

文章编号:1674-8190(2020)06-859-07

电磁混响室高强度辐射场下机载电台敏感度研究

袁洪涛¹, 段泽民^{1,2,3}, 仇善良^{2,3}, 王建国^{2,3}

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

(2. 安徽省飞机雷电防护省级实验室, 合肥 230031)

(3. 强电磁环境防护技术航空科技重点实验室, 合肥 230031)

摘要: 机载电台作为飞机典型用频机载设备, 对其进行高强度辐射场(HIRF)辐照效应试验研究具有重要意义。为了解决混响室高强度辐射场环境的快速构建、快速调控及机载设备敏感度有效测试问题, 依托混响室高强度辐射场辐射敏感度测试系统, 以某型直升机机载电台为试验对象, 在 400 MHz~2 GHz 频段内, 通过改变混响室内部场强, 分别确定混响室连续与步进两种工作模式下机载电台的典型故障类型和敏感度阈值。结果表明: 在试验环境场强相同的条件下, 相比步进工作模式, 连续工作模式更容易测试出机载电台的敏感度阈值; 搅拌器连续工作模式下, 搅拌速度越快测试得到的机载电台敏感度阈值越低, 随脉冲波脉宽的增加其敏感度阈值的测试结果呈下降趋势。

关键词: 混响室; 高强度辐射场; 机载电台; 敏感度阈值; 测试方法

中图分类号: TM931

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.06.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the Sensitivity of Airborne Radio Station in Electromagnetic Reverberation Chamber High-intensity Radiation Fields

YUAN Hongtao¹, DUAN Zemin^{1,2,3}, QIU Shanliang^{2,3}, WANG Jianguo^{2,3}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

(2. Anhui Provincial Aircraft Lighting Protection Laboratory, Hefei 230031, China)

(3. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on High Intensity Electromagnetic Environment Protection, Hefei 230031, China)

Abstract: As the typical airborne equipment, it is of great significance to study the radiation effects of airborne radio station in high intensity radiation fields (HIRF). In order to solve the problems about quickly construct, rapidly adjust and effective testing of airborne equipment sensitivity in reverberation chamber high-intensity radiation field environment, a helicopter airborne radio station was used as a test subject in the reverberation chamber high-intensity radiation field radiation sensitivity test system in the frequency band of 400 MHz to 2 GHz, the typical fault type and sensitivity threshold of the test equipment were respectively determined in different working modes of the reverberation chamber by changing the electric field strength. The results show that the sensitivity threshold of the airborne radio station can be measured more easily in agitator continuous mode than step-by-step operation mode under the same conditions as the test environment field. In continuous working mode, the sensitivity threshold of the airborne radio station will decrease with the stirring speed. The faster the stirring speed, the lower the sensitivity threshold. And the tested results of sensitivity threshold will decrease with the increase of pulse width.

Key words: reverberation chamber; high-intensity radiation fields; airborne radio station; sensitivity threshold; testing method

收稿日期:2020-01-14; 修回日期:2020-02-27

基金项目:空装预研基金(301010504)

通信作者:袁洪涛,1147471275@qq.com

引用格式:袁洪涛, 段泽民, 仇善良, 等. 电磁混响室高强度辐射场下机载电台敏感度研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(6): 859-865,906.

YUAN Hongtao, DUAN Zemin, QIU Shanliang, et al. Research on the sensitivity of airborne radio station in electromagnetic reverberation chamber high-intensity radiation fields[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(6): 859-865,906. (in Chinese)

0 引言

随着电子信息科学技术的快速发展,各类军用及民用的电子设备包括导航、雷达、通信、电磁干扰机等被广泛应用,导致电磁信号在作战环境中形成了极为复杂的电磁环境^[1-4]。而主要源自于雷达、无线电、广播发射台及其他地基、舰载或机载射频发射器发射的能量,具有频带宽、作用时间长、电场强度高等特点的高强度辐射场(High-intensity Radiated Fields,简称HIRF)不利于飞机电子电气系统的运行,更有甚者会导致航空器系统故障,造成严重后果^[5]。复杂电磁环境对飞机各种机载设备的影响研究日趋成为军事和民用工程技术领域备受关注的要点之一^[6-7]。其中机载电台作为飞机典型用频机载设备,对其进行HIRF辐照效应试验研究具有重要意义。

国际上已建立了较为完善的HIRF试验标准,例如美国的RTCA/DO-160G《机载设备环境条件和试验程序第20章 射频敏感性(辐射和传导)》^[8]和SAE-ARP 5583《飞机在HIRF环境中的合格审定指南》^[9]等。国外大量的试验研究也已验证了混响室是机载设备HIRF测试的理想试验场地^[10]。然而,目前国内在混响室下进行的设备敏感度测试仍集中在通过性试验,对于混响室不同工作模式下电子设备敏感度测试的研究较少,对于有关机载设备的报道更少。魏光辉等^[11]、贾锐等^[12-13]在混响室下对引信、不同的军用医疗设备和雷达进行了辐照效应研究,对比了混响室与微波暗室的相关性以及搅拌器不同工作模式对受试设备敏感度阈值测试结果的影响;但是,他们是按照国际电工委员会IEC61000-4-21标准中的试验方法,在低场强下比较了信号源为连续波时搅拌速度对设备敏感度阈值的影响,没有描述混响室高场强下信号源为脉冲波时,脉冲宽度对电子设备的敏感度阈值测试结果的影响。

本文依托航空工业合肥航太电物理技术有限公司在国内建立的符合标准资格认证的混响室HIRF试验平台,选择某型直升机机载电台为研究对象,进行HIRF辐照效应试验,以确定在满足标准要求的情况下如何快速有效地进行机载设备敏感度测试,以期完善有关机载设备电磁辐射防护性能测试方法及标准规范,支撑直升机复杂电磁环境适应性试验、评估和验证提供借鉴。

1 HIRF 辐射敏感度试验

1.1 试验环境

试验用混响室为机械搅拌式混响室,由电磁屏蔽室和一个金属搅拌器组成,与微波暗室不同,内部无吸波材料,主要由表面镀锌钢材材质的高导电反射金属层墙壁、天线和被试设备等吸收电磁波。随着搅拌器的搅拌,消除腔体谐振驻波效应产生的空间电场的非均匀性,使电磁波在腔体内部形成多模分布,并通过电磁场多模叠加提高场分布的空间均匀性。搅拌器转动一周,混响室中的电磁场经历一个完整的变化过程。在统计意义上,通过机械搅拌器搅拌,混响室中的电磁场能实现空间均匀、各向同性和随机极化的分布,以提供HIRF所需的理想电磁环境^[14-15]。

混响室腔体尺寸为 $3.4\text{ m}\times 2.7\text{ m}\times 3.0\text{ m}$,工作区域尺寸为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1\text{ m}$,最低测试频率为 400 MHz ,通过配备国际先进的混响室测控系统和全固态功率放大系统,能够满足DO-160G标准中G类等级HIRF辐射敏感性试验要求。该混响室可实现 $400\text{ MHz}\sim 18\text{ GHz}$ 频段内方波、连续波、脉冲波等各种波形测试,最大脉冲宽度可达 $100\text{ }\mu\text{s}$ 的脉冲波形试验,最高测试场强为 $4\text{ }000\text{ V/m}$,且可以进行搅拌器步进与连续两种工作模式的试验。机械搅拌式混响室高强度辐射场辐射敏感度测试系统如图1所示。

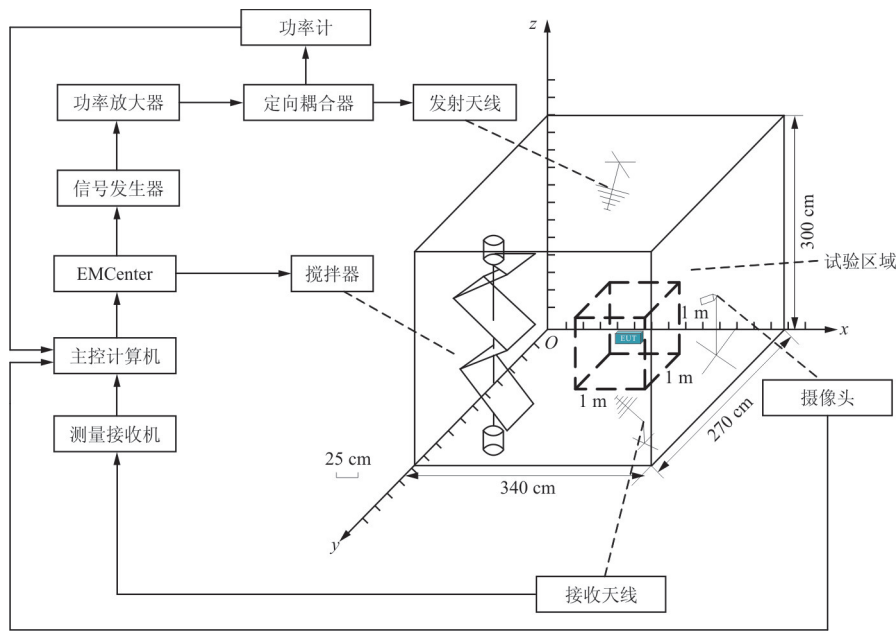


图 1 混响室 HIRF 辐射敏感度测试系统

Fig. 1 The reverberation chamber HIRF radiation sensitivity test system

混响室场地主要布置如下:

(1) 搅拌器:由 4 片铝制金属浆叶组成,呈 V 折形,相邻两叶片的夹角为 90°,叶片宽为 38 cm,长度不同(从上至下依次为 49、68、62、93 cm),旋转轴距离墙角两表面均为 50 cm;

(2) 发射天线:测试所用的发射天线型号为 UHALP 9108 A1 对数周期天线,其固定位置距离 yOz 平面 43 cm、 xOz 平面 66 cm、腔体上表面 66 cm;

(3) 接收天线:与发射天线相同型号的对数周期天线,其位置可移动,方便接收测试区域电磁信号;

(4) 摄像头:高清抗干扰摄像头位置可以移动,以方便在控制室监视受试设备状态;

(5) 测试区域:测试空间尺寸为 1 m × 1 m × 1 m,内部放置 1 m × 1 m × 80 cm 的试验台,方便受试设备的摆放,试验台位置距离前后表面各 85 cm、左右表面各 120 cm;

(6) 受试设备(EUT):受试设备为某型直升机可用于收、发信号以及数字显示的机载超短波电台,其本身以及所连接屏蔽导线下部放有起绝缘隔离作用的泡沫。受试电台放置在测试区域的试验台上,其大小以及相对试验台位置如图 2 所示。



图 2 某型直升机机载电台

Fig. 2 A certain type of helicopter airborne radio station

1.2 试验内容

在电磁兼容领域中,机载设备的敏感度测试是为了确定使其产生错误运行的电磁干扰参数。试验前验证机载电台是能够正常使用的合格产品,并将调试正常工作状态的机载电台放入满足标准资格认证的混响室测试区域内。试验中利用直流稳压电源通过屏蔽线对机载电台供电,直流稳压电源供电不仅可以为机载电台提供长期稳定的电能,便于在试验中控制开关电源调整机载电台的工作状态,而且达到了有效杜绝工频对试验结果影响的效果。在混响室测控室放置单独的信号源为机载电台发射信号,以有效控制机载电台的收发状态。试验过程是通过改变混响室内部 HIRF 场强,分别在

混响室搅拌器处于步进模式和连续模式下不同搅拌速度、不同脉宽下进行机载电台敏感度试验。具体测试内容如表 1 所示,测试频段为 400 MHz~2 GHz。

表 1 测试内容
Table 1 Test contents

搅拌器工作模式	具体设置
步进模式	步进步数 12, 脉冲宽度 4 μ s, 重复频率 1 kHz 脉冲波。
连续模式	搅拌速度 2、5、12 r/min, 脉冲宽度 4 μ s, 重复频率 1 kHz 脉冲波; 搅拌速度 2 r/min, 脉冲宽度 4、10、20 μ s, 重复频率 1 kHz 脉冲波。

参照 DO-160G 标准中第 20 章射频敏感性测试方法,由于功率放大器的限制,将测试频段分为 400 MHz~1 GHz 和 1~2 GHz 进行试验。采用脉冲波为激励源,分别设置搅拌器处于不同工作模式,以混响室能够达到的 DO-160G 标准中高强度辐射场外部电磁环境的临界试验 G 类等级的 2 倍场强值进行频段内扫频,找到受试机载电台的敏感频点,再对单个敏感频点采用精确度为 50 V/m 的二分法进行逐级升降场强。试验过程中由混响室监视装置观测机载设备出现的故障现象,找到受试设备是否正常工作的场强分界点,并以此记录敏感度阈值。辐射敏感性 G 类试验场强如表 2 所示,测试流程如图 3 所示。试验中频率的点数选为每十倍频 100 个频率点,其计算公式为

$$f_{m+1} = f_n \times 10^{1/100} \quad (1)$$

式中: f_n 为试验频率,并且 $n=1 \times m$, f_1 为起始频率, f_m 为终止频率,频点数 $m=1+100 \times \lg(f_m/f_1)$,四舍五入至最接近的整数,即在 400 MHz~1 GHz 频段内需扫描 41 个频点,1~2 GHz 频段内扫描 33 个频点。

表 2 辐射敏感性 G 类试验场强

Table 2 Radiation sensitivity G test field

试验频率范围	脉冲波试验场强/($V \cdot m^{-1}$)
400 MHz~1 GHz	700
1~2 GHz	2 000

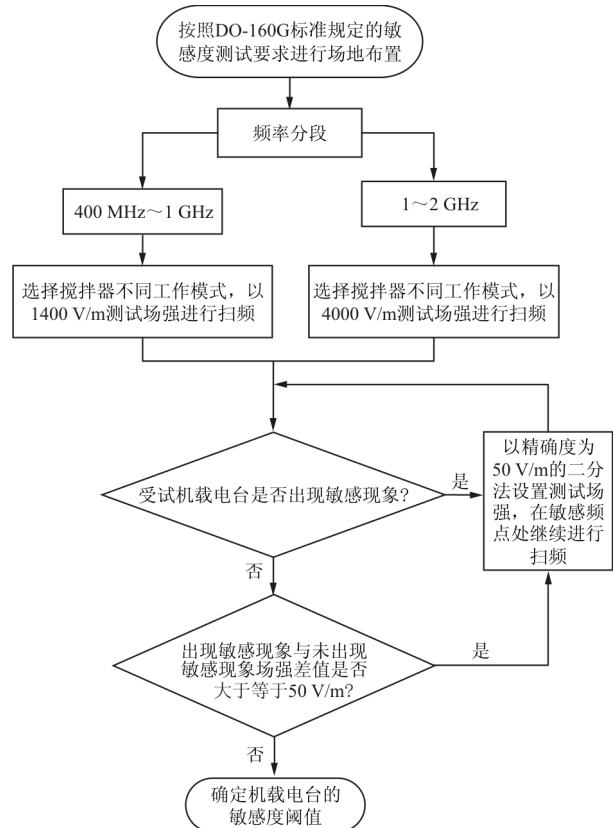


图 3 测试流程

Fig. 3 Flowchart of test

1.2.1 混响室搅拌器步进工作模式

DO-160G 标准中对搅拌器步进样本数的规定:搅拌器步数设置与搅拌器旋转一周电场比相关,其中电场比的定义为搅拌器旋转一周用到的电场绝对值的平方最大值与平均值平方之比^[9],DO-160G 校准参数如表 3 所示。由于在步进模式下混响室在低频段校准时 12 个步进数已满足混响室的统计均匀性,且在 400 MHz~2 GHz 频段内能够满足标准规定,确定 12 步进数测试机载电台的辐射敏感度阈值。

表 3 DO-160G 标准第 20.6 节要求的校准参数
(起始频率 $f_s=100$ MHz)

Table 3 Calibration parameters required by Section 20.6 of the DO-160G standard
(starting frequency $f_s=100$ MHz)

频段	校准和测试推荐搅拌器步数(最小为 12)
$f_s \sim 4f_s$	60
$4f_s \sim 8f_s$	36
大于 $8f_s$	18

当搅拌器处于步进工作时,搅拌器扇叶分别处于 12 个不同位置,机载电台敏感度的确定是对整个频段内每个频点多个搅拌器位置下的测量进行统计处理的结果^[16]。

1.2.2 混响室搅拌器连续工作模式

DO-160G 标准中仅提供了搅拌器连续模式对受试设备敏感度试验的搅拌器搅拌速度与激励源脉冲宽度的范围,故本文在混响室搅拌器处于连续工作模式下,选取搅拌器搅拌速度和激励源的脉冲宽度为变量,在 400 MHz~2 GHz 频段,进行不同搅拌速度、不同脉冲宽度下机载电台辐射敏感度试验,得到搅拌速度和脉冲宽度对机载电台敏感度阈值的影响。当搅拌器处于连续工作模式时,搅拌器以设定的恒定速率进行旋转,扇叶位置变化无限多个,搅拌器在一定时间内旋转一周完成测量数据的采集过程;再对每组测量数据进行平均,增加测量中所需要的统计特性;最后,以搅拌器旋转一周后接收机所得到的最大值作为测试结果^[17]。

(1) 对于搅拌器的搅拌速度,只要确定其搅拌速度能够满足场强的均匀性,并且受试设备能在一定时间里响应这种变化的电磁场,即可认为确定的搅拌速度能够有效测试^[18]。因此,在脉冲宽度为 4 μs、重复频率为 1 kHz 的脉冲波调试下,分别设置 2、5 和 12 r/min 三种搅拌速度进行测试,以对比搅拌速度对机载电台辐射敏感度的影响。

(2) 对于激励源脉冲宽度,标准仅规定在测试频段使用适当的脉冲宽度 4 μs(或更大)和 1 kHz 脉冲重复频率的激励源进行测试。因此,本文试验在搅拌器搅拌速度为 2 r/min 时,分别设置脉宽为 4、10 和 20 μs,重复频率为 1 kHz 的脉冲波进行对比,以确定激励源脉冲宽度对机载电台辐射敏感度的影响。

2 试验结果与分析

通过搅拌器在两种工作模式下的扫频测试发现:400 MHz~1 GHz 频段内 41 个频点受试机载电台均能正常工作,未发现故障现象,这可能是由于混响室功率放大系统能力的限制,需要增大试验场强值才能发现敏感频点,在此测试系统下无法测试出受试电台在 400 MHz~1 GHz 频段的敏感度阈值;在 1~2 GHz 频段内扫频 33 个频点里有 7

个频点受试设备出现不同的故障类型,其故障类型如表 4 所示。

表 4 故障类型
Table 4 Types of faults

敏感频点/GHz	故障类型	敏感度阈值/(V·m ⁻¹)
1.072	音频信号中断,数字显示错误,后重启	1 004~2 012
1.097	音频信号中断,数字显示错误,后重启	1 401~2 219
1.123	音频信号中断,数字显示错误,后死机	2 599~3 353
1.545	音频信号中断,数字显示错误,后重启	2 624~3 425
1.581	音频信号中断,数字显示错误,后重启	2 959~3 410
1.617	音频信号中断,数字显示错误,后重启	2 911~3 361
1.655	音频信号中断,数字显示错误,后死机	1 521~2 178

注:敏感度阈值是一个范围。

2.1 搅拌器两种工作模式对辐射敏感度的影响

在 1~2 GHz 频段内,设置激励源为脉冲宽度 4 μs、重复频率 1 kHz 的脉冲波,对比搅拌器步进模式与连续模式下受试机载电台敏感度阈值测试结果的差异,两种工作模式机载电台辐射敏感度阈值如图 4 所示,将频段内每个敏感频点视为一个单位,故采用等间距的形式绘制横坐标(图 5、图 6 亦同)。

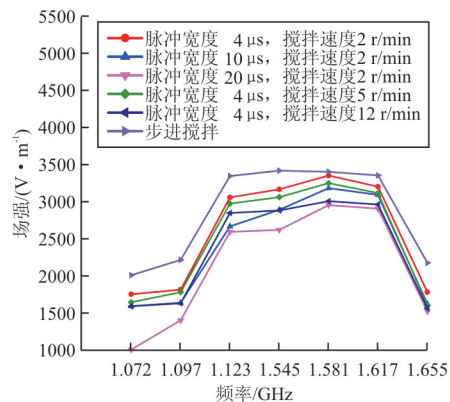


图 4 两种工作模式下机载电台辐射敏感度阈值对比
Fig. 4 Comparison of radiation sensitivity threshold for airborne radio in two operating modes

从图 4 可以看出:受试机载电台在相同的频点下,混响室搅拌器处于连续模式,无论采用何种速度和脉冲宽度,步进模式下敏感阈值的测试结果均

大于连续模式下的测试结果。这与贾锐等^[12]发现的三种不同非用频军用医疗设备辐射敏感度阈值在连续搅拌的测试结果低于步进搅拌模式的结论一致。造成此结果的原因是采用样本数为 12 的步进搅拌模式可以看作是对搅拌器旋转一周在停留位置离散地提取出 12 个强弱不同电场进行的叠加,而连续搅拌模式是搅拌器旋转一周后,得到的一个扇形范围内较强电场的叠加^[12],因此,步进模式下敏感度阈值的测试结果在数值上必定要大于连续模式下的测试结果,即相对于步进搅拌模式,连续模式下更容易测试出机载设备的敏感度阈值。

2.2 连续模式下搅拌速度对辐射敏感度的影响

在 1~2 GHz 频段内,设置激励源为脉冲宽度 4 μs 、重复频率 1 kHz 的脉冲波,对比 2、5 和 12 r/min 三种搅拌速度情况下受试设备敏感度阈值的差异,不同搅拌速度下机载电台辐射敏感度阈值如图 5 所示。

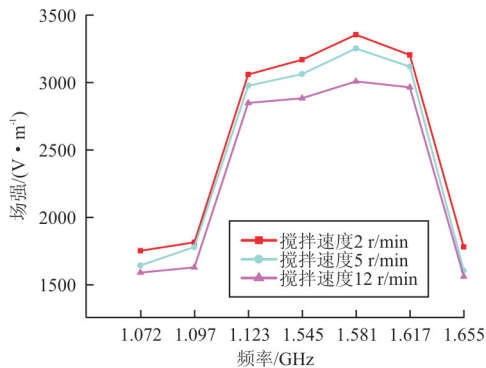


图 5 不同搅拌速度下机载电台辐射敏感度阈值

Fig. 5 Airborne radio radiation sensitivity threshold at different stirring speeds

从图 5 可以看出:当混响室搅拌器处于连续搅拌模式时,随着搅拌器搅拌速度的增加,受试设备的辐射敏感度阈值呈下降趋势。虽然选择的搅拌速度与陈京平等^[18]对于心电图机的搅拌速度不同,但是所得到的在敏感频点下随着搅拌速度的增加,受试设备的敏感度阈值减小趋势一致。这是由于搅拌速度增加会造成两种截然相反的结果:如果搅拌速度太快,受试设备来不及响应,则所需电场阈值应增加;若因搅拌器搅拌引起的寄生感应电流

容易造成设备干扰,则所需电场阈值应减小。显然本文的试验情况属于后者。搅拌速度影响着搅拌器的搅拌效率,当搅拌器搅拌速度足够快时,混响室内产生的电磁环境会更加复杂^[18]。因此,搅拌器搅拌速度较大时,机载电台出现故障的敏感度阈值较低。

2.3 连续模式下脉冲宽度对辐射敏感度的影响

在 1~2 GHz 频段内,设置搅拌速度为 2 r/min,激励源为重复频率 1 kHz 的脉冲波,对比脉冲宽度 4、10 和 20 μs 三种情况受试设备敏感度阈值的差异,不同脉冲宽度下机载电台辐射敏感度阈值如图 6 所示。

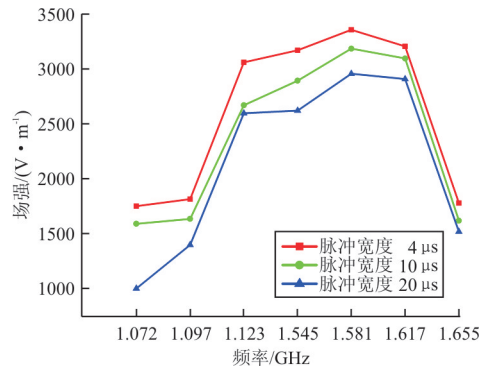


图 6 不同脉冲宽度下机载电台辐射敏感度阈值

Fig. 6 Airborne radio radiation sensitivity threshold at different pulse widths

从图 6 可以看出:脉冲宽度的增加会导致受试设备辐射敏感度阈值的减小。这是由于混响室产生相同的高强度辐射场所需要的电磁波功率是相同的,能量是功率作用时间的积分,随着脉冲宽度的增加,高强度辐射场对机载电台的电磁干扰能量变大,受试机载电台就容易在较低的场强下出现故障。

3 结 论

(1) 在试验环境相同条件下,无论是测试时间和测试成本的控制,还是对于机载电台敏感度阈值确定的难易程度考虑,相对混响室步进工作模式,选择混响室连续工作模式更适用于机载电台敏感度测试。

(2) 当混响室搅拌器处于连续工作模式时,为满足受试设备响应要求以及寄生感应电流干扰控制要求,均应在有效的搅拌速度范围内降低搅拌器速度进行机载电台敏感度测试。

(3) 当混响室搅拌器处于连续模式时,脉冲宽度的增加会得到机载电台敏感度阈值降低的测试结果,表明对于机载电台长脉冲干扰进行防护更为重要。

(4) 由于混响室功率放大器的性能以及测试时间和成本的控制,对于 100 MHz~18 GHz 整个频段内影响机载电台敏感度阈值测试结果变化的其他因素需要再做更为详细的测试和分析确定。

上述研究结论可为完善有关机载设备电磁辐射防护性能测试方法、标准规范以及军工科研单位开展复杂电磁环境适应性试验条件建设提供参考。

参考文献

- [1] 刘尚合. 武器装备的电磁环境效应及其发展趋势[J]. 装备指挥技术学院学报, 2005, 16(1): 1-6.
LIU Shanghe. Effect of electromagnetic environment to weaponry and its trend of development[J]. Journal of Equipment Academy, 2005, 16(1): 1-6. (in Chinese)
- [2] CAI X, SONG J. Analysis of complexity in battlefield electromagnetic environment[C]// IEEE Conference on Industrial Electronics & Applications. [S. l.]: IEEE, 2009: 2440-2442.
- [3] 汪连栋, 许雄, 曾勇虎, 等. 复杂电磁环境问题的产生与研究[J]. 航天电子对抗, 2013, 29(2): 20-22.
WANG Liandong, XU Xiong, ZENG Yonghu, et al. Production and investigation of the complex electromagnetic environment problems [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2013, 29(2): 20-22. (in Chinese)
- [4] 唐朝京, 刘培国. 信息化战场复杂电磁环境分析[J]. 国防科技, 2007(8): 25-28.
TANG Chaojing, LIU Peiguo. Analysis of complex electromagnetic environment in information battlefield [J]. Defense Technology Review, 2007(8): 25-28. (in Chinese)
- [5] 许广明, 项勇, 潘超英. 民用飞机高强度射频防护适航验证要求研究[J]. 航空标准化与质量, 2015(1): 44-47, 56.
XU Guangming, XIANG Yong, PAN Chaoying. Study on the requirements of high-strength RF protection airworthiness verification in civil aircraft[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2015(1): 44-47, 56. (in Chinese)
- [6] 赵紫阳. 机载电台复杂电磁环境下模拟仿真技术研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.
ZHAO Ziyang. Simulation and research of airborne radio station in the complex electromagnetic environment [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016. (in Chinese)
- [7] 惠杰. 机载短波通信电台电磁兼容技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
HUI Jie. A research on EMC of aircraft HF station [D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [8] RTCA. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment, Section 20: radio frequency susceptibility (radiated and conducted): SC-135. DO-160G-10[S]. Washington, DC: RTCA, Inc. 2010.
- [9] Ae-4 Electromagnetic Environmental Effects Committee. Guide to certification of aircraft in a high-intensity radiated field (HIRF) environment: ARP5583A-10[S]. Washington, DC: SAE International, 2010.
- [10] 赵俊. 混响室高强辐射场对信息处理系统影响试验方法与防护研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2016.
ZHAO Jun. The research of test method and protection technology of information processing system in HIRF based on reverberation chamber [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [11] 魏光辉, 刘心愿, 孙永卫, 等. 混响室与均匀场中引信电磁辐射抗扰度测试相关性研究[J]. 高电压技术, 2015(1): 287-293.
WEI Guanghui, LIU Xinyuan, SUN Yongwei, et al. Research on correlation of electromagnetic radiation susceptibility for radio fuze in uniform field and reverberation chamber [J]. High Voltage Technology, 2015(1): 287-293. (in Chinese)
- [12] 贾锐, 王庆国, 李许东, 等. 混响室工作模式对辐射敏感度测试结果的影响[J]. 军械工程学院学报, 2010, 22(4): 37-40.
JIA Rui, WANG Qingguo, LI Xudong, et al. The influence of different working modes on results of the radiated immunity tests in a reverberation chamber [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2010, 22(4): 37-40. (in Chinese)
- [13] 陈京平, 贾锐, 唐斌, 等. 混响室条件下雷达电磁辐射效应研究[J]. 微波学报, 2014, 30(6): 55-58.
CHEN Jingping, JIA Rui, TANG Bin, et al. Research on radiation effects to radar in reverberation chamber [J]. Journal of Microwaves, 2014, 30(6): 55-58. (in Chinese)
- [14] 吴一超. 高强辐射场电磁兼容设计及测试技术[J]. 光电技术应用, 2018, 33(3): 66-68, 77.
WU Yichao. Electromagnetic compatibility (EMC) design and testing technology of high intensity radiation field [J]. Electro-Optic Technology Application, 2018, 33(3): 66-68, 77. (in Chinese)
- [15] 张捍驰. 基于混响室的杂波频谱研究[J]. 军民两用技术与产品, 2018(4): 11-15.
ZHANG Hanchi. Study of the clutter spectrum based on reverb chamber [J]. Dual Use Technologies & Products, 2018(4): 11-15. (in Chinese)

- 报, 1994, 15(1): 27-31.
- WANG Zhongyan. The influence of airplane control system properties on the maneuver loads[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1994, 15(1): 27-31. (in Chinese)
- [10] 王庆林, 董善荣. 飞机操纵系统动态特性在对称机动飞行载荷计算中的应用[J]. 飞行力学, 1984(2): 49-58.
- WANG Qinglin, DONG Shanrong. Application of airplane control system dynamic properties in the calculation of symmetrical maneuver loads[J]. Flight Dynamics, 1984(2): 49-58. (in Chinese)
- [11] 李志, 崔冬梅. 带主动控制技术飞机平尾机动载荷计算研究[J]. 飞机设计, 2005(2): 15-19.
- LI Zhi, CUI Dongmei. Calculation of horizontal tail maneuver loads for aircraft using active control technology[J]. Aircraft Design, 2005(2): 15-19. (in Chinese)
- [12] 陈惠亮. 主动控制技术对民用飞机飞行载荷的影响[J]. 民用飞机设计与研究, 1997(3): 17-22.
- CHEN Huiliang. The influence of active control technology on the flight loads of civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design & Research, 1997(3): 17-22. (in Chinese)
- [13] 阮文斌, 闫中午, 符梁栋. 民用飞机控制律对俯仰机动平尾载荷影响分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2020(3): 12-16.
- RUAN Wenbin, YAN Zhongwu, FU Liangdong. Impact analysis of horizontal-tail load about civil aircraft after considering control law[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2020(3): 12-16. (in Chinese)
- [14] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册: 第 9 册——载荷、强度和刚度[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001: 20-25.
- General Editorial Board of *Aircraft Design Manual*. Aircraft design manual: Vol. 9—load, strength and stiffness [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001: 20-25. (in Chinese)
- [15] 阮文斌. 民用飞机方向舵往复偏转仿真研究[J]. 机械设计与制造工程, 2020, 48(8): 67-70.
- RUAN Wenbin. Simulation research on rudder control reversal of civil aircraft[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2020, 48(8): 67-70. (in Chinese)

作者简介:

阮文斌(1986—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行载荷设计。

张智(1978—),男,硕士,研究员。主要研究方向:飞行载荷设计。

(编辑:丛艳娟)

(上接第 865 页)

- [16] 魏光辉, 崔耀中, 潘晓东. 电磁混响室仿真与优化设计[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- WEI Guanghui, CUI Yaozhong, PAN Xiaodong. Electromagnetic reverberation chambers simulation and optimization design[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [17] 张成怀, 魏光辉, 王韶光. 电磁兼容测试中的混响室技术[C]// 中国物理学会第十三届静电学术年会. 石家庄: 中国物理学会, 2006: 297-302.
- ZHANG Chenghuai, WEI Guanghui, WANG Shaoguang. Technology of the reverberation chamber for EMC test [C]// The 13th Annual Conference of the Chinese Physical Society. Shijiazhuang: Chinese Physical Society, 2016: 297-302. (in Chinese)
- [18] 陈京平, 贾锐, 唐斌, 等. 混响室搅拌器搅拌速度及工作模式对测试结果的影响[J]. 科学技术与工程, 2014(6): 174-176, 180.
- CHEN Jingping, JIA Rui, TANG Bin, et al. The influence of stirrer velocity and working mode to test results in a reverberation chamber[J]. Science Technology and Engineering, 2014(6): 174-176, 180. (in Chinese)

作者简介:

袁洪涛(1996—),男,硕士研究生。主要研究方向:电气设备电磁防护。

段泽民(1955—),男,硕士,教授、博导。主要研究方向:飞行器雷电电磁防护,飞行器强电磁环境效应及防护,脉冲功率技术等。

仇善良(1983—),男,博士,副研究员。主要研究方向:飞行器电磁环境效应及防护,电磁环境效应仿真等。

王建国(1990—),男,学士,工程师。主要研究方向:飞行器强电磁环境试验与防护。

(编辑:马文静)