



·效应、试验与评估·

边界形变互耦混响室屏蔽效能测试系统性能评估

王平平, 程二威, 周星, 张怡

(陆军工程大学石家庄校区 电磁环境效应国家级重点实验室, 石家庄 050003)

摘要: 混响室复杂强电磁环境下开展材料屏蔽效能测试是电磁防护领域的研究热点。研究边界形变互耦混响室屏蔽效能测试系统性能, 开展了动态范围、电场分布特性和不确定度三个方面的试验验证, 结果表明: 在实际测试中, 测试结果小于 60 dB 即为可信测试值; 在 1~10 GHz 频段内, 互耦混响室发射室的空间电场标准偏差小于 3 dB, 接收室的空间电场标准偏差小于 2 dB, 满足国际、国内相关标准要求, 场均匀性良好; 测试系统的扩展不确定度为 5.90 dB, 可以作为材料屏蔽效能测试平台使用。

关键词: 边界形变; 互耦; 混响室; 屏蔽效能; 空间电场

中图分类号: O441.4

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230345

Performance evaluation of the shielding effectiveness testing system for boundary deformation mutual coupling reverberation chambers

Wang Pingping, Cheng Erwei, Zhou Xing, Zhang Yi

(Shijiazhuang Campus, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Conducting material shielding effectiveness testing in complex electromagnetic environments of reverberation chambers has become a key technology for accurately evaluating the electromagnetic protection ability of materials. To study the performance of the boundary deformation mutual coupling reverberation chamber shielding effectiveness testing system, experiments were conducted to verify the dynamic range, electric field distribution characteristics, and uncertainty. The results show that: in actual testing, a test result less than 60 dB is considered a reliable test value; the standard deviation of the electric field in both the transmitting and receiving reverberation chambers is less than 3 dB within the testing frequency range, fully meeting the uniformity requirements of the reverberation chamber; especially, the standard deviation of the spatial electric field in the receiving reverberation chamber is all less than 2 dB, and the uniformity is excellent; the expanded uncertainty of the testing system is 5.90 dB, which can be used as a material shielding effectiveness testing platform.

Key words: boundary deformation, mutual coupling, reverberation chamber, shielding effectiveness, space electric field

随着现代高技术战争中用频装备大量运用, 空间电磁环境中谐波分量越来越多、电磁辐射功率越来越强, 现代战场电磁环境越来越复杂, 各种武器装备和电子信息设备的电磁防护问题日趋凸显。在解决电磁辐射干扰的诸多手段中, 电磁屏蔽是最基本和有效的技术措施。目前主要采用屏蔽室法或法兰同轴装置法等方法开展屏蔽效能测试, 标准 GJB 8820-2015 和 GB/T 30142-2013 中对两种方法的测试规范作了详细规定。但是, 这些方法均采用电磁波垂直辐照材料来测试其屏蔽效能^[1-5], 并不能准确模拟出电子信息设备所处的电磁波多入射方向和极化方式共存的复杂电磁环境。边界形变混响室作为一种新兴混响室技术, 通过改变混响室边界位置获取统计均匀、各向同性、随机极化的电磁环境, 并且由于避免的高反射特性, 输入较小的功率就可以产生很高的场强, 这与电子信息设备可能遇到的复杂强电磁环境更为接近^[6-10], 因此, 在混响室环境中开展屏蔽效能测试成为电磁防护领域的一个研究热点。国际电工委员会在标准 IEC61000-4-21 中提出了嵌套混响室屏蔽效能测试方法, 需要在大型混响室内嵌套一个小型混响室, 测试窗口安装在小型混响室壁面上, 该方法存在测试装置复杂、最低可测频率受限、空窗条件下屏蔽效能测试结果与实际不符等不足之处^[11-17]。刘逸飞等人开展了基于频率搅拌技术的机械混响室材料屏

* 收稿日期: 2023-07-01; 修订日期: 2024-01-30

基金项目: 装备预先研究实验室基金项目(6142205210302)

联系方式: 王平平, 18630175878@163.com。

蔽效能测试研究,基于多重耦合效应修正了屏蔽效能定义表达式,降低了因测试方法自身导致的误差^[18]。美国 J. Skrzypczynski 等提出利用两个振动固有型混响室进行材料屏蔽效能测试方法^[19],试验将被测材料加载到两个混响室之间,这样能量相对集中、有利于低频测试,缺点是测试频点工作量巨大,被试材料与加载窗口之间阻抗对测试结果影响较大。为简化混响室环境下屏蔽效能测试装置、增加工作空间、拓宽可测频段范围、降低混响室测试环境构建成本及难度,本文研制了边界形变互耦混响室屏蔽效能测试系统,并从动态范围、电场分布特性和不确定度三个方面评估了该系统的性能。

1 边界形变互耦混响室设计思想

混响室定义为在一个高品质因数的屏蔽壳体内配备机械搅拌器,用以连续改变内部电磁场结构,在其内部形成各向异性、随机极化、统计均匀的电磁环境。通过文献 [20-21] 已知有一种由具有优异屏蔽效能的电磁屏蔽布作为腔体材料、步进电机带动混响室壁面沿其法线方向振动的柔性混响室设计方法,经试验验证,该混响室当壁面形变量达到 400 mm 时空间电场标准偏差均小于 3 dB,内部空间电场均匀。

边界形变互耦混响室是将两个独立的边界形变混响室有效搭接起来,构成一个电大尺寸且具有高导电反射壁面的屏蔽腔室。混响室一端放置发射天线作为发射室、另一端作为接收室,两个小室共用同一个金属壁面,材料测试窗口安装在共用壁面上,外部各由三个正交方向的步进电机带动混响室壁面振动,进而在腔室内形成传播方向多样、极化方式随机的电磁环境。边界形变互耦混响室中,边界振动技术代替了机械搅拌方式,大大简化了测试装置、增加了工作空间;互耦混响室代替了嵌套混响室,能够显著改善最低可用频率;电磁屏蔽布混响室代替金属腔体混响室,降低了混响室建设成本和难度。

2 边界形变互耦混响室屏蔽效能测试装置

测试系统由信号发生装置、信号接收装置和边界振动装置四部分构成。信号发生装置主要由矢量信号源、功率放大器、和辐射天线构成;信号接收装置主要由接收天线和频谱分析仪组成,在发射室和接收室中分别放置 1 幅接收天线,放置位置应距离壁面不小于 1/4 波长,接收天线与外部频谱分析仪连接,频谱分析仪端口接可调衰减器,用于防止功率过大损坏接收设备。信号监测装置一是采用具有三维电场解析功能的 Narda MR-200 场强计监测两个混响室内部所测位置的电场强度,二是采用双通道功率计连接功率放大器和发射天线之间,监测前向和后向功率;边界振动装置设置在混响室外部,采用自主设计研发的多维自动振动装置,分别带动发射室和接收室正交方向三个壁面振动。整个测试系统硬件采用串口控制电机控制器,通过串口、GPIB 接口线实现物理连接,采用 NI LabWindows 语言开发的电场空间自动测试软件实现自动测试和数据记录。边界形变互耦混响室屏蔽效能测试装置原理如图 1 所示,空间电场自动测试软件如图 2 所示。

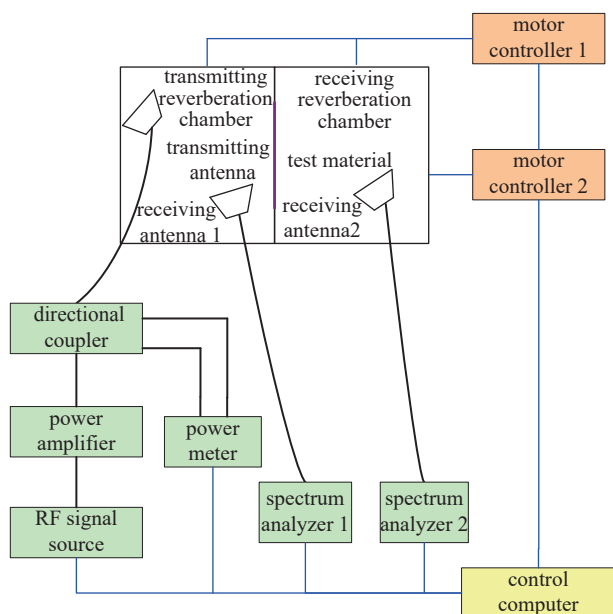


Fig. 1 Block diagram of mutual coupling reverberation room shielding effectiveness test system

图 1 互耦混响室屏蔽效能测试系统框图

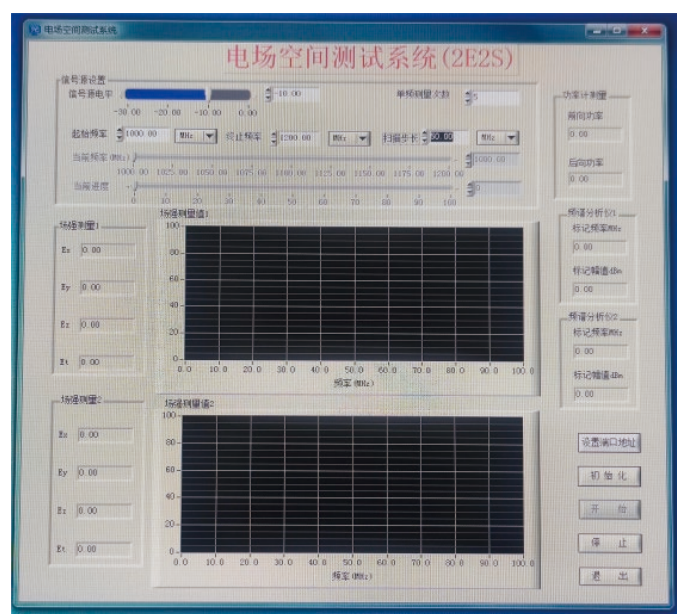


Fig. 2 Space electric field automatic testing software

图 2 空间电场自动测试软件

3 试验与讨论

3.1 测试系统动态范围评估

动态范围定义为测试窗口空载与封闭时接收混响室内接收天线的接收功率的差值, 单位用 dB 表示。

$$P = P_{r,noload} - P_{r,closed} \quad (1)$$

式中: $P_{r,noload}$ 指测试窗口未安装受试材料时接收混响室内接收天线接收到的功率, $P_{r,closed}$ 指测试窗口完全封闭时受试材料时接收混响室内接收天线接收到的功率。本文中测试窗口封闭是指使用高屏蔽效能的铜板将测试窗口完全封闭。

在 1~10 GHz 测试频率范围内, 将输入功率设置为 1 W, 获得测试系统的动态范围如图 3 所示。可以看出, 系统动态范围从 90 dB 逐渐下降到约 60 dB。如果配置更大功率的功率放大器, 提高输入功率, 或使用精度更高的接收机, 可以得到更宽的动态范围。由于在实际测试中使用的功率放大器为 20 W, 因此测试系统实际动态范围远大于 60 dB。因此在屏蔽效能测试中, 只要测试结果小于 60 dB, 就可以认为测试数据可信。

3.2 测试系统内部电场特性评估

依据标准 IEC 614000-4-21 推荐的混响室场均匀性测试方法, 分别测量发射混响室和接收混响室工作区域 8 个顶点位置处的电场强度, 结果如图 4 所示。图 4(a) 为发射混响室在 1~10 GHz 频段范围内的标准方差, 图 4(b) 为接收混响室在 1~10 GHz 频段范围内的标准方差, 在测试频率范围内发射室场强的三维分量及总量的标准方差均小于 3 dB, 接收室中空间电场标准偏差均小于 2 dB, 均匀性十分优异, 符合 IEC 61000-4-21 规定的混响室统计均匀场的标准偏差极限值, 可以用于屏蔽效能测试。分析原因是接收室内部电场能量是通过两个腔室共用壁面上的测试窗口 (60 cm×60 cm) 耦合进来的, 相当于一个天线阵在做辐射天线, 辐射到接收室的电场能量更加分散, 在受到相同振幅的边界形变扰动后场分布较发射室更均匀。

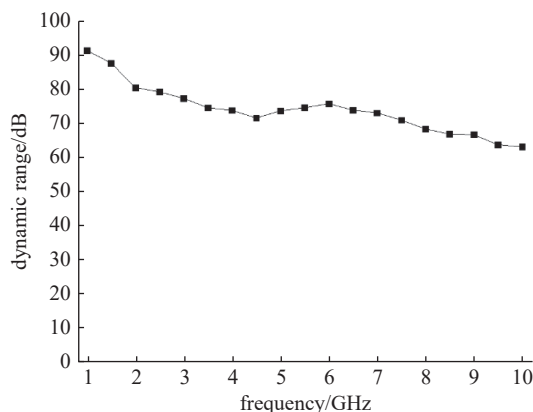
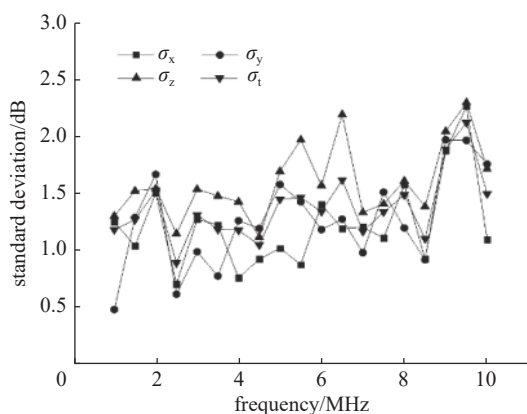
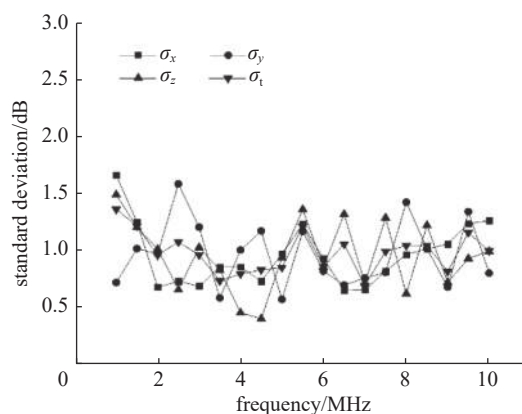


Fig. 3 Dynamic range of test system

图 3 测试系统动态范围



(a) uniformity of the emission reverberation chamber field



(b) uniformity of receiving reverberation chamber field

Fig. 4 Spatial electric field distribution uniformity of the test system

图 4 测试系统空间电场分布均匀性

3.3 测试系统不确定度分析与评定

屏蔽效能测试系统中使用的仪器设备为矢量信号源、功率放大器、定向耦合器、双通道功率计、发射天线、频谱分析仪和接收天线^[22]。其中, 矢量信号源、功率放大器和定向耦合器组合后的电磁能量可在功率计前向功率端口测试, 只需要评定功率计的不确定度即可; 发射天线和接收天线型号相同, 不需要考虑天线的匹配因子。因此评定测试系统不确定度需要考虑功率计、频谱分析仪和天线平均接收功率的不确定度^[23-24]。

根据标准不确定度 B 类评定流程, 功率计探头的最大允许误差为 ± 0.15 dB, 即不确定度区间为 ± 0.15 dB, 半宽为 0.3 dB, 在其区间内均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 标准不确定度

$$u(\alpha_1) = \alpha/k = 0.15/\sqrt{3} = 0.09 \text{ dB} \quad (2)$$

频谱分析仪的最大允许误差为 $\pm 0.22 \text{ dB}$, 即不确定度区间为 $\pm 0.22 \text{ dB}$, 半宽为 0.22 dB , 在其区间内均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 标准不确定度

$$u(\alpha_2) = \alpha/k = 0.22/\sqrt{3} = 0.13 \text{ dB} \quad (3)$$

根据标准不确定度 A 类评定流程, 屏蔽效能测试与天线平均接收功率相关, 根据中心极限定理, 平均接收功率服从正态分布, 进而求解得出接收功率 95% 置信区间为^[25]

$$\xi_{0.025}(\langle \chi^2 \rangle_N) = 2\sigma^2 \left(1 - \frac{1.96}{\sqrt{n}}\right) \quad (4)$$

$$\xi_{0.975}(\langle \chi^2 \rangle_N) = 2\sigma^2 \left(1 + \frac{1.96}{\sqrt{n}}\right) \quad (5)$$

式中: $\sigma^2 = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n P_i = \frac{\bar{P}_r}{2}$, n 为采样个数, P_r 为接收功率。将其代入接收功率的不确定度区间, 即可得到接收功率的不确定度。

边界形变混响室边界形变步数设置为 50 个, 计算得到平均接收功率的不确定度为 2.95 dB 。

合成不确定度计算式为

$$u_c(L_m) = \sqrt{\sum_{p=1}^m \{c_p u(x_p)\}^2} \quad (6)$$

式中: $u_c(L_m)$ 表示合成不确定度, c_p 表示灵敏度, $u(x_p)$ 表示标准不确定度, m 表示影响量的数量。

将功率计、频谱分析仪和天线平均接收功率的标准不确定度代入式(6), 得到合成不确定度

$$u_c(L_m) = 2.95 \text{ dB} \quad (7)$$

由于测试结果是由多个影响量合成确定的, 认为其服从正态分布, 在置信度为 95% 时, 其包含因子 $k = 2$, 因此计算扩展不确定度为^[25]

$$U_c(L_m) = k u_c(L_m) = 5.90 \text{ dB} \quad (8)$$

4 结 论

本文采用两个混响室共用同一个设置有测试窗口的金属板为分界面, 解决了两个混响室之间良好电搭接的技术难题, 构建了边界形变互耦混响室屏蔽效能测试系统。通过调控混响室边界形变的壁面数量和形变深度, 改变混响室内部电磁场边界条件, 达到有效扰动比, 在混响室内形成统计均匀、随机极化和各向同性的电磁环境^[26], 并对测试系统性能进行了试验评估, 结果表明: 测试系统动态范围大, 在 $1 \sim 10 \text{ GHz}$ 频率范围内为 $60 \sim 90 \text{ dB}$; 发射和接收混响室内部电场标准方差均小于 3 dB , 尤其是接收混响室内电场标准方差小于 2 dB , 场均匀性优异; 系统扩展不确定度为 5.9 dB , 可用于屏蔽效能测试平台, 为复杂强电磁辐射环境下材料的电磁防护性能评估提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 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])
- [2] GB/T 17626.21-2014, 电磁兼容 试验和测量技术 混波室试验方法[S]. (GB/T 17626.21-2014, Electromagnetic compatibility—testing and measurement techniques—reverberation chamber test methods[S])
- [3] 王庆国, 程二威. 电波混响室理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013. (Wang Qingguo, Cheng Erwei. Theories and applications of electromagnetic reverberation chamber[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013)
- [4] Hill D A. Electromagnetic fields in cavities: deterministic and statistical theories[M]. Piscataway: Wiley-IEEE Press, 2009.
- [5] Andrieu G. On the possible benefits of inserting metallic diffractors to improve low frequency performance of reverberation chambers[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021, 63(1): 304-307.
- [6] IEC 61000-4-21: 2011, Electromagnetic compatibility (EMC) part 4-21: testing and measurement techniques—reverberation chamber test methods[S].
- [7] Sorrentino A, Nunziata F, Cappa S, et al. A semi-reverberation chamber configuration to emulate second-order descriptors of real-life indoor wireless propagation channels[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021, 63(1): 3-10.
- [8] Reis A, Sarrazin F, Richalot E, et al. Radar cross section pattern measurements in a mode-stirred reverberation chamber: theory and experiments[J]. *IEEE*

[Transactions on Antennas and Propagation](#), 2021, 69(9): 5942-5952.

- [9] 姜林, 王庆国, 程二威. 机械搅拌混响室独立样本数建模及实验[J]. [强激光与粒子束](#), 2013, 25(11): 3050-3054. (Jiang Lin, Wang Qingguo, Cheng Erwei. Modelling and experimental study of the number of independent samples in reverberation chamber with mechanical stirring[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2013, 25(11): 3050-3054)
- [10] 程二威, 刘逸飞. 频率搅拌混响室原理及应用[J]. [强激光与粒子束](#), 2015, 27: 103202. (Cheng Erwei, Liu Yifei. Theory and application of frequency stirring reverberation chamber[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2015, 27: 103202)
- [11] 沈远茂, 陶洪波, 李吉, 等. 固定散射体对提高源搅拌混响室性能的研究[J]. [高电压技术](#), 2014, 40(3): 918-922. (Shen Yuanmao, Tao Hongbo, Li Ji, et al. Research on performance improvement of source stirring reverberation chamber introduced by stationary diffusers[J]. [High Voltage Engineering](#), 2014, 40(3): 918-922)
- [12] Kouveliotis N K, Trakadas P T, Capsalis C N. Examination of field uniformity in vibrating intrinsic reverberation chamber using the FDTD method[J]. [Electronics Letters](#), 2002, 38(3): 109-110.
- [13] Kouveliotis N K, Trakadas P T, Capsalis C N. FDTD modeling of a vibrating intrinsic reverberation chamber[J]. [Progress in Electromagnetics Research](#), 2003, 39: 47-59.
- [14] Leferink F, Boudenot J C, Van Etten W. Experimental results obtained in the vibrating intrinsic reverberation chamber[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No. 00CH37016). 2000: 639-644.
- [15] Leferink F. In-situ high field strength testing using a transportable reverberation chamber[C]//2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2008: 379-382.
- [16] Serra R, Leferink F B J. Optimizing the stirring strategy for the vibrating intrinsic reverberation chamber[C]//9th International Symposium on EMC and 20th International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2010: 457-462.
- [17] Hara M, Takahashi Y, Vogt-Ardatjew R, et al. Statistical analysis for reverberation chamber with flexible shaking walls with various amplitudes[C]//2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2018: 694-698.
- [18] Serra R, Leferink F, Canavero F. "Good-but-imperfect" electromagnetic reverberation in a VIRIC[C]//2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2011: 954-959.
- [19] 刘逸飞, 陈永光, 程二威, 等. 基于能量守恒原理的嵌套混响室法材料屏蔽效能计算[J]. [高电压技术](#), 2014, 40(3): 945-950. (Liu Yifei, Chen Yongguang, Cheng Erwei, et al. Material shielding effectiveness calculation for nested reverberation chamber method based on energy conservation principle[J]. [High Voltage Engineering](#), 2014, 40(3): 945-950)
- [20] Skrzypczynski J. Dual vibrating intrinsic reverberation chamber used for shielding effectiveness measurements[C]//10th International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2011: 133-136.
- [21] 程二威, 王平平, 赵敏, 等. 边界形变混响室设计与性能评估[J]. [强激光与粒子束](#), 2021, 33: 123002. (Cheng Erwei, Wang Pingping, Zhao Min, et al. Design and performance evaluation of boundary deformation reverberation chamber[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2021, 33: 123002)
- [22] 许宏光. 基于 C# 的混响室自动化校准及测试软件的开发以及混响室内场强特性的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014. (Xu Hognqiang. Development of automatic calibration and test software for reverberation chamber based on C# and the research of field strength characteristics inside a reverberation chamber [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014)
- [23] 苏政铭, 刘强, 赵远, 等. 基于柔性屏蔽材料混响室的设计与应用[J]. [强激光与粒子束](#), 2018, 30: 073202. (Su Zhengming, Liu Qiang, Zhao Yuan, et al. Design and application of flexible shielding material based reverberation chamber[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2018, 30: 073202)
- [24] 陈超婵, 祝思婷, 蔡青. 电磁屏蔽薄膜屏蔽效能的测量不确定度分析与评定[J]. [科学技术创新](#), 2020(29): 35-36. (Chen Chaochan, Zhu Siting, Cai Qing. Uncertainty analysis and evaluation of shielding effectiveness measurement uncertainty for electromagnetic shielding films[J]. [Scientific and Technological Innovation Information](#), 2020(29): 35-36)
- [25] 秦高强. EUT 电尺寸对混响室抗扰度测试不确定度影响分析[D]. 南京: 东南大学, 2018. (Qin Gaoqiang. Analysis of influence of EUT electrical size on uncertainty of reverberation chamber immunity test [D]. Nanjing: Southeast University, 2018)
- [26] 程二威, 王平平, 张怡, 等. 边界形变互耦混响室屏蔽效能测试技术研究[J]. [高电压技术](#), 2023, 49(7): 3102-3109. (Cheng Erwei, Wang Pingping, Zhang Yi, et al. Research on shielding effectiveness test technology of boundary deformation mutual coupling reverberation chamber[J]. [High Voltage Engineering](#), 2023, 49(7): 3102-3109)