



可靠性试验技术

陈晓彤

北京运通恒达科技有限公司

2009年8月



内 容

- ◆ 可靠性试验综述
- ◆ 常规应力的可靠性试验
 - 环境应力筛选试验
 - 可靠性增长试验
 - 可靠性验证试验
- ◆ 加速应力的可靠性试验
 - 定性加速寿命试验—HALT
 - 定量加速寿命试验—ALT





第一部分 可靠性试验综述

- ◆ 可靠性试验概述
- ◆ 可靠性试验的分类
- ◆ 可靠性试验的要素





可靠性试验的目的

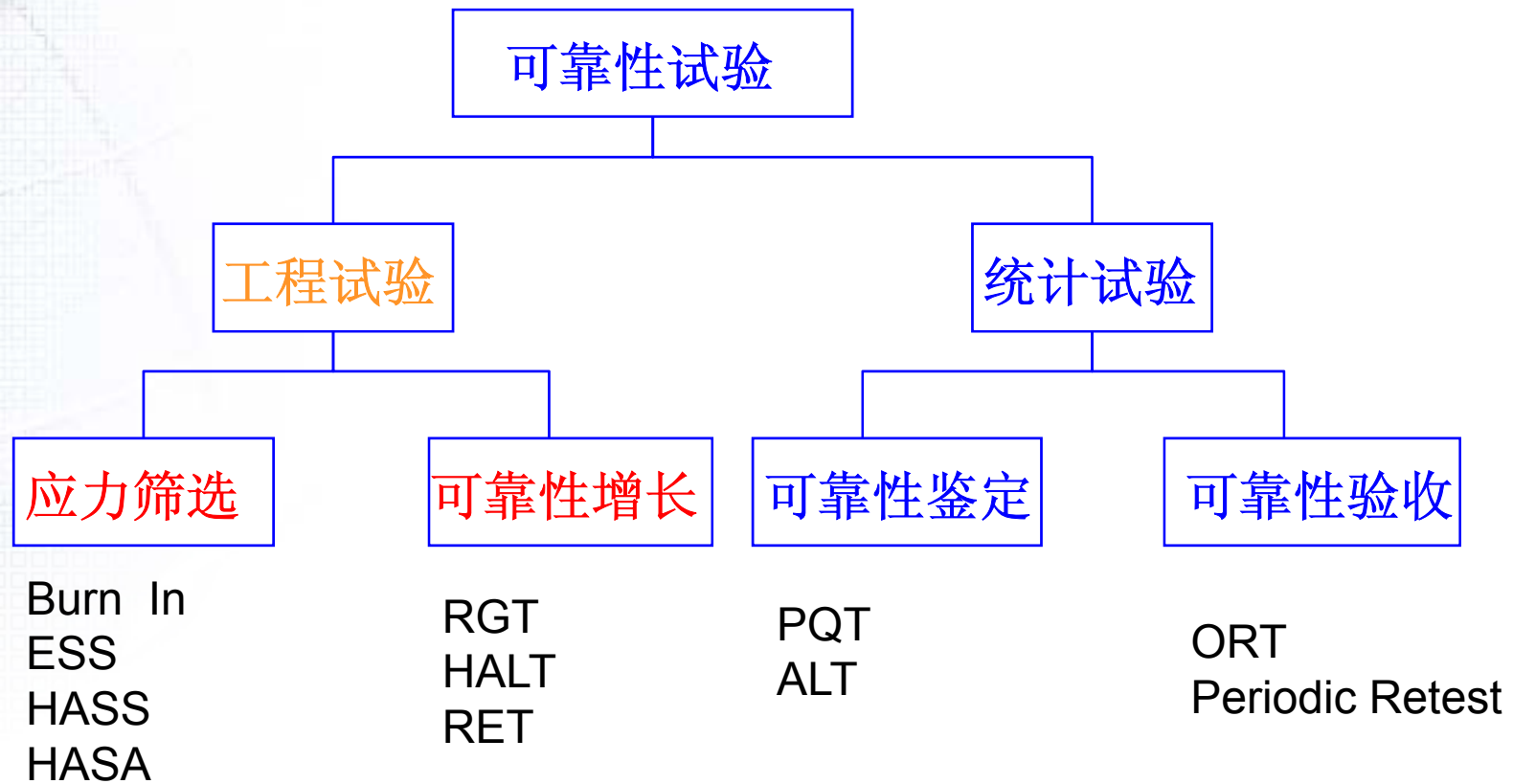
可靠性试验是对产品的可靠性进行调查、分析和评价的一种手段。

其目的是：

- 筛选：发现产品在设计、材料和工艺方面的各种缺陷，避免有缺陷的产品流到客户；
- 增长：为产品的可靠性设计改进、减少维修和保障费用提供提供信息，通过设计改进提高产品的可靠性水平；
- 鉴定：确认是否符合可靠性定量要求。

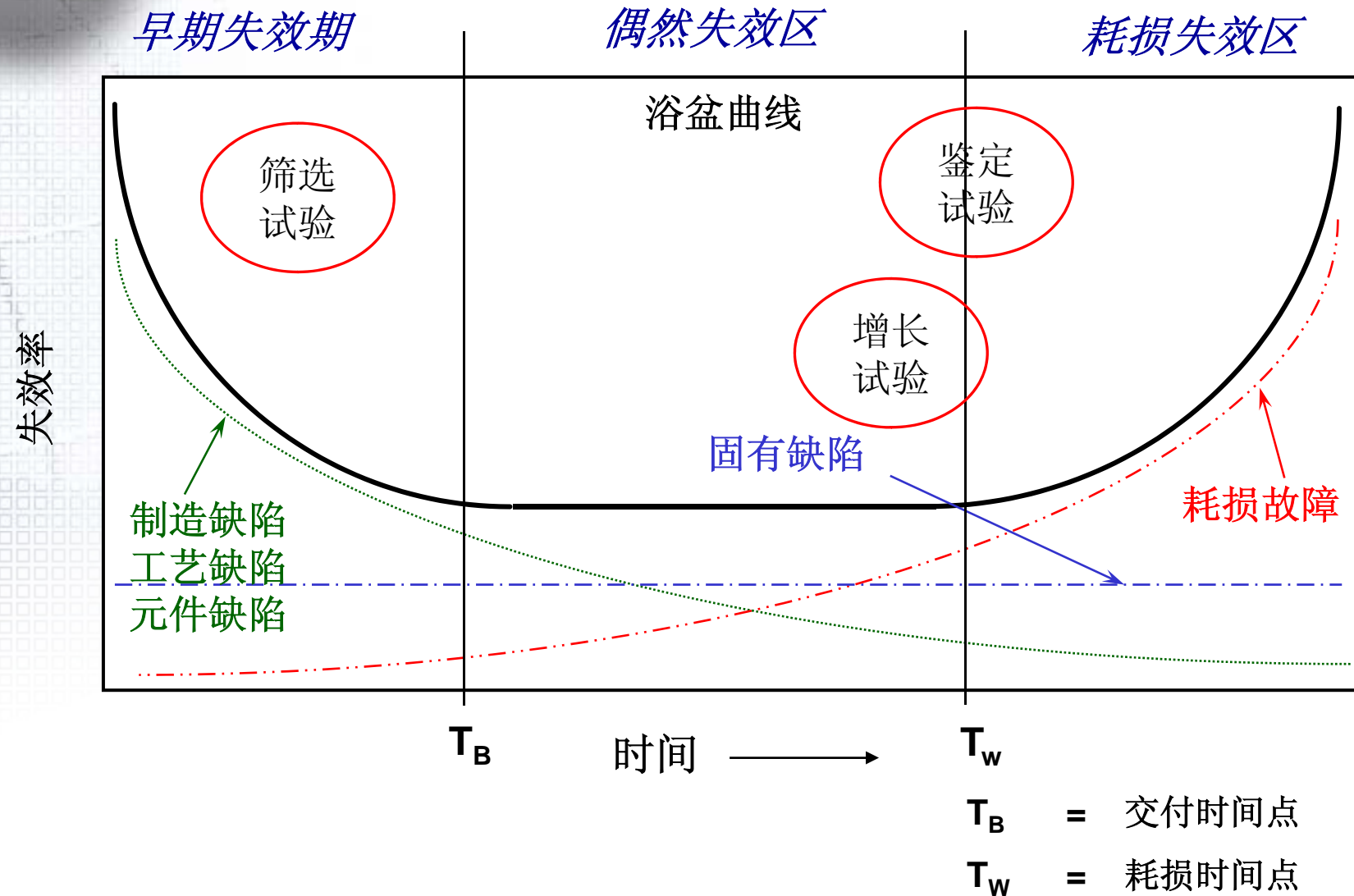


可靠性试验的分类





浴盆曲线和可靠性试验





可靠性试验的要素

- ◆ 故障判据
- ◆ 试验剖面
- ◆ 检测点和检测周期



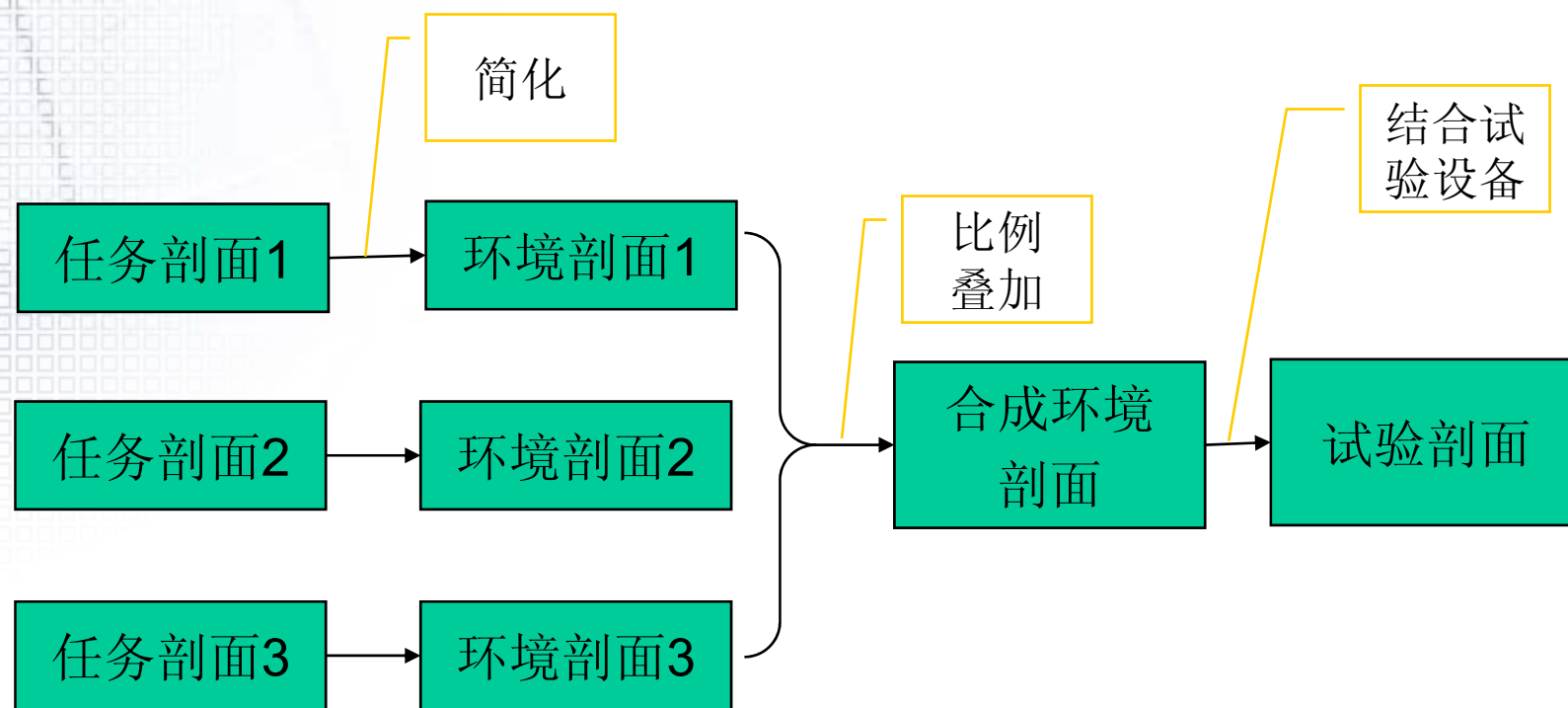
故障判据

- ◆ **故障**：不能完成预定功能的状态或事件
- ◆ **独立故障**：由于自身原因导致的故障
- ◆ **从属故障**：由于其它产品的故障所导致
- ◆ **关联故障**：按规定的条件使用而引起的故障
- ◆ **非关联故障**：未按规定条件使用而引起的故障



试验剖面

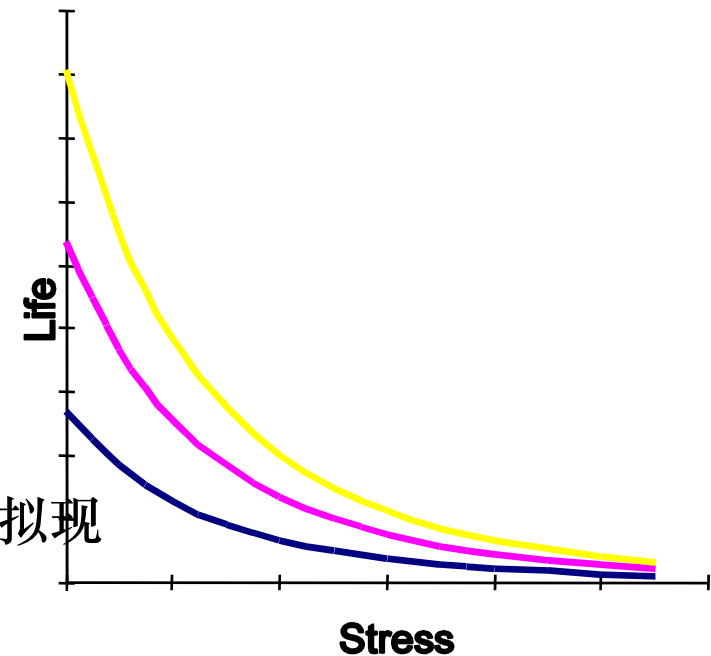
- ◆ **任务剖面**：对产品在完成规定任务的这段时间内所要经历的全部重要时间和状态的一种时序描述。
- ◆ **试验剖面**：供试验用的环境参数与时间的关系图





试验应力

- ◆ 环境越恶劣可靠性越差
 - 温度应力会提高产品的故障率
 - 振动应力会加速产品的疲劳
 - 湿度和化学应力会缩短产品的寿命
- ◆ 环境应力和可靠性一般是指数关系：
 - 温度— Arrhenius
 - 振动— Coffin-Manson
 - 湿度和其他— Eyring
- ◆ 在常规应力条件下进行试验可以真实地模拟现场使用情况—**常规试验**
- ◆ 有意施加恶劣的环境应力进行试验可以高效地暴露产品缺陷—**加速试验**。





第 2 部分 常规可靠性试验

- ◆ 环境应力筛选试验－ESS
- ◆ 可靠性增长试验－RGT
- ◆ 可靠性鉴定试验－RQT



2.1 环境应力筛选试验（ESS）

在产品出厂前，有意将环境应力施加到产品上，使产品的潜在缺陷加速发展成**早期故障**，并加以排除，从而提高产品的可靠性。

连接不牢

虚焊、漏焊

不合格元器件



ESS 的应力选择

振动应力：

- 粒子污染；
- 压紧导线磨损；
- 晶体缺陷；
- 混装；
- 邻近板摩擦；
- 两个元器件短路；
- 导线松脱；
- 元器件粘接不良；
- 大质量元器件紧固不当；
- 机械性缺陷等。

温度应力：

- 元器件参数漂移；
- 电路板开路、短路；
- 元器件安装不当；
- 错用元器件；
- 密封失效；
- 化学污染；
- 导线束端头缺陷；
- 夹接不当等。

采用温度应力和振动应力可以解决绝大部分早期失效问题



ESS 的应力选择

◆ 随机振动

◆ 正弦振动

如何选择？

◆ 温度保持

◆ 温度循环

如何选择？



筛选度（**SS**）：能剔除潜在缺陷的比率



随机振动 vs. 正弦振动

◆ 随机振动：

$$SS = 1 - e^{-0.0046(G_{rms})^{1.71}t}$$

-
- Grms—加速度均方根值，g；
- t —振动时间，min。

◆ 正弦振动：

$$SS = 1 - e^{-0.000727(G_{rms}/10)^{0.863}t}$$

结论：随机振动的筛选效率要比正弦振动高得多 ！



温度保持 vs. 温度循环

◆ 温度保持：

$$SS = 1 - e^{-0.0017(R+0.6)^{0.6}t}$$

Diagram illustrating the variables in the temperature retention equation:

- 与室温之差 (Difference from room temperature) points to R .
- 试验时间 (Test time) points to t .

◆ 温度循环：

$$SS = 1 - e^{-0.0017(R+0.6)^{0.6}[\ln(e+v)]^3 \bullet N}$$

Diagram illustrating the variables in the temperature cycling equation:

- 温变范围 (Temperature change range) points to R .
- 温变率 (Temperature change rate) points to v .
- 循环次数 (Number of cycles) points to N .

结论：温度循环的筛选效率要比温度保持高得多 ！



ESS 的机理和基本方法

◆ 机理：环境加速—>缺陷暴露—>剔除不合格品

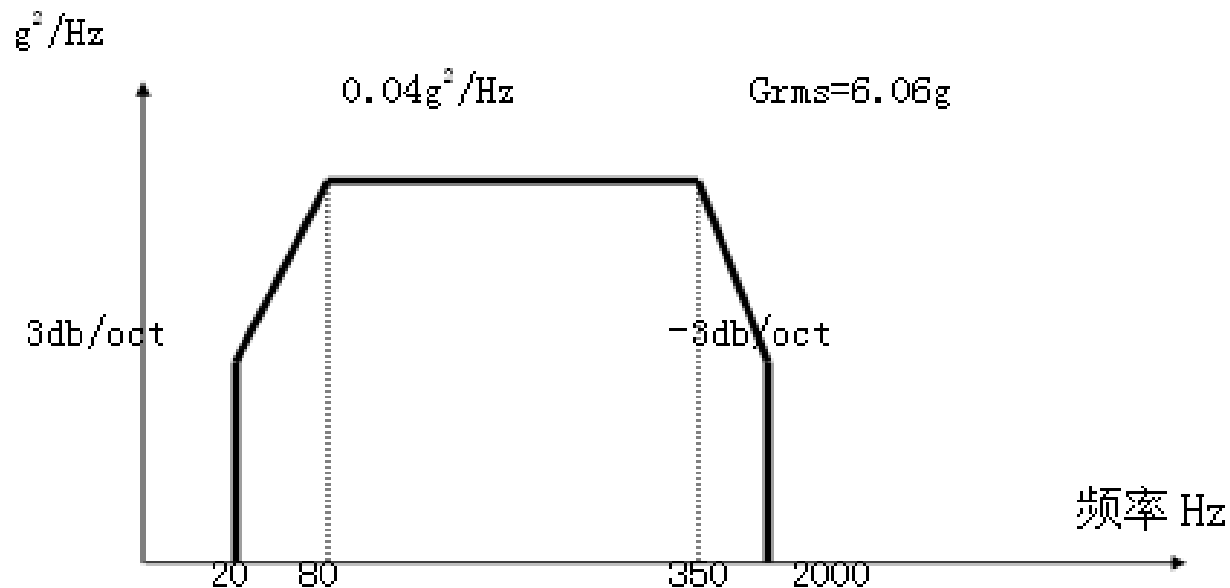
◆ 方法：

- 随机振动 ($0.04g^2/Hz$, 5~15min)
- 温度循环 (10~12个)
- 随机振动 ($0.04g^2/Hz$, 5~15min)



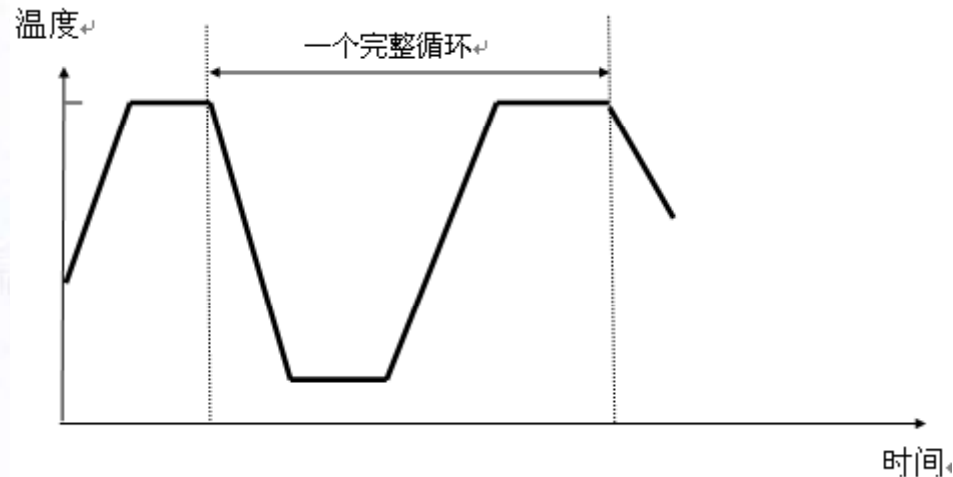
ESS的振动剖面

- ◆ 类型：随机振动
- ◆ 轴向：实际轴向或敏感轴向
- ◆ 时间：单轴向10mins，三轴向每轴向5mins
- ◆ 注意：疲劳特性，累积小于30min





温度循环剖面



- ◆ **高温保持温度**：一般取工作极限高温和贮存极限高温的最高值，例如+60℃；
- ◆ **低温保持温度**：一般取工作极限低温和贮存极限低温的最低值，例如-30℃；
- ◆ **温度箱温变率**：上升速率大于11℃/min，下降速率小于-8℃/min；
- ◆ **高/低温保持时间**：采取实际测量方式确定
- ◆ **一次温度循环的时间**：为一次升温、降温、温度保持的时间和，依赖于试验件的温度传导特性。
- ◆ **通电**：在温度循环试验过程中，在升温阶段和高温保持阶段，产品通电工作；在降温和低温保持阶段，产品断电不工作。



高低温保持时间的确定

- ◆ 将受试产品安装于温度箱内，将热电偶固定在产品的典型部位上，数量不得少于三个，装好热电偶后，应使产品恢复原状，接通产品电源，使其工作。
- ◆ 将试验箱温度设定值调到规定的高温极限值，使试验箱空气温度以 $11^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的平均速率上升。
- ◆ 保持试验箱空气温度在上设定值温度，直到产品上2/3热电偶的温度在上设定值温度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 为止，记录该时刻。
- ◆ 断开产品电源，使其停止工作。将试验箱温度设定值调到规定的低温极限值，使试验箱空气温度以 $-8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的平均速率下降。
- ◆ 保持试验箱空气温度在上设定值温度，直到产品上2/3热电偶的温度在上设定值温度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 为止，记录该时刻。
- ◆ 反复进行2-3次测量，得到升温时受试产品的滞后于试验箱空气的平均时间 $T1$ 和降温时受试产品的滞后于试验箱空气的平均时间 $T2$ 。
- ◆ 将 $T1$ 作为高温保持时间，将 $T2$ 作为低温保持时间。



试验效果预测

- ◆ 假设某产品的温度范围为 $-30^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ ，产品的实际温变率为温度箱温变率的40%，即当温度箱以 $11^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的温变速度时，产品的实际温变率为 $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$

方案	方案一	方案二	方案三	方案四
试验时间 (hrs)	40	20	10	10
温度箱温变率 ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	5	11	11	17
产品温变率 ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	2	4.4	4.4	6.8
循环次数	27	29.3	14.7	22.7
筛选度	0.7368	0.9468	0.7704	0.9679



试验前准备

- ◆ 高低温保持时间的测试
- ◆ 试验夹具的安装和试振
- ◆ 试验前产品测试
- ◆ 测试设备的准备和测试人员的培训
- ◆ 测试和故障记录表格的准备



试验故障处理（1）

- ◆ 对于破坏性故障（试验结束后，产品不能恢复其规定的功能），应对产品进行修复，修复后继续进行试验；
- ◆ 对于非破坏性故障（试验结束后，产品可恢复其正常功能），应对产品的试验环境进行分析。如果采用的试验环境应力超出了产品工作环境极限，可容忍其故障，不采取修复工作；如果采用的试验环境应力没有超出产品工作环境极限，则必须分析原因，找出可能的故障原因，实施修复。



试验故障处理（2）

- ◆ 对于试验过程中发生的故障，可在以下对策中选择其一，并在试验大纲中进行说明：
 - 中止试验，修复后继续进行试验；
 - 暂时中止试验，拆下故障件后，其余产品继续试验；
 - 继续进行试验，试验结束后修复。
- ◆ 所有通过环境应力筛选试验的产品，无论是未发生故障和故障后修复的产品，必须满足以下条件方可交付：
 - 连续10个温度循环无故障；
 - 至少5分钟的随机振动无故障；
 - 试验结束后产品的性能和功能完全正常。



ESS的应用及效益

产 品	效 益
美国卫星	轨道故障减少 50%
ANIUYK20V 计算机	MTBF 从 1150h 提高到 9534h, 提高 7.3 倍
AG3 变换器	MTBF 从 15000h 提高到 44362h, 提高约 3 倍
A-A17 惯导系统	内场故障减少 43%
电子燃料喷射系统	外场故障从 23.5%降到 8%
HEWLITT 台式计算机	现场维修次数减少 50%
我国某飞机的大气数据计算机	故障率降低 40~70%



应注意的事项

- ◆ 所有试验产品应去除包装物及减震装置后再进行试验，试验产品在箱内安装应保证除必要的支点外，全部暴露在传热介质即空气中；
- ◆ 在进行夹具设计时，要保证产品的振动激励方向为故障敏感方向；
- ◆ 试验箱热源的位置布置不应使热幅射直接到达试验产品，用于控制箱温的热电偶或其它型式的温度传感器应置于试验箱内部的循环气流中，并要加以遮护以防辐射影响；
- ◆ 若存在试验箱内空气及致冷系统的冷却介质，应对空气的温度和湿度应加以控制，使其在试验期间产品上不出现凝露。

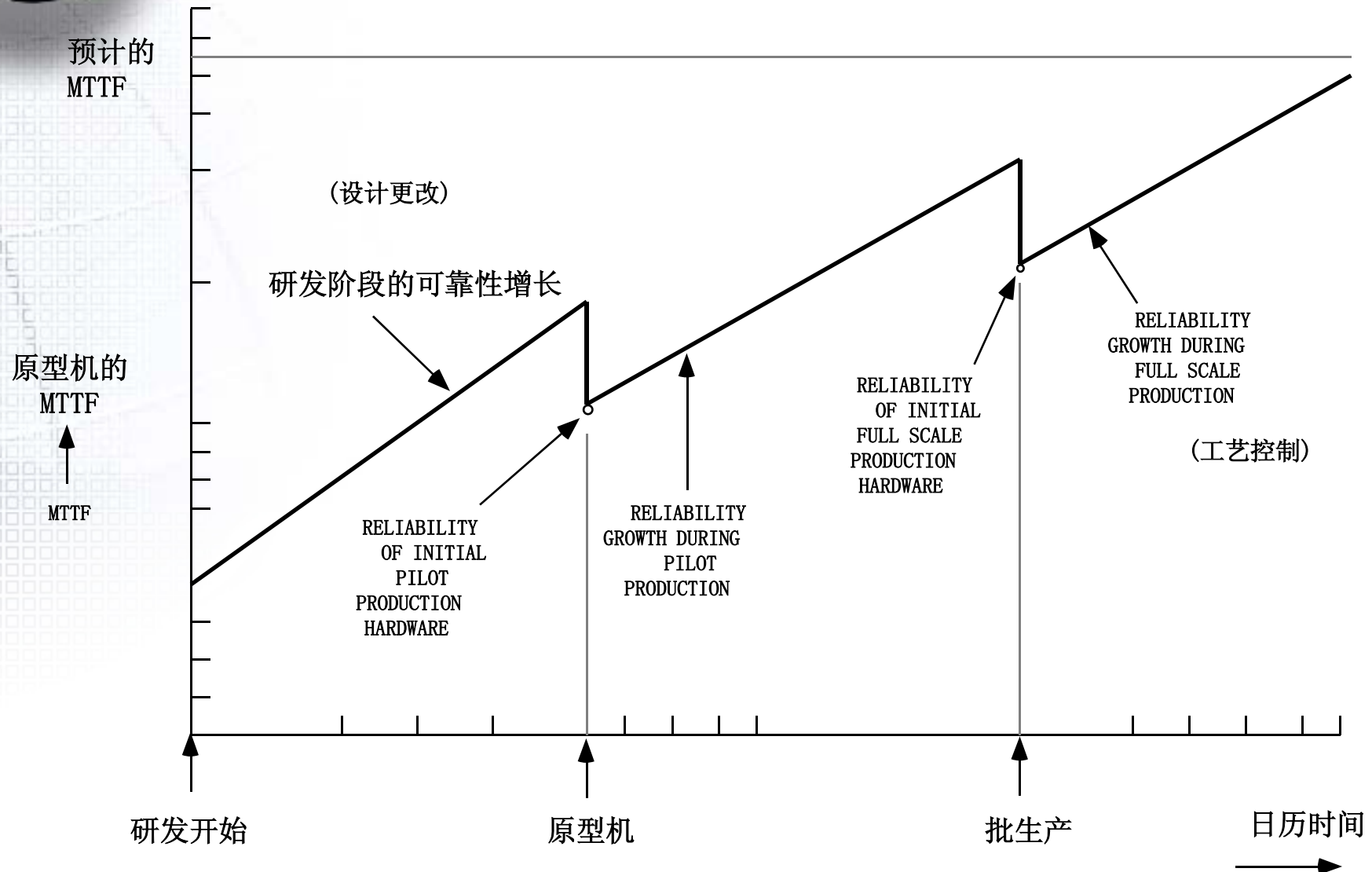
2.2 可靠性增长试验

- ◆ 可靠性增长
- ◆ 试验目的
- ◆ 试验剖面
- ◆ 试验计划
- ◆ 故障处理
- ◆ 数据分析
- ◆ 注意事项







可靠性增长... 针对可靠性的设计更改导致



态度决定一切！



但愿它不要坏!




观察

模式: 被动的

方法: 可能进行很少的试验

典型结果: 后期问题突出



想方设法让它坏!



修正

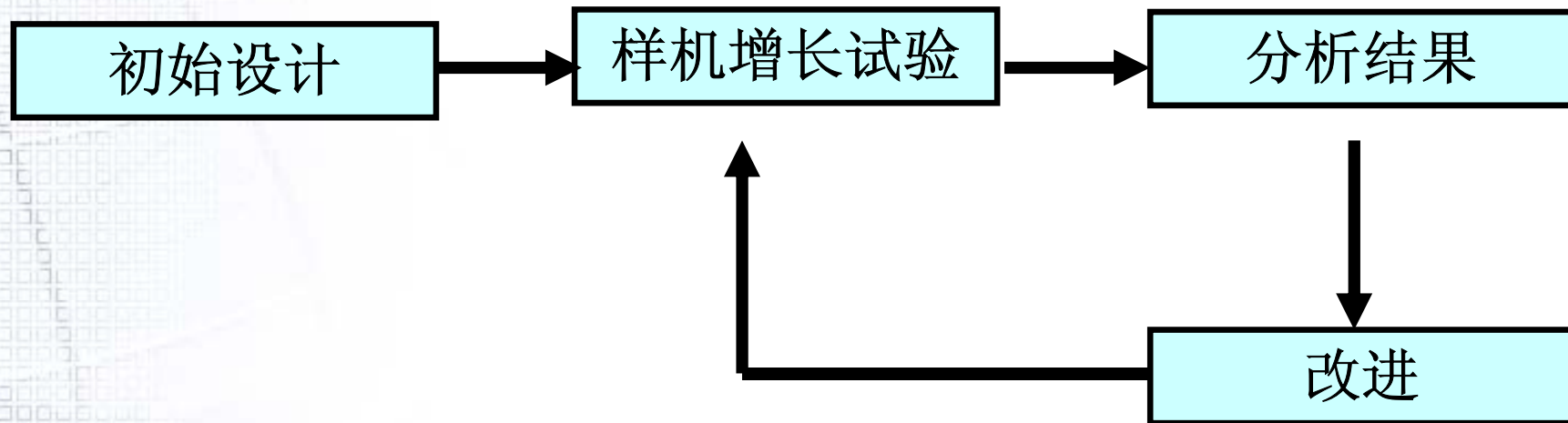
模式: 主动的

方法: 尽早开展增长试验

典型结果: 健壮可靠的产品



可靠性增长试验是一个循环的过程



Test-fix-test-fix



可靠性增长试验及其效益

部分机载电子设备可靠性增长试验效益

序号	设备名称	考核指标 MTBF (h)	80%置信下降 θ_L (h)		增长倍数
			增长前	增长后	
1	483 数导设备	100	50	101	2.02
2	941-4A 干扰投放器	250	28	255	9.11
3	CCU 控制器	700	53	1870	35.28
4	WL-7A 无线电罗盘	300	61	435	7.13
5	226 机载测距雷达	150	64	150	2.34
6	265 无线电高度表	300	25	809	32.36



试验目的

通过有计划、有目标的试验活动，可以使复杂产品从较低的可靠性水平逐步提高到预期的可靠性目标。



试验剖面

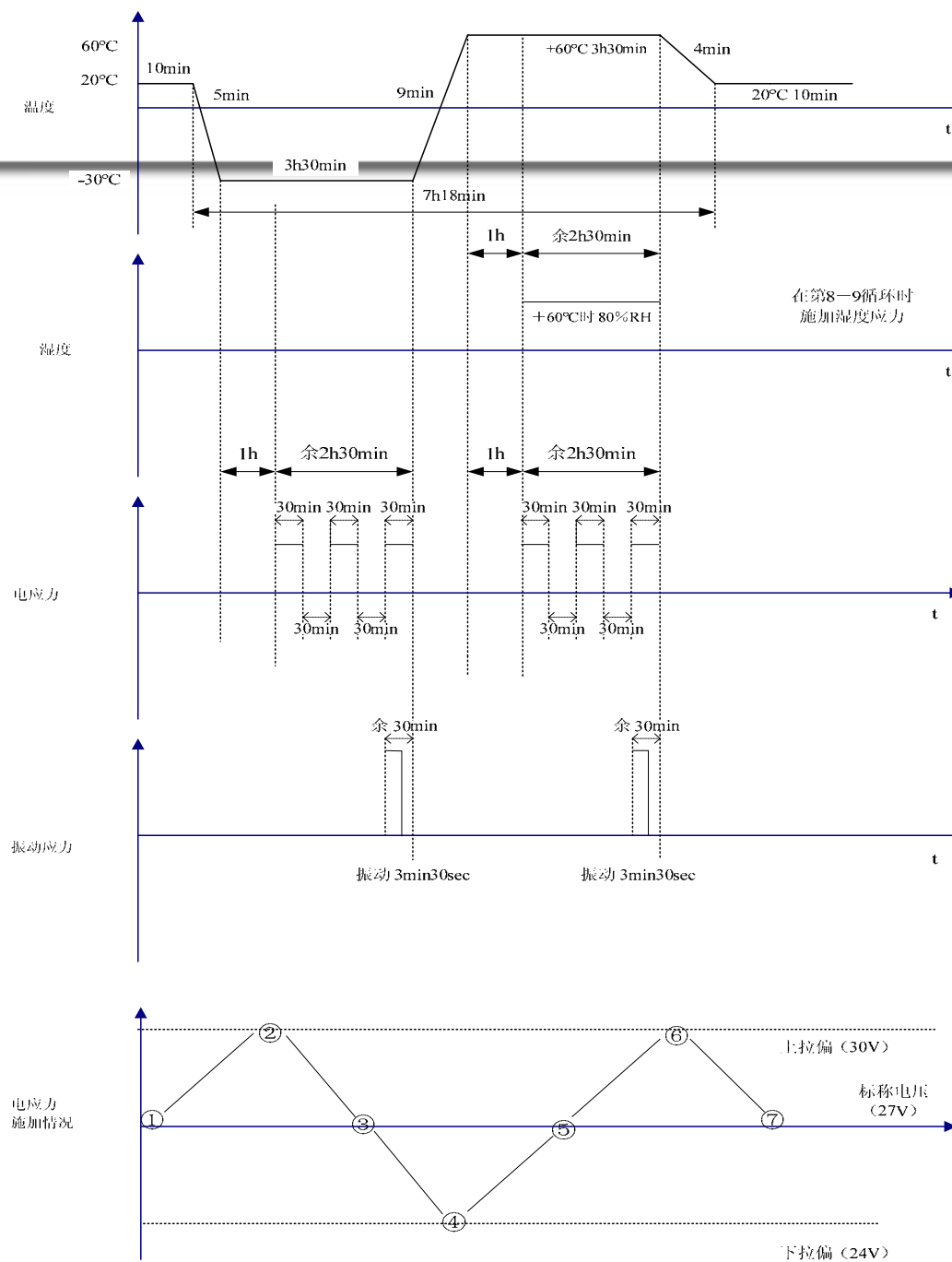
◆ 环境剖面

- 采用模拟实际使用的环境剖面
- 是综合的环境剖面，包括振动、温度、湿度等
- 要在综合环境试验台上进行

◆ 工作应力

- 常规的工作应力（常规可靠性增长试验）
- 恶劣的工作应力（加速可靠性增长试验）

试验剖面





试验计划

- ◆ 可靠性增长试验需要耗费大量资源，包括资金、器材、设备和时间，所以在开始试验之前需要制定试验计划来统筹安排。
- ◆ 可靠性增长试验计划包括：
 - 制定可靠性增长目标
 - 确定试验时间
 - 确定资源



可靠性增长目标

- ◆ 可靠性增长目标是通过试验后达到的定量的可靠性水平
- ◆ 一般情况下，可由合同(或任务书)中的可靠性最低可接受值来确定产品的可靠性增长目标。

例如，如果某产品的MTBF 的最低可接受值为1000小时，可将MTBF=1000小时作为可靠性增长试验的增长目标。

- ◆ 在资源允许的情况下，可靠性增长试验可分段多次进行，这样会提高试验效率，缩短试验时间。在分阶段进行可靠性增长试验时，需为每个阶段制定增长目标。



确定试验时间

◆ 根据可靠性增长目标和资源确定试验时间

◆ 试验时间的确定方法：

- 杜安（Duane）模型
- 评估模型



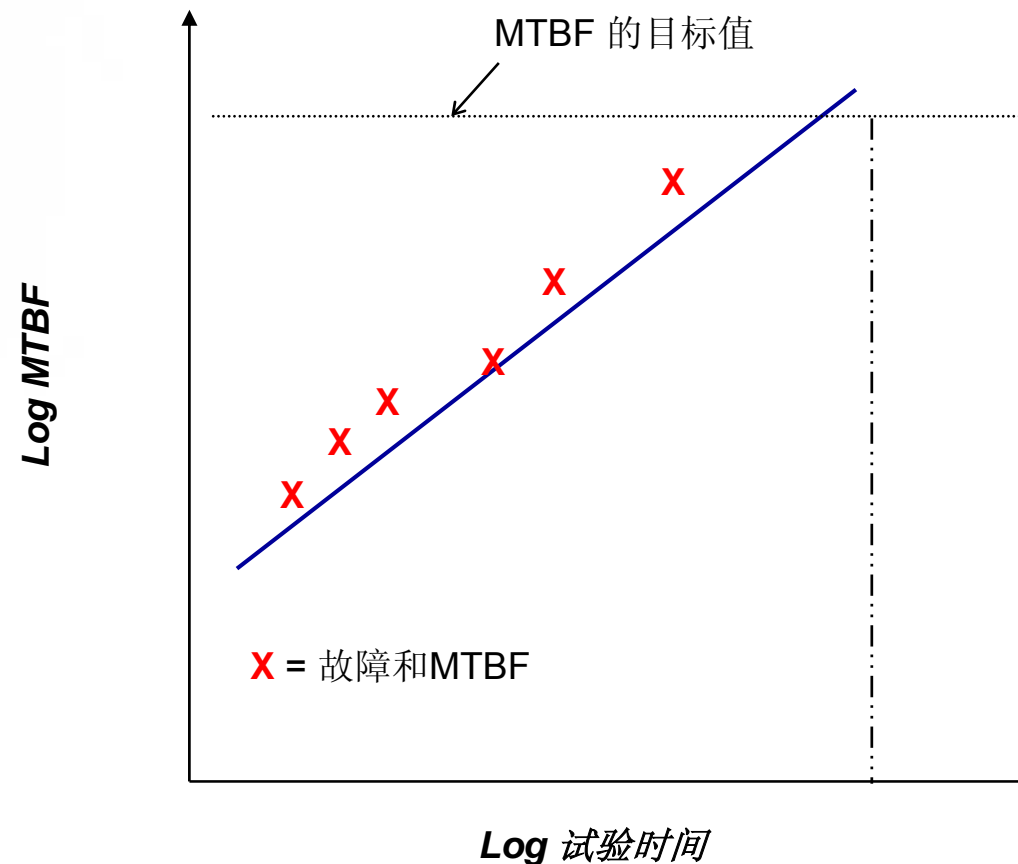
杜安（Duane）模型

- ◆ 杜安模型最初是**发动机和液压机械装置**等复杂可修产品可靠性改进过程的经验总结。
- ◆ 杜安模型的前提是：产品在可靠性增长过程中逐步纠正故障，因而产品可靠性是逐步提高的，不许可有多个故障的集中改进而使产品的可靠性突然较大幅度的提高。



杜安假设

产品在增长试验过程中，累积故障率（或**MTBF**）对于累积试验时间，在双边对数坐标纸上趋近一条直线。





杜安模型

$$\lambda_a(t) = at^{-m}$$

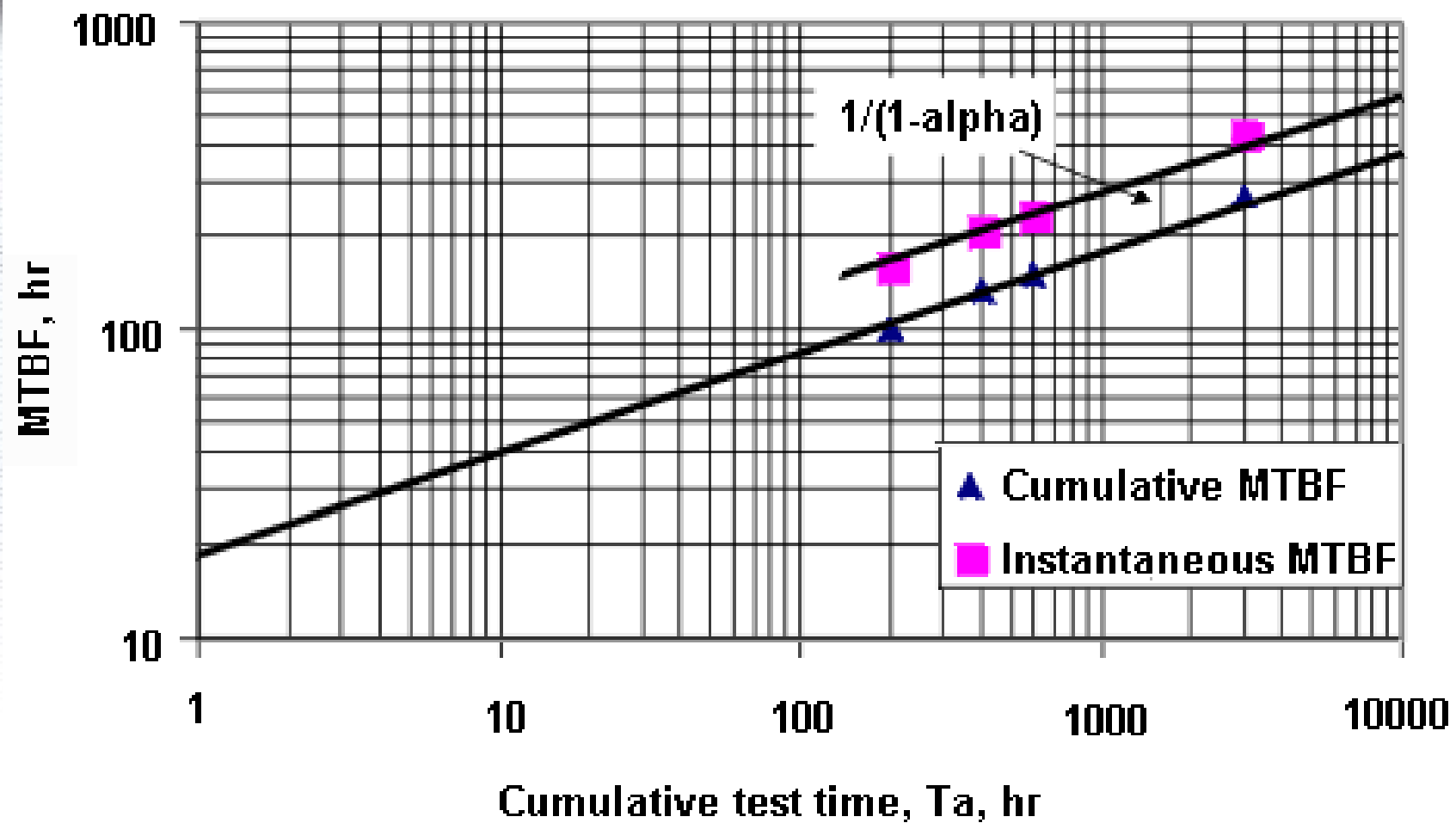
$$MTBF_a(t) = \frac{1}{a} t^m$$

$$\lambda(t) = a(1-m)t^{-m}$$

$$MTBF(t) = \frac{1}{a(1-m)} t^m$$



杜安曲线





杜安模型的参数

- ◆ **参数m**: 代表了可靠性增长的努力程度和预期效果, m值在0.3~0.6之间, 值越大效果越明显。制定可靠性试验计划时, 在没有任何信息的条件下, m值可取0.45。
- ◆ **参数a**: 代表了初始的可靠性水平, 如果知道了在某个累积试验时间 (t_I) 下对应的产品累积MTBF ($MTBF_I$), 可以按右侧公式求出a。

$$a = \frac{1}{M_I} t_I^m$$



练习

某产品进行了200小时的试验，共发生了2个故障，现欲将其增长到MTBF为150小时。

问：需进行多长时间的增长试验？



评估模型

◆ 杜安模型是应用最普遍的模型，有两个不足：

- 试验时间过长
- 可能出现超增长

◆ 评估模型是根据预定的增长目标，经过评估模型的反算得到的模型。

- 好处是：正好达到预定的增长目标，没有资源浪费。
- 坏处是：容易失去控制，有可能达不到预定的增长目标



评估模型

$$MTBF = \frac{2T}{\chi^2_{2r+2, 1-\gamma}}$$

$$T = MTBF * \frac{\chi^2_{2r+2, 1-\gamma}}{2}$$

- ◆ MTBF: 增长目标
- ◆ T: 试验时间
- ◆ χ^2 : 卡方分布 (在Excel中的函数名是Chiinv)
- ◆ γ : 置信度, 一般取0.7~0.9
- ◆ r: 故障数量.



练习

某产品进行了200小时的试验，共发生了2个故障，现欲将其增长到MTBF为150小时。

问：需进行多长时间的增长试验？



试验结束条件（成功）

- ◆ 在以下情况下认为可产品达到了预期的增长目标，可结束增长试验，**试验成功**：
 - 试验进行到规定的总试验时间，利用试验数据估计的MTBF值已达到试验大纲要求，可以结束试验；
 - 如果试验过程中一直没有出现故障，可以假设其寿命服从指数分布而在另外某一时间结束试验。例如，试验时间达到要求的MTBF值的1.6倍时，故障数为零，则可以以80%置信水平确信受试设备的MTBF已达到要求值，从而提前结束试验。



试验结束条件（不成功）

- ◆ 在以下情况下应终止增长试验，**试验不成功**：
 - 当试验进行到规定的总试验时间，而利用试验数据估计的MTBF值达不到大纲的要求时，应立即停止试验；
 - 在试验进行过程中，经过评估产品的实际增长率较低，预期在余下的试验时间内达不到预期的增长目标，应立即停止试验。
- ◆ 当试验未达到预期的增长目标而中止时，应做好以下工作：
 - 对纠正措施进行全面的分析，以确定纠正措施的有效性；
 - 组织专家对试验方案进行评审；
 - 组织专家对准备采取的措施方案进行评审。



试验后试验件的处理

- ◆ 经过可靠性增长试验的产品不可交付使用，可按以下方式处理：
 - 继续试验，以寻找产品工作寿命；
 - 继续试验，步进增强产品的试验应力，以寻找工作极限和破坏极限；
 - 报废。
- ◆ 如果选择继续试验，在后来的试验中的试验时间和故障均不计入可靠性评估。



试验过程监控

- ◆ 试验中应严格控制试验环境条件，应按照所确定的试验环境剖面施加环境应力，并记录实际的试验环境条件。
- ◆ 试验过程中应按规定的时间对受试设备进行测试并记录，当发现故障时应利用FRACAS方法对其进行处理。
- ◆ 可靠性增长的监控应贯穿整个试验过程。其方法是不断地将观测的MTBF值和计划的增长值进行比较，以对**增长率**和资金进行再分配和控制。
- ◆ 在试验大纲和试验计划中应规定试验过程的监控点。



跟踪增长率 m

- ◆ 当 $m \leq 0.1$ 时：产品的可靠性无增长，需更改试验方案；
- ◆ 当 $0.1 < m \leq 0.3$ 时：产品的可靠性有缓慢增长，需加大改进力度；
- ◆ 当 $m > 0.4$ 时：产品的可靠性有明显的可靠性增长。



试验数据分析

评估模型	优点	缺点
指数评估模型	简单 可以进行区间估计	只能评估累积MTBF, 偏保守 不能评估增长率
DUANE 评估模型	可以评估增长率 可以进行瞬时MTBF 估计	不能进行区间估计
AMSAA 评估模型	可以进行点估计和区间估计 能进行瞬时MTBF 估计	计算复杂 不能得到直观的增长率



应注意的事项

- ◆ 应根据产品的重要性、经费、进度等条件来选择可靠性增长方法；
- ◆ 试验应模拟产品真实环境；
- ◆ 应在设计定型前做；
- ◆ 试验样品应能反映小批生产时的技术状态及生产过程，并已通过了ESS和环境鉴定试验；
- ◆ 故障报告、分析与纠正措施系统（FRACAS）是否健全，是否能正常运行；
- ◆ 试验本身只能暴露问题，只有采取设计、工艺等措施方能提高产品的固有可靠性。所采取的改进措施是否已落实到产品图纸及技术文件中。



第 2 部分 加速可靠性试验

- ◆ 加速试验概述
- ◆ 定性加速寿命试验—HALT
- ◆ 定量加速寿命试验—ALT



3.1 加速试验概述

随着科技的发展，对产品的质量要求越来越高。因此为了提高产品的可靠性水平，传统的可靠性方法已经不能满足要求。加速试验技术正是这样应运而生。它不仅缩短了产品研制时间，节省了成本，并且也因此提高了公司产品的竞争力。

很多产品的寿命都以年计，
你愿意进行持续几年的可靠性试验吗？



加速试验的发展—70年代

- ◆ 加速试验的最初思路是从元器件的老化(老炼)试验而来
- ◆ 筛选的目的是激发、排除缺陷，故所施加的应力不必模拟真实环境，只要激发的效率越高越好
- ◆ 自从Nelson于70年代末提出了累积损伤的原则以来，加速寿命试验(Accelerated Life Testing)得到了蓬勃的发展



加速试验的发展

- ◆ 1980s, Gregg. K. Hobbs博士经多年对环境应力筛选的研究提出了高加速寿命试验(Highly Accelerated Life Testing) 和高加速应力筛选(Highly Accelerated Stress Screening)
- ◆ 1990s, 美国波音公司首次提出可靠性强化试验 (RET-Reliability Enhancement Testing)



加速试验的概念

加速试验——产品在比正常工作环境应力下更加严酷的环境应力下进行试验。与传统的模拟正常工作环境的可靠性试验相比，是一种激发性试验。

根据美国RAC报告，对于电子产品，温度每提高25度，故障率提高2~10倍。



加速试验分类

- ◆ Qualitative Tests
定性加速试验
- ◆ Quantitative Tests
定量加速试验



定性加速试验

- ◆ 聚焦于暴露产品缺陷，改善产品质量，提高产品可靠性
- ◆ 不能对产品的可靠性进行定量评价
- ◆ 采用的应力水平最高
- ◆ 典型的定性加速试验有： HALT, ESS, HASS, HASA



定量加速试验

- ◆ 聚焦于对产品的寿命和可靠性进行预测和评价
- ◆ 暴露问题，解决问题，提高可靠性
- ◆ 应力水平比定性加速试验小
- ◆ 定性加速试验：ALT



加速试验试验使用的应力类型

经统计，对产品可靠性产生影响的环境应力主要是温度和振动应力。据统计引起产品故障的环境因素中，温度占50%左右，振动占20%左右。

应力类型

- 温度
- 温变
- 振动
- 开/关机
- 电应力变化
- 以上几种类型的混合

例子

-100 °C to 200 °C

60 °C per minute

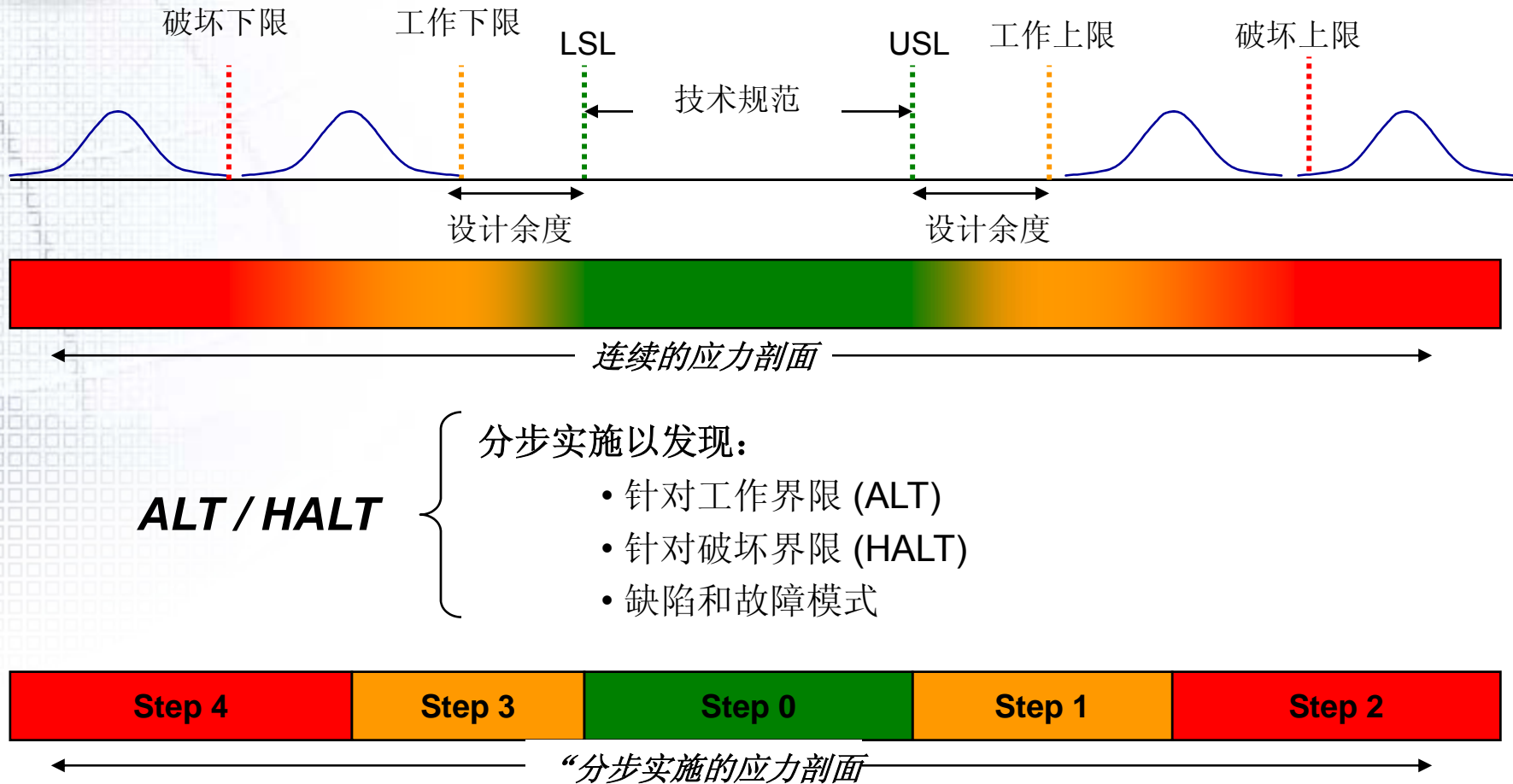
50 Grms 6-axis random

ON/OFF

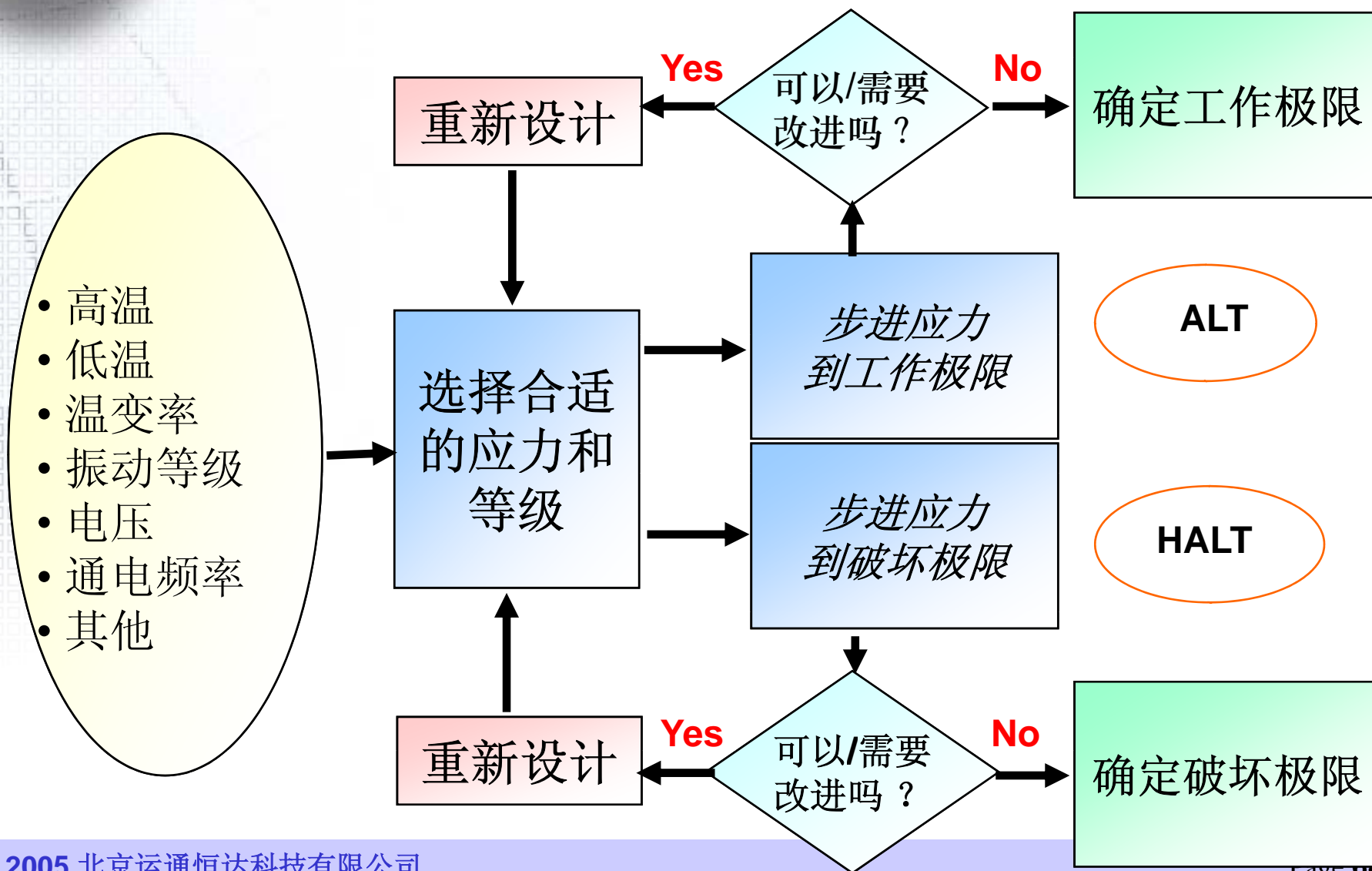
12V to 26V (200mA-500mA)



加速寿命试验—ALT和HALT



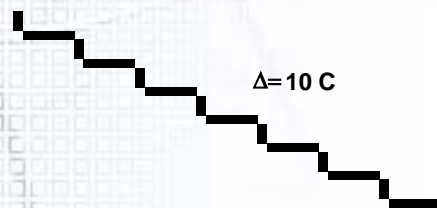
ALT/HALT 的流程



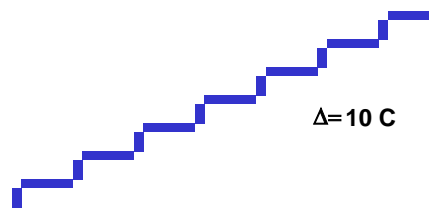


步进应力

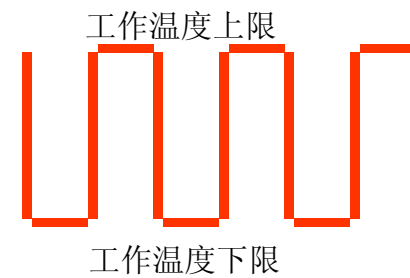
1. 低温



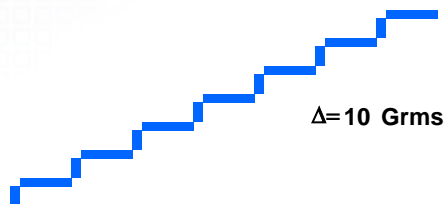
2. 高温



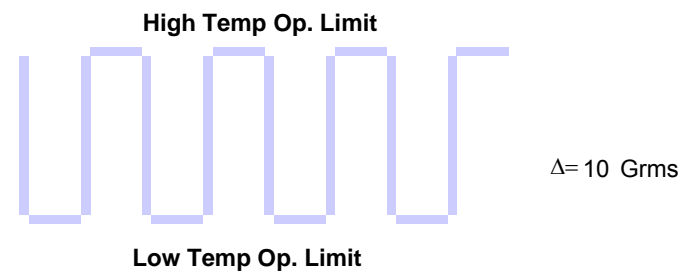
3. 快速温变



4. 随机振动



5. 混合环境





例如：对一个电路板

故障模式: 二极管发生故障 (破坏极限为 110°C)

故障原因: 二极管的承受的温度超过了降额准则
(100% vs. 80% max.)

措施: 更改选用的二极管型号，选耐 160°C 温度的

结果: 在同样温度下，问题没有再出现

ALT/HALT 试验能快速发现可靠性水桶的“短板”



2.2 定性加速试验——HALT

HALT—高加速寿命试验(Highly Accelerated Life Testing)。使用阶跃式应力使得产品承受不同的应力以此来发现产品的设计限的一种过程。HALT意在于发现产品的应力限以及确认产品的薄弱环节。这种信息的使用有助于产品的再设计。

与之类似的还有：AST (Accelerated Stress Testing, 加速应力试验)、RET(Reliability Enhancement Testing, 可靠性强化试验)、STRIFE(应力+寿命)。从实质上来说，它们都是在加大的应力水平下加速暴露产品缺陷，从而提高产品可靠性水平的一种试验方法，只是名称叫法不一样。



HALT

目的：

- ◆ 快速发现产品设计和生产中的局限性/缺陷
- ◆ 寻找和提高产品设计裕度
- ◆ 充分提高产品可靠性
- ◆ 评价产品持续改进的有效性
- ◆ 为HASS/HASA/ALT提供试验参数

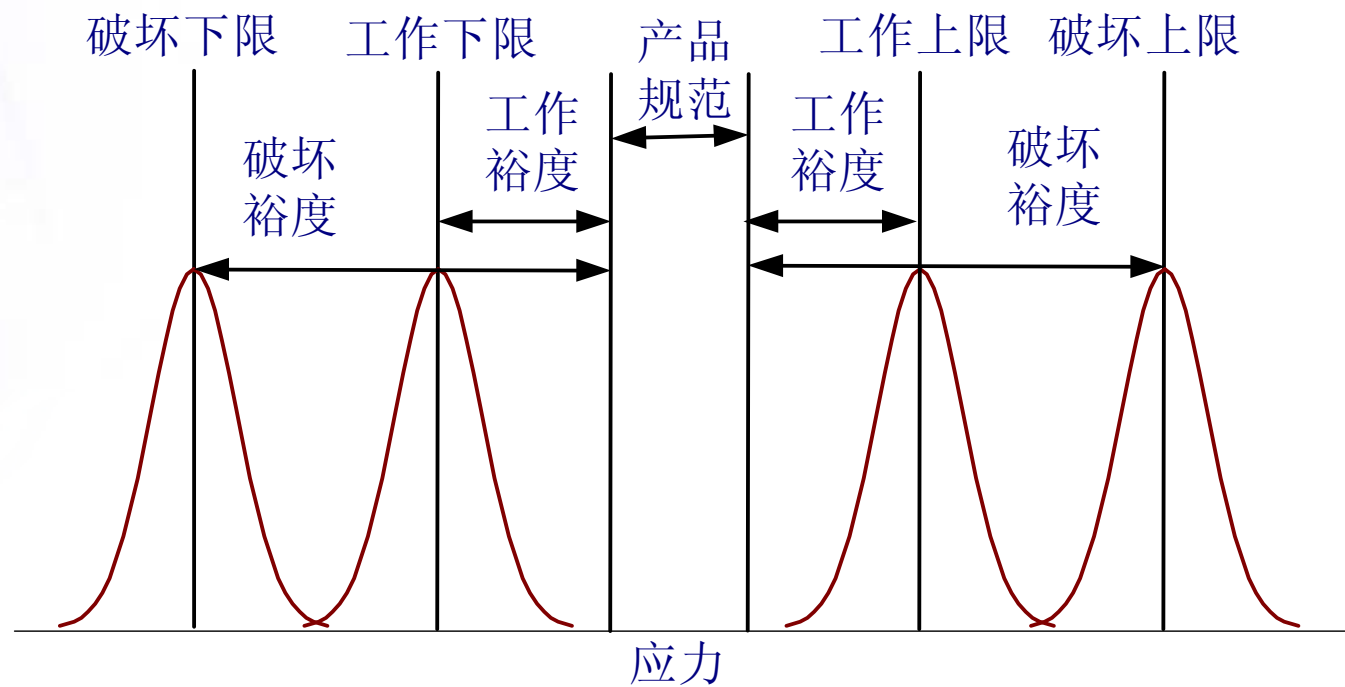


应力极限

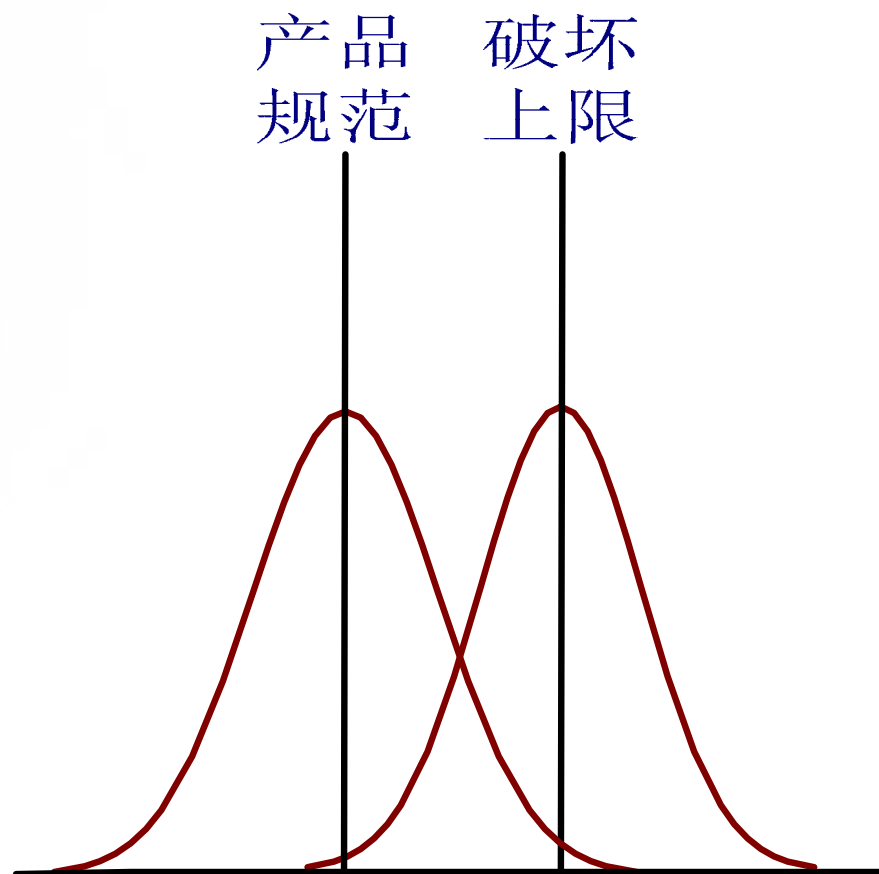
- ◆ 技术规范—Technology Specification
- ◆ 工作上限—upper operating limit
- ◆ 工作下限—lower operating limit
- ◆ 破坏上限—upper destruct limit
- ◆ 破坏下限—lower destruct limit



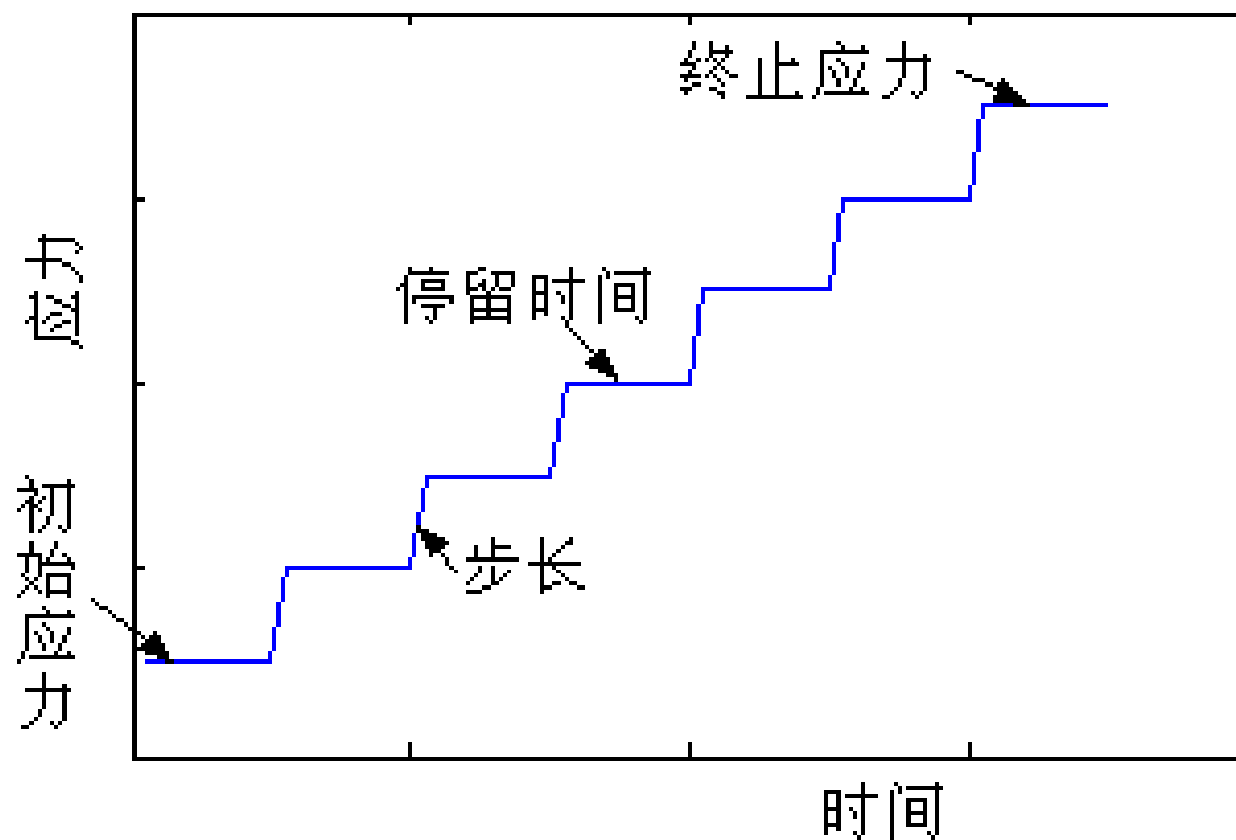
应力裕度



应力干涉



步进应力示意图





应力施加顺序

- ◆ 温度步进应力
 - ★ 低温步进
 - ★ 高温步进
 - ★ 快速温变
- ◆ 振动步进应力
- ◆ 综合环境应力



热分布测试

试验前对产品的热分布进行测试。此过程在室温下进行（不是在试验箱），测试过程中必须安装上所有结构面板。测试监控所有主要器件的温度，产品运行至少2小时后，记录环境温度和各器件的壳温。



温度步进应力—低温步进

初始温度：低温步进应力试验在某一接近室温的温度条件下进行，通常取 $+20^{\circ}\text{C} \sim +30^{\circ}\text{C}$ 。



温度步进应力—低温步进

步长：

通常为 10°C ，但是某些时候也可以增加到 20°C 或减小到 5°C 。建议在低温工作极限前步长设定为 10°C ，低温工作极限后步长调整为 5°C ，视产品具体情况而定。建议试验应力到达产品工作极限之后，适当减小步长继续试验至破坏极限。



温度步进应力—低温步进(例子)

测试从20℃开始，步进步长为-10℃，温变率40℃/min。每个温度台阶保持10分钟并完成功能测试。每个温度台阶结束后，进行5次上下电测试，测试每次上下电后功能是否可以完全恢复。

试验一直持续到发现被测产品的工作极限和破坏极限。如果温度降至某一预定温度还没有发现破坏极限，则可以停止试验。



温度步进应力——高温步进

◆ 初始温度:

高温步进应力试验在某一接近室温的温度条件下进行，通常取 $+20^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$ 。



温度步进应力——高温步进

◆ 步长:

通常为 10°C ，但是某些时候也可以增加到 20°C 或减小到 5°C 。建议在高工作极限前步长设定为 10°C ，高温工作极限后步长调整为 5°C ，视产品具体情况而定。建议试验应力到达产品工作极限之后，适当减小步长继续试验至破坏极限。



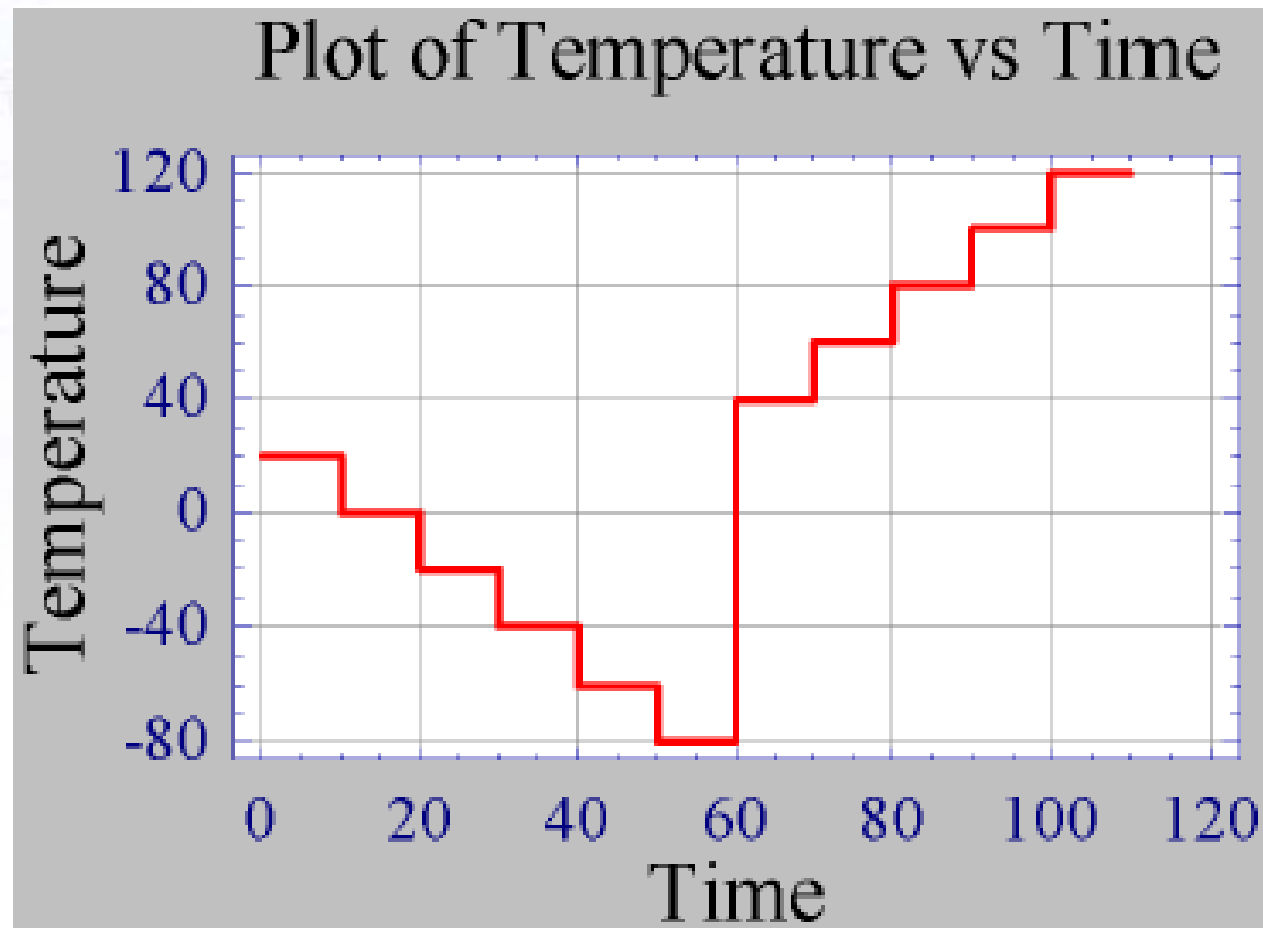
温度步进应力—高温步进(例子)

测试从30℃开始，步进应力步长为10℃，温变率40℃/min。每个温度台阶保持10分钟并完成功能测试。每个温度台阶结束后，进行5次上下电测试，测试每次上下电后功能是否可以完全恢复。

试验一直持续到发现被测产品的工作极限和破坏极限。如果温度升至100℃还没有发现破坏极限，则可以停止试验。



温度步进应力





温度步进应力——温度循环

- ◆ 通常温度循环的上、下限以不超过产品破坏极限的80%为佳。
- ◆ 在通常情况下，试件在上下限温度保持时间以10~20分钟为宜。
- ◆ 强化试验中的温度变化率一般在 $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 到 $60^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 之间。这一速率是指试验箱内温度变化的平均速度。
- ◆ 为了节约试验费用，每次试验的循环次数一般不超过6次。

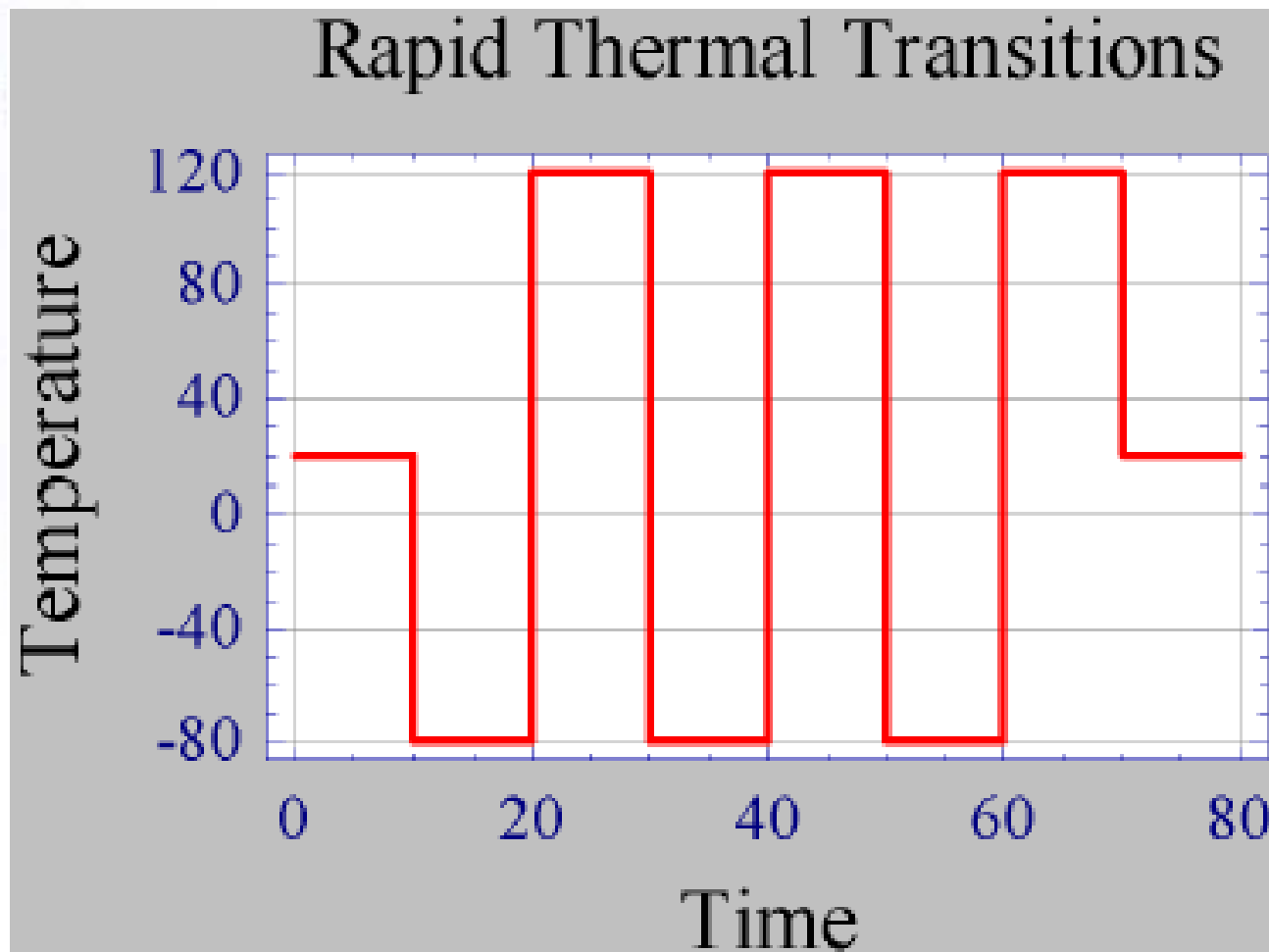


温度步进应力—温度循环(例子)

温度循环的高/低温值选择温度步进应力试验中得到的工作极限的80%，循环5次，温度变化率 $40^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。每个温度台阶保持5分钟并完成功能测试。

每个温度台阶结束后，进行1次上下电测试，测试每次上下电后功能是否可以完全恢复。

温度步进应力—温度循环





温度步进应力—注意事项

- ◆ 在温度循环时，应该采用温度变化至少 100°C （比如 -30°C 至 70°C ）、高温变率（每分钟 $20-40^{\circ}\text{C}$ ）的试验，以给产品提供所需要的温度应力（或是热冲击），这应该作为一个重要的规则。
- ◆ 增加受试产品的温变率，筛选强度也会增大
- ◆ 温度循环建议最好运行20个循环以上。

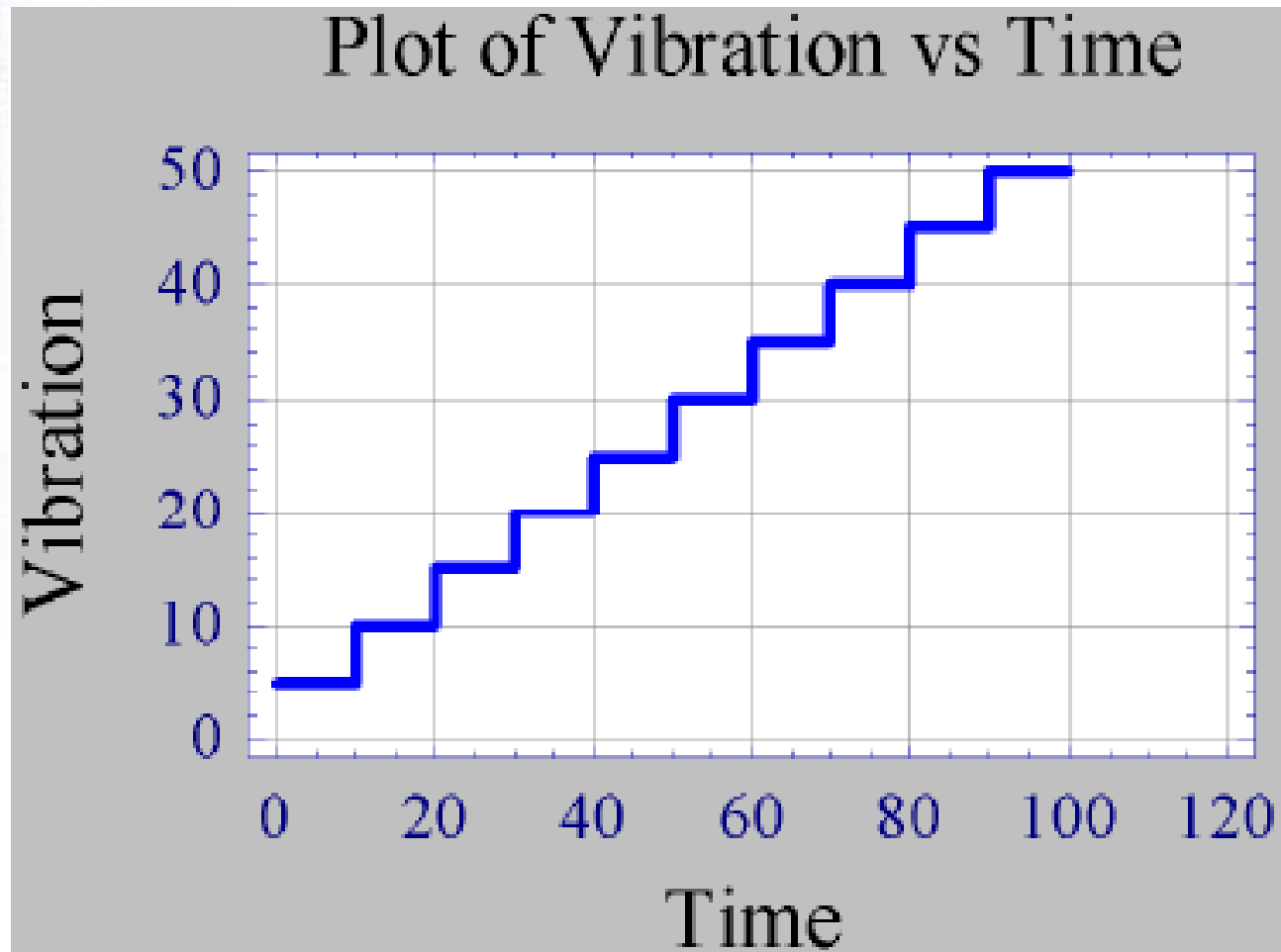


振动步进应力

- ◆ 气锤台振动步进应力试验的初始值应为3Grms到5Grms，具体选择应该根据不同试件决定，一般从5Grms开始试验。
- ◆ 每个振动水平的停留时间包括产品振动稳定后的驻留时间以及功能和性能检测时间。振动稳定后驻留时间一般为5~10分钟，功能和性能检测应该在振动稳定后进行，所需时间视具体产品而定。
- ◆ 气锤台振动步进应力步长一般为3Grms到5Grms，一般不超过10Grms。



振动步进应力





振动步进应力—例子

振动步进应力试验前，使用加速度传感器监测产品的振动响应。试验在环境温度下进行。起始振动为5Grms，步进应力步长为5Grms。每个振动台阶保持10分钟并完成功能测试。每个振动台阶结束后，进行5次上下电测试，测试每次上下电后功能是否可以完全恢复。

试验一直持续到发现被测产品的工作极限和破坏极限，如果振动设置到40Grms还没有发现破坏极限，则可以停止试验。



振动步进应力—注意事项

当振动应力到较高量级（20g以后），在每一步结束后返回到“微振动”（ $5\text{Grms} \pm 3\text{Grms}$ ）以检测在较高振动水平时可能发生的失效



综合环境步进应力—温度

- ◆ 通常温度循环的上、下限以不超过产品破坏极限的80%为佳。
- ◆ 在通常情况下，试件在上下限温度保持时间以10~20分钟为宜。
- ◆ 强化试验中的温度变化率一般在 $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 到 $60^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 之间。这一速率是指试验箱内温度变化的平均速度。
- ◆ 为了节约试验费用，每次试验的循环次数一般不超过6次。



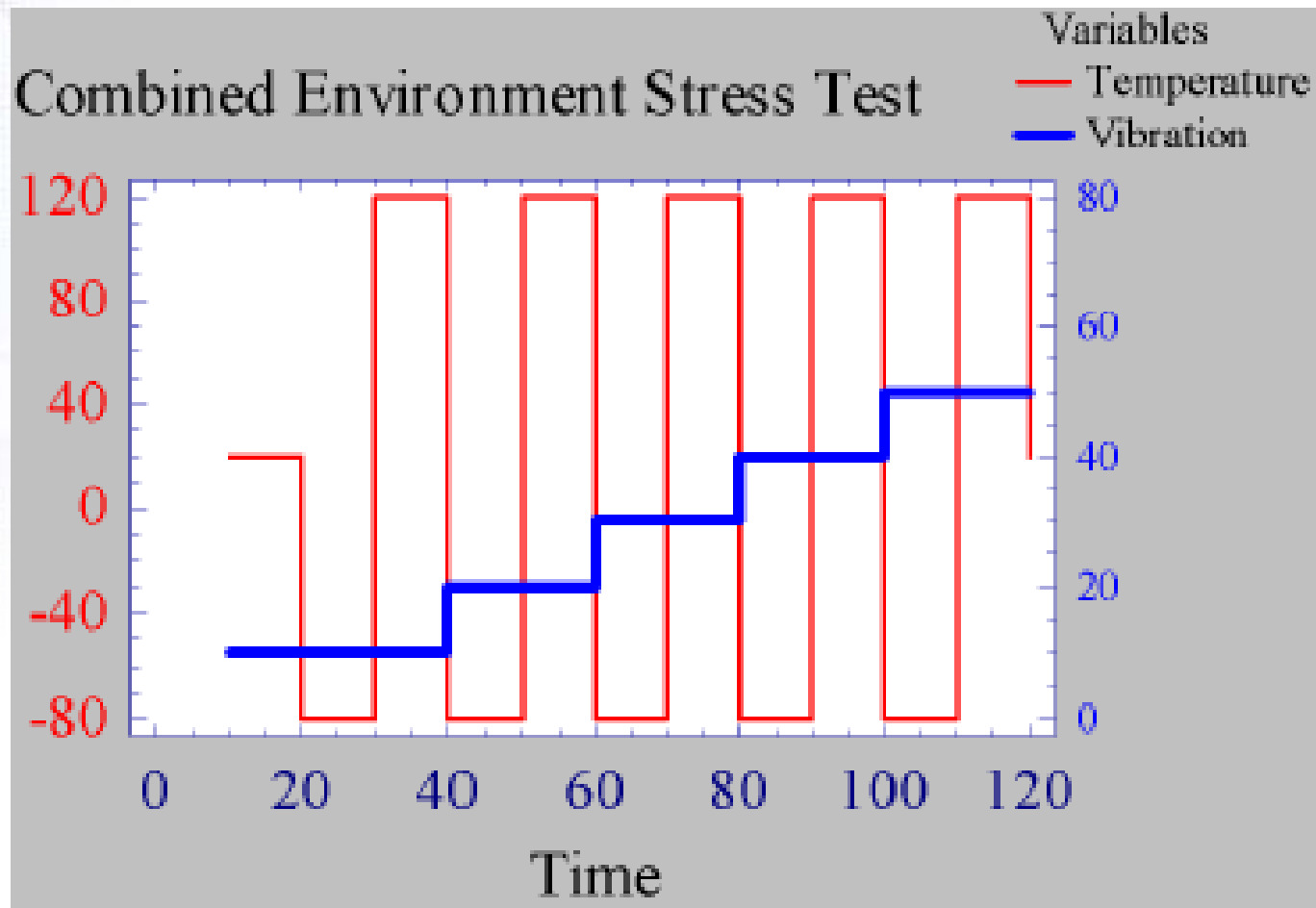
综合环境步进应力—振动

根据已完成试验获得的振动应力破坏极限值和设定的循环次数确定步长。假如在振动应力步进试验中，产品在35Grms时发生了不可修复的故障，并且设定的温度循环次数是5，那么最初的试验循环应该以7Grms水平开始。

每一个循环之后，应该以振动水平为7Grms的步长增加，则具体的剖面参数为：循环1量级为7Grms，循环2量级为14Grms；循环3量级为21Grms；循环4量级为28Grms；循环5量级为35Grms。



综合环境步进应力





综合环境步进应力—例子

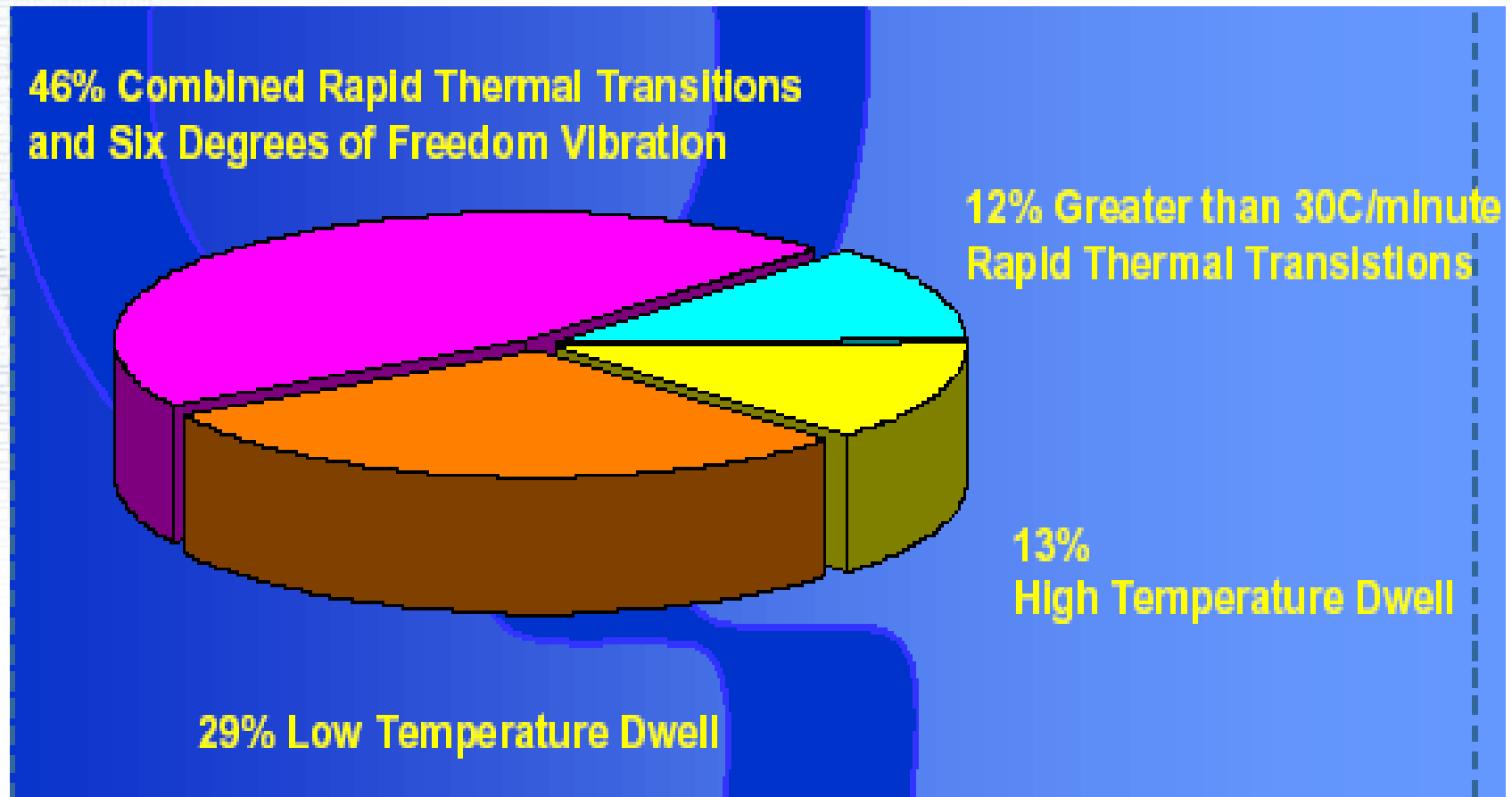
试验中，高/低温值选择温度步进应力试验中得到的工作极限的80%，振动应力为振动步进应力试验中得到的工作极限的50%，试验进行5个高低温循环。每个温度台阶停留时间为10分钟并成功能测试。每个温度台阶结束后，进行5次上下电测试，测试每次上下电后功能是否可以完全恢复。试验温度变化率40℃/min。最后一个周期振动应力减少为5Grms。



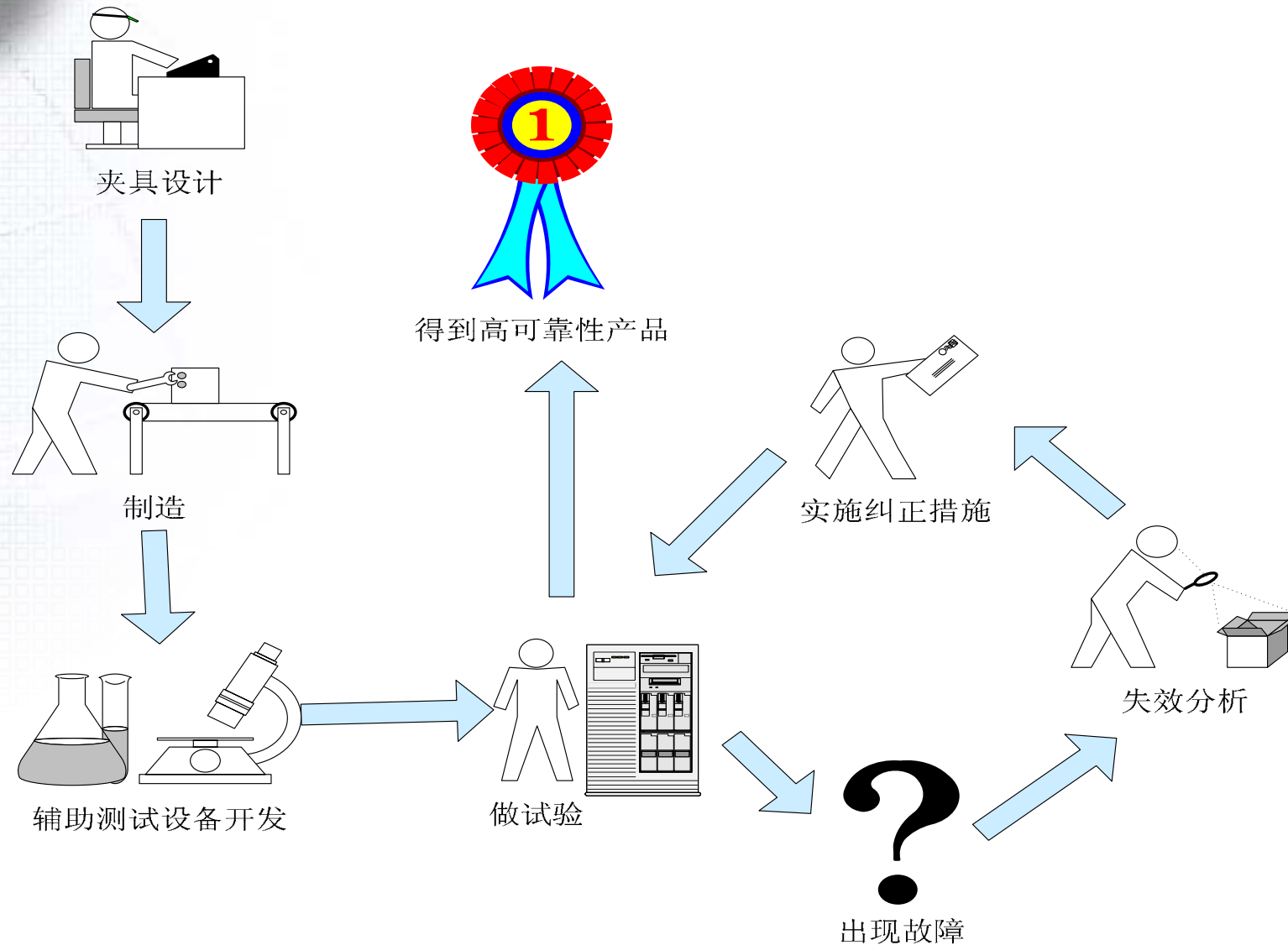
综合环境步进应力

除非产品事先已加固，否则对于大部分民用产品的破坏极限来说，温度一般在 -70 到 125°C 之间，振动频率在 20Hz 到 3000Hz 之间，随机振动量值在 15 到 20g RMS 之间。对大部分的工业产品或航空产品来说，温度在 -100 到 150°C 之间，振动在 20 到 30g RMS 。

应力效果比较



HALT回顾





3.2 定量加速寿命试验—ALT

所谓定量加速寿命试验ALT，是指在保持失效机理不变的条件下，把样品放在比通常严酷得多的条件下进行试验，从而加速样品的失效得到更多的失效数据，通过外推评估产品的可靠性指标。

ALT是一种基于统计理论，结合失效物理的试验技术。

随着科学技术的发展，出现了许多高可靠性、长寿命的产品，即使进行数年的试验，也可能没有失效，或只有一二个失效，根据这样的失效数据，要对产品的可靠性指标做出估计是很困难的。甚至试验尚未做完，新的产品已研制出来，这就要求人们改进试验方法，以期在较短的试验时间内，获得较多的失效样品，加速寿命试验正是适应这种需要孕育而生的。



加速因子

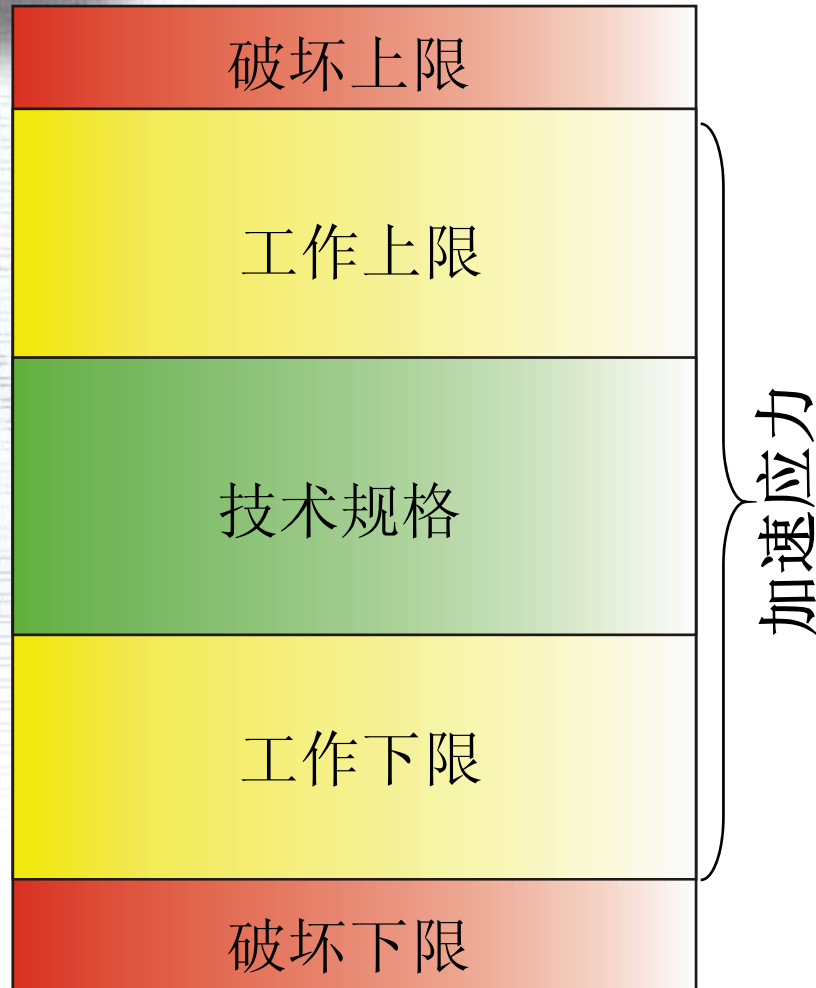
- ◆ 实际使用：每周用一次，每次2 小时
- ▶ 加速试验：连续试验，每天工作12次，每次两小时，进行7天
- ▶ 加速因子：7天（1周）共进行84次，相当于42周的运行，因此加速因子为42。
- ▶ 如果要模拟10年的运行，约需要进行12周的试验。



注意：有些故障模式不能模拟，如水管老化。



加速应力



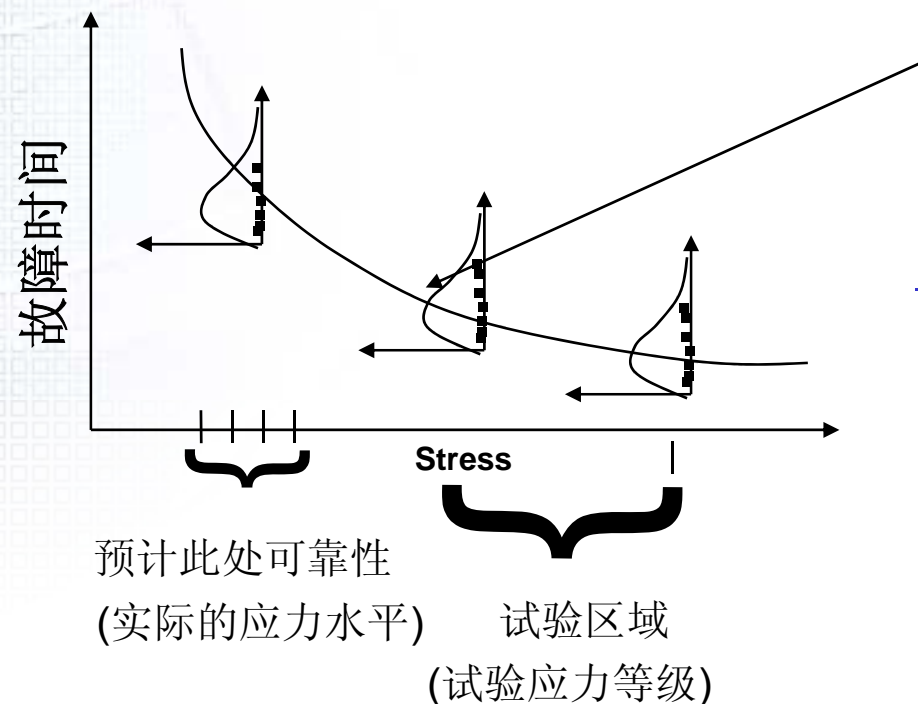
- 可能不能激发所有的故障模式
- 不能引入新的故障模式
- 以此为前提，越高越好



加速模型

作用：根据试验所获得的寿命数据，利用加速模型进行外推，推测在实际使用条件下的寿命数据。

加速模型



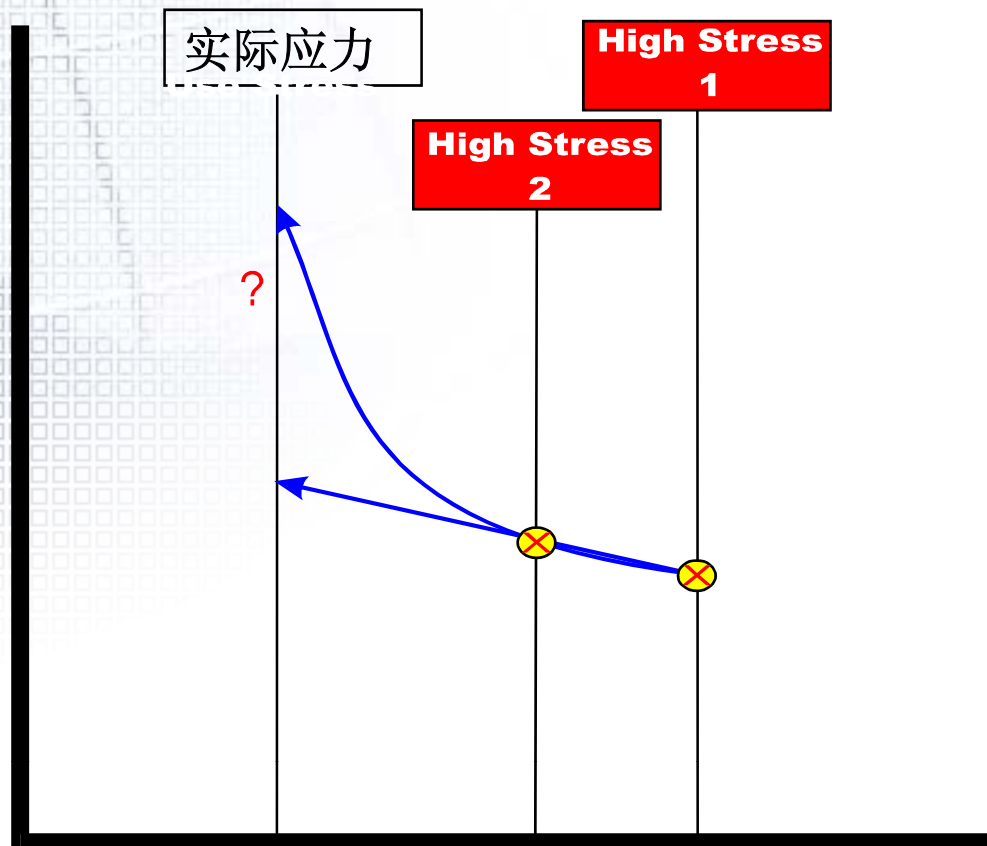
常见的加速模型:

- Arrhenius: Thermal
- Inverse Power Law: Non-Thermal
- Eyring: Combined
- Cumulative Damage
- Coffin-Manson

加速模型实际上表达了加速应力和产品失效的时间关系



自己的加速模型



- ◆ 我们可以有自己的加速模型
- ◆ 数据点越多，通过模型得到的结果越准确
- ◆ 如果我们知道了曲线的形状，很少的点就可以了
- ◆ 常用的加速模型告诉了我们曲线的形状

常用的加速模型

➤ Arrhenius Relationship (阿伦纽斯模型)

● 适用于恒温步进应力

- 电子产品
- 橡胶产品

➤ Inverse Power Law Relationship (反幂模型)

• 通常用于分析由以下因素导致的疲劳:

- 恒定振动
- 冲击
- 气压循环
- 温度循环

这两个模型最为常用, 此外还有 Ehrling, Cumulative Damage 和 Coffin-Manson等



阿伦尼斯模型 (Arrhenius)

$$MTTF = A \cdot e^{\left(\frac{E}{kT}\right)}$$

式中:

- MTTF = Mean Time to Failure
- T = 绝对温度 (K)
- A 是一个常数
- E = 活化能
- K = Boltzmann 常数, 8.623×10^{-5}

The Arrhenius 的加速因子

$$\begin{aligned} AF &= (MTTF_2/MTTF_1) = \\ &Ae^{(-B/T_2)}/Ae^{(-B/T_1)} = \\ &e^{[B(1/T_1 - 1/T_2)]} \end{aligned}$$

$$B = \frac{E}{K} = \frac{E}{8.623 \times 10^{-5}}$$

- AF 为加速因子
- 如果知道了活化能E，就能得到加速因子
- E 可以通过试验得到



应用举例

背景: 某一种电路板要求在 100°C ($=373.15^{\circ}\text{K}$) 能够工作10年。工程师想要评估此电路板在10年时的可靠性水平, 利用加速试验进行。他选择了29个电路板作为试验样本。

试验:

1. 在 488°K 下进行加速试验
2. 在 463°K 下进行加速试验



试验结果

Test #1, 488° K

# units	Time (hr)	State
2	346	Power Regulator Failure
1	1416	Failure
1	2197	Unrelated Failure
1	2533	Failure
1	2630	Failure
1	2701	Test Fixture Failure
1	3000	Failure
1	3489	Failure
1	6720	Removed - Test Terminated

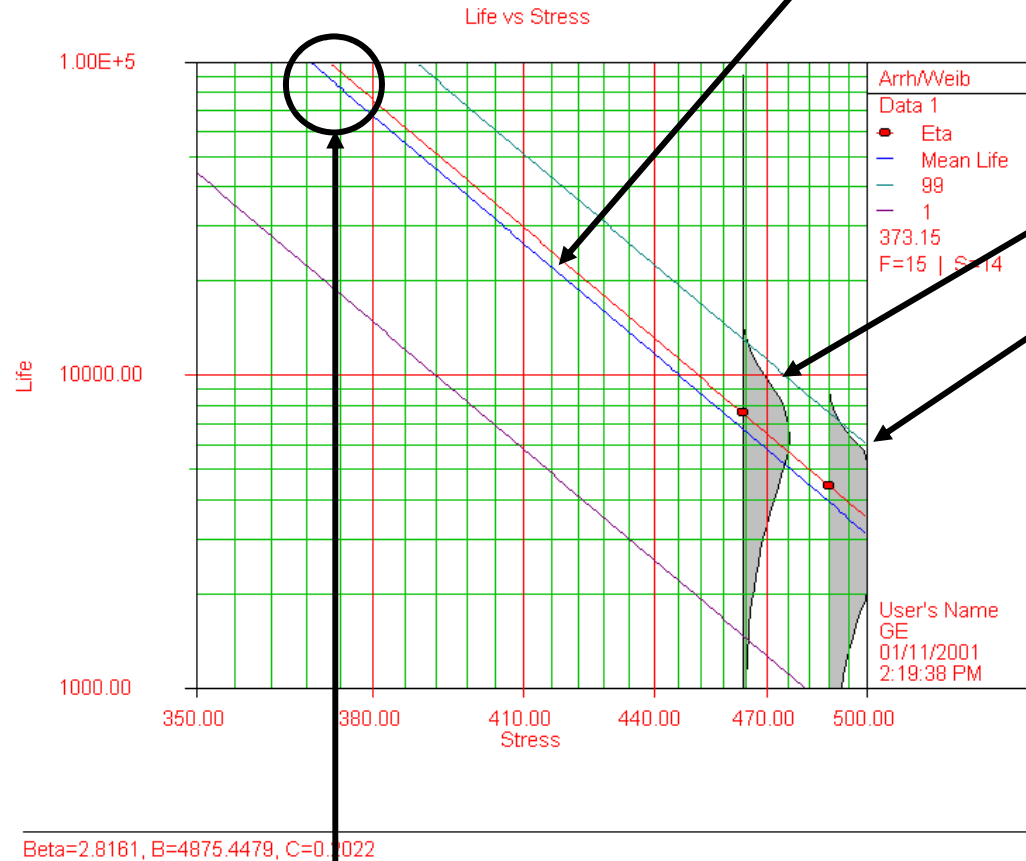
Test #2, 463° K

# units	Time (hr)	State
1	2403	Failure
1	2668	Unrelated Failure
1	3669	Test Fixture Failure
1	3863	Failure
2	4400	Test Fixture Failure
2	4767	Failure
1	5219	Failure
4	5276	Power Surge Failure
2	7517	Failure
1	7840	Failure
2	8025	Failure
1	8571	Removed - Test Terminated

评估结果

Life vs. Stress Plot

Generated by: ReliaSoft's ALTA - www.ReliaSoft.com - 888-886-0410



加速模型

加速试验结果:

463° K

488° K

100C (373.15° K) 时的外推结果为MTTF=8万到9万小时



单应力模型—温度模型

◆ 阿伦尼斯模型 (Arrhenius Relationship)

$$L = A \cdot e^{\left(\frac{E}{kT}\right)}$$

◆ 爱林模型 (Eyring model)

$$L = \frac{1}{T} e^{-\left(A - \frac{B}{T}\right)}$$

注：爱林模型有时也用来描述湿度与寿命间的关系



单应力模型—电应力模型

◆ 反幂模型 (Inverse Power Law)

$$L = kV^{-n}$$

◆ 指数模型 (Exponential Law)

$$L = c \cdot e^{-kV}$$



单应力模型—振动模型

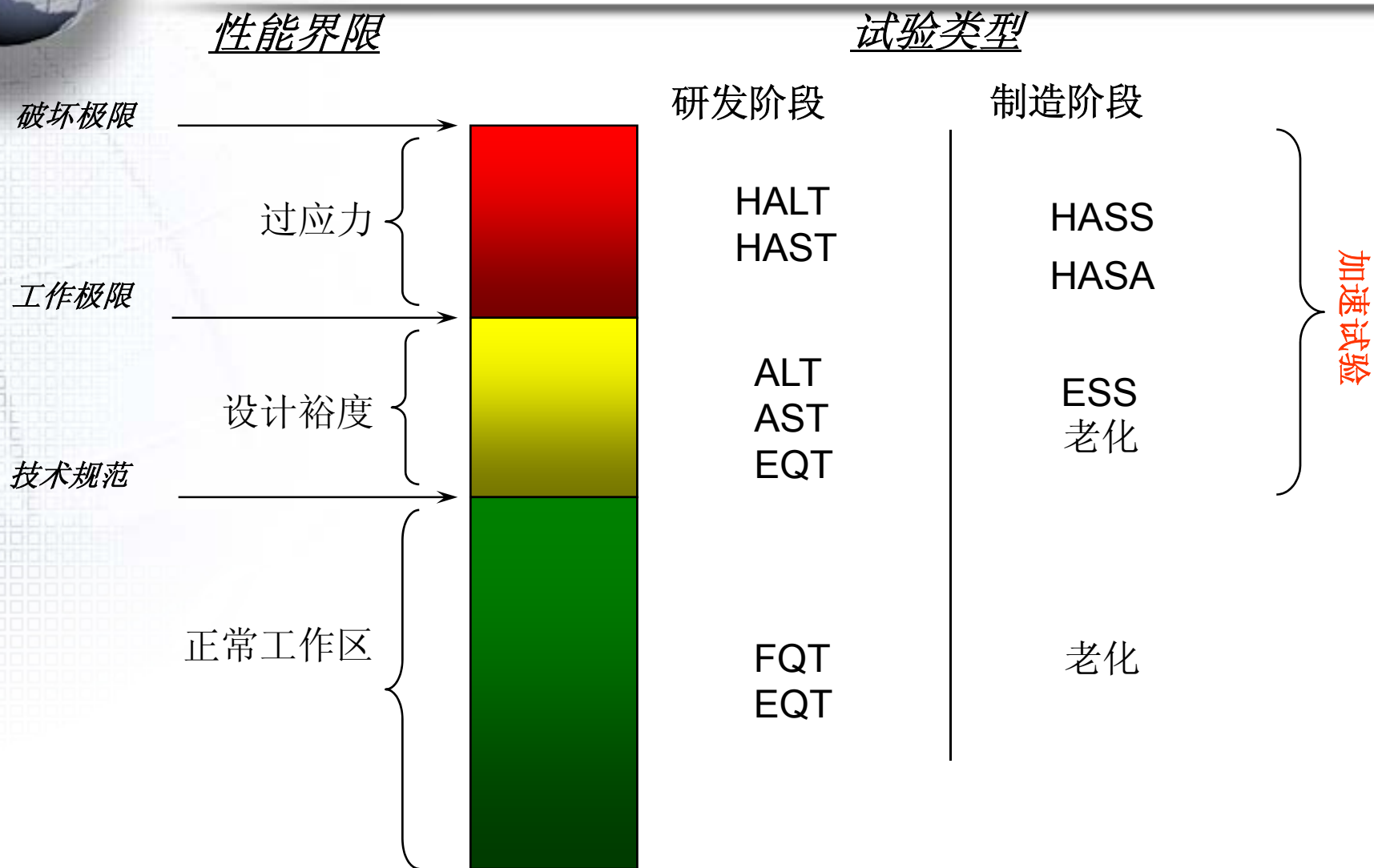
- ◆ 高周疲劳的应力循环频率较高，产生应力疲劳。一般通过建立疲劳寿命与应力振幅之间的关系来对寿命进行估算。常用的疲劳寿命模型包括Basquin和Miner累积疲劳线性方程。
- ◆ 低周疲劳的应力循环频率较低，产生应变疲劳。一般使用Manson-Coffin公式来进行寿命估算。
- ◆ 而当构件产生的疲劳断裂时，一般使用Paris公式来估算寿命



加速寿命试验总结

- ◆ 对于如今可靠性大幅度提高的产品来说，加速寿命试验作为一种可提供可靠性指标的验证试验技术，具有传统试验不可比拟的优势
- ◆ 由于产品失效模式有很多种，都要找出相应的加速模型很困难
- ◆ 加速模型的确定涉及到复杂的失效物理，而且针对不同的产品加速模型不一样
- ◆ 因此，有很多公司企业在使用，但是使用还是不广泛。

总结





谢谢！