



·高功率微波技术·

混响室内加载物损耗特性试验研究*

贾 锐, 耿利飞, 王川川, 郭 浩, 李新峰

(中国人民解放军 63892 部队, 洛阳 471003)

摘 要: 为研究混响室加载效应, 首先分析了混响室内各损耗途径, 得出加载损耗是混响室测试过程中唯一人为可控的损耗路径。构建了常见的 5 种不同测试场景, 利用时域法分别对这 5 种测试场景条件下的混响室品质因数进行测试并进行分析。结果表明, 金属天线支架造成的加载效应最小, 非金属天线支架会对混响室造成明显加载, 降低混响室的品质因数, 且随着非金属天线支架数量的增多, 这种效应会愈发明显。此外, 对加载物的平均吸收截面进行了研究, 将混响室内所有加载物视为一个加载吸收截面, 得到金属天线支架的吸收截面最小, 非金属天线支架的加载吸收截面有明显增加。

关键词: 混响室; 加载特性; 品质因数; 吸收截面; 损耗

中图分类号: O441; TM937

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220039

Research on the characteristics of lossy objects in a reverberation chamber

Jia Rui, Geng Lifei, Wang Chuanchuan, Guo Hao, Li Xinfeng

(PLA 63892, Luoyang, 471003, China)

Abstract: Aiming at the loaded effect of reverberation chamber, the lossy approaches in cavity are analyzed, and it is concluded that the loaded lossy is the only controllable approach in the testing process. Then five test scenarios are constructed to estimate the quality factor of reverberation chamber by using the time domain method. The result shows that the lossy effect caused by metal antenna supports is the least, while the non-metallic antenna supports could significantly load the reverberation chamber and reduce the quality factor of reverberation chamber. With the increase of the number of non-metallic supports, the effects would become more obviously. In addition, the average absorption cross section of the load is also investigated, taking all the lossy objects in the reverberation chamber as one lossy absorption cross section. It is shown that the absorption cross section of the metal antenna support is the smallest, and the loading absorption cross section of the non-metal support is significantly increased.

Key words: reverberation chamber, loaded effect, quality factor, absorption cross section, loss

典型的机械搅拌式混响室是在具有高反射特性的腔体内装载一个或两个机械搅拌器, 通过搅拌器的转动, 激发腔室内电磁波模数, 使得腔室工作在过模状态。近年来, 混响室被广泛用于电磁兼容测试以及无线设备的空口测试领域, 并在整车测试、生物电磁环境效应、MIMO 测试、天线性能测试等方面发挥着越来越重要的作用^[1-5]。混响室一个非常重要的特性就是其高反射特性, 用较小的输入功率就可产生较高的场强, 我们将 1 W 输入功率在混响室内产生的最大场强称为归一化场强, 相比于电波暗室开阔场等传统电磁兼容测试场地, 混响室内的归一化场强可提高几十倍, 甚至上百倍。这对于电磁兼容测试来说, 尤其是高场强测试, 这是非常好的优势。而混响室的高归一化场强, 与两个因素相关: 一是混响室的高品质因数, 二是混响室腔体损耗。由于混响室品质因数是衡量混响室腔体储能能力的重要指标, 腔体损耗最终也以品质因数的形式体现出来。因此, 对混响室内的加载效应以及损耗量的研究, 就是对品质因数的研究。

多年以来, 国内外对混响室品质因数有非常深入的研究。一些学者利用电磁仿真软件对混响室进行建模仿真, 例如, 利用时域有限差分法(FDTD)对混响室损耗效应进行建模, 得出可利用空气损耗替代混响室内壁损耗、

* 收稿日期: 2022-02-11; 修订日期: 2022-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(61801480)

联系方式: 贾 锐, jiarui315@163.com。

天线损耗、加载物损耗等,并给出空气电导率为 10^{-5} S/m^[6-9]。频域算法如边界元法(BEM)、矩量法(MoM)、快速多极子法(FMM)、多层快速多极子法(MLFMM)都可对混响室损耗进行建模仿真,但都受限于频率,无法对高频段混响室性能进行快速仿真^[10-12]。准确测量混响室品质因数是十分困难的,传统的频域测量,需要考虑发射天线、接收天线的效率,传输链路上的各种损耗,这些参数不是固定值,而是与频率、温度等因素有关,因此很难得到其精确值。而时域方法则可以避免此类问题,甚至可以不考虑各类损耗,就可以得到准确的腔室品质因数。

IEC 标准规定,混响室进行测试之前,要先进行校准,为保持一致性,所有测试过程中可能用到的测试线缆、天线支架、支撑物等必不可少的陪试设备都必须放置于混响室中,这就可能会对混响室造成加载。实际上,在实际测试过程中,这些加载损耗,会使得腔室的品质因数有非常大的变化,对测试结果的准确性也会造成影响。因此摸清陪试物体的加载效应对于混响室测试来说是非常重要且必须的。本文对混响室腔室中的损耗因素进行了分析,引入时域法求取混响室品质因数的方法,并构建了5种常见的测试场景,研究不同支架数量、材质、支撑物对混响室品质因数的影响。

1 混响室腔室损耗分析

国际电工委员会标准 IEEE61000-4-21 给出的混响室品质因数为^[13]

$$Q = \omega \frac{\bar{W}}{P_d} \quad (1)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 为角频率, \bar{W} 为混响室内储存能量, P_d 为能量损耗。

混响室的储能能力是由工作频率、腔室体积以及能量损耗共同决定的。腔室体积和工作频率很容易确定,但对于腔室能量损耗却很难确定。对于一个混响室,能量损耗主要由内壁损耗 Q_w^{-1} 、缝隙损耗 Q_l^{-1} ,发射天线损耗 Q_{Tx}^{-1} 、接收天线损耗 Q_{Rx}^{-1} 以及加载物损耗 Q_a^{-1} 等如式(2)所示,对于屏蔽效能良好的腔室来说,缝隙损耗 Q_l^{-1} 可忽略不计^[14-15]。

$$Q^{-1} = Q_w^{-1} + Q_{Tx}^{-1} + Q_{Rx}^{-1} + Q_a^{-1} + Q_l^{-1} \quad (2)$$

$$Q_w = \frac{3V}{2\mu_r S \delta_w} \frac{1}{1 + \frac{3\pi}{8k} \left(\frac{1}{w} + \frac{1}{l} + \frac{1}{h} \right)} \quad (3)$$

$$Q_{Tx} = \frac{8\pi^2 V}{m\lambda^3} \quad (4)$$

$$Q_{Rx} = \frac{16\pi^2 V}{m\lambda^3} \quad (5)$$

$$Q_a = \frac{2\pi V}{\lambda \langle S_{load} \rangle} \quad (6)$$

$$\delta_w = \sqrt{2/\omega\mu\sigma_{eff}} \quad (7)$$

式中: V 为混响室体积; μ_r 为混响室内壁材料的相对磁导率; S 为混响室内壁表面积; δ_w 为趋肤深度; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为工作频率波长; m 为天线失配系数; $\langle S_{load} \rangle$ 为加载物的平均吸收截面积; $\omega = 2\pi f$, 为角频率; $\mu = \mu_r \mu_0$ 为混响室墙壁磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m 为真空磁导率; σ_{eff} 为混响室内壁材料电导率; l, w, h 分别为混响室腔室的长、宽和高。

由式(2)可以看出,由于后向散射效应的存在,当混响室工作于过模状态时,发射天线的能量损耗是接收天线的2倍。对于匹配良好的天线, $m \approx 1$,收发天线损耗可忽略不计,内壁损耗和加载损耗占据了混响室内能量损耗的绝大部分。对于一个已建成的混响室,其内壁损耗一般为固定值,在测试过程中不会发生变化。因此,混响室加载损耗是测试过程中唯一可控的损耗路径。

2 时域法求取腔室品质因数

通常对混响室品质因数的计算是基于频域法的,即

$$Q = \frac{16\pi^2 V}{\eta_{Tx} \eta_{Rx} \lambda^3} \left\langle \frac{P_{averec}}{P_{input}} \right\rangle_N \quad (8)$$

式中: η_{Tx} 为发射天线效率, η_{Rx} 为接收天线效率, P_{averec} 为天线接收功率, P_{input} 为净输入功率, $\langle \cdot \rangle_N$ 为关于天线位置

数和方位数的平均。

频域法求腔室品质因数,会受到天线效率、线缆损耗、净输入功率等因素的影响,很难得到品质因数的精确值,甚至不同时间测得的品质因数也会有所不同。频域法计算品质因数要求有足够数量的独立搅拌位置数,这也使得整个测试过程更为繁琐和耗时。而在时域对混响室品质因数进行测量,则可避免这些不利因素,并得到准确的结果。混响室损耗可用品质因数表征,若得到混响室内能量的损耗特性,通过衰减速率得到混响室时间常数,再利用时间常数和品质因数间的对应关系,从而得到混响室品质因数^[16-19]。这是时域法求品质因数的理论基础,具体步骤为:(1)首先在频域测得发射天线/接收天线的 S_{21} 参数($S_{21}(f)$),再利用逆傅里叶变换求得时域响应($S_{21}(t)$);(2)对时域响应求平方,得到其功率时延分布PDP(时延功率谱);(3)时域PDP在混响室中呈指数衰减,而衰减速率是由混响室时间常数(τ_{RC})所决定的 $PDP(t) \sim P_0 e^{-t/\tau_{RC}}$,对PDP的衰减函数做一阶最小二乘拟合,得到其衰减速率 k ;(4)通过式(11)可得到该频率下的时间常数;(5)利用 $Q = \omega \tau_{RC}$ 可得出混响室品质因数。

$$S_{21}(t) = \text{IFT}[S_{21}(f)] \quad (9)$$

$$PDP(t) = \langle S_{21}^2(t) \rangle_N \quad (10)$$

$$\tau_{RC} = -\frac{10}{k \ln 10} \quad (11)$$

式中: t 为时间序列, P_0 为初始功率。

图1给出了多边界条件下混响室空载状态的平均时延功率谱PDP,以及最小二乘拟合出的能量衰减速率。根据拟合出的衰减速率,可得到相应频率处的混响室时间常数,即可得出混响室品质因数。由于时域法测试的理论基础是混响室内能量的损耗速度,时域法测混响室品质因数过程简单,不用像频域法测试时需要至少12个独立搅拌位置,也不需要事先对混响室进行校准,甚至不需要消除测试线缆的影响,因此测试速度会大幅度提高,但准确性并没有受到影响。图2给出了时域法和频域法求得的混响室品质因数对比,可以看出两者几乎完全重合,说明本文给出的时域法求取混响室品质因数的方法是可行的,可以用于后续的计算分析。

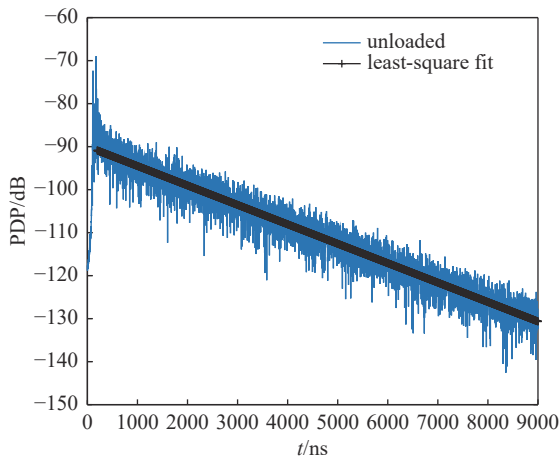


Fig. 1 Average PDP from all stirrer positions

图1 混响室多边界条件下的平均功率时延分布

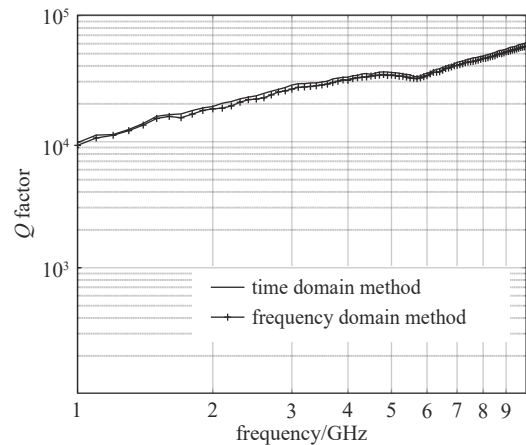


Fig. 2 Comparison of the time domain and frequency domain method

图2 时域法与频域法测试结果对比

3 实验测试混响室品质因数

构建了5种常用的测试场景,如图3所示,用以研究混响室腔体内天线支架以及测试桌的加载效应。其中金属天线支架的材质为钢制,高度为1.5 m;非金属天线支架的材质为热固性塑料,具有耐高温和耐腐蚀的优点,而且还有着很好的物理机械性能与稳定性,高度有2.3 m,1.8 m和0.5 m三种;桌子为榆木材质,高度为1 m,宽度为0.9 m,长度为1.5 m。所有试验均在温度为25℃,湿度为30%的条件下进行。场景一是空载混响室,即混响室腔室内除了收发天线之外,没有任何加载物;场景二是利用两个金属天线支架将收发天线架高;场景三是利用两个非金属天线支架,一个是2.3 m,一个是1.8 m;场景四是添加了两个可用于其他频段测试的非金属天线支架,均为0.5 m,共计4个非金属天线支架;场景五是木制测试桌放置于混响室测试区域中。五个测试场景中,收发天线在混响室内水平位置上保持不变,仅在垂直位置上,由于天线支架的存在而发生变化,事实上由于混响室的统计特性,天线

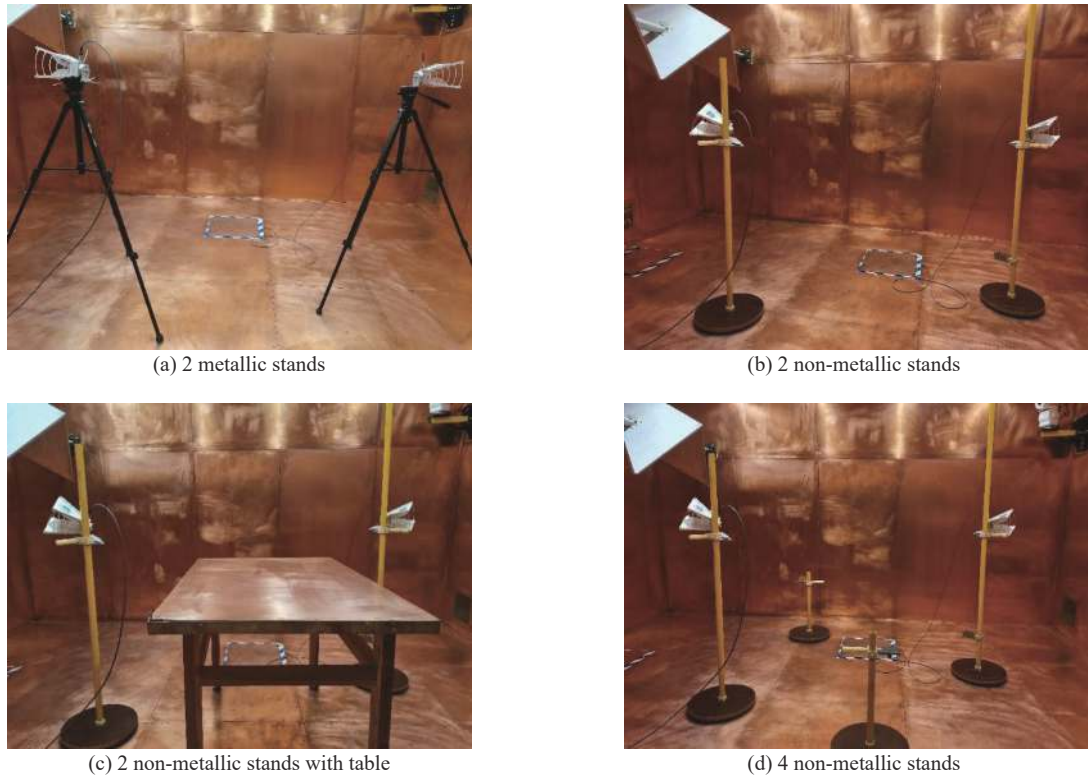


Fig. 3 Four test scenarios in a reverberation chamber

图 3 四种混响室加载测试场景

放置于混响室的任意位置,其测试结果将保持一致。测试过程中发射天线和接收天线是完全一致的双脊喇叭天线,测试频率为1~10 GHz,利用矢量网络分析仪采集该频段范围内的 S 参数,为保证时域数据的准确性,矢量网络分析仪的采样数为100001。

图4给出了5种测试场景下的腔室品质因数的实测数据。由图4可以看出,无论哪种测试场景,混响室品质因数随着频率的增加而增加。混响室空载时,其内部损耗最小,品质因数也最大;采用金属天线支架时,其加载效应也比较小,与空载时的品质因数非常接近。采用两个非金属支架时,就可以看到品质因数有较大幅度地下降,这说明非金属支架的加载效应要大于金属天线支架。事实上,当采用金属天线支架时,金属支架可看作为混响室复杂边界条件的一部分,对电磁能量的反射部分大于损耗部分,而非金属天线支架对电磁能量的反射部分会非常小,损耗占据了绝大部分,这就造成了该场景下的品质因数损失。试验还给出了4个非金属天线支架以及加上测试桌的测试场景,图4也出了这两个测试场景的测试结果,可以清楚地看出,4个非金属支架造成品质因数持续下降,而加上测试桌后,品质因数相对于空载,下降了将近1个数量级,这是非常大的性能下降。图5给出了4种加载测试场景相对于空载状态下的损耗量,可以非常清楚地看出,测试非金属支架加上测试桌的损耗量最大,而金属支架

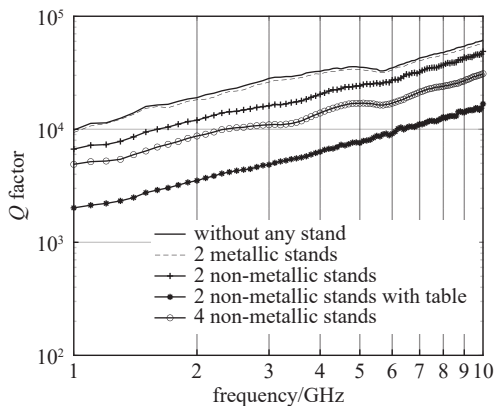


Fig. 4 Measured value of Q factor from 5 test scenarios

图 4 不同场景下的混响室品质因数实测数据

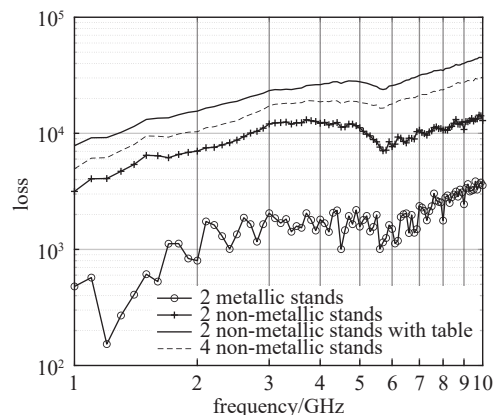


Fig. 5 Loss of load in 5 test scenarios

图 5 不同加载物损耗量

的损耗量最小,两者相差将近一个数量级。这说明不同加载物的加载效应有明显不同,在混响室内进行相关电磁兼容试验时,由于要保持加载一致性,所有可能用到的陪试设备和天线都需要放置于混响室内,天线支架应选择金属支架,测试桌也应避免采用厚重的木质结构,这些都会对混响室造成严重加载,使混响室性能降级从而达不到设计要求。

4 加载物吸收截面

加载物吸收截面(S_{load})是表征加载物的重要参数之一,吸收截面越大,则说明加载效应越强,对混响室性能影响越大。实际测试过程中,应尽量减小混响室腔体内加载物的吸收截面,以提高混响室的品质因数,从而获得较高的测试场强。可以将混响室腔体内所有加载物等效为一个损耗吸收截面,由式(12)给出

$$\langle S_{load} \rangle_{all} = \frac{2\pi V}{\lambda Q} \quad (12)$$

式中: Q 为该工作频率下的品质因数。

图6给出了5种测试场景下的吸收截面对比曲线,由图可以看出5种不同测试场景下的吸收截面相差是比较大的,且都随着频率的增加有变大的趋势。其中空载状态和场景一的两个金属天线支架差值较小,这说明金属支架的吸收截面较小,对混响室性能的影响也较小;而非金属支架的加载物吸收截面都有明显的增加,值得注意的是四个天线支架的吸收截面有较为明显的起伏,这说明混响室内加载物吸收截面的增加并不是线性的,这就需要在实际测试之前要消除加载物的加载效应,避免对混响室性能产生较大影响。

5 结 论

本文针对混响室内不同天线支架以及测试桌,对其加载效应进行了研究。构建了5种常见的测试场景,分别对各测试场景下的品质因数、损耗量、加载物吸收截面进行实际测试并对测试结果进行分析。结果表明:无论哪种加载形式,混响室品质因数随着频率的增加而增加,且金属天线支架的加载效应明显小于非金属支架的加载效应。非金属天线支架的加载效应随着支架数量的增加而增加,木制测试桌的加载效应远大于天线支架。需要注意的是,本文使用的天线是双脊喇叭天线,该天线尺寸较大,天线支架的存在不会明显影响收发天线的性能。但如果采用小型超宽带偶极子天线,由于天线尺寸较小,金属支架的存在可能会明显影响天线性能,这种情景下的测试结果是否与本文结论相符,还需要进一步深入研究。

参考文献:

- [1] Migliaccio M, Gradoni G, Arnaut L R. Electromagnetic reverberation: the legacy of Paolo Corona[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, 58(3): 643-652.
- [2] Tian Zhihao, Huang Yi, Shen Yaochun, et al. Efficient and accurate measurement of absorption cross section of a lossy object in reverberation chamber using two one-antenna methods[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, 58(3): 686-693.
- [3] Xu Qian, Huang Yi, Xing Lei, et al. B-scan in a reverberation chamber[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(5): 1740-1750.
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] Kim J S, Mitra R. Performance evaluation of a mode-stirred reverberation chamber using the finite difference time domain (FDTD) simulation[C]//*Proceedings of 2021 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2012: 173-176.
- [7] Harima K, Yamanaka Y. FDTD analysis on the effect of stirrers in a reverberation chamber[C]//*Proceedings of 1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 1999: 260-263.
- [8] Primiani V M, Moglie F. Reverberation chamber performance varying the position of the stirrer rotation axis[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic*

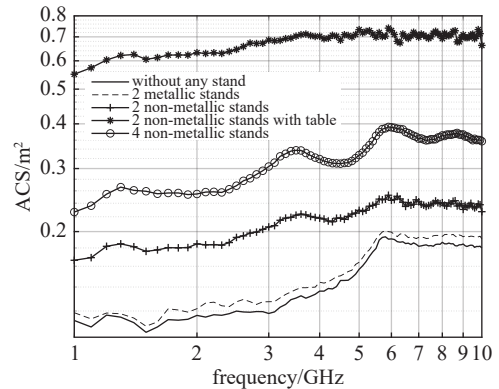


Fig. 6 Absorption cross sections (ACS) of load in 5 scenarios

图6 不同测试场景的加载物吸收截面

- [Compatibility](#), 2014, 56(2): 486-489.
- [9] Bastianelli L, Primiani V M, Moglie F. Stirrer efficiency as a function of its axis orientation[J]. [IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility](#), 2015, 57(6): 1732-1735.
- [10] Moglie F, Bastianelli L, Primiani V M. Reliable finite-difference time-domain simulations of reverberation chambers by using equivalent volumetric losses[J]. [IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility](#), 2016, 58(3): 653-660.
- [11] Carlberg U, Kildal P S, Carlsson J. Numerical study of position stirring and frequency stirring in a loaded reverberation chamber[J]. [IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility](#), 2009, 51(1): 12-17.
- [12] Zhao Huapeng, Shen Zhongxiang. Fast wideband analysis of reverberation chambers using hybrid discrete singular convolution-method of moments and adaptive frequency sampling[J] [IEEE Transactions on Magnetics](#), 2015, 51: 7206804.
- [13] IEC 61000-4-21, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-21: testing and measurement techniques—reverberation chamber test methods[S].
- [14] Xu Qian, Huang Yi, Xing Lei, et al. Average absorption coefficient measurement of arbitrarily shaped electrically large objects in a reverberation chamber[J]. [IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility](#), 2016, 58(6): 1776-1779.
- [15] Carlberg U, Kildal P S, Wolfgang A, et al. Calculated and measured absorption cross sections of lossy objects in reverberation chamber[J]. [IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility](#), 2004, 46(2): 146-154.
- [16] Xu Qian, Huang Yi, Xing Lei, et al. Extract the decay constant of a reverberation chamber without satisfying Nyquist criterion[J]. [IEEE Microwave and Wireless Components Letters](#), 2016, 26(3): 153-155.
- [17] Cui Y, Wei G, Wang S, et al. Fast calculation of reverberation chamber Q -factor[J]. [Electronics Letters](#), 2012, 48(18): 1116-1117.
- [18] Wang Song, Wu Zhancheng, Wei Guanghui, et al. A new method of evaluating reverberation chamber Q -factor with experimental validation[J]. [Progress in Electromagnetics Research Letters](#), 2013, 36: 103-112.
- [19] Clegg J, Marvin A C, Dawson J F, et al. Optimization of stirrer designs in a reverberation chamber[J]. [IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility](#), 2005, 47(4): 824-832.