 是加速试验的正弦振动峰值加速度
- 对于电子设备m值的典型值为6，对于电路板m值的典型值为2.5

逆幂律—正弦振动案例

- 某PCBA产品的正弦试验标准为0.5G，120分钟。如果在2G条件下测试，其试验时间应该调整为多长时间？
- 电路板m取2.5

$$T = \frac{120}{AF} = \frac{120}{\left(\frac{W_2}{W_1}\right)^m} = \frac{120}{\left(\frac{2}{0.5}\right)^{2.5}} = \frac{120}{32} = 3.75$$

逆幂律—随机振动

$$AF = \left(\frac{W_{r2}}{W_{r1}} \right)^{m/2}$$

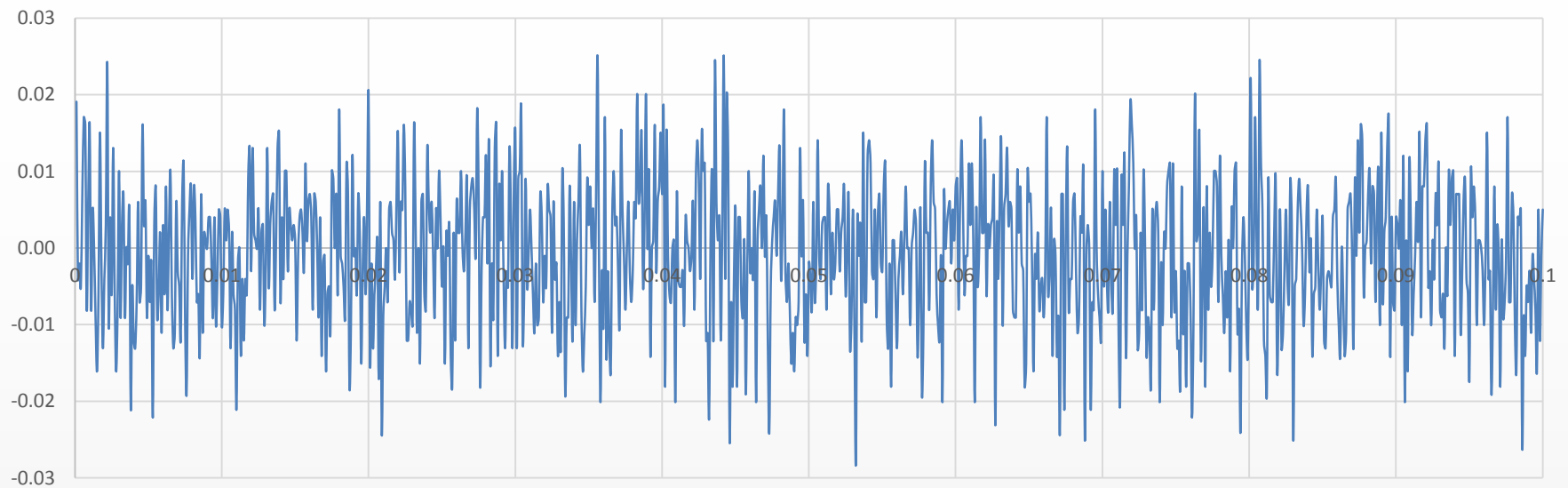
- W_{r1} 是随机振动现场工作条件的能量 (r.m.s.)
- W_{r2} 是随机振动加速试验条件的能量 (r.m.s.)
- 电子设备m值的典型值为4

逆幂律—随机振动案例

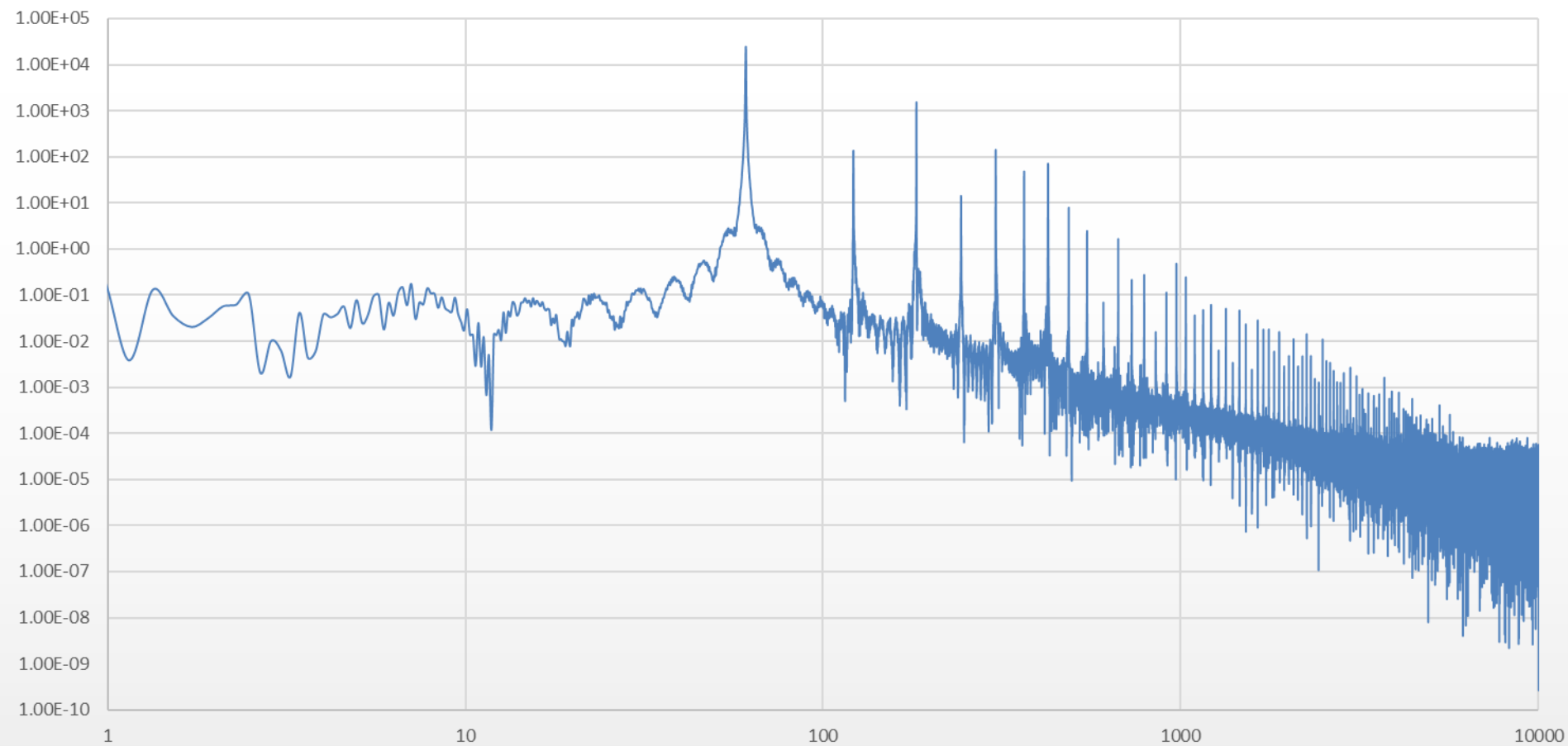
- 某电子设备现场工作随机振动能量为0.3Grms，在实验室开展3Grms的加速试验，其加速因子是多少？
- 电子设备的m值取4。

$$AF = \left(\frac{W_{r2}}{W_{r1}} \right)^{m/2} = \left(\frac{3}{0.3} \right)^{4/2} = 100$$

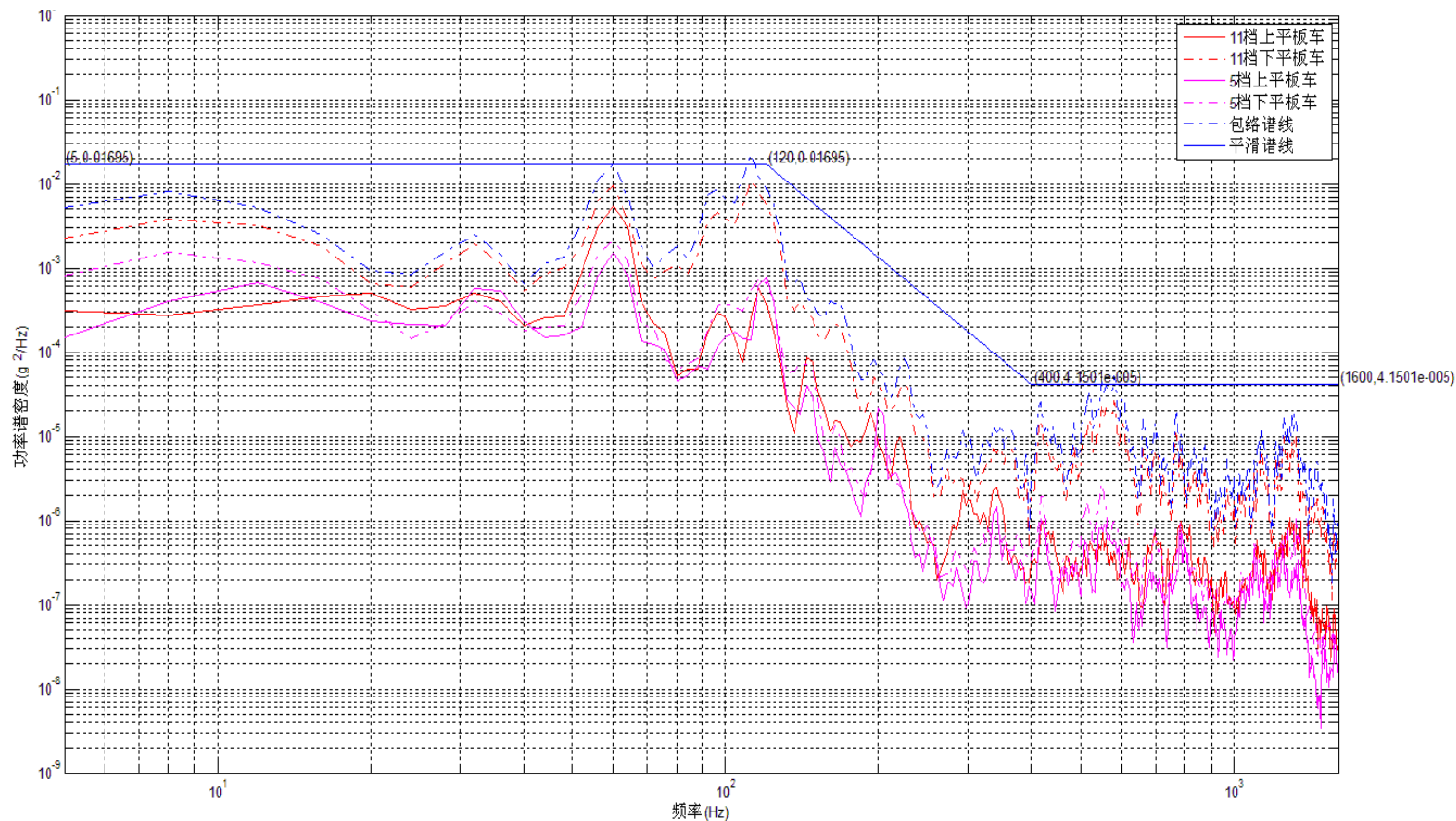
振动时域信号



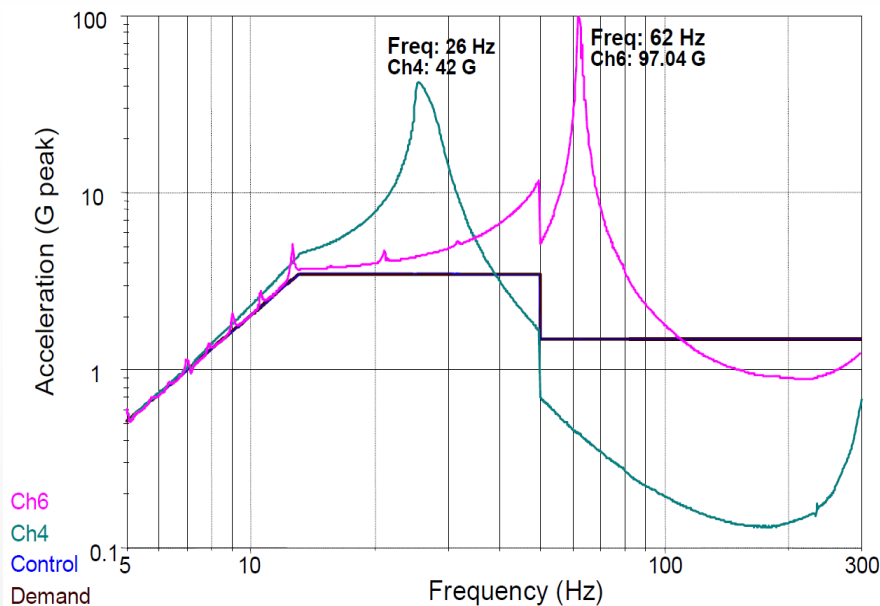
振动频域信号



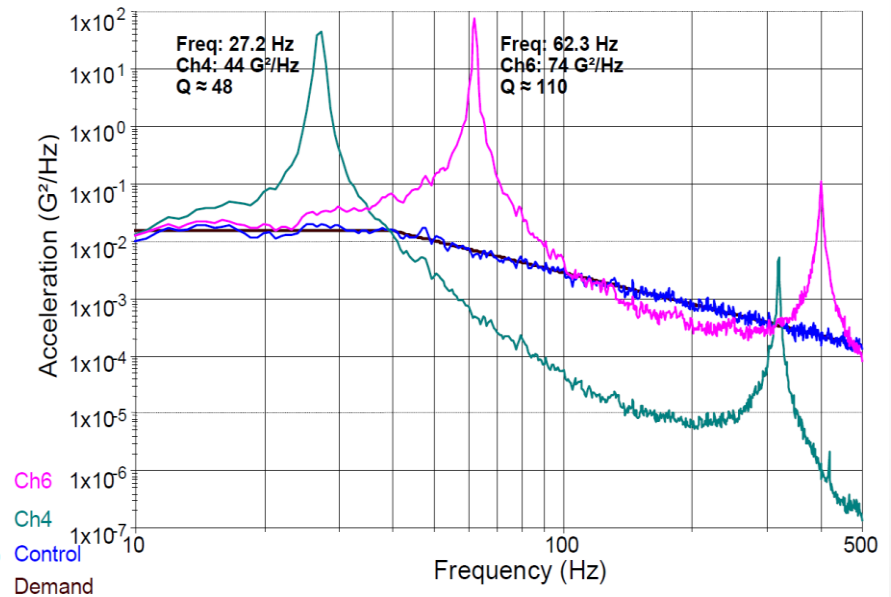
振动PSD包络



正弦振动与随机振动加速机理



正弦振动试验



随机振动试验

包装随机振动加速模型

$$I_T = I_o \sqrt{T_o / T_T}$$

- I_T ：测试振动能量 (Grms)
- I_o ：原始振动能量 (Grms)
- T_o ：原始振动频谱时间
- T_T ：试验时间

注：建议加速系数不高于5，则试验振动能量和原始振动能量之间的差异不高于2.24倍（ $\sqrt{5}=2.24$ ）

包装随机振动加速案例

- 每个卡车长途运输的平均距离为750英里，如果以平均60英里每小时的速度行驶，大约需要12.5小时。
- 美国卡车振动频谱的能量为0.25Grms，长途运输时间为12.5小时，ASTM 4169建议试验时间为3小时，基于计算结果则对应的振动频谱的能量为0.51Grms，和ASTM 4169的等级2一致。

$$I_T = I_o \sqrt{T_o/T_T} = 0.21 \sqrt{12.5/3} = 0.51 \text{Grms}$$

电流加速模型

$$AF = \left(\frac{J_2}{J_1} \right)^n e^{\left\{ \frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right\}}$$

- J_1 是现场工作电流密度 (A/cm²)
- J_2 是加速试验电流密度 (A/cm²)
- n 是电流加速模型参数, $1 \leq n \leq 3$
- T_1 是现场工作环境温度 (K)
- T_2 是加速试验温度 (K)
- E_A 是活化能 (eV)
- k_B 是波尔兹曼常数, $k_B = 8,617 \times 10^{-5}$ eV/K

多应力加速模型

$$AF = e^{\left\{\frac{E_a}{k_B}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2}\right)\right\}} \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{n_1} \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{n_2}$$

where

- T_1 是现场工作环境温度 (K)
- T_2 是加速试验温度 (K)
- E_A 是活化能 (eV)
- k_B 是波尔兹曼常数, $k_B = 8,617 \times 10^{-5}$ eV/K
- V_1 是现场工作电压 (V)
- V_2 是加速试验电压 (V)
- n_1 是针对电压模型的常数
- H_1 是现场工作相对湿度
- H_2 是加速试验相对湿度
- n_2 是针对相对湿度模型的常数 (铝的腐蚀, $n=3$)

多加速因子计算模型

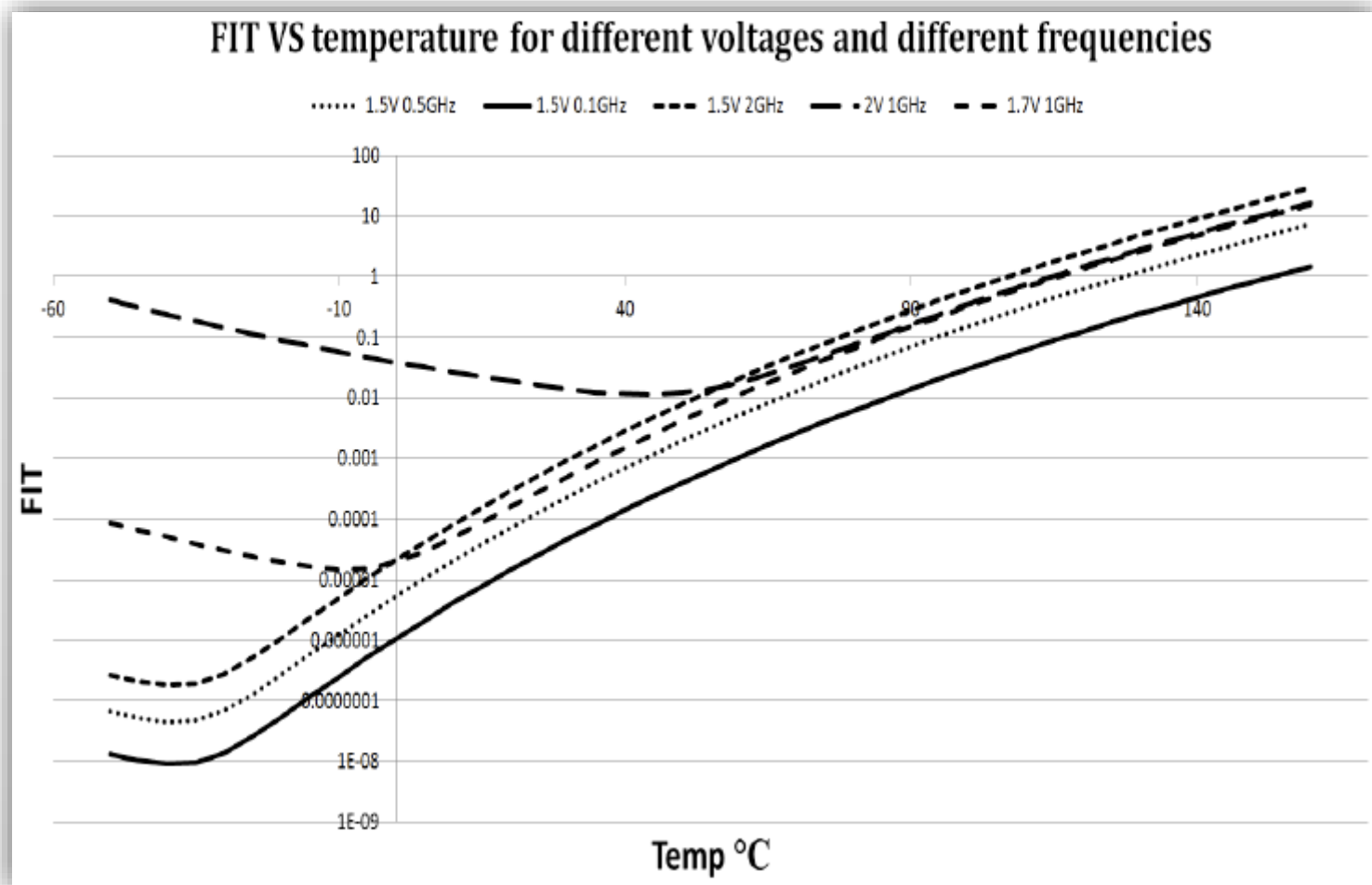
	TDDB	HCI	BTI	EM	Results
V_1, T_1	$W.A_1$	$X.B_1$	$Y.C_1$	$Z.D_1$	$Failure_1$
V_2, T_2	$W.A_2$	$X.B_2$	$Y.C_2$	$Z.D_2$	$Failure_2$
V_3, T_3	$W.A_3$	$X.B_3$	$Y.C_3$	$Z.D_3$	$Failure_3$
V_4, T_4	$W.A_4$	$X.B_4$	$Y.C_4$	$Z.D_4$	$Failure_4$

$$\begin{matrix} & AF \\ \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & D_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 & D_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 & D_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 & D_4 \end{bmatrix} & \times & \begin{matrix} P_i \\ \begin{bmatrix} W \\ X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \end{matrix} & = & \begin{matrix} \lambda \\ \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix} \end{matrix}\end{matrix}$$

$$(AF) \times (P_i) = (\lambda) \rightarrow (P_i) = (AF)^{-1} \times (\lambda)$$

Note: Hot carrier injection (HCI), Electromigration (EM), Bias temperature instability (BTI) and time, dependent dielectric breakdown (TDDB).

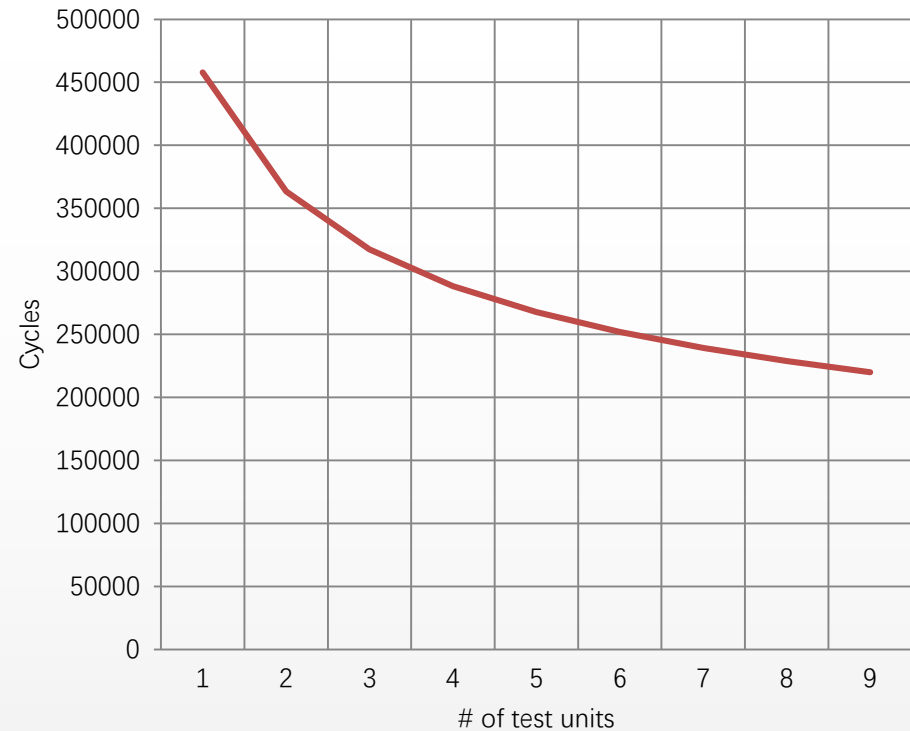
多加速因子案例



机械产品可靠性试验

Weibull模型

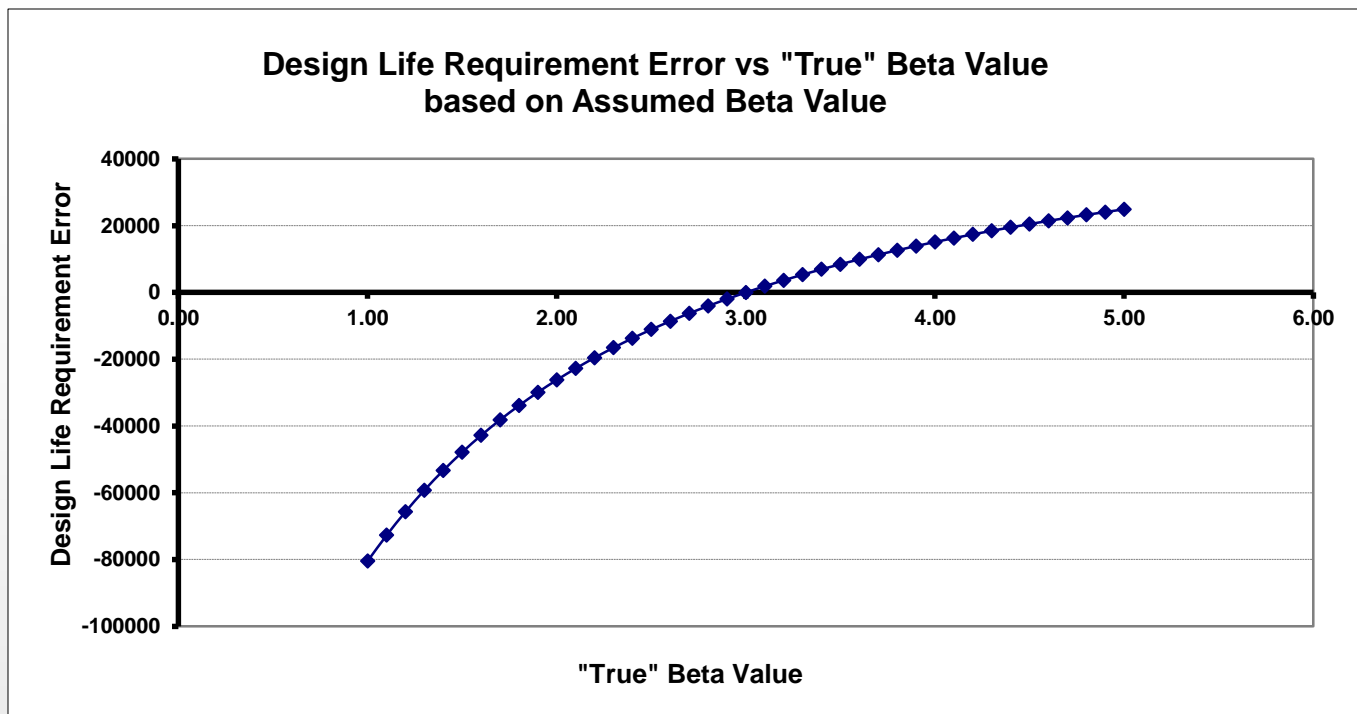
R	0.9	可靠性
t	150000	寿命要求
b	3	Beta值假设
1-a	0.95	置信度水平



n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
test time	457825	363376	317438	288412	267738	251951	239332	228913	220099

Weibayes模型

寿命要求	寿命单位	Beta假设值	Weibayes零失效每个样品的测试要求 (Hours)	样品数量	可靠性要求
150,000	Hours	3.00	220,204	3	0.90



β值差异评估

"True" Beta Value	Actual Demonstrated Design Life (Hours) at R = 0.9	Percent of Design Life Requirement Actually Demonstrated at R = 0.9	Design Life Requirement Error (Hours) at R = 0.9	Change in Number of Expected Failures at R = 0.9
2.00	123,801	82.5%	-26199	217
2.10	127,243	84.8%	-22757	191
2.20	130,455	87.0%	-19545	167
2.30	133,459	89.0%	-16541	144
2.40	136,272	90.8%	-13728	121
2.50	138,914	92.6%	-11086	99
2.60	141,397	94.3%	-8603	78
2.70	143,736	95.8%	-6264	58
2.80	145,942	97.3%	-4058	38
2.90	148,027	98.7%	-1973	19
3.00	150,000	100.0%	0	0
3.10	151,869	101.2%	1869	-18
3.20	153,643	102.4%	3643	-35
3.30	155,328	103.6%	5328	-52
3.40	156,930	104.6%	6930	-68
3.50	158,457	105.6%	8457	-84
3.60	159,912	106.6%	9912	-99
3.70	161,300	107.5%	11300	-113
3.80	162,627	108.4%	12627	-127
3.90	163,896	109.3%	13896	-141
4.00	165,110	110.1%	15110	-154

机械零部件 β 值

Description	β	η (Years)	2-Year Renewal Interval (FPMH)	8-Year Renewal Interval (FPMH)	15-Year Renewal Interval (FPMH)
Seal, static, gasket	1.4	3	31	41	42
Seal, static, o-ring	1.4	3	31	41	42
Seal, dynamic, shaft	1.4	3	31	41	42
Spring, compression	1.1	3	36	39	39
Spring, extension	1.1	3	36	39	39
Spring, torsional	1.1	3	36	39	39
Solenoid	1.1	9	11	12	13
Contactactor	1	10	11	11	11
Valve, poppet	1	11	10	10	10
Valve, slide	1	17	6.7	6.7	6.7
Bearing, ball	1.3	5	17	23	25
Bearing, roller	1.3	6	13	19	20
Bearing, sleeve	1	6	19	19	19
Bearing, linear motion	1.2	8	11	14	15
Gear, spur	2	9	2.8	9.9	14
Gear, helical	2	9	2.8	9.9	14
Gear, bevel	2	9	2.8	9.9	14
Gear, planetary	2	9	2.8	9.9	14
Gear, spline	2	9	2.8	9.9	14
Actuator, linear	1.2	11	7.3	9.4	10
Actuator, rotary	2	9	2.8	9.9	14
Pump, centrifugal, axial flow	1.2	4	24	29	30
Pump, centrifugal	1.2	4	24	29	30

动态密封垫圈

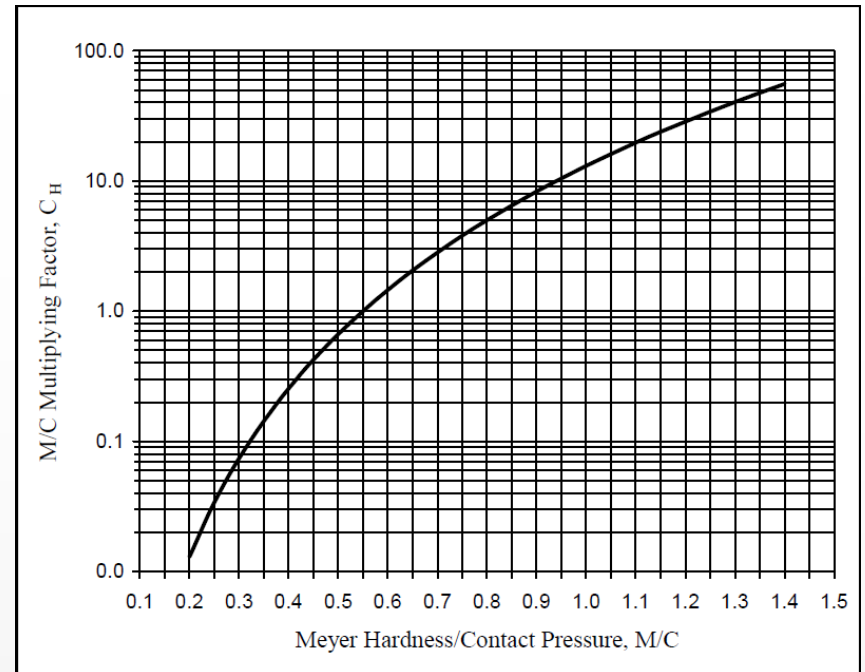
$$\lambda_{SE} = \lambda_{SE,B} \cdot C_P \cdot C_Q \cdot C_{DL} \cdot C_H \cdot C_F \cdot C_V \cdot C_T \cdot C_N$$

- λ_{SE} = 密封失效率, (百万小时失效数)
- $\lambda_{SE,B}$ = 密封基本失效率, 每百万小时2.4个失效
- C_P = 流体压力影响因子
- C_Q = 允许泄露影响因子
- C_{DL} = 密封尺寸影响因子
- C_H = 密封硬度和接触压力影响因子
- C_F = 密封座光洁度影响因子
- C_V = 流体速度影响因子
- C_T = 温度影响因子
- C_N = 流体中污染物影响因子

动态密封垫圈压力加速因子

$$C_H = \left(\frac{M/C}{0.55} \right)^{4.3}$$

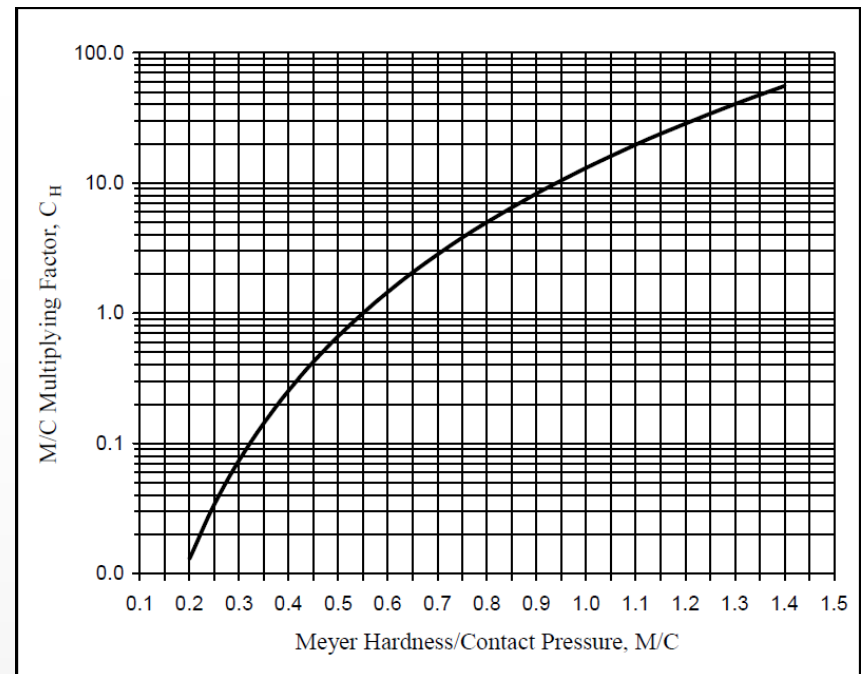
- M = Meyer Hardness, lbs/in²
- C = Contact Pressure, lbs/in²



动态密封垫圈压力加速因子

$$C_H = \left(\frac{M/C}{0.55} \right)^{4.3}$$

- M = 迈耶耳硬度, lbs/in²
- C = 接触压力, lbs/in²



机电产品可靠性试验

压缩机

$$\lambda_C = (\lambda_{FD} \cdot C_{SF}) + \lambda_{CA} + \lambda_{BE} + \lambda_{VA} + \lambda_{SE} + \lambda_{SH}$$

- λ_C = 压缩机失效率（百万小时失效数）
- λ_{FD} = 活塞/转轴（百万小时失效数）
- C_{SF} = 应用条件影响因子
- λ_{CA} = 外壳失效率（百万小时失效数）
- λ_{BE} = 轴承失效率（百万小时失效数）
- λ_{VA} = 控制阀模组失效率（百万小时失效数）
- λ_{SE} = 密封失效率（百万小时失效数）
- λ_{SH} = 轴失效率（百万小时失效数）

活塞/转轴

Fluid Driver Mode		Model Type	Base Rate λ_{FD} (Failures / million hours of operation)
Radial flow			12.0
Axial flow			12.0
Reciprocating		Single piston	14.0
Reciprocating		Double acting piston	16.5
Reciprocating		Labyrinth	16.5
Reciprocating		Rubber Diaphragm	22.8
Reciprocating		Metal Diaphragm	28.5
Rotary		Vane	12.0
Rotary		Screw	12.0
Rotary		Lobe	12.0
Rotary		Liquid Ring	12.0

泵

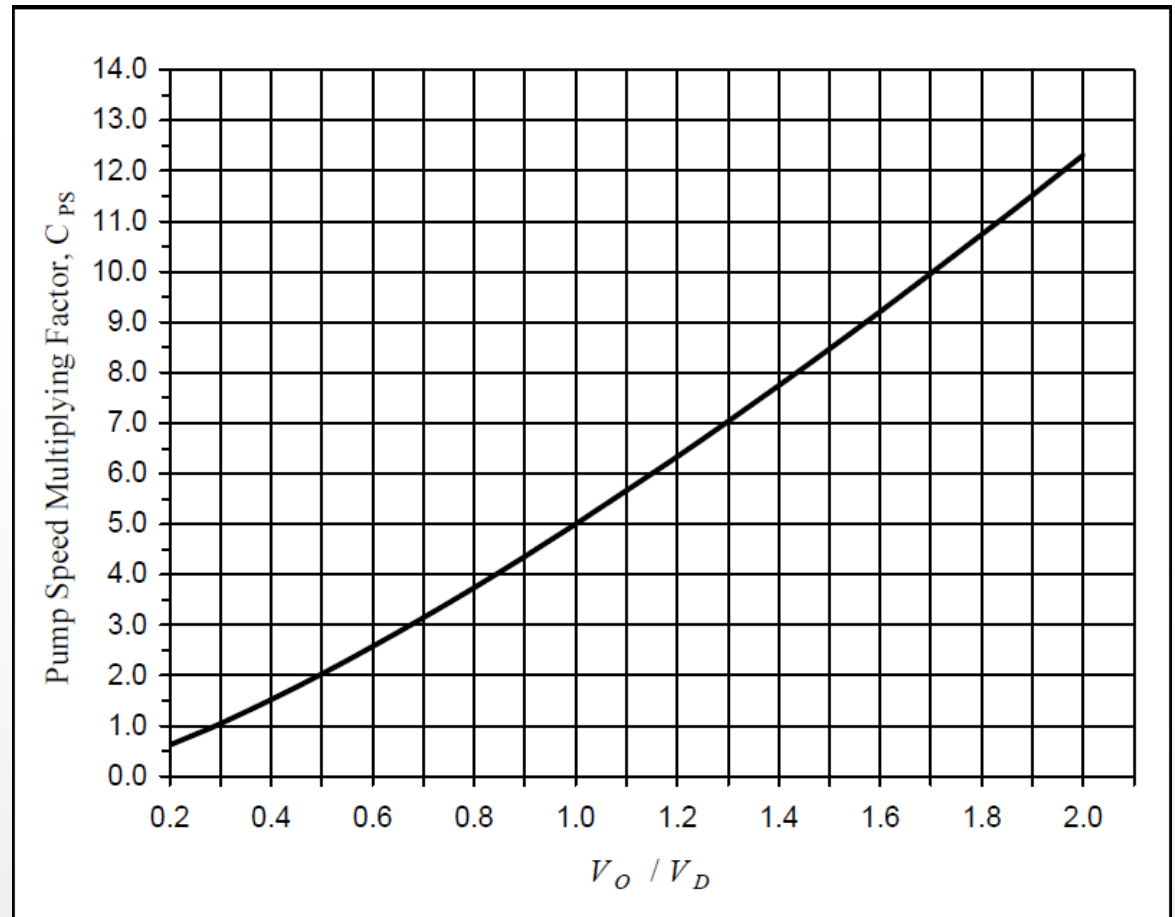
$$\lambda = \lambda_{FD,B} \cdot C_{PF} \cdot C_{PS} \cdot C_C \cdot C_{SF}$$

- λ_{FD} = Failure rate for the pump fluid driver, failures/million operating hours
- $\lambda_{FD,B}$ = Base failure rate of pump fluid driver
- C_{PF} = Percent flow multiplying factor
- C_{PS} = Operating speed multiplying factor
- C_C = Contaminant multiplying factor
- C_{SF} = Service factor multiplying factor

泵转速加速因子

$$C_{PS} = k \cdot \left(\frac{V_O}{V_D} \right)^{1.3}$$

V_O = Operating speed
 V_D = Maximum allowable design speed
 K = Constant = 5.00



电机

$$\lambda_M = (\lambda_{M,B} \cdot C_{SF}) + \lambda_{WI} + \lambda_{BS} + \lambda_{ST} + \lambda_{AS} + \lambda_{BE} + \lambda_{GR} + \lambda_C$$

- λ_M = 电机失效率（百万小时失效数）
- $\lambda_{M,B}$ = 电机基本失效率（百万小时失效数）
- C_{SF} = 应用条件影响因子
- λ_{WI} = 绕组失效率（百万小时失效数）
- λ_{BS} = 碳刷失效率（每百万小时3.2个失效）
- λ_{ST} = 外壳失效率（每百万小时0.001个失效）
- λ_{AS} = 轴失效率（百万小时失效数）
- λ_{BE} = 轴承失效率（百万小时失效数）
- λ_{GR} = 齿轮失效率（百万小时失效数）
- λ_C = 电容失效率

电机绕组

$$\lambda_{WI} = \lambda_{WI,B} \cdot C_T \cdot C_V \cdot C_{alt}$$

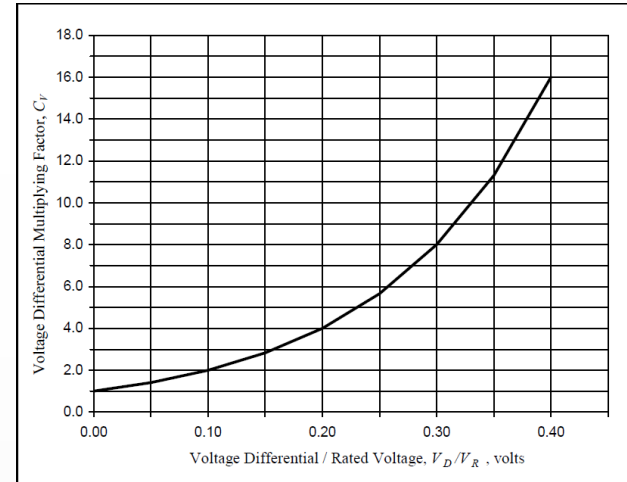
- λ_{WI} = 绕组失效率（百万小时失效数）
- $\lambda_{WI,B}$ = 绕组基本失效率（百万小时失效数）
- C_T = 环境温度影响因子
- C_V = 电压影响因子
- C_{alt} = 工作海拔影响因子

电机绕组电压加速因子

单相电机：

$$C_V = 2^{10(V_D/V_R)}$$

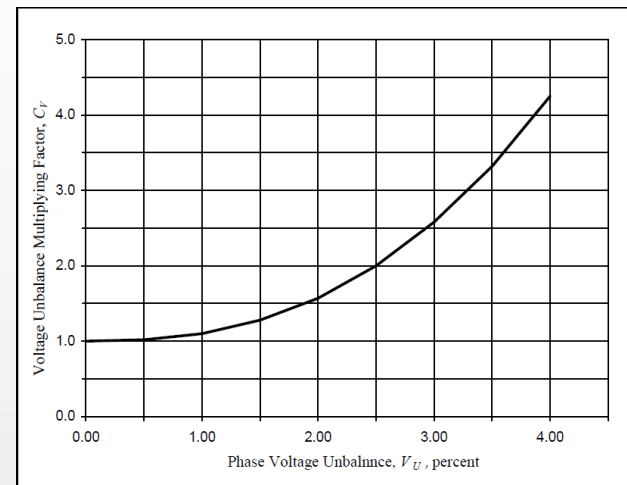
- V_D = 额定电压和实际工作电压的差值
- V_R = 额定电压



三相电机：

$$C_V = 1 + (0.40V_U)^{2.5}$$

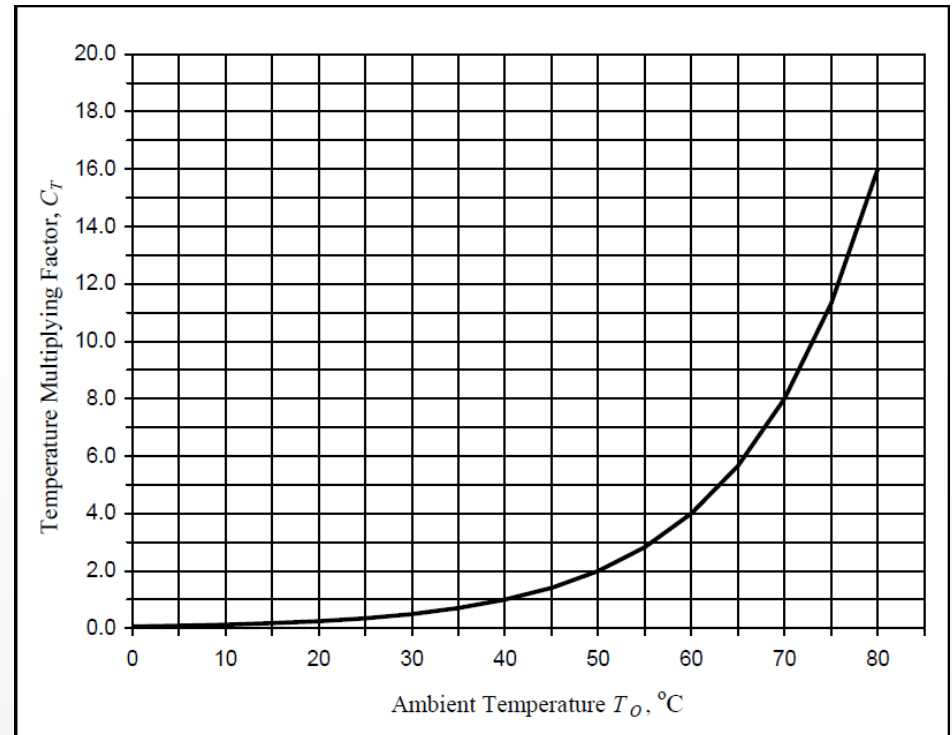
- V_U = % 电压不平衡比例（最大电压差 / 平均相位电压）



电机绕组温度加速因子

$$C_T = 2^{(T_O - 40)/10}$$

T_O = 电机满载时的环境温度



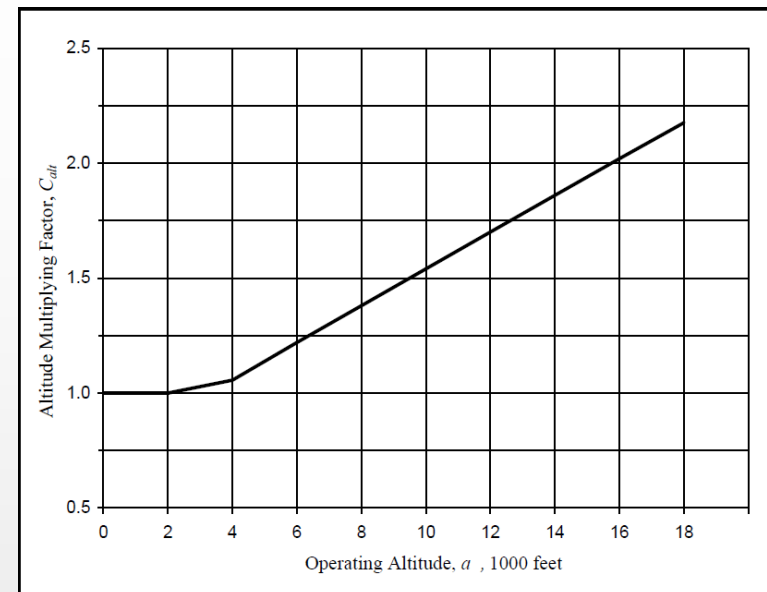
电机绕组海拔加速因子

工作海拔 > 3300 英尺:

$$C_{alt} = 1.00 + 8 \times 10^{-5}(a - 3300)$$

- a = 工作海拔 (英尺)

工作海拔 ≤ 3300 ft, $C_{alt} = 1.0$



软件可靠性试验

MTBF试验

	时间截止测试		失效数截止测试	
单边置信（低）	$\frac{2T}{X^2(\alpha, 2n+2)}$		$\frac{2T}{X^2(\alpha, 2n)}$	
双边置信	$\frac{2T}{X^2(\alpha/2, 2n+2)}$	$\frac{2T}{X^2(1-\alpha/2, 2n)}$	$\frac{2T}{X^2(\alpha/2, 2n)}$	$\frac{2T}{X^2(1-\alpha/2, 2n)}$
MTBF极值	低	高	低	高

- T：总试验时间
- α ：接受风险
- n：失效数

卡方分布参数表

d	<div> <div>99% 双边</div> <div>99.5% 单边</div> <div>98% 双边</div> <div>99% 单边</div> <div>95% 双边</div> <div>97.5% 单边</div> <div>90% 双边</div> <div>95% 单边</div> <div>80% 双边</div> <div>90% 单边</div> <div>60% 双边</div> <div>80% 单边</div> </div>											
	下限						上限					
2	0.1850	0.2170	0.2720	0.333	0.433	0.619	4.47	9.462	19.388	39.58	100.0	200.0
4	0.1350	0.1510	0.1800	0.210	0.257	0.334	1.21	1.882	2.826	4.102	6.667	10.00
6	0.1080	0.1190	0.1390	0.159	0.188	0.234	0.652	0.909	1.221	1.613	2.3077	3.007
8	0.0909	0.1000	0.1140	0.129	0.150	0.181	0.437	0.573	0.733	0.921	1.212	1.481
10	0.0800	0.0857	0.0976	0.109	0.125	0.149	0.324	0.411	0.508	0.600	0.789	0.909
12	0.0702	0.0759	0.0856	0.0952	0.107	0.126	0.256	0.317	0.383	0.454	0.555	0.645
14	0.0635	0.0690	0.0765	0.0843	0.0948	0.109	0.211	0.257	0.305	0.355	0.431	0.500
16	0.0588	0.0625	0.0693	0.0760	0.0848	0.0976	0.179	0.215	0.251	0.290	0.345	0.385
18	0.0536	0.0571	0.0633	0.0693	0.0769	0.0878	0.156	0.184	0.21	0.243	0.286	0.322

注：

1、 $d = 2 \times$ 累计失效数

2、对于时间截止试验，如果失效数低于试验样品数量，则 $d = 2 \times (\text{累计失效数} + 1)$

卡方分布

$$MTBF = \frac{2T}{\chi^2(2R + 2, 1 - \alpha)}$$

置信度水平

0.90

可接受的失效数（推荐不接受出现任何失效）

0.00

产品MTBF指标（小时）

50000.00

卡方模型因子（基于置信度水平和可接受失效数）

4.61

试验样品数量

50.00

试验时间（小时）

2303

假设检验

失效次数	0
失效率	0.0001333
置信度水平	0.95
最少测试次数	22473

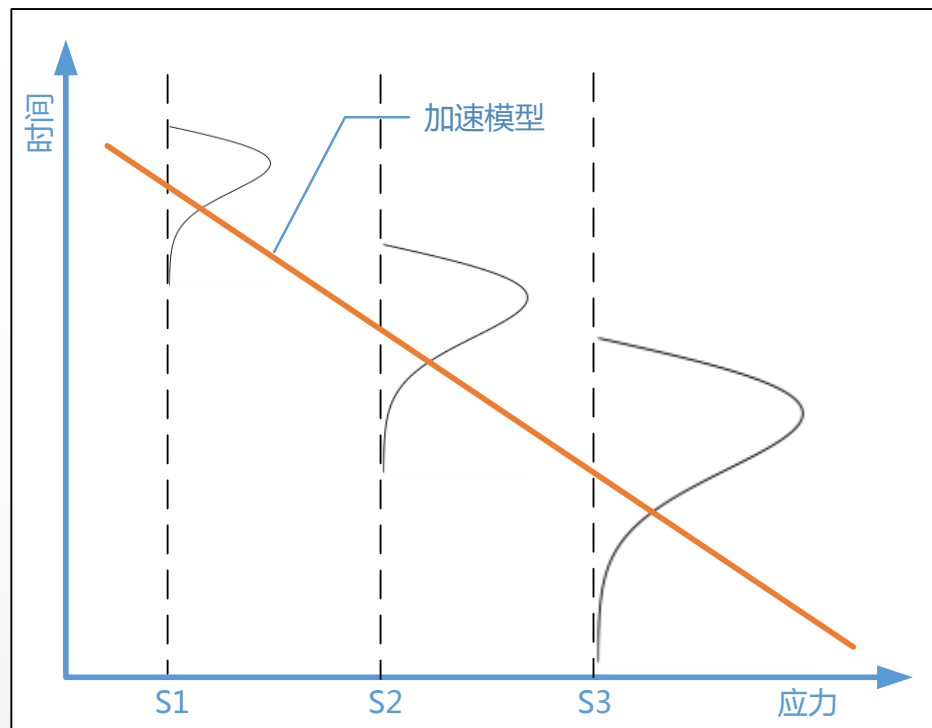
通用可靠性试验方法

无模型加速试验

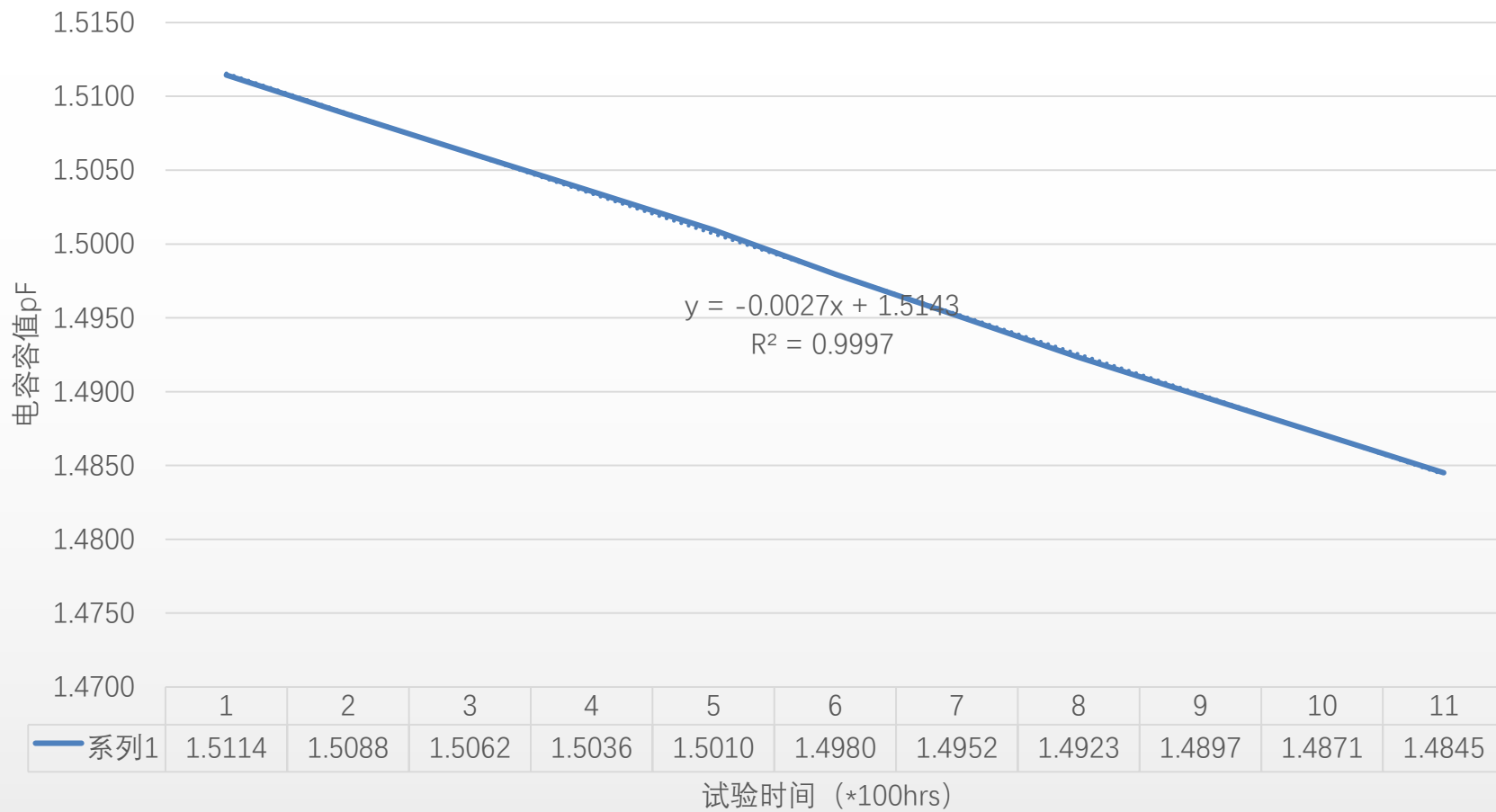
准备三组样品分别在不同应力水平下开展可靠性试验，对试验结果进行可靠性数据分析获得其分布模型和具体参数。对三个应力水平下的中值数据再进行拟合得出其不同应力条件下的加速模型。根据三组应力试验结果的任意一组数据结合加速模型来计算特定应力下的产品可靠性水平。

此方法不仅可以计算出产品加速模型，而且可以同时计算出产品特定应力条件下的可靠性水平，从根本上解决了没有加速模型无法开展加速寿命试验的问题，而且由于是基于试验数据，精度有保障。

注：此加速模型分析计算方法已经申请发明专利，已经公开，正在审查中。



寿命退化试验



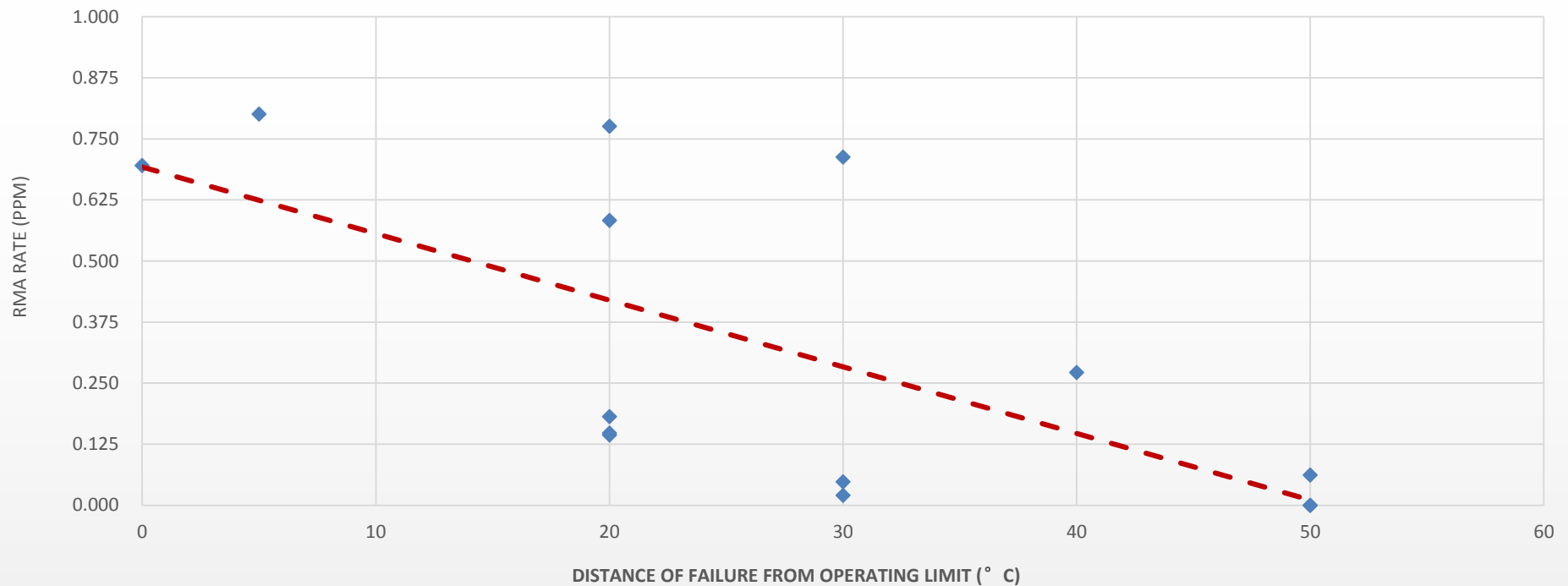
HALT定量可靠性评估

HALT 2.0 起源

- Harry McLean拥有非常丰富的HALT试验经验，他首先提出通过产品不同阶段的HALT试验结果来进行产品的可靠性水平的对比评估，相关发明专利成功通过了美国专利局的审批。
- Harry提出HALT的裕量的概念并出版相应的书籍来详细讨论HALT试验标准的制定。
- Harry与OPS合作开发基于HALT试验结果来进行产品可靠性评估的方法和工具，这在之前的基础上又进了一大步，是对HALT方法的一个创新。关于如何就HALT试验结果进行可靠性评估的具体算法没有公开，具体的算法无从得知。但是这说明利用HALT试验结果进行可靠性评估在企业开展应用的可行性。

Cisco HALT裕量和返修率

HALT OPERATING RANGE VS. MONTHLY RMA PPM



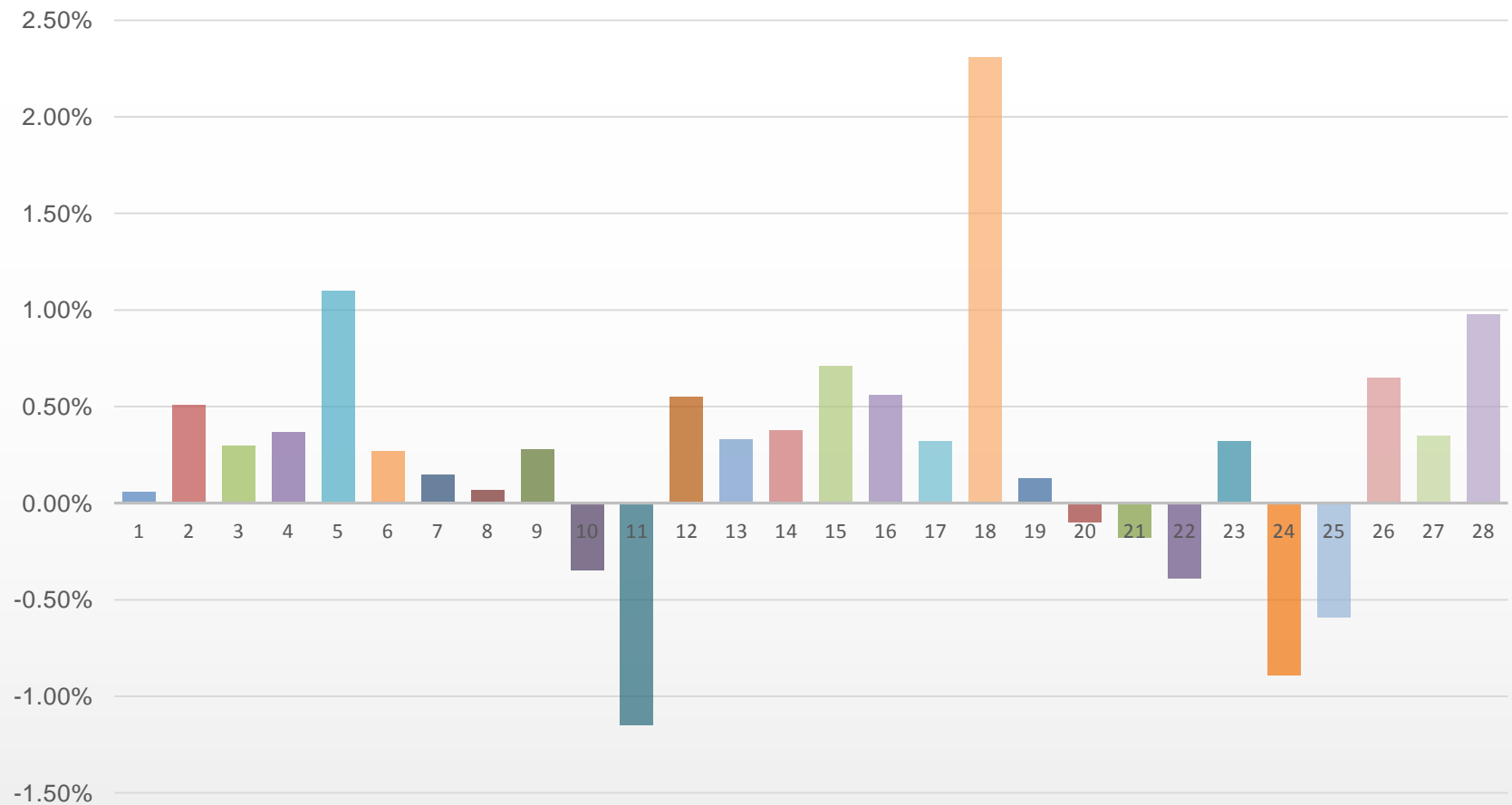
OPS HALT计算示例

Field Failure Rate Estimate - % of Failures/Year

	Input Matrix	Data Verifiy	Key
MTBF (in Hrs) =	3,199,090	OK	User input
Product Thermal (Hot in °C) =	80	OK	Calculated
Product Thermal (Cold in °C) =	-50	OK	Selection
Product Vibration (in Grms) =	20	OK	Data Validity
Prod Published Spec Level (see below) =	1	OK	
Number of HALT Samples =	4	OK	
HASS or HASA (yes = 1, no = 0) =	0	OK	
If HASS or HASA, Daily Sample Size =	1	OK	
If HASS or HASA, Detectable Shift in AFR (in %) =	0	OK	
Steady State AFR, % (HALT Only) =	1.35		
Steady State Field MTBF, Hrs (HALT Only) =	648169		
Lower 90% HALT Confidence Limit =	349429		
Upper 90% HALT Confidence Limit =	1332260		
Days to Detect Shift w/ HALT/HASS/HASA (Max) =			

Published Spec	Level #	Guard Band Limits	
0 to +40	1	Consumer	-30 to +80
0 to +50	2	Hi-end Consumer	-30 to +100
-10 to +50	3	Hi Performance	-40 to +110
-20 to +50	4	Critical Application	-50 to +110
-25 to +65	5	Sheltered	-50 to +110
-40 to +85	6	All Outdoor	-65 to +110

OPS HALT计算模型验证



注：纵坐标为年失效率的误差绝对值

基于HALT的可靠性计算模型

$$\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} fr_1 \\ \vdots \\ fr_n \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} fr_1 \\ \vdots \\ fr_n \end{pmatrix}$$

$$fr_j = \sum_{i=1}^n x_{ji} \cdot y_i$$

其中 $\mathbf{X} = (x_1 \ \dots \ x_n)$ 为关键应力的工作极限水平、 $\mathbf{Y} = (y_1 \ \dots \ y_n)^T$ 为关键应力的类型、 $\mathbf{FR} = (fr_1 \ \dots \ fr_n)^T$ 为现场失效率、 n 为关键应力的类型的数量、 i 为矩阵的列指标， j 为矩阵的行指标， $1 \leq i, j \leq n$ 。 n 的取值范围为大于1小于15的整数值。

假定新型号产品关键应力工作极限水平为 $\mathbf{X}' = (x'_1 \ \dots \ x'_n)$ ，根据上面的数学计算对于新型号产品的现场失效率为

$$\mathbf{FR}' = \mathbf{X}' \cdot \mathbf{Y}$$

注：本模型已经于2015年3月提交发明专利申请至国家知识产权局专利局并受理

HALT可靠性计算模型验证

Prediction Result		HALT Test Result			AFR Based on HALT, %		
MTBF	AFR	Hot	Cold	Vibration	OPS Calculation	Matrix	Field Act
17,000	51.6	120	-70	48	1.18	N/A	1.36
32,000	27.4	125	-100	48	0.39	N/A	0.78
14,000	62.6	120	-60	50	1.87	N/A	1.55
18,900	46.4	120	-80	62	0.89	0.5983	1.78
20,600	42.6	120	-90	65	0.57	0.2296	1.16
14,600	60.0	120	-90	55	0.81	0.5870	0.16
71,000	12.3	120	-65	40	0.86	1.7766	0.51
11,000	79.7	125	-70	25	1.34	2.3862	0.36

多加速因子计算模型

	TDDB	HCI	BTI	EM	Results
V_1, T_1	$W.A_1$	$X.B_1$	$Y.C_1$	$Z.D_1$	$Failure_1$
V_2, T_2	$W.A_2$	$X.B_2$	$Y.C_2$	$Z.D_2$	$Failure_2$
V_3, T_3	$W.A_3$	$X.B_3$	$Y.C_3$	$Z.D_3$	$Failure_3$
V_4, T_4	$W.A_4$	$X.B_4$	$Y.C_4$	$Z.D_4$	$Failure_4$

$$\begin{matrix} & AF \\ \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & D_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 & D_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 & D_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 & D_4 \end{bmatrix} & \times & \begin{matrix} P_i \\ \begin{bmatrix} W \\ X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \end{matrix} & = & \begin{matrix} \lambda \\ \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix} \end{matrix} \end{matrix}$$

$$(AF) \times (P_i) = (\lambda) \rightarrow (P_i) = (AF)^{-1} \times (\lambda)$$

Note: Hot carrier injection (HCI), Electromigration (EM), Bias temperature instability (BTI) and time, dependent dielectric breakdown (TDDB).

产品HALT可靠性评估流程

- 一、确定产品的关键应力的类型和数量
- 二、获得已经销售同类型不同型号产品所有关键应力的工作极限水平
- 三、获得已经销售同类型不同型号产品现场失效率水平
- 四、获得已销售同类型不同型号产品关键应力的类型和现场失效率的关系
- 五、获得新型号同类型产品高加速寿命试验
- 六、计算新型号同类型产品的现场失效率

注意事项

- 产品关键应力的类型为温度、电压、湿度、电流、频率、静电、振动、推拉力、弯折、盐雾、臭氧、气压、光照或温度循环中的任意两种或多种。
- 开展高加速寿命试验已经销售同类型不同型号产品的型号数量与所确定的关键应力的类型的数量一致。每个型号产品至少测试三个样品。
- 所需要收集的同类型不同型号产品的产品型号数量与所确定的关键应力的类型数量一致。记录下全部型号产品所有应力的工作极限水平。
- 新型号同类型产品高加速寿命试验至少测试三个样品。记录下产品不同应力的工作极限水平。

产品相似性定义

- 同一企业的产品
- 功能相似
- 使用环境一致
- 功率在一个数量级上
- 尺寸大小接近
- 生产工艺相似



摩西/Mosch/卢申林/Sammy

2001年：毕业后开始从事可靠性工作至今
2004年：作为第二作者编写出版《印制电路板可靠性》
2005年：创建可靠性家园网 (www.reliaonline.com)
2010年：开设摩西的可靠不可靠博客 (www.mosch.cn)
2011年：上海电子学会可靠性专业委员会副主任委员
2013年：中国质量协会可靠性推进工作委员会委员
2014年：提交3份可靠性发明专利申请，等待实审提案中
2015年：提交1份可靠性发明专利申请，等待实审提案中

[186-2621-3737](tel:186-2621-3737) mosch@xreliability.com





微信公众号：mosch-reliability

Any Questions?