

航天器动力学环境试验标准体系研究

韩晓健, 李宁, 李俊慧, 焦安超, 于丹

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 文中主要论述了我国标准体系框架和分类及军用标准体系, 研究了航天器环境工程标准体系及航天器动力学环境标准的发展及其与国外标准体系的关系, 探讨了航天器动力学环境试验验证系统及验证标准的发展及作用, 阐述了航天器力学环境试验标准与国外同行业的差距及发展方向。

关键词: 标准; 航天器动力学环境试验; 验证; 体系

中图分类号: V412.4 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)03-0027-06

Investigation on Chinese Standard System of Dynamics Environmental Test for Spacecraft

HAN Xiao-jian, LI Ning, LI Jun-hui, JIAO An-chao, YU Dan

(Beijing Institute of Spacecraft Environmental Engineering, Beijing 10094, China)

Abstract: The standard system frame and organization of national and defense standard system of our country was introduced. The development of spacecraft environmental engineering standard system and spacecraft dynamics environmental test standards was studied as well as relationship with foreign standard system. Development and function of validation system and validation standard of spacecraft dynamics environmental test were discussed. Difference from the same trade of foreign country was analyzed and development direction of spacecraft dynamics environmental test standard was put forward.

Key words: standard; dynamics environmental test for spacecraft; validation; system

在航天研制过程中,为了检验产品的设计、制造是否能经受预计的动力学环境载荷,是否能暴露产品在材料和制造方面的缺陷,需要进行大量的地面动力学环境试验^[1]。这些试验贯穿在整个研制过程中,对航天器的质量和可靠性的保证起到了巨大的作用。为此,各国相继制定了航天器试验标准来指

导试验计划的制定和实施,我国也通过多年的积累及参考国外的先进经验,制订了较为系统的动力学环境试验标准及体系。这些标准经过几十年的应用和不断修订,已初步适应了航天产品设计、研制、生产的需要,但随着航天事业特别是载人航天器和深空探测事业的发展,需要对动力学环境试验标准及

收稿日期: 2012-03-05

作者简介: 韩晓健(1964—),女,辽宁大连人,研究员,主要从事航天器力学环境试验的测量和数据分析。

体系进行研究。

1 标准体系

1.1 国家标准体系

1.1.1 标准的分类

当前我国标准有几种不同的分类方法:

1) 按标准的适用领域和有效范围可以分为国际标准、区域性或国家集团标准、国家标准、军用标准、行业标准、地方标准和企业标准;

2) 按级别分为国家级、行业级、企业级;

3) 按使用对象分为军用、民用;

4) 按标准的密级分为绝密、机密、秘密、内部;

5) 按标准的有效期分为现行标准和作废标准;

6) 按标准的约束性分为强制性标准和推荐性标准;

7) 按标准是否具备通用性分为通用标准和专用标准;

8) 按标准的性质分为技术标准、管理标准和工作标准;

9) 按标准的用途分为产品标准、设计标准、材料标准、零部件标准、工艺工装标准、方法标准和基础标准等;

10) 按标准的成熟程度分为标准草案、暂行标准、试行标准和正式标准;

11) 按标准化对象所属专业,《中国标准文献分类法》将标准划分为24类。

2.1.2 国家军用标准的分类

根据GJB 832A—2005《军用标准文件分类》的规定,军用标准分类为25个。系统标准分大、小类,其中大类为16个,小类类目有233个,每个小类均隶属于特定的大类之中。

1.2 航天器工程标准体系

1.2.1 体系分类

目前,中国宇航活动的常用标准有国军标、航天行业标准和企业标准。国家军用标准中有关航天的标准总数约几百个。航天行业标准最初是第七机械工业部的部标准的代号,主要涉及武器装备的标准,随着空间技术的发展,逐渐形成了现在的航天行业

标准,目前还有航天科技集团标准。

航天科技集团空间技术研究院的标准体系(企业标准)是军用标准的航天系统标准下的航天器标准。目前中国空间技术研究院标准包括工程系统标准体系、管理系列标准体系、产品系列标准体系、产品保证系列标准体系。

1.2.2 体系架构

航天器工程的标准涉及国标、国军标、行业标准、企业标准(院标)、所标。国家标准是环境工程基础标准,是最基本的标准,从标准的执行范围和指导作用来讲,依次为国军标(国标)、行业标准、院标、所标,其组成关系如图1所示。

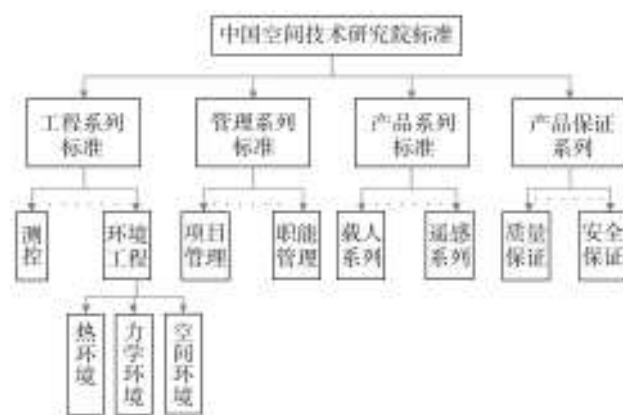


图1 中国空间技术研究院标准体系

Fig. 1 Standard system of China academy of space technology

航天器标准的系统架构与欧洲ECSS标准体系框架相似,为树状结构,我国航天器标准包括项目管理(M)、产品保证(Q)、工程(E)、产品(P)系列,较ECSS标准多了产品系列。

1.3 航天器环境试验标准体系

1.3.1 体系分析

航天器环境工程标准系统框架如图2所示。

从图2可以看出,动力学环境是环境工程的重要组成部分之一,组成动力学环境试验的标准有国军标、行业标准、院标(企业标准)、所标等。然而,在标准体系中没有明确地按照动力学环境试验的各个组成专业(例如振动、声)的层次进行划分和归纳,不利于标准的查询和使用。

1.3.2 体系框架

经过大量的标准体系资料的调研分析,可以按



图2 航天器环境工程标准体系

Fig. 2 Standard system of spacecraft environmental engineering

照标准级别划分或者按照动力学环境试验的专业进行划分。航天器动力学环境试验标准详细分类如图3所示。

从图3可以看出,航天器动力学环境试验标准按照动力学专业划分为基础标准、振动环境试验标准、声环境试验标准、冲击和分离试验标准、加速度环境试验标准、环境试验测量和数据处理标准及其它标准,其中其它标准主要是包含航天器动力学环境试验辅助的一些相关标准,以支撑航天器动力学环境试验实施,如航天器产品多余物控制标准等。模态试验是航天器结构试验方法之一,不能作为航天器动力学环境试验范畴,但可以作为航天器动力学试验组成的主要部分之一,将其归为航天器结构试验方法的范畴。航天器动力学环境试验标准按照级别划分有国军标、行业标准、企业标准及规范。

航天器动力学环境试验标准详细列表的优点在于将标准按照专业及级别进行组合,使标准体系一目了然,相互关系明确,查找方便。

航天器动力学环境试验标准经过近30年的发展,体系框架清晰,各专业标准比较完整、系统,但随着航天器动力学环境试验的发展,需要尽快完善和补充以下标准:1)航天器综合环境试验方法方面的标准;2)月球土壤环境模拟及试验方法方面的标准;3)多轴试验技术标准;4)微振动环境模拟及试验技术标准等。

2 航天器动力学环境试验标准与国外相关标准的关系

航天器动力学环境试验最直接且具指导性意义

的标准是GJB 1027A—2005《运载器、上面级和航天器环境试验要求》、GJB 150.16A—2009《军用装备实验室环境试验方法 第16部分:振动试验》、GJB 150.17A—2009《军用装备实验室环境试验方法 第17部分:噪声试验》、GJB 150.18A—2009《军用设备实验室环境试验方法 第18部分:冲击试验》、GJB 150.15A—2009《军用设备实验室环境试验方法 第15部分:加速度试验》,其次是GJB/Z 222—2005《动力学环境数据采集和分析指南》。

GJB 1027A—2005代替GJB 1027,GJB 1027A—2005的修订主要参考了美国军用标准MIL-STD-1540B, MIL-STD-1540C和MIL-STD-1540E(草案)、美国军用手册MIL-HDBK-340A Vol I和欧洲空间合作组织标准ECSS-E-10-13^[2]。该标准从2005年颁布执行,它为运载器、上面级和航天器制定贯穿于整个研制过程的、经济有效的试验计划提供依据和指导。从目前来看,MIL-STD-1540E是1989年颁布的标准,2000年1月1日MIL-STD-1540F颁布,2008年10月MIL-STD-1540G颁布,MIL-STD-1540G中增加了5项试验,其中首次将多轴试验方法作为一种实验室环境试验方法写入该标准中。由于MIL-STD-810G本身的适用范围比较广,是制定很多标准和规范的指导性的标准,它对多轴试验的很多细节并没有作出明确的规定。因此,可以看出美军标基本每7~8年就会根据实际应用情况进行修订,而GJB 1027A—2005主要是参考MIL-STD-1540C和MIL-STD-1540E(草案)。因此,GJB 1027A也应在充分考虑我国多年来型号和试验中的实践和经验并参考新颁布的美军标的内容,在适当的时机进行修订。

GJB 150—1986在1986年颁布,2009年第1次修订。该标准是军用设备环境试验方法标准,本标准是制定军用设备有关标准和技术文件相应部分的基础和选用依据。其中GJB 150.15—18部分是关于动力学环境试验方法。新GJB 150基本上等效于美国军用标准MIL-STD-810F第I部分中的第5章和第II部分^[3]。标准的性质从原来可直接引用的“菜单标准”转变为经剪裁后才能使用的“剪裁标准”,因此要求标准使用者对标准有更深入的理解,并掌握更多的环境工程基本知识和信息。新GJB 150规定的试验项目相对于GJB 150有所变化,即增加了酸性大气、流体污染、弹道冲击和爆炸分离冲击等试验方

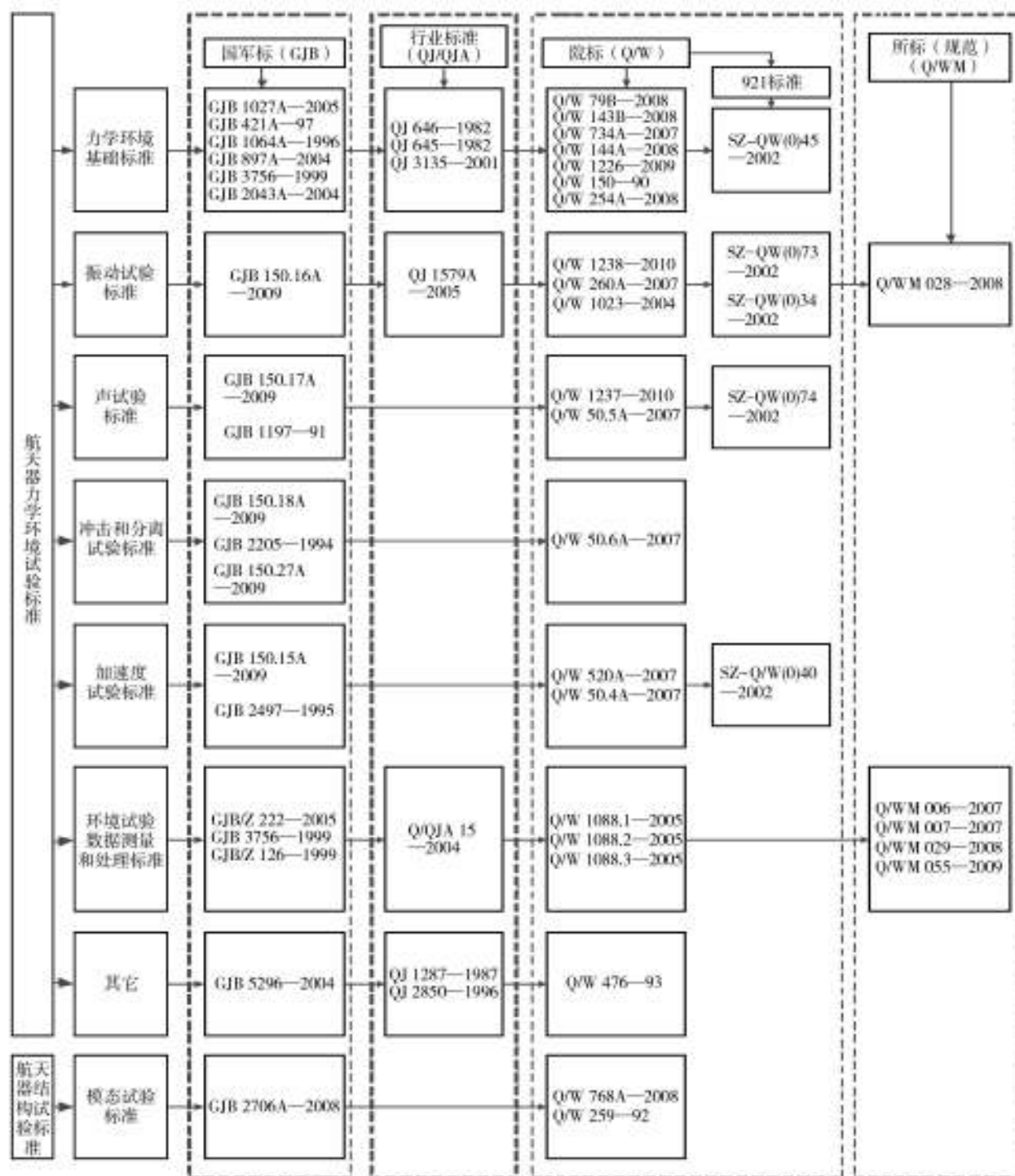


图3 航天器动力学环境试验标准详细列表

Fig. 3 List of particular standard and criterion of dynamics environment test for spacecraft

法,取消了温度-高度和温度-湿度-高度试验。此外,按照 MIL-STD-810F 中的方法 520 对 GJB 150 中原有但未实际应用的方法 24 进行了修订。

动力学环境数据采集与分析是工程产品开发和

研制中一项重要的共性技术。要求完整地、准确地采集产品试验验证或科学实验的数据,进而用适当的分析方法从数据中提取对产品研制有意义的特征信息。这些信息是产品环境设计和试验条件制定的

依据。但是,由于动力学环境数据特征的多样性,数据采集与分析设备性能和功能的差异以及各种数据采集和分析方法的局限性,动态数据采集与分析方法多,加之测试人员素质的差异,使测量结果的准确度和精确度很大程度上取决于人的判断。如果处理不当,往往引起较大的误差甚至错误。因而,合理、正确地进行测量系统设计(配置与参数设置)与规范化数据分析的原则和方法相当关键。

GJB/Z 222—2005《动力学环境数据采集和分析指南》是2005年由国防科工局(原国防科工委)颁布。该标准主要参考了美国环境科学技术协会IES-RP-DTE 012.1《动力学数据采集和分析手册》(1993),并根据国际上动力学环境数据采集与分析技术的进展,结合我国的具体技术现状,删减了过时内容,补充了一些新的技术和方法^[4]。该指导性技术文件在总结国内外动力学环境数据采集与分析的研究成果和工程实践经验的基础上编制,对动力学环境数据测量、采集与分析过程的规划、测量仪器的选择与使用、数据的确认和编辑以及数据分析所设计的主要技术问题进行了全面论述,推荐了工程实践中行之有效的方法,目的是规范动态数据采集与分析的过程与方法,减少测量结果的易变性和误差,保证试验测量数据的有效性和可比较性。

2001年,美国航天局发布了NASA-HDBK-7005《动力学环境准则》^[5],该准则系统地总结和评估了产品任务的动力学环境预示方法、动态激励或力学环境引起的载荷预示方法、结构环境激励响应预示方法及为航天器的设计和试验制定的动力学容差标准程序方法,总结了试验设备和试验过程,然而,目前我国还没有将其转化为航天行业标准^[6]。建议根据NASA-HDSK-7005制定4类标准:动力学环境分类与描述、动力学环境预示、动力学设计与试验准则、动力学环境试验方法标准。

3 航天器动力学环境试验标准体系发展的探讨

3.1 验证(评价)体系及验证标准的探讨

验证工作是用实证的方法确认产品的实际特性是否符合预定的使用要求。通过验证发现设计、制造、材料等方面的各种缺陷并采取措施加以消除,以

保证产品符合使用要求。验证活动作为一种过程管理手段,可以控制产品研制生产中的技术、计划和成本风险,以保证产品研制生产项目的成功实施。

对于航天器的验证问题,其标准体系分为3个层次:验证的顶层管理标准,验证技术和管理要求与管理方法标准,具体验证技术/方法标准。

国外验证技术和管理要求与管理方法标准、文件主要有:ECSS-E-10-02A《航天工程验证》、MIL-STD-1540《运载器、上面级和航天器与运载火箭的产品验证要求》、MIL-HDBK-340A《运载器、上面级和航天器与运载火箭的试验要求》等^[7]。具体验证技术/方法标准和文件有MIL-STD-810G。

航天器产品的地面动力学试验验证和评价的重要依据之一是各项试验标准,国外主要的航天器研制单位都有各自的试验标准,并随着实践经验的积累和有关研究工作的进展,每隔一定时间都要进行标准修订,使之更好地为航天器的研制服务。作为国内航天器的力学环境试验验证标准有GJB 1027A—2005和GJB 150等。

国外对于航天器验证技术和管理要求与管理方法标准很完整,对航天器验证有很好的指导作用,执行情况没有查询到更具体的相关报道。国内对于航天器验证已有验证技术和管理要求及具体验证技术/方法的标准,主要问题在于:1)缺少顶层的管理标准;2)缺少航天器验证体系的建立,只停留在航天器验证认识层面,缺乏从管理和技术上建立一套完整的验证体系和机制。

3.2 需求分析及差距

总体来说,现有技术标准基本上涵盖全面,试验过程中各相关工序均有标准支持,目前各标准的可操作性较好,自颁布以来,在对我国各型号的研制试验和对外的合作和交流中都起了很大的作用。但随着我国航天器研制的深入推进、专业技术的发展,现有标准存在差距。

1) 部分标准不具备普遍性。由于编制标准当时的环境及条件的限制,主要针对卫星环境试验,未考虑载人航天器、目标飞行器、深空探测器等多种型号研制试验的实施,这在一定程度上削弱了标准的通用性,也给除卫星外的各型号研制试验的实施带来了一定程度的随意性,有悖于航天器研制规范和

标准的要求。

2) 有些标准中规定的技术内容过于陈旧。如声试验标准 GJB 1197—1991, 由于试验方法、仪器设备日益更新, 标准中的部分技术过于陈旧或者从来没有使用过, 一些规定和要求与现行法规 (如 GJB 1027A—2005) 有相冲突和矛盾的地方, 这给引用标准带来了困难。

3) 标准体系不太完整。随着研制水平和认识程度的提高, 一些试验方法和测试手段已经逐渐得到验证和接受, 如力限控制技术、声振联合试验方法将逐渐应用到航天器验证试验中, 目前国内尚没有相关的标准。

4) 与国际标准的接轨。随着对外合作项目的发展, 迫切要实现航天标准与国际标准的接轨, 在不断跟踪和掌握国际上的新技术、新材料和新工艺, 学习科学、系统、规范化的管理方法和经验的同时,

使我国标准纳入到科学、系统、规范化的管理轨道。

3.3 需新增、修订的标准和规范

随着航天器动力学环境试验的发展及探月项目和火星计划的实现, 需要对未知的新型航天器的在轨环境、月面环境等动力学环境进行模拟, 通过地面模拟试验方法研究, 验证航天器的可靠性, 所以需要研究新环境 (例如 $g/6$ 微重力环境) 的试验方法及规范的建立。

同时航天器的试验技术在不断发展, 如航天器力限试验技术、航天器声振联合试验技术、航天器多轴试验技术、航天器虚拟仿真试验技术、航天器微振动环境试验技术将趋于成熟, 亟待建立相应的试验技术和试验方法方面的标准和规范, 使航天器动力学环境试验标准更加全面, 和国际接轨。需要新增的标准见表 1。

表 1 需新增的标准及规范

Table 1 List of standards and criterions needed to be drafted

序号	标准名称	制定/修订	建议级别
1	月球探测工程大型地面试验项目及要求	制定	国军标
2	月面巡视探测器地面模拟试验方法	制定	国军标
3	航天器力限控制振动试验方法	制定	国军标
4	航天器多轴振动试验方法	制定	国军标
5	航天器声振联合试验方法	制定	国军标
6	航天器振动试验虚拟仿真方法	制定	国军标
7	航天器噪声试验虚拟仿真方法	制定	国军标
8	航天器微振动环境模拟试验方法	制定	国军标
9	航天器微振动环境地面测量及数据处理方法	制定	院标
10	卫星动力学试验数据库管理与应用规范	制定	院标

4 结论

通过国内标准体系及航天器动力学环境试验体系现状研究和国内外航天器动力学环境试验标准的对比分析, 可以得出如下结论: 1) 航天器工程标准和动力学环境试验标准体系框架继承了欧洲的 ECSS 标准体系框架; 2) 航天器动力学环境试验标准主要参照美军标和 NASA 标准; 3) 需要开展航天器动力学环境试验验证体系及验证标准的研究; 4) 需要加强航天器标准体系中涉外标准中的技术秘密保

护的工作; 5) 需要开展航天器标准中涉密标准体系建设工作; 6) 急需进行新型航天器的在轨环境、月面环境等动力学环境模拟技术、试验技术和方法及标准的研究。

参考文献:

- [1] 柯受全, 金恂叔, 白松波, 等. 卫星环境工程和模拟试验 [M]. 北京: 宇航出版社, 1996.
- [2] GJB 1027A—2005, 运载器、上面级和航天器环境试验要求[S].

(下转第 47 页)

斜向 $y=105.525x^2-1.165x+0.012$

实验过程中采集到的噪声数据是符合噪声衰减变化规律的,实验数据真实可靠,能够用于说明无人靶机的噪声问题。

此外,从图3中的噪声数据可以看出,在50 m范围之内,各个方向的噪声值均随着测试位置与发动机距离的增大而减小。由于所测噪声数值与表1规定的环境噪声标准值中的听力保护与语言交流的理想值有比较大的差距,说明无人靶机确实会对人的身心与作业造成影响;在距发动机5 m的范围内,各个方向的噪声数值都在100 dB以上,超过表2听力保护的噪声允许标准,在这样比较强的噪声环境下,操作人员每个工作日允许的工作时间应该尽量减少且不超过0.5 h。

对比3个方向的噪声分布可以看出,图3中所示的纵向方向的噪声衰减最明显。因此,在同等条件下,纵向对操作人员的身心与作业影响应该最小。该方向将成为操作人员站位的首选方向。

4 无人靶机噪声防护对策

1) “机”的设计和制造。从人-机-环境系统工程的角度来讲,应该在无人靶机的理论研究、模型设计、实物制造时充分考虑到噪声因素,尽量提高发动机制造的工艺水平,通过运用先进的制造工艺与技术,最大限度地降低发动机本身产生的噪声。

2) 人员操作位置的选取。对于必须在无人靶机近距离操作的人员(一般为3人),在操作规程要求的操作距离范围之内尽量选择在远离无人靶机发动机的位置(根据无人靶机的相关操作规程,其操作地域一般在3 m范围之内)。同时,从操作位置的方向上考虑,应该尽量选择在靶机的纵向方向,最大限度地减小噪声的影响。对于协同操作的其他保障或维护人员,在确保任务完成的基础上,尽量选择在靶

机的纵向且离无人靶机50 m之外。

3) 操作人员自身的防护。对于负责无人靶机具体操作的人员,由于与无人靶机的距离很近,必须采取听力防护。为了保护听力,应该配戴专门的噪声防护装置,确保传到耳朵的噪声在75 dB以下。同时,应该尽量减少他们在无人机靶机噪声区的操作时间,确保其最大操作时间不超过0.5 h,从而有效地保护身心健康。对于与无人靶机协同操作的其他保障或维护人员,因无人靶机对其听力不构成危害,因此,主要致力减少语言交流的影响,可以视情况采取灵活的应对措施。

5 结语

无人靶机的噪声强度比较大,对操作人员的身心与操作绩效都有较大的影响。文中从解决实际问题的角度出发,通过对噪声环境的实际测试,得出了部分实验数据。经过对实验数据的分析,得出了无人靶机发动机噪声分布情况与变化规律,并结合数据结果提出了相应的解决对策。

参考文献:

- [1] 庞志兵. 防空兵人-机-环境系统工程[M]. 郑州: 防空兵学院, 1999: 211—235.
- [2] 赵景联. 环境科学导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 35—66.
- [3] 环境工程考虑和实验室试验[M]. 北京: 航空工业第三〇一所, 2000: 112—143. (余不详)
- [4] 军用设备人的因素工程设计手册[M]. 北京: 航天医学工程研究所, 1998: 53—69. (余不详)
- [5] 李志辉, 罗平. SPSS统计分析教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 132—161.
- [5] NASA-HDSK-7005, 动力学环境准则[S].
- [6] 张小达, 荣克林. NASA-HDBK-7005《动力学环境准则》分析[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(5): 32—36.
- [7] 张小达. 航天器与运载火箭验证技术标准化探讨[J]. 航天标准化, 2009(3): 48—53.

(上接第32页)

- [3] 祝耀昌, 汪启华. 美军标810F和未來GJB 150A中《温度、湿度、高度、振动》试验的分析和讨论[C]//装备环境工程研讨会论文集. (余不详)
- [4] GJB/Z 222—2005, 动力学环境数据采集和分析指南[S].