

基于分档策略的装备统一环境试验条件 设计方法

李炳蔚, 牛智玲, 黄梦宏, 李雨青

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: **目的** 研究提出基于分档策略的装备统一环境试验条件设计方法。**方法** 首先, 对装备力、热、自然等环境试验条件的统一化进行详细论证, 研究得到不同类型环境条件的分档策略。然后, 对不同型号环境试验条件的项目进行分析, 提出环境试验项目“基本项”+“定制项”的统一方法, 得到通用试验项目和定制试验项目。随后, 对于特定环境试验项目, 提出基于极值的“包络式”、基于概率统计的“精细式”和基于就近归集的“分档式”3种统一环境试验条件制定方法, 给出各种方法的特点、剪裁方法, 并结合典型航天型号, 给出应用案例和方法示意。**结果** 得到了基于分档策略的装备统一环境条件制定的方法, 给出了典型装备的分档环境试验条件。**结论** 从装备的实际出发, 提出的基于分档策略的装备统一环境试验条件的设计方法, 经实践证明是可行的, 对于降低货架产品的研制、批产和验收成本具有重要工程意义, 并且对于其他类型产品的技术条件统一化具有重要的借鉴意义。

关键词: 装备; 分档策略; 统一环境条件; 环境试验条件设计方法; 力学环境; 热环境; 自然环境

中图分类号: V421.1; V216.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)04-0008-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.04.002

Design Method of Unified Environmental Test Conditions for Equipment Based on Grading Strategy

LI Bing-wei, NIU Zhi-ling, HUANG Meng-hong, LI Yu-qing

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a design method of unified environmental test conditions for equipment based on grading strategy. First of all, the unification of mechanical environment, thermal environment, natural environment and other environmental test conditions of equipment were demonstrated in detail, and the grading strategies of different types of environmental conditions were obtained. Then, the items in different types of environmental test conditions were analyzed, the unified method of "basic item" + "customized item" of environmental test project was put forward, and the general test project and customized test project were obtained. Then, for specific environmental test projects, three unified environmental test conditions

收稿日期: 2022-10-19; 修订日期: 2022-12-09

Received: 2022-10-19; Revised: 2022-12-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11972377); 国家自然科学基金青年基金(11902364)

Fund: The National Natural Science Foundation of China(11972377); The National Natural Science Foundation of China Youth Foundation(11902364)

作者简介: 李炳蔚(1984—), 男, 博士。

Biography: LI Bing-wei(1984-), Male, Doctor.

引文格式: 李炳蔚, 牛智玲, 黄梦宏, 等. 基于分档策略的装备统一环境试验条件设计方法[J]. 装备环境工程, 2023, 20(4): 008-015.

LI Bing-wei, NIU Zhi-ling, HUANG Meng-hong, et al. Design Method of Unified Environmental Test Conditions for Equipment Based on Grading Strategy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(4): 008-015.

were proposed: "envelope" based on extreme value, "fine" based on probability and statistics, and "grading" based on nearest set. Finally, the characteristics and tailoring methods of various methods were given, and the application cases and methods were displayed in combination with typical aerospace models. Thus, the method of establishing unified environmental conditions of equipment based on grading strategy was obtained, and the grading environmental test conditions of typical equipment were given. Considering the reality of equipment, the design method of unified environmental test conditions for equipment based on grading strategy is proved to be feasible, and it is of great engineering significance to reduce the cost of development, batch production and acceptance of shelf products and has important reference significance for the unification of technical conditions of other types of products.

KEY WORDS: equipment; grading strategy; unified environmental conditions; design method of environmental test conditions; mechanical environment; thermal environment; natural environment

在装备研发过程中, 为降低成本, 提高可靠性, 需要大量采用相对成熟、久经考验的货架产品, 如通用遥测传感器、通用导航接收机等。货架产品为了适应不同型号、不同安装位置的环境试验条件, 相同的产品往往要重复开展大量定制化的试验项目, 这对于产品的低成本研制、批量化备料、规模化生产、高效率验收都非常不利。传统的“包络式”设计方法把所有型号的环境试验条件进行最大化包络, 虽然可以实现环境试验条件的统一, 但不利于产品的低成本设计。为此, 本文从装备的实际出发, 研究提出了基于分档策略的装备统一环境试验条件设计方法。本文以航天装备为例, 开展了力、热、自然环境试验条件设计方法的研究, 该方法对于其他类型装备也具有一定的普适性。

工程中, 装备的环境的力、热、自然等试验条件主要是根据相关标准制定的^[1-5]。大部分装备环境试验条件制定方法研究主要是集中在力学环境试验条件方面, 包括地面运输和飞行环境, 研究的主要方向是环境试验条件预示和标准剪裁方法方面。冯福来^[4]、邹小玲^[5]、王亮等^[6-7]、章思騫^[8]、张曾铝等^[9]、郭强岭等^[10-11]、马升等^[12]、李春丽等^[13]、刘凯^[14]、宁薇薇等^[15]研究了各类装备振动环境预示、制定和分析的方法。商霖等^[16]研究了基于实测地面试验数据统计分析的导弹装备公路运输振动环境试验条件的预示方法。王晓雷等^[17]研究了基于实测飞行试验数据的惯组飞行角振动环境测量与试验条件设计方法。李春丽等^[18]研究了基于地面脉动压力风洞试验数据的再入飞行器飞行噪声、振动环境预示方法。董周战等^[19]、孙建勇等^[20]、史明丽等^[21]、宋敬利等^[22]、龚学兵等^[23]、张玉杰等^[24]研究了装备冲击试验条件的制定和分析方法。对于自然环境(盐雾、霉菌、砂尘等)、平台诱导环境(机载武器挂飞振动环境等)主要是参考相关标准^[25-29]。黄梦宏等^[30]基于任务剖面分析, 根据实测地面运输、飞行试验的数据, 研究了武器装备统一力学环境试验条件的可行性。结果表明, 装备运输振动、运输冲击环境、飞行振动、飞行噪声环境可以建

立统一的环境试验条件。在航天工程实践中, 对一个适装不同型号的货架产品提出统一环境试验条件时, 传统做法是对不同型号的环境试验条件进行包络处理, 使得产品可以适应不同型号项目的环境。

然而, 目前对环境条件制定的研究主要是集中在通过环境分析或者参考相关标准制定特定的环境条件, 其中对统一环境条件的研究主要是采用条件包络的方法, 还缺乏针对货架产品的产品化统一环境试验条件制定方法的系统研究, 且难以指导和支撑装备产品化、低成本的工程研制需求。为此, 本文从装备的实际出发, 提出基于分档策略的装备统一环境试验条件设计方法, 通过采用“基本项”+“定制项”的方法对试验项目进行统一化, 采用“包络式”+“精细式”+“分档式”对试验条件进行统一化。本文的方法从工程实际出发, 提出了一种基于分档策略的系统、多维度统一环境条件的制定方法, 是对传统“大包络”设计方法的重要延拓和创新, 规避了传统方法带来的高量级、高成本弊端, 且经过了航天工程实践的验证, 对于产品化研制、降低装备成本具有重要意义, 支撑现代战争“打得起才能打得赢”。

1 统一环境试验条件制定方法概述

首先, 对装备环境试验条件的统一化进行详细的论证。全面梳理装备环境适应性要求的试验条件, 结合不同平台装备的使用剖面, 开展不同平台装备使用环境统一化可行性论证, 研究统一环境试验条件制定的策略。装备需要开展的环境试验项目可以分为平台使用环境试验和飞行环境试验, 每一类又可以细分为若干不同类型的试验项目。对于不同型号, 其环境试验条件可能在试验项目、试验条件上有所不同, 如图 1 所示。为了提高统一环境条件在型号应用中的便捷性、可操作性, 且降低研制和批产成本, 环境试验条件统一化应遵循简化和经济性的原则, 按照环境试验项目和条件分档 2 个方面提出环境试验条件分档的总体策略。

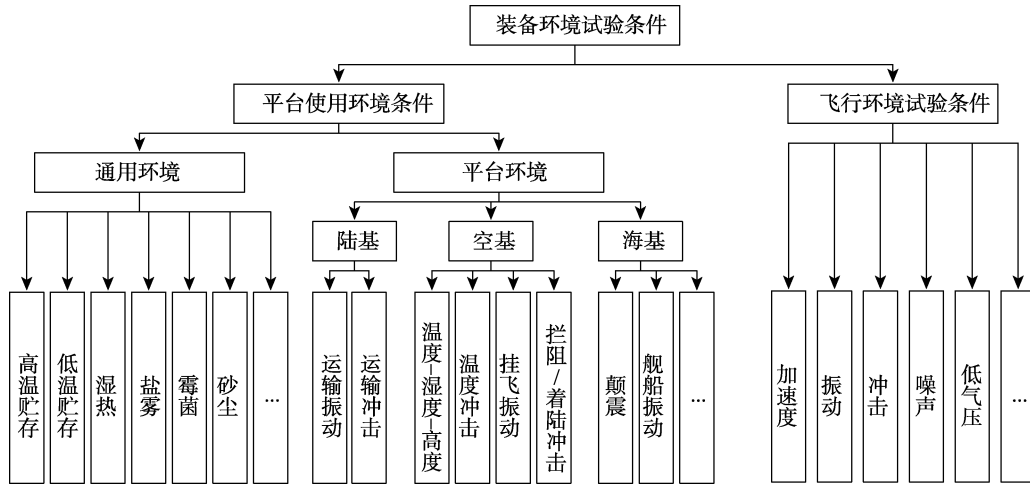


图1 装备环境试验条件分析
Fig.1 Analysis of environmental test conditions of equipment

2 环境试验项目分档方法

首先,对图1中产品涉及的不同型号各类环境试验的项目进行分析,确定试验项目的分档策略,明确分档环境试验项目。由于航天工程中一些通用产品应用到不同平台、不同军兵种的型号众多,面临不同型号环境试验条件项目差异较大,同一类环境试验条件散布范围较大的情况。为此,对试验项目进行分档,分为“基本项”和“定制项”,如图2所示。“基本项”是通用的环境试验项目,也就是所有产品都要开展的试验项目,“定制项”是需要视情剪裁的试验项目。

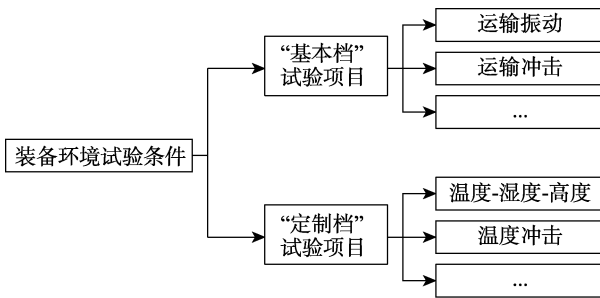


图2 环境试验项目的分档
Fig.2 Grading of environmental test projects

根据装备实际情况,经过论证后的统一环境试验条件及其制定策略见表1。本文的研究结果可以作为其他武器装备的参考,也可以根据实际情况具体问题具体分析。

3 环境试验条件分档方法

对于图2中每个具体的环境试验项目,如果不同型号的试验条件差异不大,尽可能合并为1个统一的包络环境试验条件,也就是“包络式”环境试验条件,这样会使得货架产品在研制、备料和批产时只需要对

标1个环境试验条件,可以极大地降低成本。对于不同型号环境试验条件差异性较大的情况,考虑到不同量级的环境试验(如振动、冲击试验)可能会极大影响产品的试验方法、产品元器件原材料等级,进一步会极大地影响研制成本和批产价格,如果采用简单的包络式统一化环境试验条件,那么会使得低档位型号对应产品的成本大大增加。这种情况下,需要首先尽可能地根据飞行或者地面试验实测数据进行统计分析,然后基于统计结果进行精细化的环境试验条件设计,也就是“精细式”环境试验条件。或者对多型号环境试验条件进行分档环境试验条件的制定,把不同型号的环境试验条件就近归集到若干档位。出于经济性的考虑,一般环境试验条件的档位个数不超过3个,也就是“分档式”环境试验条件。

3.1 “包络式”环境试验条件制定方法

在工程上,往往已知各型号的环境试验条件,那么最简单的方式是对各型号的环境试验条件进行简单的包络,得到统一环境试验条件。包络的方法是:

1) 对试验项目进行包络。对于不同型号的试验项目进行最大包络,比如有的型号有盐雾试验,有的型号没有盐雾试验,统一环境试验条件需要按照有盐雾试验考虑。

2) 对试验条件进行包络。对于不同型号的试验条件进行最大包络,比如有的型号高温试验按60℃,有的型号55℃,那么统一后试验条件按照60℃。

假设有 n 个型号,其环境试验条件为 E_1, E_2, \dots, E_n ,那么进行包络后,统一环境试验条件可以描述为:

$$E_0 = \max \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$$

对典型的几种试验条件包络的方法如下:

1) 随机振动。一般环境试验条件以功率谱密度的形式给出,应对功率谱密度曲线取最大包络。

2) 高频冲击。一般环境试验条件以冲击响应谱

表1 统一环境试验项目分档策略
Tab.1 Grading strategy of unified environmental test projects

任务剖面	环境要素	试验种类	试验项目分档	
交付、转载 运输	包装箱运输(公路、铁路)	运输振动试验	基本项	
		低频冲击试验		
长时间贮存	高、低温贮存	高温贮存试验	基本项	
		低温贮存试验		
值班	温度-湿度-高度	温度-湿度-高度综合试验	定制项(机载)	
	温度冲击	温度冲击试验	定制项(机载)	
	执勤-运输	运输振动试验	定制项(陆基)	
		低频冲击试验	定制项(陆基)	
	执勤-挂飞	随机振动	定制项(机载)	
		低频冲击试验	定制项(机载)	
	执勤-舰载	颠簸试验	定制项(舰载)	
		正弦振动试验	定制项(舰载)	
		湿热	交变湿热试验	基本项
		沙尘	武器系统级沙尘试验	定制项(搭载)
		大风	武器系统级大风试验	定制项(搭载)
		低气压	—	基本项
	发射	发射	随机振动试验、冲击试验	基本项
		弹射	冲击试验	定制项(冷弹射)
飞行	振动	随机振动试验	基本项	
	分离冲击	高频冲击试验	基本项	
	噪声	噪声试验	基本项	
	加速度	加速度试验	基本项	
	高低温工作	高温工作试验	基本项	
		低温工作试验	基本项	
	电磁	电磁兼容试验	基本项	

的形式给出, 应对冲击响应谱取最大包络。

3) 高、低温试验。保温时间取最大值, 高温温度取最高值, 低温温度取最低值, 温度变化率取最大值。

4) 湿热试验。温度、湿度、持续时间取最大值。

5) 霉菌试验。温度、湿度、试验周期取最大值, 试验菌种取包络。

6) 盐雾试验。盐溶液浓度、盐雾沉降量、持续时间取最大值。

7) 沙尘试验。风速取最大值, 吹尘、吹砂浓度取最大值。

其他类型试验条件的包络可以参考上述方法进行包络, 包络的原则是使得统一环境可以包络各型号的环境对产品的损伤、破坏或腐蚀效果。包络的温度-湿度-高度环境试验条件如图3所示。

“包络式”环境试验条件的制定方法是工程上目前比较常用的一种方法, 其优点是简单易行、对现有型号环境试验条件满足性好、对批产比较友好, 缺点

是条件取最大包络, 可能会导致统一环境试验条件的量级过高。“包络式”环境试验条件的制定方法比较适用于环境试验条件本身比较接近, 或者产品对相关环境不敏感, 或者试验条件的大包络不显著改变产品研制或试验成本的情况。

3.2 “精细式”环境试验条件制定方法

“包络式”环境试验条件制定方法虽然比较方便, 但是多型号的包络往往导致环境试验条件项目多、量级高, 对于产品的低成本设计和批量生产往往是不利的。为了规避这一弊端, 提出“精细式”环境试验条件制定方法, 即通过梳理分析产品在不同型号地面及飞行试验实测的环境数据, 得到精细化的统一环境试验条件。由于各型号环境试验条件的提出往往是在方案设计阶段, 这一阶段由于缺乏试验实测数据, 出于工程化的考虑, 提出的条件往往带有较大的余量, 属于强化的环境试验条件。随着装备进入到鉴定定型阶段、使用阶段, 环境实测数据子样就更

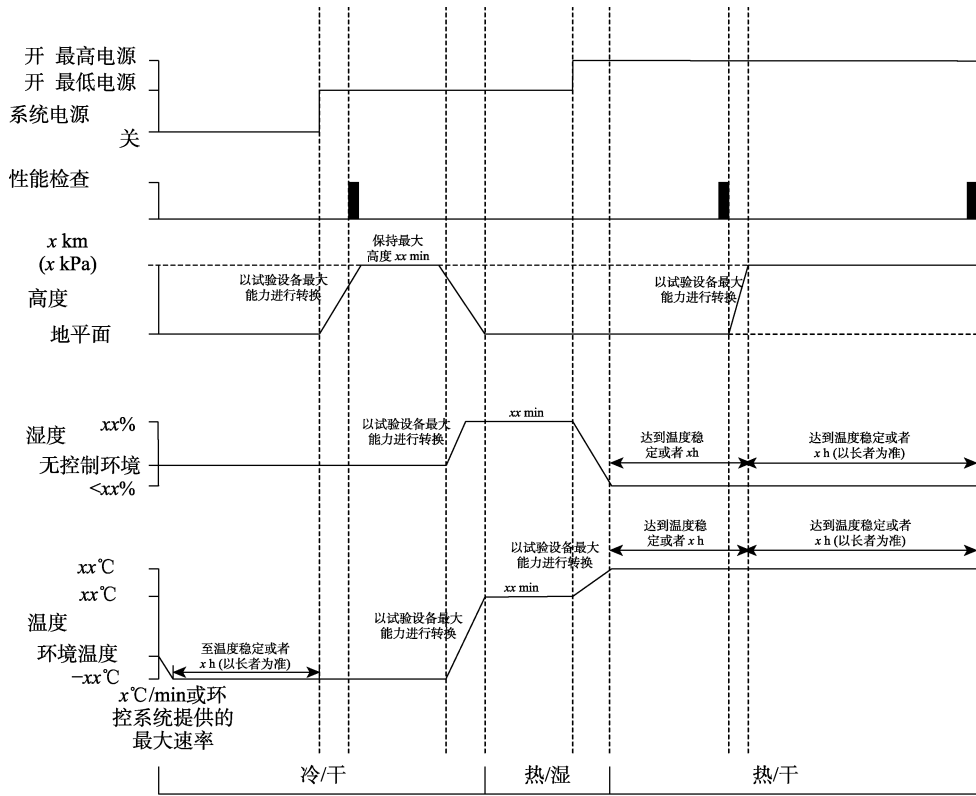


图3 包络的温度-湿度-高度试验条件

Fig.3 "Envelope" temperature-humidity-height test conditions

多了，且其量级往往远小于当初制定的环境试验条件。因此，在进行多型号条件统一时，可以基于各型号实测的环境数据，进行环境试验条件的“统一化”和“再制定”，可以达到既满足各型号环境试验考核的要求，同时又避免量级过高的效果。

“精细式”环境试验条件制定前，需要先收集不同型号实测的飞行试验数据，根据子样大小，采用不同的概率统计方法得到环境试验条件^[3]。

1) 子样数 $3 \leq N < 7$ 时，采用正态单边容差上限 (NTL) 的方法确定环境试验条件。对于某个 3 子样的火工冲击环境试验条件的制定情况(99%概率, 90%的置信度) 如图 4 所示。

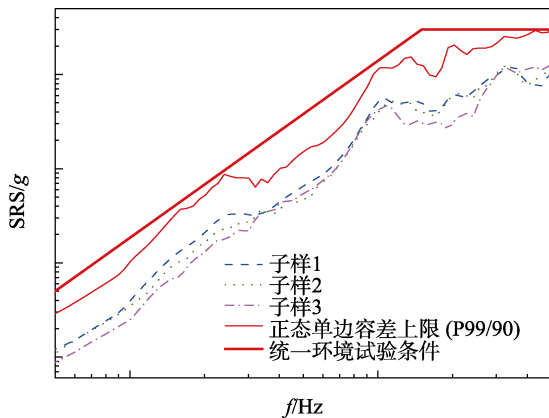


图4 基于 NTL 的“精细式”环境试验条件
Fig.4 Schematic diagram of "fine" environmental test conditions based on NTL

2) 子样数 $7 \leq N \leq 10$ 时，采用自由分布容差上限 (DFL) 或正态单边容差上限 (NTL) 方法确定环境试验条件。

3) 数据子样数 $N > 10$ 时，采用经验容差上限 (ETL) 或自由分布容差上限 (DFL)、正态单边容差上限 (NTL) 方法确定环境试验条件。

“精细式”环境试验条件是基于一组实测数据制定的，具备传统“包络式”方法的优点，同时规避了环境试验条件过大的问题。然而，该方法应建立在数据子样足够多的基础上，并且需要处理好统一环境试验条件与各型号环境适应性要求之间的兼容关系，也需要处理好与未来新的型号环境适应性要求的兼容性。

3.3 “分档式”环境试验条件制定方法

针对“包络式”、“精细式”环境试验条件制定方法的缺点，提出了“分档式”环境试验条件制定方法。该方法主要是对不同型号的环境试验项目和环境试验条件进行分析梳理，就近归集到若干档位，按照量级、谱形等区分为若干个不同的档位，通常不应超过 3 档。

通过论证，某航天装备飞行环境试验条件的分档情况如图 5 所示。对于飞行环境试验条件，根据不同的环境要素，结合飞行试验数据，分析得到分档环境试验条件。某航天装备飞行振动环境试验条件的分档情况如图 6 所示，根据不同型号环境试验条件子样的

分布, 进行就近归集可以细分为 3 档统一环境试验条件。相关产品在研发和批产过程中可以进行分组、分批, 分别执行相关档位的环境试验。在工程中, 也可

以根据实际情况, 对产品的设计进行对应分档, 对应于低档位环境试验条件, 可以适当选取低等级的元器件、原材料, 以降低成本。

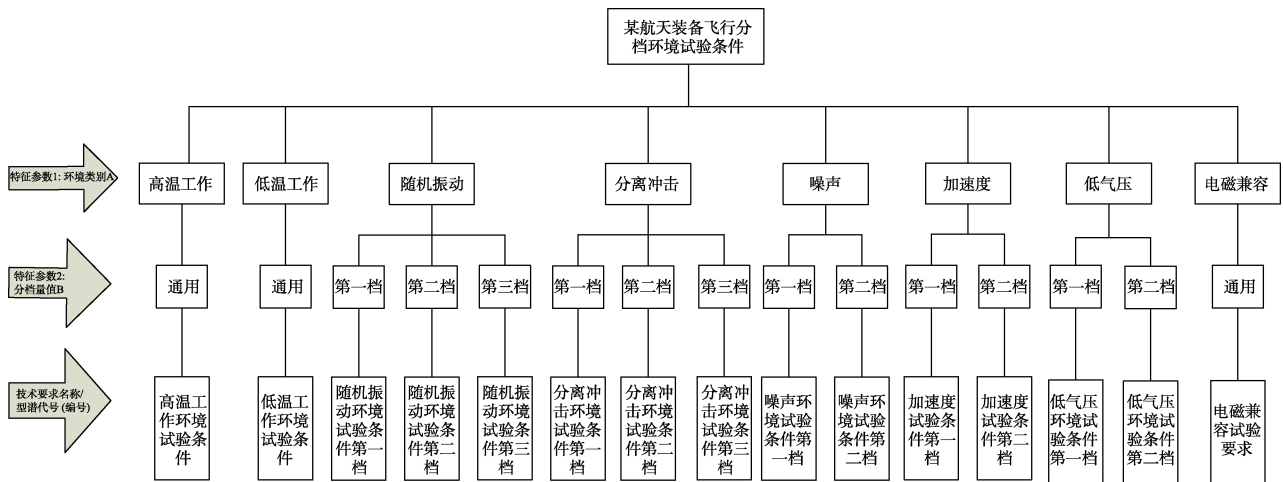


图 5 飞行环境试验条件的分档策略

Fig.5 Grading strategy of environmental test conditions of flight

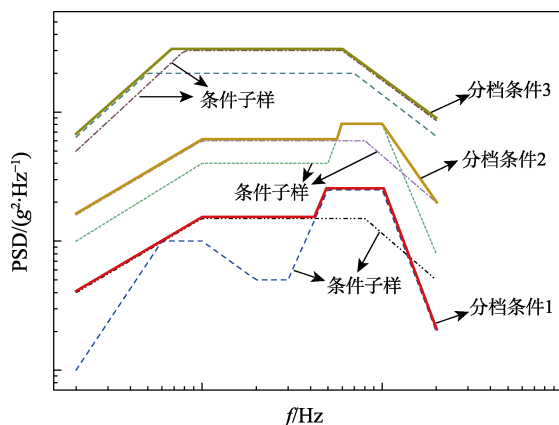


图 6 飞行振动分档环境试验条件

Fig.6 Schematic diagram of environmental test conditions of flight vibration

“分档式”环境试验条件制定方法特点是把环境试验条件或者实测环境进行就近归集, 避免了多型号环境试验条件散布较大时“一刀切”的做法, 且兼顾了经济性要求。

4 结语

本文提出基于分档策略的装备统一环境试验条件设计方法, 给出了装备环境试验条件的分档策略和剪裁方法。经过航天装备的实践表明, 本文提出的统一环境试验条件设计方法是可行的, 可以很好地兼顾产品化设计验收和低成本之间的关系。对不同型号环境剖面 and 试验项目进行分析, 可以采用“基本项”+“定制项”的方法对试验项目进行统一化。对不同型号具体环境试验条件进行分析, 可以采用“包络式”+“精细式”+“分档式”对试验条件进行统一化。

本文提出的统一环境试验条件的设计方法对于产品化研制、装备降成本具有重要意义。后续还需要开展的研究工作如下:

- 1) 开展基于疲劳/损伤等效的环境试验条件等效方法的研究, 支撑半正弦、随机振动等不同类型的试验条件的统一化。
- 2) 开展力、热、自然环境效应研究, 通过环境观测数据、自然暴露性能退化试验数据的积累, 支撑综合环境试验条件的等效。

参考文献:

- [1] GJB 150A—2009, 军用装备实验室环境试验方法[S]. GJB 150A—2009, Laboratory Environmental Test Method for Military Equipment[S].
- [2] MIL-STD-810F, 国防部试验方法标准—环境工程考虑和实验室试验[S]. MIL-STD-810F, Defense Department Test method Standard—Environmental Engineering Considerations and Laboratory Testing[S].
- [3] Q/Y 237—2020, 导弹武器系统力学环境条件设计规范[S]. Q/Y 237—2020, Standard for Design of Mechanical Environmental Conditions of Missile Weapon System[S].
- [4] 冯福来. 对机载设备环境试验条件若干问题的探讨[J]. 航空标准化与质量, 2001(5): 30-33. FENG Fu-lai. A Study of some Issues in Environmental Test Conditions for Airborne Equipment[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2001(5): 30-33.
- [5] 邹小玲. 直升机机载设备环境试验剪裁探讨[J]. 直升机技术, 2013(4): 24-28. Zou Xiao-ling. Tailoring of Environmental Test Standard

- for Airborne Equipment of Helicopter[J]. Helicopter Technique, 2013(4): 24-28.
- [6] 王亮, 张妍, 周晓丽, 等. 战术导弹飞行主动段力学环境快速预示方法[J]. 强度与环境, 2015, 42(5): 44-48.
WANG Liang, ZHANG Yan, ZHOU Xiao-li, et al. Fast Dynamic Environment Prediction Technology of Tactics Missile in Boost Phase[J]. Structure & Environment Engineering, 2015, 42(5): 44-48.
- [7] 王亮, 张妍, 蔡毅鹏, 等. 基于随机有限元的导弹振动环境试验设计研究[J]. 强度与环境, 2018, 45(6): 56-63.
WANG Liang, ZHANG Yan, CAI Yi-peng, et al. Study on the Design of Vibration Environment Test Conditions for Missile Base on the Stochastic Finite Element Method[J]. Structure & Environment Engineering, 2018, 45(6): 56-63.
- [8] 章思翥. 无人飞机环境振动试验条件的计算分析[J]. 航空标准化与质量, 1980(S2): 103-113.
ZHANG Si-yi. Calculation and Analysis of Environmental Vibration Test Conditions of Unmanned Aerial Vehicle [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 1980(S2): 103-113.
- [9] 张曾辑, 章光裕. 直升机机载设备飞行振动环境试验条件设计[J]. 直升机技术, 1996(4): 29-34.
ZHANG Zeng-chang, ZHANG. Design of Vibration Environment Test Conditions for Helicopter Equipment[J]. Helicopter Technique, 1996(4): 29-34.
- [10] 郭强岭, 李立名. 空空导弹挂飞振动试验条件探讨[J]. 航空兵器, 2003, 10(6): 21-23.
GUO Qiang-ling, LI Li-ming. Discussion on Test Conditions of Hanging Vibration of Air-to-Air Missile[J]. Hangkong Bingqi, 2003, 10(6): 21-23.
- [11] 郭强岭. 空空导弹振动试验条件确定方法[C]//中国航空学会环境工程学术年会. 洛阳: 中国航空学会, 2006.
GUO Qiang-ling. Method for Determining Vibration Test Conditions of Air-to-air Missile[C]// Annual Meeting of Environmental Engineering of Chinese Aeronautical Society. Luoyang: Chinese Aeronautical Society, 2006.
- [12] 马升, 徐明. 振动环境试验条件的确定[J]. 航空标准化与质量, 2004(2): 38-43.
MA Sheng, XU Ming. Determination of the Conditions for Environmental Vibration Test[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2004(2): 38-43.
- [13] 李春丽, 石云国, 邓克文, 等. 火箭试验弹振动试验条件分析[J]. 装备环境工程, 2010, 7(4): 32-35.
LI Chun-li, SHI Yun-guo, DENG Ke-wen, et al. Analysis of Vibration Test Condition of Experimental Rocket[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(4): 32-35.
- [14] 刘凯. 基于实测数据的空空导弹自由飞振动条件制定方法研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 114-118.
LIU Kai. Study on the Method of Making Free Flight Vibration Profile for Air-to-Air Missile Based on Measured Data[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 114-118.
- [15] 宁薇薇, 陈立伟, 孙立明. 舰船电子设备振动试验条件的分析和对比[J]. 环境技术, 2017, 35(3): 76-80.
NING Wei-wei, CHEN Li-wei, SUN Li-ming. Analysis and Comparison of the Condition of Shipboard Electronic Equipment Vibration Test[J]. Environmental Technology, 2017, 35(3): 76-80.
- [16] 商霖, 周国峰, 卢鑫. 战术导弹公路机动运输振动环境条件的研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(12): 40-44.
SHANG Lin, ZHOU Guo-feng, LU Xin. Vibration Environment Condition for Highway and Off-Road Transportation of Tactical Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(12): 40-44.
- [17] 王晓雷, 南官自军, 龙梁, 等. 惯组飞行角振动环境测量与环境条件设计[J]. 宇航总体技术, 2018, 2(1): 37-40.
WANG Xiao-lei, NANGONG Zi-jun, LONG Liang, et al. Measure of IMU? s Angular Vibration Environment during a Rocket Flight and Design of Test Condition[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2(1): 37-40.
- [18] 李春丽, 石先杰. 再入飞行器振动环境工程预示方法[J]. 装备环境工程, 2021, 18(3): 9-13.
Li Chun-li, Shi Xian-jie. Engineering Prediction Method of Vibration Environment of Reentry Vehicle[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(3): 9-13.
- [19] 董周战, 秦庭森, 李立名. 空空导弹冲击试验及试验条件的确定[J]. 航空兵器, 2001, 8(3): 15-17.
DONG Zhou-zhan, QIN Ting-sen, LI Li-ming. Air-to-Air Missile Impact Test and Determination of Test Conditions[J]. Hangkong Bingqi, 2001, 8(3): 15-17.
- [20] 孙建勇, 张建军. 飞行器拦阻着陆冲击试验分析[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 5-8.
SUN Jian-yong, ZHANG Jian-jun. Analysis of Shock Test for Aircraft Arrested Landing[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 5-8.
- [21] 史明丽, 黄国强. 冲击基本设计试验条件对机载外挂的适用性分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 17-20.
SHI Ming-li, HUANG Guo-qiang. Applicability Analysis of Basic Shock Test Condition on Aircraft External Carry[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2): 17-20.
- [22] 宋敬利, 张玉涛. 某浮动冲击平台外载荷与冲击环境分析[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(9): 16-19.
SONG Jing-li, ZHANG Yu-tao. External Load and Shock Environment Analysis of a Floating Shock Deck[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(9): 16-19.
- [23] 龚学兵, 任全彬, 李翥. 导弹发射冲击试验条件制定研究[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(5): 86-90.
GONG Xue-bing, REN Quan-bin, LI Zhu. Research on the Establishment of Shock Response Spectrum under the Missile Launch Conditions[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(5): 86-90.
- [24] 张玉杰, 杨卫平, 李斌, 等. 舰载机机载设备弹射和拦阻冲击试验条件研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(9):

- 123-128.
ZHANG Yu-jie, YANG Wei-ping, LI Bin, et al. Catapult Launch and Arrested Landing Shock Test Condition of Carrier-Based Aircraft Airborne Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(9): 123-128.
- [25] 翟波, 蔡良续, 祝耀昌. 实验室环境试验条件及其剪裁技术[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 87-91.
ZHAI Bo, CAI Liang-xu, ZHU Yao-chang. The Conditions of Laboratory Environmental Tests and Its Tailoring Techniques[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 87-91.
- [26] 杨华, 张少宏, 封雷. 型号研制中实验室环境试验条件剪裁方法浅析[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 35-38.
YANG Hua, ZHANG Shao-hong, FENG Lei. Analysis on a Method to Set Laboratory Environment Test Conditions for Prototype Development[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(2): 35-38.
- [27] 翟唤春, 赵鑫. 关于自行火炮湿热环境试验条件的讨论[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1): 66-69.
ZHAI Huan-chun, ZHAO Xin. On Damp Heat Environmental Test Condition for Self-Propelled Artillery[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(1): 66-69.
- [28] 张亚娟, 吴敬涛, 孟宁. 飞机实验室风吹雨气候环境试验技术研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(11): 59-63.
ZHANG Ya-juan, WU Jing-tao, MENG Ning. Wind and Rain Test of Aircraft in Climatic Environment Laboratory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(11): 59-63.
- [29] 唐扬刚, 马兰, 任战鹏. 气候环境实验室降/扬雪环境表征方法分析[J]. 装备环境工程, 2020, 17(7): 52-56.
TANG Yang-gang, MA Lan, REN Zhan-peng. Characterization Method of Snowfall Environment in Climatic Environmental Laboratory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(7): 52-56.
- [30] 黄梦宏, 朱令娴, 张志勇, 等. 装备统一环境试验条件研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(8): 69-72.
HUANG Meng-hong, ZHU Ling-xian, ZHANG Zhi-yong, et al. Unified Conditions of Environmental Test for Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(8): 69-72.

责任编辑: 刘世忠