

环境试验与评价

民用飞机机载设备振动试验要求和应用分析(二)
DO 160F/G 民用固定翼飞机机载设备振动试验要求祝耀昌¹, 李韵², 徐俊¹, 王星皓¹

(1.中航工业综合所 北京 100028; 2.西测环境试验中心, 西安 710119)

摘要: 阐述了民用飞机机载设备振动环境的特点和振动试验分类, 归纳和汇总了 DO 160 F/G 中的各类民用飞机机载设备的振动试验要求, 包括振动谱、振动量值和试验持续时间等, 并进行了分析和说明, 以便于查阅和使用。最后对民用飞机机载设备振动试验方法的应用进行了概括, 介绍了民用固定翼飞机的机载设备振动试验要求, 按设备在机上的区域不同进行分类, 详细地对比说明各个位置上设备的振动试验要求; 介绍了民用直升机的机载设备振动试验要求。

关键词: 民用飞机; 机载设备; 振动试验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.05.020

中图分类号: TJ01; TB114

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2016)05-0122-06

Vibration Test Requirements and Application Analysis of Civil Aircraft Equipment (II)
Vibration Test Requirements of Civil Fixed-wing Aircraft Equipment in DO 160F/GZHU Yao-chang¹, LI Yun², XU Jun¹, WANG Xing-hao¹

(1.AVIC China Aero-polytechnology Establishment, Beijing 100028, China;

2.Environmental Testing Center of XCET, Xi'an 710119, China)

ABSTRACT: The paper set forth the characteristics of the vibration environment of civil aircraft equipment and the classification of vibration tests. The vibration test requirements of various civil aircraft equipment in DO 160 F/G were concluded and summarized, including vibration spectrum, magnitude and duration, and then were analyzed and explained accordingly, so as to facilitate the reference and application thereof. At last, the application of vibration test method for civil aircraft equipment was generalized. Vibration test requirements of civil fixed-wing aircraft equipment was described and classified according to the different sections of the equipment in the aircraft. The vibration test requirements of the equipment at each position were described in details by contrast; and the vibration test requirements of the airborne equipment of civil helicopters was presented.

KEY WORDS: civil aircraft; airborne equipment; vibration test

近年来,我国民用飞机制造业发展迅速,支线客机 ARJ21 基本通过适航取证,大客机 C919 也将于明年下线投入试飞^[1-3]。目前这些飞机所用的发动机和

机载设备主要还是依靠国外供应商,这表明航空发动机和主要机载设备仍然是制约我国民用飞机制造业大规模发展的瓶颈^[4]。按规定无论是飞机和发动机,还

收稿日期: 2016-03-28; 修订日期: 2016-04-21

Received: 2016-03-28; Revised: 2016-04-21

作者简介: 祝耀昌(1942—),男,研究员,主要从事产品环境工程,实验室环境试验和可靠性试验技术研究及其相关标准的制订工作。

Biography: ZHU Yao-chang(1942—), Male, Researcher, Research focus: product environmental engineering, laboratory environmental testing, reliability testing technology and formulation of relevant standards.

是飞机和发动机上的机载设备，在其投入使用前，都应通过适航取证，以确保能正常运行和飞行安全。适航取证过程的重要环节是经历一系列的规定试验^[5-6]。对于机载设备来说，则应通过一系列的环境试验，以证明其在民用飞机运行中遇到的各种环境因素的作用下，其机载设备均能满足最低性能标准的要求。

目前民用飞机机载设备适航取证使用的环境试验标准主要是美国航空无线电技术委员会（RTCA）制定的 RTCA DO 160 系列的标准。该标准的编号最初为 DO 138，后来改为 DO 160^[7]，DO 160 经历 7 次修订，目前已发展为 DO 160 G。其包含的试验项目越来越完整，各试验项目中的试验程序越来越科学合理。必须指出 DO 160 系列标准主要适用于电子设备，不是民用飞机机载设备适航取证用的唯一环境试验标准，大多数机械、液压设备则使用其 TSO（技术标准规定）指定或直接规定的环境试验方法^[8]。

1 振动谱和振动量值

1.1 已知频率

民用直升机上机载设备遇到的是宽带随机上叠加正弦振动环境^[9-10]，振动谱型如图 1 所示。

该谱型中的宽带随机部分的频率范围为 10~2000 Hz，性能试验量值为 0.01 g²/Hz，其加速度均方根为 2.75g，功能试验量值为性能试验量值

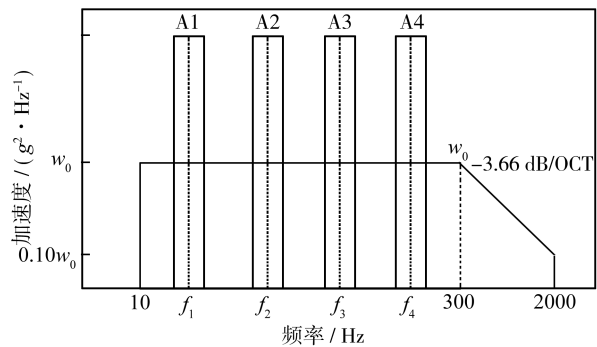


图 1 直升机正弦叠加随机振动试验曲线

Fig.1 The sinusoidal superposition random vibration test curve of helicopter

的 2 倍，即 0.02 g²/Hz，其加速度均方根值为 3.89g。所有区域设备振动谱的随机部分都是一样的。

正弦峰值的频率和峰值量值则取决于主旋翼 M 桨叶通过频率(f_1)、尾桨 T 桨叶通过频率(f_2)、发动机 E 旋转频率(f_3)和主减速箱 G 旋转频率(f_4)。主旋翼和尾桨的一阶通过频率均为其旋转频率与桨叶数 (N) 的乘积。图 1 中各频率上的正弦峰值根据确定的频率所属范围按表 1 计算或直接查阅该频率处振动性能试验和振动功能试验量值^[11]。从表 1 中 40~200 Hz 频率范围给定的性能和耐久试验量值来看，其耐久试验量值与性能试验量值相比，其放大倍数不是一常数，随频率范围和设备在机上的位置而有一些变化。表 2 给出了直升机各区域设备应用的正弦峰值的曲线及其峰值频率。正弦峰值根据给定的 f_1 , f_2 , f_3 , f_4 所属频率范围按表 1 计算或直接采用其给定的峰值^[12-13]。

表 1 各曲线的功能和耐久试验量级
Table 1 The magnitude of function and endurance test for each curve

试验频率范围 /Hz	试验 类型	正弦峰值/g			
		G 曲线	H 曲线	I 曲线	J 曲线
$3 < f_n < 10$	性能	$0.04 f_n$	$0.05 f_n$	$0.08 f_n$	$0.17 f_n$
	耐久	$0.05 f_n$	$0.07 f_n$	$0.1 f_n$	$0.2 f_n$
$10 < f_n < 20$	性能	$0.04 f_n$	$0.05 f_n$	$0.08 f_n$	4.2
	耐久	$0.2 f_n - 1.5$	$0.28 f_n - 2.1$	$0.3 f_n - 2$	$0.3 f_n - 1$
$20 < f_n < 40$	性能	$0.04 f_n$	$0.05 f_n$	$0.08 f_n$	4.2
	耐久	2.5	3.5	4.0	5.0
$40 < f_n < 200$	性能	1.6	2.5	$0.08 f_n$	4.2
	耐久	2.5	3.5	$0.1 f_n$	5.0
$200 < f_n < 2000$	性能	16.7			
	耐久	20			
试验频率范围/Hz	试验类型	宽带随机(PSD)/(g ² · Hz ⁻¹)			
10~2000	性能	0.01(2.75)	0.01(2.75)	0.01(2.75)	0.01(2.75)
	耐久	0.02(3.89)	0.02(3.89)	0.02(3.89)	0.02(3.89)

表 2 各设备位置应用的曲线
Table 2 The curve of each equipment section

设备所在位置		试验曲线 (性能和耐久)	试验频率			
			f_1	f_2	f_3	f_4
1a	机身	G			—	—
1b	尾桨	G			尾桨一阶通过频率	尾桨二阶通过频率
2	仪表板控制台与设备机架	G	主旋翼一 阶通过频	主旋翼二 阶通过频	—	—
3	发动机舱与吊舱	H	率	率	发动机旋转频率	主减速箱旋转频率
4	发动机与齿轮箱	I			发动机旋转频率	主减速箱旋转频率
7	尾桨与翼尖整流罩	J			尾桨一阶通过频率	尾桨二阶通过频率

直升机没有固定机翼和起落架,因此没有相应这两个区的设备及相应振动曲线。直升机没有涡轮发动机,因此直升机上的设备不会遇到涡轮叶片损坏造成的高量值瞬态正弦振动^[14]。

1.2 未知频率

当不知道直升机的频率时,有两种试验程序:使用正弦加随机试验的程序(DO 160 F 中称为 U 类);完全采用随机试验的程序(DO 160 F/G 中称为 U₁类),用 U₁类代替 U 类进行试验。这两个程序仅适用于机身和仪表板、控制台和机架区的设备^[15]。

1) U 类使用的振动谱如图 1 所示,随机振动性能和振动功能试验的频率范围和量值与已知频率类相同。正弦峰值则根据标准中规定的三组频率按表 1 计算或直接使用其提供的量值。标准中要求进行三次试验,这三次试验可以用 1 个产品,2 个产品或 3 个产品进行^[16—17]。但振动驻留试验只需要在其中一个产品上进行,三组峰值频率见表 3。根据表 4 给定的频率,按其所在频率范围和按表 2 确定曲线类型,从表 1 计算出相应峰值或查出的量值作为相应的正弦振动峰值。由于标准中规定此试验仅适用于机身和仪表板、控制台和设备机架两个区的设备,只考虑使用 G 曲线。

2) U₁类用简单的随机振动曲线,代替 U 类的试验,曲线如图 2 所示。该曲线中明确性能试验量值(w_0)为 0.05 g²/Hz,耐久试验量值(w_1)为性

表 3 DO 160 F 规定的三组峰值频率
Table 3 Three frequency peak defined by DO 160 F

	Hz			
	f_1	f_2	f_3	f_4
试验 1	11	19.9	35.5	63.9
试验 2	13	24	43.4	77.8
试验 3	16	29.2	52.5	94.9

表 4 按标准给定的三组频率对应的正弦峰值(G 曲线)
Table 4 The sine peak of three frequency according to the standard (curve G)

频率 代号	试验 类型	试验 1		试验 2		试验 3	
		频率 /Hz	量值 /g	频率 /Hz	量值 /g	频率 /Hz	量值 /g
f_1	性能	11	0.44	13	0.52	16	0.64
	耐久		0.55		1.1		1.7
f_2	性能	19.9	0.796	24	0.96	29.2	1.168
	耐久		2.48		2.5		2.5
f_3	性能	35.5	1.42	43.4	1.6	52.5	1.6
	耐久		2.5		2.5		2.5
f_4	性能	63.9	1.6	77.8	1.6	94.9	1.6
	耐久		2.5		2.5		2.5

能试验量值的 2 倍,即 0.10 g²/Hz。两类试验振动谱中 40 Hz 和 300 Hz 拐点量值分别为 w_0 的 0.126 倍和 0.199 倍,见表 5。

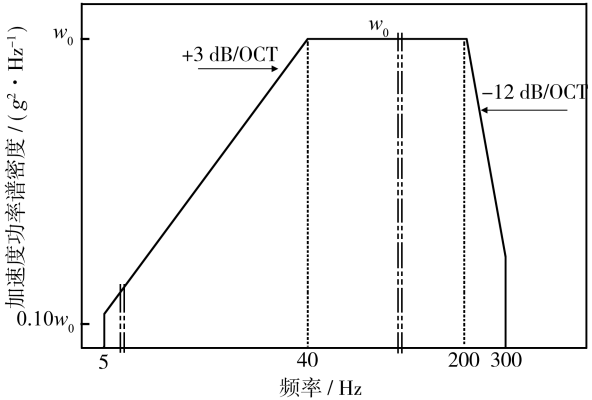


图 2 直升机机身、仪表板和尾梁的随机振动试验曲线
Fig.2 Random vibration test curve of helicopter fuselage, dash board and tail beam

表 5 随机振动谱的频率拐点和量值
Table 5 The break frequency and magnitude of random vibration spectra (g²/Hz)

类型	频率/Hz		
	5	40~200	300
性能试验	0.0063	0.05	0.00995
耐久试验	0.0126	0.10	0.0199

1.3 振动试验的持续时间

民用直升机机载设备的振动试验的持续时间

取决于其在载机上的位置^[18—22]，是正弦加随机振动还是正弦振动，是标准振动试验还是强化振动试验，具体见表 6。

表 6 直升机机载设备振动试验的持续时间
Table 6 Vibration testing duration of helicopter equipment

飞机种类	振动类型	机上位置	标准振动试验时间	强化振动试验时间（包括耐久试验时间）
直 升 机	正弦加 随机	全部区域	1) 非工作状态，用 正弦扫频确定共振 频率和放大系统的 时间； 2) 工作状态，每轴 向最低 10 min。	1) 非工作状态用正弦扫频确定共振频率和放大系统的时间； 2) 工作状态，按曲线进行耐久量级试验最少持续 2 h（每方向），总时间不超过 3 h，还进行共振驻留试验，每共振点振动 30 min，若 2 个共振点则进行 1 h 共振驻留试验，余下时间 2 h 按曲线进行，若共振点多于 2 h（不超过 4 个），则按曲线振动时间应减少，其总和不超过 3 h。
				1) 用 2 个试件进行至少 2 h 的耐久试验； 2) 再用 1 个试件进行耐久试验和共振驻留试验。
	随机	机身（1a）， 仪表板（3）	设备处于工作状态 每方向进行至少 10 min	设备处于工作状态，按耐久试验量级每轴向进行 3h。
		机身（1a）和仪表 板控制台与设备 机架（2）及尾桨 （1b）		

2 应用说明

1) 民用飞机机载设备适航取证用的环境条件和试验方法标准除了美国航空无线电技术委员会制定的 DO 160 系列外，还有美国汽车工程师协会 (SAE)，材料工程师协会 (ASTM) 等其他一些机构制定的标准^[23]。RTCA160 系列标准是其中最为常用的试验方法标准。通常适航最低性能标准 (美国的 TSO 或中国的 CTSO，即产品规范标准) 采用哪个机构制订的标准，则环境试验方法会尽量采用其自己制订的相应的环境试验方法标准，例如若采用 RTCA 制订的电子产品标准规范，则该规范中优先采用 DO 160 系列标准^[24]。

2) RTCA DO 160 系列标准至今已有 A, B, C, D, E, F, G 七个版本，每个版本都是有效版本，应用哪个版本由 TSO 或 CTSO 标准决定^[25—27]。TSO 或 CTSO 标准中采用 DO 160 系列版本的新旧与 TSO 标准申请时已有的产品规范标准密切相关，产品规范中引用的环境条件与试验方法标准是制订产品规范时已有的标准。因此只要 TSO 或 CTSO 标准有效，则其产品性能最低要求和其引用的环境条件和试验方法标准同样有效^[28]。这就是目前美国 150 多项 TSO 标准中引用的 DO 160 系列标准遍及各个

版本而不是最新版本的原因。一旦某机载设备 TSO 标准修改重新申请时，会尽量使用最新版本的产品规范标准和环境试验条件和试验方法标准^[29—31]。

3) RTCA DO 160 系列标准是不可剪裁的标准，标准中明确规定了各种环境试验要求。具体的环境试验要求（如振动试验要求），只能根据机载设备载机的类型和在机上的位置等从标准中选取或按标准中给定的方法计算得出。为了便于读者理解和选用，将 DO 160 F 中的振动试验要求图表化，达到易查、易选的目的。

4) DO 160 系列等环境条件和试验方法标准的应用完全取决于产品性能规范制定者，因为这是产品性能规范中质量一致性检验要求的组成部分。产品性能规范是 TSO 标准的基础，其差别是获得适航当局批准后才能成为 TSO 标准。

3 结语

1) 民用飞机机载设备的振动环境比军用飞机机载设备的振动环境温和。由于民用飞机的飞行任务剖面比较单一和固定，因而其振动试验的振动谱的谱型和振动量值可以事先确定。DO 160 F 标准中给各种固定翼飞机和直升机规定了振动谱、振动量值或振动量值的计算方法。可以根据机载设备载

机的类型、机载设备在机上的位置,确定其性能试验和功能试验所用的振动谱和振动曲线(振动量值)。

2) 直升机机载设备的振动没有标准振动而只有强化振动,其振动谱的特点是宽带随机上叠加正弦振动。DO 160 F 标准中对随机振动和正弦峰值均给出性能试验和耐久试验的量值或量值计算方法。宽带随机谱的性能和耐久试验量值是固定的,分别为 $0.01 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 和 $0.02 \text{ g}^2/\text{Hz}$, 正弦峰值则根据峰值频率和应用的试验曲线确定,试验频率 f_1 和 f_2 均采用主旋翼一阶和二阶通过频率,而 f_3 和 f_4 则应根据设备在载机上的位置使用尾桨一阶、二阶通过频率或发动机旋转频率和主减速向旋转频率。直升机的强化振动也要考虑振动驻留试验,但频率必须在正弦试验频率±升机带宽的范围内,最多选择 4 个频率进行 30 min 的振动驻留试验,耐久试验量级上的振动最多 3 h,如果发现超过 2 个共振点,则可减少耐久试验量值上的振动时间。

3) 未知频率直升机上设备的振动试验(U)可以采用已知频率直升机上设备的宽带随机叠加正弦的振动谱,其宽带随机谱与在已知频率直升机上设备是一样的,DO 160 F 标准中给出三组频率用于计算正弦峰值的量值,并进行三次试验,或许能够覆盖实际振动环境。由于标准中明确规定只适用于机身(1a 区)和仪表板、控制台和设备机架(2 区)的设备,从标准中的表 8-2a 可查出,这两个区均使用 G 曲线,因此表 3 直接给出了标准中给定的三组峰值频率对应的性能和耐久试验用的峰值量值。

4) DO 160 F 标准中规定未知频率直升机上的设备的试验(U)可以用随机振动来代替,此时的试验大大简化,可直接按标准中给定的随机振动谱和给出的频率拐点和量值,按随机振动强化试验程序进行强化试验,即每个轴向进行 3 h 的耐久试验,在 3 h 耐久试验前、后各进行至少 10 min 的性能试验。

5) DO 160 F 中不管是正弦振动还是随机振动,振动开始前和结束后均安排正弦扫频,以确定受试设备共振频率和振动后此共振频率是否变化,这是很有必要的,因此军标中对此没有作任何规定。

参考文献:

[1] RTCA, DO 160F/G, 机载设备环境条件和试验程序[S].

- RTCA, DO 160F/G, Environment Condition and Testing Procedure of Aircraft Equipment[S].
- [2] 祝耀昌. 国外适航性条例对机载设备的环境试验要求[J]. 航空标准化与质量, 1988(5): 21—26.
ZHU Yao-chang. Environment Testing Requirements for Aircraft Equipment in the Abroad Navigability Regulations[J]. Aviation Standardization and Quality, 1988(5): 21—26.
- [3] 祝耀昌, 陈光章, 张伦武, 等. 武器装备环境工程[J]. 装备环境工程, 2006, 3(3): 3—8.
ZHU Yao-chang, CHEN Guang-zhang, ZHANG Lun-wu, et al. Technical System of Materiel Environmental Engineering[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(3): 3—8.
- [4] 祝耀昌, 孙建勇. 装备环境工程技术及应用[J]. 装备环境工程, 2005, 2(6): 1—9.
ZHU Yao-chang, SUN Jian-yong. Materiel Environmental Engineering Technology and Its Application[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(6): 1—9.
- [5] 祝耀昌, 常文君, 傅耘. 武器装备环境适应性与环境工程[J]. 装备环境工程, 2005, 2(1): 14—19.
ZHU Yao-chang, CHANG Wen-jun, FU Yun. Environmental Suitability of Weapons and Environmental Engineering[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(1): 14—19.
- [6] 祝耀昌, 王丹. 武器装备环境适应性要求探讨[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(5): 416—422.
ZHU Yao-chang, WANG Dan. The Environmental Worthiness Requirements with Respect to Weapon Materials[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(5): 416—422.
- [7] 傅耘, 祝耀昌, 陈丹明. 装备环境要求及其确定方法[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 46—51.
FU Yun, ZHU Yao-chang, CHEN Dan-ming. Materiel Environmental Requirements and Their Determination Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 46—51.
- [8] 李维宝, 李明, 李泽新, 等. 环境适应性要求在型号中应用问题分析[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 81—86.
LI Wei-bao, LI Ming, LI Ze-xin, et al. Analysis of Application Issues of Environment Worthiness Requirements in Model Development[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 81—86.
- [9] 周堃, 钱翰博, 刘伟, 等. 浅谈装备环境适应性和可靠性[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 72—76.
ZHOU Kun, QIAN Han-bo, LIU Wei, et al. Discussion on Environmental Worthiness and Reliability of Materiel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 72—76.
- [10] 王永, 杨宏. 民用飞机机载设备适航与安全性设计[J]. 航空科学技术, 2014, 25(8): 27—33.
WANG Yong, YANG Hong. Airworthiness and Safety Design for Civil Aircraft Airborne Equipment[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(8): 27—33.
- [11] 祝耀昌, 王建刚, 张建军. GJB150A 与 GJB150 内容对比和分析(一)[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(1): 5—10.
ZHU Yao-chang, WANG Jian-gang, ZHANG Jian-jun. A Comparative Study of GJB 150A and GJB 150 (Part I) [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(1): 5—10.
- [12] 祝耀昌, 王建刚, 张建军. GJB150A 与 GJB150 内容对比和分析(二)[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(2): 110—114.
ZHU Yao-chang, WANG Jian-gang, ZHANG Jian-jun. A Comparative Study of GJB 150A and GJB 150 (Part II) [J].

- Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(2): 110—114.
- [13] 赵帅帅, 陈立伟, 彭康, 等. 某型航空发动机振动环境统计[J]. 装备环境工程, 2015, 12(1): 20—24.
ZHAO Shuai-shuai, CHEN Li-wei, PENG Kang, et al. Statistical Estimation of Vibration Environment for a Certain Aero-engine[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(1): 20—24.
- [14] 牛宝良, 王东升, 李思忠. 振动实验室比对探讨[J]. 装备环境工程, 2015, 12(1): 102—105.
NIU Bao-liang, WANG Dong-sheng, LI Si-zhong. Discussion on Vibration Laboratory Comparison[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(1): 102—105.
- [15] 熊长武. 装备环境适应性设计思想变革与实践[J]. 装备环境工程, 2014, 11(2): 20—25.
XIONG Chang-wu. Transformation and Practice of Equipment Environmental Adaptability Design Ideas[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(2): 20—25.
- [16] 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.
ZHANG 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.
- [17] 赵保平, 孙建亮, 蔡骏文, 等. 航天动力学环境的最新进展与技术展望[J]. 装备环境工程, 2015, 12(3): 8—14.
ZHAO Bao-ping, SUN Jian-liang, CAI Jun-wen, et al. Recent Development and Prospect of Astrodynamics Environmental Technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(3): 8—14.
- [18] 杨策, 李鸿志, 姚金勇. 机电产品加速贮存寿命试验评估方法[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 110—114.
YANG Ce, LI Hong-zhi, YAO Jin-yong. An Evaluation Method of Accelerated Storage Life Test for Mechanical and Electronic Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 110—114.
- [19] 宋琼, 胡荣华. 动态飞行模拟器及其发展概述[J]. 装备环境工程, 2015, 12(5): 11—18.
SONG Qiong, HU Rong-hua. Summarization of Dynamic Flight Simulator and Its Development[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(5): 11—18.
- [20] 张海, 余闯, 王晓红. 应用环境应力分类的加速贮存退化试验评估方法[J]. 装备环境工程, 2014, 11(3): 87—90.
ZHANG Hai, YU Chuang, WANG Xiao-hong. A New Accelerated Storage Degradation Test Estimation Method Based on Environmental Stress Classification[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(3): 87—90.
- [21] 陆中, 孙有朝, 周伽. 民用飞机适航符合性验证方法与程序研究[J]. 航空标准化与质量, 2007(4): 6—8.
LU Zhong, SUN You-zhao, ZHOU Jia. Airworthiness Compliance Approach Procedure for Civil Aircraft[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2007(4): 6—8.
- [22] 刘育. 现代民用飞机环境控制系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
LIU Yu. The Research of the Modern Civil Aircraft Environmental Control System[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [23] 牛跃听, 穆希辉, 杨振海. 自然贮存环境下某型控制舱贮存寿命评估[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 7—11.
NIU Yue-ting, MU Xi-hui, YANG Zhen-hai. Storage Life Assessment for a Certain Type of Control Cabin Accelerometer in Natural Storage Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 7—11.
- [24] 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.
- [25] 刘凯. 基于实测数据的空空导弹自由飞振动条件制订方法研究[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.
- [26] 丰志强, 阎楚良, 张书明. 飞机机载设备振动环境谱的数据处理与编制[J]. 航空学报, 2006, 27(2): 289—293.
FENG Zhi-qiang, YAN Chu-liang, ZHANG Shu-ming. Data Processing and Compilation of Vibration Environmental Spectrum for Aircraft Airborne Equipment[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2006, 27(2): 289—293.
- [27] 李曙林, 杨森, 孙冬. 军用飞机环境适应性评价模型[J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1053—1057.
LI Shu-lin, YANG Sen, SUN Dong. Evaluation Model of Environmental Worthiness for Military Aircraft[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2009, 30(6): 1053—1057.
- [28] 卢彩玲, 康宁民, 王树荣. 设备运输振动试验方法探讨[J]. 环境技术, 2009(6): 7—17.
LU Cai-ling, KANG Ning-min, WANG Shu-rong. Vibration Test of Cargo Transportation[J]. Environmental Technology, 2009(6): 7—17.
- [29] 纪敦, 张书明. 军用飞机机载设备环境实测技术研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(6): 45—50.
JI Dun, ZHANG Shu-ming. Study on Field Test Technology of Airborne Equipment for Military Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(6): 45—50.
- [30] 唐平, 黄晓霞. 环境试验数据资源建设的思考[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 140—147.
TANG Ping, HUANG Xiao-xia. Consideration of Environment Test Data Resource Construction[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 140—147.
- [31] 陈晓冬, 杜向辉, 徐宁. 空空导弹发射装置组合振动试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 153—158.
CHEN Xiao-dong, DU Xiang-hui, XU Ning. Research on Combined Vibration Test Method for the Launcher Equipment of Airborne Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 153—158.
- [32] 卢文婷, 李志远, 边颖娜. 高压星型空压机振动分析与虚拟样机仿真[J]. 四川兵工学报, 2014(5): 66—69.
LU Wen-ting, LI Zhi-yuan, BIAN Ying-na. Vibration Analysis and Virtual Prototype Simulation of High Pressure Star-type Air Compressor[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014(5): 66—69.