

## 综 述

## 系统级产品环境试验与评估若干问题探讨

赵保平, 张韬

(北京机电工程研究所, 北京 100074)

**摘要:** 根据近年来系统级产品的典型问题, 分析了系统级产品环境特点, 提出了系统级产品环境问题的相关理论, 具体给出了相应的试验设计思路、方法以及环境适应性评价方法。

**关键词:** 环境试验; 环境适应性; 航天产品

**中图分类号:** V416.5      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2012)06-0054-09

## On Environmental Test and Evaluation of System Grade Products

ZHAO Bao-ping, ZHANG Tao

(Beijing Mechano-electronic Engineering Institute, Beijing 100074, China)

**Abstract:** The environmental worthiness characteristics of system grade product were analyzed based on typical cases in recent years. Relevant theory for environmental worthiness problems of system grade product was discussed. Test design thought, methods, and evaluation methods were put forward.

**Key words:** environmental test; environmental worthiness; aerospace product

航天产品因构成复杂、功能/性能要求多、任务完成过程复杂, 在完成设备、分系统级试验后, 系统级试验仍会存在相应的协调匹配等问题。由于建模简化及模型认识不足等原因, 系统存在的问题难以完全依靠理论分析获得清楚的认识, 也可能出现难以把握的新问题, 因此需要进行系统级试验。同时系统级试验中也会出现设备、器件、材料、结构等问题, 以至于不少产品设计人员对试验本身产生疑问, 为何做了试验还出问题? 甚至设备研制单位与总体集成单位因此产生矛盾, 到底是系统试验造成了设备问题还是设备仍存在问题? 实际上不仅仅是单纯

的试验方法问题, 而且存在着是否可以验证, 验证哪些功能, 如何验证这些功能, 产品设计需要为验证付出多大代价, 验证到何种程度, 产生多大副作用等相伴而生的问题。因此, 系统级试验技术、试验系统、实施方法、评价方法等难度较大。

## 1 系统级产品试验的典型案例分析

## 1.1 典型问题案例

在航天产品研制中出现过几类系统级产品问题

收稿日期: 2012-08-13

作者简介: 赵保平(1962—), 男, 河北石家庄人, 研究员, 主要从事产品环境工程、环境试验和可靠性试验技术研究和管理工作。

和试验现象。1) 某产品公路运输跑车试验,在中等速度运行时出现强烈的俯仰运动。产品测试振动数据与底盘固有振动频率相比较,实测数据的频率上限明显高于底盘固有频率,且具有超高斯分布特性。2) 某产品使用中出现问题,经排查明确为某传感器振动问题引起超差,但该传感器的敏感振动频率远超出外界激励的频率上限。3) 某产品改进设计,采用同样的试验条件,改进后产品内部的零部件损坏。4) 某产品使用中出現裂纹,但研制过程中的温度试验条件远高于使用温度。5) 某产品在温循试验中出現结构断裂。

### 1.2 通常设计队伍提出的环境问题

来自总体、分系统专业的设计人员和型号管理人員的常见问题如下:

做了设备试验,为何还要做系统级试验?

从元器件开始,每个层次都做试验,会不会产生损伤并影响寿命?

为何做了环境模拟试验还要做自然暴露试验?

为何做了环境模拟试验但使用中还会出现問題?

产品设计是否满足要求?

什么是系统级問題?

做过试验后到了上一级试验为何还出问题?

鉴定/定型按相应国军标做了试验,但到使用时为何还出问题?

严格按照国军标的试验条件和试验方法做了试验,出厂后还会不会出问题?

上述典型案例和提出的疑問一般很难给出定论或回答,在产品试验中很多试验项目往往按照国军标执行,很难变通。至少从总体上说明我们对试验目的研究不够、需求认识不清楚且与产品功能之间存在的关系尚需深入研究。只有从理论分析和具体問題上都有了充分认识,才能回答上述問題,且提出合理可行的多快好省的试验方案。

## 2 系统级试验問題与设备级试验的差别

### 2.1 系统级航天产品构成特点及相应环境特点

航天产品由于其特殊的功能要求而形成多层结构。由于层次多,外部环境一般作用在产品表面,结

构传递过程中产生诱发作用,如存在结构工艺、间隙、多体、材料、非线性等情况,在外界环境作用下会产生诱发环境<sup>[1]</sup>。内部设备工作也会产生较多的诱发环境。层次越多,诱发环境越可能会占据环境因素集合的主要部分。

一般的产品构成如图1所示,产品构成为多个层次。每个层次的设备、结构等功能各不相同,内部各设备之间存在相互协调匹配、相互影响,功能不同的相应结构的环境要求不同。系统级产品环境性适应性设计的主要任务就是处理好不同层次、不同功能的产品协调匹配,降低相互之间的影响,消除诱发环境,降低产品环境敏感性。在多层次产品中,上一级是下一级产品的平台。应尽量减少安装层次;层次越多,末端观测性、维修性越不好;层次越多,环境传递路径越复杂,中间不可知因素越多,诱发环境越多;产品越复杂,相应的下一级数量越多,数量导致环境复杂,相同功能会增加产品质量和结构;层次越多越复杂,就越可能多地存在着设计上并不希望的特性和多余现象。这些特性决定了可能的诱发环境以及应力敏感性,也是设计中分析与试验的难点所在。

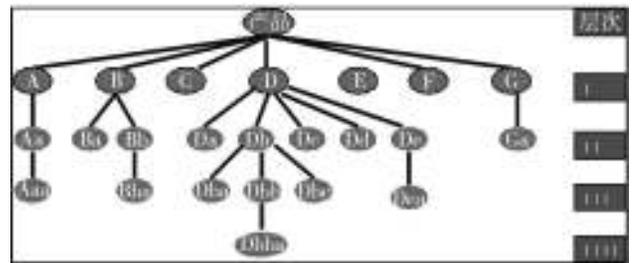


图1 产品构成层次

Fig. 1 Product structure tree

复杂产品的诱发环境模型如图2、图3所示<sup>[1]</sup>。

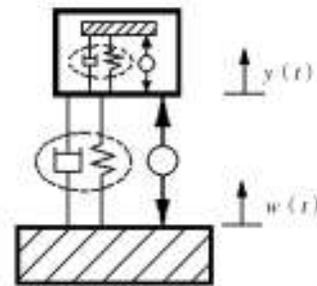


图2 系统内部环境模型

Fig. 2 System internal environment model

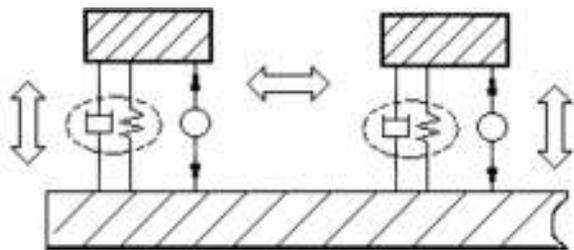


图3 系统相互影响模型  
Fig. 3 System coupled model

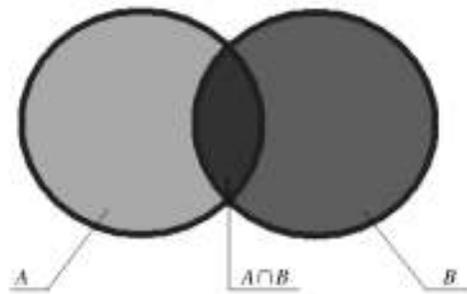


图5 A, B集合求交  
Fig. 5 Intersection of set A and set B

某设备单独使用与安装在相应系统级产品内部的环境集合变化如图4所示,图中集合A为设备独立工作

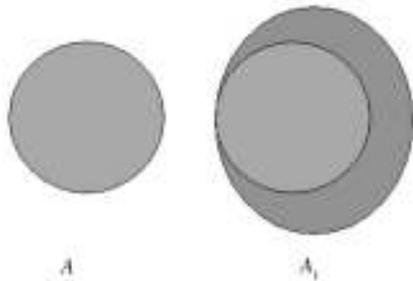


图4 系统级产品环境集合  
Fig. 4 Environmental set for system grade product

时经历的环境理想集合,  $A_1$  为在系统级产品内部的环境集合。设备所受影响的环境类型增加, 将大于集合A。

## 2.2 系统级产品环境问题基本理论

### 2.2.1 产品寿命期环境与产品敏感应力交集理论

环境应力对产品产生的作用具备以下3个条件才可能对产品产生不利影响:

- 1) 环境必须是产品在其寿命周期内所经历的;
- 2) 环境应力必须达到一定量值;
- 3) 该应力必须是产品敏感的。

因此,在产品寿命周期中,产品遇到的环境并不是全部都产生有害影响,造成产品破坏的敏感应力未必都存在。两者之间的关系如图5所示<sup>[3]</sup>。

图5中,  $A$  是产品使用环境中有一定出现概率、出现后有有一定应力水平的各环境因素的集合;  $B$  是产品结构和性能敏感的各环境应力集合;  $A \cap B$  则为需要通过试验考核产品结构和性能的环境因素集合,是产品研制过程中需要分析确定并进行试验考

核的部分。整个环境工程就是围绕着如何圆满处理两个集合以及交集进行工作的。产品研制过程中只有分析出完整的环境因素集合  $A$ 、充分掌握敏感环境集合  $B$ 、确切得出两者的交集  $A \cap B$ ,从而设计出试验条件和试验方法,通过试验验证,保证产品具有良好的环境适应性。

于是可以得出以下结论,在工程研制过程中,解决环境适应性问题必须从设计和环境两方面入手。一是设计上要对产品的环境特性充分掌握,尽量减小对环境敏感的范围和敏感程度;二是环境分析和试验验证尽可能覆盖整个寿命周期。这就要求管理上要制定严密的计划,对环境工作统筹考虑。

### 2.2.2 系统级产品诱发环境及应力敏感性变化

随着产品复杂程度的提高,产品采用的材料、结构形式、系统集成度、安装工艺等越来越复杂,设备环境响应和结构传递特性呈现多源性、多层性、非线性。系统内部各部分之间相互影响因素增多,产品在外部激励、内部环境作用下的诱发环境因素可能显著增加,同等激励下的产品敏感性相应增加。如图6所示,集合  $A$  为产品寿命周期正常的环境集合,在系统内部由于复杂度的提高,相应诱发环境因素增加,其环境集合变为  $A_1$ , 会大于集合  $A$ 。如果设计人员有足够多的经验和知识,则可以使产品内部的环境集合小于  $A$ 。图6中  $A_0$  为理想的环境集合。同时,由于结构复杂,相应的敏感性应力集合也会扩大范围,如图6中  $B_1$ 。显然,  $A_1 \cap B_1$  会大于  $A \cap B$ , 这意味着产品的故障增加。理想的结果应该是敏感应力集合为  $B_0$ , 这样  $A_0 \cap B_0$  为0。

由于产品的环境特点,如果产品内部结构和各部分之间的关系处理不当,同等的外界环境作用其

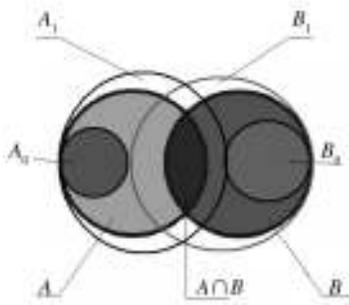


图6 系统级产品环境与敏感应力

Fig. 6 Environment of system grade product and its sensitive stress

应力敏感性会增加,这也是系统级产品设计与设备、零部件设计的最大差别所在。零部件的设计主要在于提高抵抗环境能力,而系统级产品设计关键在于考虑各部分之间的协调匹配,降低响应或消除传递和诱发因素。

### 2.2.3 系统级产品故障最终表现形式

在实际工程中,绝大部分系统级产品的故障往往最终表现为系统组成部分之一出现问题,如设备、结构某部位、零部件、元器件等超出设计要求而出现问题,但并不属于设备/器件独立环境问题。系统级问题与设备独立环境问题的区别在于,同样的激励环境下设备/器件等并不出现问题,直接的依据是元器件的筛选条件远远高于产品的环境设计要求。系统级产品由于环境存在不均匀性、传递调制、耦合、大尺寸效应等,导致局部超出设计指标或出现不协调问题。

### 2.3 国外情况

产品的试验与产品功能/性能特点是相关的。根据美国导弹的试验情况,不同导弹种类其任务复杂程度不同,各种试验所占的比例不同,见表1。其中,任务复杂程度表明了其功能结构的复杂程度,而

表1 试验分布情况<sup>[4]</sup>

Table 1 Test distribution

型号	任务复杂性	试验百分比/%					
		发射	系留	实验室/野外	数学仿真分析	半实物模拟	
空空导弹	麻雀导弹 XAAM-N-2	中等	98	0	2	0	0
	麻雀导弹 AIM/RIM-7M	很高	<1	4	0	5	85
	响尾蛇导弹 AIM-9L	中等	30	60	5	5	0
	先进中程空空弹 AIM-120	很高	<1	4	0	5	90
反舰导弹	鱼叉导弹	高	<1	10	7	25	57
	战斧导弹	高	<1	10	7	25	57
地对空导弹	拉姆导弹	中—高	5	0	0	5	90
	标准导弹 SM-2	很高	25	0	0	70	5

各类性能试验往往需要在相应的环境下验证。

表1为美国导弹产品研制过程中的做法。可以发现,不同功能的产品做法不同,要根据研制产品的功能特点有针对性选取相应的合理方法。复杂程度越高,仿真分析、模拟试验、系统级试验的比例越高,而实际的发射试验比例越低,主要在于最大地积累数据,充分验证产品的功能/性能。产品需要经历环境程度越复杂,越会提高系留试验、试验模拟、野外暴露试验的比例。这些试验往往比较昂贵,但不包含从材料到整机的使用试验、贮存试验等。

美国格鲁曼公司统计的使用期间失效分布图

如图7所示<sup>[4]</sup>。除了明确的环境因素造成52%故障

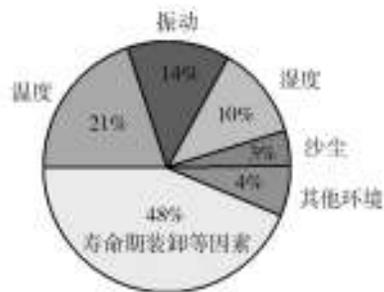


图7 使用期间失效分布

Fig. 7 Failure distribution during usage

外,使用非环境因素造成了48%的故障,比例很高。基本上可以确定,有这类故障的产品通常是整机以上级别,往往只有在产品整机使用中诱发的环境下才会出现故障。一般情况下,系统内部的零部件、元器件的环境应力严酷度远高于系统。

## 2.4 试验目的与结论

系统级产品故障最终的表现形式是材料与器件问题或设计超出要求,产品内部诱发环境增加,产品环境应力敏感性提高,诱发环境/传递路径与产品功能目标不一致。这是系统级产品新出故障的原因所在。因此仅仅依靠设备/单机试验不可能代替系统级产品试验并排除相应级别的潜在故障。

# 3 系统级产品试验设计相关问题

## 3.1 环境分析问题

环境分析是保证试验覆盖性的基础,也是确定试验项目和保证试验正确性的基础,产品研制过程中必须对产品全寿命周期环境和验证试验的效果从多个角度进行全面分析<sup>[1]</sup>。

首先,产品寿命周期环境剖面要分析到位,包括典型的环境及其组合作用模式,以及环境时序与功能/性能时序可能的组合作用模式。大型产品系统往往功能很多,如果模式不覆盖,就会出现漏项,得不到考核,导致在使用过程中发生故障。特别是嵌入式计算机系统和软件,逻辑分支多,而且每个逻辑分支对应着一个工作状态和非工作状态,往往与执行任务、功能特性、作用模式存在关联,这些关联组合应尽可能覆盖。

对于组合环境模式,外界极端环境往往不是同时出现,而且由于系统级产品尺寸较大,因此很难出现多个极端环境组合的情况。往往是较小量值的组合,但有可能导致故障。

其次,环境分析要针对明确的目标,不同产品层次的功能单元不同,不能照搬其他单元或整体的环境分析结果,否则可能漏掉很多内部诱发环境。应分析产品总体在上述环境作用下,内部各部分响应以及环境传递过程中的变异、诱发、激励源等因素,并提供给下一级设备。下一级设备要继续分析设备

内部的环境情况以及工作特性给其他设备可能带来的影响,分析直到零部件或元器件。

环境分析的3个环节,包括激励源、传递路径、作用目标响应特性。环境作用于产品上导致产品损坏的最终结果体现在某个器件、结构部位的损坏或指标超差。因此系统级产品往往在外界环境作用下进行传递,要进行精细化分析,对环境源、传递路径、响应要进行分析,确认那些与其他环境相比并不突出因素的影响效果以及诱发因素。

特别值得关注的的一个问题是系统级产品的尺寸效应问题。由于尺寸大,相对于设备而言,系统级产品的环境更不易均匀和单一,可能最终造成问题。例如大型设备受日光照射,形成膨胀位移和温度梯度,在单个设备中由于尺寸较小不会存在问题;当尺寸大时,受到边界条件或其他相邻设备限制等约束,在某些部位产生超出设计要求的位移和应力。例如淋雨时,一般设备只要进行了防水处理就能保证不出问题;在有风时,由于局部表面的复杂多样,会造成局部湍流等情况,造成雨水的侵入。

以上都是考核验证前需要充分分析的问题。系统级产品与设备零部件差别很大,在系统级产品中,存在很多设备不存在的新问题、新特性,在分析中难以准确定量甚至无法定性分析,需要到试验阶段发现暴露。目前系统级产品的理论建模、环境传递过程分析难度很大,分析结果与实际差距较大,甚至有些结果是无法预测的。因此,最终需要进行一定数量的系统级试验研究,但仍应该按照正交、均匀等设计方法,将各类情况进行认真分析比较,筛选出影响权重大的因素作为试验的备选集合。随着研制的深入和数据积累,不断对理论分析进行修正,为后续产品服务。

## 3.2 试验方案

试验的目的在于发现产品故障、降低产品使用风险,最终满足用户要求。制定试验方案并不能仅仅局限于某一类或某一个试验项目,而是要综合考虑、统筹安排各种情况<sup>[2]</sup>。做到实物试验与分析/虚拟试验相结合、室内模拟与室外暴露试验相结合、独立功能项目与日常数据收集积累相结合、部分与总体相结合、单因素与组合因素相结合、功能与环境/时序相结合、研究性/研制试验与鉴定/使用相结合、

环境因素与产品应力敏感性研究试验相结合、试验实现方式与经济代价/周期代价相结合等,确保试验方案具有科学性、经济性、可行性、多功能性。

### 3.2.1 试验项目

目前大部分产品研制按照 GJB 150A《军用装备实验室环境试验方法》系列标准进行试验,总计约 28 个项目<sup>[9]</sup>。这些试验项目都是针对用户最终鉴定试验需要的项目,相对复杂产品功能任务而言,必须有更多类型的试验才能满足要求。

试验项目的确定与要达到的设计目的密切相关,要达到什么目的,要验证那些功能,这是首先需要明确的,这也是 GJB 150A《军用装备实验室环境试验方法》增加了剪裁的意义所在。

首先确定试验情况,包括产品的状态和特性、边界条件、环境作用因素等。产品特性包括了前述产品的结构、工艺、设备特性等不同情况;产品状态包括寿命周期使用过程中的各项功能,有多种组合情况,如软件逻辑分支引起的功能变化状态、时序;边界条件包括产品使用过程中的机械、电气、电磁等边界情况;环境作用因素包括了各种因素、大小及组合、时序等情况。对上述特性和状态、边界、环境 3 方面所有情况对应的环节一一列举筛选,明确出可能产生影响的因素和水平。

其次根据上述结果选取适当的设计方法,如正交设计、均匀设计等方法,按照设计方案对产品进行建模,仿真分析产品的敏感性和响应。通过评估确定每种情况的重要程度和影响大小。对理论分析无法分析或没有把握的情况与分析结果一起确定为试验情况。

再次,对确定的试验项目进行分析。确定每个试验项目的试验策略,完成试验项目的设计。受技术手段限制,试验验证毕竟与实际工作情况差距很大,特别是飞行器飞行状态与地面试验状态一致性很难全面到位,一个状态往往需要多个试验才能完成考核,甚至有些功能存在无法进行部分或全部试验的情况。这种情况下,就要根据试验目的采取灵活方法进行<sup>[9]</sup>。例如,包含发动机的产品往往在地面模拟中其发动机无法工作;火工品只能一次性工作,不能反复使用,对系统考核存在很大影响,原因是不能对产品反复分解安装。有些情况只有对等效或分析结合、实验室模拟试验还是外场暴露试

验、设备-系统综合等替代情况统筹考虑才行。这一点,在美军标中有明确说法,应“针对装备整个寿命期间将经历的环境条件剪裁环境设计和试验,确定能复现装备环境效应的试验方法,而不是重复环境条件本身”<sup>[6]</sup>。

### 3.2.2 设备级试验作用

设备是系统级产品的基础。由于系统诱发等因素,设备的状态、边界条件以及实际感受到的环境与设备试验状态存在差距,有些属于随机且不可知状态。清楚每个设备工作的实际环境应力状态代价高昂,因此有些设备的试验并不完全采取与实际环境相同或真实的条件进行试验,而采用充分考核、提高设备承受能力的方法更为经济适用。如在产品冲击考核中采用与设备固有频率挂钩的方法进行冲击试验<sup>[2]</sup>,不但简单易行,且考核充分,无论在实际中遇到何种冲击都能保证没有问题。另外一个方法,就是近年来的高加速寿命试验,通过严酷的试验,充分暴露故障,改进设计,保证设备不出现问题。

### 3.2.3 可测试性

首先必须保证激励施加。产品的测试性是在对应环境下的性能,设计上要考虑产品能够进行试验、能够把环境应力施加到产品上等问题,相应产品也要付出一定的代价,这是产品试验验证必须付出的代价。有些产品设计人员认为环境激励不属于设计而属于环境试验,造成验证的困难,甚至不能验证,增加了产品交付的困难和反复。由于产品试验不能完全按照任务剖面环境应力施加,对产品需要附加一定的试验功能,相应的环境应力传递形式等有一定差别,如试验应力传递结构功能、产品信息的探测等。

其次,要能够正确测量相应的物理量。除产品的任务功能/性能指标外,要明确环境响应形式,确保产品诱发环境、可能超标物理量所在部位等能够测到。相应的物理量特性应该明确,确定选取的感知器件、量程、分辨率、精度等的正确性,保证测试所需时间长度。同时要注意系统级产品性能测试中精度降低、变异、附加因素等现象。

可测试性在飞行器中的问题比较突出,飞行试验环境测量数据必须在飞行试验过程中通过遥测系统快速传递下来。受到遥测带宽的影响,能够传递

的数据量相对于环境分析需求来说要少很多。同时,传感器安装位置和安装数量受到限制,导致某些重要设备的振动、噪声和冲击测量无法进行,一旦出现故障,缺乏相应的数据来判断故障原因。随着飞行速度的提高,气动、发动机工作导致的热环境异常恶劣,飞行过程中的脉动压力、外蒙皮温度、舱内高温部位振动等测量问题凸显出来。进行地面环境适应性的试验时也出现热流控制(温度控制)的精度无法与真实情况一致等情况。

此外,需要注意系统级产品测试要求不同于设备,要降低要求。如标准规定的试验条件允许误差要求中,对试验件体积大于 $5\text{ m}^3$ 时的温度允许误差等<sup>[6]</sup>。

### 3.3 几个试验的关系

系统级产品由于其多功能特点,进行研究试验和验证试验都会与实际使用过程不同,每一种试验都存在其固有的优缺点,应扬长避短,综合利用。试验包括实验室模拟试验、自然环境暴露试验、试用演练、使用试验等<sup>[7]</sup>。

#### 3.3.1 自然环境试验、实验室模拟环境试验、使用试验的关系

1) 实验室模拟试验(内场)。实验室模拟环境试验是在产品研制中通过模拟产品经历的环境或模拟环境效应发现和解决产品环境问题使用最多的一类试验。实验室模拟环境试验的优点是环境应力等参数可以严格控制,保证试验复现性和试验结果的可比性<sup>[7]</sup>,可以方便、高效率实施,并定量评价环境因素对产品的影响。特别是在研制过程中进行产品环境影响规律、产品环境特性和环境应力敏感性等研究性试验尤为方便经济。正是这一特性,决定了大部分研制试验在实验室进行,是装备采办过程的重要手段。实验室试验必须进行到这样的程度,即可以在采办过程早期将环境引起的产品问题在其解决代价变得更加高昂之前就被暴露出来<sup>[6]</sup>,在实验室阶段解决绝大部分问题。

实验室试验存在固有的局限性,实验室模拟环境忽略或难以模拟自然环境随机因素和未认识到的相互叠加或抵消作用的综合因素,在确定和外推分析意见、试验准则和试验结果时要十分谨慎。正如MIL-STD-801F《环境工程考虑和实验室试验》前言,

“重要的是要认识到实验室试验有其固有的局限性。因此,当利用这些实验室结果来判断实际使用条件下的结果时,必须小心谨慎并进行工程判断。在许多情况下,真实环境应力(单一或综合)不可能在实验室试验中真实可靠地复现。用户不能认为某一系统或部件通过了本标准中所包含的实验室试验也就能通过现场/载体的验证试验”。通过了实验室试验,并不能评定产品在使用中没有问题。

2) 自然环境试验(外场)。自然环境试验也叫做天然暴露试验,是一种将产品长期暴露于某种自然环境中,以确定该种自然环境对其影响的试验<sup>[7]</sup>。自然环境试验因地制宜,因此试验范围也比较广泛。自然环境试验与实验室环境模拟试验正好是相互补充、相辅相成的。自然环境试验的优点是包含了产品寿命周期内很多随机偶然因素,以及多种因素综合/组合作用,与使用环境一致,与实验室模拟相比更为真实,能够暴露实验室不能暴露的缺陷,是产品真实经历的环境,所以也是产品研制必需的试验。某些缺点,只能在特定地点和典型气候环境模式下进行,而且试验周期较长,环境不可控<sup>[7]</sup>,有些环境无法遇到,因此不能简便地进行量化评估。

自然环境试验应从方案论证阶段开始材料、零部件、器件等选型和筛选试验,以保证产品在设备级能够获得理想的材料等。在研制阶段就投入设备、单机等进行试验;在定型时进行整机或系统级试验,以保证用户使用时不会存在大问题。

从经济角度来看,低级别产品应选择实验室模拟;大型产品试验,气候稳定性比较好的,选择自然环境试验经济性可能更好,如高原低气压进行自然环境试验可能更为经济。

3) 使用演练/自然现场/载体。由于产品与使用、平台有关,除了自然环境因素外,还包括了人为因素和诱发因素及其三者的综合作用。因此,此类试验模拟实际的使用过程,主要用于发现匹配协调以及综合作用的叠加和抵消效应问题。这些在实验室模拟、自然环境试验中是不容易发现的问题,试验更接近于真实使用状态。在研制过程中由研制方或用户方配合完成,尽管这些研制活动的主要目标不是环境,但属于重要的试验补充,与用户的使用还是差距很大。

4) 使用试验/使用过程问题监控(OT&E)。当产

品交付用户后,在长时间使用中还会存在一些问题,这些问题主要是一些根本想不到的偶然性问题,属于在实验室阶段看起来很简单,而实际隐藏很深的问题,后果影响很大。如美国沙漠风暴行动中的中东沙尘环境、阿富汗战争中的黑色尘土环境、亚丁湾执勤的海洋气候等,可能存在很多新的环境因素及时序组合。这个阶段的主要环境任务是监测、积累使用中的环境问题。如美国在越战期间舰船环境的跟踪测量、中东基地的跟踪监测等。同时,采取试验来调整用户使用方法程序以及确定维护保养计划等。

以上试验之间存在一定的逻辑关系,距离用户使用越近,缺陷的对研制成本影响越大。原则是,进行充分的实验室试验,把那些属于无法预料的、技术上存在认识不到位的问题推迟到飞行试验等外场来发现,把我们无法掌握、使用人动作习惯造成的问题留给试用阶段,极个别的问题通过演练、演习暴露。争取把最少的问题留给使用阶段,使每一个阶段的试验充分发挥该阶段的作用,把每一个阶段的功能发挥到最大。同时,上述试验做法的侧重面不同,实验室试验需要更多地研究设计,而外场试验乃至使用,则更侧重跟踪监测,收集足够的数据用于维护保障和后续产品研制<sup>[9]</sup>。

### 3.3.2 研制方试验-用户试验的关系

目前研制方和部队都建设了较多的环境试验设备,但两者的目的不同。用户主要的目的是发现问题、改进设计,特别是系统级产品存在很多诱发因素和未知因素,需要在定型之前进行研究,保证各种诱发环境影响和相关特性能够掌握。部队试验除了确认产品的质量特性外,还要进行产品的维护保养,通过系统级试验,发现使用过程中的问题和现象,验证保养维护的有效性和使用维护保养计划的正确性。

### 3.3.3 试验等效替代关系

在MIL-STD-801F《环境工程考虑和实验室试验》和GJB 4239—2001《装备环境工程通用要求》中均给出了替代方案,在实际过程中也存在以下几种情况。

1) 建模分析和仿真替代实物试验。由于地面技术条件或经济条件限制,特别是大型系统级产品存在无法进行的试验或已经存在大量数据支持的经验,则可以通过建模分析与仿真来代替实物试验。如核大国进行的模拟核爆炸试验。一般的仿真可以

减少实物投入和试验费用,但很难用于证明模型的正确性,模型与仿真正确性的可靠性准则来自于实际、外场和载体平台数据等<sup>[9]</sup>。

2) 效应相同替代试验。产品淋雨试验包括吹雨、降雨和滴雨试验。标准指出,当产品尺寸较大或没有吹雨设备时,可以采用程序II的防水性试验程序。在实际中,也经常存在采用水密试验代替淋雨/吹雨的情况。产品工作机理比较清楚时,特别是密闭结构的水密设计为双向密封时,完全可以替代;当水密设计为单向时,则难以代替。特别是大型产品表面复杂,风在产品表面会出现各种复杂的气流变化,如横向气流、湍流、负压作用,导致表面结构受到拉/压等应力作用,密封出现间隙或松动,使雨水浸入。另外,存在复杂表面产生涡流等局部变化,导致雨水不按重力方向进入的情况。因此,采用何种试验方法要先分析其密封结构机理。

3) 部分代替整体试验。大型装备的盐雾试验往往由于其不可恢复/破坏特性常常采用材料/部件/结构组合等形式进行替代试验,判断是否能够等效分析产品材料、结构组合的盐雾影响机理。分析产品微环境影响情况,如有的产品采用材料试验替代,则可能存在不同材料之间的电泳腐蚀等现象,或者局部积水等情况,必须将腐蚀的失效模式全部覆盖才能等效。

## 4 系统级产品试验及环境适应性评价技术

### 4.1 产品环境适应性评价的目标/目的

尽管产品环境适应性有其严格定义,但由于实际使用与设计要求之间存在落差,采用何种试验、如何评定仍十分困难。产品环境适应性如何才认为是合格的?围绕产品研发,不同人员由于自身所处角度不同,要求也会不同。用户一般会提出进行了试验是否表明以后使用中不再出问题?产品总体人员往往向环境技术人员询问,进行了试验是否在今后的研制过程中和交付后不再出问题?试验人员也存在疑问,为何试验后对产品环境适应性感觉难下结论?主要原因在于,由于产品的复杂性,对环境适应性要评价什么并不明确,主要是目前环境条件过于宏观,不够具体细致,对产品的各类性能测试要求

不够全面,试验目的往往一言以蔽之——考核产品在某环境下的适应能力。

例如在强度试验中我们能给出产品合格与否的结论,而振动试验完成后,我们无法给出产品合格与否的结论。原因在于,强度试验的指标要求十分明确,设计过程中,将产品工作环境中的过载、冲击、低频运动等转化成了衡量结构能力的某些部位的应力/应变定量指标,设计过程中可以进行定量分析和过程监控。然而,振动试验仅仅给出了宏观的统计包络值,没有任何设计指标作为过程监控手段,只能等到产品生产出来后进行试验,衡量抗振能力没有定量指标,甚至不知道要评判什么,所以也就难以给出合格与否的结论。

按照产品环境的3个环节理论,产品功能分为实现任务的目标功能和辅助功能。如设备电性能为目标功能,而对该目标功能起到连接固定作用的辅助支撑结构则为辅助功能,其具有的刚度、强度以及动力学运动、力/振动传递特性直接影响目标性能的实现。将主要目标功能特性和细化辅助功能作为环境适应性设计准则要求,则可以根据试验结果较易进行评估并得出结论。在评价过程中,只关注了目标功能,但往往忽略了辅助功能。因此,评估的内容不仅仅是目标功能,而且牵涉到辅助功能的环境适应性设计指标的细化和可操作程度。

评估是否满足设计要求,要对环境进行适应性准则设计,分解成设计要求。是否满足使用要求,并不意味使用中是否会出问题。表2为经过实验室

表2 通过室内模拟试验的产品自然环境试验结果

Table 2 Natural environmental test data of products passed laboratory simulated test

试验时间	保护评级					
	样品1	样品2	样品3	样品4	样品5	样品6
1个月	10	10	10	10	10	10
2个月	10	10	10	10	10	10
3个月	10	10	10	10	10	10
6个月	9	9	9	9	10	10
12个月	9	9	6	8	10	9

960 h 盐雾试验的产品在海边试验场进行自然暴露试验的结果。虽然通过了实验室内的模拟试验,但经过自然环境试验场的试验后有多个产品的性能发

生下降。3号产品性能失效,6号产品穿孔。

### 4.2 评价方法

按照产品环境3个环节理论,环境激励源、传递路径的传递特性、目标单元响应特性均应满足要求,才能保证其最终性能满足设计要求。当飞行器性能/功能确定时,激励源就确定了。因此,主要工作应为传递路径特性和目标单元响应特性是否满足要求的评价。

首先,要分析产品功能/性能特点导致的环境特性要求表征量。需要通过仿真分析,确定产品具体的环境应力敏感量和具体的物理表达形式。在振动环境条件中,说某产品对振动敏感是不够的,它包含的信息往往是多重的,不是仅仅一个均方根加速度就可以到位的。应针对不同设备功能要求分解到具体的物理量形式。如大型设备对低频敏感;小型设备器件等,对高频敏感;光学设备对角位移和速度敏感;惯性器件对角运动敏感;分离元器件对加速度敏感;表贴器件对线路板低频大变形敏感等。因此,就振动环境而言,要对各个关重件制定相应的设计准则,规定相应的频率范围和振动位移、加速度、角速度等敏感物理量。对温度环境而言,需要分析温度及其变化导致了何种物理过程变化,最终导致损坏。如温度引起结构变形和应力、材料成分变化等。

其次,连接支撑结构和容易引起问题关键部位应进行特性影响表征,如力学传递特性、升温降温特性等。需要明确是否存在诱发、转移、耦合、换能等结构,是否存在对激励源的不恰当调制过程。

第三,根据上述分析的表征,建立产品性能基线。除了给出性能的基线和相应的容差范围外,还要对上述敏感物理表征量和传递特性给出性能基线和容差范围。

第四,在产品试验中,要对上述量进行全面的监测。根据测量结果、趋势得出结论。

### 4.3 评价内容

1) 按产品级别逐级评估合格性。从底层到系统级,应该逐级满足要求;确定各设备是否满足设计要求。

(下转第71页)

- [3] 玛辉生. 高原沙漠对工程机械的特殊要求[J]. 西部地理, 2000(1):40—41.
- [4] GJB 150.12A—2009, 军用装备实验室环境试验方法 沙尘试验[S].
- [5] GJB 4111.22—2000, 军用履带式工程机械设计定型通用试验规程 沙漠地区适应性试验方法[S].
- [6] GJB 4110.14—2000, 军用轮式工程机械设计定型通用试验规程 沙漠地区适应性试验方法[S].
- [7] GJB 59.30—1991, 装甲车辆试验规程 沙漠地区适应性试验总则[S].
- [8] GJB 1106—1991, 军用专用汽车定型试验规程[S].
- [9] 于衍华. 武器装备环境适应性论证[M]. 北京:兵器工业出版社, 2007.

(上接第62页)

2) 覆盖性评估。环境分析覆盖性; 试验覆盖性; 试验状态覆盖一致性; 环境传递、响应物理表征量是否体现产品特性; 产品环境可测试性(具备施加激励、测试验证的能力)。

3) 试验应力施加正确性评估。各项试验施加的环境应力是否正确, 是否落在了容差范围内, 试验方法是否正确, 是否存在非线性, 是否只是极限情况。

4) 性能测量参数正确性评估。测量的性能参数是否正确/准确, 是否在容许范围内; 测量的位置、数量、功能是否正确反映产品实现其功能的特性; 性能与环境的相关性如何, 与性能极限比较, 性能存在的时间变化趋势。

5) 关键部位响应量的设计符合性评估。关键/关心部位及其物理量是否能够表征产品整体或局部环境特性; 各部分关键/关心部位环境响应量是否在设计范围(设计指标)内; 输入点与输出点的相互关系/传递曲线; 温度指标, 包括关键/关心部位的应力/应变、位移量、温度高低; 振动指标, 包括关键/关心部位的应变/应力、速度、加速度、位移、斜率、角度、角速度、角加速度、该点响应物理量与输入点的相关性、相位关系等, 根据该部位相关性能要求选择不同物理量, 如光学系统选择角度、速度等。

6) 其他佐证材料。

## 5 结语

试验与评价的方式方法与产品的功能特性密

切相关, 分析、试验等应紧紧围绕产品功能特点开展研究才能有的放矢, 才能获得方便实用的方法, 分析试验结果才能更经济、有效、准确, 建设的试验设施才更科学合理、方便实用。由于系统级产品功能、结构各异, 相应的环境与产品相互作用及诱发环境结果十分复杂, 试验与评估也会存在较大变化, 必须认真对待。

## 参考文献:

- [1] 赵保平, 孙建亮, 庞勇. 航天产品环境适应性问题研究(I)[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2):51—57.
- [2] 赵保平, 孙建亮, 庞勇. 航天产品环境适应性问题研究(II)[J]. 装备环境工程, 2011, 8(3):42—48.
- [3] 王德言. 试验环境条件的剪裁技术[J]. 环境技术, 1997(1):5—8.
- [4] 小埃米尔. 战术导弹试验与鉴定[M]. 蔡道济, 译. 北京:国防工业出版社, 1992.
- [5] 祝耀昌. GJB 150A 和环境试验技术[R]. 北京:中国航空综合技术研究所, 2010.
- [6] MIL-STD-810F, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Test[S].
- [7] 祝耀昌, 王有刚. 各种环境试验的特性及其应用分析[J]. 航空标准化与质量, 2005(2):30—35.
- [8] 胥泽奇, 张世艳, 宣卫芳. 装备环境适应性评价[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1):54—59.
- [9] 朱建斌, 向树红. 航天器动力学试验评价技术[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6):5—10.