



中华人民共和国航天行业标准

QJ 3138—2001

FL0111

航天产品环境应力筛选指南

Guideline of environmental stress screening for aerospace products

2001—11—15发布

2002—02—01实施

国防科学技术工业委员会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 一般要求 2

4.1 环境应力筛选的目的、应用与效益 2

4.2 环境应力筛选大纲 5

4.3 受筛选产品 5

4.4 通用检测仪表 5

4.5 筛选设备要求 5

4.6 受筛选产品性能监测 6

4.7 环境应力筛选条件允差 6

4.8 ESS 信息收集、分析与记录 6

4.9 故障处理 6

5 详细要求 7

5.1 环境应力筛选方法 7

5.2 航天器和运载器的环境应力筛选 17

附录 A（资料性附录）常规 ESS 原理/定量 ESS 的数学模型/航天 ESS 标准的发展 35

附录 B（资料性附录）×××导弹系统环境应力筛选技术条件及要求 40

附录 C（资料性附录）×××运载器电子产品环境应力筛选的条件及要求 42

附录 D（资料性附录）若干航天系统产品环境应力筛选技术条件及要求的综述 46

前 言

《航天产品环境应力筛选指南》是贯彻GJB 450《装备研制与生产的可靠性通用大纲》、QJ 1408A《航天产品可靠性保证要求》、GJB 1032《电子产品环境应力筛选方法》和GJB/Z 34《电子设备环境应力筛选指南》等通用的要求与方法标准的指导性技术文件。为航天型号工程管理和技术人员编制和实施航天产品环境应力筛选大纲提供指导。

本指导性技术文件的附录 A、附录 B、附录 C、附录 D 为资料性附录。

本指导性技术文件由中国航天科技集团公司提出。

本指导性技术文件由中国航天标准化研究所归口。

本指导性技术文件起草单位：中国航天标准化研究所。

本指导性技术文件主要起草人：宋文治、施修明、伍平洋。

航天产品环境应力筛选指南

1 范围

本指导性技术文件提供了航天产品环境应力筛选的一般技术要求和原则,并提供相应的实施方法及应用示例。

本指导性技术文件中的相关要求与技术内容适用于导弹和航天系统电子产品,为编制受筛产品的环境应力筛选大纲提供指导。其它类型产品可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本指导性技术文件的引用而成为本指导性技术文件的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包含勘误的内容)或修订版均不适用于本指导性技术文件,然而,鼓励根据本指导性技术文件达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于指导性技术文件。

GJB 451 可靠性维修性术语

GJB 841 故障报告、分析和纠正措施系统

GJB 899—1990 可靠性鉴定和验收试验

GJB 1032 电子产品环境应力筛选方法

GJB/Z 34 电子设备环境应力筛选指南

MIL—STD—1540C (1994) 运载器、上面级飞行器、航天器试验要求

MIL—STD—2164A (1996) 电子产品环境应力筛选指南

3 术语和定义

GJB 451、GJB 1032、GJB/Z 34 确立的以及下列术语和定义适用于本指导性技术文件。

3.1

部件 subassembly

部件是包含两个或更多个元器件(零件)的单元,它们可以被拆开或更换元器件(零件)。例如:装有元器件(零件)的印制电路板,齿轮组等。

3.2

组件 unit

组件是具有某种功能的产品,从制造、维修或记录的目的来看可视为一个完整及独立的整体,又称为单元。例如:液压作动筒、阀门、蓄电池、发射机等。

3.3

分系统 subsystem

分系统是许多功能上相关组件的组合,它由两个或更多个组件组成并可能包括电缆或管道之类的连接件,以及安装这些组件的支承结构。例如:电源、姿控、遥测、热控和推进分系统。

3.4

运载器 launch vehicle

运载器由正样飞行器的一个或多个下面级组成，它能将上面级及航天器发射上天，通常是进入一亚地球轨道轨迹。在发射阶段用来保护航天器，或者还包括上面级在内的整流罩，常被认为是运载器的一部分。

3.5

上面级飞行器 upper-stage vehicle

是正样飞行器的一级或多级，能将被运载的送入亚地球轨道的一个或多个航天器推入轨道。

3.6

航天器 space vehicle

航天器是由一整套分系统及组件组成，它能支持某项空间运行任务。一个航天器可以是轨道飞行器或其主要部分，或者是连接在运载器或上面级上执行任务的一个有效载荷。使用可回收运载器或上面级的型号所特有的空中保障设备被认为是航天器的一部分。

3.7

载人航天器 manned spacecraft

载有航天员或其它成员的航天器。如载人飞船、空间站、航天飞机等。

3.8

系统 system

系统是能够执行或支持一项工作任务的设备、技术人员及技术的组合。一个系统包括为运行它所需的所有工作设备、有关设施、材料、软件、辅助装置及所需操作人员。一个系统通常由系统计划办公室或负责对它进行采办的部门来定义。

3.9

发射系统 launch system

发射系统是能将一个或多个航天器发射入轨的设备、技术人员及技术的组合。它包括正样飞行器及有关设施、地面设备、材料、软件、程序、辅助装置及所需操作人员。

3.10

在轨系统 on-orbit system

在轨系统是为使航天器在轨道运行所需的设备、技术人员及技术的组合。它包括航天器、指令与控制网络、有关设施、地面设备、材料、软件、程序、辅助装置以及所需操作人员。

3.11

正样飞行器 flight vehicle

是用于飞行的发射系统各部分的组合，即运载器，上面级及将要送入轨道的航天器。

3.12

导弹武器系统 missile weapon system

导弹及其配套技术装备、设施的总称。

4 一般要求

4.1 环境应力筛选的目的、应用与效益

4.1.1 环境应力筛选的目的

环境应力筛选是向产品施加适当的环境应力（主要是热循环应力及随机振动应力）和电应力激励，暴露其存在的制造工艺和元器件等缺陷，并加以剔除的一道工序，它是一种经济有效地保障硬件无制造缺陷和元器件缺陷的工艺，而不是一般意义上的试验（其原理参见附录 A 中的 A.1）。当然，对某些设计不够成熟的产品或可靠性增长试验不充分的情况，它也可作为早期发现设计隐患提高产品可靠性的手段。

4.1.2 环境应力筛选应用范围和管理效益

4.1.2.1 环境应力筛选应用范围

环境应力筛选主要适用于电子产品，包括电子组件、单机和系统。原则上，亦可用于电气、光电、机电或电化学产品。

根据 GJB 1032 的规定，它可用于海、陆、空等六类军事装备，也适用于机载、舰载等战术导弹，以及有批量的战略导弹。对于运载火箭、卫星等无批量的产品，按 MIL-STD-1540C，环境应力筛选亦适用，只是具体筛选应力类型和量级有差异，如需增加热真空循环等，而且筛选对象除电子产品外，还有阀门等多项非电子产品，详见 5.2。

环境应力筛选主要用于产品的批生产阶段，批生产产品出厂前，一般应 100% 地进行环境应力筛选，至少应在元器件级以上的最低组装级或根据工程实际规定的最佳组装级的产品上逐个进行环境应力筛选，以消除早期故障，其在产品寿命各阶段的应用如表 1 所示。

表 1 环境应力筛选在寿命期各阶段的应用

环境 应 力 筛 选	研 制 阶 段	初 样	可靠性增长试验的预处理
		正（试）样	可靠性鉴定试验前预处理
	生 产 阶 段		各组装级的筛选以消除工艺和元器件缺陷
			可靠性验收试验前的预处理
	使 用 阶 段		故障修复件、备件消除早期故障

a) 研制阶段：

在产品研制早期，即初样阶段，环境应力筛选是可靠性增长试验的一种预处理工艺（见 GJB 899—1990 中 4.6 的规定）。在可靠性鉴定试验以前，亦应对受试产品进行环境应力筛选，以消除早期故障以提高鉴定试验效率和试验结果的准确性。

在研制阶段，利用环境应力筛选还可尽早地提供产品设计故障信息。这些故障信息和筛选结果也为制订产品生产阶段的可靠性筛选大纲提供帮助。

b) 生产阶段：

批生产产品交付验收之前，应 100% 地进行环境应力筛选，至少应在的最低组装级或根据 ESS 最佳效费比确定的组装级按筛选大纲要求进行，以消除早期工艺和元器件故障。

c) 使用阶段：

故障产品在修复后，也要进行环境应力筛选，以消除更换件和维修操作可能引入的故障。

4.1.2.2 环境应力筛选的管理效益

- a) 在产品研制阶段，通过 ESS 预先剔除产品中因工艺缺陷及元器件缺陷引起的故障（据统计 60% 故障可能是由工艺缺陷引起的，30% 故障可能是由元器件缺陷引起的），有助于提高可靠性增

长试验的效益、保证硬件性能和可靠性满足要求并为生产阶段的筛选做好准备；

- b) 在生产阶段，ESS 从最低组装级开始可以较低成本发现隐患并进行改进消除根源，减少高组装级的返修量及高昂费用使整个生产过程更为有效；管理者可用 ESS 为质量控制工具，及时发现和解决生产中的质量问题；
- c) 由于 ESS 使故障得以在生产步骤中产生，减少潜在缺陷被带到外场的可能性，降低了昂贵的外场维修费用，从而提高了外场可靠性，减少型号研制总费用；
- d) 交付硬件及备件均经过 ESS，使最初交付硬件满足可靠性和质量要求，同时使外场故障极少发生或极少采取维修措施，增加了用户对产品的置信度和满意度。

4.1.3 环境应力筛选与有关可靠性试验的关系

4.1.3.1 环境应力筛选与可靠性增长试验

环境应力筛选主要用于剔除生产过程中元器件和工艺缺陷，以保证产品的使用可靠性。而可靠性增长试验则是通过试验、分析和改进（TAAF）程序，发现并消除产品设计问题使产品的可靠性满足规定要求。

为了实现可靠性增长，要充分利用各种手段发现产品的设计问题。这些手段中包括常规的性能试验和检测、环境适应性试验、应力筛选和可靠性研制/增长试验等。而环境应力筛选和环境试验等一样，可在产品研制阶段早期，用于剔除产品潜在缺陷（包括设计缺陷），作为早期可靠性增长的有效手段。

此外，为了提高可靠性增长试验的效率，其参试产品必须先进行环境应力筛选，以排除工艺、元件等非设计隐患。

环境应力筛选与可靠性增长试验改善可靠性的模式不同，前者主要用于提高使用可靠性，后者则用于提高固有可靠性，二者的关系如图 1 所示。

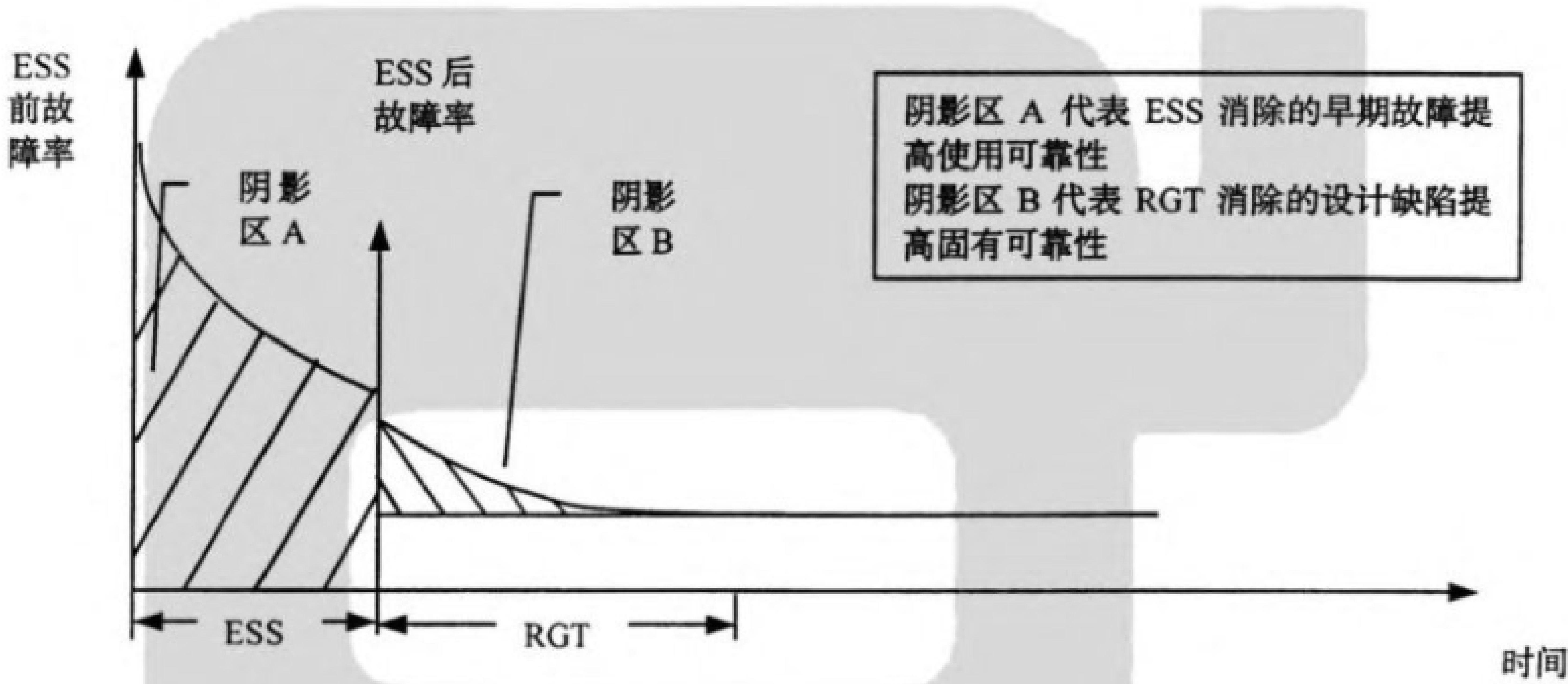


图 1 环境应力筛选与可靠性增长试验（RGT）关系的示意图

4.1.3.2 环境应力筛选与可靠性统计（鉴定和验收）试验

环境应力筛选是可靠性统计试验的预处理工艺。任何进行用于可靠性统计试验的样本必须经过环境应力筛选。只有通过环境应力筛选、消除了早期故障的样本，其统计试验的结果才代表其真实的可靠性水平。

4.1.3.3 环境应力筛选与传统批生产抽样验收试验

环境应力筛选方法要求批生产产品应 100% 地进行。而传统的批生产抽样验收是在抽样的基础上进行的。

4.2 环境应力筛选大纲

为了确保环境应力筛选有效地进行，达到预期的目的，必须根据研制进度、费用和保障条件等，事先拟定环境应力筛选大纲。该大纲的内容一般应包括：

- a) 受筛选产品；
- b) 受筛选产品的组装等级（组件/设备、分系统、系统）技术状态，尺寸、重量、复杂程度等；
- c) 筛选方法（应力的类型、量级、施加顺序，筛选条件允差，通/断电、检测及无故障的要求等）；
- d) 性能检测（筛选前、筛选期间及筛选后）项目，检测仪表及其精度要求；
- e) 筛选用设备（温循箱、振动台等）及其状态说明；
- f) 故障判据及中断处理；
- g) 筛选过程及故障记录要求；
- h) 纠正措施及实施效果的要求。

4.3 受筛选产品

受筛选产品的技术状态应与技术条件规定相一致，受筛选产品应具备产品要求的功能和性能，并具有检验合格证明。

4.4 通用检测仪表

所用仪表应满足下述要求：

- a) 应能实时地采集到所需的产品性能参数；
- b) 应可提供全部环境筛选条件的连续记录；
- c) 检测仪表准确度不应低于筛选条件允差的 1/3；
- d) 在环境筛选设备运行前，所有测量仪表应进行校准。

4.5 筛选设备要求

原则上，凡能产生规定环境应力的筛选设备均可用于环境应力筛选。

4.5.1 热循环筛选设备

可供使用的热循环筛选设备按制冷方式分有机~~械~~制冷和液氮制冷两种，前者控制精度高，但温度变化率受到制冷功率限制（一般 $5^{\circ}\text{C}/\text{min} \sim 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ）；后者控制精度较差，但温度变化率可达 $30^{\circ}\text{C}/\text{min} \sim 60^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ；前者控制精度高，但温度变化率受到制冷功率限制（一般 $5^{\circ}\text{C}/\text{min} \sim 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ）。对热循环筛选设备的主要要求如下：

- a) 应备有产品放置搁架，以利于被筛选产品充分暴露于筛选设备箱内空气中；
- b) 应有足够的工作温度范围及温变率；
- c) 箱中热源布置不要使辐射直接到达产品及传感器；
- d) 箱中气流应使温场均匀且有较高流速以利于产品与空气间的热交换；
- e) 应备有空气排湿能力的选件以防产品凝露。

4.5.2 随机振动筛选设备

常用的随机振动筛选设备主要是电动振动台。与之相比，气动激振器的谱形不易调节，且有 2000Hz 以上的高频分量，选用时要注意。

对随机振动筛选设备的主要要求如下：

- a) 要有大尺寸的工作台面以利于产品安装；
- b) 应具备有必要的夹具。夹具应在高达 2000Hz 的频率范围内没有或只有极小的夹具共振。对给定的夹具和设备组合应进行检验以确定共振或传递因子。在夹具校准时，需利用一动力学模拟件来代替实际受筛件，以避免在产品上累积应力循环。若使用真实产品，则需将振动输入限制在低量级范围；
- c) 应具有由一个或多个加速度计振动输入进行控制的能力。控制加速度计要安装在尽可能靠近夹具和产品的部位，或者夹具和支持结构的界面处；控制加速度计应该采用机械紧固件（螺钉或螺栓），而不要使用胶接；并应使加速度计的敏感轴向与激励方向平行。

4.6 受筛选产品性能监测

ESS 的总有效性取决于在环境应力施加之前、施加期间和施加之后对受筛选产品性能监测的完善程度。在环境应力施加之前，应对所有功能参数进行检测并尽可能地得到定量结果，这将成为一个参考基准，以备在其后的筛选的各个阶段中用于判断故障或是性能恶化程度。

4.7 环境应力筛选条件允差

4.7.1 热循环筛选条件允差

除必要支撑点外，被筛选件应完全被空气所包围。在被筛选件附近的温度梯度不超过每米 1℃，热循环设备箱内温度应在要求筛选温度的±2℃以内。

4.7.2 随机振动筛选条件允差

GJB 1032 规定的随机振动振动筛选条件允差见表 2。

表 2 GJB 1032 随机振动筛选条件允差

频率范围 Hz	分析带宽 Hz	允差 dB
20~200	25	±3
200~500	50	
500~1000		
1000~2000	100	±6
注：如有困难，在 500—1000Hz 频率范围内允差可放宽到 -6dB，但累计带宽不得超过 100Hz； 在 1000Hz—2000Hz 频率范围内允差可放宽到 -9dB，但累计带宽不得超过 300Hz。		

4.8 ESS 信息收集、分析与记录

应按 GJB 841 的规定，运用产品的故障报告、分析和纠正措施系统（FRACAS）去收集分析在 ESS 期间产生的所有故障数据并适时地记录纠正措施。该系统应包括全部受筛选件、受筛选件间的接口、测试仪器设备、筛选程序、筛选人员和操作规程。为了能尽可能全面地评价受选筛件在筛选条件下的性能，应记录所有相关的信息，以利于在进行筛选结果分析时，补充实时监测之不足。应保存受筛选件的筛选记录，通过信息累积用于关键参数的趋势分析。

在记录中还应包括筛选设备、输入电源功率、操作和程序错误等引起的问题以及对其所采取纠正措施与有效性验证情况备查。

4.9 故障处理

4.9.1 产品在缺陷剔除阶段出现的故障

若产品的故障出现在缺陷剔除阶段，即可立即进行修正，也可以延迟到筛选结束时再进行。然而，若该故障对监测产品的工作状态有不利影响，则应立即进行纠正。

4.9.2 在无缺陷筛选期间的故障

若在无缺陷筛选的前 40h 内出现故障，则应采取纠正措施；若在筛选已进行 40h 之后出现故障，则应结束筛选，并且在纠正措施有效实施之前，不能认为产品符合 ESS 要求而交付。

4.9.3 重新筛选

已出现过故障的产品的重新筛选应在适当的研究、分析和纠正措施实施并验证有效后再进行。

5 详细要求

5.1 环境应力筛选方法

5.1.1 筛选应力选择

5.1.1.1 应力类型的选择

据国内外已发表的 ESS 调查统计结果说明，在常用的 13 种环境应力中，热循环和随机振动是最有效的筛选应力，见图 2。

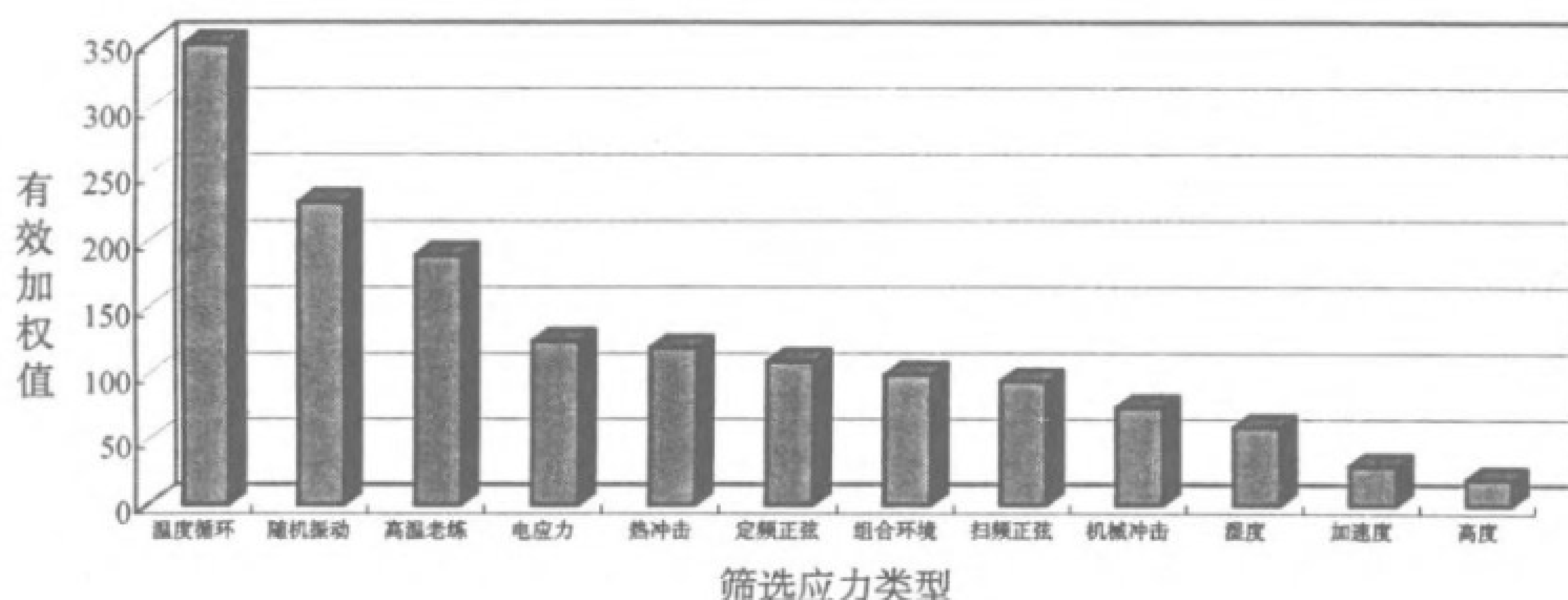


图 2 筛选应力类型

筛选应力激发出的主要故障模式如下：

a) 热循环：

- 1) 使涂层、材料或线头上各种微裂纹扩大；
- 2) 使粘结不好的接头松弛；
- 3) 使螺钉连接或铆接不当的接头松弛；
- 4) 材料热膨胀系数不同产生的变形和应力引起的故障；
- 5) 使机械张力不足的压配接头松弛；
- 6) 使质差的钎焊接触电阻加大或造成开路；
- 7) 使运动件及密封件故障。

b) 随机振动：

- 1) 结构部件、引线或元件接头产生疲劳，特别是导线上有微裂纹的情况下；

- 2) 电缆磨损;
- 3) 接头松驰;
- 4) 安装加工不当的集成电路片脱落;
- 5) 汇流条及连到电路板上的钎焊接头受到振动应力,引起钎接薄弱点故障;
- 6) 元器件及引线布置不良而造成损坏;
- 7) 已受损或安装不当的脆性绝缘材料出现裂纹。

从国内实践看,据各类型号在部分设备上的 ESS 经验,除上述热循环和随机振动应力之外,高温老练也是必要的,特别是在稳定性能方面可发挥较好的作用。从表 3 综述的筛选效果看,有些型号产品热循环效果较随机振动为好,而另外一些型号产品则相反。

表 3 部分航天型号设备 ESS 应力筛选效果比较

型 号	应力类型及筛选效果		
	热循环 (%)	随机振动 (%)	高温老炼 (%)
××中程导弹(控制)	0	100	/
××中程导弹(遥测)	79	21	/
××运载火箭	100	0	/
××地空导弹	52	28	10
××远程导弹	0	80	20

为描述不同应力的筛选效果,GJB/Z 34 给出了在试验研究的基础上得出的数学模型。该模型用筛选度 SS (Screening Strength) 作为衡量不同应力筛选效果的尺度。SS 是经应力筛选后筛出的缺陷数与筛前产品中存在的缺陷数之比值。详见附录 A 之 A.2。由该模型可以看出各个应力参数对筛选度的影响,它主要用于定量 ESS,亦可供常规 ESS 在选择应力参数时参考。

5.1.1.2 筛选应力量级的确定

筛选应力量级的确定主要有如下 4 种方法:常规、定量、步进和加速。其中,常规法是最常用的和最基本的方法,其他方法皆源于此,该法主要用于批量产品如战术导弹;定量方法是为了解决前法靠经验确定筛选应力的不足,依靠筛选应力的数学模型,试图依此精确地定量确定筛选应力,它适用于重要的批量产品;步进方法则是以递增的应力试验和故障分析为手段确定筛选应力的方法,该法所得到的结果最符合产品实际情况;加速方法通过步进应力试验得到产品的性能极限和破坏极限,然后将其降额用做筛选应力。该法概念较新,虽国外已用于批量生产的客机产品,但目前尚未形成标准。

5.1.2 常规筛选应力的确定方法

5.1.2.1 GJB 1032 常规筛选应力的确定方法

GJB 1032 给出的筛选应力与使用环境无关。一般所用的是强化应力,但不能超出产品设计的极限应力。

5.1.2.1.1 热循环特性参数及其应力的确定

- a) 温度范围的确定:
热循环中的温度极值决定了温度范围(高、低温之差),为提高筛选效率,筛选温度变化幅度应尽可能大。若对产品进行通电筛选,则筛选的温度限应取产品的设计极限工作温度;若筛选时产品不通电,则其温度限应取产品的设计贮存温度限。
- b) 温变率的确定:

温变率对筛选效率有重要影响。因为它可在受筛选产品中产生温度梯度并引起热应力，其量级随着温变率的增加而增加。

GJB 1032 所规定的温变率不小于 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，根据 MIL-HDBK-2164A 的规定，温变率要求已增加到不小于 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。注意这里的温变率是指箱内空气温度在温度范围内的平均变化率，而非产品本身的温变率，箱温由布置在箱内的温度传感器（3 个以上）的均值控制。由于受筛选产品本身的热惯性影响，产品实际温变率，尤其在产品内部，远低于 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。具体取决于受筛产品本身的热惯性，产品在箱内的安装状态和试验箱的性能（容积、功率、风速）等。特别是对试验箱的容积要求，原则上，它应为产品体积的 8~27 倍，即产品所占各边长为箱各边长的 $1/2$ 到 $1/3$ 。

c) 保持时间的确定：

该时间为温度达到稳定所需要时间（温度极值下的停留时间），具体由筛选前的热测定试验确定。GJB 1032 中规定：保持时间是产品（三个重要部位处）实测的温度均值与箱温之差 $\Delta T_s \leq 10^{\circ}\text{C}$ 所需的时间。测点不宜选在高热惯性部位，因为这样会使保持时间过长。

d) 热循环次数及总筛选时间的选择：

研究结果证明，产品早期故障随筛选热循环次数的增加而剧减（呈指数关系），仅需 8~10 次的热循环即可以高概率暴露并去除产品早期故障。故 GJB 1032 推荐的热循环筛选次数为 10 次，为检验筛选效果紧接着再做 10~20 次循环，总计 20~30 次。以每循环需 4h 计，则筛选总时间为 80h~120h。显然这不致对产品的疲劳寿命有重要影响。实际上，热循环次数还应与具体产品的复杂程度和元器件数量有关，热循环时间与产品质量大小有关。故制定具体产品筛选大纲时可据实情增删。

e) 产品通断电状态的确定：

筛选中是否通电和进行性能检测视具体情况而定，一般考虑以下因素：

通电在产品内部生热形成温度梯度，由这些热梯度导致的热应力/应变可以析出那些不通电筛选时会漏过的缺陷。故通电筛选在析出缺陷方面要比不通电筛选更有效。

通电并且进行监测的筛选可找出那些在不通电筛选时会漏过的故障（间歇故障）和在一般环境条件下测试时不会显示出来的故障。

从提高筛选效率出发，筛选中应尽量通电并进行性能检测。但要注意，一般情况下通电、监测的筛选比不通电筛选费用高。

从可行性和经济性出发，一般在高组装级（组件或系统级）进行通电和检测，低组装级（印制线路组件）不进行通电和检测，这是因为在低组装级往往不具备检测性能的条件，而专门设计和制造一个检测系统费用太大。因此，通电振动筛选最合适的组装等级是组件（黑盒子）级。因为此时最可能利用其本身的性能检测能力。

f) 无故障循环次数确定：

无故障循环应作为热循环筛选的一个组成部分，其作用是：

- 1) 作为筛选圆满程度的度量——若在规定的时间内或循环次数内产品没有出现故障，表明筛选已有效地完成；
- 2) 作为故障修理是否有效的度量——对于出现故障经采取措施修复的产品，也要进行规定的无故障筛选，以证明修理有效。

GJB 1032 规定（见该标准附录 C），在 40h~80h 的无故障检查时间内，要有至少 40h 不出故障，其工作量是相当可观的。为此当产品复杂程度较低且经费或进度有限制时，可适当减少无故障循环次数。根据型号 ESS 实施经验，一般取 2 个循环即可（美空军 R&M 2000 ESS 及陆军 AMC 702—25 ESS 标准亦如此），实际上 40~80h 的无故障检查时间是在假定产品通过 ESS 的概率 P_A 大于 90%、产品 $\theta_0=1h$ 、筛选时间 T_T =无故障检查时间 T_W 、剩余缺陷百分比为 1%、鉴别比=2 等条件下求得的，显然这样一些假设不可能适于所有的情况，假设的任何变动都会影响结果。由 GJB 1032 附录的表 C3 可见，在其他假定条件不变的情况下，若 $\theta_0=1/2$ ，则筛选时间 T_T 与无故障检查时间 T_W 均可减少到 20h。故可酌情进行剪裁。

5.1.2.1.2 随机振动筛选特性及其应力的确定

a) 振动频率范围：

考虑振动频率范围和量值时，重要的是要了解受筛产品的振动响应特性，这可通过响应特性试验完成。据国内外的调查结果，一个有效的筛选振动谱其频率范围应为 20Hz~2000Hz，这覆盖了大部分产品响应的频率范围。

b) 振动谱型及量级：

振动谱型见图 8，其量级一般在 $0.01g^2/Hz \sim 0.04g^2/Hz$ 间选择。具体应通过筛选条件摸底试验用步进应力法，并观察分析故障机理，最后确定。

但该谱在用于包含有光电和机电装置等对振动敏感的产品时应小心使用，此时应当设法根据产品振动响应特性确定振动应力条件，在敏感频率处可局部降低输入谱值，一般可用 $0.02g^2/Hz$ 代替 $0.04g^2/Hz$ 。

c) 振动轴向：

原则上，随机振动一般应在三个轴向进行，三向筛选在寻找缺陷方面最有效。但三向筛选工作量大，时间长。为经济起见，亦可选择单轴筛选或两轴依次筛选，一般在决定单轴或双轴激励轴向前，要进行振动调查，测量产品关键部位的响应，据以找出最有效轴向。

在两个或三个轴向同时激励产品的振动筛选可以满足激励主要响应轴的要求，同时还增加了旋转激励。很明显，其优点是可减少筛选和装卸时间。但这需要有专门的多轴振动台，如双轴电动振动台和三轴六自由度气动振动台。

d) 振动时间：

GJB 1032 推荐单轴振动筛选时间为 10min，双轴振动每轴 7.5min，三轴振动每轴 5min。

此外，由于一些筛选是在断电、不工作状态下进行的，在这些条件下，将无法找出间歇性等软故障。故按 GJB 1032 规定，允许在筛后利用低量级振动以便有较充分的时间进行故障复现工作，但筛选和寻找故障用的总振动时间不得超过 20min，以免消耗过多的疲劳寿命。低量级振动的等效时间 T_D 的计算公式如下：

$$T_D = 20 (0.04/\text{低量级振动的功率谱密度值})^3 \dots\dots\dots (1)$$

由上式可知利用低量级振动的等效时间大为延长，有利于故障寻找。

应该注意，标准所给定总振动时间不得超过 20min 要求是经验性的，而不是硬性规定。故亦可根据实情适当剪裁。

e) 产品通断电状态：

振动过程中一般应通电并进行性能检测，以及时发现故障和保证软故障不漏检，提高寻找故障

效率；但对不具备通电条件的产品，如某些电路板可不通电。

f) 无故障振动时间：

振动筛选在温循之后再行进行 10min，其间至少应有连续 5 min 无故障。

5.1.2.2 GJB/Z 34 定量筛选应力的确定方法

这是一种较科学的确定筛选应力的方法，即定量 ESS 方法，它可根据数学模型确定产品筛选应力。有关定量 ESS 数学模型的说明见附录 A 中的 A.2。但对使用者的要求高，需占有较充分的信息（产品使用的元器件类型、数量、所处环境、环境因子、等级及故障率等）且过程较繁，详见 GJB/Z 34。其具体步骤简述如下：

- a) 预计受筛产品中的引入缺陷数 D_{IN} ；
- b) 据要求的 MTBF 的倒数求得漏筛缺陷数 D_{OUT} ；
- c) 筛选检出度 $TS=1-(D_{OUT}/D_{IN})$ ；确定检测效率 DE ；筛选度 $SS=TS/DE$ ；
- d) 确定筛选应力类型；
- e) 分配各类筛选应力的百分比，一般假定输入缺陷有 24%是由随机振动筛出的，有 76%是由热循环筛出的，由此可知随机振动筛选度 $SS_{RV}=0.24\times SS$ ，热循环筛选度 $SS_{TC}=0.76\times SS$ ；
- f) 据罗姆可靠性研究中心应力强度模型选择适当的随机振动量级，使满足上述的 SS_{hv} 要求；与此相似，确定热循环应力量级。也可反过来做：
 - 1) 即已知 D_{IN} ；
 - 2) 选择筛选应力参数，由罗姆模型 SS ；
 - 3) 据检测仪表发现故障的能力，确定检测效率 DE ；
 - 4) 实际筛选检出度 TS 为 SS 与 DE 的乘积；
 - 5) 设 D_{IN} 有 24%是可由随机振动应力激发成故障的，记为 $D_{IN, RV}$ ；有 76%是可由热循环应力激发成故障的，记为 $D_{IN, TC}$ ；
 - 6) 未筛出（剩余）的缺陷数为 $D_{OUT}=[D_{IN, RV}(1-TS)]+[D_{IN, TC}(1-TS)]$ 。

5.1.2.3 步进筛选应力的确定方法

MIL-HDBK-2164A 中特别强调要用步进应力法来确定最有效的应力，并给出了步进应力方法的流程图，见图 4。该法从低到高给产品施加应力，监测产品性能，对出现的故障进行分析。对于相关故障，则可据此确定筛选应力量级。

国内早在 1987 年在 $\times\times$ 导弹型号弹上产品随机振动筛选条件摸底试验中就采用了步进应力方法。受筛产品共 17 台件，随机振动从 $0.01g^2/Hz$ 开始，以 $0.005g^2/Hz$ 为一步进级，逐级进行筛选。前几级无故障出现，从应力到达 $0.035g^2/Hz$ 时开始出现故障，在应力到达 $0.04g^2/Hz$ 时，在 17 台件出现 5 个故障。经设计/工艺人员分析均属不良工艺及元件引起的故障，而非过应力故障。鉴于该值恰与 GJB 1032 标准推荐值相一致，故以其做为正式筛选条件。

由于筛选后的产品还要经受真实发射和飞行产生的振动环境的作用，为确保并证明筛后产品仍有足够疲劳寿命，消除设计生产部门对 ESS 的疑虑，我们又设计另一验证试验，即将筛后产品进行一次鉴定级随机振动试验，结果未发现问题。说明筛后产品确有足够疲劳寿命。

示例：国外某战斗机电子对抗系统的定量筛选流程见图 3。



图3 国外某战斗机电子对抗系统的定量筛选流程

5.1.2.4 高加速应力筛选 (HASS) 的应力确定方法

该法由两部分组成。前一部分是高加速寿命试验 (HALT)。HALT 通常是应用一系列的单项或综合应力, 如多轴振动、热循环和产品功率循环 (超过预计的外场环境) 逐步增加其强度直到产品破坏。藉此我们可以:

- a) 发现并改进设计薄弱环节;
- b) 确定产品的极限能力。

后一部分是依上述极限应力确定 HASS 即 ESS 的应力量级, 参见图 5。

该法从应用于低组装级（如印刷电路板）开始。然后将 HALT 用于各较高组装级（单元至分系统，甚至系统）。对每一组装级均应确定 HALT 应力，因为它们的应力各不相同。典型系统所用的 HALT 应力见表 4。

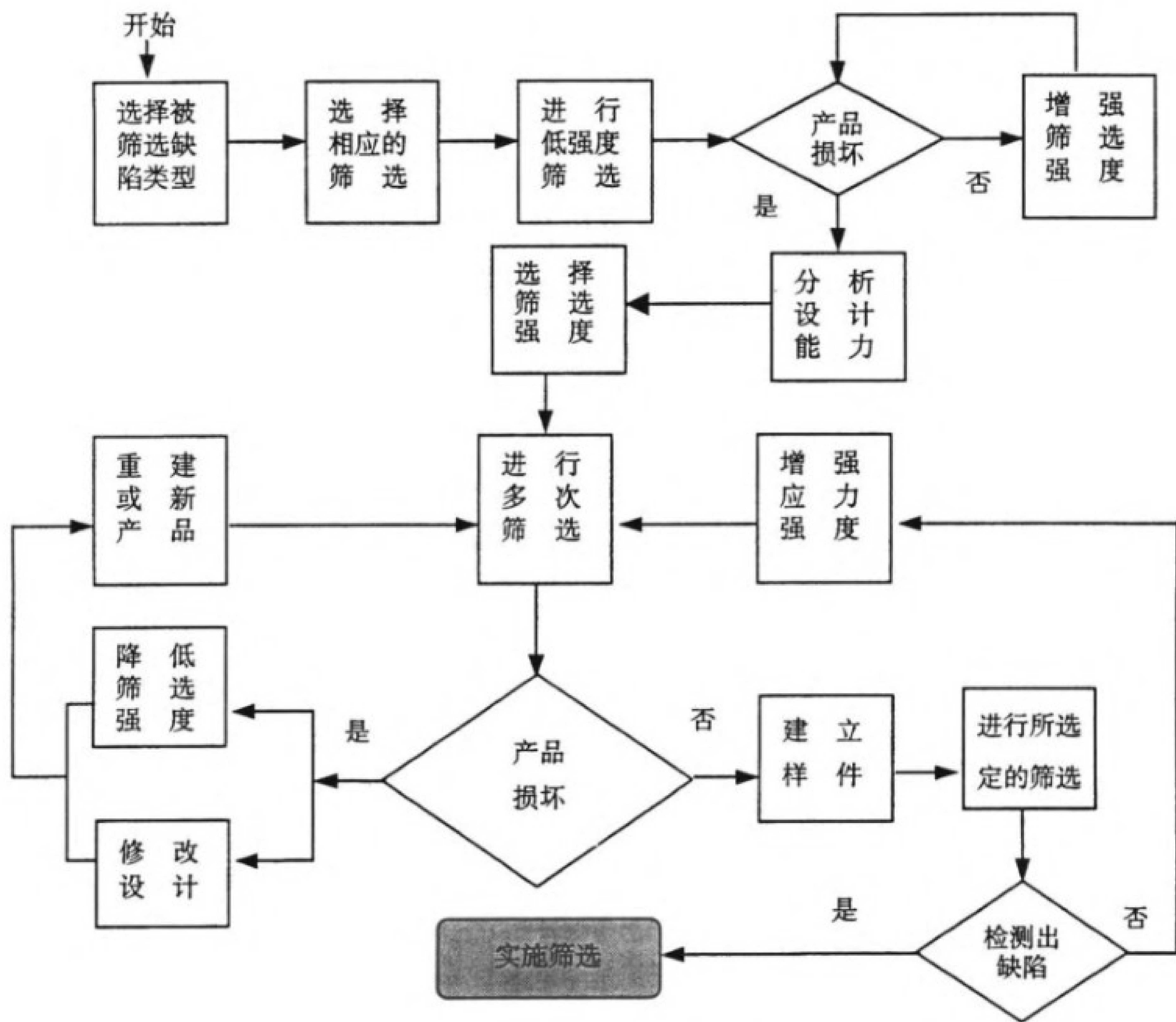
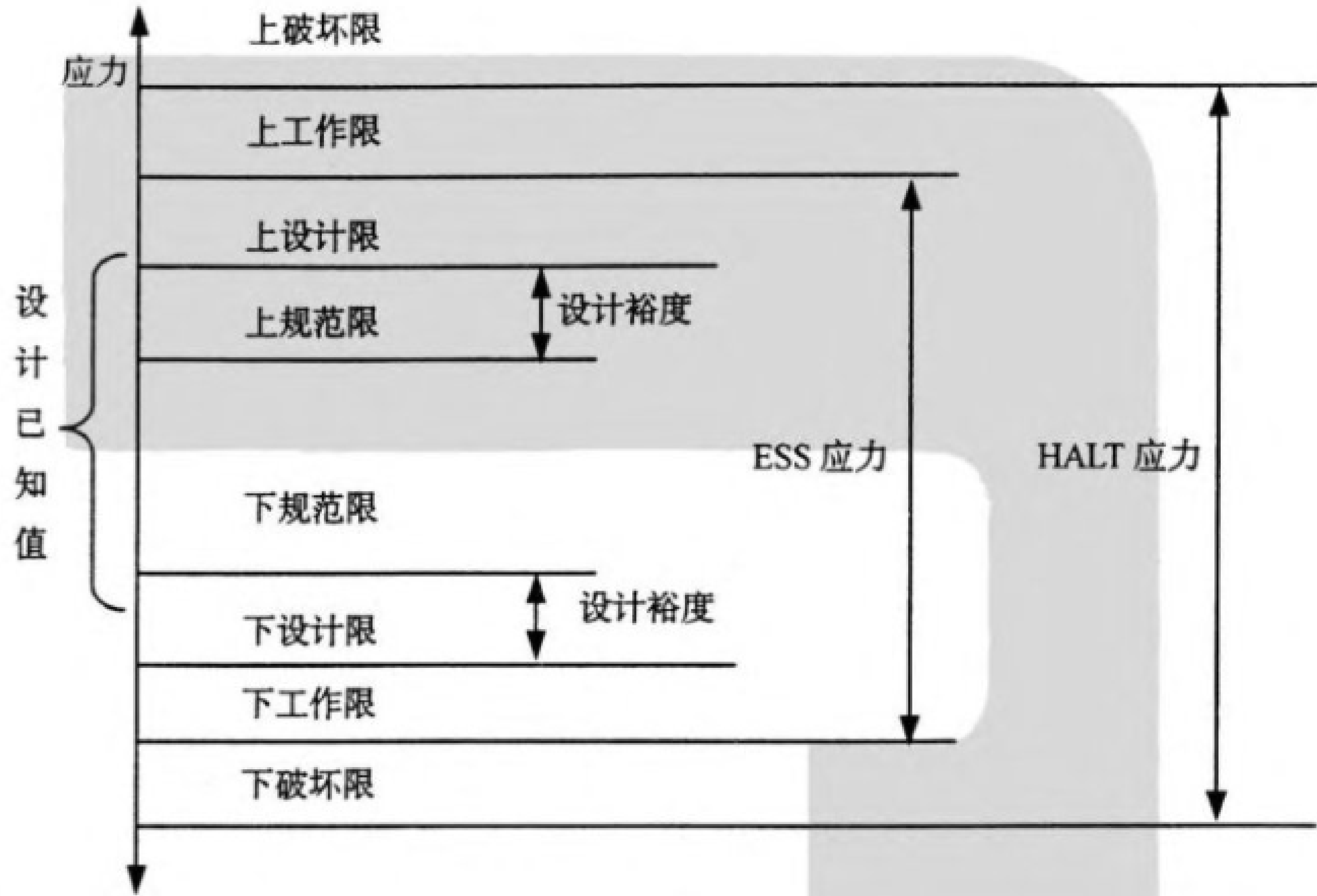


图 4 步进应力方法的流程图

表 4 国外某产品 HALT 所用的应力参数及作用效果

应力参数		所发现的问题
Vcc (偏压)		设计缺陷, 不良元件
时钟速度/频率偏置		设计缺陷, 不良元件
时钟对称性偏置		设计缺陷, 不良元件
功率保持/循环		无
温度	低温	设计余量不足
	高温	超载, 劣质元件
	高低温循环	焊接工艺缺陷
振动		焊接工艺问题



图中：规范限——为产品规定的工作应力限（使用环境）；

设计限——为产品设计应力限，在该限内产品可正常工作；

以上这两个应力限是已知的。

工作限——为产品实际工作应力限，在该限内产品可正常工作；

破坏限——为产品破坏应力限，在该限内产品仍可工作但性能已不正常；

以上这两个应力限是未知的；它们必须由 HALT 试验确定。

ESS 应力限——为产品筛选应力条件，它应取在工作应力限之内，一般要大于设计应力限，以提高筛选检出度。

图 5 ESS 应力与 HALT 应力限之间的关系

在设计 HALT 时首先应该根据产品的故障机理考虑可能采用的应力类型及参数。由表 5 可见 HALT 法中所用筛选应力类型的多样性。然后在 HALT 期间进行修正，确定某些应力应该添加，另一些应力可能要取消，有可能要加以综合。HALT 是一个迭代的反馈过程，通过试验—修正—再试验过程来增删应力，最后通过步进法逐步增加应力直到破坏，从而可给出这些应力的上/下破坏限和上/下工作限。据工作限应力可确定 ESS 的应力量级（取在工作限之下或稍高于工作限），参见图 5。

应用示例：某产品温度规范限为 50℃和-20℃。通过 HALT 试验结果发现，其工作限为 70℃和-40℃，破坏限为 110℃和-60℃，故可取 65℃和-35℃作为热循环应力筛选的温度范围。

5.1.3 产品组装等级（层次）的选择

为了保证彻底消除早期故障，应在各个组装等级安排环境应力筛选，任何一级上的筛选不能代替高一级上进行的筛选，这是因为在将低组装等级的各产品组装成高一级产品时，由于使用了外购件及组装工艺，会引入新的缺陷。但是随着组装等级的提高，其筛选检出度将降低，而筛选成本亦会随着提高。

图 6 为一个典型的制造过程。该图说明了在各组装级的制造过程中，由于使用了外购的线路板、部件、组件，并进行布线和装焊操作，都有引入新的缺陷的机会，证明了在各组装等级都进行筛选的必要性。

尽管有必要在各组装等级进行筛选，但在每一组装等级都进行筛选往往是不够现实的。因为组装级越高其筛选成本越高。在技术和经济有限、无法逐级进行筛选时，在制订 ESS 大纲时，应根据各组装等级上预期会出现的缺陷类型、各组装等级上的 ESS 条件及其费用、技术风险等因素找出最佳筛选组装等级，在筛选成本与可靠性效益间进行权衡。一个较为经济的方法是对组件进行热循环不通电筛选，对组件以上则进行随机振动通电筛选。目前航天各型号实际应用的产品组装级多为印制电路板及组件（整机）两级。

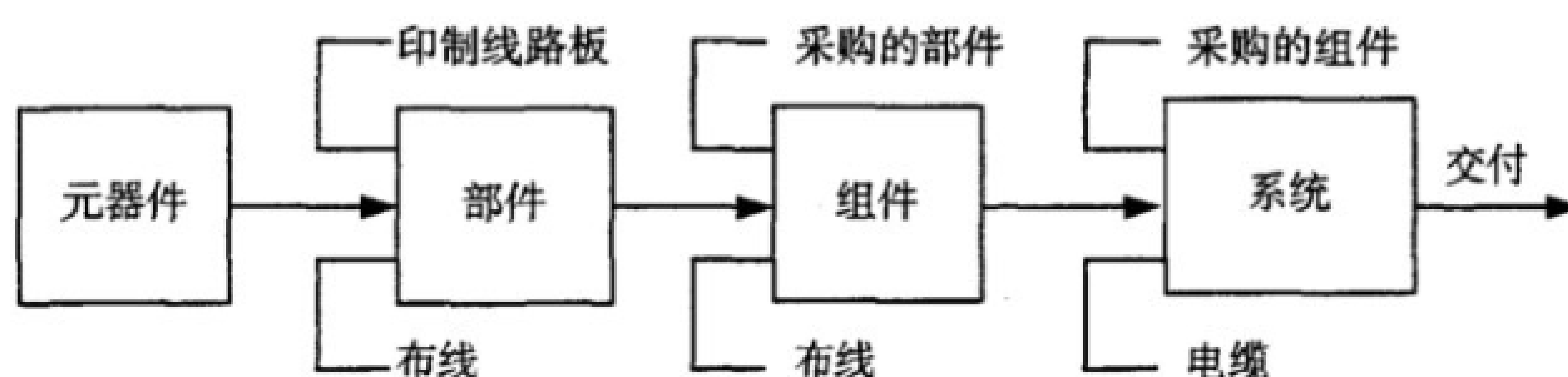


图6 产品典型的制造过程

5.1.4 筛选的实施及故障处理

本条以 GJB 1032 中规定的筛选为基础，说明典型的环境应力筛选实施的全过程，图 7 是 GJB 1032 中的环境应力筛选组成图。环境应力筛选由初始性能检测、缺陷剔除、无故障检验和最后性能检测 4 部分组成，其中第 2 部分最重要，在该部分要通过施加环境应力使缺陷以故障形式暴露出来；而第 3 部分的任务是通过无故障检查确定筛选的效果。本条结合该图说明环境应力筛选的实施步骤。

5.1.4.1 筛选前的准备工作及性能检测

筛选前应按规定检查受筛产品的技术状态、筛选用设备、夹具和检测仪表等是否符合要求。

对受筛产品进行全面的性能检测并作好记录。

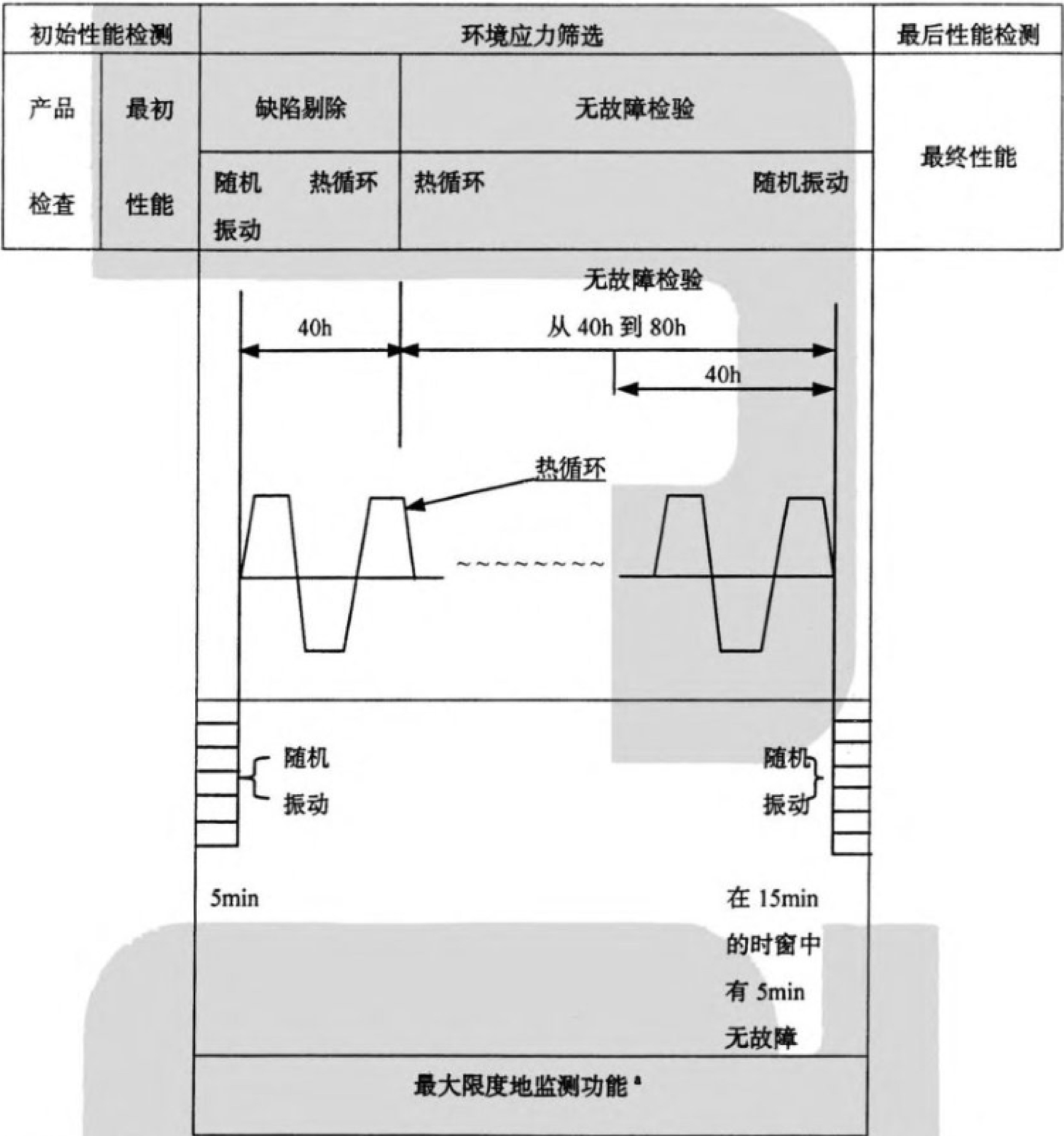
5.1.4.2 剔除缺陷阶段

5.1.4.2.1 随机振动

- 安装—将受筛产品刚性安装在振动台上，也就是说，若产品实际使用中带减震器，在筛选时应去除减震器以保证能把筛选应力直接施给产品；
- 筛选—施加振动应力，此时产品通电工作，并监测其功能，检查有否故障出现；
- 故障处理—对振动期间出现的故障，可到筛选结束时，加以修复。当不加振动无法确定故障部位时，可用低量级随机振动寻找故障部位。

5.1.4.2.2 热循环

- 安装—将受筛产品安装于温度箱中，并测量性能；
- 进行热循环—按大纲中规定的热循环曲线进行热循环，产品通电工作并监测其功能，注意有无出现故障；
- 故障处理—热循环期间受筛产品出现故障，而且出现此故障后必须切断电源或会影响监测受筛产品性能时，应立即中断循环，规定进行故障调查并加以修复，修复部分进行局部检验合格后从该循环的开始点继续进行循环，但出现故障的该循环无效；若虽出现故障但仍可在升温、保温阶段通电，则可将故障调查和修复过程推迟到该循环结束时进行，此时该循环有效。



^a 在无缺陷检验中，最后的四次热循环和整个随机振动期间，应充分地进行功能监测。在环境筛选期间，在监测参数充分的条件下，则最后性能检测一般不应算做无缺陷要求的一部分，但是如果发现故障，则需重新进行无故障检验。

图 7 环境应力筛选的组成

5.1.4.3 无故障检验阶段

5.1.4.3.1 热循环

继续进行热循环，热循环参数不变，但应从此刻记录无故障循环数。若从第 11 循环开始连续 10 个循环不再出故障，则认为完成无故障运行，可转到下一步。若在第 11 循环~20 循环间还出故障，则尚允许修复，只要以后有 10 个循环能连续无故障，仍可认为完成无故障运行，转下一步。若在最后的 10 个循环中还出故障，则认为受筛产品筛选不通过，并按 4.8 所规定的方法处理。

5.1.4.3.2 随机振动

只有通过了热循环筛选的产品才转入这一步。按规定的输入量值使产品振动，并使产品通电工作，

监测其性能，注意有否故障。若连续振动 5min 不出现故障，则可认为产品通过了随机振动筛选，可转入下一步。若在振动后的累计 10min 之内还出现故障，尚可修复，修复后有连续 5min 不出故障，可认为产品通过筛选。若振动 10min 后还出故障，则认为产品筛选不通过。

5.1.4.4 最终工作性能检查

只有通过了热循环和振动筛选的产品才转入这一步。未通过的产品应进行仔细分析，以决定是否价值或有必要继续进行筛选。

使通过无故障筛选的受筛产品在规定的标准环境条件下运行并接受筛产品规范中的规定检测其性能，记录结果。以验证受筛产品能否满意地工作。

将最终运行测量值与初始测量值进行比较，根据受筛产品规定的极限验收值对筛选作出评价。

最终运行试验期间若出现故障，只要施加环境应力期间性能检测项目足够，则可认为无故障筛选是有效的，不必重新进行无故障筛选。若认为施加环境应力期间性能检测项目不足，不能发现全部故障，则应重新进行无故障筛选。对所有的故障均应作出记录，记录内容包括：故障现象、故障时刻的环境应力条件以及采取的改正措施，以供分析和编写报告使用。记录的故障应纳入 FRACAS 系统。

5.1.5 筛选实施的动态管理及优化

- a) 有效的环境应力筛选的实施及优化应是一个动态的闭环过程，开始可根据具体产品特性按标准剪裁所获得的 ESS 大纲执行；
- b) 实施一段后，通过连续监视 ESS 的结果分析判断，对原始大纲加以控制，以保证筛选始终有较高的效费比。对 ESS 进行有效管理的结果，可能取消在某些组装级上的筛选，或根据能否暴露出缺陷来修改应力类型或水平；或根据出现某新缺陷的迹象增加某种筛选。

要想实施一个动态的环境应力筛选大纲，必须加强对筛选的管理，管理者应考虑的因素及采取的措施如表 5 所示。

表 5 环境应力筛选管理考虑事项

考虑因素	采取的措施
制造过程	计划和评价
制造人员	资格考试、技术培训
缺陷类型和数量	连续分析评估
筛选费用	计算确定并纳入型号预算
改正措施	保证对制造过程有正影响
用户的故障数据反馈	保证数据质量

5.1.6 筛选的经济分析及效费比

对筛选应进行付出成本及所得效益的分析，以确定所设计的筛选方案是否有足够高的效费比。每一种结构类型的产品，应有其特定的筛选大纲，严格说来，不存在一个通用的、对所有产品都具有最佳效果的筛选大纲。这是因为不同结构响应是不同的。因此不应盲目引用筛选标准或指南，而是应根据具体产品的情况对标准或指南进行剪裁以形成产品的 ESS 大纲。

5.2 航天器和运载器的环境应力筛选

原则上，5.1 所述的 ESS 的方法和指南对运载器及航天器亦是适用的，但是由于它们确实有别于武器系统的特点（特别是极小批量和特殊的空间环境），故 ESS 在航天器（载人或不载人）及其运载器上

的应用，有许多独特的方法和要求。

5.2.1 航天器和运载器的特点

- a) 任务重要，可靠性要求高；
- b) 批量甚小，甚至单件；
- c) 造价昂贵；
环境恶劣且特殊，如运载火箭的点火、跨音速、分离环境；卫星的热循环、真空及辐照等空间轨道环境；
- e) 长寿命，如通讯卫星要长达十数年；
- f) 结构复杂，包含大量的非电部件，如陀螺、星载像机等。

5.2.2 航天系统产品环境应力筛选的特点

针对航天系统产品的特殊性，为了保证产品在使用寿命期内能可靠地工作，在型号的不同研制阶段如模样、初样、正样和使用等阶段，根据型号任务重要性、可接受风险、技术的成熟程度来规定该型号在研制过程中要进行什么样的试验。按照试验性质的不同，通常将试验分成如表 6 中所示的 5 类。

表 6 航天系统产品的试验类别与项目

序 号	试 验 类 别	试 验 项 目
A	研制	工程特性，验证鉴定，验收程序有效性
B	鉴定	飞行器级，分系统级，组件级
C	验收（ESS）	飞行器级，分系统级，组件级
D	试飞和原型飞行鉴定	飞行器级，分系统级，组件级
E	发射前合格认证	综合系统，初始运行

表 6 中 C 类试验是把环境应力筛选作为主要手段。而它与一般电子电气和武器系统所规定的环境应力筛选有许多不同之处。归纳起来有如下几方面：

- a) 航天系统产品所施加的筛选应力是和环境验收试验结合在一起考虑而不是单独进行的。所施加的应力部分与环境验收试验一致，即模拟使用应力，而有的部分采用的是激励应力，它不完全模拟实际环境，而是为激发隐患而使用的应力，如热循环和随机振动等。
- b) 要进行筛选的产品包括部（组）件级、分系统和系统级，对筛选重点放在低组装级；对环境重点放在高组装级。
- c) 受筛选产品包括电子产品和机电、机/光/电产品、机械、活动部件等。除火工装置、发动机应特殊考虑外，凡是上天飞行的产品（包含备份产品），百分之百的都要进行筛选。
- d) 采用的筛选应力不限于温度循环和随机振动，还有热真空和噪声等。
- e) 振动筛选谱型和量级不是固定的而是和产品工作环境有关。筛选应力量级基本上是采用产品在整个寿命期内可能要承受的实际应力量级，但也有最低限的限制。振动加载轴向分别沿产品三个相互垂直轴向依次进行。航天产品的筛选量级较高，而时间较短（1min）。
- f) 关于组件级产品热循环时间和温度变化范围：
 - 1) 热循环时间：
一般电子电气和武器系统产品要求前 40h 为缺陷消除。后 40h 为无故障检验的时间。而航天系统产品一般要求热循环（包括热真空）累计时间要达到 200h~300h，而最后 100h 应

为无故障循环时间。

2) 热循环的温度变化范围:

对一般电子电气和武器系统的产品要求试验箱的空气温度 $-54^{\circ}\text{C}\sim 61^{\circ}\text{C}$ 范围内变化;而航天系统产品的温度变化范围是随产品工作环境而异的,同时温度标定点是选在被筛产品的非电源处的壳体底板上。一般是产品环境适应性试验的验收级的温度变化范围。

g) 关于组件级产品热循环在温度变化的极端温度限上停留时间:

一般电子电气和武器系统的产品,是指当试验箱内空气温度达到规定值的时刻开始,直到在产品内部安装的温度测点有 $2/3$ 的测点达到与箱内规定温度相差 10°C 范围内时为止所持续的总时间。有的系统规定一般保持时间在 2h 左右。

而对航天系统产品则是规定在被筛产品壳体上温度测点达到规定值后,待产品冷透或热透(在 30min 内测点温度变化 $\leq 3^{\circ}\text{C/h}$)后才开始计时,其持续时间是模拟在轨连续工作时间,一般不少于 4h 。

h) 关于温度变化率:

一般电子电气产品要求试验箱内空气温度要大于等于 10°C/min ,而航天系统产品要求壳体底板非热源处温变率只要求大于或等于 $3^{\circ}\text{C/min}\sim 5^{\circ}\text{C/min}$ (以前只要求大于等于 2°C/min)。

i) 关于试验箱内温度测控点:

对于一般电子电气组件温度循环的热测定是试验箱内空气温度和产品要开盖在内部安装若干测温点作为温度转换控制点;对不能开盖安装测温点的产品,则以测定试验箱内空气温度作为温度控制点。而航天系统产品一般是不允许开盖做试验的,不在产品内部装温度测点,温度控制点是选在被试产品非热源的底板上。

j) 航天系统产品因为在进行 ESS(验收试验)前都应经过鉴定级或准鉴定级的试验,由于鉴定级和验收级筛选技术条件已有一定的安全余量,故航天系统产品的验收试验的筛选技术条件不存在超过产品设计能力的问题。

5.2.3 运载器/航天器受筛产品的分类

运载器/航天器受筛产品主要可分为以下三类:

- a) 电工电子产品——这类产品与常规 ESS 做法相近,筛选应力以热循环和随机振动为主,并给出了实际使用环境应力与最低筛选应力要求,两者取其大者用做筛选条件,参见 5.2.5;
- b) 阀门、蓄电池、太阳帆板、助推器等机械、机电、光电部件类,这类产品的筛选应力与方法各不相同,取决于其故障机理,用实际使用环境应力做为筛选条件,亦见 5.2.5;
- c) 发动机组件——在本指导性技术文件中不涉及固体及液体火箭发动机自身的验收,但涉及固体及液体火箭发动机的组件的验收试验。国内一般只进行抽样验收。若能确定发动机的验收试验点火试验环境及持续时间,可满足组件验收试验的目的,则可进行组件级验收试验。否则不宜单独试验组件,而应该用点火试验代替。

5.2.4 武器系统 ESS 和运载器/航天器电子产品 ESS 的比较

对电子产品,运载器/航天器 ESS,也像武器系统 ESS 一样,其主要筛选应力仍是热循环和振动,两者异同的比较见表 7。由表 7 可见,对于电子产品来讲,两者 ESS 基本一致。不同之处是,对航天 ESS 还有 200h 高温老炼要求,但是并不单独列为一项,而是由热循环和热真空筛选中累积,即在其中高温保持时间之和至少为 200h 。若该要求不能满足,则需在热循环或热真空循环时,延长高温保持时

间以补足附加的热运行要求。附加热运行时间，使高温保持时间之和 $\geq 200\text{h}$ （这比 MIL—STD—1540C 的要求缩短了 100h）。其中最后 100h 的运行应是无故障的。

表 7 武器系统和运载器/航天器电子产品常规 ESS 的比较

项 目		类 型	
		常规 ESS	航 天 ESS
筛选标准	国军标/行业标准	GJB—1032	GJB 待制订/QJ 本标准
	美军标	MIL—STD—2164	MIL—STD—1540C、D 第七章
筛选目的		消除工艺及元器件隐患	消除工艺及元器件隐患
筛选阶段		批生产	产品验收
筛选对象		电子产品，100%	电子产品等，100%
筛选应力		随机振动，热循环	随机振动，热循环、热真空、声振等
		完全不模拟工作环境	大部分模拟工作环境
筛选级别		电路板组件为主，单元，分系统，系统	组件，分系统，系统
热循环	温度范围	$-40^{\circ}\text{C}\sim 65^{\circ}\text{C}$	$-44^{\circ}\text{C}\sim 61^{\circ}\text{C}$
	温变率	$5^{\circ}\text{C} / \text{min}$	$3^{\circ}\text{C} / \text{min}\sim 5^{\circ}\text{C} / \text{min}$
	次数	10 次	12.5 次（总时间不小于 200h）
	循环时间	每个循环 $\geq 4\text{h}$	除了第一个循环和最后一个循环 $\geq 12\text{h}$ 之外，每个循环 $\geq 2\text{h}$
	无故障检查	在 40h $\sim$ 80h 的无故障检查中，要求有连续 40h 无故障	上述 12.5 次热循环中的最后 100h 无故障
随机振动	频率范围	20Hz $\sim$ 2000Hz	20Hz $\sim$ 2000Hz
	振动量级	20Hz $\sim$ 80Hz 3dB/OCT 80Hz $\sim$ 350Hz 0.04 g^2/Hz 350Hz $\sim$ 2000Hz -3dB/OCT	20Hz $\sim$ 150Hz 3dB/OCT 150Hz $\sim$ 600Hz 0.04 g^2/Hz 600Hz $\sim$ 2000Hz -6dB/OCT （质量小于 23kg）
	振动轴向	3 向	3 向
	振动时间	每向 5min	每向 1min
	产品状态	去除减振器	去除减振器
	无故障检查	在 10min 的无故障检查中，要求有连续 5min 无故障	

有关国内外航天 ESS 标准发展情况的说明见附录 A 中 A.3。

图 8 给出了常规和航天（质量小于 23kg）最低量级 ESS 的随机振动筛选应力的比较。由该图可见，两者的应力量级是基本一致的，只是航天的 ESS 谱的高频成份较多。这可能是考虑到航天器的电子组件比较紧凑，固有频率较高之故。

图 9 给出了两种 ESS 的热循环筛选应力的比较。该图可见，航天 ESS 的第一个循环和最后一个循环（未示出）的保持时间中的通电工作时为 6h，其余各循环的保持时间中通电工作时间为 1h。该图中，第一个循环和最后一个循环（未示出）的保持时间较长是为了测量筛选前后产品性能；其余各循环的保持时间中通电工作时间为 1h，较常规 ESS 的缩短了一半，其原因可能是考虑到航天产品体积小，易于

热透之故。

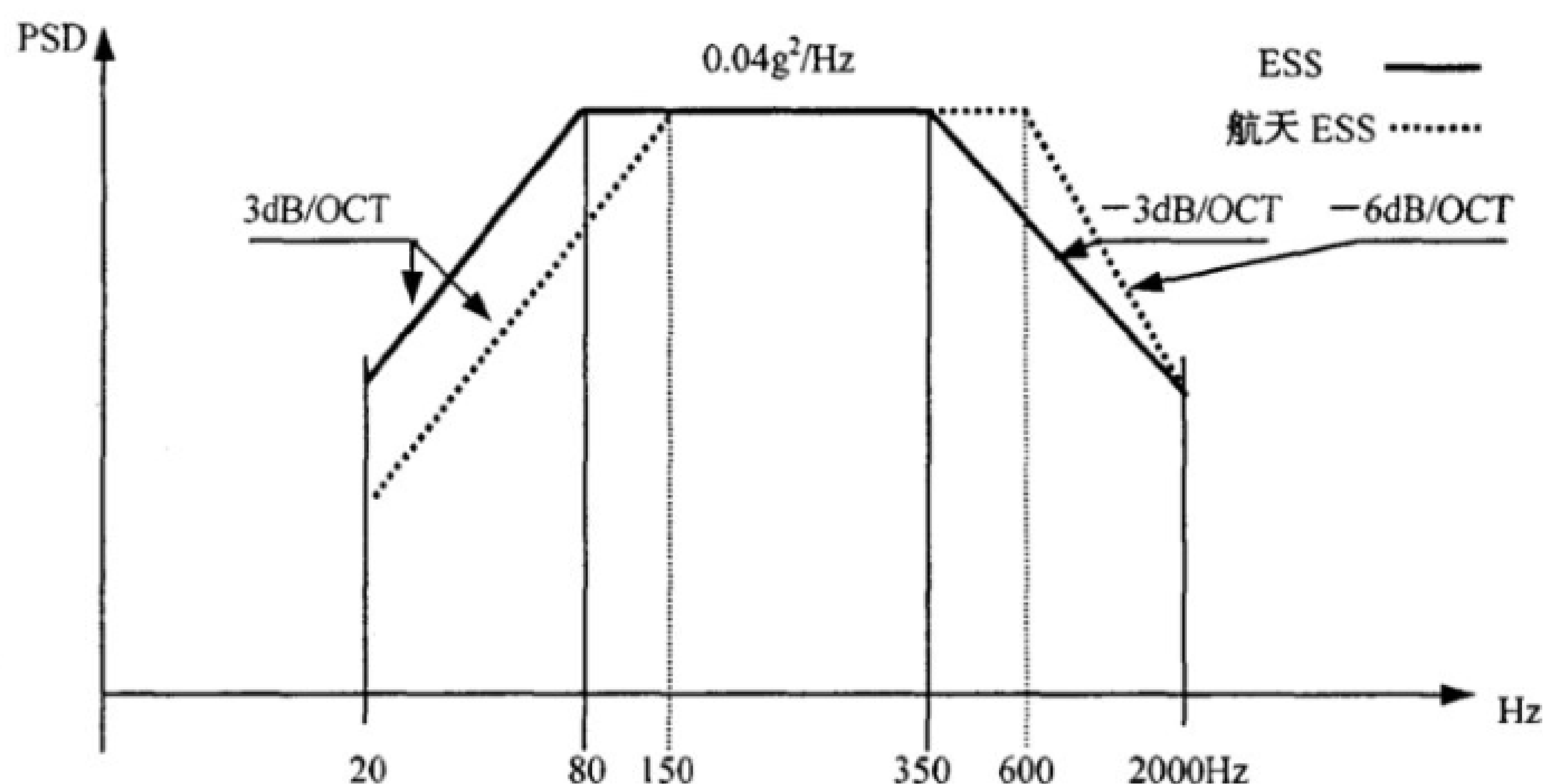


图8 常规 ESS 与航天 ESS 的随机振动筛选应力比较

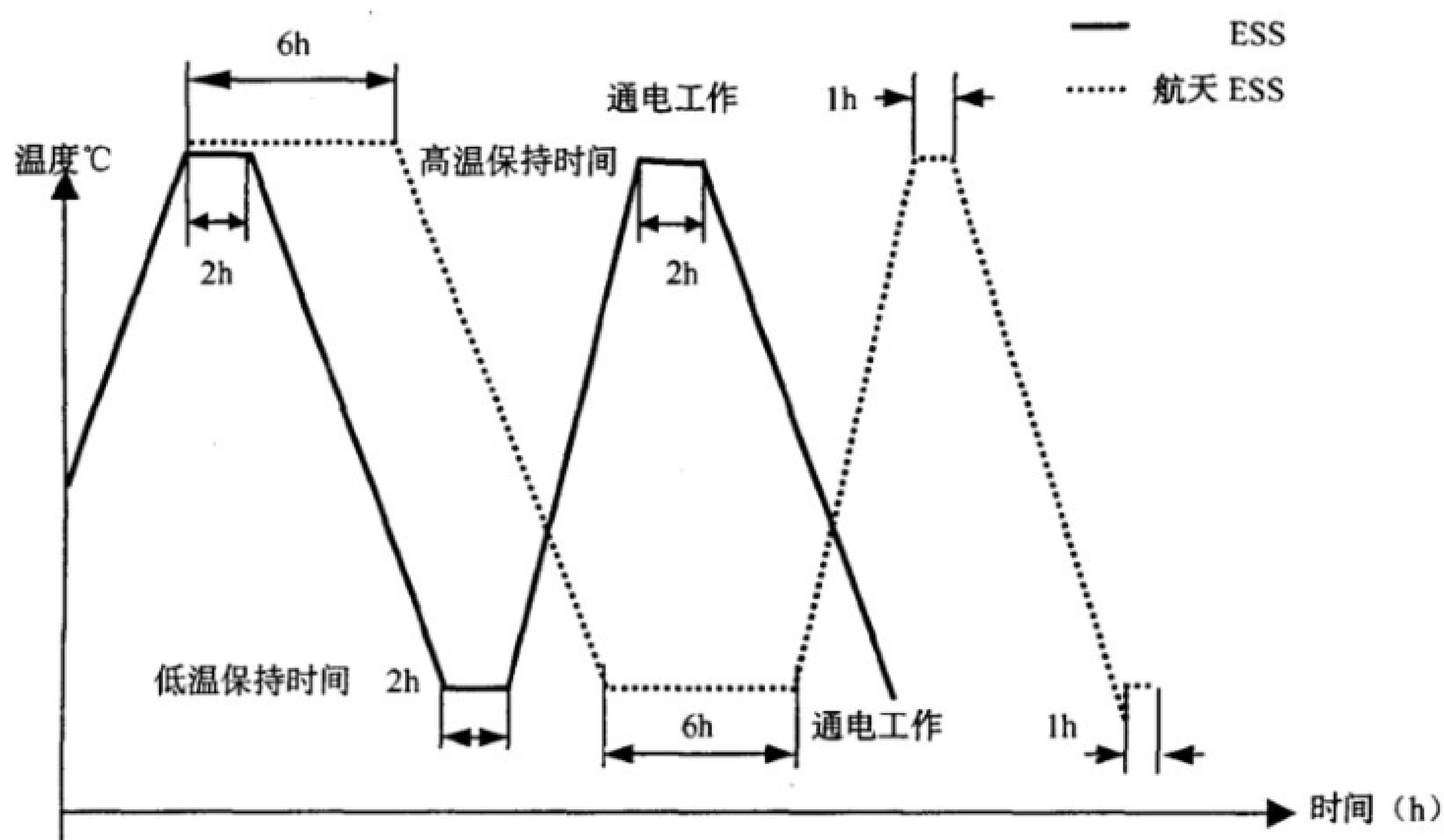


图9 常规 ESS 与航天 ESS 的热循环筛选应力比较的示意图

除此而外，与常规 ESS 相比：

- 对有密封要求的航天电子产品要验证其密封性能仍需增加热真空应力；
- 高压微波电子产品若加工过程中存在毛刺（足够长），在低气压下（ $\geq 1\text{Pa}$ ）通电工作时可能出现由电晕、电弧引起放电的现象，这种工艺缺陷用温度循环和随机振动进行筛选是暴露不出来的；
- 太阳帆板在制造过程存在工艺缺陷，在高真空和高温环境下可能出现放气现象而使结构材料脱粘，因此，要在真空压力 $\leq 1 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 和高温下（ $\geq 80^\circ\text{C}$ ）进行烘烤除气筛选试验；

d) 冲击环境应力可以用于暴露继电器的触点换向和使潜在带电颗粒迁移导致短路等隐患。

5.2.5 航天验收试验和航天 ESS 目的的一致性

进行验收试验是要证明每一件交付产品是可接收的,是符合规范要求的,是没有工艺和材料缺陷的。而进行应力筛选的目的也是要暴露由于元器件、材料和制造工艺中潜在缺陷造成的产品早期故障,从而控制和保证了产品的质量和可靠性。可见验收试验与 ESS 在这里是一回事。

5.2.6 航天筛选应力条件

一般来讲,验收试验条件源自产品的实际使用环境,但对航天产品由于考虑到 ESS 的需要,特别是电工电子产品,其试验条件就不仅如此,而是为了尽可能多地暴露由于元器件和工艺中潜在缺陷造成的早期故障,就要考虑采用强化的或最有效环境应力,如热循环和随机振动。然而要注意该应力条件不应超过产品的设计能力或引起不真实的故障模式和系统级不同部位应力条件的差异。若产品被多型号使用,或装在系统级的不同部位上,则验收试验应力条件应包括多型号或系统级不同部位的有关条件。典型的验收试验级和持续时间综述于表 8。

5.2.6.1 热循环应力条件

a) 温度范围:

温度范围应满足以下的两项要求:

- 1) 应包括最高和最低期望温度(见图 10);
- 2) 温度范围宜尽可能宽,以满足环境应力筛选的目的。

对组件,如能满足要求 a),温度范围建议取 $-44^{\circ}\text{C}\sim 61^{\circ}\text{C}$,即 105°C 。如果该温度范围(即 105°C)的热端及冷端各扩展 10°C 用于鉴定会引起不真实的故障模式或导致不真实的设计要求时,则此范围可以适当缩减。为弥补温度范围的缩小,热循环次数应按以下 b)中的循环次数公式计算,做相应的增加。

b) 循环次数:

若温度范围与表 8、表 9、表 10 中的相对应,则对其他温度范围的循环次数 N_A 应按下式计算:

$$N_A = 10 (125/\Delta T_A)^{1.4} \dots\dots\dots (2)$$

包括再试验的验收级试验循环的最大允许次数: $N_{\max}=2N_A$,即为不进行系统级验收再试验的两倍。

表 8 典型的验收试验级和持续时间

试 验 名 称	组 件	飞 行 器
声	同系统级	最低谱(图 11)的包络, 1min
振动	最低谱(图 12)的包络, 每轴 1min	同组件, 但最低谱按图 13
热真空 ^a	-44°C 到 61°C 1次循环, 真空度为 $1.3 \times 10^{-2}\text{Pa}$	-44°C 到 61°C 4次循环, 压力同组件
热循环 ^a	-44°C 到 61°C , 12.5 次循环	/
热真空和循环组合	-44°C 到 61°C , 8.5 次热循环和 4 次 热真空循环	/
^a 见表 9 和表 10。		

图 9 热循环（TC）和热真空循环（TV）试验的温度范围

试验项目类别	组 件	系统级	
	TC 和 TV	TC	TV
验收温度范围△TA	105℃ 推荐值，可增减	≥50℃	由首先达到高或低验收温度限的组件决定
注：TC 可与 TV 试验结合进行，当 TC 和 TV 都进行时，其循环次数为两者之和。对于不含电子部件的组件，最低的验收试验循环次数应为一次。			

c) 温变率：
建议对组件取 3℃/min~5℃/min；对系统视设备能力确定。

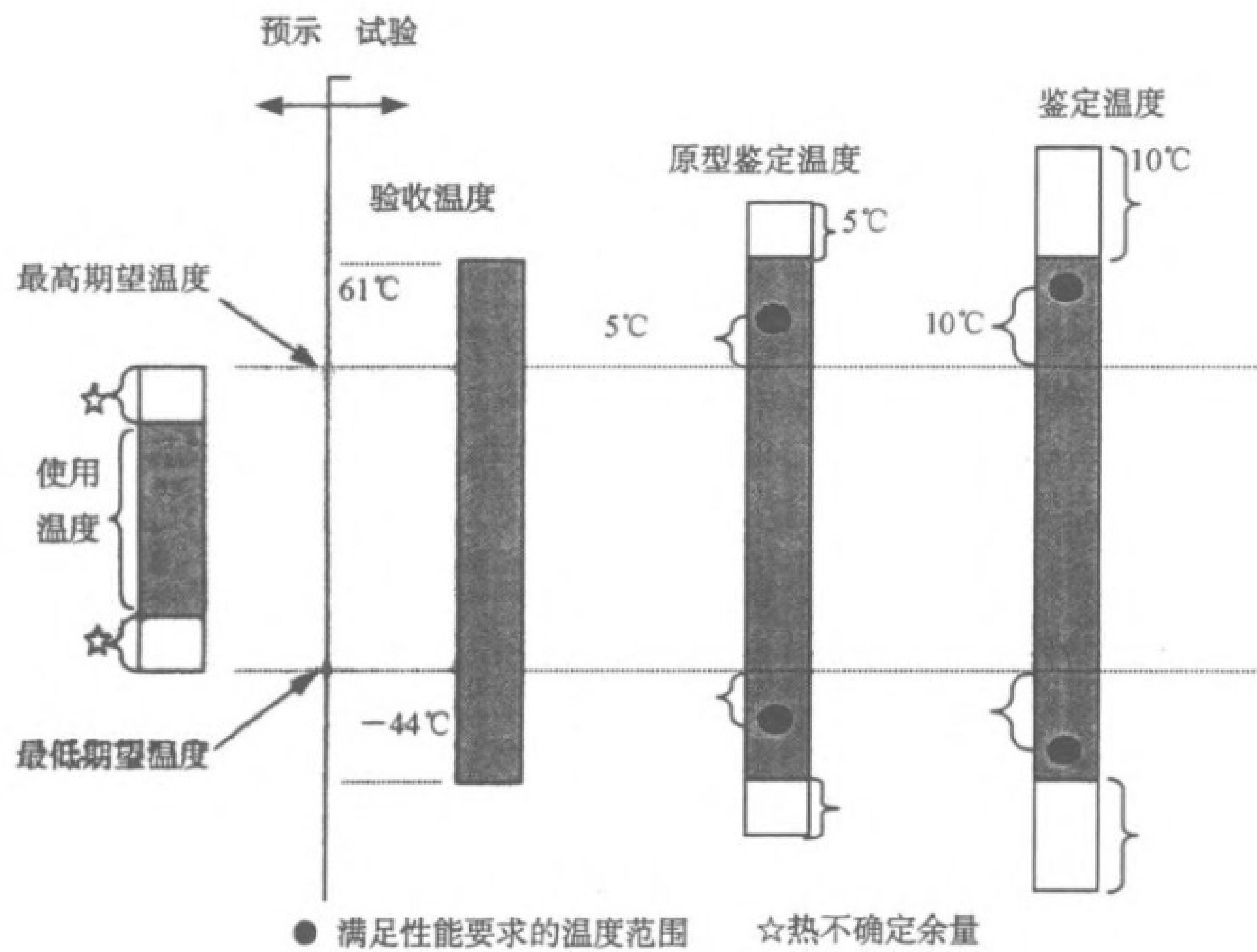


图 10 组件预示/验收/鉴定试验温度范围间关系

5.2.6.2 热真空循环环境应力条件

对于系统级热真空试验，在热浸时，至少应有一个组件达到其验收热温度。在冷浸时，至少应有一个组件达到其验收冷温度。如果选择常压热循环试验替代，则最小的温度范围应是 50℃。热真空和热循环的次数列于表 10。

5.2.6.3 声环境应力条件

航天 ESS 最低的筛选声环境应力条件见表 11 和图 11。验收试验的声谱应是最高期望环境，但不低于图 11 中的最低声压谱。验收声试验的最短持续时间为 1min。

表 10 热循环（TC）和热真空循环（TV）试验的循环次数

产 品 级 别	组 件		飞 行 器
试 验 类 别	验 收		验 收
循环次数	N _A	N _{max}	N _A
TC 和 TV	8.5	17	4
	4	8	1
TV	1	2	4
TC	12.5	25	/

表 11 航天 ESS 筛选声环境应力条件

1/3 OCT 中心频率 Hz	最小声压级 dB	1/3 OCT 中心频率 Hz	最小声压级 dB
31	121	630	125
40	122	800	124
50	123	1k	123
63	124	1.25k	122
80	125	1.6k	121
100	125.7	2k	120
125	126.5	2.5k	119
160	126.7	3.15k	118
200	127	4k	117
250	127	5k	116
315	127	6.3k	115
400	126.5	8k	114
500	125.7	10k	113
总声压级 138 dB			

5.2.6.4 航天 ESS 筛选随机振动应力条件

验收试验随机振动谱应为最高期望环境，但对组件不低于图 12 中的最低谱值，对系统级不低于图 13 中的最低谱值。重量 W 超过 23kg 的组件，其最低谱值宜逐个评估，可参照哥达德航天中心的“航天飞机和一次使用运载器有效载荷分系统及组件通用环境检验规范”的规定，对重量超过 23kg 的组件，其最低谱值可按下式计算：

谱值随重量增加而降低的分贝数=10LOG（W/50）。验收正弦振动幅值，应取最高期望的正弦振动环境幅值。当工作寿命期间随机振动和正弦振动协同作用比分别考虑要严酷时，宜将这两种类型的振动适当组合来作试验。验收随机振动试验的最短持续时间在三个相互垂直轴的每个轴上应为 1min。

随机振动功率谱密度试验条件允许偏差见表 12。

1/3 OCT 声压级, dB

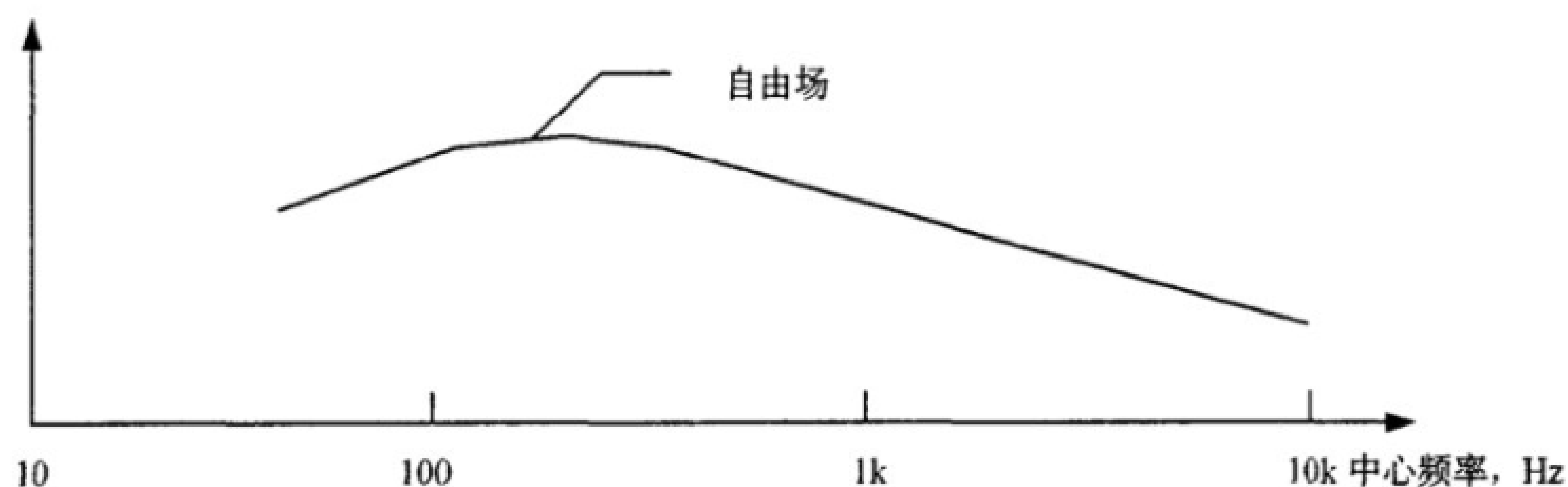


图 11 最低声压谱 1/3 OCT, 飞行器及单元验收试验

表 12 随机振动功率谱密度试验条件允许偏差

频率范围	最大控制带宽	随机振动功率谱密度允许偏差
20Hz~100Hz	10Hz	$\pm 1.5\text{dB}$
100Hz~1000Hz	中心频率的 10%	$\pm 1.5\text{dB}$
1000Hz~2000Hz	100Hz	$\pm 3.0\text{dB}$
总均方根值 grms		$\pm 1.0\text{dB}$

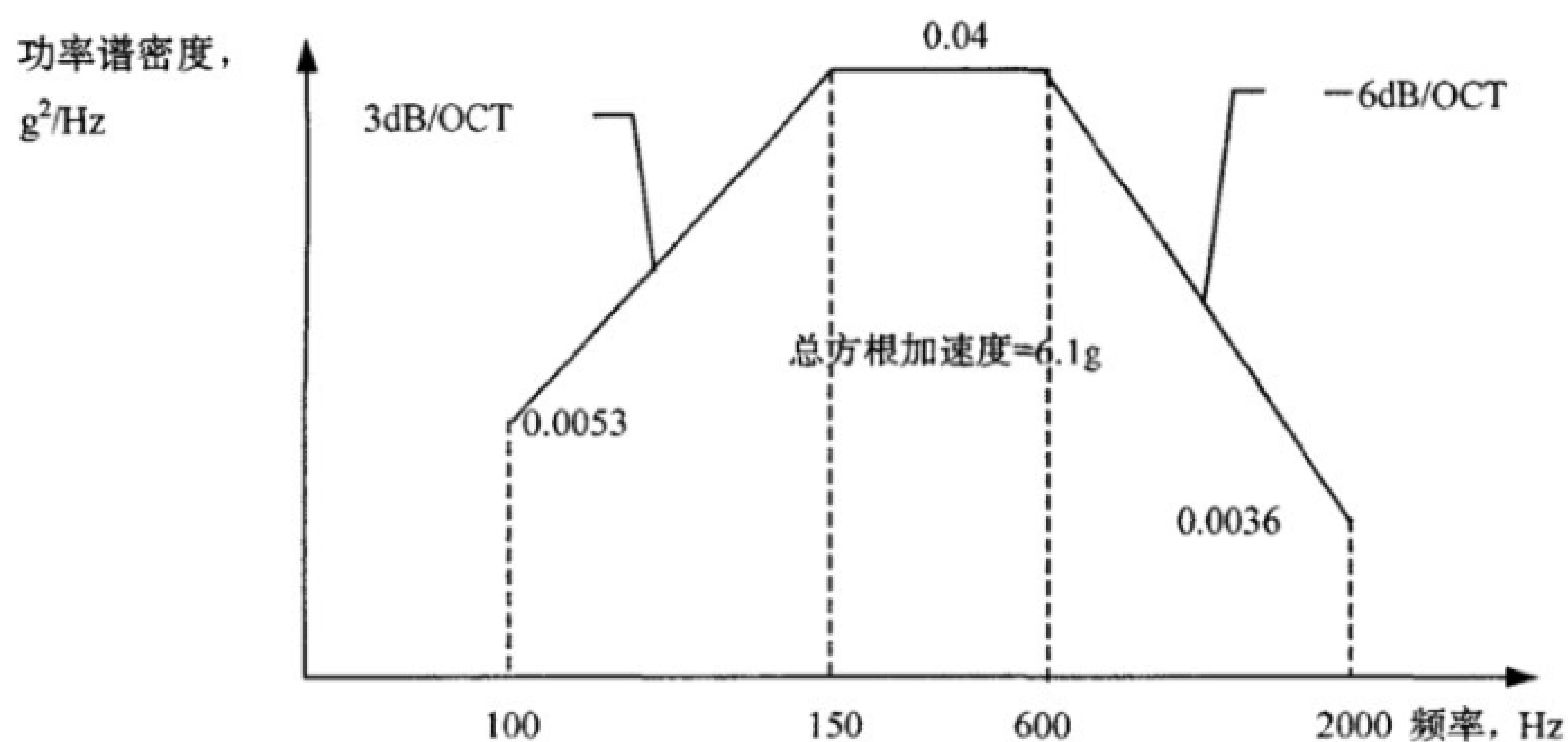


图 12 组件验收试验最低随机振动谱

5.2.7 航天系统产品组装级别（层次）的选择

航天系统产品组装级别（层次）包括系统、分系统、组件、部件 4 级，主要是系统和组件两级。对于系统级（运载火箭、顶级飞行器与航天器）由于它们所负任务与所处环境之间的差异，实施 ESS 的方法与设备等亦会各异。

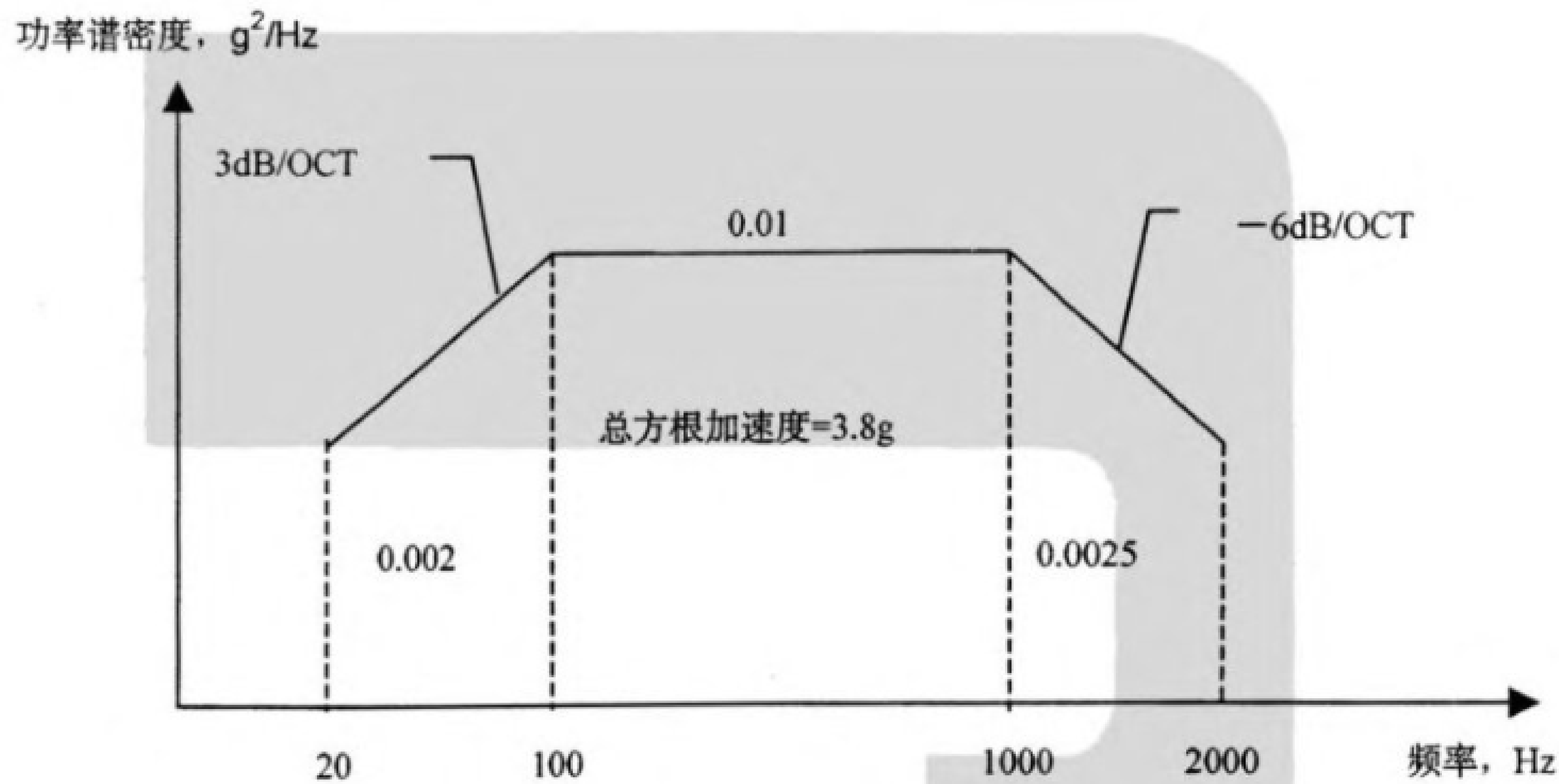


图 13 系统级验收试验最低随机振动谱

5.2.8 系统级 ESS（验收试验）

系统级验收试验项目及基本要求见表 13。

表 13 系统级验收试验基本要求

试验名称	建议试验顺序	运载火箭	顶级火箭	航天器
检查 ^a	1	R	R	R
功能 ^a	2	R	R	R
压力/检漏	3, 7, 10	R	R	R
电磁兼容	4	—	0	0
冲击	5	0	0	0
声/振动 ^b	6	0	R	R
热循环	8	0	0	0
热真空 ^c	9	0	R	R
贮存	任意	0	0	0
注：R 基本要求； 0 选作； — 不要求。				
^a 如可行，每次试验前都要求进行，包括适用的特殊试验；				
^b 对于密实的系统级（质量小于 180kg），声试验可用振动试验代替；				
^c 如果进行热循环，要求可以更改。				

5.2.8.1 系统级声试验

声试验模拟飞行的声环境或最低工艺筛选声环境（图 11）。目的是暴露在静态试验条件下可能检测不到的材料和工艺质量缺陷。

声环境试验量级和持续时间应按 5.2.6.3 来确定。发射时工作的部件的运行时间要在冗余组件间大致地均分。如没有足够时间对发射、入轨或再入阶段工作的冗余组件，功能和模式进行试验时，可以延长试验的时间，但试验量级应低于验收级 6dB。

5.2.8.2 系统级振动试验

对小型系统级可用振动试验代替声试验，因为通过连接面激振可以比声场更有效地激励。这样的系统级一般质量在 180kg 以下。

随机振动环境试验量级和持续时间应按 5.2.6.4 来规定。为防止在某个频段内输入应力量级过大或组件响应太高，可使在该频段内系统级输入谱下凹或使响应限幅，但不能低于图 13 的最小谱值。应如鉴定试验那样在三个相互正交轴的每个轴上施加振动。如果没有足够时间来试验在发射、入轨或再入段工作的冗余线路、功能及模式，可以延长试验时间，但试验量级应低于验收级 6dB。

5.2.8.3 系统级压力和检漏试验

压力和检漏试验是要验证液压分系统满足规定的流量、压力和检漏的要求。

试验量级和持续时间同鉴定试验，只是仅进行一个压力循环。

进行所有试验时都应遵守适用的安全标准。在接头、接合面、插头和管道等部位应进行外检漏试验。应通过适当的分析来确定满足任务要求的允许泄漏率。此外，测量技术应考虑泄漏率随压力和温度的变化，并有所需的阈值、分辨率，准确度，以发现任何等于或大于允许泄漏率的泄漏。应在最大预期工作压力和工作温度下用有代表性的液体进行泄漏率测量，以考虑其体积和粘度的变化。对于达到热和压力平衡的次数、试验持续时间和温度敏感度都应通过分析和研制试验的适当组合来确定，并记录结果。有的检漏应在热真空条件下进行，或采用其它方法。

5.2.8.4 系统级热试验

热循环试验目的是使系统级经受热循环环境来检测出材料、加工和制造质量缺陷。

系统级应放在常压热容器内，并进行功能试验以确信它已适宜于进行试验。在整个试验过程中，应使系统级工作并对它进行监测，除非为了在低温下达到稳定而可能需要关闭系统级电源之外。系统级工作应与热循环同步，各冗余组件的工作次数应大致相同。

当系统级内部空间的相对湿度低于低温试验温度下引起冷凝时的湿度时，应开始进行热循环试验。一个完整的热循环试验过程是从正常温度开始，接着升到一个温度极值并保持稳定，然后达到另一个温度极值并保持稳定，最后再回到室温。安装在关键位置上的温度传感器应能保证若干个组件达到期望的温度极值并保持稳定。对于选定的对温度敏感组件（如电池）可以采用辅助加热和冷却。如果需要，为了达到所需温变率，可将系统级的某些部分如太阳能电池板和无源热设备取下作试验。最后的热循环试验应包括冷热浸，并在此期间进行系统级的功能试验，包括测试冗余组件。

试验量级和持续时间：

最小温度范围应为 50℃。从一个极端温度至另一个极端温度的平均温变率应尽可能地快。工作时间在各冗余线路之间宜大致均分。热循环的最少次数为 4 次。

如果已进行了热循环试验，则在 5.2.8.5 中规定的热真空验收试验只要求一次热循环。

5.2.8.5 系统级热真空试验

热真空试验目的是为发现可能由真空和热应力条件引起的材料、加工和制造质量缺陷，并验证热控分系统。

试验期间应进行性能检测以便监测间歇故障。应防止电子组件内部的湿气冷凝。应避免在系统级外表面及在那些湿气不易扩散的内部空间（如多层绝缘）因温度和湿度的共同作用引起湿气冷凝。

试验量级和持续时间：

不同设备区的温度应由外部试验环境和设备工作时产生的内部发热来控制，使每个设备区内至少有

一个组件的热温度达到 5.2.6.2 规定的验收试验温度。对航天器和末级火箭试验容器的压力应保持（或低于） 1.3×10^{-2} Pa。对运载器，压力应保持（或低于）在与其最大可能飞行高度相当的压力。

工作时间在各冗余线路之间宜大致均分。热真空验收试验应至少包括 4 个完整的冷热循环，温度变化率取最大预示的轨道温度变化率。在第一次和最后一次循环时，在冷热两温度极值下各至少保持 8h。对中间各次循环在每个湿度极值下至少保持 4h。保温的时间应根据试验飞行工作条件（包括冗余）的需要延长。如果已进行了替代的热循环试验（5.2.8.4），则应只做一次热—冷真空循环，在冷、热端温度下的保持时间至少为 8h（表 8 和表 9）。

在一次循环期间，在冷热端温度下应达到热平衡，以采集足够的数据来验证恒温器、百叶窗、热管和电加热器等的功能，并评价主动热控分系统的控制能力。

可能有必要通过局部改变热边界条件或改变工作程序来提供辅助的加热或冷却，以便使某些部位达到温度限，临近的设备可以通电或断开；然而，一般应避免在系统级内部采用任何特殊的调节。应尽可能利用外部阻挡、遮阴或加热。系统级应是使用验收温度限。在最高和最低期望温度以外的温度范围不要求性能在规范要求之内。

5.2.9 分系统 ESS

除充压系统外，分系统级的验收试验被认为是任选的。这些试验是有效的，因为对在此装配级上发现的故障进行修复的费用往往比在系统级发现同样故障的修复费要低。而且某些验收试验宜在分系统级进行，如果在该级能比组件级或系统级提供更直观的试验。但是否进行分系统验收试验宜根据下列因素来评定：

- a) 分系统及其组件的相对可达性；
- b) 系统级的再试验时间；
- c) 试验备用组件时，分系统的成本和是否容易获得。

进行分系统试验时，试验要求通常根据系统级的试验要求来确定。

5.2.9.1 结构分系统检验载荷试验

检验载荷试验用于所有粘接结构、复合材料结构或夹层结构。它检测结构检验载荷可能会引起的材料、加工和制造质量缺陷。如果使用了经考验的非破坏性测试方法，并有明确的接收和拒收判据，则不需要作检验载荷试验。

试验量级和持续时间：

- a) 静载荷，除非另有规定，飞行件的检验载荷应为最大使用载荷的 1.1 倍；
- b) 持续时间，加载应尽可能接近实际的飞行加载次数，并具有足以记录试验数据的最短停留时间。

5.2.9.2 充压分系统检验压力试验

检验压力试验目的是要发现导致充压分系统损坏的材料和制造质量缺陷。

试验温度和湿度应与关键使用情况的温度和湿度相一致。作为一种替代方法，如果能通过适当调节试验压力来考虑温度和湿度对材料强度及断裂韧性的影响，就可在室温条件下进行试验。

试验量级和持续时间：

- a) 除非另有规定，充压结构的最小检验压力应为最大工作期望压力的 1.1 倍；
- b) 对压力容器和其它压力部件如压力管路和接头，最小检验压力应遵循相应标准中规定的要求；
- c) 应将压力保持一段时间使足以保证达到正确的压力，除非另有规定，除压力容器，保持时间至少应为 5min。

5.2.10 组件 ESS (验收试验)

组件验收试验的基本要求见表 14。组件验收试验通常应在组件级完成。有些组件(如太阳能电池阵、内部连接管线、射频电路和导线等)可部分地在较高的装配级下完成。当被试组件是由表 13 中两个或两个以上的组件构成时,则应按每个组件所规定的要求进行试验。例如,星敏感器既属于“电子组件”,也属于“光学设备”,而在此例中电子设备要求作热循环试验,虽然光学设备不要求,星敏感器仍要作热循环试验。

5.2.10.1 组件功能试验

功能试验的目的是检验组件的电性能和机械性能是否符合组件的规定使用要求。

电试验应在包括所有冗余电路在内的组件电接口加入预期的电压、阻抗、频率、脉冲和波形。这些参数应在整个规范范围内并按预期的飞行工作顺序变化。应测量组件的输出来检验组件是否按规范要求工作。功能特性还应包括电连续性、稳定性、响应时间、调直、压力、泄漏、或与其它的特定制件技术状态有关的特殊功能试验。应在与所模拟的环境相对应的技术状态下进行运动机械组件试验,并应按组件在对应的环境暴露时的状态使之断电或者工作。应进行扭矩一角度和时间一角度测量,或对线性装置作等效线性测量。功能试验异常宜包括刚度、阻尼、摩擦、和断开特性。对设计中包含冗余件的运动机械组件应在试验中在每个冗余工作模式下验证是否有要求的性能。

在每次组件试验前、试验过程中以及试验后,都应进行功能或监测试验来检测设备的异常现象,并确保性能满足规范要求。

表 14 组件验收试验基本要求

试 验	电子设备	天线	运动机械 组件	太阳电池板	蓄电池	阀门与 推进组件	压力 容器	推力 装置	温控 设备	光学 设备	结构 组件
探伤	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
功能	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	—
检漏	R	—	R	—	R	R	R	0	0	—	—
冲击	0	—	—	—	—	—	—	—	—	0	—
振动	R	R	R	R	R	R	0	R	R	R	—
噪声	0	R	—	R	—	—	—	—	—	0	—
热循环	R	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
热真空	R	0	R	0	R	R	0	R	R	R	0
磨合	—	—	R	—	—	R	—	R	—	—	—
耐压	—	—	0	—	0	R	R	0	—	—	—
加载	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
电磁兼容	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
注: R 基本要求: 0 选作: — 不要求。											

5.2.10.2 电子组件热循环试验

如果在真空中进行了鉴定热循环试验,则热循环验收试验应与 5.2.10.3 的热真空试验组合进行。组合后的循环次数应符合表 8 中的要求。

热循环试验目的是在组件装入系统之前,通过热循环发现材料和制造质量缺陷。

应按图 10 所示温度剖面进行试验,同时使组件工作(通电)并监测敏感参数。应在组件有代表性的位置或在基板的安装点上,测量试验控制温度。每当控制温度稳定在热端温度时,应切断组件电源后热启动。然后,应使组件工作。为了帮助组件达到低温,将控制温度降到冷端温度并关掉电源。当组件温度比其最低期望温度至少低 10°C 时,组件在低端温度下稳定后,应进行冷启动。温度从室温升到高温,再降到低温,最后回到室温组成一个热循环。

试验量级和持续时间:

a) 压力和湿度:

通常使用正常压力;然而也可以在低压下,包括真空条件,进行热循环试验。在试验非密封部件时,应采取措施避免在低温时组件表面和内部产生凝露。例如,可以在容器内充满干燥空气或氮气。而且最后半个循环应是热半循环。

b) 温度:

应取热端和冷端温度为验收温度限。

c) 持续时间:

热循环的最少次数是 12.5 次,其中最后的两次应是无故障的。经受 5.2.10.3 热真空试验的组件,循环次数要减去热真空循环次数(表 12)。在第一次循环和最后一次循环,温度保持时间在热端和冷端均为最少 6h;对中间循环,至少要保持 1h。在温度保持期间,组件应断电直到温度稳定,然后再通电。每次温度保持时间的测量应在组件启动时开始计时。冷热端温度之间的温变率以平均每分钟 $3^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ 为宜;并不得低于每分钟 1°C 。应积累在热验收温度的附加运行时间,使热循环时间、热真空时间和附加的热运行时间之和至少为 200h。希望的话,可在热循环或热真空循环时,延长热浸时间来满足附加的热运行要求。最后 100h 的运行应是无故障的。对于内部的冗余组件,运行时间应由至少 150h 的主运行和至少 50h 的冗余运行组成。每个组件的最后 50h 应是无故障的。

在第一次和最后一次热循环中,当组件稳定在高温和低温,以及当组件回到正常温度后,都应进行功能试验。对其余各次循环,电子组件,包括全部冗余电路或通道在内,都应经历各种工况,并尽最大可能监测敏感参数,检查故障和间歇现象。组件应在最高期望温度两极端各延伸 10°C 的范围内满足规范性能要求。对如计算机等数字组件,在最后一次热循环内温度变化宜足够地慢,以便能几乎在所有温度下重复整个功能检查。

应防止在电子组件内部有湿气凝结。使第一个和最后一个半循环为热循环,可将冷凝减至最小。

仅要求组件在最大期望温度范围符合规范性能要求。

5.2.10.3 组件热真空试验

热真空试验目的是使组件经受热真空环境来检测出材料和制造质量缺陷。

组件应安装在真空容器内一控温热沉上或以近似于系统级上的实际安装方式进行安装。影响辐射传热或接触传导的组件表面粗糙度应与飞行组件热等效。对于设计中要从基板排走多余热量的组件,应在组件基板或热沉上安装温度敏感元件。应尽可能选择接近对应于系统级热设计分析或有关的组件与系统级接口准则所用的温度范围的部位。对于主要是辐射冷却的组件,应类似地选择组件外壳上有代表性的部位。组件向温控热沉的传热和对环境的辐射传热的比值应控制得与计算的飞行环境下情况相同。

容器内压力应降至所要求的真空条件。需要在入轨阶段工作的组件应在压力降至规定最低值的过程中和在真空运行的早期阶段工作,并检测电晕和电弧放电。当真空压力低于 $1.3 \times 10^{-1} \text{Pa}$,应适当地检

测组件保证不出现微放电现象，在发射阶段不工作的组件应在试验压力达到后接通电源。

热循环是从传导或辐射源及热沉处于室温时开始。一面使组件工作，一面进行敏感参数的监测，将组件温度升高至规定高温并保持。切断所有在轨道阶段工作的电子组件电源，经过一段时间，待组件内部温度稳定后进行热启动，然后进行功能试验。应一面使组件工作，一面将组件温度降到规定的低温值。为有助于组件达到低温值，当组件温度比其最低期望温度至少低 10°C 时，可以关掉组件电源。当组件温度达到规定低温以后，应关掉组件电源（如果在温度变化过程中未预先关掉），直至内部温度稳定，然后冷启动并进行功能试验。继续保持组件在规定温度直到冷浸结束。然后应将热沉温度提高到室温。这样就组成一个完整的热循环。

试验量级和持续时间：

a) 压力：

压力应从大气压降至 $1.3 \times 10^{-2} \text{Pa}$ （对于轨道模拟而言），或降至与功能相适合的压力。降压速率尽可能模拟入轨剖面。对运载器的组件，真空压力应修正，使与最高的工作高度相一致。对于那些故障模式与真空无关的组件，热真空验收试验可以在常压下进行。

b) 温度：

应取热端及冷端温度做为验收温度限。

c) 持续时间：

除电子组件外，基本要求是一次循环，并有 6h 的热浸和冷浸。对电子组件，应至少作 4 次循环。在第一次和最后一次循环时，在热端和冷端温度至少都应保持 6h。在两个中间循环，应保持 1h。在每次保温期间，组件应断电直至温度稳定，然后再通电。温度保持时间的测量应从组件通电时开始。

在第一次和最后一次循环时，在冷热端温度下，以及组件在真空中恢复到常温后，均应进行功能试验。在试验的其它部分，电子组件，包括所有冗余电路和路径，应在循环中通过各种工况。应尽最大可能地监测敏感参数，以发现故障与间歇现象。组件应在最大期望温度范围内满足性能要求。应使组件在最大期望温度范围内运行，虽然在验收温度超出最低和最高期望温度时，不要求性能在规范以内。对于运动机械组件，其性能参数，如耗电量、阻力矩或阻力、启动时间，速度或加速度，都应监测。推力器与其工作液体的兼容性应在试验温度极值下进行验证。

5.2.10.4 组件验收振动试验

振动试验目的是要使组件经受振动环境来检测出其材料和制造质量缺陷。

组件应通过其规定的安装点装在夹具上。应在 3 个相互正交轴的每一个轴向进行组件试验。需要在入轨阶段的压力下工作的组件都应充压以便从结构和泄漏的角度上模拟飞行环境，同时监测压力的下降。设计在入轨阶段工作的组件，其最高和最低温度会超出正常温度范围，此时要考虑进行组合的振动及热试验。

安装在冲击或振动减振器上的组件一般应在两种结构状态下进行验收级振动试验。第一种状态是：验收试验一般不带减振器进行，而应将组件刚硬安装，按图 12 谱值试验。第二种状态是将组件装在减振器上按飞行环境（5.2.6.4）的要求试验。应尽可能在组件上安装与工作中使用的同批次的减振器。安装在减振器上的组件应在减振器与结构连接处进行控制。刚硬安装的组件应在组件安装连接处进行控制。

验收试验不要求连接的液压或气压管路。安装在冲击或振动减振器上的组件，一般应刚硬安装进行

试验, 以确保有图 12 给出的最小振动谱输入给组件。

试验量级和持续时间:

振动环境应按 5.2.6.4 确定, 最小谱示于图 12。在没有足够时间试验所有工况时, 应按需要在低于验收试验级 6dB 的振级上, 延长试验时间来完成功能试验。

在试验过程中, 所有电子组件都应接通电源, 尽最大可能按顺序通过各种工况。这包括所有冗余电路, 以及所有在发射过程中不工作的电路。在试验时, 应连续监测组件的性能参数来发现间歇故障。对质量超过 23kg 的组件, 为了防止不真实的应力输入或组件响应, 可限制频谱值或使之下凹, 但不能低于组件的最低试验谱值。对表面面积很大的组件不作振动试验, 因为引起响应的主要是直接声激励。如动力学试验的结构状态(组件和夹具)与鉴定的状态不一样, 则在试验加载到验收级前, 应重新评估夹具。

试验夹具应通过试验检验, 看它是否能在试验过程中将运动均匀地传到被试组件, 并能限制能量从试验轴传到另两个正交轴。这种交叉干扰量值宜低于相应轴的输入。在高于 1000Hz 的 1/6 倍频程频带中, 允许在一交叉轴上带宽之和不超过 300Hz 的范围内超出达 3dB。

对减振器的特殊考虑:

减振器随同其额定支承质量至少应在一个轴向作多次试验, 以验证动态放大和共振频率是在允许范围内。试验输入可以或是至少 15s 的最高期望随机振动级, 或是扫频率不大于每分钟 1 倍频程的基准正弦输入。

5.2.10.5 组件声试验

声试验目的是使组件经受声环境来检测出其材料和制造质量缺陷。

组件应以入轨的技术状态安装在声试验设施内, 该设施产生的声场或脉动表面压力要能诱发出足以鉴定组件的振动环境。组件宜安装在飞行型支撑结构或模拟结构上。应尽实际可能复现重要的流体和压力条件。应安装适当的动态测试仪表测量振动响应。控制传声器至少应安放在相距很远的 4 个位置上, 并放在距试验件和最近的混响室壁之间, 但离试验件表面和室壁均不小于 0.5m。

试验量级和持续时间:

组件声环境应按 5.2.6.3 确定。如在 1min 内不足以检查冗余电路、功能和在发射、入轨或再入阶段状态时的工作模式, 应在低于验收级 6dB 的量级延长时间来完成功能试验。

在试验过程中所有电子组件, 即使在发射阶段不工作, 都应尽最大可能通电, 并按顺序通过各种工况, 但那些通电后可能会受到损坏的组件除外。应连续监测组件的性能参数, 以便发现有否发生异常现象。

5.2.10.6 组件冲击试验

冲击试验目的是使组件经受飞行中的高量级冲击环境以检测出其材料和工艺缺陷。

组件应安装在与冲击鉴定试验所用的同一夹具或结构的规定点上。组件应通电并被监测。所用的试验技术应与鉴定所用的一致, 只是量级和重复次数不同。冲击试验前后都应进行功能试验。在试验时组件应通电, 并尽最大可能监测电路的间歇现象。

试验量级和冲击时间:

三个正交轴的每轴两个方向上的冲击响应谱至少应是此方向上的最大期望值。冲击应进行足够的次数, 以保证在 6 个方向中的每一个方向都至少有一次符合要求的量级。

如果最大期望冲击谱响应(用 g 值表示)超过频率(Hz)的 1.6 倍时(相当于 2.54m/s 的速度),

就要求作该验收试验。例如，在 1000Hz 的最大期望冲击响应谱值超过 3200g 时，就要求作试验。

5.2.10.7 结构组件检验载荷试验

所有由复合材料制成或具有粘接件的结构组件都应进行检验载荷试验。该试验是检验在经受结构检验载荷时会产生材料、加工和制造质量缺陷。如果采用一种经过考验的非破坏性测试方法，并具有明确的接收和拒收判据，则检验载荷试验可以取消，试验说明及试验量级和持续时间与 5.2.9.1 相同。

5.2.10.8 组件检验压力试验

压力试验目的是检验压力容器或其他组件中可能导致故障的材料和工艺缺陷。

对充压结构和压力部件这类试件，应进行最少一次循环的检验压力试验。出现任何泄漏，超出图形允差的永久变形或扭曲，或其它型式的破坏，都应认为组件未通过试验。

试验量级和持续时间：

对充压结构和压力部件这类试件，应进行最少一次循环的检验压力试验。出现任何泄漏，超出允差的永久变形或扭曲，或其它形式的破坏，都应认为组件未通过试验。

此外，应遵守相应的安全标准。

5.2.10.9 组件检漏试验

检漏试验目的是验证组件符合规定的泄漏率要求的能力。

组件泄漏率检测的方法、试验量级和持续时间应与鉴定所用的一致。

5.2.10.10 组件磨合试验

磨合试验目的是检测组件寿命早期的材料和制造质量缺陷，并使机械组件磨合或跑合，使它们能在平稳、协调和受控状态下运行。

当组件在典型的工作载荷、速度和环境条件下运行，并同时监测敏感参数时，则组件应在规定的时间周期内运行。对阀门、推力器和其他产品，确保检测出早期故障的较好方法是工作循环次数而不是工作时间，应在常温下进行功能循环。对推力器而言，一次循环包括起动、稳态运行及关机在内的热点火。用肼推进剂进行热点火的推力器，在试验点火后应将飞行用阀门内肼的污迹全部清除干净。对寿命周期极为有限的装置，如正推进剂贮箱，不需要作磨合试验。

试验量级和持续时间：

- a) 压力：一般采用常压；
- b) 温度：如能够达到试验目的，可在常温下运行。否则，应在有代表性的运行环境温度下运行；
- c) 持续时间：循环次数应是 15 次或整个寿命期间预期循环数的 5%，取其大者。

在磨合试验时应监测敏感参数，以发现性能下降的证据。

5.2.10.11 组件电磁兼容试验

对于具有发射和敏感特性，且这些特性可能危及系统级性能的组件，应进行有限的电磁兼容试验，以验证这些特性没有因鉴定试验量级而下降。试验宜限于评价这些关键特性所必需的。

5.2.11 航天系统产品 ESS 环境应力条件允差

如无其它规定，应力的允差为：

- a) 温度：
 - 1) $-54^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ；
 - 2) $-30^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 。
- b) 相对湿度： $\pm 5\%$ 。

附录 A
(资料性附录)

常规 ESS 原理/定量 ESS 的数学模型/航天 ESS 标准的发展

A.1 常规环境应力筛选原理

应力筛选原理可用应力—环境干涉理论阐明如下：一般产品的故障率均服从于环境应力—耐环境强度“干涉”理论。按照某一强度要求设计的产品，设其耐环境强度 S 服从正态分布，图 A.1 中用概率 PS 表示；而设产品使用中经受到的环境应力 E 亦呈正态分布，图 A.1 中用概率 PE 表示。当产品耐受环境强度 S 远大于使用环境应力 E 时，两个分布的重叠区极小（即耐环境强度 S 小于使用环境应力 E 的概率较小）此时产品是较安全的。因此，设计上应力图使两曲线分开，以提高产品的可靠性，实际这样的目标由于经济上和客观条件的限制是不易实现的。常见的情况是，两条曲线有部分重叠，见图 A.1a 中的阴影区，该阴影区表明，产品中有一部分耐受环境强度的能力小于使用中实际能遇到的环境应力，这些薄弱部分很可能在使用条件下被激发而发展成为故障。

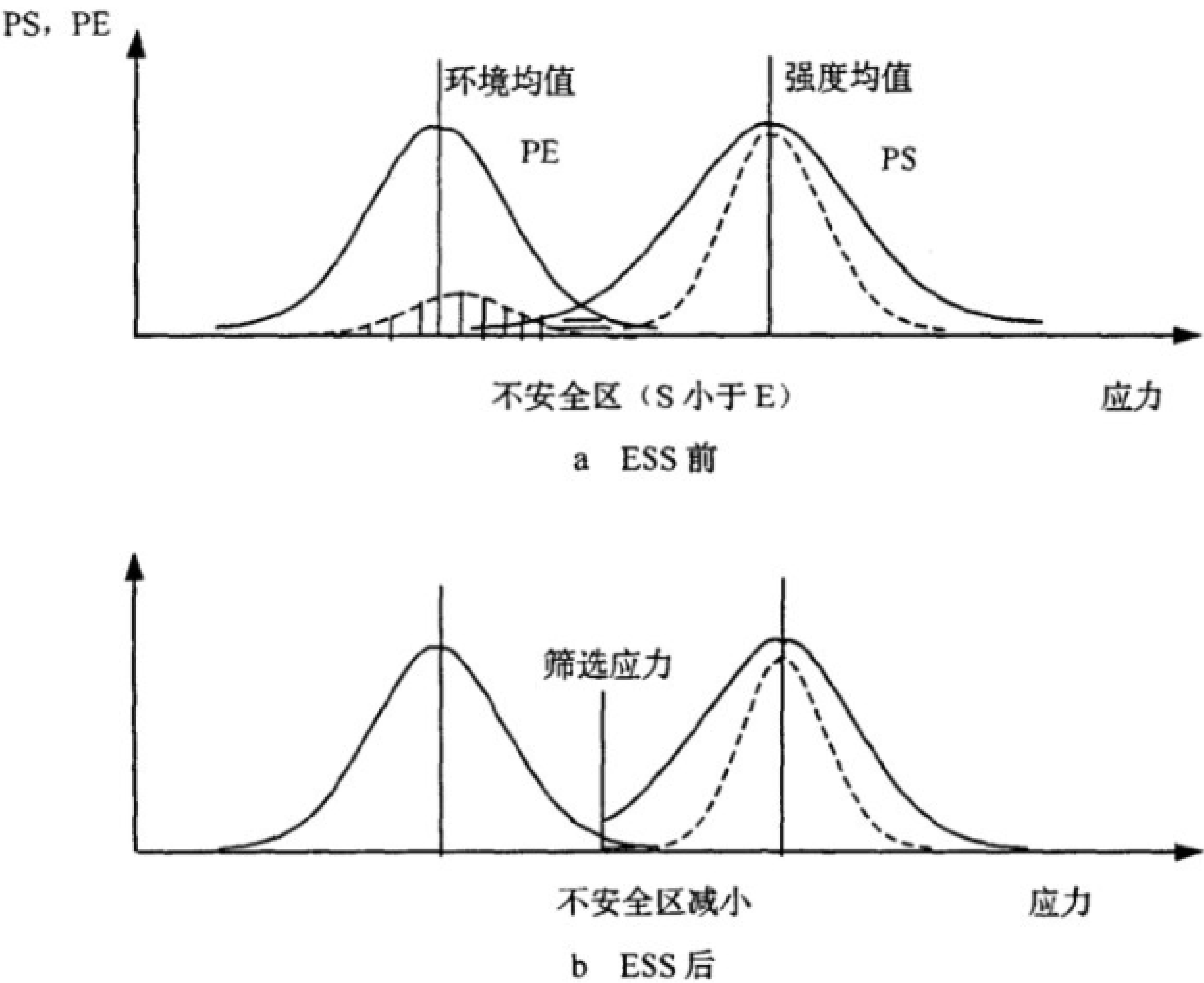


图 A.1 环境应力筛选提高可靠性的机理

环境应力筛选是在产品出厂前先给产品施加一远高于环境应力均值的筛选应力，迫使产品中耐环境应力能力小于所施加的环境应力的薄弱部分提前以故障形式暴露出来并加以修复，使交付产品中各部分耐环境的能力均大于施加的环境筛选应力，从而使图 A.1b 中阴影区的面积大大缩小，扩大了安全范围，

提高了产品在实际使用环境中的可靠性。

对于电子产品，由于其所含元器件众多且工艺及装配过程复杂，故其耐环境强度不象图 A.1 那样呈简单的单峰正态分布，而是如图 A.1 所示的由两个子集构成的双峰分布，其中左边的小峰是由总体中含缺陷产品（次品小子集）所构成的；而右边的大峰是由总体中不含缺陷产品（好品大子集）所构成的。正是由于该次品小子集的存在，使电子产品的应力—环境干涉区面积大为增加，一旦这些混有次品的产品投入市场，在使用环境应力的作用下就会产生早期故障。ESS 恰好可以通过适当的筛选应力的作用挑出次品而不致影响正常产品的性能和寿命，将次品留在厂内，使得投放市场的产品可靠性大为提高。

A.2 定量筛选应力的数学模型

A.2.1 热循环筛选应力的数学模型

热循环应力强度 SS_{TC} 可按下式计算：

$$SS_{TC} = 1 - \exp[-0.0017 (R+0.6)^{0.6} (\ln(e+V))^3 N] \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

R ——温度范围，单位为摄氏度（℃）；

V ——温变率，单位为摄氏度每分钟（℃/min）；

N ——热循环次数；

e ——自然对数。

热循环应力强度与温变率与温度范围 R 的关系见图 A.2。

A.2.2 随机振动筛选应力的数学模型

随机振动的筛选度 SS_{RV} 可按下式计算：

$$SS_{RV} = 1 - \exp[-0.0046 (G_{RMS})^{1.71} t] \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

G_{RMS} ——加速度均方根值；

t ——筛选时间，单位为分钟（min）。

随机振动应力强度与时间/ G_{RMS} 的关系见图 A.3。

A.2.3 恒定高温筛选应力的数学模型

恒定高温的筛选度 SS_{HT} 可按下式计算：

$$SS_{HT} = 1 - \exp[-0.0017 (R+0.6)^{0.6} t] \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

R ——高温温度与室温之差（室温一般取 25℃）；

t ——恒定高温持续时间，单位为小时（h）。

A.2.4 扫频正弦振动筛选应力的数学模型

扫频正弦振动的筛选度 SS_{SV} 可按下式计算：

$$SS_{SV} = 1 - \exp[-0.00727 (G)^{0.863} t] \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

G ——加速度幅值；

t ——筛选时间，单位为分钟（min）。

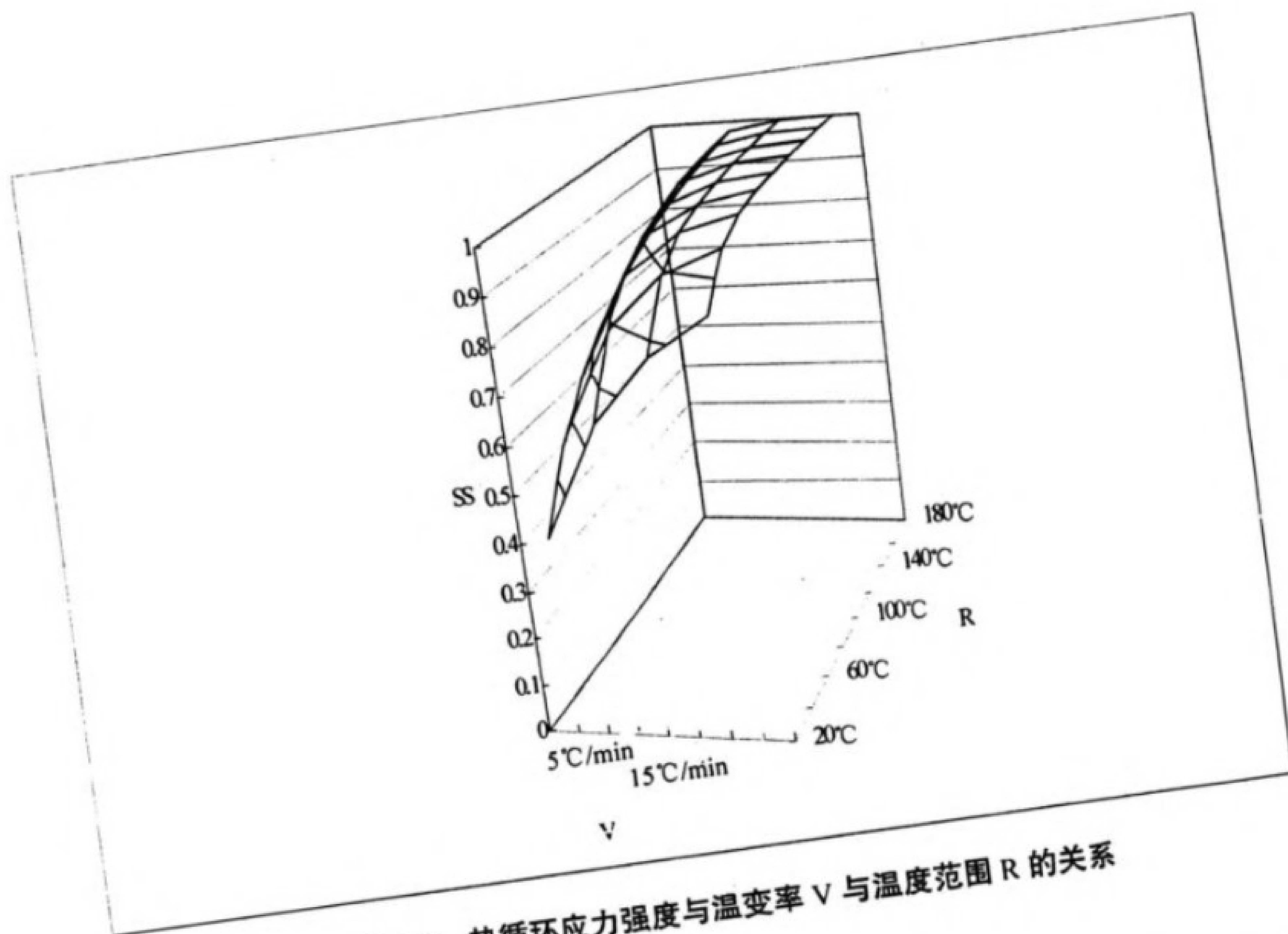


图 A.2 热循环应力强度与温变率 V 与温度范围 R 的关系

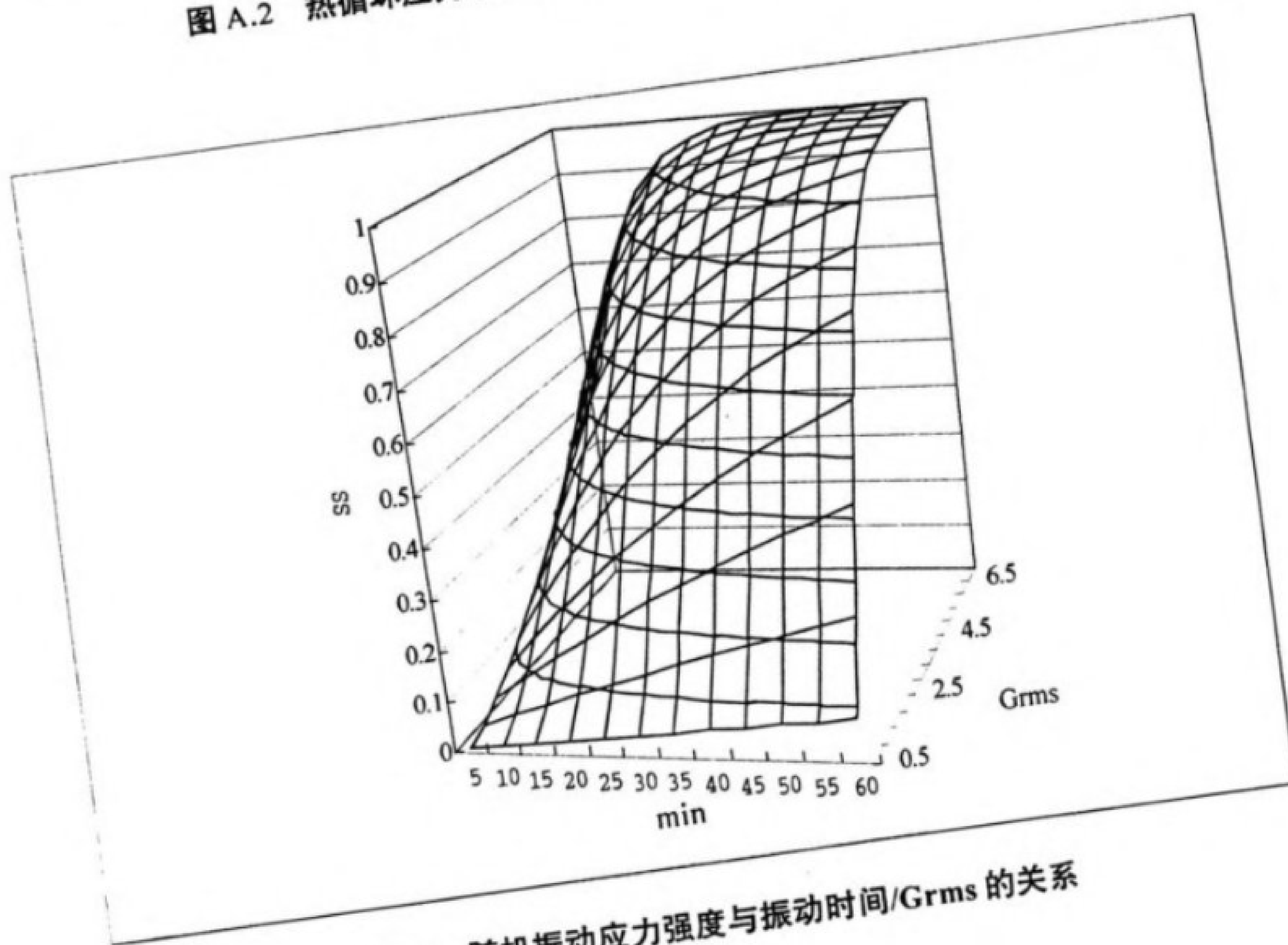


图 A.3 随机振动应力强度与振动时间/Grms 的关系

A.3 航天器和运载器的环境/可靠性试验与 ESS 标准的发展

由于运载器、卫星等系统级产品样本很少，故以 MIL-STD-781 为代表的统计型的可靠性试验标准已不完全适用，1982 年颁发的 MIL-STD-1543A《航天器和运载器可靠性大纲要求》（1988 年修订版为 1543B），提出了有别于 MIL-STD-781 的非统计型的可靠性试验要求。MIL-STD-1543B 规定要将环境应力筛选（工作项目 301）与 MIL-STD-1540 结合进行。

此外，针对航天器和运载器的特点，美军 1974 年制订了适用于以卫星等轨道系统级为主的环境试验要求的标准，即 MIL-STD-1540A《航天器试验要求》。在 MIL-STD-1540A 中并没有明确提出环境应力筛选的要求，但标准中规定的有关“验收试验”的目的和方法与 ESS 在实质上是一致的。在 1982 年颁布了 B 版，在该版的 4.1.3 中指出：“验收试验目的是验证每一个可以交付的产品的适合性，在生产过程中的评定试验，老炼试验或磨合试验和环境应力筛选试验也都被看作是验收试验”，这显然不同于 MIL-STD-810 以考核产品对极端环境适应性为目的的那种试验。该标准中，还将组件级和部件级的验收老炼试验中加入热循环、热真空、恒定高温、振动等强化应力以发现并排除硬件隐患，也就是说，自 MIL-STD-1540B 起，开始重视 ESS 在组件级和部件级的验收中的作用。

1994 年 MIL-STD-1540C《运载器、上面级飞行器、航天器试验要求》颁布，该标准吸取了近年美国在环境试验和可靠性试验方面的经验，从指导思想到应用范围等方面都对 B 版进行了较大的变化：首先标准名称改变，由“航天器试验要求”改为“运载器、上面级飞行器、航天器试验要求”更明确地指出其应用范围不限于卫星，而是包括运载器、上面级飞行器在内的整个航天器系统；其次是针对航天器系统的特点（高可靠、小子样、任务重大等）设计了三种环境型（即 MIL-STD-810）的、而非统计型（区别于 MIL-STD-781）的试验，即研制、鉴定和验收试验；明确指出，上述试验的目标不仅是单纯地验证产品对极端环境的适应能力，而是要通过试验验证，最终保证所研制型号在整个使用寿命期内可靠地工作。

就 ESS 而言，MIL-STD-1540C 与 1540B 相比有以下变化：

首先，进一步明确地将 ESS 的概念、方法引入该标准：

其次，它不仅要求做热循环老炼试验（1540B 有相应规定），还给出了随机振动和声振等应力筛选要求、最低应力量级及谱形；

第三，它将 ESS 与环境验收试验合二为一，从而解决了两种标准要求相叠部分引起的重复试验问题；

第四，为保证试后交付产品的使用寿命，该标准规定，鉴定试验时间要大于四倍的使用寿命，而验收试验时间则取鉴定级的一半。

总之，该标准设计了“由环境验收试验（含 ESS）保证极小批量航天产品的可靠性”的方法，正如 MIL-STD-1540C 的 7.1 中所明确指出的：“验收试验的目的是要对产品进行应力筛选，暴露由于零件、材料和制造工艺中潜在缺陷造成的早期故障”这说明了验收与 ESS 在这里是一回事，而不像武器系统那样，环境试验与可靠性试验分属两个标准和两种思路（由 MIL-STD-810 和 MIL-STD-781 分别规定）。如图 A.4 所示。

由图 A.4 可以看出，对航天系统的环境试验与可靠性试验，到 MIL-STD-1540C 颁布之时，实际上已将两者有机结合，即利用环境手段达到保证产品可靠性的目的。从而既提高了试验效率又保证了试验质量。与我国航天领域传统的做法（即每批次用 1—2 发产品做例行试验）相比，显然更科学和更经

济。

由该图还可看出，对常规武器系统，环境试验与可靠性试验两者的目的与手段均不一致，故它们的环境试验与可靠性试验标准是相互独立的。这是合理的，因为对批量生产的产品，不可能像 MIL-STD-1540C 所要求的那样，对 100% 的产品做那么多项环境可靠性验收试验，况且对一般武器装备也无此必要。将环境与可靠性分开做反而省钱。当然，最近几年发展起来的 HALT/HASS 的新概念和新方法，有望成为更经济有效的保障可靠性的有力手段，但从目前状态看，尚未达到于航天型号的实用要求。

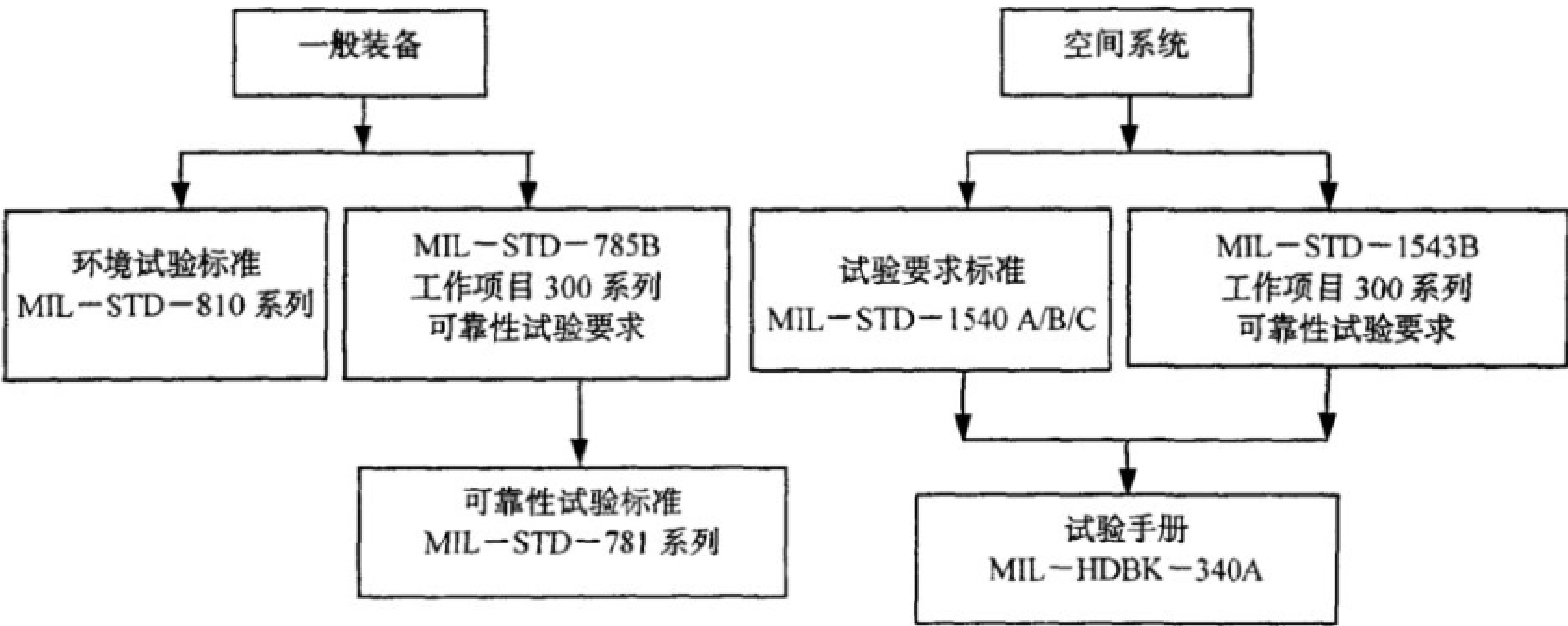


图 A.4 美军常规武器系统/航天系统的环境试验标准与可靠性试验标准关系

附录 B
(资料性附录)

×××导弹系统环境应力筛选技术条件及要求

本文件依据《×××导弹系统可靠性大纲》规定了×××导弹系统及其组成部分的环境应力筛选技术条件及要求。

B.1 环境应力筛选的目的

环境应力筛选作为产品制造过程的工序之一，其目的在于鉴别和剔除由于不良零部件、元器件、工艺缺陷和其它原因所引起的早期故障。

B.2 受筛选对象

研制阶段、大型地面试验、飞行试验和定型交付的弹载/地面电子设备（包括整机、模块和惯性器件等）。

B.3 环境应力类型、量级的确定原则

选择采用的环境应力类型一般应以尽可能剔除产品的早期故障为原则，所确定的环境应力量级不能超过产品的设计极限且不应明显影响产品的寿命和技术性能。筛选环境应力条件与产品的使用条件无关。

B.4 环境应力筛选条件要求

B.4.1 热循环

- a) 温度范围：-40℃~60℃
-40℃~70℃（不加电）；
- b) 温度变化速率：10℃/min，或两箱法转移时间不超过 3min，试件开盖；
- c) 高低温保持时间：试件内达到稳定的时间加 5min；
- d) 循环次数：8~10 次；
- e) 加电：升温及高温保持时通电，降温及低温保持时断电；
- f) 监测：有；
- g) 故障数要求：最后两个循环无故障。

B.4.2 随机振动

- a) 功率谱密度：

20Hz~80Hz	3dB/OCT
80Hz~350Hz	0.04g ² /Hz（惯性器件减半）
350Hz~2000Hz	-3dB/OCT；
- b) 轴向数：3（模块轴向数为 2）；

- c) 持续时间: 5min/每向;
- d) 加电: 有;
- e) 监测: 有;
- f) 状态: 去减振器。

B.4.3 电应力

功率老炼 200h。

B.5 筛选程序

B.5.1 初始性能检测

受筛选产品应按有关标准和技术文件进行外观、机械及电气性能检测并记录。凡检测不合格者不能继续进行环境应力筛选。

B.5.2 施加应力的顺序

- a) 第一次随机振动 (一个敏感轴向);
- b) 温度循环;
- c) 第二次随机振动 (其它轴向);
- d) 功率老炼。

B.5.3 筛选后性能检测

B.5.4 故障处理

- a) 在随机振动筛选时出现的故障, 待随机振动试验结束后排除;
- b) 在热循环时出现的故障, 每次出现故障后, 应立即中断筛选, 排除故障后再重新进行筛选。

B.5.5 中断处理

- a) 随机振动筛选因出现故障而中断后再重新进行筛选时, 中断前的筛选时间应计入筛选时间;
- b) 热循环试验因出现故障而中断后再重新进行筛选时, 扣除发生中断那个循环内中断前的筛选时间。

附录 C
(资料性附录)

×××运载器电子产品环境应力筛选的条件及要求

C.1 前言

环境应力筛选是通过施加高低温循环和随机振动应力，鉴别和剔除早期工艺缺陷和故障，保持产品固有可靠性水平的一种有效手段，是电子产品生产过程中交付验收前不可缺少的一道工序。××运载器电子产品按元器件级、单板级、整机级三个级别逐级进行环境应力筛选。本文件规定了箭上和地面的单板级和整机级电子产品进行环境应力筛选的条件及要求。元器件级筛选条件由各研制单位根据“××运载器电子产品元器件技术条件”制定，并纳入到产品研制任务书、技术要求或合同中。

C.2 箭上电子产品环境应力筛选条件

箭上电子产品环境应力筛选条件见表 C.1、C.2。

表 C.1 热循环应力条件

	整 机 级	单 板 级
温度范围	−40℃~60℃ 整机试验时开盖进行	−40℃~75℃
温变率	升温率：10℃ / min 降温率：10℃ / min 采用二箱法时，转移时间 3min	升温率：10℃ / min 降温率：10℃ / min 采用二箱法时，转移时间 3min
温控误差	高温：±2℃ 低温：±3℃	高温：±2℃ 低温：±3℃
一个循环时间	4h	1.5 h
温度保持时间	以热透为原则 高温保持时间 $t_H > 1h$ 48 温保持时间 $t_L > 1.5h$	以热透为原则 高温保持时间 $t_H > 25min$ 低温保持时间 $t_L > 35min$
循环次数	10 次 最后 2 个循环为无故障循环。 若在最后 2 个循环中出现故障， 修复后要补做 2 个无故障循环。	10 次 最后 2 个循环为无故障循环。 若在最后 2 个循环中出现故障， 修复后要补做 2 个无故障循环。
监测方式	升温和高温保持阶段通电监测	5 个温循检测一次。

表 C.2 随机振动应力条件

	单板及整机随机振动应力
频率	20Hz~2000Hz
谱形	20Hz~80Hz 3dB / OCT 80Hz~350Hz 0.04g ² / Hz 350Hz~2000Hz -3dB / OCT
功率谱密度 PSD	0.04 g ² / Hz
均方根加速度值	6.06 Grms
施振方向	三个轴向
施振时间	5min / 向
连接形式	受试产品与振动台刚性连接
监测方式	整机在振动过程中通电监测，单板振动后检测。

C.3 环境应力筛选要求

C.3.1 筛选对象

箭上电子产品及机电产品中的电子产品要 100%地进行元器件级、单板级、整机级三个级别的环境应力筛选。

地面设备中自行研制的电子产品要 100%地进行元器件级、单板级的环境应力筛选。整机级有条件做环境应力筛选的，应力条件与箭上产品相同；没有条件进行整机级环境应力筛选的设备要在验收技术条件中增加高低温存放、公路运输试验等验收项目，并纳入到研制任务书或验收技术条件中。特殊情况报总师系统批准、实施。

C.3.2 受试产品的要求

- a) 所有受试产品应具有检验合格证明；
- b) 去掉包装物；
- c) 凡是带减震装置的产品，要求与振动台刚性连接；
- d) 整机做温循试验时，要求开盖进行。

C.3.3 试验大气条件

- a) 温度 15℃~35℃；
- b) 相对湿度为不加控制的室内环境温度；
- c) 大气压力为试验场所的当地气压。

C.3.4 试验设备要求

C.3.4.1 温度循环试验箱

- a) 应满足本文件规定的高、低温范围、温变率、温控误差的要求；
- b) 受试产品在箱内的安装应保证除必要的支点外，全部暴露在空气中；
- c) 试验箱热原的位置不应使辐射热直接到达受试产品；
- d) 用于控制箱温的温度传感器应置于循环气流中，并加以遮护防止辐射影响；
- e) 受试产品周围的温度场应均匀，如果有多个试验产品同时进行试验，应使受试产品之间及受试

产品与试验箱壁之间有适当间隔，以便气流能在受试产品之间及受试产品与箱壁之间自由循环；

f) 箱内空气的温度和湿度应加以控制，使其在试验期间产品上不结露。

C.3.4.2 随机振动试验设备

凡能满足本文件规定的随机振动试验条件的振动试验台均可用于振动筛选试验。

C.3.4.3 振动试验夹具

夹具在规定的功率谱密度频率上限 2000Hz 内不应有共振频率存在，即在 20Hz~2000Hz 范围内沿振轴方向的传递函数必须保持平坦，其平度允差不得超过±3dB。如夹具不能满足上述要求时，允许频率范围在 500Hz~2000Hz 的偏差放宽到±6dB，但累计带宽应在 300Hz 以内。

C.3.4.4 试验条件允差

C.3.4.4.1 温度试验允差

除必要的支承点外，试验产品应完全被温度试验箱内空气包围。箱内温度梯度（靠近试验产品处测得）应不小于 1℃ / m；箱内温度不得超过试验温度控制偏差（高温±2℃；低温±3℃）。

C.3.4.4.2 随机振动试验允差

随机振动试验允差见表 C.3。

表 C.3 振动试验控制点谱形允差

频率范围 (Hz)	分析带宽 (Hz)	允差 (dB)
20—200	25	± 3 ^a
200—500	50	
500—1000		
1000—2000	100	± 6 ^b
^a 如有困难时，允差放宽到-6dB，但累计带宽应在 100Hz 以内。		
^b 如有困难，允差可放宽到-9dB，但累计带宽应在 300Hz 以内。		

C.3.4.4.3 试验时间允差

试验时间的允差为±1%。

C.3.4.5 监测仪表

用于试验监测的仪表应满足以下要求：

具有计量合格证明；

测试准确度应不低于被测参数允差的 1/3。

C.3.5 故障处理

在随机振动试验时出现故障，待振动试验结束后排除。在温度循环试验时，每次出现故障后，应立即中断试验，待故障排除后，重新进行这个循环的试验。

出现两次重复故障或出现三次不同故障的产品不能交付。

C.3.6 中断处理

试验因故中断后再进行试验时，中断前的试验时间计入试验时间对温度循环则要扣除中断所在循环内中断前的试验时间。

C.3.7 制订筛选试验大纲

在筛选试验前，要按照本文件制订筛选试验大纲，其主要内容包括：

- a) 进行筛选的产品；
- b) 施加环境应力的类型、水平、简要过程、承受应力的时间；
- c) 试验期间内应监控的产品性能和应力参数；
- d) 筛选程序，见表 C.4。

表 C.4 筛选程序

序号	程 序		依据的文件	要 求
1	初始性能检测		产品技术要求	按产品技术要求进行外观、机械及电气性能的检测并记录。检测合格者才能参加环境应力筛选。
2	缺陷剔除	随机振动	表 C.2	
		温度循环	表 C.1	
3	无故障检验	温度循环 随机振动	表 C.1 及表 C.2	若出现故障，允许修复一次。修复后至少要重做 2 个温循并重做无故障检验随机振动。
4	最后性能检测		产品技术要求	通过无故障检验随机振动的产品按产品技术要求逐项检测并记录，将最后性能与初始测量值比较，对产品进行评价。不满足产品技术要求的产品不能交付。

C.3.8 试验数据采集、故障分析与纠正措施

- a) 在环境应力筛选期间，要采集各种信息，包括受试产品、受试产品间的接口、 试验仪器仪表、试验装置、试验程序、试验人员和操作说明；
- b) 在环境应力筛选期间，出现故障时，要按要求报告，并及时进行故障分析，采取纠正措施。

附录 D
(资料性附录)

若干航天系统产品环境应力筛选技术条件及要求的综述

D.1 筛选前的准备与测试要求

- a) 筛选前准备状态应满足筛选大纲，测试细则及其它专用技术条件的要求；
- b) 筛选前，必须按专用技术条件对筛选前准备状态进行检查，确认无误时才能正式筛选；
- c) 电性能的功能测试要求如下：
 - 1) 按测试大纲（或细则）及试验工况设置产品工作状态；
 - 2) 认真监测、判断和记录被筛选产品工作情况和各种数据；
 - 3) 按有关的规定，进行试验中的故障分析与处理；
 - 4) 产品在筛选前、后均需做性能检测。

D.2 热真空试验

热真空试验组件级，分系统和系统级的产品都要进行的而且对航天产品来讲这种环境应力筛选手段是不可缺少的，它是一种复合环境的应力筛选也是航天系统产品所独有的。

D.2.1 组件级热真空试验

D.2.1.1 试验剖面

下述过程为一个完整循环，如图 D.1 所示。

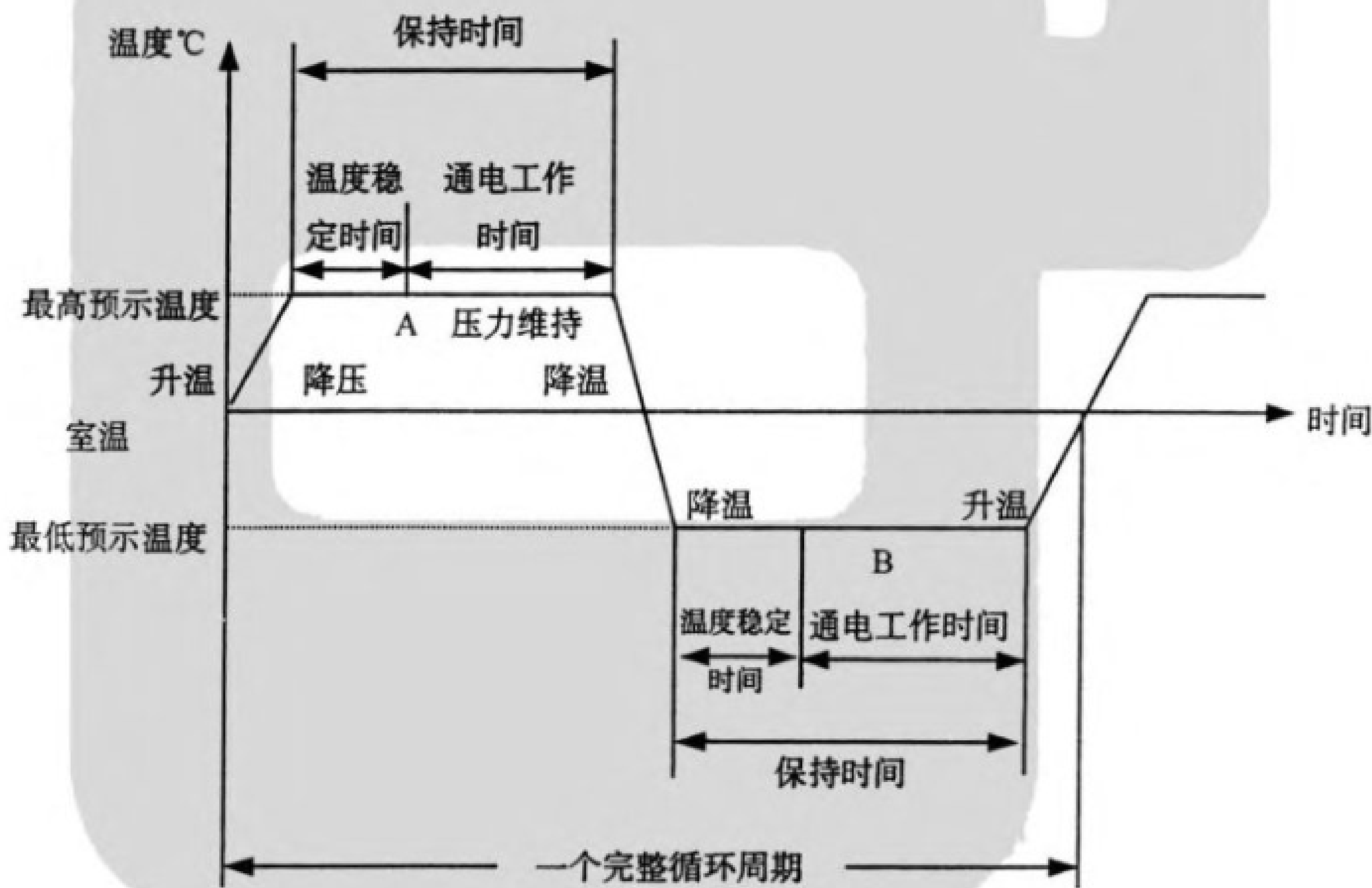


图 D.1 组件级热真空试验循环过程示意图

D.2.1.2 试验应力条件

- a) 压力：由常压降至 $6.5 \times 10^{-3} \text{Pa} \sim 1 \times 10^{-3} \text{Pa}$ ；
- b) 试验剖面 A、B 端温度：取产品的最高、最低预示环境温度；
- c) 温变率：为预计的在轨温度变化率；
- d) 循环次数：1.5~2.5 次。

D.2.1.3 温度控制点选择

试验产品的非热源设备底板上。

D.2.1.4 试验工况温度稳定判据

试验剖面 A、B 端的温浸时间视产品热惯性而定，以设备冷透和热透为原则（即在 30min 内其温变率达到 $\leq \pm 3^\circ\text{C/h}$ ）。

D.2.1.5 产品性能测试

- a) 试验产品温度稳定后，进行热（冷）启动，模拟在轨工作模式，连续通电工作不少于 4h 并进行电压拉偏试验。如果在轨道上需多次重复开、关机的仪器设备，在不同热状态下，开、关机次数应不少于三次（包括备份部分）。
- b) 在进试验容器前和出试验容器后要性能检测。试验后性能指标应满足设计要求。
- c) 在试验容器的压力下降过程中，试验产品处于低气压区 1.33Pa 以前的范围内应监视是否产生放电现象。当达到规定压力时高压微波组件要检测其性能有否产生微放电现象。

D.2.1.6 试验要求

- a) 试验加载系统、试验测量、数据采集处理系统等要满足试验大纲技术条件的要求；
- b) 试验产品尺寸大时应在壳体多个位置安装温度控制点；
- c) 试验容器内热沉温度不大于 100K ，热沉表面半球向发射率不小于 0.9，注入气体应干燥、清洁；
- d) 如试验产品不能加真实负载，允许采用模拟负载来代替；
- e) 安装试验产品的悬挂支撑或固定装置不能使用高换气量材料和含污染物质的材料，并要尽可能减少热沉和试验产品之间的遮挡；
- f) 试验容器上的连接电缆要有良好的绝缘性能且真空密封可靠，重要试验产品应进行污染检测；
- g) 试验过程中要详细记录，发现异常或故障时应冻结试验状态（记下供电状态，异常现象等）。

D.2.1.7 试验步骤

试验一般按图 D.2 所示流程进行。

D.2.1.8 试验中断和故障处理**D.2.1.8.1 试验中断判据**

遇到下列情况之一者试验应中断：

- a) 试验设备达不到试验技术条件要求；
- b) 试验产品出现故障，或主要参数的性能指标不能满足设计要求。

D.2.1.8.2 故障处理

- a) 试验系统的设备故障经检修后确认正常后才能重新启动试验；
- b) 试验产品出现故障应停机，待产品恢复到环境温度后，取出试验产品进行故障和异常现象定位；
- c) 试验产品经修复后，确认工作性能正常后才能装进试验容器继续试验。在装进之前是否需要补

做那一类型的试验视具体情况而定。如要更换元器件时，一般应是同批次并经过筛选后的产品；

d) 试验从头开始，以前的试验时间不计入试验总时间内。

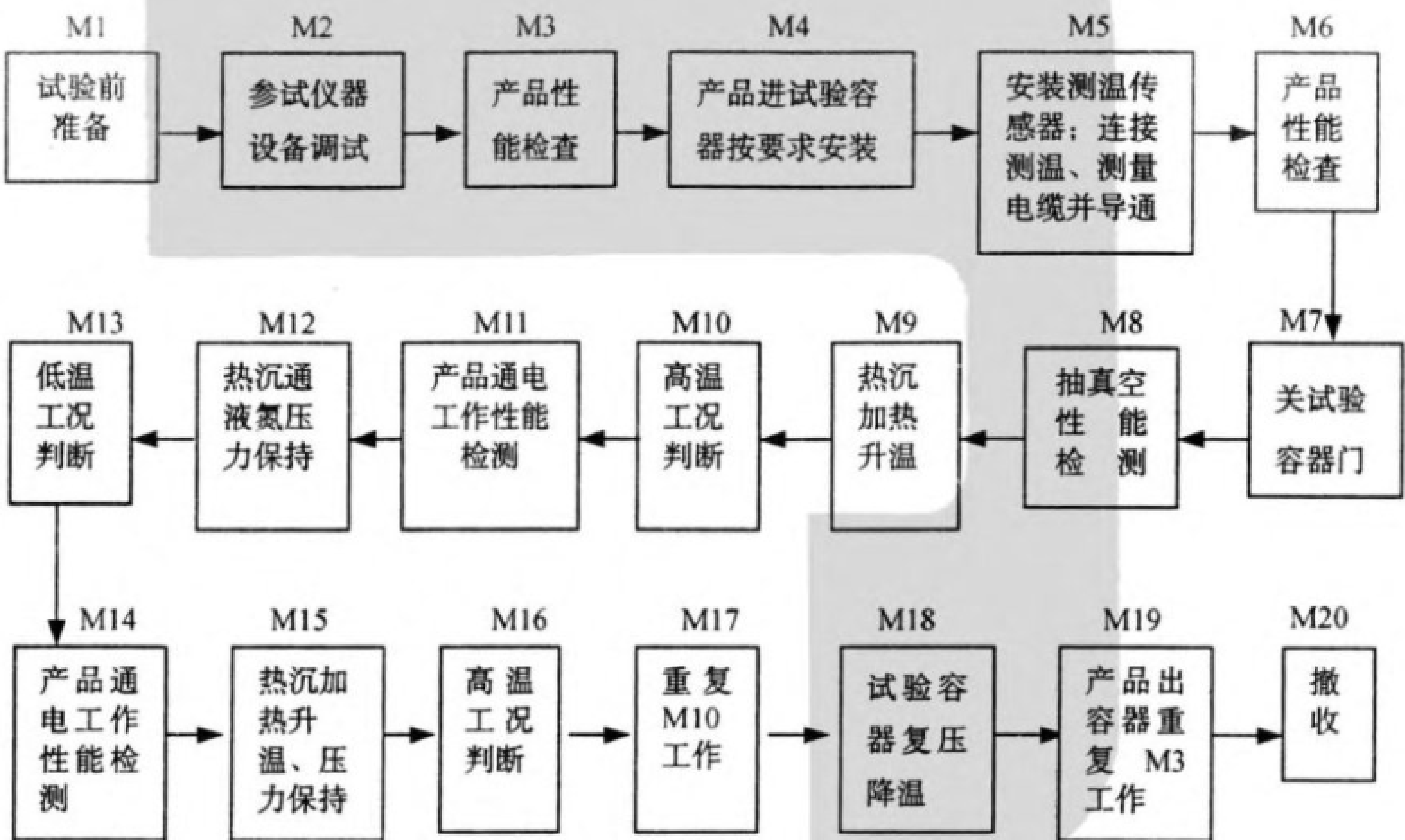


图 D.2 热真空试验步骤流程

D.2.1.9 国内外组件热真空试验的主要参数综述

真空热循环和常压热循环一样，主要筛选参数是温度变化范围、温变速率和循环次数等。

D.2.1.9.1 循环次数和工作时间

组件级的热真空热循环次数，对电子电气组件至少应做 4 个循环。在第一次和最后一次循环时，在热端和冷端温度下，至少应工作 6h。在两个中间循环应工作 1h。对其它组件只进行一次热循环。在每次工作期间，组件应断电直至温度稳定，然后再通电工作检测性能。如图 D.1 所示。组件温度特性测试因为和组件的热惯性有很大关系，因此，规定应以产品热透和冷透 ($\leq 3^{\circ}\text{C/h}$) 为准则，此时开始模拟在轨工作模式连续工作规定的小时数，在返回式卫星中规定要连续工作不少于 4h。

D.2.1.9.2 温变率

根据 MIL-STD-1540C 要求，温变率 $\geq 1^{\circ}\text{C/min}$ 。

D.2.1.9.3 温度范围

对一般电子电气组件要求其温度范围应尽量宽，对无特殊限制的组件，低温 -44°C ，高温 61°C 。其温度范围是 105°C 。有特殊要求则据其设计能力逐一规定。对于一些特殊组件如蓄电池，机电产品，太阳帆板等也需逐一加以考虑。

D.2.1.9.4 试验容器的压力

按 MIL-STD-1540C 规定，试验容器的压力为 $1.3 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 。实践证明真空状态下，由于在失重环境中无对流导热，故真空度对卫星温度分布影响极小，因而从传热角度来讲可不必对压力要求太高。

D.2.2 分系统和系统级的热真空试验

D.2.2.1 筛选试验剖面

与 D.2.1.1 相同。

D.2.2.2 筛选应力条件

除循环次数外，其它与 D.2.1.2 要求相同。

D.2.2.3 温度控制点选择

对于几何尺寸及质量都较大的分系统和系统级产品采用多点控制。控制点的选择原则是以对温度最敏感的仪器设备处做为控制点

D.2.2.4 试验工况温度稳定判据

除 D.2.1.4 的判别外，并视 80% 以上的温度控制点达到规定值时为温度稳定。

D.2.2.5 产品性能测试

- a) 当试验工况稳定后，产品通电工作每个循环在高温工况和低温工况各热（冷）浸时间不少于 8h，在此期间产品模拟在轨工作模式循环工作（包括备份设备电路）并进行电压拉偏试验；
- b) 性能测试其它要求与其它筛选项目要求相同。

D.2.2.6 试验要求**D.2.2.6.1 试验设备要求**

- a) 真空容器要求：
 - 1) 真空室器压力应优于 $1 \times 10^{-2} \text{Pa}$ ；
 - 2) 热沉温度不高于 100K；
 - 3) 热沉表面半球向发射率不小于 0.90；
 - 4) 可凝挥发物沉积量总污染量小于 $1 \times 10^{-7} \text{g/cm}^2$ ；
 - 5) 密封法兰的电接口路数应满足产品综合测试，加热和测温等要求。
- b) 外热流加热装置和加热功率系统：
 - 1) 外热流加热装置加热功率应满足试验技术条件要求；
 - 2) 地面电源，配电装置应满足试验要求，电源输出电压应连续可调，电压变化量小于 0.1V；
 - 3) 每个加热回路应在过流、过压、短路、断路保护及报警功能。
- c) 测量系统：
 - 1) 试验容器内应有足够电缆提供试验使用；
 - 2) 测温电缆在 100V 下的绝缘电阻应大于 $100 \text{M}\Omega$ 。
- d) 温度数据采集和处理装置：
 - 1) 电压分辨率，温度测量误差要满足使用要求；
 - 2) 应有存储、显示、打印和适时绘图功能。
- e) 试验产品支架：
 - 1) 应有足够承载能力和可调节性能；
 - 2) 应有隔热措施。
- f) 测温传感器的要求：

测温传感器的个数和精度应满足使用要求。

D.2.2.6.2 安装要求

- a) 试验产品安装：

- 1) 试验产品用玻璃钢块隔热通过螺栓固定在支架上;
 - 2) 如果用加热笼给试验产品加热, 与试验产品表面距离约为 100mm;
 - 3) 试验产品的地线与试验容器地桩相连。
- b) 热流计安装:
- 热流计的感温面与星体表面平行, 用压敏胶带固定在试件表面。

D.2.2.6.3 测量要求

- a) 环境参数测量:
- 1) 每日测量、记录温度、湿度、洁净度;
 - 2) 试验容器内从预抽真空开始到结束按规定时间间隔测量并记录压力和热沉温度;
 - 3) 试验容器内污染测量, 按规定时间间隔测量并记录。
- b) 温度和热流加热功率测量:
- 按规定时间间隔测量、记录和打印全部测点温度和加热回路加热功率数据。

D.2.2.7 试验中断和故障处理

D.2.2.7.1 中断试验数据

遇到下列情况之一者试验应中断。

- a) 试验设备故障:
- 1) 试验容器压力高于 $1.3 \times 10^{-2} \text{Pa}$;
 - 2) 试验容器热沉温度高于 100K;
 - 3) 试验产品外表主要加热回路断路或对热流不能满足试验要求;
 - 4) 测温系统故障无法进行正常测温。
- b) 受筛选产品故障:
- 1) 试验产品上有效载荷不能正常工作;
 - 2) 试验产品上电源不能正常工作;
 - 3) 试验产品测控系统不能正常工作。
- c) 试验产品上某些系统的仪器设备与地面试验、测量系统发生严重干扰不能正常工作。

D.2.2.7.2 故障处理

与 D.2.1.8.2 故障处理基本相同, 但试验设备的性能参数虽超出规定范围而在有关技术文件允许范围可以继续试验。试验产品上某些组件虽存在故障而采取了补救措施, 不影响主要性能或功能的可以继续试验。

D.3 组件级温度循环和老炼试验

由于温度循环试验和用温度循环的老炼试验其目的和做法是一致的。因此可合并为一项试验即温度循环试验。而把原老炼试验中含有活动部件或以循环次数老炼部分分出来规定为磨合试验。但仍可把温度循环和老炼试验分开考虑, 如 ESA 标准中的做法。

D.3.1 电子电气组件的温度循环和老炼试验

电子电气组件的温度循环试验和老炼试验的试验技术条件和试验方法是完全一致的。

D.3.1.1 试验技术条件

D.3.1.1.1 试验剖面

试验循环过程如图 D.3 所示。

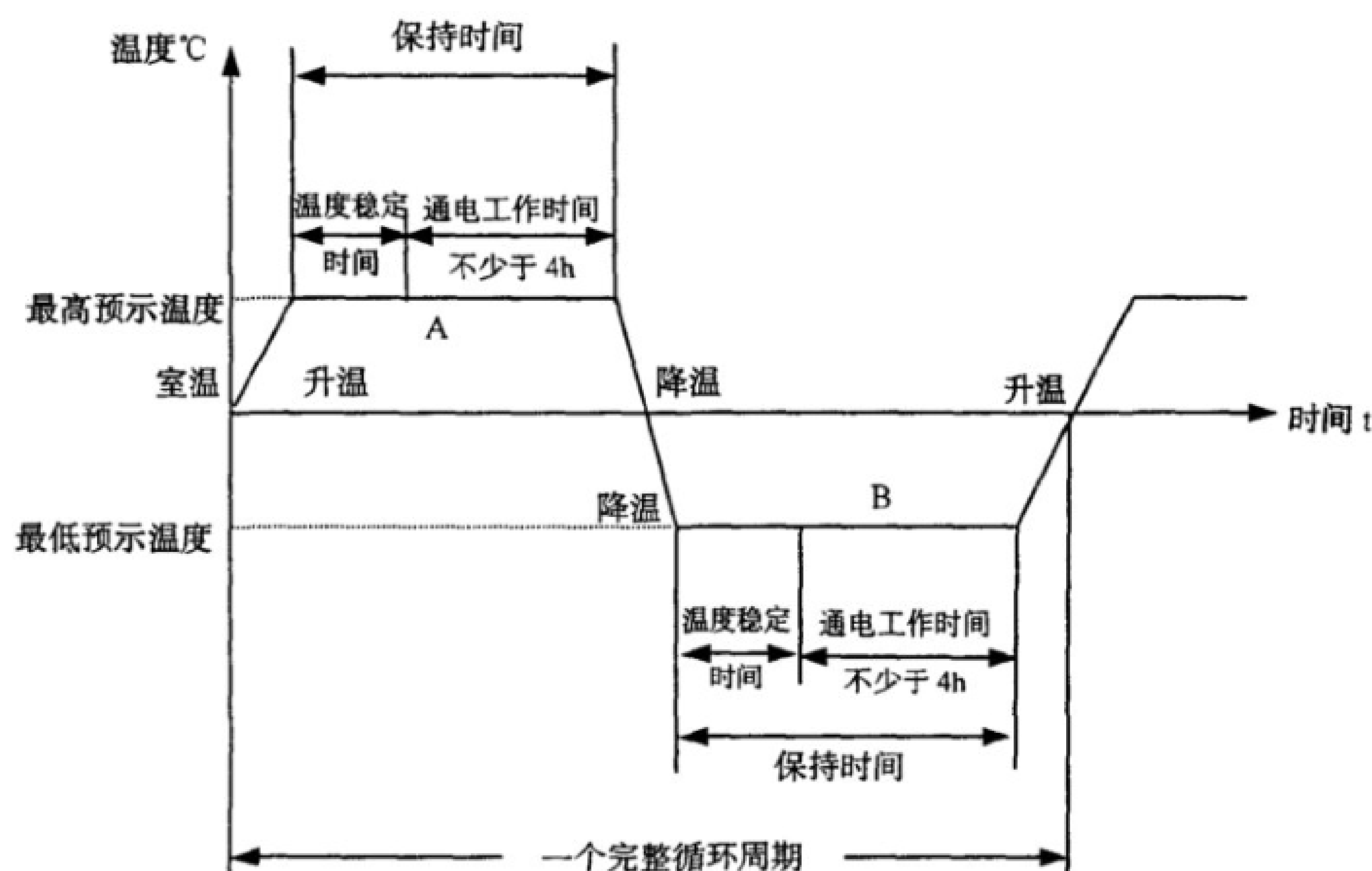


图 D.3 组件级温度循环试验过程示意图

D.3.1.1.2 试验应力条件

- a) 压力：试验室压力；
- b) A、B 端温度：最高、最低预示环境温度；
- c) 温度变化率： $2^{\circ}\text{C}/\text{min} \sim 3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ；
- d) 循环次数：累计（含热真空循环时间）应达到 240h~300h。

D.3.1.1.3 温度控制点选择

试验产品非热源处的底板或壳体上。

D.3.1.1.4 试验工况温度稳定数据

A、B 端温度稳定时间视产品热惯性大小而定以产品热透和冷透为原则。

D.3.1.1.5 产品性能测试

- a) 试验产品进、出试验箱前后要进行性能测试；
- b) 试验产品温度稳定后，开始计时进行热（或冷）启动，并应连续通电工作不少于 4h，模拟在轨工作模式，如果在轨道上需多次重复开、关机的仪器设备，在一个循环不同温度状态下开关机次数应不少于三次；
- c) 试验产品在第一个循环和最后一个循环要进行详细的性能检测，中间循环可以只对主要性能参数进行监测。备份部分也应进行温度循环规定小时数。

D.3.1.1.6 试验要求

- a) 如果试验产品不能加真实负载应用模拟负载代替；
- b) 在试验非密封产品时，应采取措施避免在低温时产品表面和内部产生冷凝水。在试验箱内应充干燥空气或氮气。试验箱内温度不均度 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ ；

- c) 试验由高温开始，最后半个循环应是热状态的半个循环；
- d) 在升温时，试验产品可以通电工作当达到规定温度 A 后，断电待产品温度稳定后，再进行热启动，后使产品工作。当降温时，产品断电，在达到冷端 B 温度后，待产品温度稳定后再进行冷启动重新使产品工作。在高、低温端应进行电压拉偏试验，一般规定标准值的±10%。

D.3.1.1.7 筛选合格判据

- a) 温度循环试验规定为应完成 6~9 个完整的循环，最后 2 个循环为无故障循环；
- b) 老炼试验规定时间为温度循环、真空热循环加最后老炼温度循环累计应达到 240h~300h，最后 100h 应为无故障；
- c) 同一故障模式不能重复出现，不同模式的故障不能超过三次。

D.3.1.1.8 筛选中断和故障处理

- a) 有下列故障之一者，必须中断筛选，待故障排除后再继续筛选：
 - 1) 筛选设备主要性能参数不能满足筛选要求；
 - 2) 受筛选产品或受筛选产品测量（试）系统发生故障，无法进行各项参数正常测试。
- b) 筛选中断处理：
 - 1) 筛选设备和测量系统不能满足筛选要求的故障中断，待故障排除后继续筛选，中断期间筛选条件满足技术要求的，中断前的筛选时间应累计到总筛选时间里，否则不能计入；
 - 2) 筛选产品故障或故障的中断，如发生在低温工况 B 端时，应使产品温度恢复到试验室内环境温度且温度稳定后才能开试验箱取出产品；
 - 3) 做老炼试验时在 100h 以前出现故障受筛选产品经修复后继续筛选，如要更换器件，一般应是经过严格筛选的同批次器件。更换后是否补做其它筛选应视具体情况而定。故障前的筛选时间一般是不计入筛选总时间内。100h 以后出现故障应确保修复后的产品至少有 100h 无故障的时间。

D.3.2 活动部件的老炼试验

这个试验主要是以工作循环试验有效地暴露出活动部件中的早期故障组件。工作循环次数为寿命循环次数的 5%，或至少进行 100 个循环。

D.4 振动/声试验

- a) 对声不敏感的组件进行低频正弦扫频和宽带随振动试验，对声敏感的还要进行声试验；
- b) 对于质量小于 2270kg 的分系统和系统，只进行低频正弦扫频和宽带随机振动或声试验；
- c) 对于质量大于 2270kg 的一般要进行低频正弦扫频振动、声试验和窄带随机振动。

D.4.1 组件级振动试验

D.4.1.1 正弦对数扫频振动试验技术条件

组件级正弦对数扫频振动试验技术条件见表 D.1。

表 D.1 组件级正弦振动试验技术条件

振动方向	频率 (Hz)	振动量级 (g)	扫频率 (OCT/min)
分别沿试验产品三个互相垂直轴向加载	5~100	最高预示环境量级 (不同舱段不同位置的量级不同)	每个轴向 4 OCT/min

D.4.1.1.1 加载控制点选择

- a) 被试产品直接固定在振动台面上的振动控制点可以直接选在振动台台面上;
- b) 如果通过振动支架与振动台固连, 加载控制点一般选在振动支架与产品连接面处;
- c) 如果试验产品带真实支架的, 振动加载控制点一般应选在支架与台面连接面处。

D.4.1.1.2 加载控制方式

有单点控制和多点控制两种可选择。

D.4.1.1.3 产品性能测试

在试验前、后要按产品性能测试大纲要求进行电性能和功能测试。试验中要监测主要参数。

D.4.1.1.4 试验设备要求

- a) 试验加载、测量、记录等系统应能满足试验技术条件要求;
- b) 试验产品性能测试设备应能满足性能测试大纲要求;
- c) 振动试验夹具的固有频率应尽量高, 一般要求要高于试验产品一阶固有频率 3~5 倍以上。
- d) 振动台漏磁量要满足试验产品的要求。

D.4.1.2 随机振动技术条件

组件级随机振动试验技术条件见表 D.2。

表 D.2 组件级随机振动试验技术条件

振动方向	频率范围 (Hz)	振动量级 PSD (g^2/Hz)	总均方根值 (Grms)	每个轴向振动时间 (s)
分别沿试验产品三个 互相垂直轴向加载	10 (或 20) ~ 2000	最高预示环境量级 (不同舱段不同位置 量级不同)	一般范围 6.06~12, 但最低不能小于 6.06	60
注: 试验产品质量 < 23kg, 若 > 23kg 要进行修正。修正方法见 5.2.6.4。				

D.4.1.3 组件级声试验

本试验主要是针对对声敏感组件进行的, 如太阳帆板, 抛物面天线等; 其试验技术条件见表 D.3。

D.4.1.3.1 加载控制点选择

控制传声器位置应离试验产品表面 500mm 处, 在试验产品周围安装的控制传声器不应少于 3 个, 均布在试验产品的四周围一平面内。

D.4.1.3.2 加载控制方式

一般情况对声谱和总声压级进行多点平均闭环控制, 也可以选用一个主要测点控制。

D.4.1.3.3 试验要求

- a) 设备要求:
 - 1) 混响室的体积应 10 倍于试验产品体积以上;
 - 2) 混响室(空室)的模态密度要求应是连续谱或满足每倍频带有 21 个模态;
 - 3) 混响室(空室)有效空间内总声压级的空间均匀度应满足规范值的 -2dB~4dB 范围内的要求;
 - 4) 试验件在混响室内安装时, 应避免其主平面与混响室的内表面平行, 且应保持尽量大的距离;

表 D.3 组件级声试验技术条件

倍频带中心频率 (Hz)	声压级 (dB)	试验允差 (dB)
31.5	118~122	-2~5
63	124~128	-2~4
125	132~136	-2~4
250	136~140	-2~4
500	138~142	-2~4
1000	135~139	-2~4
2000	127~131	-2~4
4000	123~127	-2~4
8000	116~120	±5
总声压级 (dB)	142~146	-1~3
持续时间 (s)	60	

5) 试验产品的支撑或吊挂系统的固有频率应低于 25Hz。

b) 加载要求:

- 1) 混响室预调可用空室预调,从低声压级开始,逐步增加到使声谱满足试验条件要求。预调时控制传声器的位置应与正式试验时一致;
- 2) 当试验产品较大对声场有较大影响时,可以采用模件和试验产品外形相似的试件进行预调,从低声压级开始逐渐调到满足试验要求的声压级,预试时控制传声器位置亦应与正式试验时一致;
- 3) 如果上述两法均不适用时,可用试验产品直接预调,但试量级应低于正式试验的满量级的 6dB;
- 4) 加载可采用分级方式,一般以 3dB 为一级,作短暂停顿性加载,在此期间,通过实时显示声谱的观察、判断和调整,作出能否继续加载的决定;
- 5) 试验可以用开环或闭环测控方式。在开环控制时,按预设置被控参数,再依据实时显示声谱和总声压级作相应修正。

D.4.2 系统级振动试验

D.4.2.1 正弦对数扫频振动试验技术条件

系统级正弦对数扫频振动试验技术条件见表 D.4。

表 D.4 系统级正弦振动试验技术条件

条件/种类	振动方向	频率 (HZ)	振动量级	扫描速率 (OCT/min)
I	x、y、z	5→8	2.34mm~3.35mm (o-p)	4
		8→100 (200)	0.6g~0.86g	
II	x、y、z	5-8	3.13mm (o-p)	4
		10-30	0.8g	
		30-100 (200)	1.3g~2g	

D.4.2.1.1 控制点位置的选择

一般情况都是选在试验产品与振动支架连接面上，产品的四个象限每个象限一个控制点。
如果要作响应控制，有的控制点也可选在试验产品对振动敏感的组件上参加加载控制。

D.4.2.1.2 加载控制方式

除 D.4.1.1.2 控制方式外，系统级试验可以进行响应控制以确保关键件不致过应力损伤。

D.4.2.1.3 试验产品性能测试要求与试验要求

测试要求与 D.4.1.1.3 相同。试验设备要求与 D.4.1.1.4 相同。

D.4.2.2 随机振动试验技术条件

系统级随机振动试验技术条件见表 D.5。

表 D.5 系统级随机振动试验技术条件

条件种类	振动方向	频率范围 (Hz)	功率谱密度 PSD (g^2/Hz)	总均方根值 (Grms)	加载时间 (s)
I	x	10—100	3dB/OCT	5.73~8.10	60
		100—600	0.04~0.08		
		600—2000	-9dB/OCT		
II	x	10—80	0.0030~0.0042	5.2~6.82 (6.2)	60
		80—300	6dB/OCT		
		300—800	0.03~0.043		
		800—2000	-6dB/OCT (或-12dB/OCT)		

注：Y 向、Z 向谱形与 X 向相同，但其总均方根值 (Grms) 较 X 向降低 25%。

D.4.2.3 声试验技术条件

系统级声试验技术条件见表 D.6。

D.4.3 振动和声试验中断及其故障处理

组件级和系统级的振动与声试验的中断和故障处理基本相同。

- a) 由于试验设备出现故障造成试验中断，在设备故障排除并确认试验产品未受影响后，继续进行试验；
- b) 因试验加载出现欠试验或过试验不满足试验技术条件要求时，要中断试验，待查出原因后重新设置加载量级进行试验。如是欠试验时，中断前的试验时间无效，试验应重新开始，如果是过试验时，若确认试验产品未受任何影响，可从中断点开始继续试验，中断以前的试验时间应计入总试验时间；
- c) 由试验产品及其测试设备发生干扰或故障而引起中断，则在干扰或故障排除后，重新开始试验；
- d) 若产品上的关键设备出现故障异常，应中断试验并及时记录故障现象、产品供电状态和性能参数等并冻结异常或故障时的状态。若要复现故障或异常的现象，允许以低规范值 1/3 的量级进行；
- e) 若试验产品故障或异常经确认和定位后，在需要更换元器件时，应更换经过严格筛选的同批次的，更换后的产品经性能测试确认正常后，在继续试验之前（或之后）是否要补做其它试验项目的试验应视具体情况而定。

表 D.6 系统级声试验技术条件

倍频带中心频率 (HZ)	声压级 (dB)	试验允差 (dB)
31.5	118~120	-2~5
63	124~126	-2~4
125	132~134	-2~4
250	136~138	-2~4
500	138~140	-2~4
1000	135~137	-2~4
2000	127~129	-2~4
4000	123~125	-2~4
8000	116~118	±5
总声压级 (dB)	142~144	-1~3
持续时间 (s)	60	

D.5 冲击试验

冲击试验对产品内存在有多余物（小金属颗粒）、材料缺陷和加工引起的缺陷（如继电器的簧片刚度不一致）可起到很好检验作用。系统级冲击试验主要是有效载荷的分离试验，对于原型飞行用的航天系统产品，一般要做此试验。它利用实物火工装置爆炸试验直接检验有效载荷的耐冲击能力和验证分离系统及供配电的合理性与可靠性。

对于航天器的产品来讲主要冲击源是火工装置。其引爆时会产生剧烈爆炸冲击载荷。组件级冲击试验采用冲击响应谱来进行模拟。试验技术条件见表 D.7。

表 D.7 冲击响应谱试验技术条件 (Q=10)

条件种类	频率范围 (Hz)	量级 (g)	方向 ^a	次数	持续时间 (ms)
I	100→400 (1000)	6dB/OCT→8dB/OCT	分别沿试验产品三个相互垂直的轴向加载	每个轴向一次	20
	400 (800) →3000	500~1200			
II	100→1000 (1500)	8dB/OCT→10dB/OCT			
	1000 (1500) → 8000	1500~3000			
^a 三个方向冲击至少有一个轴向的 50%的谱值应大于标称值，对轴对称产品可仅做两向。					

试验产品在试验前后要进行性能测试，在试验过程中要监测产品有无间歇性故障或异常现象。这对使用继电器作为开、关控制的产品其触点是否翻转尤为重要。

中华人民共和国航天行业标准
航天产品环境应力筛选指南
QJ 3138—2001

•

中国航天标准化研究所出版
北京西城区月坛北小街 2 号
邮政编码：100830

北京航标印务中心印刷
中国航天标准化研究所发行
版权专有 不得翻印

•

2002 年 02 月出版
定价：33.00 元