

电力系统（高）可靠性试验能力建设分析

陈光华，郑蓬，贺春，银庆伟，黄岩，王朋飞

(许昌开普检测技术有限公司)

摘要：随着智能电网的发展和建设，电力系统产品对可靠性试验的需求在不断增加，电力用户对产品可靠性的关注程度也在不断加强。介绍产品可靠性的定义和影响产品可靠性的因素，介绍可靠性试验的概念、分类、功能以及不同应力对发现产品失效的效果。分析电力系统可靠性试验能力建设的必要性和建设方案，以高加速寿命/筛选试验为例，介绍可靠性试验的项目和组合功效。

关键词：可靠性；电力系统；高加速寿命试验；高加速筛选试验

0 引言

可靠性研究起源于武器系统，经过近半个世纪的发展，已成为一门遍及各学科各行业的工程技术学科，已经从电子产品的可靠性发展到机械和非电子产品的可靠性，从硬件的可靠性发展到软件的可靠性，从重视可靠性统计试验发展到强调可靠性工程试验，通过环境应力筛选和可靠性强化试验来暴露产品故障，提高产品的可靠性^[1]。

国外的电气公司与各类国际机构对可靠性工作都比较重视，IEC 在 1965 年成立了可靠性与维修性工艺委员会，至今已发布了不少关于可靠性与维修性方面根本性或共性的尺度：如 IEC300《可靠性与维修性办理》，它为产物在制定可靠性与维修性时供给参考，还有 ISO 9000 系列尺度的弥补文件供给相关可靠性方面的内容；还有 IEC605《设备可靠性试验》与 IEC 706《维修性导则》 IEC605 是关于设备可靠性试验方面一套较为完整的根本性尺度，它了设备可靠性验证试验和可靠性测定试验的总准绳、具体法式及试验方案。

国内六十年代首先在电子工业部门进行了可靠性技术的开拓性工作，发展到八十年代，在武器装备的研制中全面推行可靠性工作，并取得了显著成绩。特别是八十年代以来，我国国防科技工业在型号研制过程中展开一系列可靠性管理、分析、设计与实验工作，并积累了不少经验。

1 可靠性试验的介绍

1.1 产品的可靠性

定义：元件、产品、系统在一定时间内、在一定条件下无故障地执行指定功能的能力或可能性^[2]。

评价：可通过可靠度、失效率、平均无故障工作时间、平均失效前时间、有效度等来评价产品的可靠性。

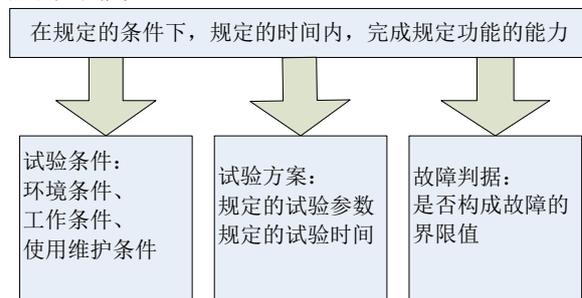


图 1 产品可靠性的定义

产品可靠性定义的要素是三个“规定”：“规定条件”、“规定时间”和“规定功能”。

“规定条件”包括使用时的环境条件和工作条件。“规定时间”是指产品规定的任务时间；随着产品任务时间的增加，产品出现故障的概率将增加，而产品的可靠性将是下降的。“规定功能”是指产品规定的必须具备的功能及其技术指标。所要求产品功能的多少和其技术指标的高低，直接影响到产品可靠性指标的高低。

1.2 产品失效率曲线

产品典型的失效率曲线是浴盆曲线，其分为三个阶段：早期失效期、偶然失效期、耗损失效期。

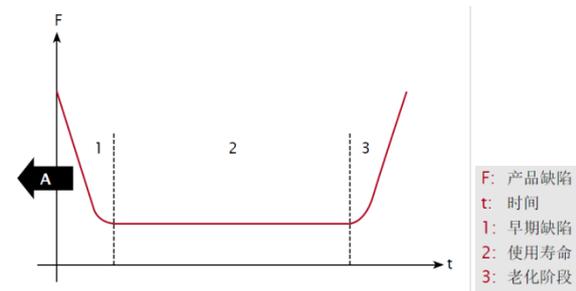


图 2 产品失效率浴盆曲线

早期失效期的失效率为递减形式，即新产品失效率很高，但经过磨合期，失效率会迅速下降。偶然失效期的失效率为一个平稳值，意味着产品进入了一个稳定的使用期。耗损失效期的失效率为递增形式，即产品进入老年期，失效率呈递增状态，产品需要更新。

1.3 产品可靠性的要素和影响因素

第一，产品可靠性的要素

表 1 产品可靠性的要素

序号	可靠性要素	要素描述
1	耐久性	产品使用无故障性或使用寿命长就是耐久性。
2	维修性	当产品发生故障后，能够很容易的通过维护或维修排除故障，就是可维修性。
3	设计可靠性	这是决定产品质量的关键，由于人机系统的复杂性，以及人在操作中可能存在的差错和操作使用环境的这种因素影响，发生错误的可能性依然存在，所以设计的时候必须充分考虑产品的易使用性和易操作性，这就是设计可靠性。

第二，影响产品可靠性的因素

产品可靠性是设计、制造、管理出来的，影响产品可靠性的因素和所占的比重如表 2 所示。

表 2 影响产品可靠性的因素

产品可靠性	影响产品可靠性的因素	影响比重
内在可靠性	设计技术	40%
	零部件/原材料	30%
使用可靠性	制造技术	10%
	使用/操作/维修	20%

1.4 可靠性试验定义

第一，定义

可靠性试验是为了解、评价、分析和提高产品的可靠性而进行的各种试验的总称。

可靠性试验通过使用各种环境试验设备模

拟气候环境中的高温、低温、高温高湿以及温度变化等情况，加速反应产品在使用环境中的状况，验证其是否达到在研发、设计、制造中预期的质量目标，从而对产品整体进行评估，以确定产品可靠性寿命。

第二，目的

1) 发现产品在设计、材料和工艺等方面的各种缺陷，经分析和改进，使产品可靠性逐步得到增长，最终达到预定的可靠性水平。

2) 为改善产品的战备完好性、提高任务成功率、减少维修保障费用提供信息。

3) 确认是否符合规定的可靠性定量要求。

第三，分类

可靠性试验可以是实验室内的试验，也可以是现场试验。按试验目的可分为工程试验和统计试验两类。

表 3 可靠性试验的分类

序号	试验类型	试验内容
1	工程试验	环境应力筛选
2		可靠性研制/增长试验
3	统计试验	可靠性鉴定试验
4		可靠性验收试验

程试验目的是暴露产品的可靠性薄弱环节并采取纠正措施加以排除（或使其故障率低于允许水平）。

统计试验目的是在一定的置信度要求下，验证产品的可靠性是否达到规定的定量要求。统计试验一般有经认可的第三方实验室负责完成，应尽可能结合产品的性能试验、环境适应性试验等来进行。

目前推广应用的高加速寿命试验、高加速应力筛选和可靠性强化试验也属于可靠性试验范畴。

2 开展可靠性试验的必要性

2.1 产品可靠性不足危害大

1986 年美国“挑战者”号航天飞机就是因为火箭助推器内橡胶密封圈因温度低而失效，导致航天飞机爆炸和七名宇航员遇难及重大经济损失。

日本的汽车曾一度因可靠性差，在美国造成大量退货，几乎失去美国市场。日本及时总结经验，提高汽车可靠性，使日本汽车在世界市场上具有很强竞争力。

国内的电子式互感器自投运以来因可靠性

不足导致事故频发，引起电网事故，给社会经济带来较大损失，给人民群众生活带来诸多不便。

根据国内外有关统计分析，认为产品故障有 80-90%是因产品设计原因造成的。特别是民用工业，因为对可靠性重视不够，产品质量问题多，影响竞争力和企业信誉，导致生命力不足，市场占有率低。

2.2 可靠性试验解决实际问题

可靠性工程是一个综合的学科，它的发展可以带动和促进产品的设计、制造、使用、材料、工艺、设备和管理的发展，把电子元器件和其它电子产品提高到一个新的水平。

通过可靠性测试可以帮助制造企业及早发现产品设计不足，对产品的可靠性指标进行有效评估，改进产品软硬件质量，提高产品运行稳定性。

表 4 可靠性试验的功能

序号	可靠性试验的功能
1	有效确认有无设计之缺失
2	有效确认有无加工机具或工艺技术上之瑕疵
3	有效确认有无瑕疵的零组件
4	有效确认有无任何变异产生
5	有效确认工程修改之完整性
6	有效建立及查核整体的品质水准

根据美国可靠性分析中心的统计数据：在造成电子系统故障的多个原因中，元器件故障占比最高，而元器件故障在可靠性试验中能得到有效暴露。

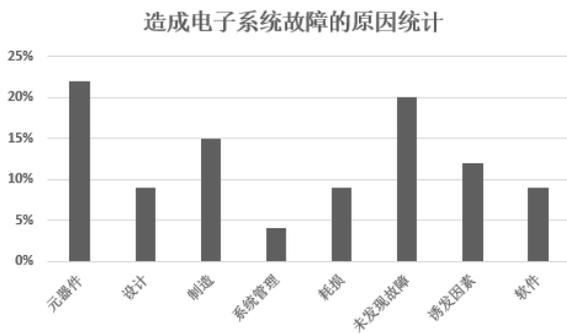


图 3 造成电子系统故障的原因统计

在可靠性试验中，各种环境应力在促使产品失效上的效率值是不同的，其中以温度循环和机械振动效率最高。具体统计如下：

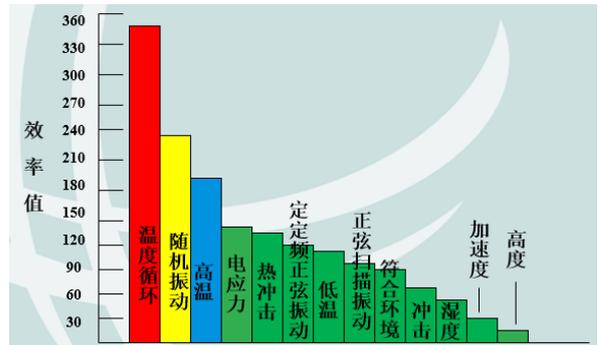


图 3 环境应力在促使产品失效上的效率值统计

在环境试验中，ESPEC 以 Hughes Aircraft 为例进行统计，在环境应力与电子元件的故障关系中，高达 70%的失效来自于：温度（变）或震动。

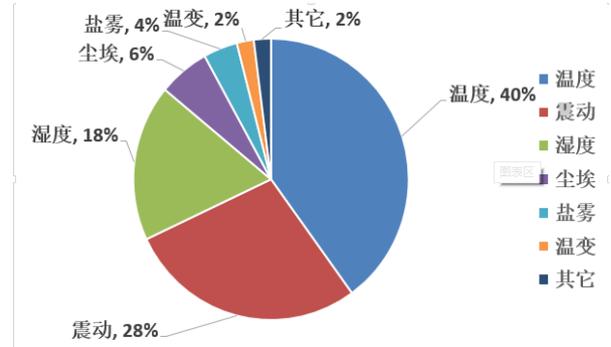


图 4 环境应力与电子元件的故障关系

QualMark 失效试验结果表明：32%的失效来自于综合应力，传统单一温度或震动测试，会错过大部分失效。110 位 HALT 使用者投票，59%认为综合应力对失效的影响最为显著。

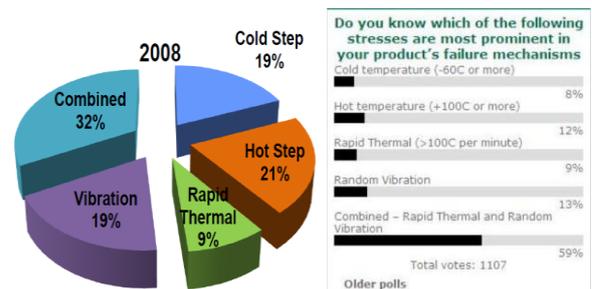


图 5 环境应力与产品失效的关系

2.3 产品和用户对可靠性试验有需求

第一，产品质量发展和提高的需要，可靠性需求愈发凸显。



图6 产品对可靠性试验的需求

产品的可靠性决定于所用元器件的可靠性，任何一个元器件、任何一个焊点发生故障都将导致系统发生故障。为保证产品或系统能可靠地工作，对元器件可靠性的要求就非常高、非常苛刻。

从实验室到野外，从热带到寒带，从陆地到深海，从高空到宇宙空间，经受着不同的环境条件，除温度、湿度影响外，海水、盐雾、冲击、振动、宇宙粒子、各种辐射等对电子元器件的影响，导致产品失效的可能性增大。

产品正朝小型化、微型化方向发展，导致装置密度的不断增加，从而使内部温升增高，散热条件恶化电子元器件将随环境温度的增高，降低其可靠性，因而元器件的可靠性引起人们的极大重视。

第二，用户产品质量评价体系发展的需要，对可靠性越来越关心。

以前，人们只用产品的技术性能指标作为衡量质量好坏的标志，这只反映了产品质量好坏的一个方面，不能反映产品质量的全貌。因为，如果产品不可靠，即使其技术性能再好也得不到发挥。

现在，用户越来越关心产品的可靠性指标（特别是国外用户），认为可靠性可以综合反映产品的质量，纷纷将（高）可靠性试验作为标准产品验证方法，例如 HALT 试验已成为美国电子业界新产品上市前所必需通过的验证。

第三，制造企业产品质量保证体系建设需求增强，可靠性试验是重要手段。

以前，企业将自己的产品生产销售视作短期行为，对可靠性的认识不清或存在着认识误区，使企业缺乏有效的可靠性管理机制，产品长期运行稳定性欠佳，导致现场事故多，影响产品后续销售。

现在，企业对产品可靠性的认识和重视程度越来越高，国外企业往往从自身出发从选材、设计和开发上重视自检，国内企业往往认为产品的可靠性、产品的质量要靠检验人员来把关的，寻求第三方检测机构的帮助。

3 电力系统产品可靠性试验需求

3.1 电力系统产品可靠性现状

电力用户对产品的可靠性一直比较重视，也采取了很多措施，例如：加强入网测试，但从现场实际运行情况看，因产品可靠性不足引起设备故障而导致的电网事故时有发生，给社会经济带来较大损失，给人民群众生活带来诸多不便。

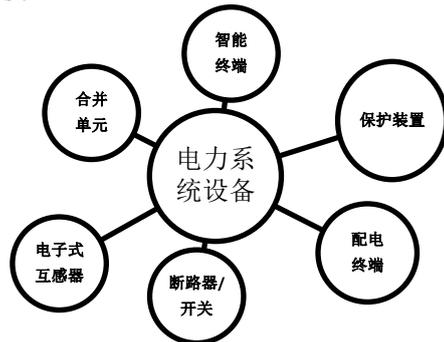


图7 电力系统常见设备

上面所列产品在现场投运前均进行过型式试验，但实际运行中，均因出现故障，引起过电网事故或导致事故扩大。追其原因，则是软件或元器件的可靠性不足。

以电子式互感器为例，国网公司 110kV 及以上电压等级智能变电站运行过程中共发生故障 150 台次以上，直接经济损失巨大。

以合并单元为例，电力用户在入网测试和产品一致性上严格要求，但现场运行中，软件 BUG 或关键元器件故障依然时有发生，导致了严重的停电事故。

3.2 电力用户的思考和推进

第一，国家电网推广常规继电保护产品就地化的趋势明显，对（高）可靠性试验的需求加大。

装置小型化和就地化之后，产品设计密度增加且所处环境愈发复杂和严酷，可靠性和维护性较之产品的技术性能显得更为重要，高可靠和免维护的装置显然更利于智能电网的长远发展。

第二，南方电网对配网产品的可靠性和维护性提出较高要求，寻求试验验证和评估。

广州局正在组织厂家研发高可靠免维护配电自动化终端产品，并对产品（DTU、FTU）高可靠性、免维护性的指标进行检测评估。

第三，电力用户正在对入网产品制定评价体系，其中一个重要指标就是产品的可靠性。

可靠性的评价指标如：平均无故障时间（MTBF）、平均修复时间（MTTR）和平均失效时间（MTTF）等需要借助高加速寿命/应力筛选试验

进行有效评估。

第四，电力用户对现场产品的软件可靠性和硬件可靠性越来越重视，需要借助试验进行评估。

电力用户要求现场产品（例如：过程层设备）的软件和硬件与通过测试产品一致，不能改变。为保证装置长期运行的稳定性（≥10年），有必要在试验时对装置软件、硬件的可靠性进行考核和评估。

3.3 国家政策的导向支持

在国家十三五科技规划中，设立了继电保护可靠性技术和应用的研究课题。

第一，在现有硬件技术发展水平上，通过试验与理论计算的方法，找到影响继电保护产品可靠性的关键元器件，为今后开展继电保护产品可靠性认证奠定基础。

第二，提出继电保护系统可靠性试验方法，提出影响保护装置生命周期的核心因素，获得继电保护装置、关键部件的临界失效条件，制定继电保护装置选型可靠性指标。

第三，制定继电保护装置、关键部件、辅助设备的选型原则，完善继电保护可靠性入网检测技术规范。

4 可靠性试验能力建设

4.1 建设的必要性分析

电力用户关心。电力用户对产品可靠性越来越关注，需要检测机构提供试验结果支撑。

制造企业需要。制造企业一般不具备可靠性试验能力，需要具备试验能力的检测机构帮助测试。

经济效益可观。继电保护类产品的可靠性试验需求在不断增加，未来市场大，可带来可观的经济效益增量。

4.2 试验能力建设方案

可靠性试验能力建设需要组建专业测试团队、购买专业测试设备、根据测试对象设计专业试验方案，最后根据试验结果按照科学、合理的评估模型和评价体系对被试产品的可靠性进行评估。

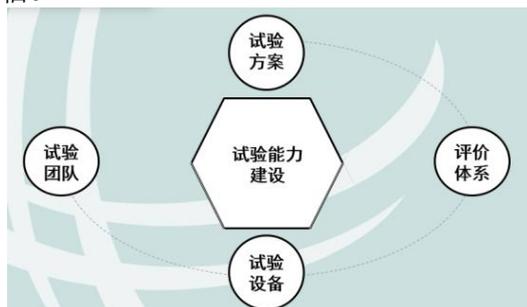


图8 可靠性试验能力建设方案

(1) 设计可靠性试验方案

首先，根据被试产品的行业归属选择和确定试验的参考标准体系。

然后，根据被试产品的应用特点开展失效机理分析，确定试验的考核重点和试验项目。

最后，根据用户的需求确定被试产品可靠性的考核指标，例如：平均无故障时间、平均修复时间和平均时标时间等。

表5 可靠性试验项目（典型）

试验项目	试验范围	试验项目	试验范围
振动试验	水平、垂直振动，正弦、随机、正弦+随机	堆码试验	最大承载 Max Load: 5吨
机械冲击试验	5000m/s ² (500g)	温度/湿度/振动三综合试验	温度: -70℃~+150℃, 湿度: 25~98%RH, 温度变化速率: 15℃, 频率: 1~2000Hz, 加速度: 0~60gn, 位移(p-p): 50.8mm
碰撞试验	250kg 50m/s ² ~300m/s ²	盐雾试验	中性盐雾、醋酸盐雾、铜加速醋酸盐雾
包装跌落	跌落姿态: 角、棱、面	气体腐蚀	SO ₂ /H ₂ S/CO ₂
模拟运输	三级公路: 35km/h(140/h) 最大负荷: 1500kg	恒温恒湿	20℃~95℃, 5~98%RH
抗压强度	最大压力: 5吨 ton	冷热冲击	-65℃~+150℃
防尘	IP1Y~IP6Y	UV老化	UVA340, UVA351, UVB313
防水	IPX1~IPX8	快速温变	70℃~150℃, 25~98%RH, ≦20℃/min

(2) 建立可靠性评估体系

可靠性是一项重要的质量指标，只是定性描述就显得不够，必须使之数量化，这样才能进行精确的描述和比较。可靠性的定量表示有其自己的特点，由于使用场合的不同，很难用一个特征量来完全代表^[3]。

不同的行业在进行可靠性试验的同时，一般需要根据自己的产品特征（例如：华为），制定可靠性指标（例如：寿命）的评估模型，利用试验结果进行有效评估。

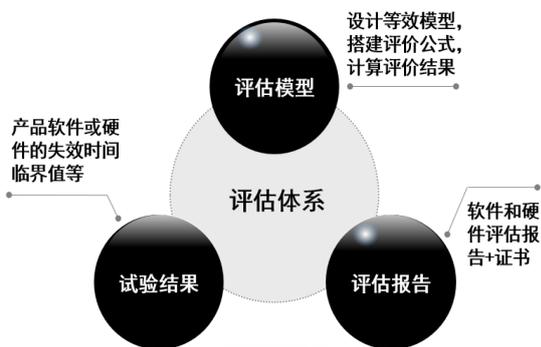


图9 可靠性评估体系

(1) 可靠度 R 或可靠度函数 R(t)

定义：产品的可靠度是指产品在规定条件下和规定时间内，完成规定功能的概率。

假设规定的时间为 t，产品的寿命为 T，在一批产品中的寿命有的 T>t，也有的 T≤t，从概率论角度可以将可靠度表示为 T>t 的概率，即：

$$R(t) = P(T > t)$$

在数值上，某个时间的概率可用试验中该事件发生的频率来估计。

(2) 失效概率或积累失效概率 F(t)

定义：失效概率是表征产品在规定条件下和规定时间内，丧失规定功能的概率，也成为不可靠度。

它也是时间 t 的函数，记作 F(t)，显然

$$F(t) = P(T \leq t)$$

它在数值上等于 1 减可靠度，也就是说，产品从 0 开始试验（或工作）到时刻 t，失效总数 r(t) 与初始试验（或工作）产品总数 N0 之比，即

$$F(t) = \frac{r(t)}{N_0}$$

积累失效概率 F(t) 与可靠度 R(t) 的关系式为

$$F(t) = 1 - R(t)$$

(3) 失效密度或失效密度函数 f(t)

定义：失效密度是表示失效概率分布的密集程度，或者说是失效概率函数的变化率。

它在数值上等于在时刻 t，单位时间内的实效数 Δr/Δt 与初始试验（或工作）产品总数 N0 的比值，即

$$f(t) = \frac{\Delta r}{N_0 \Delta t}$$

同样，当 N0 很大时，也可用微商的形式来表示，即

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{N_0 \Delta t} = \frac{1}{N_0} \frac{dr}{dt}$$

$$= \frac{d}{dt} \frac{1}{N_0} = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

其所描述的曲线成为失效密度曲线，它与横坐标轴之间的面积恰好等于 1。也就是说，失效密度这个随机变量在 (0, ∞) 范围内的概率等于 1。用积分式表示有

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = \int_0^t f(t) dt + \int_t^{\infty} f(t) dt$$

$$= F(t) + R(t) = 1$$

(4) 平均寿命 μ

定义：平均寿命对不可修复或不值得修复的产品和可修复的产品有不同的含义。

对于不可修复产品，其寿命是指产品发生失效前的工作时间或工作次数。因此，平均寿命是指寿命的平均值，即产品在丧失规定功能前的平均工作时间，通常记作 MTTF。

对可修复产品，寿命是指两次相邻故障间的工作时间，而不是报废时间。因此，对这类产品的平均寿命是指平均无故障工作时间，或称平均故障间隔时间，记作 MTBF。

但是，不管哪类产品，平均寿命在理论上的意义是类似的，其数学表达式也是一致的。

假设被试产品数位 N0，产品的寿命分别为 t1、t2、……tn，则他们的平均寿命为各寿命的平均值，即

$$\mu = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t$$

当失效密度函数 f(t) 已知，且连续分布，那么，总体的平均寿命 μ 可按下式计算：

$$\mu = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

5 高加速寿命/应力筛选试验研究

5.1 高加速寿命试验

高加速寿命试验（Highly Accelerated Life Testing，简称 HALT 试验）是一种对电子和机械装配件利用快速高、低温变换的震荡体系来揭示设计缺陷和不足的过程。

- a) HALT 试验是由美国军方所延伸出的设计质量验证与制造质量验证的试验方

法。

- b) HALT 的目的是在产品开发的早期阶段识别出产品的功能和破坏极限，从而优化产品的可靠性。
- c) 将原需花费 6 个月甚至 1 年的新产品可靠性试验缩短至一周，且在这一周中所发现的产品问题几乎与客户应用后所发现的问题一致。
- d) HALT 以高应力加速产品失效，在最短时间内发现/改正缺陷，提升产品可靠度，替制造企业省时/省钱，替用户把关质量。
- e) HALT 试验现已成为美国电子业界的标准产品验证方法，新产品上市前所必需通过的验证。

高加速寿命试验的过程为：HALT->失效发生->分析->缺陷改进->RE HALT 验证->找出产品极限。

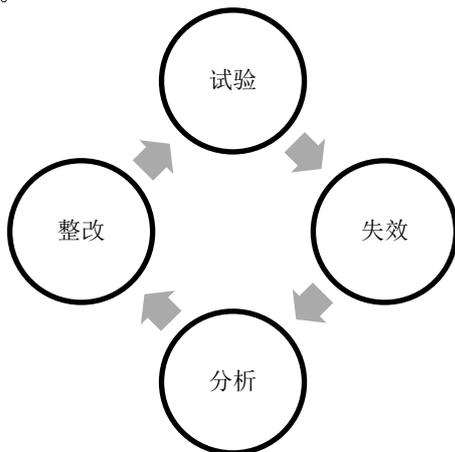


图 10 高加速寿命试验的过程

- a) 逐步施加应力直到产品失效或出现故障。
- b) 采取临时措施，修正产品的失效或故障。
- c) 继续逐步施加应力直到产品再次失效或出现故障，并再次加以修正。
- d) 重复以上试验→失效→改进的步骤。
- e) 找出产品基本操作界限和基本破坏界限。

5.2 高加速应力筛选试验

高加速应力筛选是一种生产筛选技术，迅速揭示产品的过程或生产流程的缺陷。与 HALT 不同，HASS 使用非破坏性的极限温度应力和温度变化率。

HASS 试验的目的是暴露和剔除产品的制造

和工艺缺陷，确保产品在 HALT 过程中获得的高可靠性、高强度不因制造过程而降低，对产品的质量和可靠性进行监控。

HASS 试验能把潜在的缺陷转化为显性缺陷，对显性曲线进行识别和维修后，在产品走向现场时其最终质量和可靠性将达到较高水平，现场失效率和返修率则将降低到最低水平。

5.3 高加速寿命/筛选试验的结合效果

国外多年的实践证明，HALT 与 HASS 过程的结合对暴露产品的潜在缺陷，改进产品的强度和可靠性非常有效。试验结果表明，应力的增加可加速失效发生，应力提升 1 倍，时间缩短 1000 倍。

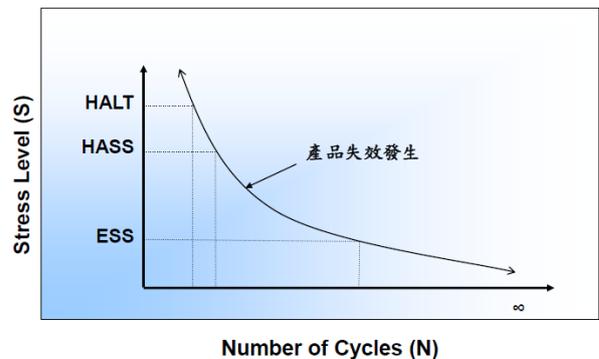


图 11 疲劳故障之 SN 曲线

5.3 HALT/HASS 试验项目

表 6 HALT/HASS 试验项目

序号	试验项目	考核目的
1	低温步进应力检验	通过逐级增加试验应力，确定产品极限。
2	高温步进应力检验	通过逐级增加试验应力，确定产品极限。
3	高低温循环应力检验	快速发现产品的潜在缺陷，并加以改进和验证，从而增加产品的极限值，提高其坚固性及可靠性。
4	振动步进应力检验	通过逐级增加试验应力，确定产品极限。
5	综合应力试验	快速发现产品的潜在缺陷，并加以改进和验证，增加产品的极限值，提高其坚固性及可靠性。

通过 HALT 和 HASS 试验可以对产品的多个缺陷进行有效检测, 具体如表 7 所示。

表 7 通过 HALT/HASS 检测缺陷

缺陷类型	温度筛选	振动筛选	振动/温度筛选
有缺陷部件	√	√	√
破损部件	√	√	√
不当安装	√	√	√
焊接连接	√	√	√
短路/开路	√	√	√
接触不良	√	√	
电线绝缘	√		√
终端接触不良	√	√	√
不当卷曲或啮合	√		√
污染	√		√
碎片		√	√
硬件接触不良		√	√
擦损电线	√	√	
参数漂移	√		√
密封件	√		√
相邻板/部件 短路		√	√

备注: 表格中“√”表示可以检测

6 结论

可靠性现已成为电子及电气产品从设计、管理、制造到销售、维修整个生命周期中重要的组成部分。

可靠性在实际当中有着极其重要的作用。对于产品来说, 可靠性问题和人身安全、经济效益密切相关。提高产品的可靠性, 可以防止故障和事故的发生, 尤其避免灾难性的事故发生, 从而保证人民生命财产安全; 可以使产品总的费用降低; 可以减少停机时间, 提高产品

可用率, 一台设备可以顶几台设备的工作效率; 对于企业来讲, 提高产品的可靠性可以改善企业信誉, 增强竞争力, 扩大产品销路, 从而提高经济效益; 还可以减少产品责任赔偿案件的发生, 以及其它处理产品事故费用的支出, 避免不必要的经济损失。

电力用户对产品的可靠性越来越重视, 电力系统产品对于可靠性试验的需求也越来越明显。建设可靠性试验能力, 研究电力系统产品的可靠性试验方法和评估模型, 是未来的方向。

参考文献

- [1] 刘俊美, 王金诺. 电子产品的可靠性试验研究[J]. 电子质量, 2004(5).
- [2] 吕明春, 田宏. 电子产品可靠性试验方法研究[J]. 电子质量, 2007, 22(5):85-88.
- [3] 梁潇, 陈华文. 电子产品的可靠性测试[J]. 电子质量, 2007, 25(4):25-29.

作者简介:

陈光华(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能变电站自动化系统、通信规约一致性及时间同步测试技术, Email: chenguanghua@ketop.cn.

郑蓬(1981-), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向: 智能变电站自动化系统、通信网络及时间同步测试技术, Email: zhengpeng@ketop.cn.

贺春(1973-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 智能电网、电力系统自动化、通信规约及规约测试, IEC SMB SG3 战略专家组成员, IEC TC57 标委会委员, Email: hechun@ketop.cn.

银庆伟(1985-), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向: 智能变电站自动化系统、通信规约及规约测试技术, Email: wangpengfei@ketop.cn.

黄岩(1993-), 男, 学士, 主要研究方向: 电力系统信息安全、智能变电站自动化系统, Email: huangyan@ketop.cn.

王朋飞(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能变电站自动化系统、通信规约一致性及时间同步测试技术, Email: wangpengfei@ketop.cn