

综 述

航天产品环境适应性问题研究

赵保平, 孙建亮, 庞勇

(北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘要: 全面论述了航天产品研制中提高环境适应性的途径, 从产品设计角度阐释了产品环境适应性基础原理、产品环境分析、环境适应性设计、环境适应性试验、环境适应性管理等内容, 并总结了相关环境分析、试验、设计、管理的风险因素, 提出了环境适应性工作管理的三个覆盖和适应性技术的发展趋势, 认为对当前传统认识——环境适应性工作就是制定环境条件和进行环境试验的观念要有所改变。

关键词: 环境适应性; 航天产品; 覆盖性; 环境剖面; 环境适应性设计; 研制试验

中图分类号: V216.2 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)02-0051-07

Research on Environmental Worthiness Problems of Aerospace Product

ZHAO Bao-ping, SUN Jian-liang, PANG Yong

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

Abstract: The ways of improving environmental worthiness of aerospace product were introduced. From the designer's viewpoints, product environmental worthiness basic theory, environmental worthiness analysis, environmental worthiness design, environmental worthiness test and environmental worthiness management were discussed. The relative factors of the risk for environmental analysis, design, test and management was summarized, and the three principles for environmental worthiness management and development work were proposed. The traditional idea was corrected, which consider that the work of environmental worthiness is establishing environmental conditions and environmental test.

Key words: environmental worthiness; aerospace product; completeness; environmental profile; environmental worthiness design; development test

GJB 4239 全面规定了装备环境工程的通用要求, 从而为产品环境适应性问题全面系统解决奠定了重要基础, 是产品研制过程中重要的指导性文件和依据。在型号研制中, 仅靠通用要求还无法适

用于工程实践, 必须深刻理解有关要求, 并结合具体产品的特点进行分析^[1]。

近年来航天产品型号的研究取得了很大成绩, 在环境适应性方面也有不少经验总结, 但随着技术

收稿日期: 2010-12-06

作者简介: 赵保平(1962—), 男, 研究员, 主要研究方向为飞行器环境设计与试验技术。

的进步和装备交付使用,隐藏的环境适应性问题也日益凸现,如长时间贮存问题和运输问题等。产品的多样性特点,设计、生产、试验、管理方法的不同,影响产品问题的因素很多,但在技术飞速发展的今天,能够全面深刻领会其精神实质并落实 GJB 4239 的要求,抛弃环境适应性等同环境试验的观念^[2],将有助于上述问题的理解和全面解决。

笔者对在现阶段如何提高产品的环境适应性进行了深入分析,提出了 GJB 4239 相关要求在工程上的具体应用方法。

1 产品环境适应性分析与试验基础

1.1 定义

环境适应性是可靠性的基础。GJB 4239 中明确给出了环境适应性定义:装备(产品)在其寿命期预计可能遇到的各种环境的作用下能实现其所有预定功能和性能和(或)不能被破坏的能力,是装备(产品)的重要质量特性之一^[1]。

从定义可知,在进行产品研制中,应该考虑产品全寿命周期内的环境分析、设计及其作用下产品性能的验证问题,消除造成产品破坏或失效的潜在影响因素,最终达到环境适应性要求。

1.2 产品环境覆盖性与剪裁原理

引起产品功能和性能破坏或失效的原因很多,掌握失效潜在原因是防止破坏失效的根本所在^[8]。通过环境工程的方法可以最大限度地确定已知因素,减少分析、试验中的漏项,将较低的风险留给研制后期和用户使用阶段。

环境应力对产品产生作用必须具备以下 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) 该应力必须是对产品敏感的。

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,产品敏感的应力未必实际都存在。两者之间的关系如图 1 所示^[3]。

图 1 中, A 是产品使用环境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

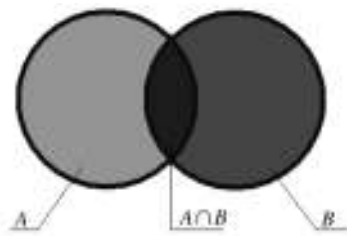


图 1 AB 集合求交集示意

Fig. 1 Environmental tailoring sets

境应力的集合; $A \cap B$ 则为需要通过试验考核产品性能的环境因素的集合,是产品研制中需要分析确定并进行考核试验的部分。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。产品研制只有分析出完整的环境因素集合 A 、充分研究掌握敏感环境集合 B 、确切得出两者的交集 $A \cap B$ 并通过试验进行验证,才能保证产品具有良好的环境适应性。

在工程研制中,解决环境适应性问题必须从设计和环境 2 方面入手:1) 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;2) 环境分析和试验验证尽可能覆盖整个寿命周期。因此,管理上要制定严密的计划,对环境工作统筹考虑。

2 产品环境分析

GJB 4239 规定在论证、方案阶段实施环境分析,分析的基本方法是依据用户提出的使用情况,分析产品在全寿命周期中的环境,确定寿命期环境剖面。此项工作开展的越早、越准确,后期产品的研制反复越少,环境适应性越能得到保证。

2.1 寿命期剖面 and 寿命期环境剖面

寿命期剖面是装备自出厂到寿命终结的过程中有关事件和条件的事件历程。寿命期环境剖面是与装备寿命期剖面对应的环境种类及其时序的描述^[1]。寿命期环境剖面准确与否是环境适应性的关键,由于任务、使用、平台以及产品结构的复杂性,寿命期事件或每个环节对应着多个环境因素和不同层次的表现形式,所以首先要有明确的寿命期任务剖面;其次必须从事件历程和产品系统层次 2 个角度进行多维考虑分析,才能得到比较全面的环境因素,确定的

产品全寿命期环境剖面才是比较完整的。

2.2 环境分析中存在的风险

在工程中由于认识或专业的局限性,要特别注意以下几个方面的问题所带来的风险。

2.2.1 全寿命周期环境及其延伸

产品系统往往具有多个层次,研制也往往是按照先分系统后整体的顺序完成的,在界定产品寿命期时往往按照系统的出厂界定。这对产品整体的环境分析来讲没有问题,但对产品内部的分系统或设备甚至部件,其寿命由于比高一等级生产往往寿命更长,因此其经历往往包含了更多的总装前的时间段和作为备件所经历的环境,如使用、试验影响等等。所以对产品寿命的定义应根据产品所在的级别层次分别对待,相应的环境分析也要根据所在层次具体分析其环境历程。

2.2.2 寿命周期中环境分析容易被忽视的因素

一般产品结构层次复杂、经历的环境复杂,造成产品内部环境的复杂性。对于存在相似结构相似用途的产品,大部分环境是已知的;新产品则只能通过理论分析预示,这正是产品环境分析的风险所在,只能通过各种实际验证。因此,GJB 4239工作项目203的要求在某些情况下十分困难。

1) 输入分析风险。产品环境分析的较大风险是使用环节,由于使用人员个体差异性很大,所以使用习惯、动作造成的影响很大^[5]。其次是产品进入新的使用范围,该范围内的环境因素及其与产品相互作用影响。此外,产品新的性能与外界环境相互作用产生的环境影响。

2) 诱发环境分析风险。诱发环境分析是最大风险来源之一,见图2的简化模型。一般的产品系统可以简化成如图2的环境响应模型,该模型与传统的单自由度振动响应模型相似,最大不同在于增加了一个扰动源。对一个振动系统来讲,该扰动源可以是结构间隙、结构对界面、电磁热等致动器件、换能器、运动设备等,简化模型中的阻尼、弹簧和扰动源反映了机械振动冲击传递路径情况。该模型具有通用性,对于其他环境如电磁、传热等,该模型元件改变为相应专业元件即可。

图2模型中,扰动源是环境分析中最大的困难所在。例如间隙、对接面等情况,在外界激励较小

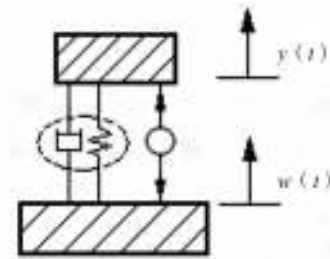


图2 系统简化模型

Fig. 2 System predigested model

时,系统响应表现为线性特征,当外界激励量级较大时,则界面由于位移较大出现碰撞等,会诱发出新的冲击环境,且往往表现出超高斯分布特征,对间隙附近的器件产生很大影响。但由于间隙存在有很多随机影响因素,估计诱发冲击的频谱和量值范围困难很大。

其次的风险是不同部分之间的相互作用^[5],如图3所示,平台对设备、设备对平台以及设备通过平台对其他设备的影响。这种情况下不仅仅是环境问题处理,需要整体考虑设备之间以及与平台之间的关系,从设计上考虑整体环境防护以及部位安排等。

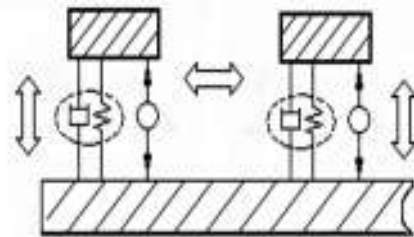


图3 系统相互影响模型

Fig. 3 System interaction model

再次是不同专业之间的相互耦合,如电磁发射影响导致发热、振动等情况。

上述情况主要发生在次级结构中。次级结构主要指设备支架、设备内部结构等非主要承力结构,但对内部环境影响巨大,且出现过很多经验教训。此外,要特别注意平台的相对性概念,对设备来讲,其平台可能是飞行器外壳,但对于设备内部线路板,则设备外壳安装骨架为平台。

3) 小概率事件风险。一般进行环境分析往往对大概率事件非常关注,如通常资料给出的影响比例中温度为40%、振动为27%等等,属于大概率事件。由于统计方法上存在缺陷,小概率事件往往受很多限制,获取该环境样本代价太高或机会很小,所

以概率往往较低,但是造成的后果却非常严重。

4) 与时间有关的环境分析。对时间敏感或与时间相关的环境有以下几种情况:不同环境发生的顺序不同,对产品会产生较大影响;发生的时间长度差距较大,如变化速度很快或很慢,如温变率。

5) 累积效应分析风险^[8]。有3种情况需要考虑:1)对精度的影响,如惯性器件,尽管量值很小,而且在短时间内对精度影响也不大,但经过长时间积累,则影响很大;2)量值很小,但经过长时间的使用或贮存,设备发生老化、磨损、疲劳等变异情况;3)产品发生老化、磨损、疲劳后,会改变产品结构的特性,使环境产生放大效应或特性变异。

上述3种情况尽管都是小量级环境,但经年累月长期作用且数量巨大,造成的影响就不容忽视了,这也是环境分析中容易忽视的。时间的积累,与产品寿命有关,特别是产品寿命后期阶段。

2.3 对分承制方的要求

承制方是相对于用户而言的,对产品最终用户而言为产品系统总体,对产品系统总体而言为分系统设备厂家等。所有这些都应根据设备的特点分析其环境特性,特别是诱发环境。对可能存在放大效应的,就像系统总体不能直接把用户的要求直接用于设计一样,要经过分析研究后,确定具体量化的设计要求。

目前飞行器主结构一般按照静态设计准则,问题认识清楚,方法也比较准确。对分承方,如果系统平台简单,认识会容易。但多层次产品由于存在多次调制和界面扰动,问题非常复杂。

分系统或设备属于次级结构,目前分析难度很大,采用常规的方法根本无法解决问题。分析系统或设备环境分析要考虑其相对性,即考虑与其他设备之间的相互影响、接口关系和与平台之间相互关系影响。如图4所示,当考虑设备内部组件A时,要考虑其他部分的影响。

对于产品内部的组/部件或线路板等,由于处于环境响应的末端,成为环境分析最复杂的一环,而且在很多情况下往往不能直接测量,而且是容易被忽视却最容易出问题的位置。由于经过了多个层次的调制,属于高度非线性系统,可能响应非常剧烈,所以不能想当然地进行简化,如图5。其分析设计试验

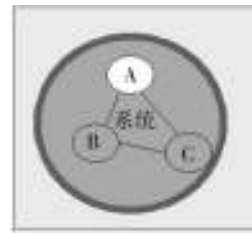


图4 设备内部环境

Fig. 4 Product interior environment

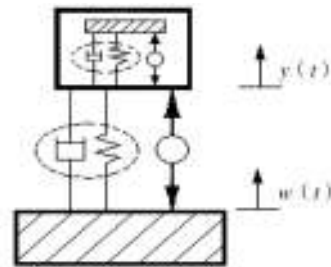


图5 设备内部环境

Fig. 5 Product interior induced environment

技术与系统分析一样不能减少,如进行微模态响应分析试验等。

此外,分承制方由于经过了试验,在安装到系统后要随系统进行试验,其经受的重复试验影响需要考虑。

2.4 环境试验条件的包络特性和不确定性

试验条件是多种状态的统计结果,涉及因素太多,不可能每一种情况都搞明白,实际上是一种经济代价的权衡。当进度费用允许时,可以分多种情况详细研究。所以试验条件一般代表着一定程度的实际情况,同时还是一把尺子,是对质量的一种度量。

时下比较热门的研究方向是追求环境条件的真实性,其实是无法实现的且代价很大。如果照搬天上的条件,相当于飞行试验,但飞行试验也并不真实,仅仅是众多情况下的几个特例而已。目前的试验,只不过是许多试验能够覆盖某些状态而已,所以应主要考虑条件的典型性、代表性和覆盖性。环境条件要通过试验验证,可能要分成许多个试验完成,条件也要发生相应的变化。如强度试验,并不是采用分布载荷进行试验,而是通过载荷离散化成有限个集中载荷进行试验,所以环境条件不等于试验条件。

此外,经常希望给出某设备的条件,这虽然是一种选择但代价太大,当成为成熟产品而且积累数据很多时,给出某个位置的条件是可能的,如美国捕鲸叉 AGM-130 导弹,但更多的产品无法给出。解决方法是给出较大的容差或余量,或设计上采取一定措施。所以,环境精细化可以进行,对产品研制可以起到节省经费的作用,但要适度。

由于产品系统的环境与系统结构关系密切,与设计水平有关,要求精确确定各设备某个位置的条件是不经济的,可以通过设计方法控制这些部位结构的特性来改善环境。但产品整体环境特性是与产品的飞行、使用特点和指标密切相关,所以,整体环境分布规律可以分析得出。掌握的原则应该是,重点研究产品的整体分布特点和规律以及参考量值,对局部环境应该重点研究结构的环境传递特性,以改善其特性控制其部位的环境响应。各部位的个体环境响应通过容差或余量进行包络或覆盖。

需要注意的是,制订环境条件的方法问题,特别是利用实测数据进行时,要注意方法的适用性和环境的新特性,否则容易忽视掉一些环境特性造成错误。如对运输或飞行中的一些振动数据,通常利用平稳随机高斯分布的分析方法,但实际上往往是非平稳非高斯分布的,当结构复杂到一定程度,则会存在高度非线性,相应的振动数据呈现出超高斯特征,如果设备对超高斯信号敏感,则条件属于不当,试验则为无效了,其差别如图6所示^[7]。

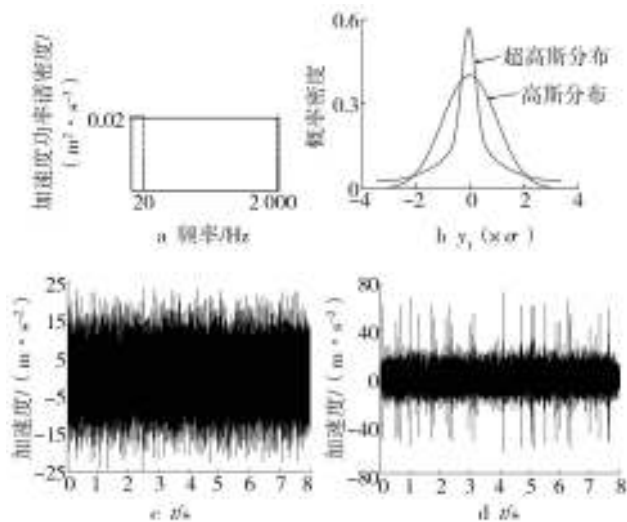


图6 具有相同PSD的高斯和超高斯随机振动激励

Fig. 6 Gaussian and Super Gaussian random vibration of the same PSD

由于实验室模拟手段的限制,尽管通过各种手段获取了非常“真实”的环境条件,在具体实施上还是存在问题的。因此,环境试验条件不等于环境条件,是真实环境和试验手段的结合体,是综合考虑的结果。

2.5 环境分析的覆盖性

由于环境的多样性、复杂性,应该从多个角度进行分析才能达到较高的覆盖性,建议采用QFD方法,从以下几个方面考虑。

1) 系统层次分析。系统层次是构成环境涌现的重要来源,例如机械加工间隙/对界面的碰撞、环境耦合、电磁干扰、电气发热等等,各个层次的响应是不同的。

2) 时间特性分析。全寿命周期中的日历寿命中的各个环节、贮存影响、使用影响等等;工作时序影响,如某个功能、动作、测试程序等;时间变化,如温度/热变化率、力变化速率;长时间积累影响;复杂系统中设备、部组件等经受多次试验影响。

3) 空间分布分析。地面广度和高度三维空间,包括空间位置、分布概率等,如灾害气候;大小不同尺度的影响等等;产品不同位置,以及环境场分布等特性。

4) 幅值域分析。幅值概率分布,如运输中的朝高斯分布特性,也是容易被忽视的领域;

5) 功能域分析。换能器对不同能量形式的转换影响,如电、机运动特性影响,旋转、机构展开等情况;影响电性能测试应该与环境、功能对应。

6) 频率域分析。不同作用效果和特性,如从运输到爆炸,频率的转移。

7) 数量变化分析。量变到质变,长短多少等影响;减震器由单个变为阵列时,特性发生变化。

8) 路径分析。传递路径、运动路径;特别是要分析是否存在潜在通路,如传热之热桥、振动敏感结构、电磁耦合通道等。

9) 环境类型及因素。不同环境因素影响等。

按照上述各个方面,在研制阶段中的分析、测量、试验设备等是否匹配。通过不同侧面不同角度考虑分析,反复循环迭代分析,覆盖性就比较好,能分析出相应的对策。

3 产品环境适应性设计

环境取决于产品的特性。因此,一般普遍采用

耐环境设计方法,即选择能够承受环境的器件材料结构等等^[10]。解决产品环境适应性的问题仅仅从环境分析和试验角度去做,显然这是不够的,根本之道是从设计和环境2个方面去做,而且最根本的是产品自身的特性,试验仅是对其进行确认的方法和途径^[6]。

按照环境适应性定义,通常采用的方法是选取能够承受高量级环境的元器件、组件等等,当经历的环境十分恶劣,或者产品内部放大严重时,按照这样的策略就要付出非常大的代价。

根据剪裁原理,除上述方法外,比较恰当的做法还应有3种选择:使设备不敏感、对环境输入减缓或隔离、对环境采取主动控制措施,即设计上要采取减缓环境激励的措施。

3.1 根据环境分析结果研究产品敏感性

根据环境分析的结果,对产品的环境敏感性进行定性和定量分析。通过直观经验、建模、讨论等方法,分析这些环境因素的传递路径,并定量分析传递路径灵敏度。然后根据分析结果采取措施改善传递路径的特性。产品设计中,传递路径越短越好,这样就会减少诱发其他新的因素,当需要时则提高传递路径灵敏度,不需要时降低传递路径灵敏度。

进行分析时,要注意进行多个专业综合分析,而不仅仅局限于产品设计主要功能专业的分析,如电气、振动冲击、电磁、热力、机械结构等多个专业共同分析。否则容易出现因忽视某方面专业问题而出现潜在通路的遗漏,造成后期故障的频发。传递路径包括了机械传递路径、电磁传递路径、传热换热路径等方面,工程上的热桥、漏磁、振动耦合等就是比较典型的潜在通路。

此外,对次级结构特别是设备内部的线路板等结构,一般受工艺材料等方面影响,不能过多简化且分析难度很大,建模分析的结果只能作为参考,需要与试验结合进行。

分析既要研究平台传递的影响,又要研究研究对象对平台的反作用影响。

工程上,产品分析的顺序应该是沿着传递路径的逆向进行分析^[6],先对末梢的部/组件进行分析,降低分析的复杂性,分析完成后通过子结构等方法进行上一级分析,末梢部/组件则可以简化为一个等效的模型施加到该层次分析模型上。

3.2 编写设计准则

根据上述分析结果、相似产品和该产品的总体性能要求,编写产品各层次的设计准则、约定、要求、注意事项等,使所有人员遵守执行。

编写全局和整体要求,包括产品整体的环境影响、环境响应特性,控制系统回路、承力结构、主要设备和部件的特性范围以及部位安排等要求^[10-11]。如各部分设计应控制的固有频率范围,振动敏感器件远离振源等。

对产品内部具有环境源(能量源)的设备,应规定能量释放后产生的影响范围,特别是火工品产生的冲击振动、空气电离形成的电磁等。这类环境的传递路径应尽量短,作用时间尽量小,减少调制或涌现的机会,要规定采取措施使之迅速消失。

对各分系统、设备提出要求,规定设计必须考虑的一些问题和原则。如规定固有频率范围、安装方式。必须根据自身的特点进行振动冲击、传热、电磁等方面的分析、试验,给出相应的下一层次部组件的环境特性要求。做到不受平台特性的重大影响,减小放大聚热换能耦合等程度。

对部件、器件、支架、连接、接口等提出要求,规定必须的分析与试验及其方法。

对工艺、材料的选择提出要求,如对界面连接的拧紧力矩等,逐步实现定量要求。

对不同专业之间提出要求,如控制与结构、电磁与力学、传热等进行的工作。

对非线性结构,特别是存在间隙、弱连接等结构的,要规定中间量值的分析试验要求,不能只进规定最大值包络。当复杂系统同时受到多种环境因素的影响时,由于内应力的分布变化,要分析不同组合情况,其响应特性并不是所有最大值的迭加。另一种情况是,对设备内部存在大位移大变形情况,由于空间限制,可能在一定冲击振动或温度下出现碰撞,应规定最大位移量^[17]。

如果上述规定仍然不能满足要求,则需要考虑整体环境控制措施,如采用整体减震、隔热,或采取温度控制等主动环境控制设备等。

3.3 产品设计应考虑环境测试性或环境约束

产品在设计时,除考虑其功能外,还应该考虑其

测试性,如果仅仅考虑功能,其功能验证和暴露缺陷的机率就会大大降低,功能测试的覆盖率会很低。其中,环境能否正确施加到产品上,不仅仅是试验人员的夹具设计和试验系统设计的问题,而是产品设计人员必须考虑的问题。首先,对大型试验,如振动、冲击必须具有振动冲击激励力的输入传力位置或接口,保证产品在该环境下的测试性;其次,应保证性能测试条件能够在对应的环境中进行完整准确的测试,否则就降低了测试的覆盖性。

同时,任何试验都是不真实的,由于地面与空中的差异,为验证某个功能可能需要在地面增加很多的辅助装置进行,无疑增加了试验的副作用。试验人员与产品设计人员应分析该作用影响,将其降低到能够接受的程度。特别是对内部设备,设计时应考虑该副作用影响作为设计的必需约束条件之一。设计人员还要考虑如何进行验证、可行性以及进行那些试验。

此外,还应该考虑环境试验条件的工艺性问题,要保证该条件能够以较小的代价实施,或适当改进设备实施。所以,制定试验条件要与试验人员进行充分的沟通。

3.4 环境响应特性调查试验

分析完成后,要根据分析结果制定响应特性调查试验计划。实际上,特性调查试验是设计与分析密不可分的改进手段之一,仅仅分析是无法代替试验的。

可能的环境响应特性调查试验包括多种方法,其实质就是敏感性测试,振动特性包括从线路板的微模态试验到系统整体的大型模态试验,如扫频、定频振动、冲击试验等。温度特性包括温度分布特性、温度变化速度、温度平衡时间或时间常数等。电磁特性包括辐射发射特性、接收特性、屏蔽特性、频谱特性等。此外,还包含综合特性,如热振动特性。其中特别是电气设备结构、支架、连接、减震器、隔热件

等集多种功能于一身,对其本身性能起到非常关键的作用,所以也是试验不能忽视的部分。

具有强非线性的复杂结构系统,应采用不同量值输入。

试验的顺序仍然是按照先传递路径末梢开始,沿着传递路径逆向进行,以便减少耦合因素的影响。当然,设备之间的影响,不同能量之间的转换需要考虑。

近几年虚拟试验成为产品设计手段的发展方向之一,由于当前网络和计算机技术具有非常好的条件,应大力发展试验建模分析技术,逐步形成完善的模型库,为后续的产品设计提供更为实用的分析工具。对产品设计而言,其成为一种仿真工具;对环境试验而言,可以辅助分析增加边界条件后试验状态下是否存在问题。

3.5 特殊情况下的设计思路

当遇到一些特殊情况时,环境量级很大,采用特性控制和提高抗环境能力都无法解决,如战场环境下或环境武器作用,因其目的就是压制或摧毁敌方装备,所以量级巨大,产品无法承受。所以此时应转变思路,采用规避策略或防护策略,如核防护、电磁脉冲防护等。

3.6 环境适应性的关键

由于产品出现缺陷往往是对外部环境响应的直接作用结果,产品响应特性反映了其内部环境的恶劣程度,因此产品对环境敏感特性解决了,环境问题也就解决了一大半,就能集中精力实现产品的整体功能。电气设计不当会造成电磁干扰,结构设计不当会造成共振或放大等,这些问题需要环境人员和产品设计人员共同研究才能提供好的解决方法。产品设计人员应充分与环境人员沟通,使环境技术人员充分了解产品结构、功能、采用的材料及其特性。

(未完待续)