

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(一) DO 160F/G 民用固定翼飞机机载设备振动试验要求

祝耀昌¹, 李韻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 160F/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.1672-9242.2016.04.009

中图分类号: TJ01; TB114 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)04-0054-08

Vibration Test Requirements and Application Analysis of Civil Aircraft Equipment (I) Vibration Test Requirements of Civil Fixed-wing Aircraft Equipment in DO 160F/G

ZHU 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 160F/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 也于 2015 年年底线投入试飞。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。

按规定无论是飞机和发动机还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。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

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.

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 DO138, 后来改为 DO 160^[1], DO 160 经历 7 次修订, 目前已发展为 DO 160G, 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。

1 民用飞机机载设备振动环境的特点

民用飞机的飞行任务仅限于两个机场之间的飞行, 其任务剖面无非是地面起飞滑跑, 升到巡航高度, 在巡航高度飞行一段时间, 下降着落到地面和地面滑跑到停止。这一过程中的各个阶段都会经受到振动环境, 主要包括飞机地面滑跑, 飞行中气动扰流和发动机噪声引起的随机振动环境、螺旋桨等旋转部件运动引起的正弦振动环境。因此其振动谱主要类型为宽带随机谱, 正弦谱和宽带随机谱上叠加宽带随机谱三种类型^[3]。

军用飞机使用过程往往要执行低—低—低, 高—低—低—高, 低—低—高, 近距离支援和渡

运(转场)等各种任务, 民用飞机的任务剖面只相当于其转场。因而其遇到的振动量值较小且变化范围不大。由于民用飞机飞行高度、飞行速度、机场跑道质量等都是已知且基本固定的, 因而其振动环境也是基本不变的, 振动试验标准中直接给出各类飞机各个部位振动谱和振动量值, 不必像 GJB 150.16/16A 中那样根据飞机和发动机相关参数按公式进行计算, 相对来说比较简单^[4]。民机振动量值是不可剪裁的, 只能从各种图表中去选取。由于民用飞机只执行单一载客运输任务, 没有外挂、吊舱和机炮类的机外设备, 当然也没有这类设备的振动试验要求。

下面对民用飞机机载设备适航取证用的主要环境试验标准 DO 160 系列标准中的 DO 160F 版本中的振动试验作详细介绍。要说明的是, DO 160G 版本的振动试验与 DO 160F 是一致的^[5—7]。

2 DO 160F/G 中的振动分类和说明

DO 160F/G 将振动试验分为标准振动试验(S)、强化振动试验(R, U, U2)和短时高量级振动试验(H, Z)三类, 应根据设备性能验证所需保证的级别选用适当的类别或几个类别, 具体选用哪个试验类别和试验曲线取决于机载设备载机的类型和其在机上的位置^[8]。各试验类别的目的、内容和应用对象见表 1。

表 1 各试验类别的目的、内容和应用对象

Table 1 Objective, content and application object of various tests

试验类别	试验目的	应用对象
标准振动试验 固定翼飞机 (S)	验证设备在经受飞机正常工作状态 遇到的振动环境时能否满足相应 TSO 标准中规定的最低性能要求	仅应用于固定翼飞机, 不适用于直升机
大部分固定翼 飞机 (R)	可用正弦和随机两种振动方式进行强化振动试验, 具 体取决于飞机类型和设备位置;	
强化振动试验 (R, U, U1)	频率已知 (R) 验证设备经受功能振动期间是否能 满意地工作。并在其经受耐久振 动 频率未知量级后仍能满意地工作, 即验证设 备的功能性能及结构完整性	不适用于固定翼活塞式或涡轮螺旋桨发动机飞机设备。 已知频率的直升机设备进行正弦叠加随机的强化振 动试验
直升机 (U)	未知频率直升机设备可按标准给定的三组频率进行 与已知频率直升机设备相同的正弦叠加随机的强化 振动试验, 仅适用于机身和仪表板	
频率未知 (U1 代 替 U)	未知频率的直升机设备可用标准中给定的随机振动 试验代替(即 U1 代替 U), 但仅适用于安装于机身、 尾桨和仪表板, 控制台与设备机架两个区的设备	
短时高量级振 动试验 大部分固定翼飞 机 (H, Z)	验证固定翼飞机机载设备耐受发动 机风扇叶片损坏造成异常振动、即 短时高量值瞬态振动的能力	不能代替标准振动和强化振动试验, 仅适用于固定翼 活塞式或涡轮螺旋桨发动机飞机, 不适用于直升机

3 振动谱和振动量值

3.1 振动谱

飞机的振动谱的谱型主要取决于其主要振源即发动机的类型。因此，DO 160F/G 中的振动谱按飞机上装载的发动机类型分别给出其机载设备的振动谱型。由于机载设备经受的振动强度还取决于离振源的距离和所在位置。因此，每一振动谱中还给出了机上各位置对应的多条振动曲线，如图 1—4 所示。

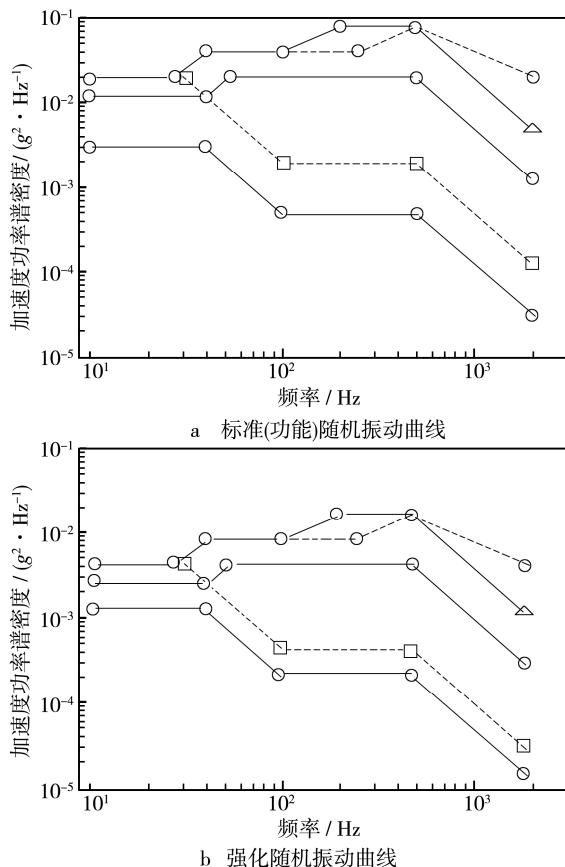


图 1 固定翼涡轮喷气发动机和涡扇发动机飞机上的设备
Fig.1 Equipment on fixed wing turbojet engine and turbofan engine

3.2 振动量值

3.2.1 装有涡轮喷气发动机和涡扇发动机的固定翼飞机上的设备

这类飞机的振动是由飞机蒙皮经受的气动扰流和发动机、齿轮箱工作引起的。位于机身，仪表板、控制台与设备机架，发动机舱和吊舱，机翼及起落架舱，尾翼及翼尖整流罩五个区的设备经受随机振动；位于发动机及齿轮箱和起落架两个区的设备主要经受正弦振动；发动机叶片损坏导致机载设

备经受短时高量值瞬态正弦振动。

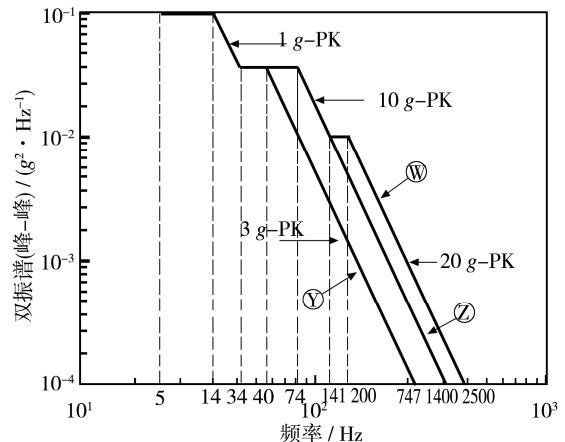


图 2 固定翼无涵道涡轮风扇（桨扇）发动机飞机上的设备标准和强化正弦振动曲线

Fig.2 Standard and strengthened sine vibration curves of equipment on fixed wing turbofan engine plane without bypass

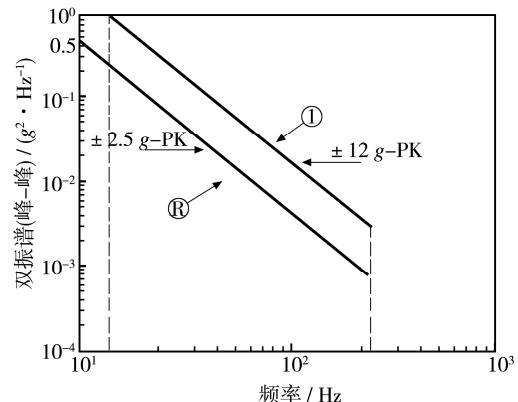


图 3 固定翼涡轮喷气发动机和涡扇发动机、无涵道涡轮风扇(桨扇)发动机上的部分设备短时高量级正弦振动试验曲线
Fig.3 Short-term and high magnitude sine vibration curve of some equipment on fixed wing turbojet engine, turbofan engine and turbofan (prop-fan) with bypass

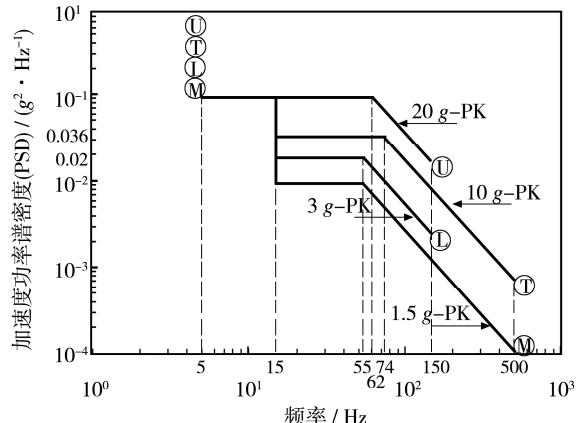


图 4 安装在固定翼活塞式发动机或涡轮螺旋桨发动机飞机上设备的标准正弦振动试验曲线

Fig.4 Standard sine vibration curve of equipment on fixed wing piston engine or turboprop plane

1) 位于机身、仪表板、控制台与设备机架,发动机机舱和吊舱,机翼及起落架舱和尾翼及翼尖整流罩五个区的设备。这五个区域的机载设备遇到均是随机振动环境,由于机载设备在机上的位置不同,其随机振动谱的曲线各不一样,如图 1a 和 b 所示。图 1a 是标准振动曲线,图 1b 是强化振动曲线,两者谱型相同,只是强化振动量值相对于标准正弦振动量值作了放大^[9—10],每根曲线上均标明了量值,但表 2 中的频率量值表更清楚。该表给出了性能和耐久试验的量值计算公式或具体数据,表 2 中概括了飞机上各个区使用的振动类型和曲线。从表 2 中可以看出,对于装在仪表板、控制台与设备机架上的区域设备,大多数使用(B2)这一预期量级,其振动强化试验量值(B12)相对于标准振动试验(B2)放大了 4 倍^[11—12];如果使用能反映所有预计环境的更高量级(B),则振动强化试验的量级(B1)相对于标准振动试验量级(B)放大了 2 倍。装在大型飞机上这一区域的设备,其标准振动量值使用最高的振动量级(B3),其强化振动试验量级(B4)也为其标准振动量级的 2 倍。装在其他三个区的设备,强化振动试验量值(C1, D1 和 E1 曲线)均为其标准振动量值(C, D 和 E)的 2 倍。从表 2 中还可以看出,装在机翼及起落架舱的设备的标准振动和强化振动试验曲线与装在尾翼及翼尖整流罩区的设备的曲线是完全一样的^[13]。

2) 位于发动机及齿轮箱和起落架区的设备。安装在发动机及齿轮箱和起落架两个区域的设备主要经受正弦振动环境,其正弦振动曲线如图 2 所示,仅适用于(机身、发动机及齿轮箱、起落架和尾翼及翼尖整流罩四个区的设备。与上述随机振动不同,这两个区域设备的标准和强化正弦振动曲线是一样的,都是使用 W 曲线,可见对两个区域内设备要求的振动谱和量值是一样的。

3) 所有区的设备。飞机发动机风扇叶片在使用中可能发生损坏,从而导致固定翼飞机发生异常振动情况,这时机载设备将遇到短时高量级的瞬态正弦振动。这一试验适用于飞机上所有区域内,其功能性能丧失将危及到飞机性能的设备。其振动谱型和振动量值的曲线如图 3 所示,不包括活塞式和涡轮螺旋桨发动机飞机上的设备。显然安装在机身,仪表板、控制台与设备机架两个区的设备经受这种振动的强度较小,使用图 3 中量值较低的 R 曲线,其他区域使用 P 曲线。

3.2.2 装有无涵道涡轮风扇发动机上的设备

这类飞机的振动主要是由发动机和齿轮箱工作引起的,飞机蒙皮经受气动扰流也是引起振动的原因之一。位于机身,发动机及齿轮箱,起落架和尾翼及翼尖整流罩四个区域的设备主要经受正弦振动;位于仪表板、控制台与设备机架,发动机机舱和吊舱,机翼及起落架三个区域的设备主要经受随机振动;发动机叶片损坏导致机载设备经受短时高量值的正弦振动。

1) 安装在机身、发动机及齿轮箱、起落架和尾翼及翼尖整流罩四个区域的设备。这类设备主要经受正弦振动环境,尾翼及翼尖整流罩区的设备也经受随机振动环境的作用^[14—19]。正弦振动曲线如图 3 所示。从表 2 可以看出,机身区设备使用 Y 曲线,发动机及齿轮箱区和起落架区使用 W 曲线,尾翼及翼尖整流罩区的设备可使用图 2 中的 Z 曲线,也可使用图 1a 中的 E 曲线和图 1b 中的 E1 曲线。正弦振动与随机振动不同,其标准振动和强化振动使用的是同一条曲线,没有放大倍数问题^[20]。有关耐受振动疲劳累积损伤的能力通过共振点驻留试验来解决,一般在每个频率上驻留 30 min^[21]。

2) 安装在仪表板、控制台与设备机架,发动机舱和吊舱,机翼及起落架舱三个区域的设备。这三个区域设备主要经受随机振动环境^[22],其振动曲线与安装在涡轮喷气发动机和涡扇发动机飞机上的设备是一样的(见表 3),分为标准振动曲线和强化振动曲线(如图 1a 和 b 所示)。

3) 所有区域设备。飞机上所有区域的设备,如要考虑涡轮叶片损坏造成的瞬态异常的正弦振动影响^[23—24],均需进行短时高量值正弦振动,如图 3 所示。

3.2.3 装有活塞式或涡轮螺旋桨发动机的飞机上的设备

安装在这种飞机上的机载设备主要经受正弦振动环境:其振动曲线如图 4 所示,曲线上直接标明量值。标准中根据发动机是多发还是单发,推力是否大于 5700 kg,将其分为 3 种类型,分别按机上位置给出振动曲线,如表 4 所示^[25—26]。标准中只规定标准正弦振动曲线,未规定起落架,尾翼及翼尖整流罩两个区域设备的振动曲线。没有强化振动曲线,有关耐振动疲劳的能力的考核,通过共振驻留试验来解决^[27],每个共振点驻留时间一般最多为 30 min,共振点不能多于 4 个。这种飞机的发动机

没有涡轮叶片，不会产生因其损坏导致的短时高量值正弦振动^[28—29]。

表2 试验量值及振动曲线(固定翼涡轮喷气发动机和涡扇发动机飞机上的设备)

Table 2 Test magnitude and vibration curve (equipment on fixed wing turbojet engine and turbofan engine) g²/Hz

曲线		频率/Hz ⁻¹								
		10	28	31	40	51.7	100	200	250	500
B2/B12	功能	0.0003			0.003		0.00005		0.0005	0.000032
	耐久	0.012			0.012		0.002		0.002	0.00013
B/B1	功能	0.012			0.012		0.002		0.002	0.00013
	耐久	0.024			0.024		0.004		0.004	0.00026
B3/B4	功能	0.02		0.02			0.002		0.002	0.00013
	耐久	0.04		0.04			0.004		0.004	0.00026
C/C1	功能	0.012			0.012	0.02			0.002	0.00126
	耐久	0.024			0.024	0.04			0.004	0.0026
D/D1	功能	0.02	0.02		0.04			0.04	0.08	0.02
	耐久	0.04	0.04		0.08			0.08	0.16	0.04
E/E1	功能	0.02	0.02		0.04		0.09	0.08	0.08	0.00505
	耐久	0.04	0.04		0.08		0.08	0.16	0.16	0.011

各区域的设备使用的振动曲线

区域号	设备所在位置	标准振动	强化振动	短时高量值振动
1	机身	C	C 和 C1	R
2	仪表板、控制台与设备机架	B, B2, B3	B 和 B1 或 B2 和 B12 或 B3 和 B4	R
3	发动机舱和吊舱	D	(随机)	P
5	机翼及起落架舱	E	图 1a	图 3 (正弦)
7	尾翼及翼尖整流罩	E	图 1b	P
4	发动机及齿轮箱	W	图 2	P
6	起落架	W	(正弦)	P

表3 各区域的设备使用的振动曲线(固定翼无涵道涡轮风扇(桨扇)发动机飞机上的设备)

Table 3 Vibration curve of each section (equipment on fixed wing turbofan (prop-fan) engine plane without bypass)

设备所在位置	标准振动			强化振动		短时高量值振动
	(功能试验)		(功能加耐久试验)			
1 机身	Y		Y			R
4 发动机及齿轮箱	图 2	W	图 2	W	图 2	P
6 起落架		W	(正弦)	W	(正弦)	P
7 尾翼及翼尖整流罩	图 1a E 或图 2 Z			E 和 E1 或 Z		P
2 仪表板、控制台与设备机架	B, B2 或 B3			B&B1 或 B2&B12 或 B3&B4	图 1a	R
3 发动机舱及吊舱	图 1a	D	(随机)	D&D1	(随机)	P
5 机翼及起落架舱		E		E&E1		P

表 4 各区设备的标准振动曲线(固定翼活塞式或涡轮螺桨发动机飞机)

Table 4 Standard vibration curve of each section (equipment on fixed wing piston engine or turboprop plane)

设备所在位置	标准振动(功能)			谱图	强化振动 (功能+耐久)	短时 高量级
	多发		单发			
	>5700 kg	<5700 kg	<5700 kg			
1 机身	L	M	M			
2 仪表板控制台与设备机架	W	M	M			
3 发动机舱及吊舱	T	L	M			
4 发动机及齿轮箱	U	L	L	图 4	—	—
5 机翼及起落架舱	T	L	M			
6 起落架	—	—	—			
7 尾翼及翼尖整流罩	—	—	—			

4 振动试验的持续时间

固定翼民用飞机机载设备振动试验时间取决于其载机的类型、在机上的位置, 是正弦振动还是随机振动^[30—32], 是标准振动试验还是强化振动试验。活塞式或涡轮螺桨发动机的设备不进行强化振动试验。

5 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, 因而其振动试验振动谱的谱型和振动量值可以事先确定。DO 160F 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) 固定翼涡轮喷气发动机或涡扇发动机飞机和无涵道涡轮风扇发动机机载设备的振动试验分为标准振动试验、强化振动试验和短时高量值振动试验三种类型。其标准振动试验实际上就是功能(性能)试验, 其强化振动试验实际上是性能试验和耐久试验的组合, 即在耐久试验前后要进行不少于 10 min 的性能试验。标准振动试验和强化振动试验可以用正弦振动也可用随机振动, 具体取决于载机的类型或其在载机上的位置。短时高量值振动试验是由发动机风扇叶片损坏造成的瞬态振动, 因而是正弦振动。固定翼活塞式或涡轮螺桨发动机飞机振动试验只有标准振动试验, 没有强化振动和短

时高量值振动试验。标准振动试验只进行正弦振动试验。

3) 固定翼飞机的强化振动使用正弦振动时, 正弦振动曲线与标准振动试验曲线一致, 其强化主要体现在进行最多四个关键频率上 30 min 的共振驻留试验。因此其正弦试验程序中包括了每个轴向进行对数扫描速率不超过 1.00 ct/min 正弦扫频循环, 以确定关键频率, 并从中选出最严酷的四个关键频率用以进行振动驻留试验, 振动驻留试验结束后, 继续进行正弦扫频循环。正弦循环的时间为 3 h 减去在关键频率上驻留振动所用的时间。如果关键频率少于四个甚至没有, 则可减少驻留振动所用时间甚至无需振动驻留, 从而使正弦循环时间从 1 h 增加至 3 h。

4) 固定翼飞机的强化振动使用随机振动时, 其振动曲线形状与标准振动试验一样, 但量值要放大 2 倍或 4 倍(见表 2), 因而标准中分别提供了标准随机振动曲线(图 1a) 和强化振动曲线(图 1a)。如前所述强化振动试验为每轴向只进行最低 10 min 的性能试验加上 3 h 的耐久试验。耐久试验时产品应处于工作状态, 并在振动开始和即将结束时进行检测, 确定是否满足设备性能标准, 如果耐久试验期间产品不工作, 则耐久试验结束后, 则应在性能试验振动量级下检测其性能是否满足要求。

5) 从图表中可以看出固定翼活塞式或涡轮螺桨发动机飞机的设备只安排标准振动试验(正弦振动), 未安排强化试验程序, 即不进行耐久试验, 而且其起落架区和尾翼及翼尖整流罩两个区域未安排任何振动试验, 尚未见到标准中对此的相关说明。此外标准中对未知直升机频率的机载设备的振动试验, 仅规定了机身和仪表板、控制台和设备机

架两个区域的振动要求,其他五个区域的加载设备的振动要求未作规定,也无相应说明。

6) DO 160F/G 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

- [18] 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.