

可靠性试验与评价介绍

江妙富

13901280659

jmf1969@163.com

北京利江技术服务有限公司

目录

1. 可靠性试验基本概念
 2. 可靠性试验的发展历程
 3. 国内可靠性试验的发展
 4. 可靠性试验与评价
 5. 可靠性试验与产品的研制周期
 6. 环境试验与试验设备的发展
 7. 可靠性试验与标准
-

1.可靠性试验基本概念

1.1可靠性试验与可靠性和可靠性工程的关系

可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。

可靠性工程是为达到产品可靠性要求而进行的有关设计、分析、试验和生产等一系列工作。其任务就是“优生”。可靠性试验是可靠性工程中的一项重要内容。

可靠性试验是指为了获取评价所需的数据资料而按照规定的可靠性要求和规范对试件进行的试验。通常包括实验室试验和现场（外场）整机试验，在这里主要指的是在实验室里进行的可靠性试验。

1.可靠性试验基本概念

1.1可靠性试验与可靠性和可靠性工程的关系

环境试验是为了保证产品在规定的寿命期间，在预期的使用、运输或贮存的所有环境下，保持功能可靠性而进行的活动。是将产品暴露在自然的或人工的环境条件下经受其作用，以评价产品在实际使用，运输和贮存的环境条件下的性能，并分析研究环境因素的影响程度及其作用机理。

可靠性试验是由环境试验、寿命试验、性能试验和特殊试验等组成，环境试验是其中的主要组成部分。

1.可靠性试验基本概念

1.2 可靠性试验目的

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：发现产品在设计、材料和工艺方面的各种缺陷，从而改进；为改善产品的战备完好性、提高任务成功率、减少维修费用及保障费用提供信息；确认是否符合可靠性要求。

因此，可靠性试验不仅是为了对产品作出接收、拒收或合格、不合格的结论，而且要通过可靠性试验发现产品的可靠性问题，采取有效的措施予以纠正，从而提高产品的可靠性水平。

可靠性试验的目的是为了提供可靠性评价的试验数据，所以试验与评价是不可分的。

1.可靠性试验基本概念

1.3 试验与评价介绍

美军装备的试验与评价定义为“某一武器系统或分系统在其研究、研制、交付部队和部署期间进行的所有物理试验、建模、仿真、实验和相应的分析”。

其中“试验”是指硬件/软件（模型、样机、生产设备、计算机程序）的实际试验，通过试验旨在获取供开发新能力、建立管理过程或进行资源分配决策使用的定性和定量数据；

“评价”是指对数据进行逻辑组合、分析并与期望的性能进行比较以帮助做出系统性决策的过程，也就是对从设计审查、硬件检测、建模和仿真、试验或设备的使用中得到的定性或定量数据进行审查和分析的过程。

试验与评价

试验与评价是如图一所示的五个步骤反复迭代的过程。第一步是明确决策者所需的试验与评价信息；第二步是对第一步得到的评价目标进行试验前分析，以确定所需数据的类型和数量、预期或预计能从试验得到的结果以及进行试验与评价所需的工具；第三步，试验活动和数据管理；第四步，试验后综合和评价；第五步是决策者将试验与评价信息与其它项目进行权衡比较以确定一系列正确的措施。

- 试验与评价过程是产品研制过程的一个有机组成部分，通过该过程提供系统或部件有关风险和风险转移的信息以及用于确认模型和仿真的经验数据。美军的试验与评价分为研制试验与评价（DT&E）和使用试验与评价(OT&E)两类。在研制的早期阶段，试验与评价（T&E）主要是验证方案的可行性、评价设计风险、挑选设计备选方案、进行比较和分析权衡、估计使用要求的满足程度。随着系统的设计和研制的进展，试验与评价的迭代过程从主要关注工程目标的实现程度的DT&E逐步转移到主要关注使用效能、适用性和生存性问题的OT&E。

2 可靠性试验的发展历程

以美国的可靠性试验发展为例，可靠性试验的发展经历了四个阶段：

1. 可靠性萌芽： 二战到20世纪50年代中期
 2. 实施可靠性统计试验： 20世纪50年代后期—70年代中期
 3. 重视综合环境试验： 20世纪70年代后期—80年代中期
 4. 注重可靠性强化试验、综合系统试验、仿真与虚拟试验： 20世纪80年代后期—至今
-

美国当前可靠性试验

1. 美国当前可靠性试验模式：

可靠性强化试验（RET），包括高加速寿命试验（HALT）和高加速应力筛选（HASS），立足于部件级。

2. 强调在方案与技术开发阶段解决关键技术问题。

3. 全方位的模拟整机的工作状态试验——整机综合试验。

4. 对研发试验的进一步发展，比如振动试验，增加瞬态冲击和非高斯随机试验，减少冲击响应谱试验等。

故障积累与实验数据积累。

3. 国内可靠性试验发展

国内可靠性研究始于20世纪70年代，八十年代中期开始实施可靠性试验，90年代开始可靠性验证试验（教练八飞机）。到了20世纪90年代末，我国才真正开始重视可靠性试验。我国各个军工企业从90年末才开始大量采购环境试验设备。

国内各种可靠性试验的军标基本上根据美军标编制的，所以在实施上也有很大的不适用性。另外，美国总在挑战；而中国没有对产品研制周期和费用这方面的迫切感；所以中国的可靠性试验技术和执行远远落后于美国。

笼统来说，中国目前的可靠性试验水平等同于美国80年代后期至90年初。但是随着我国对可靠性试验的深入，尤其对综合试验箱和可靠性强化试验箱的需求，已经引起了美国对我国的可靠性试验技术的重视，从2014年开始对我国实行综合试验箱和可靠性强化试验箱出口禁运。

3. 国内可靠性试验发展方向

总结：国内国情

军工产品：元器件、部件、系统都是100%试验；主要试验量是筛选、摸底和鉴定试验（通过不通过，没有破坏性试验）。民品是例行或者抽检。

目前国内的“强基”政策和采购策略的改变（允许民营企业参与军品）都会改变环境试验和技术要求。

发展：有效试验，减少重复试验；节省费用，减少周期

- ◆ 加强元器件和部件级产品的筛选老化试验，进行可靠性强化试验。
 - ◆ 加强综合环境应力试验。
 - ◆ 加强整机的环境试验
 - ◆ 加强仿真
-

3. 国内可靠性试验发展方向

国内从行业看：可靠性做好的是汽车行业和IT行业。
从企业看，我国华为的可靠性试验是做得最好。
军工企业的可靠性试验是严格——过试验。

当前军工企业也在积极进步，比如可靠性最提高、产品延寿、也在不断增加研发试验。

总体上发展存在问题：试验数据分析与积累、产品的研发周期和费用问题。一些体制的改革？

4. 可靠性试验与评价

4.1 定义

可靠性试验与评价：为了解、分析、提高、评价产品的可靠性而进行的试验与评价工作。

试验——指硬件（或软件）实际的试验，以便获取评价所需的数据资料。

评价——是对数据进行逻辑组合、分析并与期望的性能进行比较以帮助做出系统性决策的过程。

试验是为了获取评价所需的数据，但评价所需的数据并不仅仅来自于试验。

4. 可靠性试验与评价

4.2 分类

(1) 按照GJB-450A，可靠性试验可分为环境应力筛选、可靠性研制试验、可靠性增长试验、可靠性鉴定试验、可靠性验收试验和寿命试验等。

(2) 按试验场地分类，可分为：实验室试验与现场试验。

4.3 环境应力筛选

1) 目的:

通过向电子或机电产品施加合理的环境应力和电应力，将其内部的潜在缺陷在短时间内激发成为故障，并加以排除，从而提高产品的可靠性。

环境应力筛选：在电子产品上施加随机振动及温度循环应力，以鉴别和剔除产品工艺和元件引起的早期故障的一种工序或方法。环境应力筛选对象：研制阶段和批生产初期的全部产品均应进行环境应力筛选；在批生产中、后期可根据产品批量及质量稳定情况进行抽样筛选。参见GJB1032-90《电子产品环境应力筛选方法》和GJB/Z34-93《电子产品定量环境应力筛选指南》。试验产品是元器件、可更换的部件或组件。

4.3 环境应力筛选

2) 用途与效果:

研制阶段——可用于改进设计，提高产品的固有可靠性

生产阶段——提高产品的使用可靠性

3) 方法:

推荐采用温度循环加随机振动组合的试验方法。

对温度循环和随机振动敏感的缺陷

4) 实施程序

5) 实施要点

- (1) 适用的产品对象——参加导弹飞行试验和所有批生产的电子、电气、机电、光电产品；关键、重要产品要做到三个百分之百：整机、电路板、元器件。
-

4.3 环境应力筛选

5) 实施要点

(2) 力求进行整弹的ESS，重点在接口和连线，采用多点最大值响应控制方法。

(3) 施加的环境应力不必模拟真实的环境条件，其环境应力类型、水平、施加时间的确定原则：

▼ 能迅速、经济地暴露隐患和缺陷，以剔除早期故障为目标

▼ 不应使正常的产品失效，不能超过设计极限

▼ 不留残余应力或明显影响使用寿命

(4) 环境应力的确定：

▼ 随机振动：振动量值—— $0.04g^2/HZ$ ，一般比使用振动环境应力大，但大多数航空、航天产品应能承受。

▼ 温度循环：高、低温值不能超过产品设计规范规定的允许值；温变率一般不小于 $5^{\circ}C/min$ 。

(5) 选取环境应力对产品最为敏感的方向进行试验。

4.4 可靠性研制试验

4.4.1 目的：

通过对产品施加适当环境应力、工作载荷，寻找产品中的设计缺陷、以改进设计、提高产品的固有可靠性水平。

4.4.2 试验分类：

➤ 可靠性强化试验

可靠性强化试验：通过系统地施加逐渐增大的环境应力和工作应力，来激发故障和暴露设计中的薄弱环节，从而评价产品设计的可靠性。因此，可靠性强化试验(RET)应该在产品设计和周期中最初的阶段实施，以便于修改设计。激发和暴露产品设计中的薄弱环节，予以改进。包括高加速寿命试验（HALT）和高加速应力筛选（HASS）。

加速试验综述

4.4 可靠性研制试验

4.4.2 试验分类:

➤ 可靠性增长摸底试验

可靠性增长摸底试验：在模拟产品真实的使用环境应力和工作应力下，通过试验尽早暴露产品在设计、工艺等方面的缺陷，及时采取改进措施，使产品的可靠性达到增长。

其实就是可靠性鉴定试验的预演。在产品设计定型之前，要交付产品进行试用，在没有进行可靠性增长试验管理的情况下进行摸底试验。

属于国情试验。

4.5 可靠性增长试验

4.5.1 目的:

通过对产品施加真实的或模拟产品真实的使用环境应力和工作应力，暴露产品中潜在缺陷并采取纠正措施，使产品的可靠性在预定的时间内提高到规定的水平。

增长试验的主要目的是验证设计和设计中使用的工具和模型。最近各公司经理主要是根据可靠性增长试验来确定是否符合合同规范的。

可靠性增长试验：在产品研制阶段，模拟产品真实的使用环境应力和工作应力下，通过试验尽早暴露产品在设计、工艺等方面的缺陷，及时采取改进措施，使产品的可靠性达到增长。适用标准是：GJB1407《可靠性增长试验》，GJB/Z 77《可靠性增长管理》；试验产品是部件、功能系统和设备。

4.5 可靠性增长试验

4.5.2 依据:

GJB1407 《可靠性增长试验》

GJB/Z 77 《可靠性增长管理》

4.5.3 可靠性增长试验的特点

可靠性增长试验是一种工程试验;

试验前有明确的可靠性增长目标, 试验过程中和试验结束后能评估产品的可靠性水平;

试验时间一般较长, 为MTBF要求值的5-25倍。

4.5 可靠性增长试验

4.5.4 可靠性增长模型

4.5.4.1 可靠性增长模型的功用

- (1) 用来确定可靠性增长试验方案，如试验总时间等
- (2) 在试验跟踪过程中用来评估产品当前的可靠性水平，试验结束时用来评估产品已达到的可靠性水平。

4.5.4.2 杜安 (Duane) 模型

- (1) 杜安 (Duane) 模型的公式

累积MTBF为:

$$\text{MTBF}_{\Sigma}(t) = \frac{1}{a} t^m$$

瞬时MTBF为:

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

4.5 可靠性增长试验

4.5.4.2 杜安 (Duane) 模型

(2) 杜安 (Duane) 模型的特点:

- a. 确定性模型，不是数理统计模型；
- b. 产品在增长试验过程中，累积MTBF对累积试验时间，在双对数坐标纸上趋近为一条直线，截距 a 为产品进入试验时的MTBF水平，斜率 m 为增长率。

(3) 适用范围：适用于发现故障及时改进的可靠性增长过程，但不能用于延缓改进，而使产品可靠性突然大幅度提高的过程。

(4) 优点：方法直观、使用简便

(5) 缺点：不能提供依据数理统计的评估结果

4.5 可靠性增长试验

4.5.4.3 AMSAA模型

(1) AMSAA模型的公式

故障强度函数:

$$\lambda(t) = abt^{b-1}$$

均值函数:

$$E[r(t)] = \gamma(t) = \int_0^t \lambda(t) dt = at^b$$

(2) AMSAA模型的特点:

a. 为数理统计模型

b. AMSAA模型是杜安 (Duane) 模型的概率解释, 能提供依据数理统计的评估结果

4.5 可靠性增长试验

4.5.5 可靠性增长试验方案

- (1) 可靠性增长曲线：计划增长曲线、跟踪增长曲线
 - (2) 确定起始点：预计值的10~20%
 - (3) 确定增长目标：使产品以高概率通过可靠性鉴定试验的MTBF值。
 - (4) 确定增长率： $0.3 \sim 0.6$ ，取决于产品设计成熟程度、增长措施的力度。
 - (5) 确定总试验时间：取决于增长率和起始点及可用资源，一般为MTBF值的5~25倍。
-

4.5 可靠性增长试验

4.5.6 可靠性增长试验结果评定

(1) 杜安 (Duane) 模型: 根据故障数据, 拟合得参数 m 、 a , 可求出最终 MTBF 值, 以判定是否达到预期增长目标。

(2) AMSAA 模型:

点估计:

$$\overline{\theta(t_s)} = \left[\overline{abt_s}^{\bar{b}-1} \right]^{-1} \quad (1)$$

区间估计:

对于时间截尾数据:

$$\theta_L = \pi_1 \overline{\theta(t_s)} \quad \theta_U = \pi_2 \overline{\theta(t_s)} \quad (2)$$

对于故障截尾数据:

$$\theta_L = \rho_1 \overline{\theta(t_s)} \quad \theta_U = \rho_2 \overline{\theta(t_s)} \quad (3)$$

式中—— t_s 为试验结束时间; $\overline{\theta(t_s)}$ 为产品最终的 MTBF 点估计值, θ_L 为估计下限, θ_U 为估计上限, 其他系数由查表获得。

4.5 可靠性增长试验

4.5.7 实施要点

- (1) 要在充分实施可靠性设计的基础上开展可靠性增长试验，而不能仅依赖可靠性增长试验来纠正劣质设计。
 - (2) 进行可靠性增长试验的产品选取原则：新研、有重大改进的关键、重要设备或分系统。经分析和可靠性研制试验表明其可靠性达不到要求的产品。
 - (3) 试验时机：在可靠性研制试验、环境鉴定试验和ESS后，可靠性鉴定试验前完成。
 - (4) 试验剖面应尽可能模拟真实使用环境应力和工作应力。
 - (5) 试验的关键在暴露故障，实施可靠性增长。
 - (6) 经订购方同意，成功的可靠性增长试验可以代替可靠性鉴定试验。
-

4.6 可靠性验证试验

可靠性验证：在设计定型阶段和初始使用阶段，对装备的可靠性是否达到《研制总要求》或《合同》规定的要求给出结论性意见所需进行的鉴定、考核或评价工作的总称。

可靠性验证试验：用于考核可靠性指标是否满足规定的要求的试验，包括可靠性鉴定试验、验收试验、寿命试验、现场试验等。

4.6.1 目的：

验证研制与批生产的产品是否达到了规定的可靠性定量要求。

4.6 可靠性验证试验

4.6.2 依据

——GJB899《可靠性鉴定与验收试验》，其统计试验方案适用于故障分布服从指数分布的产品。

GB5080.5《设备可靠性试验 成功率的验证试验方案》，其统计试验方案适用于故障分布服从二项分布的产品。

可靠性鉴定和验收试验，在产品研制的设计定型阶段或研制工程阶段末期进行，对产品研制后能否达到规定的可靠性要求而在规定的条件下进行的试验。

4.6.3 试验分类

(1) 可靠性鉴定试验：用于设计定型产品，分实验室试验和现场试验。

(2) 可靠性验收试验：用于批生产产品，可靠性保证试验是其中一种试验方法。

4.6 可靠性验证试验

4.6.4 统计试验方案

4.6.4.1 统计推断与抽样

- (1) **统计推断**: 从总体中抽取一组样本, 利用样本的试验所获取的信息来推断总体的统计特性。
- (2) **随机抽样**: 简单随机抽样

4.6.4.2 统计试验方案类型

◆ 满足指数分布的统计试验方案

适用于可靠性参数为MTBF、MTBCF的可靠性鉴定与验收试验。序贯试验方案/定时截尾试验方案/全数试验方案

◆ 满足二项分布的统计试验方案

适用于可靠性参数为成功率的产品可靠性验证试验,产品可以是重复使用的设备,也可以是一次使用的设备。

截尾序贯试验方案/定数试验方案

4.6 可靠性验证试验

4.6.5 可靠性试验剖面

4.6.6 试验判决与可靠性评估

4.6.7 现场可靠性验证

4.6.8 可靠性评估

4.6.9 实施要点

- (1) 可靠性鉴定试验是产品设计定型的试验，应由定型机构组织，一般在独立于订购方和承制方的第三方进行。
- (2) 进行可靠性验证（鉴定试验）的产品选取原则：新研、有重大改进的一、二级定型产品及部分关键、重要的三级定型产品。综合考虑经费、进度要求。
- (3) 受试品的技术状态要符合产品设计定型的技术状态要求。
- (4) 受试品试前经ESS，同批产品通过了环境试验。
- (5) 故障分类与故障判据。
- (6) 试验中发生故障只能修复，不能改进。

4.7 寿命试验

4.7.1 目的

验证产品的寿命是否满足规定的要求。可靠性试验是考核产品浴盆曲线底部离横指标轴的高度，寿命试验则考核产品浴盆曲线拐点离坐标原点的横坐标距离。

4.7.2 参考文件

(1985) 科六字第1325号《航空技术装备寿命和可靠性工作暂行规定》，附件：机载设备、飞机、发动机、机载兵器、水雷、空空导弹、直升机。

4.7.3 寿命试验考核的参数

- (1) 空-空、空-地导弹——工作寿命
 - (2) 弹用航空发动机——首翻期等
 - (3) 所有导弹——储存寿命
-

4.7 寿命试验

4.7.4 寿命试验方法

- (1) 厂内寿命试验法：产品在实验室内，按尽可能真实地模拟使用条件的试验剖面进行的试验。工程经验法是其中的一种方法。
- (2) 外场信息法：
 - a. 外场数据统计法：利用产品外场使用中得到的数据。如：残存比率法、平均秩次法等。
 - b. 检查法：检查产品的征候（泄露、锈蚀、磨损）或测量产品功能参数，作为定寿的依据。
- (3) 类比分析法：根据相似产品（指：设计、制造、使用和维护条件等相似）寿命信息与水平，确定新产品的寿命。
- (4) 薄弱环节法：：用分析的方法找出待验证的产品中寿命最短又能决定产品寿命的零部件，按厂内寿命试验法对该零部件进行试验，给出该产品的寿命。适用于具有复杂结构，又难于进行设备整机寿命试验的产品。

4.7 寿命试验

4.7.5 寿命试验与可靠性验证试验的区别

	寿命试验	可靠性验证试验
试验目的	验证耐久性参数	验证可靠性参数
失效（故障）判据	对不可修复产品，凡引起产品更换的所有偶然失效和耗损失效均判为失效。 对可修复产品，只计及将引起产品翻修的耗损性故障，如磨损、老化，疲劳断裂等。	对基本可靠性指标，将导致增加维修人力和保障资源的所有事件均判为故障，包括所有偶然故障和耗损故障。 对任务可靠性指标，凡出现将影响完成规定的任务的事件才判为故障，其中包括偶然故障和耗损故障。
试验中的故障处理方法	如发生关联责任故障，该试件终止试验。	如发生关联责任故障，可更换修复。
受试品数量	由试验方案决定	根据试验最佳效费比和产品寿命指标值决定
所需的试验总时间	根据寿命指标值、产品重要度和受试品数量决定	取决于统计试验方案和可靠性指标值

4.7 寿命试验

4.7.6 寿命试验的一种工程评估方法——工程经验法

(1) 如每台受试品试验到截止时间 T_z 均未发生与寿命关联的失效，其寿命值 T_0 ：
$$T_0 = T_z / K \quad (4)$$

式中： K —工程经验系数，一般少于1.5，具体数值由承制方与使用方共同商定；

(2) 如 n 个受试品中有 r 个受试品在 T_z 小时内发生了与寿命关联的失效，其寿命值为：

$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^r t_i + (n-r)T_z}{n \cdot K_0} \quad (5)$$

式中： t_i —第 i 个试品发生与寿命关联的失效时间；

K_0 —工程经验系数，大于 K ，可取1.5，具体数值由承制方与使用方共同商定。

4.7 寿命试验

4.7.6 寿命试验的一种工程评估方法——工程经验法

(3) 如果产品试验到截止时间 t_0 之前，全部产品均发生了关联失效，则其寿命值为：

$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^r t_i}{n \cdot K_1} \quad (6)$$

式中： K_1 —工程经验数，一般大于 K 与 K_0 ，具体数值由承制方与使用方共同商定。

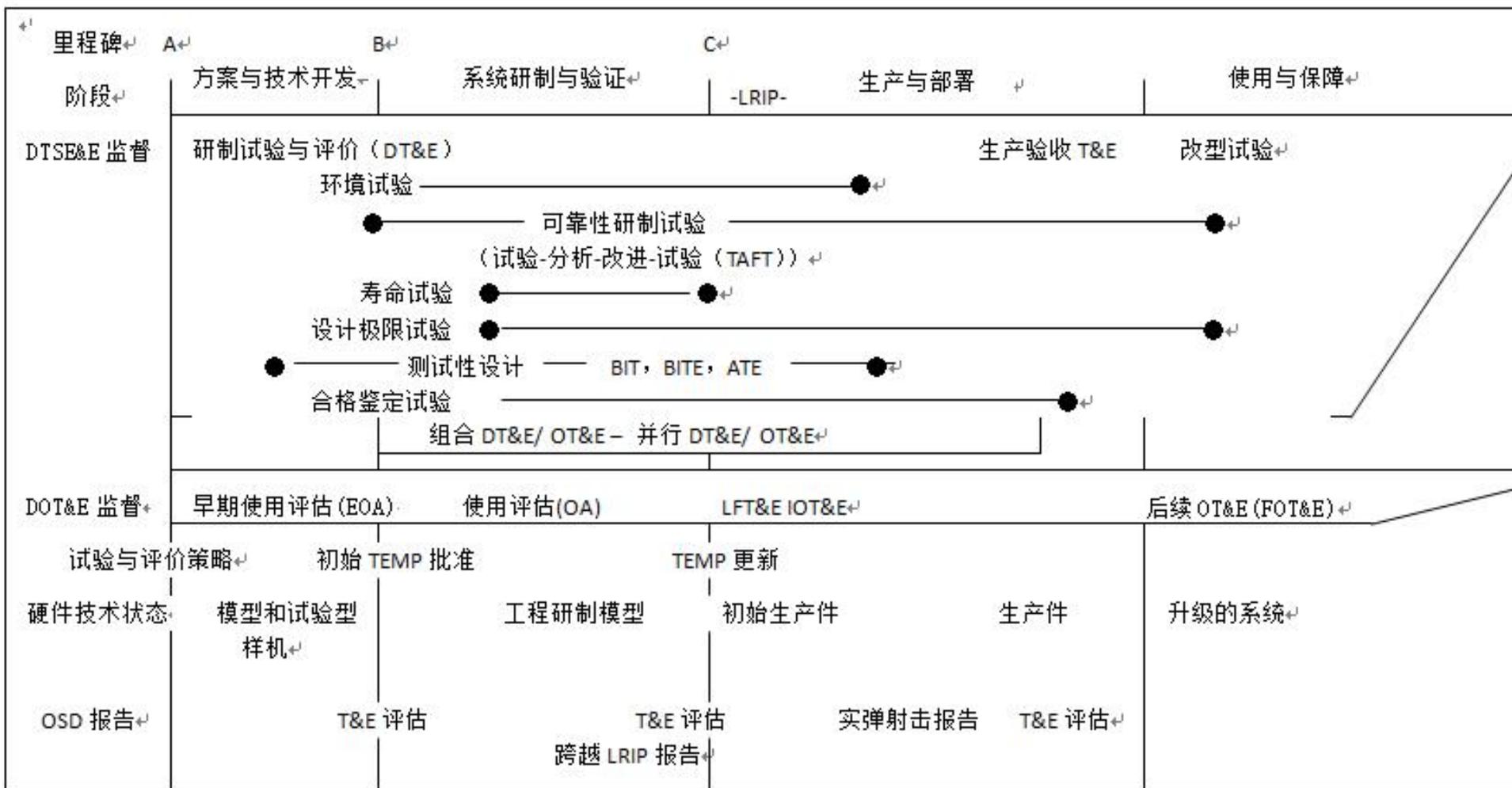
4.7.7 寿命与可靠性综合验证试验

5 可靠性试验与产品的研制周期

产品研制阶段	论证方案	工程研制	设计定型	初始使用	生产定型	部署使用
环境应力筛选						
环境试验						
可靠性研制试验						
可靠性强化试验						
可靠性增长试验						
可靠性摸底试验						
可靠性鉴定试验						
寿命试验						
可靠性验收试验						

5 可靠性试验与产品的研制周期

美军采办期间的试验与评价



备注: DTSE&E——试验、系统工程和评价主任, DOT&E——使用试验与评价主任, OSD——国防部长办公厅, LRIP——小批初始生产,

T&E——试验与评价, IOT&E——初始使用试验与评价, LFT&E——实弹试验与评价, TEMP——试验与评价总计划,

6 环境试验与试验设备的发展

6.1 环境试验的发展

- 由单一输入激励模拟到产品的响应模拟；
 - 单一环境因素试验，到多种环境因素综合试验；
 - 自然环境模拟，到加速（严酷）环境试验；
 - 部件级、单元级产品试验，到整机、装备级产品试验。
原因是部件级环境应力高筛选，但在整机中，安装方式，所处在整机中的位置，导致振动固有频率发生变化，由于对于部件来说，周围环境状态的变化，导致温度场的温度应力也发生变化，容易激发故障。
 - 两级分化，部件级和整机试验变化。
 - 简单的过程控制，到规范化、精确化、自动化和信息化、故障复现
-

6 环境试验与试验设备的发展

6.2 环境试验设备的发展

随着环境试验技术的发展，相应需要提高试验手段——环境试验设备的发展，并回绕着模拟真实环境应力而努力。

- 设备本身的能力发展

- ◆ 从模拟简单应力到复杂，甚至于仿真的应力；
- ◆ 从一般的环境应力到更广更高的环境应力；
- ◆ 从一般容量到能容纳更大尺寸的整机产品的设备。

- 控制试验技术发展

7 环境试验与标准

7.1 环境试验

7.1.1. 气候环境试验（GB2423，GJB150，GB4208等）

- ✓ 温度试验：高温试验、低温试验、温度变化、温度冲击、温度循环试验等；
 - ✓ 湿度试验：恒定湿热、交变湿热；
 - ✓ 腐蚀试验：盐雾试验、霉菌试验、二氧化硫/硫化氢试验；
 - ✓ 其它：防尘防水(IP防护等级、IP等级、IP代码、外壳防护等级)、老化试验、淋雨试验、砂尘试验、低气压试验（高度试验、快速气压变化）、高气压试验（过压试验、正压试验）、太阳辐照（太阳辐射、阳光辐射）、风压（风载荷）、热真空、爆炸性减压、离心试验（加速度试验）等。
-

7 环境试验与标准

7.1 环境试验

7.1.2. 机械环境试验（GB2423，GJB150，RTCA/Do 160E）

- 振动试验：正弦振动、随机振动、复合振动；
- 其它：冲击试验、地震试验（地震模拟试验）、碰撞、跌落、包装运输等。

7.1.3. 综合环境试验（GB2423，GJB150）

- 温度-湿度-高度-振动综合试验
 - 其他综合环境试验
-

7 环境试验与标准

7.2 电磁兼容试验

电磁兼容试验：GJB151A-97、152A-97(MIL-STD-461D/462D)、GB/T17618、GB/T17619、GB17625、GB/T17626、GB6833、GB / T 13926、GB 17799、RTCA/Do 160E等。

① 各种电磁兼容试验

② 抗扰度试验：静电放电、射频电磁场、电快速瞬变脉冲群、浪涌冲击、传导射频（BCI）、工频磁场、电压暂降、短时中断、电压变化、谐波、谐间波、共模 / 串模干扰影响、电源电压频率变化影响、电源电压低降影响、电源短时中断影响、电源瞬时过压影响、外界磁场影响、冲击电压、绝缘强度、传导瞬态脉冲抗扰度、点火噪声等。

③ 电磁发射：谐波电流、电压波动和闪烁、传导发射、辐射发射、干扰功率、插入损耗、喀喇声、罗经安全距离等。

7 环境试验与标准

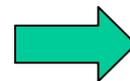
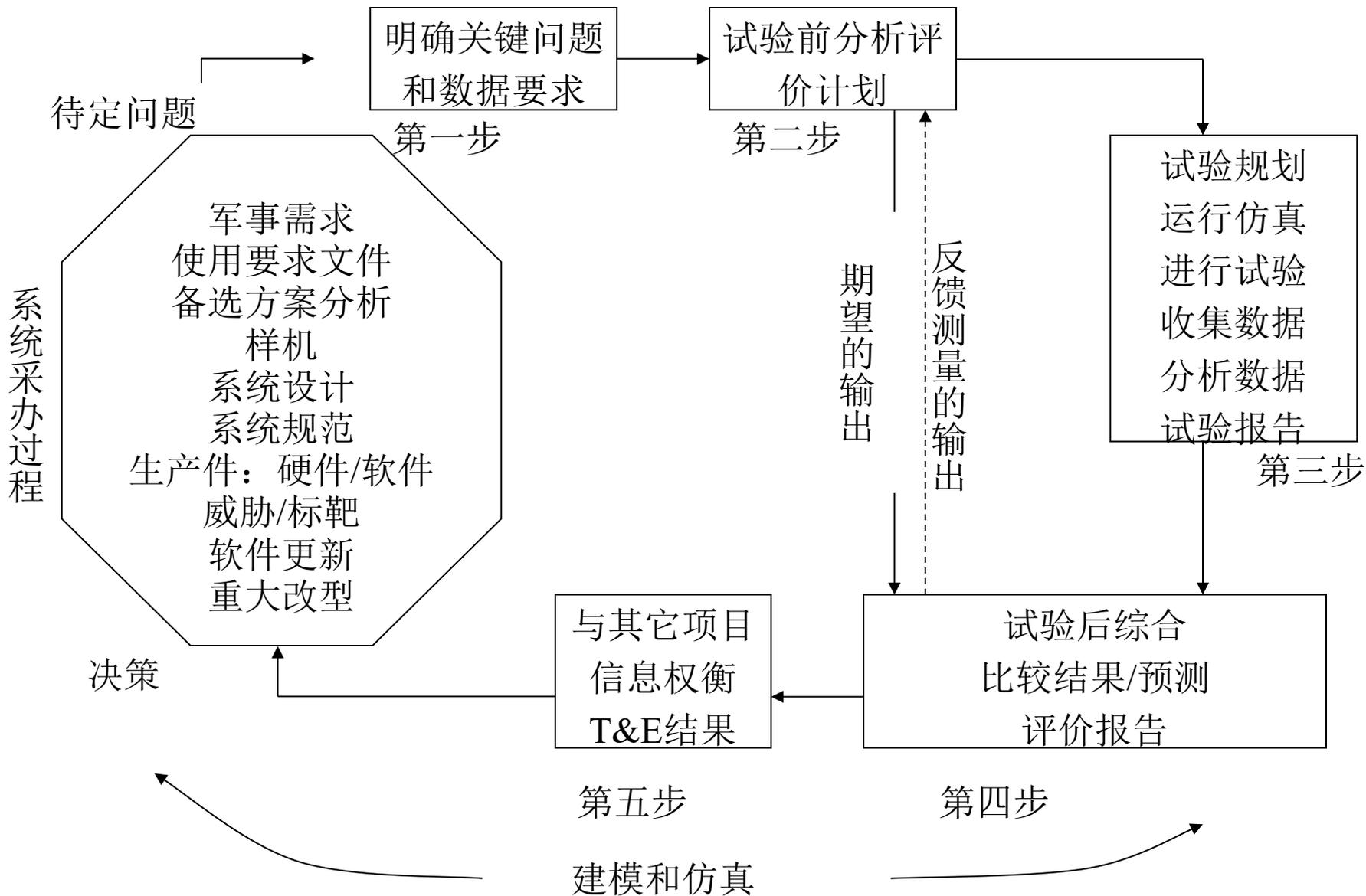
7.3 包装运输试验

包装试验（GB/T4857，GB6543，GB6544，QB/T1649）：
碰撞、跌落、倾斜、翻倒等。

具体各项试验项目的标准

谢谢!





可靠性萌芽：二战到20世纪50年代中期

可靠性源于二战时期，当时美军运到战场的电子设备有50%以上出现故障不能使用。二战结束后，以美国为首的西方国家开始重视收集有关电子产品的故障数据，并进行研究。同时航天技术的发展，促进了可靠性工程的发展。

围绕着电子产品的使用环境和要求，开展了一系列研究，提出了试验规范和要求。从而可靠性试验在军工产品研发中普遍开展，使产品的可靠性得到了很大的提高。



实施可靠性统计试验：

20世纪50年代后期—70年代中期

50年代后期美国国防部建立军用电子设备可靠性统计试验方法。美国军用电子设备可靠性咨询组（AGREE）于1957年发表了《军用电子设备可靠性》研究报告，提出了一套军用电子设备的可靠性试验方法，经过2年应用，国防部于1959年6月颁发、1962年9月更改的可靠性试验规范MIL-R-26667A“电子设备可靠性要求的通用规范”规定了可靠性验证试验要求；1963年美国国防部颁发了MIL-STD-781“可靠性试验（指数分布）”取代MIL-R-26667A，1965年进行了修改并颁发MIL-STD-781A“可靠性试验（指数分布）”，1967年又进一步进行大的修改，颁发了MIL-STD-781B，改名为“可靠性设计鉴定试验和验收试验（指数分布）”，规定了一组较完善的可靠性试验计划、试验程序及条件，在美国及世界上得到广泛应用。

实施可靠性统计试验：

20世纪50年代后期—70年代中期

美军在60年代研制的F-14A、F-15A、A-7A和C-5A等军用飞机的航空电子设备都按照MIL-STD-781B的要求进行可靠性验证试验，试验按照标准提供的试验统计方案及有关参数，如生产方风险 α 、使用方风险 β 、MTBF检验上限 θ 、MTBF检验下限 θ_1 、鉴别比 d 等确定的试验时间与合同规定的模拟实际使用环境条件进行。

案例：F-15战斗机的可靠性统计试验



重视综合环境试验

20世纪70年代后期—80年代中期

70年代中后期到80年代中期，美英等国航空装备重视综合环境试验、可靠性工程试验，包括可靠性增长试验与环境应力筛选，而且把测试性作为维修性的组成部分进行试验验证。

由于许多航空电子设备在外场使用中获得的MTBF与在实验室里按照MIL-STD-781B进行试验所获得的MTBF相差较大，高达数倍。美国国防部于1977年颁发MIL-STD-781C“可靠性设计鉴定试验与产品可靠性验收（指数分布）”，该标准中规定了采用更加符合产品实际工作条件的综合环境试验条件，即温度、振动和湿度三综合的环境试验条件。

同年，美国国防部还颁发了MIL-STD-2068“可靠性研制试验”，1978年又颁发了MIL-STD-1635“可靠性增长试验”，鼓励承包商通过可靠性研制试验与增长试验来提高产品的设计可靠性，以保证顺利通过可靠性鉴定试验。

重视综合环境试验

20世纪70年代后期—80年代中期

MIL-STD-1635还指出“如果产品在交付前全部达到要求的可靠性，成功的可靠性增长试验可能取消可靠性鉴定试验”。

环境应力筛选是剔除航空电子设备早期失效的元器件，发现制造和工艺缺陷最经济有效的手段。这种技术先用于民用航空电子设备，后来越来越广泛地用于军用航空电子设备。1979年美国海军颁发了第一个环境应力筛选指导性文件NAVMA P 9492“海军制造筛选大纲”，随着美国国防部、三军等部门相继颁发了10个有关电子产品环境应力筛选的标准、手册及指南，以指导和管理电子产品环境应力筛选工作，在美国掀起环境应力筛选热潮，几乎所有的军用航空电子设备都有在元器件、组件和设备级进行环境应力筛选。例如，美国海军的F/A-18战斗机的火控雷达要求的集成电路、混合电路、印制电路板和某些设备都要100%进行环境应力筛选。

重视综合环境试验

20世纪70年代后期—80年代中期

80年代初美国国防部修订了MIL-STD-781C，并于1986年颁发MIL-STD-781D改名为“工程研制、鉴定和生产的可靠性试验”。该标准是一个满足系统和设备整个研制和生产阶段需要的试验标准，包括了系统和设备的可靠性研制和增长试验、可靠性设计鉴定试验、可靠性生产验收试验和环境应力筛选等，并且适用于指数分布与非指数分布的系统和设备。美国在70年代中期以来新研制和改型的航空装备F-117、F-16C/D、F-15C/D、E等战斗机的航空电子设备等都强调采用可靠性研制与增长试验和环境应力筛选，保证了这些飞机的可靠性水平有了显著提高。

案例：F/A-18战斗机的RMS试验与评价



注重可靠性强化试验、综合系统试验、仿真：

20世纪80年代后期—至今

➤ 可靠性强化试验

随着经济全球化和市场竞争加剧，要求缩短新产品研制周期，节省研制费用，尽快使新产品投入市场；在军用产品研制过程中，对高可靠性产品的可靠性试验无论从费用上还是时间上都是一个严重的挑战。因此，1988年美国Hobbs工程公司的G.K.Hobbs博士提出了一种有利于缩短产品研制周期，缩短试验时间并节省研制费用的新型可靠性试验技术——可靠性强化试验（RET），包括高加速寿命试验（HALT）和高加速应力筛选（HASS），可靠性强化试验通常在较多的产品层次（组件）上进行。

注重可靠性强化试验、综合系统试验、仿真：

20世纪80年代后期—至今

➤ 可靠性强化试验

高加速寿命试验通过对产品施加一系列单向应力（如三轴向、六自由度随机振动、快速温度循环、电应力）和组合应力，并逐步提高应力强度直到产品发生失效。在试验过程中，对在每一应力等级上产生的失效都要进行分析，在采取改进措施和验证后，再将应力提高到更高一级，如此连续不断进行，直到现有技术无能力排除故障为止。在产品研制过程中，HALT与HASS是一介整体，只有完成了HALT的产品，才允许进行HASS。

注重可靠性强化试验、综合系统试验、仿真：

20世纪80年代后期—至今

➤ 可靠性强化试验

高加速应力筛选（HASS）是在高加速寿命试验（HALT）的基础上发展起来的不同于常规环境应力筛选的新技术，它通常定义为一种使用比产品正常工作时所承受到的应力（产品设计规范中规定的最高应力）高得多的应力进行应力筛选。其应力可以是环境应力，也可以是工作负载造成的应力，或者是两者的综合。它要求应力能够激发在正常使用时会暴露出来的缺陷，并使之变成可检测到的故障加以排除，使经筛选的产品剩余疲劳寿命远高于正常使用条件下工作所要求的疲劳寿命，具有很高的安全余量。与ESS相比，HASS能更快、更经济有效地删除产品中的潜在缺陷，而使产品具有更高的使用可靠性和使用寿命。

注重可靠性强化试验、综合系统试验、仿真： 20世纪80年代后期—至今

➤ 可靠性强化试验

九十年代以来，HALT和HASS美国等工业发达国家得到广泛应用，特别是用于各种电路板试验，它们的用途也是很广泛的。例如，F-22战斗机和波音-777运输机等的航空电子组件（模块）采用了比规定应力大10倍的加速应力进行可靠性强化试验，大大地提高这些航空电子组件的可靠性水平。

据美国加洲Vista控制设备公司的市场部主任介绍，该公司一直对电路板进行HLAT和HASS，大部分的HASS是作为环境应力筛选的一部分进行的。HALT因费用可能很昂贵而在有限的产品上进行，在进行HALT过程中，经常将产品试验到破坏后结束，当HALT达到某一极限后，便产生HASS的试验剖面。HALT通常要在几个星期内通过增加环境和工作应力的试验来模拟产品在整个寿命期的工作。HASS包括振动、冲击和温度极值的大部分试验过程。

注重可靠性强化试验、综合系统试验、仿真：

20世纪80年代后期—至今

➤ 可靠性强化试验

Vista控制公司还利用HALT来确定产品的平均故障间隔时间（MTBF）。当设计师想真实了解一个产品是如何发生故障的，HALT是一种正确的选择。它是任务关键产品与寿命关键产品的理想试验方法。

Dy4公司也对该公司产品进行HALT，作为一种设计完整性试验。该公司市场部主任认为：HALT对确定产品寿命期的可靠性是无用的，但确实可大致了解产品的设计余量，使设计师能够对具体环境条件正确选择零部件。

在产品进行HALT和HASS试验之前，Dy4公司的工程师们对这些产品进行了长时间的试验，包括调试（debug）和诸如施加电压和温度的功能试验。HALT完成后，把HALT结果转换成HASS和ESS。

加拿大通用动力公司通常是在高可靠性的军用产品上进行HALT和HASS。该公司的商务经理认为，HALT对确定产品的环境范围是很有用的，他们也是通过进行HALT获得数据后再转换成HASS的试验剖面。一个公司进行HALT和HASS的数量主要取决于具体产品的特性和用户的要求。

注重可靠性强化试验、综合系统试验、仿真：

20世纪80年代后期—至今

➤ 可靠性强化试验

上述过程也可以分为两个阶段，随着并行工程（性能、可靠性和费用、研制周期）发展：把产品问题解决在部件级；技术储备。

第一阶段 90年代：发展了试验技术，试验主要用于产品的研制阶段；

第二阶段从21世纪开始至今：美国国防部采购指令提出了新的要求：第一把关键部件研发和重大技术问题放在在产品研制立项前完成；第二在产品研制过程中，主要解决整机状态的可靠性试验问题和仿真系统，比如在产品研制中，把研制试验与使用试验并行或组合，提前解决整机试验中的问题，利用仿真系统对试验与评价提供支持。

注重可靠性强化试验、综合系统试验、仿真：

20世纪80年代后期—至今

➤ 综合系统试验

从21世纪开始，美国越来越重视整机可靠性试验。整机系统的复杂结构和多系统性，决定了系统与部件级的高可靠性试验不能替代整机的可靠性试验。另外，一些重复试验，也导致费用的增加。

- ✓ 温度场变化
- ✓ 整机结构的多自由度系统
- ✓ 电磁兼容
- ✓ 阳光、淋雨、腐蚀等

（那个阶段试验问题就是那个阶段的产品问题，涉及反攻和引发以前的问题少。）

案例：军民用飞机

注重可靠性强化试验、综合系统试验、仿真：

20世纪80年代后期—至今

➤ 仿真与虚拟试验

(1) 仿真试验

美军最新颁发的防务采办条例DoDD5000.1“防务采办系统”规定：试验与评价应与建模与仿真活动结合进行，以有助于了解和评估技术成熟度和互用性，便于与野战部队综合，并能根据文件规定的能力需求和在系统威胁评估中描述的敌方能力来确定系统性能。

仿真系统的建立，尤其对维修和保障提供数据。

注重可靠性强化试验、综合系统试验、仿真：

20世纪80年代后期—至今

➤ 仿真与虚拟试验

(1) 仿真试验

特别是美国防务采办改革以来，建模与仿真技术在可靠性、维修性和保障性（RMS）领域的应用也越发广泛。在制定航空装备的RMS要求过程中，建模与仿真是决定满足用户需求所必需的RMS水平和范围的一种有效的技术；利用建模与仿真技术还可以确定费用、进度与性能的要求，以及RMS在满足寿命周期费用条件下的优化组合参数；在RMS设计中，通过建模了解产品中各零部件、组件、设备和软件与整个产品的关系，并通过仿真来验证这种关系的正确性，分析产品可靠性设计的薄弱环节，改进设计、提高产品的可靠性。

注重可靠性强化试验、综合系统试验、仿真：

20世纪80年代后期—至今

➤ 仿真与虚拟试验

(1) 仿真试验

此外，建模与仿真技术也广泛用于航空装备的保障性分析，确定可靠性、维修性及各种保障资源对装备战备完好性及作战效能的影响，评价装备各种备件及维修人力要求，装备保障的人力和后勤计划等。美英等国在80年代就运用CAD建模与仿真技术对F/A-18、F-16、F-22和EF-2000等第三代和第四代战斗机进行可靠性、维修性、可用性和保障性分析与评价。此外，功能可靠性仿真将系统可靠性与性能在统一的环境和统一的模型下进行分析，有效地解决航空装备缺少数据的问题。

注重可靠性强化试验、综合系统试验、仿真：

20世纪80年代后期—至今

➤ 仿真与虚拟试验

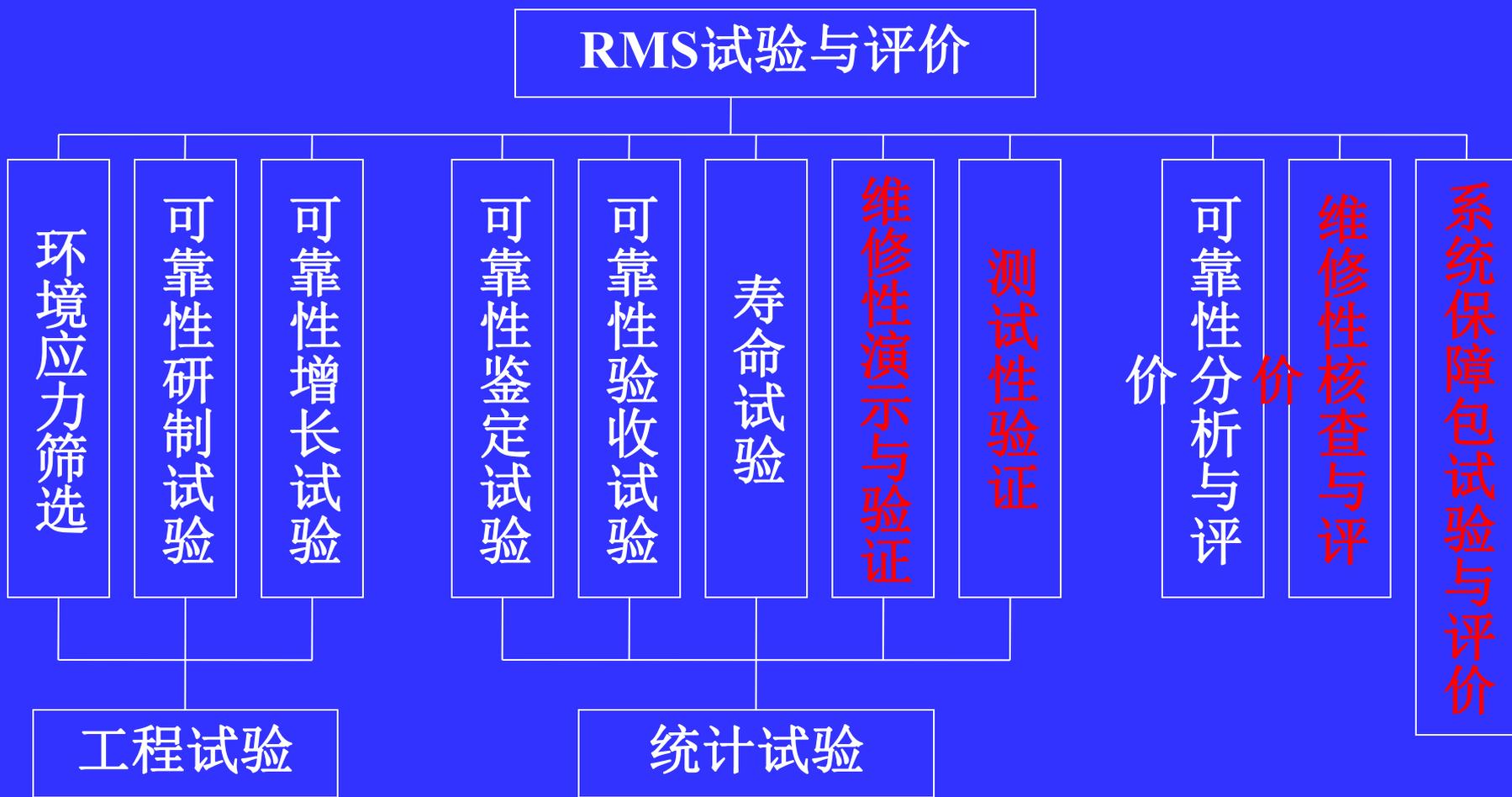
(2) 虚拟试验与评价

虚拟试验与评价技术是以虚拟现实技术为基础，以产品的RMS为对象的设计分析与评价手段。国外广泛采用的技术是虚拟维修性设计与评价技术，借助这一手段，设计人员可以通过多种传感器与多维信息环境进行自然地交互，从定性和定量综合集成环境中得到对产品维修性设计的全面认识，从而帮助维修性设计人员深入了解设计中存在的各种问题，提出创新的设计思路。虚拟维修性设计与评价主要由生成虚拟环境的计算机、虚拟现实中常用的交互设备（头盔式显示器、数据手套、定位器、立体眼镜等）以及产品电子样机数据、基于产品数据管理的产品维修性信息模型、人体数据与动力学模型、常用工具和专用工具数据等组成。这种设计手段可以使维修性设计与评价工作在并行环境中完成，从而大大地缩短维修性设计与评价的周期。

案例：军民用飞机



可靠性试验与评价分类 (GJB450A)



实验室试验与现场试验的优缺点分析

	优点	缺点
实验室试验	<ol style="list-style-type: none">1. 可测得产品的固有可靠性;2. 试验(故障)可以再现;3. 试验条件可以控制, 试验结果具有可比性;4. 数据收集和分析较方便。	<ol style="list-style-type: none">1. 不能完全模拟现场使用的真实条件;2. 试验费用高;3. 受试品数量少。
现场试验	<ol style="list-style-type: none">1. 可获得产品的使用可靠性;2. 真实的使用条件(包括环境条件、工作条件、使用维护条件);3. 可结合其他试验进行, 费用较低;4. 样本量(包括受试品数量和故障信息)相对较多;	<ol style="list-style-type: none">1. 数据收集和分析较困难, 数据准确性和完整性较差;2. 不能严格控制试验条件, 随机性大;3. 试验(故障)再现的可能性较低;4. 组织管理工作复杂。



对温度循环和随机振动敏感的缺陷

缺陷类型	环境应力		缺陷类型	环境应力	
	温度循环	随机振动		温度循环	随机振动
参数漂移	√		相邻元件短路		√
印刷电路板开、短路	√	√	相邻电路板接触	√	√
布线连接不当	√	√	虚焊或焊接不良	√	√
元件装配不当	√	√	元件松脱	√	√
错用元件	√	√	冷焊接点缺陷		√
密封失效	√	√	硬件松脱		√
元件污染	√	√	有缺陷低劣元件		√
多余物		√	紧固件松脱		√
导线擦破			连接器不配对		√
导线夹断			元器件断腿		√
导线松			接触不良		√



环境应力筛选程序图

初始性能检测	环境应力筛选		最后性能检测
<p>随机振动5min</p>	<p>缺陷剔除 随机振动 温度循环</p>	<p>无故障检验 温度循环 随机振动</p>	<p>在80h中应有40h无故障</p> <p>随机振动5-15min</p>
	<p>在80h中应有40h无故障</p> <p>40h 温度循环</p> <p>80h 温度循环</p>		
	<p>最大限度地监测功能</p>		<p>在15分钟中应有5分钟无故障</p>

环境应力筛选实施程序

(1) 筛选前的准备工作：性能全面检测

(2) 缺陷剔除阶段：

- ▼ 施加随机振动：5分钟，不带减震器，通电工作，如有故障修复
- ▼ 施加温度循环：40小时，通电工作，有故障产品无法通电应立即中断、修复，不计该循环。

(3) 故障检验运行阶段

- ▼ 施加温度循环：80小时，通电工作，保证40小时连续无故障。
- ▼ 施加随机振动：最多15分钟，不带减震器，通电工作，保证5分钟连续无故障

(4) 最后性能检测：检测结果与初始测量值比较做出评价



环境模拟试验

早在40年代美国就对产品的设计开始采用单因素环境的研制试验与鉴定试验，以检验设计的质量与可靠性。至70年代发展到采用综合环境可靠性试验(CERT)和任务剖面试验。为检验工艺则采用不带设计余度的验收试验。

随着环境模拟试验技术的发展与成熟，各政府部门及军兵种相继颁布了一系列的国标、军标，以严格的法规形式来保证产品的质量和可靠性，其中最有代表性的如环境模拟试验军标MIL-STD-810，可靠性试验军标MIL-STD-781和空间飞行器试验军标MIL-STD-1540以及它们的修订版，具体产品型号则根据这些标准与型号的特点制订详细的试验大纲。长期以来环境模拟试验便成为保障产品可靠性主要手段。

环境模拟试验

该技术的特点是：模拟真实环境，加上设计裕度，确保试验过关。因此，环境模拟的真实程度和设计裕度的大小便成为两个关键的因素，要提高可靠性就必须对环境进行更精确的模拟和加大设计裕度，但这样一来便使难度增大，周期拖长和增大成本。

这种方法的不足之处是对设计和工艺缺陷未作专门处理，只分别通过鉴定试验与验收试验解决，因此潜在缺陷残留量仍不少，随时都可能在外场使用时出现故障，可靠性的增长靠自然反馈缓慢地实现，这时木已成舟，留给设计修改的时间与空间都极其有限，从而使市场竞争的优势大为降低。



环境应力激发试验

激发试验(Stimulation)与模拟试验(Simulation)的思路相反，它是用人造的施加环境应力的方法，快速激出并清除产品的潜在缺陷来达到提高可靠性的目的，因此试验时不仅不求获得通过，反而求激出潜在缺陷越多越好，这一思路虽早为人知，但发展却比模拟试验慢得多。

早在50年代的老化试验便是激发试验的最初形式，所加应力有高温、温度循环和温度冲击等，至70年代后发展成当今广义的环境应力筛选。由于试验的目的是激发、清除缺陷，故所加应力不必模拟真实环境，只要激发的效率越高越好，这样一来试验就简单多了，根据经验至今公认为最基本最有效的应力是高温变率的温度循环和宽带随机振动。

环境应力激发试验

这里着重指出的是自从1979年美国海军颁布了海军生产筛选大纲NAVMAT P-9492后收到了惊人的效果，产品可靠性获得上倍的提高，1982年美国环境科学学会又颁发了指导性文件《电子产品环境应力筛选指南》使应力筛选进入了一个蓬勃发展的时期。在此期间发表了大量的文献，其中有人也试图用“军标”的形式来加速这一技术的发展，但这种尝试是错误的也是极其有害的，极易把问题搞混淆，重新把问题拉回到“模拟”的轨道，把“激发缺陷”又变成“试验通过”。因为“获得通过”有时是由于筛选方案不当或应力量级太小所致，而产品的可靠性并未获得真正的提高，故应力筛选只能用“指南”的形式执行，不同的缺陷类型和不同的失效机理必须使用不同的筛选方案而无统一的标准可言。

要强调的另一点是当今的应力筛选方法都是在设计无缺陷的前提下针对生产过程的缺陷的，实际上设计缺陷除用鉴定试验外并无其他专门的方法检测和清除，因此专门研究设计缺陷的排除以提高产品的可靠性仍有很大的潜力可挖。

