

基于电磁混响技术的电磁环境与自然环境综合 试验技术

孙月刚, 王健

(北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘要: **目的** 研究电磁环境与自然环境综合试验方法。**方法** 针对装备电磁环境与温度、湿度环境的多物理场综合试验需求, 基于电磁混响技术, 解决不同环境模拟相容性问题, 对关键部件进行分析和设计, 并依据相关标准进行了性能测试。依据 IEC61000-4-21, 分别测试电磁环境与自然环境综合箱在常温、高温和低温条件下的场均匀性。**结果** 综合场均匀性偏差最大值小于 3 dB, 性能满足标准要求。**结论** 基于电磁混响技术的综合试验方法, 为装备在多重环境应力综合作用下效应机理研究和适应性考核提供了手段。

关键词: 电磁环境; 自然环境; 电磁混响技术

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.05.008

中图分类号: TJ01; TB114

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2016)05-0048-06

The Combined Test Technology of Electromagnetic Environment and Natural Environment Based on the Technology of Electromagnetic Reverberation Chamber

SUN Yue-gang, WANG Jian

(Beijing Institute of Electrical and Mechanical Engineering, Beijing 100074, China)

ABSTRACT: Objective To study the combined test method of electromagnetic environment and nature environment. **Methods** As required by equipment combined test of multi-physical fields, electromagnetic environment and temperature/humidity environment, the problem of compatibility of different environmental simulations was solved based on the technology of electromagnetic reverberation chamber. By analyzing and designing key components, the combined test system was tested in compliance with relevant standards. According to IEC61000-4-21, the field uniformity of electromagnetic environment and nature environment combined test chamber was tested under the condition of normal temperature, high temperature and low temperature. **Results** Results showed that the maximum value of combined field uniformity was less than 3 dB. The performance met the requirements of the standard. **Conclusion** The combined test method based on the technology of electromagnetic reverberation chamber is provided for effect mechanism study and adaptive test of equipments under combined effects of environmental stress.

KEY WORDS: electromagnetic environment; natural environment; technology of electromagnetic reverberation chamber

收稿日期: 2016-08-08; 修订日期: 2016-09-06

Received: 2016-08-08; Revised: 2016-09-06

作者简介: 孙月刚 (1965—), 男, 山东人, 研究员, 主要研究方向为装备电磁环境效应。

Biography: Sun Yue-gang(1965—), Male, from Shandong, Researcher, Research focus: electromagnetic environment effect of equipment

装备使用面临着多种复杂严酷环境的影响,不同环境因素对装备的影响机理各异,同时各种环境因素不是孤立的存在,往往共同作用于装备。由于环境因素的耦合作用,会产生大量新的未知故障模式,一般会放大单一因素的影响。电磁环境与温度、湿度环境的多物理场综合效应将对装备的作战使用造成严重的影响。将电磁环境和温度、湿度环境综合在一个环境中产生,对考核装备在多环境因素综合作用下的环境适应性会起到非常重要的作用。

单独的电磁环境试验和温度、湿度综合试验技术已经十分成熟,并有专门的试验标准。电磁环境试验一般在电波暗室中进行,近些年来,电磁混响室、TEM室、GTEM室等也得到应用。文中基于电磁混响技术,设计了电磁环境与自然环境综合试验箱,并进行了三种温、湿度条件下的场均匀性测试。结果表明,综合试验系统的电磁性能和温湿度性能指标满足相关试验标准的要求。

1 技术途径

电磁混响技术是利用金属墙壁构成电磁波的反射,在混响室内部装设特殊设计的搅拌器,将天线发射的电磁波通过搅拌器和内墙面的多次反射,在混响室的有效测试区域产生动态均匀的电磁环境。

电磁混响室由混响室本体、搅拌器、信号源、大功率发射系统和场强测量装置等组成。混响室内部的搅拌器由装在轴上的金属反射面构成,通过外部电机步进或连续旋转,驱动改变混响室内部电磁场的边界条件,从而改变室内的电磁场分布。混响室内部的电磁场就是所有反射波的叠加,经过搅拌后的场具有空间均匀、各向同性、随机极化的特点。另外由于混响室是一个高 Q 值的屏蔽腔体,可以很容易地通过小的输入功率获得非常高的场强,特别适合模拟高场强电磁环境。

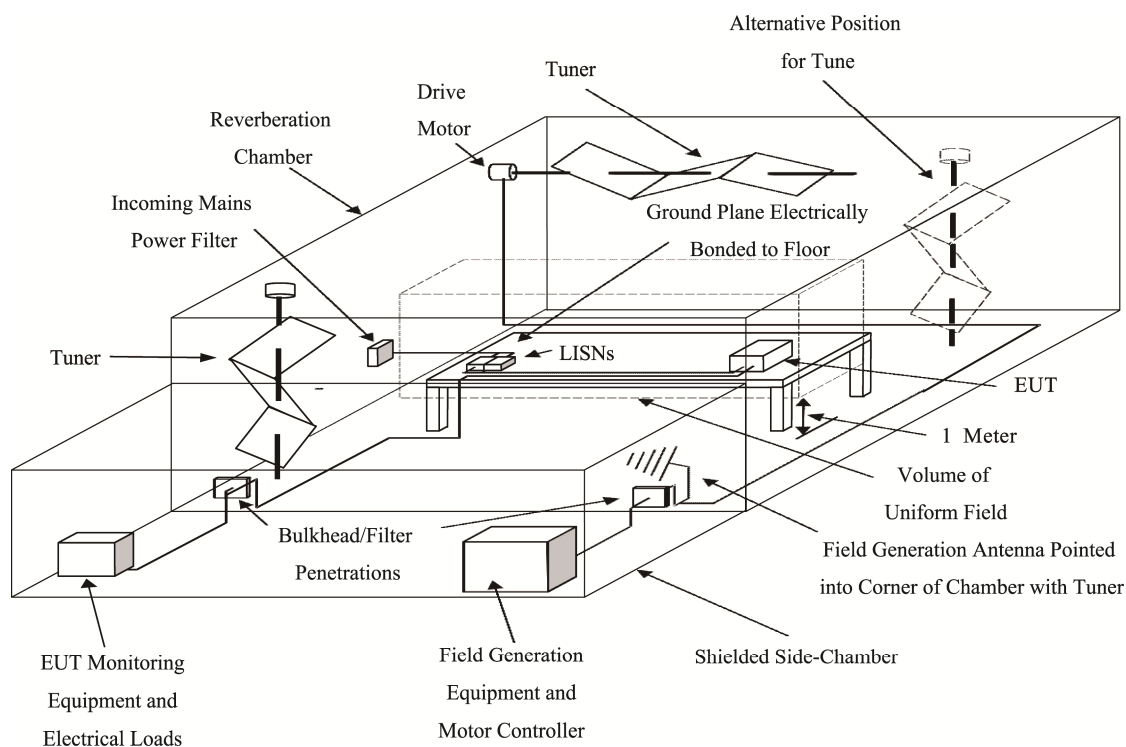


图1 电磁混响室

Fig.1 Reverberation chamber

混响室可用频率可以根据式(1)估算^[13]:

$$N = \frac{8\pi}{3} lwh \frac{f}{c} \quad (1)$$

式中: N 为电磁场分布模式个数,个; l , w , h 分别混响室的长宽高, m; f 为频率, Hz; c 为光

速, 3×10^8 m/s。

经过计算后,若混响室内可能存在的电磁场分布模式个数为 N ,在给定的频率上满足 $N > 100$ 的条件,则可以作为该混响室使用的下限频率。因此,一个 $2 \text{ m} \times 1.6 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 的混响室,其可用频率在350

M Hz 以上, 满足模拟雷达辐射电磁环境的要求。

基于电磁混响技术设计的混响室是一个内壁光滑, 耐湿、热的金属封闭体, 与温湿度试验箱在总体结构上比较一致, 具备融合设计的基因, 是一个天然的技术解决途径。因此, 总体设计方案是将电磁混响室和温湿度试验箱集成在一起, 共用一个箱体, 同时解决二者之间的相容性问题。经过分析, 需要解决的主要问题为: 温湿度试验需要的进风、出风口与电磁混响室要求六个面具有良好的电磁波反射性能矛盾的问题; 温湿度试验箱大门气密与电磁混响室电磁密封的协同问题; 温湿度试验箱观察窗不具备电磁反射性能和存在电磁泄漏的问题; 温湿度试验箱传感器等电磁防护的问题; 电磁环境

试验系统温湿度环境适应性问题; 通风系统改进、电磁搅拌器对温湿度试验指标的影响问题; 综合试验系统的技术指标满足试验标准的问题。

2 系统设计技术

系统设计基于温湿度试验箱开展, 首先要增加电磁搅拌器。由于搅拌器的形状、大小、位置都会对混响室的场均匀性能有很大影响, 因此在箱体内通过计算机电磁仿真, 确定了搅拌器的位置、尺寸和结构形式, 保证在测试区域内, 有较好的场均匀性, 如图 2 和图 3 所示。

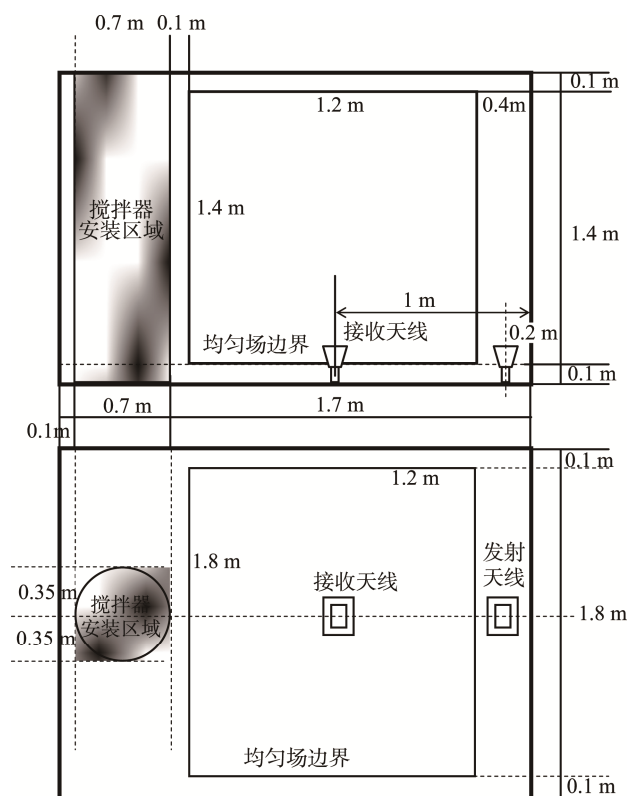


图 2 电磁搅拌器的位置

Fig.2 Position of tuner

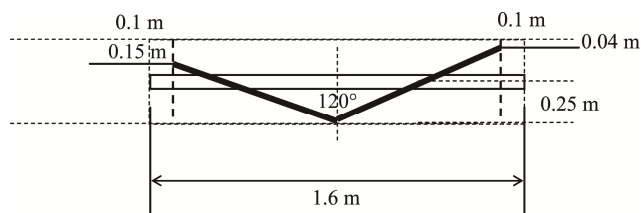


图 3 电磁搅拌器的结构

Fig.3 Structure of tuner

试验箱的进风口、出风口采用截止波导式通风窗, 如图 4 所示。当电磁波频率低于截止频率时, 电磁波在通风口上会全反射, 满足混响室的反射面要求。通过试验箱的预期使用频率, 确定截止波导的截面和深度尺寸, 同时计算通风量, 满足温度试验的通风要求。

通风波导一般采用蜂窝状结构, 单个蜂窝六角

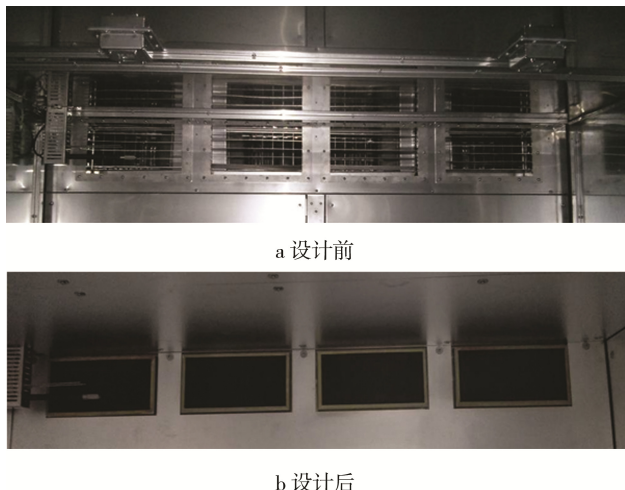


图 4 试验箱通风口设计前后

Fig.4 The air vents of test chamber before and after designing

形的边长可以用式 (2) 估算：

$$f = \frac{15}{w} \times 10 \quad (2)$$

式中： w 为单个六角形的边长，cm； f_c 为截止频率，Hz。实际中，取 $w=3$ mm， $f_c=50$ GHz，满足一般试验频率 18 GHz 的要求。

试验箱大门设计采用电磁和气密“三明治”复合结构，在内外两层橡胶气密的基础上，中间增加一层导电橡胶。屏蔽橡胶条采用耐高温和低温的掺银导电橡胶，设计为中空形式以增大屏蔽橡胶条的形变量，更好地与门框贴合，在保证原气密性能的基础上，增加了电磁屏蔽的能力。

试验箱的观察窗在内部增加一层屏蔽效能达 60 dB 的金属丝网电磁屏蔽玻璃，满足了混响室表面电磁反射需求和防电磁泄漏要求。

为解决温湿度传感器受电磁干扰问题，采用电缆屏蔽和增加低通滤波器进行电磁防护，同时对进出试验箱的电源线、信号线采用相应的滤波措施，增加光纤波导接口。一般进行场均匀性测试的电场探头，其温度使用范围为 5~35 °C，为满足 -55~+100 °C 环境下的测试要求，提出了利用小型参考天线进行场均匀性测试的技术，并进行了试验验证。

3 性能测试

3.1 常温下场均匀性测试

场均匀性是判定混响室性能好坏的一个重要

指标。随着搅拌器的不停旋转，混响室内边界条件发生变化，某一点的电场也会随着搅拌器的旋转而发生变化。旋转一周后对某点的电场取最大值，如果各点最大值的变化范围在 3 dB 以内^[14]，说明混响室场均匀性指标满足标准 IEC61000-4-21。设定测试区为 1.5 m×1.4 m×1.8 m 的立方体，对 8 个顶点位置进行场强测试，如图 5 所示。

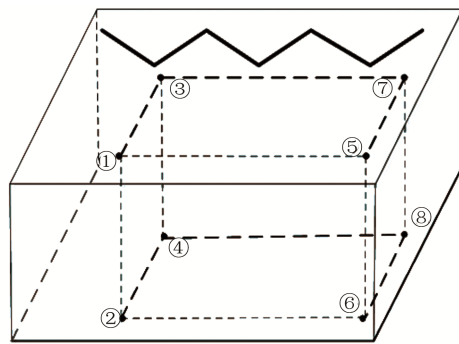


图 5 场均匀性测试 8 个探头位置

Fig.5 The position of eight probes during field uniformity testing

常温环境(温度为 12.0 °C,相对湿度为 38.0%)下，测试结果表明，各方向场强分量的标准偏差和全部方向的综合标准偏差均在测试要求的容限之内，综合场均匀性偏差最大为 2.51 dB，满足 3 dB 的均匀性指标要求。

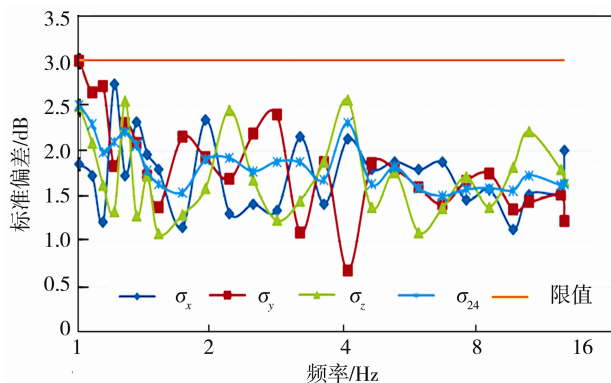


图 6 常温环境下的场均匀性结果

Fig.6 The results of field uniformity testing under the normal temperature

3.2 高、低温条件场均匀性测试

按照上述方法，选取了高温 100 °C (相对湿度为 0.4%) 和低温 -55 °C (相对湿度为 100%) 进行测试，测试结果如图 7 所示。从结果可以看出，高温、低温条件下的场均匀性也同样满足标准要求。

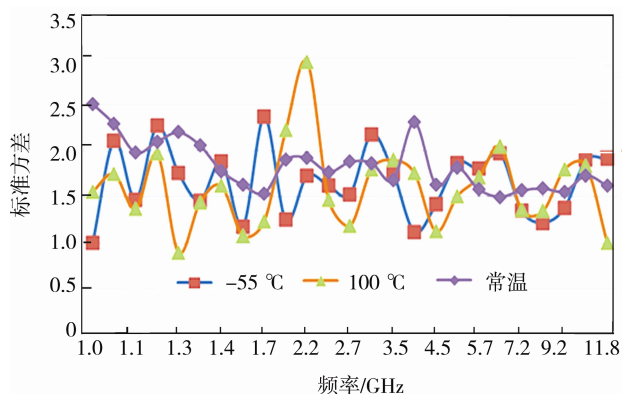


图7 高、低温下场均匀性测试结果

Fig.7 The results of field uniformity testing under the high/low temperature

3.3 场强测试

单位功率场强如图8所示。

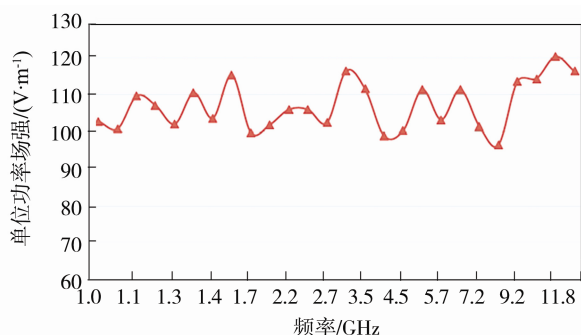


图8 单位功率场强

Fig.8 The field strength inspired by unit power

根据测试结果可知,最低的单位功率激发场强值是 96.46 V/m,若要激发 200 V/m 的场强,需要功放的瓦数为 4.3 W。由此可见,只要混响室的输入功率达到 4.3 W,即可激发出 200 V/m 的场强。当使用 200 W 功放时,激发的场强为: $E=1364.15$ V/m,可以满足雷达高场强电磁辐射环境的模拟。

3.4 温度、湿度特性测试

对试验箱进行温、湿度标定^[15-17],结果满足标准的要求。温度范围为-65~100 °C,相对湿度范围为 20%~98% (30~60 °C时),温度均匀性 ≤ 1.22 °C (空载测试时),温度变化率 ≤ 5 °C/min

4 结论

1) 基于电磁混响技术实现了在同一个试验箱中同时加载电磁环境应力与自然环境应力的试验

方法,在多物理场综合环境试验技术领域进行了有益的探索。

2) 解决了电磁环境与自然环境两种试验系统测试设备的相互影响问题,以及两种环境测试系统的环境适应性问题。

3) 通过试验验证,综合试验系统的电磁性能和温湿度性能指标满足相关试验标准的要求,为装备多种环境应力综合作用机理研究和试验考核提供了技术手段。

参考文献:

- [1] HILL D A. Electromagnetic Theory of Reverberation Chambers. National Institute of Standards and Technology (US) Technical Note 1506[M]. Gaithersburg: NIST TN, 1998.
- [2] MIL-STD-461E-1999, Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment[S].
- [3] 李尔平,高捷.应用新型混响室技术进行电磁辐射和抗干扰检测[J].安全与电磁兼容,2004(5):28—30.
LI Er-ping, GAO Jie. Emission and Immunity Tests and Measurements by Using the Advanced Reverberation Chamber Technique[J]. Safety and EMC, 2004(5):28—30.
- [4] 陈穷.电磁兼容性工程设计手册[M].北京:国防工业出版社,1993.
CHEN Qiong. EMC Engineering Design Handbook[M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 1993.
- [5] 逯贵祯,关亚林.电磁兼容中的混波室测量技术[J].中国传媒大学学报自然科学版,2005(3):26—30.
LU Gui-zhen, Guan Ya-lin. Measurement Technique of Reverberation Chamber in Electromagnetic Compatibility[J]. Journal of Communication University of China Natural Science Edition, 2005(3): 26—30.
- [6] 袁智勇,何金良,曾嵘.电磁兼容中的混响室技术[J].高压技术,2005,31(3):56—59.
YUAN Zhi-yong, HE Jin-liang, ZENG Rong. Reverberation Chamber Technology in Electromagnetic Compatibility[J]. High Voltage Technology, 2005,31(3): 56—59.
- [7] 张林昌.混响室及其进展(上)[J].安全与电磁兼容,2001,27(4):1—5.
ZHANG Lin-chang. A Review of Reverberation Chamber[J]. Safety and EMC, 2001, 27(4): 1—5.
- [8] 张林昌.混响室及其进展(下)[J].安全与电磁兼容,2002,28(1):9—13.
ZHANG Lin-chang. A Review of Reverberation Cham-

- ber[J]. Safety and EMC, 2002, 28(1):9—13.
- [9] 王晓伟, 朱云. 混响室校准与辐射抗扰度测试[J]. 电声技术, 2006(8): 70—74.
WANG Xiao-wei, ZHU Yun. The Calibration of Reverberation Chamber and Radiated Immunity Test[J]. Electro-acoustic Technology, 2006(8): 70—74.
- [10] 丁坚进. 混响室的理论、设计和测试[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
DING Jian-jin. Theory, Measurement and Design of Reverberation Chamber[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005.
- [11] DING Jian-jin, SHA Fei, HUANG Yi, et al. Calculating Mode Numbers of Asymmetric Reverberation Chambers[C]// 7th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Beijing: Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2005
- [12] 周香. 混波室的设计及其在电磁兼容测试中的应用[D]. 南京: 东南大学, 2005.
ZHOU Xiang. The Design of Reverberation Chamber and the Application in EMC Test[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [13] GJB 151B—2013, 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量[S].
GJB 151B—2013, Electromagnetic Emission and Susceptibility Requirements and Measurements for Military Equipment and Subsystems[S].
- [14] IEC61000-4-21, Part 4-21: Testing and Measurement Techniques-Reverberation Chamber Test methods.[S].
- [15] GJB 150.3A—2009, 军用装备实验室环境试验方法 第3部分:高温试验[S].
GJB 150.3A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel-Part 3: High Temperature Test[S].
- [16] GJB 150.4A—2009, 军用装备实验室环境试验方法 第4部分:低温试验[S].
GJB 150.4A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel-Part 4: Low Temperature Test[S].
- [17] GJB 150.9A—2009, 军用装备实验室环境试验方法 第9部分:湿热试验[S].
GJB 150.9A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel-Part 9: Damp Heat Test[S].