

带温控装置的机载外挂设备挂飞 可靠性试验方法

周洁, 宫晓春, 褚亮

(北京强度环境研究所, 北京, 100076)

摘要: **目的** 制定安装于带温控装置吊舱内的机载外挂电子设备挂飞可靠性试验剖面, 并提出一种安装于带温控装置吊舱内的机载外挂电子设备挂飞可靠性试验方法。**方法** 结合机载外挂电子设备的典型任务剖面及其复杂多样的环境条件, 以某机载侦察相机为例, 给出带温控装置吊舱内的机载外挂电子设备可靠性鉴定试验中试验方案的选择依据, 然后根据 GJB 899A—2009 中的温度应力、振动应力简化处理原则和典型任务剖面的持续时间及其占比, 得到温度、振动应力条件, 并合成挂飞可靠性试验剖面。**结果** 使用该方法对某机载侦察相机的温度、振动应力进行处理, 得到了带温控装置的吊舱内的机载外挂电子设备挂飞可靠性试验剖面。**结论** 提出的带温控装置吊舱内的机载外挂电子设备挂飞可靠性试验剖面设计方法, 为安装于带温控装置的吊舱内的机载外挂电子设备开展可靠性鉴定试验提供了指导。

关键词: 温控装置; 机载外挂电子设备; 挂飞可靠性; 试验剖面

中图分类号: V216

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)08-0059-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.08.009

Test Method for Hanging Reliability of Airborne External Equipment with Temperature Control Device

ZHOU Jie, GONG Xiao-chun, CHU Liang

(Beijing Institute of Strength and Environment, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: The paper intends to develop a reliability test profile and proposes a reliability test method for airborne external electronic equipment mounted in a pod with temperature control device. Based on the typical mission profile of airborne external electronic equipment and its complex and diverse environmental conditions, taking an airborne reconnaissance camera as an example, the selection basis of test scheme in the reliability qualification test of airborne external electronic equipment in the pod with temperature control device was given. Then, in line with the simplified treatment principle of temperature stress and vibration stress in GJB899A-2009 and the duration and proportion of typical mission profiles, to obtain the temperature and vibration stress condition and synthesize the hanging reliability test profile. The method was used to deal with the temperature and vibration stress of an airborne reconnaissance camera, and the reliability test profile of airborne external electronic equipment in a pod with temperature control device was obtained. The proposed method of reliability test profile design for airborne external

收稿日期: 2021-08-29; 修订日期: 2021-11-15

Received: 2021-08-29; Revised: 2021-11-15

作者简介: 周洁 (1990—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为环境与可靠性试验技术。

Biography: ZHOU Jie (1990-), Female, Master, Engineer, Research focus: environment and reliability test technology.

引文格式: 周洁, 宫晓春, 褚亮. 带温控装置的机载外挂设备挂飞可靠性试验方法[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 059-065.

ZHOU Jie, GONG Xiao-chun, CHU Liang. Test Method for Hanging Reliability of Airborne External Equipment with Temperature Control Device[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 059-065.

electronic equipment mounted in a pod with temperature control device can provide guidance for reliability qualification test of airborne external electronic equipment mounted in a pod with temperature control device.

KEY WORDS: temperature control device; airborne external electronic equipment; hanging reliability; test profile

载机长期在远离陆地、复杂海洋环境下工作,需要具备较高的战备完好率和任务成功率,安装在载机上的关键电子设备也必须具备较高的可靠性。因此,高度重视机载电子设备可靠性工作,提升其可靠性水平,是实现较高的战备完好率和任务成功率的关键因素。在定型阶段,通常根据 GJB 899A—2009 的规定选择合适的统计方案,通过在实验室中开展能够模拟实际遇到的环境条件的挂飞可靠性鉴定试验对电子设备的挂飞可靠性进行鉴定^[1]。因此,如何选择试验方案、确定可靠性试验剖面,成为开展可靠性鉴定试验的关键。

目前已经有不少文献对电子设备可靠性试验剖面的设计进行了研究。陈万创等^[2]分析了防空导弹综合环境可靠性试验的作用以及试验剖面、试验应力的确定方法等。程德斌^[3]讲述了电子吊舱可靠性试验剖面制定的过程和方法。陈万创等^[4]结合试验剖面的真实性和典型性,将导弹挂飞作为主要试验阶段,对空空导弹可靠性试验剖面进行了研究,并讨论了试验剖面设计中循环及小周期的确定问题。在机载设备的环境与可靠性试验研究方面,林琳^[5]对机载电子产品的环境适应性进行了研究。张书明等^[6]对机载设备振动谱的数据处理方法进行了研究,得到了通过实测振动谱数据制定可靠性试验剖面中的振动条件的方法。湛振华等^[7]结合工程实践中的一些难题,从任务剖面的确定、振动谱型的选取等方面进行了分析,给出了机载设备可靠性试验剖面中振动应力的处理方法。汪凯蔚等^[8]对直升机载导弹及外挂可靠性试验技术进行了研究。王桂华等^[9]给出了一种航空发动机成附件振动环境试验剖面的确定方法。王学孔^[10]分析了利用实测数据制定可靠性试验剖面的方法。吕梦琴等^[11]给出了一种机载外挂设备开展发射飞行可靠性试验的试验剖面制定方法。申加康等^[12]给出了一种安装于飞机发动机影响区域范围内设备的可靠性试验剖面设计方法,并使用此方法对某设备的振动数据进行了处理,得到了安装于飞机发动机影响区域设备的可靠性试验剖面。在其他发射平台的电子设备可靠性试验研究领域, QJ 2653—1994^[13]对地地战略导弹地面设备可靠性验证试验方法进行了规定。莫昌瑜等^[14]给出了一种通过舰船设备的实测数据确定可靠性试验中振动应力的方法。陈津虎等^[15]对机动发射平台电子设备可靠性试验技术进行了研究。宋岩等^[16]对跨平台装备可靠性试验剖面合成方法进行了探讨。

袁宏杰等^[17]结合工程实际情况,通过合理运用数学和空气动力学知识,给出了一种安装在喷气式飞机

上的设备的可靠性试验剖面设计方法。邹祁峰等^[18]给出了安装在机载吊舱内的设备的可靠性试验剖面制定方法,但都没有给出安装在带温控装置飞机吊舱内的电子设备在制定可靠性试验剖面时的处理方法。本文通过分析某机载侦察相机的安装位置和任务剖面,结合 GJB 899A—2009^[1]和 GJB 150.16A—2009^[19],考虑到带温控装置飞机吊舱内的电子设备在制定可靠性试验剖面时的特殊性,给出了某机载侦察相机挂飞可靠性试验方案选择依据、试验剖面设计及试验方法。

1 任务剖面分析

某机载侦察相机,安装于飞机机腹下方的吊舱内,吊舱内安装有温度控制装置,在周围环境温度低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、高于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,温度控制装置会启动工作。该机载侦察相机属于外挂设备,用于执行全天时特别是夜间等气象条件下远距离、大范围高分辨率成像侦察任务,具有抗干扰能力强、精度高、全天时工作等突出优点。其任务剖面是随载机在完成规定任务这段时间内所经历的全部事件和状态的一种时序描述,该电子设备吊挂在载机的吊舱内,并随载机执行2种任务:高-高-高侦察任务和高-中-高侦察任务,分别占 P_1 和 P_2 ($P_1+P_2=1$),2个典型任务剖面中,主要包含事件、高度、速度、持续时间等参数。

2 可靠性试验方案选择

在定型阶段,通常根据 GJB 899A—2009 的规定选择合适的统计方案、制定合理的试验剖面,通过开展实验室试验来评估电子设备的 MTBF。由于该侦察相机为新研产品,综合考虑承制方及订购方能够接受的试验时间和允许出现的故障数,经与总体单位及军工厂双方协调确认,选用 GJB 899A—2009 中的标准型定时试验统计方案 17,即在 $4.3\theta_1$ 的时间内,试验中所出现的责任故障数 ≤ 2 时,则作出接收判决^[1],具体参数见表 1。

3 挂飞可靠性试验剖面制定

吊舱是吊挂在飞机机腹下方的装备,对于安装在吊舱内的电子设备,其遇到的环境条件通常有2种:随载机在机场停留时遇到的地面环境和执行任务过程中遇到的空中环境,主要的环境应力有温度、湿度和振动。为了提高试验效率,整个可靠性试验剖面中,

表 1 可靠性鉴定试验指标参数
Tab.1 Reliability qualification test index parameters

统计试验方案	生产方风险 α 名义值/%	使用方风险 β 名义值/%	拒收 故障数	接收 故障数	试验时间 (θ_1 的倍数)	检验下限 θ_1/h	试验 时间/h
17	20	20	≥ 3	≤ 2	4.3	80	344

前半部分模拟“冷天-标准天-热天”的环境条件,后半部分模拟“热天-标准天-冷天”的环境条件^[1],冷天、标准天和热天的应力均使用由温度、湿度、振动、电应力以及这 4 种应力随时间的变化来模拟实际的环境条件。

3.1 温度应力

3.1.1 温度应力剖面

1) 地面停留阶段的温度。挂飞前后,机载外挂电子设备随载机在机场停留时遇到的温度主要有 3 种:即标准天、热天、冷天的地面温度。标准天地面温度可以从 GB 1920 中查出,为 15 ℃^[20];冷天和热天地面温度可以从 HB 5652.1 中查出,冷天地面温度为-54 ℃,热天地面温度为 45 ℃(在假定产品设计时选定的冒极端温度的风险率为 10%的情况下)^[21]。由于该侦察相机吊挂在载机机腹下方的吊舱内,其内带有温度控制装置,当环境温度低于-20 ℃、或高于

60 ℃时,温控设备会启动工作。依据该侦察相机的技术协议,高温贮存温度为 60 ℃,低温贮存温度为-20 ℃,高温工作温度为 50 ℃,低温工作温度为-20 ℃。为此,将冷天地面停放温度调整为-20 ℃,冷天地面工作温度调整为-20 ℃,热天地面停放温度调整为 60 ℃,热天地面工作温度调整为 50 ℃。

2) 各个任务剖面中空中阶段温度。挂飞阶段的温度主要是根据载机的高-高-高侦察任务(占 P_1)和高-中-高侦察任务(占 P_2)中载机所处高度的飞行速度、大气温度,依据式(1)得到恢复温度(t_r)^[18]。

$$t_r=(1+0.178M^2)(t_0+273)-273 \tag{1}$$

式中: t_0 为所在高度的大气绝对温度,通过查阅 GB 1920 和 HB 5652.1 获得; M 为载机飞行速度,以马赫数计算。

依据式(1),计算出高-高-高侦察任务和高-中-高侦察任务各阶段的恢复温度,见表 2。

表 2 各阶段的恢复温度
Tab.2 Recovery temperature at each stage

事件	高-高-高侦察任务剖面			高-中-高侦察任务剖面		
	冷天	标准天	热天	冷天	标准天	热天
地面试车	-54	15	45	-54	15	45
起飞加速	-30.5	33.1	65.1	-30.5	33.1	65.1
爬升	-39.1	-10.1	21.1	-39.1	-10.1	21.1
任务 1	-39.1	-10.1	21.1	-39.1	-10.1	21.1
下滑	-45.1	20.7	51.4	-27.2	5.8	31.3
着陆	-54	15	45	/	/	/
任务 2	/	/	/	-27.2	5.8	31.3
爬升	/	/	/	-39.1	-10.1	21.1
返航	/	/	/	-39.1	-10.1	21.1
下滑	/	/	/	-45.1	20.7	51.4
着陆	/	/	/	-54	15	45

3.1.2 合成试验温度应力剖面

根据 GJB 899A—2009,可靠性试验一般只模拟持续时间不小于 20 min 的稳态温度应力。因此,本次可靠性试验只考虑执行侦察任务时外挂设备遇到的温度,不考虑在空中飞行过程中的温度变化。将以上 2 个任务剖面中所有温度按照递增次序进行排列,

同一温度只写 1 个,如果某温度值仅出现 1 次,则将出现这一温度的加权持续时间作为总加权持续时间;如果某温度出现多次,则将出现这一温度的各加权时间相加作为总加权时间^[1],得到各阶段的最高温度、最低温度、加权温度,见表 3。

依据技术协议规定的高温贮存/工作温度、低温

表3 冷天、标准天、热天温度值及持续时间(计算值)

Tab.3 Cold day, standard day, hot day temperature and duration (calculated value)

阶段	类型	温度值/℃	总加权持续时间/min
冷天	最低温度	-45	12
	加权温度	-39	227
	最高温度	-28	11
标准天	最低温度	-10	227
	加权温度	14	22
	最高温度	33	1
热天	最低温度	21	227
	加权温度	42	22
	最高温度	65	1

贮存/工作温度对计算得到的温度值进行调整,具体如下:

1) 由于冷天计算温度均低于技术协议规定的最低工作温度 -20°C , 因此将冷天飞行阶段温度调整为 -20°C 。

2) 标准天的最高温度总加权持续时间为1 min, 按 GJB 899A—2009 的规定, 删去热天阶段中温度低于 10°C 或持续时间小于20 min的部分^[1], 可将最高温度 33°C 删去。因此, 标准天飞行阶段温度调整为 -10°C 、 14°C 。

3) 热天的最高温度总加权持续时间为1 min, 且吊舱内的温控装置在高于 50°C 时就会启动工作, 同理, 可将最高温度 65°C 删去。因此, 热天飞行阶段温度调整为 21°C 、 42°C 。

最终, 得到的合成温度应力试验剖面见表4。

表4 合成后的冷天、标准天、热天温度值及持续时间
Tab.4 Temperature value and duration of cold day, standard day and hot day after synthesis

阶段	温度值/℃	总加权持续时间 (含变温时间)/min
冷天	-20	250
标准天	-10	227
	14	23
热天	21	227
	42	23

3.2 湿度应力

对于完整组合式外挂及密封设备, 湿度应力确定为仅在每一循环的热天地面阶段对湿度进行控制。从热天地面不工作阶段开始, 即保持露点温度 $\geq 31^{\circ}\text{C}$, 直到热天地面工作阶段结束^[1]。

3.3 振动应力

3.3.1 振动谱

根据 GJB 899A—2009, 确定可靠性试验所要施

加的振动应力主要有3种方法。鉴于本次可靠性鉴定试验的振动应力不能通过实测应力得到, 因此参考 GJB 899A—2009 中图 B3.8-6 安装在外挂和导弹上的设备的振动谱, 确定振动应力的谱形^[1], 再根据 GJB 150.16A—2009 中表 C.5 喷气式飞机外挂的振动环境计算得到各拐点频率及功率谱密度值^[19], 得 $f_1=20\text{ Hz}$, $f_2=31\text{ Hz}$, $f_3=102\text{ Hz}$, $f_4=1\,102\text{ Hz}$, $W_1=0.02\text{ g}^2/\text{Hz}$, $W_2=0.065\,73\text{ g}^2/\text{Hz}$ 。因此, 确定的随机振动谱如图1所示。

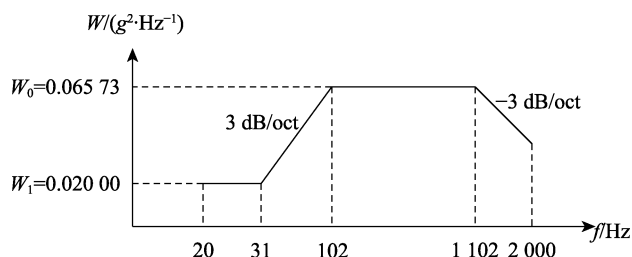


图1 挂飞随机振动谱

Fig.1 Random vibration spectrum of hanging flight

3.3.2 合成试验振动应力剖面

由于吊舱是组合式的单个外挂, 产品位置因子($F_{\text{位}}$)选取为0.88。根据典型任务剖面的详细参数计算出的动压和位置因子, 计算挂飞振动量值调节因子 F_{grms}^2 , 再用该振动量值调节因子乘以归一化的基本功率谱密度值($W_{0\text{B}}$ 、 $W_{1\text{B}}$), 可得到试验的功率谱密度值($W_{0\text{T}}$ 、 $W_{1\text{T}}$)。计算公式^[19]为:

$$F_{\text{grms}}^2 = 10^{\lg q - 3.965\,48} \times F_{\text{位}} \quad (2)$$

$$W_{0\text{B}} = \left[(f_2/f_3) \times (f_2 - f_1) + 0.5 \times (f_3 - f_2^2/f_3) + (f_4 - f_3) + f_4 \times \ln(f_0/f_4) \right]^{-1} \times 100 \quad (3)$$

$$W_{1\text{B}} = (f_2/f_3) \times W_{0\text{B}} \quad (4)$$

$$W_{0\text{T}} = F_{\text{grms}}^2 \times W_{0\text{B}} \quad (5)$$

$$W_{1\text{T}} = F_{\text{grms}}^2 \times W_{1\text{B}} \quad (6)$$

根据公式(2)~(6)计算得到各阶段的振动量级, 见表5。

删去不足 $0.1\text{ (m}\cdot\text{s}^{-2})^2/\text{Hz}$ 的振动量级, 增加 $0.1\text{ (m}\cdot\text{s}^{-2})^2/\text{Hz}$ 的持续振动以保证振动的连续。参照 GJB 899A—2009 附录 B.3.5.5.4.3.3 和附录 B.3.5.5.5.3 中的方法, 根据表5各任务剖面的比例和功率谱密度值进行加权合成, 得到振动量级的最低振动量值、加权振动量值、最高振动量值及其相应的持续时间, 见表6。

振动施加先后顺序按照2个任务剖面实际起飞过程经历的振动顺序进行, 具体施加时序及时间见表7。

表 5 各阶段振动量级
Tab.5 Vibration magnitude at each stage

事件	高-高-高侦察任务剖面		高-中-高侦察任务剖面	
	F_{grms}^2	振动量级 $W_0/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-4}\cdot\text{Hz}^{-1})$	F_{grms}^2	振动量级 $W_0/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-4}\cdot\text{Hz}^{-1})$
地面试车	0	0	15	45
起飞加速	8.63	0.51	8.63	0.51
爬升	2.31	0.14	2.31	0.14
任务 1	2.31	0.14	2.31	0.14
下滑	0.59	0.04	2.19	0.13
着陆	1.34	0.08	/	/
任务 2	/	/	2.19	0.13
爬升	/	/	2.31	0.14
返航	/	/	2.31	0.14
下滑	/	/	0.59	0.04
着陆	/	/	1.34	0.08

表 6 合成后的振动量级及持续时间
Tab.6 The magnitude and duration of vibration after synthesis

类型	振动量级 $W_0/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-4}\cdot\text{Hz}^{-1})$	总加权持续时间 /min
起飞振动	0.51	1
最低振动	0.13	11
加权振动	0.14	222
持续振动	0.1	16

表 7 振动量级、时序及持续时间
Tab.7 Magnitude, timing and duration of vibration

施加时序	类型	振动量级 $W_0/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-4}\cdot\text{Hz}^{-1})$	总加权持续时间/min
1	起飞加速振动	0.51	1
2	爬升振动	0.13	11
3	飞行振动	0.14	222
4	下滑振动	0.1	12
5	着陆振动	0.1	4

3.3.3 振动方向

机载侦察相机挂飞期间, 振动应力主要集中在产品的竖轴方向 (Y 向), 竖轴方向 (Y 向) 的应力远大于垂直于竖轴方向 (X、Z 向) 的量值, 因此选择竖轴方向 (Y 向) 作为机载侦察相机挂飞可靠性鉴定试验的振动应力施加方向。

3.4 电应力

试验中每次通电模拟地面工作和空中执行任务时间, 输入电压按照标称值的±10% (产品技术协议规定的幅值) 进行拉偏, 第 1、2、3 循环的输入电压分别为电应力的上限值、标称值、下限值。3 个试验循环的输入电压变化构成一个完整的电应力循环, 以满足 GJB 899A—2009 中对输入电压的变化要求^[1]。

在每个试验循环中, 冷天、标准天、热天地面阶段的前 30 min, 产品不工作, 之后按操作程序启动 3 次, 以考核产品在该温度下的瞬时启动能力。第 3 次启动后, 产品应在相应气候段连续工作, 并在规定的时刻进行功能性能测试。

3.5 可靠性试验剖面

根据 3.1—3.4 节的分析结果, 确定该机载侦察相机的挂飞可靠性试验剖面如图 2 所示。

4 可靠性试验安装方式

本试验使用综合环境试验系统对产品施加温度、湿度和振动应力。该产品按照模拟实际安装方式, 采用吊挂的方式, 通过橡胶减振器安装在工装上。试验中振动控制采用六点平均控制方式 (1#、2#、3#、4#、5#、6#), 其中, 1#、2#、3#、4#位于工装的 4 个支脚上部, 5#、6#传感器位于振动工装底板上, 以此完成对产品振动应力的施加。此外, 在产品的关键部位, 刚度较大处安装测量传感器, 以监测产品上的响应量级, 根据响应量级确定是否进行限值控制。在试验过程中, 对产品上的响应量级及谐振频率进行观察, 并与试验前的试振曲线进行对比, 根据响应曲线的变化情况决定是否更换减振器。

5 挂飞可靠性评估

本次对产品共进行了 344 h 的可靠性鉴定试验, 试验期间产品未发生故障, 即 $r=0$ 。

根据定时截尾的统计方案, 则产品 MTBF 的单侧置信下限值^[1]为:

$$\theta_L = \frac{2T}{\chi^2(\gamma, 2r+2)}$$

(7)

式中: T 为总试验时间, $T=344\text{ h}$ 。

- 题探讨[J]. 上海航天, 1999, 16(3): 13-17.
CHEN Wan-chuang, LIANG Wei-bin. Discussion on some Problems in Combined Environmental Reliability Tests[J]. Aerospace Shanghai, 1999, 16(3): 13-17.
- [3] 程德斌. 电子吊舱可靠性试验剖面制定方法[C]//第三届电子产品可靠性与环境试验技术经验交流会. 华阴: 中国电子学会, 2001.
CHENG De-bin. Method for Establishing Reliability Test Profile of Electronic Pod[C]//The 3rd Electronic Product Reliability and Environmental Test Technology Experience Exchange Conference. Huayin: The Chinese Institute of Electronics, 2001.
- [4] 陈万创, 李爱国. 空空导弹综合环境可靠性试验剖面研究[J]. 上海航天, 2005, 22(4): 41-44.
CHEN Wan-chuang, LI Ai-guo. Research on Air to Air Missile Combined Environment Reliability Test Profile[J]. Aerospace Shanghai, 2005, 22(4): 41-44.
- [5] 林琳. 机载电子产品的环境适应性研究[J]. 可靠性与环境试验技术及评价, 2006, 24(4): 34-37.
IN Lin. Environmental Suitability Analysis of Airborne Electronics[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2006, 24(4): 34-37.
- [6] 张书明, 丰志强, 阎楚良. 机载设备振动环境谱可靠性试验的数据处理方法研究[C]//北京力学学会第12届学术年会论文摘要集. 北京: 北京力学学会, 2006.
ZHANG Shu-ming, FENG Zhi-qiang, YAN Chu-liang. Research on Data Processing Methods for Reliability Test of Airborne Equipment Vibration Environment Spectra[C]//Abstract of Proceedings of the 12th Annual Conference of Beijing Mechanics Society. Beijing: Beijing Mechanics Society, 2006.
- [7] 湛振华, 张帝, 阙月祥. 飞机机载设备可靠性振动试验剖面若干问题探讨[J]. 装备学院学报, 2012, 23(2): 112-116.
ZHAN Zhen-hua, ZHANG Di, KAN Yue-xiang. Discussion on Some Problems of Aircraft Airborne Equipment Reliability Vibration Test Profile[J]. Journal of Academy of Equipment, 2012, 23(2): 112-116.
- [8] 汪凯蔚, 陈明凡, 高欣. 直升机载导弹及外挂可靠性试验技术研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2009, 27(5): 1-5.
WANG Kai-wei, CHEN Ming-fan, GAO Xin. Reliability Testing Technique for Helicopter Borne Missiles and External Store[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2009, 27(5): 1-5.
- [9] 王桂华, 刘海年, 张大义, 等. 航空发动机成附件振动环境试验剖面确定方法研究[J]. 推进技术, 2013, 34(8): 1101-1107.
WANG Gui-hua, LIU Hai-nian, ZHANG Da-yi, et al. Study on Formulating Method for Vibration Environment Test Profiles of Aero-Engine Accessories[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(8): 1101-1107.
- [10] 王学孔, 江露, 张钟文, 等. 利用实测数据制定可靠性试验剖面综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2016, 34(3): 72-75.
WANG Xue-kong, JIANG Lu, ZHANG Zhong-wen, et al. Summary of Designing Reliability Test Profile Based on Measured Data[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2016, 34(3): 72-75.
- [11] 吕梦琴, 陈斯文, 仵宁宁. 机载外挂设备发射飞行可靠性试验剖面制定方法[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2020, 38(6): 42-45.
LV Meng-qin, CHEN Si-wen, WU Ning-ning. Method for Designing the Launch Flight Reliability Test Profile of Airborne External Equipment[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2020, 38(6): 42-45.
- [12] 申加康, 张建军, 傅耘. 一种飞机发动机影响区设备的可靠性试验剖面设计方法[J]. 装备环境工程, 2021, 18(7): 29-37.
SHEN Jia-kang, ZHANG Jian-jun, FU Yun. Design Method for Reliability Test Profile of Equipment in the Affected Area of Aircraft Engine[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(7): 29-37.
- [13] QJ 2653—1994, 地地战略导弹地面设备可靠性验证试验方法[S].
QJ 2653—1994, Test Method for Reliability Verification of Ground Equipment for Surface-to-Surface Strategic Missile[S].
- [14] 莫昌瑜, 袁宏杰. 舰载设备可靠性振动试验剖面设计方法研究[J]. 船舶力学, 2012, 16(4): 442-448.
MO Chang-yu, YUAN Hong-jie. Study on Design Method for Reliability Vibration Test Profile of Ship-Borne Equipment[J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(4): 442-448.
- [15] 陈津虎, 周芳, 韩铭, 等. 机动发射平台电子设备可靠性试验技术研究[J]. 强度与环境, 2016, 43(5): 45-51.
CHEN Jin-hu, ZHOU Fang, HAN Ming, et al. Research on Reliability Test Technology of Electronic Equipment in the Missile Mobile Launching Platform[J]. Structure & Environment Engineering, 2016, 43(5): 45-51.
- [16] 宋岩, 胡巨刚, 杨然, 等. 跨平台装备可靠性试验剖面合成方法探讨[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2020, 38(4): 56-62.
SONG Yan, HU Ju-gang, YANG Ran, et al. Discussion on the Synthesis Method of Reliability Test Profile for Multi-Platform Equipment[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2020, 38(4): 56-62.
- [17] 袁宏杰, 党伟, 杨贵超. 喷气式飞机设备可靠性综合试验剖面设计[J]. 环境技术, 2004, 22(6): 4-6.
YUAN Hong-jie, DANG Wei, YANG Gui-chao. Design of Reliability Testing Profiles for Jet Plane[J]. Environmental Technology, 2004, 22(6): 4-6.
- [18] 邹祁峰, 沈嵘嵘. 喷气式飞机机载吊舱内设备的可靠性试验剖面制定研究[J]. 环境技术, 2016, 34(4): 24-28.
ZOU Qi-feng, SHEN Zheng-rong. Research on Formulation of Reliability Test Profile for Jet Pod Devices[J]. Environmental Technology, 2016, 34(4): 24-28.
- [19] GJB 150.13A—2009, 军用装备实验室环境试验方法第16部分: 振动试验[S].
GJB 150.13A—2009, Environmental Test Methods for Military Equipment Laboratories: Part 16 Vibration Test[S].
- [20] GB/T 1920—1980, 标准大气[S].
GB/T 1920—1980, Standard Atmosphere[S].
- [21] GB5652.1-1981, 气候极值 大气温度极值[S].
GB5652.1-1981, Extreme Climatic Value Extreme Atmospheric Temperature[S].

责任编辑: 刘世忠