

输入功率对电磁混响室特征参数影响的实验研究



张昊民, 郭晓涛, 刘科, 刘天鑫

中国计量科学研究院, 北京 100029

【摘要】 电磁混响室的校准通常是在较低输入功率下面向场均匀性和归一化场强等特征参数进行,但在电磁兼容抗扰度测试等实际应用中,实际工作在较高输入功率条件下,目前相关国际和国内标准中对此差异是予以忽略的,没有给出具体理论或实验证明。设计并开展了具体的实验研究,确认了输入功率对电磁混响室特征参数的影响程度。其中,低输入功率下的校准采用基于三维光电场探头的快速校准技术方案,高输入功率下的参数测量与汽车零部件抗扰度测试的实际工作状态保持一致。实验结果表明,不同输入功率对场均匀性这一特征参数的影响基本在 ± 0.5 dB 以内,对归一化场强的影响在 2 dB 以内。进一步的,基于对实验结果的分析,给出了相应的电磁混响室校准和测试过程中对场均匀性和归一化场强标定的建议。

【关键词】 计量学;电磁混响室;场均匀性;归一化输入功率;抗扰度测试

【中图分类号】 TB973

【文献标识码】 A

【文章编号】 2096-9015(2024)08-0051-07

DOI: 10.12338/j.issn.2096-9015.2024.0063

【引用本文】 张昊民,郭晓涛,刘科,等.输入功率对电磁混响室特征参数影响的实验研究[J].计量科学与技术,2024,68(8):51-57.

Experimental Study on the Influence of Input Power on Characteristic Parameters of Electromagnetic Reverberation Chambers

ZHANG Haomin, GUO Xiaotao, LIU Ke, LIU Tianxin

National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

【Abstract】 Electromagnetic reverberation chambers are typically calibrated for characteristic parameters such as field uniformity and normalized field strength under low input power conditions. However, in practical applications like electromagnetic compatibility immunity testing, these chambers operate under high input power conditions. Currently, relevant international and domestic standards ignore this difference, providing no specific theoretical or experimental evidence. This paper presents a designed experimental study to investigate the influence of input power on the characteristic parameters of electromagnetic reverberation chambers. A rapid calibration technique using 3D photoelectric field probes was employed for low input power calibration, while high input power parameter measurements were conducted under conditions consistent with actual automotive component immunity tests. Results show that the impact of different input power levels on field uniformity is generally within ± 0.5 dB, and the effect on normalized field strength is within 2 dB. Based on these findings, recommendations are provided for calibrating field uniformity and normalized field strength during electromagnetic reverberation chamber calibration and testing processes.

【Key words】 metrology, electromagnetic reverberation chamber, field uniformity, normalized input power, immunity test

0 引言

近年来,特别是在汽车、通信、医疗等领域,电磁混响室被广泛用于电磁兼容抗扰度测试和空口性能(OTA, Over the air)测试^[1-8]。

电磁混响室由一个高导电性和电屏蔽的金属腔结构、调谐器/搅拌器、发射和接收天线等基础设备组成。电磁混响室内的电磁环境是通过不同的搅拌技术而变化的,例如调谐器的运动(模式调谐或模式搅拌)、频率搅拌、使用的天线或被测设备(EUT)

收稿日期:2024-02-29;修回日期:2024-05-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF0604805)。

作者简介:张昊民(1997-),中国计量科学研究院在读研究生,研究方向:毫米波传感器计量,邮箱:zhanghaomin@nim.ac.cn。

的方向、极化或位置的变化。采用上述搅拌技术中的一种或组合来改变电磁混响室内部的模态结构,从而在电磁混响室内部产生统计上均匀、各向同性和均匀的空间电磁场。

相较于暗室,电磁混响室具有以较小输入功率产生高场强、测试时间短、测试量大等综合优势^[9-15]。作为相关测试系统的一部分,其场均匀性和归一化场强等特征参数直接影响测试结果的准确可靠^[16-18],因此需要对其特征参数进行校准,并在实际测试过程中按照校准结果开展实际测试。

为了校准的稳定和可靠,电磁混响室的校准通常是在较低输入功率(0~10 dBm)下开展的;但电磁混响室在电磁兼容抗扰度实际测试过程中,通常工作在较高输入功率(>50 dBm)的状态下^[19-26]。目前,相关国际国内标准没有考虑这一差异对其场均匀性和归一化场强等特征参数的影响,且没有给出具体理论或实验证明^[25-28]。为进一步明确该差异的影响程度,本文设计开展了对比实验,以从实验研究的角度为电磁混响室的校准和应用提供参考。

1 实验方案

本文开展了两组比对实验,分别使电磁混响室处于低输入功率和高输入功率的状态。两组实验均

对电磁混响室的场均匀性和归一化场强进行了测试。进而通过比对两组实验中场均匀性和归一化输入功率的差异,确定不同输入功率条件下电磁混响室特征参数的影响。

实验方案的测试频段均为 200~1000 MHz。被测混响室的内腔体尺寸为 6.43 m(长)×5.09 m(宽)×5.57 m(高),工作区尺寸为 2.5 m(长)×1.5 m(宽)×3.0 m(高),如图 1 所示。



图 1 电磁混响室装置图
Fig.1 Diagram of electromagnetic reverberation chamber setup

1.1 低输入功率条件下的测试

低输入功率条件下的测试方案如图 2 所示,整体上与电磁混响室校准保持一致。

实验中主要使用仪器设备的基本情况如表 1 所示。

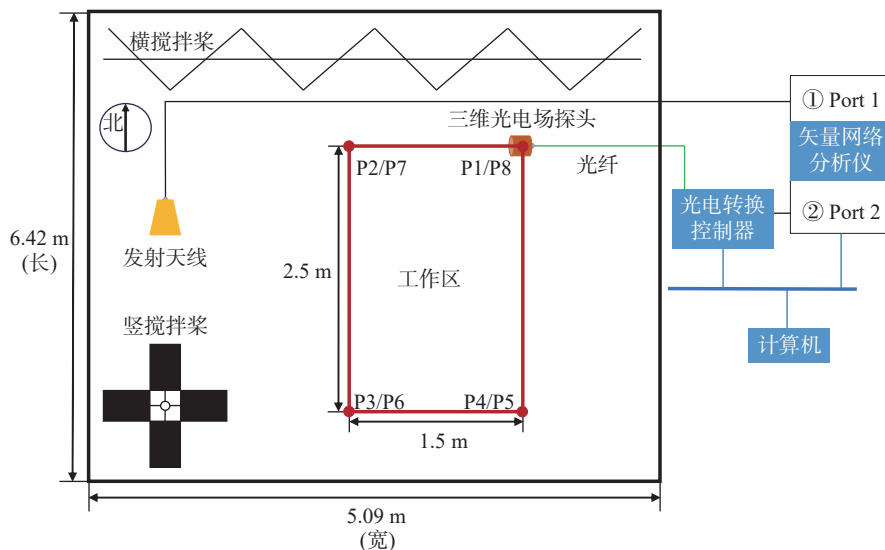


图 2 低输入功率电磁混响室连接示意图
Fig.2 Schematic diagram of low input power electromagnetic reverberation chamber connection

该测试中,激励信号由矢量网络分析仪发射端口(内置 10 dBm 激励源)接入到发射天线。在电磁混响室腔体内,实验采用三维光电场探头在不同工作区

位置 and 不同方向上接收电场信号,并输出给矢量网络分析仪的接收端。整个测试过程由专门编写的测试软件程控搅拌浆控制器、矢量网络分析仪等完成。

表 1 低输入功率条件下的测试主要设备及附件
Tab.1 Main testing equipment and accessories for low input power conditions

设备名称	型号	主要参数
矢量网络分析仪	ZVA24	频段: 200 MHz ~ 18 GHz
发射天线	HL223	频段: 200 MHz ~ 1.3 GHz
光电转换控制器	OEFS-C5-A10	频段: 0.1 MHz ~ 10 GHz
三维光电场探头	SH-10EX	频段: 0.1 MHz ~ 10 GHz

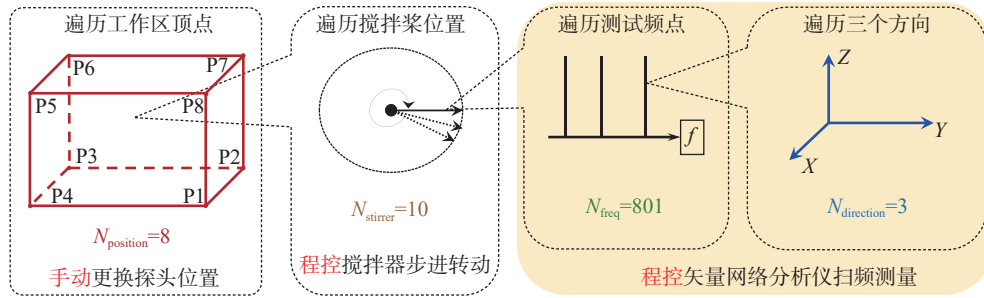


图 3 低输入功率混响室场均匀性确认遍历关系示意图

Fig.3 Schematic diagram of traversal relationship for confirming field uniformity in low input power reverberation chamber

低输入功率的电磁混响室的场均匀性按照式(1)进行计算。

$$FU(\text{dB}) = 20\log_{10}\left(\frac{\bar{E} + s}{\bar{E}}\right) \quad (1)$$

式中, \bar{E} 为电磁混响室经归一化后的场强线性值中, 各频点 24 个位置最大场强的平均值, 由式(2)计算得到, 单位为 V/m。

$$\bar{E} = \frac{\sum_i^3 \sum_j^8 \vec{E}_{ij}}{24} \quad (2)$$

s 为经归一化后的场强线性值中, 各频点 24 个位置最大场强的标准差, 由式(3)计算得到, 单位为 V/m。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i^3 \sum_j^8 (\vec{E}_{ij} - \bar{E})^2}{24 - 1}} \quad (3)$$

式中, \vec{E}_{ij} 为经归一化后的场强线性值中, 搅拌桨所有步进位置下的各频点 24 个位置最大场强, 由式(4)计算得到, 单位为 V/m。

$$\vec{E}_{ij} = \max_k (\vec{E}_{i,j,k}) \quad (4)$$

式中, $\vec{E}_{i,j,k}$ 为电磁混响室的归一化输入功率, 按照式(5)进行计算。

测试过程中需要逐层进行工作区顶点位置、搅拌器步进转动位置、测试频点和测试场强等 4 层遍历测试。为有效提升测试效率, 实际采用的遍历关系如图 3 所示。其中, 第三层频率的遍历由矢量网络分析仪自带的频率扫描功能完成, 因此测试速度较快、测试频点较多。实际完成的测试频点数为 1201。

$$\vec{E}_{i,j,k} = S_{21,i,j,k} + AF + CH_i \quad (5)$$

式中, i 表示各个场强分量, 即 X 、 Y 、 Z 三个正交轴方向; j 表示场强探头放置的位置, 对应工作空间的 8 个顶点; k 表示搅拌桨的各个步进位置; $S_{21,i,j,k}$ 为矢量网络分析仪测量的 S_{21} 参数, 单位为 dBm; AF 为场强探头的天线系数, 可以查询厂家的数据, 也可以通过校准得到, 单位 dB/m; CH_i 为场强探头控制器通道的修正系数, 三个通道分别对应场强探头的 X 、 Y 、 Z 三个正交轴, 单位 dB。

该组测试中, 由于矢量网络分析仪的内置激励源为 10 dBm, 相应的线缆、射频转接头和天线效率的损耗不超过 10 dB, 因此实际输入到电磁混响室内的输入功率在 0 ~ 10 dBm 之间, 对应较小输入功率条件下电磁混响室特征参数测量。

1.2 高输入功率条件下的测试

高输入功率条件下的测试如图 4 所示, 整体上与电磁混响室抗扰度实际测试保持一致。

主要设备和附件的基本情况如表 2 所示。

该测试中, 信号源输出激励信号, 通过功率放大器放大输出, 经过定向耦合器后通过穿墙线缆馈给混响室内的发射天线, 电磁混响室的前向输入功率如图 5 所示。

同时, 定向耦合器的前耦合端接入功率计, 以监测功率放大器的输出功率。采用三维光电场探头在

不同工作区位置 and 不同方向上接收电场信号, 并输出给频谱仪。整个测试过程由专门编写的测试软件

程控混响室搅拌桨、矢量网络分析仪以及光电转换控制器等完成。

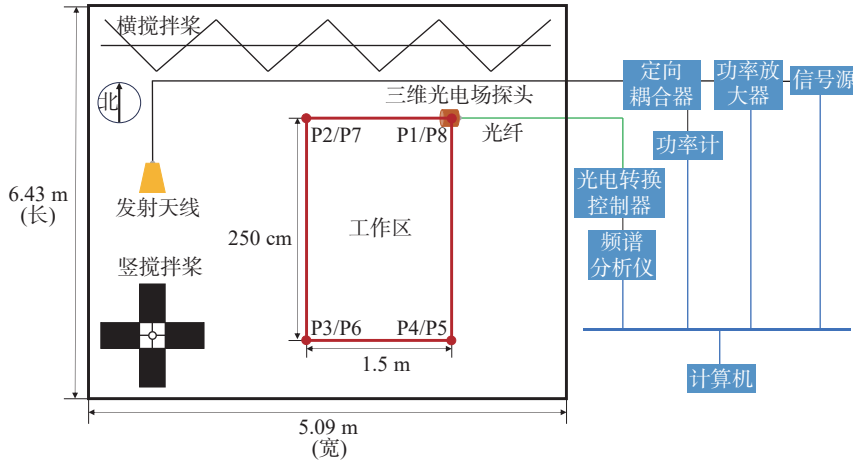


图 4 高输入功率电磁混响室连接示意图

Fig.4 Schematic diagram of high input power electromagnetic reverberation chamber connection

表 2 高输入功率主要设备及附件

Tab.2 Main equipment and accessories for high input power conditions

设备名称	型号	主要参数
信号源	E8257C	频段: 250 KHz ~ 40 GHz
频谱仪	FSW	频段: 200 MHz ~ 13.6 GHz
发射天线	HL223	频段: 200 MHz ~ 1.3 GHz
光电转换控制器	OEFS-C5-A10	频段: 0.1 MHz ~ 10 GHz
三维光电场探头	SH-10EX	频段: 0.1 MHz ~ 10 GHz
功率计	E4412A	频段: 10 MHz ~ 18 GHz
定向耦合器	C8998-10	频段: 100 MHz ~ 3 GHz
功率放大器	NPWPA-00810200	频段: 80 MHz ~ 1 GHz

拌器步进转动位置、测试频点和测试场强等 4 层遍历测试。为有效提升测试效率, 实际采用的遍历关系如图 6 所示。其中, 第三层频率的遍历由自动化测试软件程控信号源和场强探头配合进行扫描完成, 因此测试速度相对较慢, 相应的测试频点数相对较少。实际完成的测试频点数也与电磁混响室在汽车领域进行抗扰度测试实际应用的频点数保持一致, 为 601 个[27-28]。

高输入功率的电磁混响室的场均匀性同样通过式(1)进行计算。不同的是, 其中的场强测量结果是由三维光电场探头接收电场信号、使用频谱仪进行场强读数得到。其中高输入功率的电磁混响室的归一化场强按照式(6)进行计算。

$$\vec{E}_{i,j,k} = \frac{E_{i,j,k}}{\sqrt{P_{i,j,k}}} \quad (6)$$

式中, $E_{i,j,k}$ 为三维光电场探头的测量结果, 单位为 V/m, 其中, i 表示各个场强分量, 即 X、Y、Z 三个正交轴方向, j 表示场强探头放置的位置, 对应工作空间的 8 个顶点, k 表示搅拌桨的各个步进位置; $P_{i,j,k}$ 为功率计测量的监视功率值, 单位为 W。

2 实验结果分析

2.1 场均匀性对比

经过计算后的场均匀性数值处理如图 7~图 9 所示, 高输入功率与低输入功率的电磁混响室场

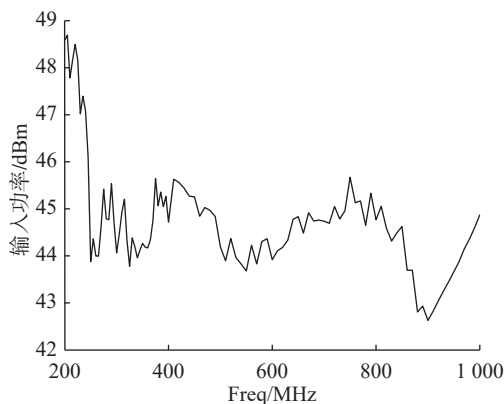


图 5 高输入功率时监测输入功率值

Fig.5 Monitoring input power value at high input power

测试过程中需要逐层进行工作区顶点位置、搅

均匀性均低于国际标准要求的电磁混响室场均匀性限值,且不同输入功率之间的场均匀性差值在

± 0.5 dB 以内。考虑到整个测量系统本身具有的不确定度^[29-37],该差异可以忽略不计。

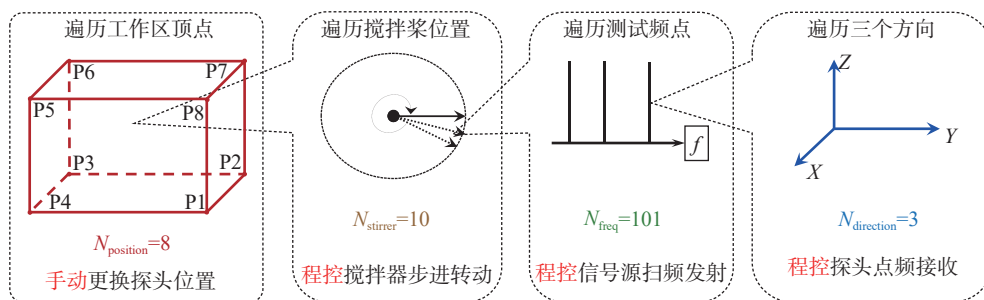


图 6 高输入功率电磁混响室场均匀性确认遍历关系示意图

Fig.6 Schematic diagram of traversal relationship for confirming field uniformity in high input power electromagnetic reverberation chamber

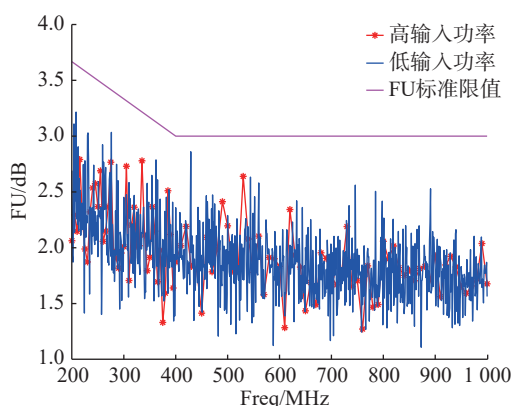


图 7 低输入功率和高输入功率场均匀性测量结果对比
Fig.7 Comparison of field uniformity measurement results between low and high input power

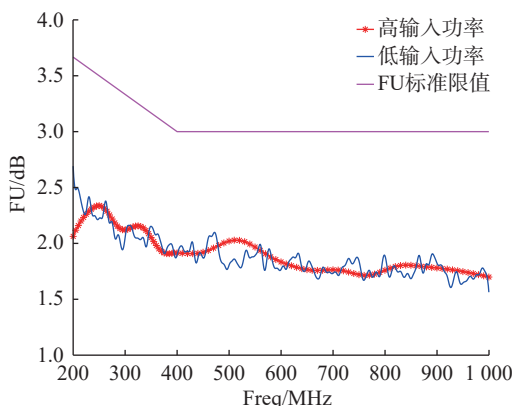


图 8 低输入功率和高输入功率场均匀性测量结果平滑后对比
Fig.8 Comparison of smoothed field uniformity measurement results between low and high input power

2.2 归一化场强对比

通过式(2)得到低输入功率时的归一化到输入功率为 0 dBm 时产生的干扰场强,通过式(6)得到

高输入功率时的归一化到输入功率为 0 dBm 时产生的干扰场强,比对结果如图 10~图 12 所示。结果表明低输入功率与高输入功率在归一化到输入功率为 0 dBm 时产生干扰场强测量结果差值在 2 dB 以内,且在大部分频点处差值在 1 dB 以内。在各类国际国内标准中,电磁混响室场均匀性要求要求的限值都不低于 3 dB^[25],因此整体上,目前实验所显示的差异都基本在可接受的范围内。

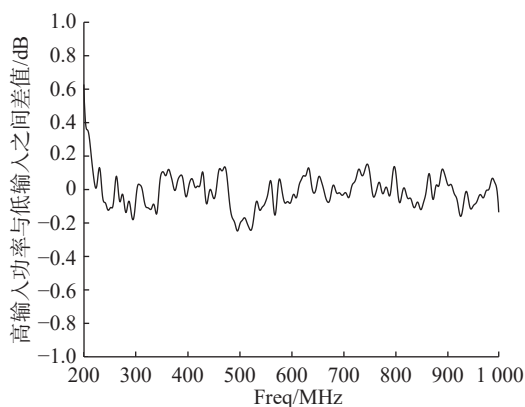


图 9 低输入功率和高输入功率场均匀性的差异
Fig.9 Difference in field uniformity between low and high input power

更进一步的,图 11 所示差异呈现主要为正偏差,因此如果更进一步的需要在 1dB 量级不确定度的应用(如与 OTA 测试结合)时,对归一化场强的差异有可能不能忽略且主要体现为正偏差。此时,如果归一化输入场强的校准数值由低输入功率下的测试得到,则在高输入功率条件下应用时,应通过更进一步的实验明确相应的修正值并按照修正值适当提高输入功率。

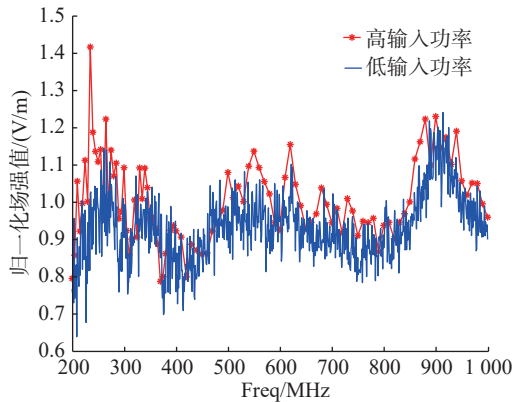


图 10 归一化到输入功率为 0 dBm 时产生干扰场强的测量结果对比

Fig.10 Comparison of interference field strength measurement results normalized to 0 dBm input power

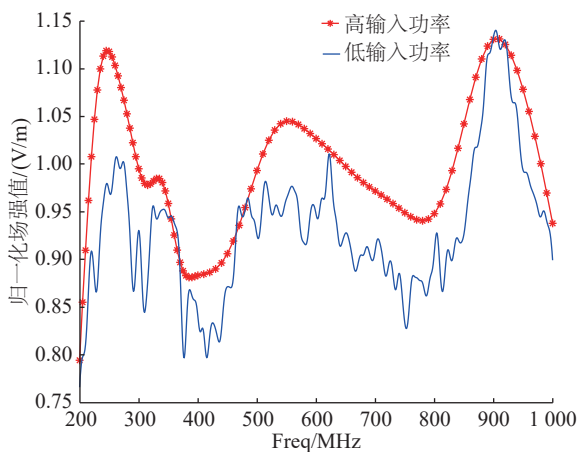


图 11 归一化到输入功率为 0dBm 时产生干扰场强的测量结果曲线平滑对比

Fig.11 Smoothed comparison of interference field strength measurement results normalized to 0 dBm input power

3 结论

本文设计并开展了低输入功率下和高输入功率下电磁混响室特征参数比对测试的实验。实验结果表明,低输入功率下和高输入功率下,电磁混响室的场均匀性测试结果的差异在±0.5 dB 以内,归一化场强的差异在 2 dB 以内。考虑到测试系统本身的不确定度水平和实际应用的准确程度要求,当电磁混响室应用于电磁兼容抗扰度测试时,不同输入功率对两项特征参数的影响可以忽略不计。因此,可以在低输入功率下进行电磁混响室特征参数的校准,并按照线性关系将相关校准结果直接用于实际测试过程中。

但是,需要注意的是,输入功率对场均匀性的影

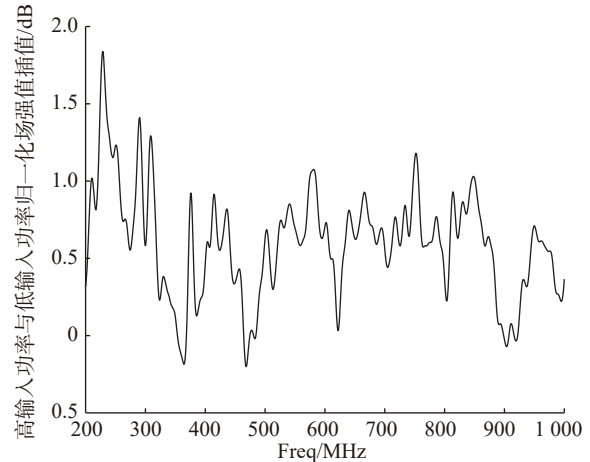


图 12 归一化到输入功率为 0 dBm 时产生干扰场强测量结果的差异

Fig.12 Differences in interference field strength measurement results normalized to 0 dBm input power

响呈现有正有负的特征且相对较小(0.5 dB),主要表现为测量系统不确定度的影响;但对归一化场强的影响主要呈现为正的征且相对较大(1~2 dB),说明不仅仅包含测量系统不确定度的影响,可能还存在一定的固有偏差。因此,当电磁混响室更进一步的用于 OTA 测试等对准确程度要求更高的应用时^[1-8],需特别注意输入功率对归一化场强这一特征参数的影响,不能直接采用低输入功率条件下的校准结果,需要通过独立的实验进一步确认具体的修正参数。

参考文献

- [1] Chen X, Tang J, Li T, *et al.* Reverberation Chambers for Over-the-Air Tests: An Overview of Two Decades of Research[J]. IEEE Access, 2018, 6: 49129-49143.
- [2] Stek T, Hubrechsen A, Prinsloo D S, *et al.* Over-the-Air Noise Figure Characterization of mm-Wave Active Integrated Antennas Using a Reverberation Chamber[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(3): 1093-1101.
- [3] Remley K A, Pirkel R J, Wang C M, *et al.* Estimating and Correcting the Device-Under-Test Transfer Function in Loaded Reverberation Chambers for Over-the-Air Tests[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(6): 1724-1734.
- [4] Qi W J, Fang F, Xia W J, *et al.* A Compact Multi-Probe Reverberation Chamber for Over-the-Air Testing[J]. APPLIED COMPUTATIONAL ELECTROMAGNETICS SOCIETY JOURNAL, 2021, 36(9): 1196-1201.
- [5] Micheli D, Barazzetta M, Diamanti R, *et al.* Over-the-Air Tests of High-Speed Moving LTE Users in a Reverberation Chamber[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(5): 4340-4349.

- [6] Li J, Qi Y H, Fan J. Over-the-air measurement for MIMO systems[J]. *FRONTIERS OF INFORMATION TECHNOLOGY & ELECTRONIC ENGINEERING*, 2021, 22(8): 1046-1058.
- [7] Horansky R D, Remley K A. Flexibility in over-the-air testing of receiver sensitivity with reverberation chambers[J]. *IET MICROWAVES ANTENNAS & PROPAGATION*, 2019, 13(15): 2590-2597.
- [8] Arnold M D, Jensen M A, Mehmood R. A Reconfigurable Over-the-Air Chamber for Testing Multi-Antenna Wireless Devices[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(6): 5289-5298.
- [9] 李春雷, 邓波, 高斌, 等. 混响室的仿真与优化 [J]. *安全与电磁兼容*, 2004(6): 33-35.
- [10] 崔耀中, 魏光辉, 范丽思, 等. 混响室发射天线指向对场均匀性影响研究 [J]. *微波学报*, 2011, 27(6): 42-46.
- [11] D A Hill. Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers[J]. *IEEE Trans*, 1998, 40(3): 209-217.
- [12] P Corona, G Ferrara, M Migliaccio. Reverberating chamber electromagnetic field in presence of an unstirred component[J]. *IEEE Trans*, 2000, 42(2): 111-115.
- [13] P Corona, G Ferrara, M Migliaccio. Reverberating chambers as sources of stochastic electromagnetic fields[J]. *IEEE Trans*, 1996, 38(3): 348-356.
- [14] P. Corona, G. Ferrara, M. Migliaccio. A spectral approach for the determination of the reverberating chamber quality factor[J]. *IEEE Trans*, 1998, 40(2): 145-153.
- [15] P. Corona, J. Ladbury, G. Latmiral. Reverberation-chamber research-then and now: a review of early work and comparison with current understanding[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2002, 44: 87-94.
- [16] Yousaf J, Nah W, Hussein M I, *et al.* Characterization of Reverberation Chamber-A Comprehensive Review[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 226591-226608.
- [17] 邢昊, 何梓滨, 吴梦娟, 等. 电场场强校准技术的研究进展 [J]. *计量科学与技术*, 2023, 67(3): 20-28.
- [18] 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.
- [19] Q Xu, K Chen, X Shen. Comparison of the Normalized Maximum Field Strength Using E-Field Probe and VNA Methods in a Reverberation Chamber[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(10): 2135-2139.
- [20] X. Guo, Z. He, Y. Zhang. Investigation of field uniformity validation in reverberation chamber using VNA [C]. 2015 7th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics.
- [21] Chen X. On Statistics of the Measured Antenna Efficiency in a Reverberation Chamber[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(11): 5417-5424.
- [22] Chen X. On Near-Field and Far-Field Correlations in Reverberation Chambers[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2019, 29(1): 74-76.
- [23] Gifuni A, Bastianelli L, Moglie F, *et al.* Base-Case Model for Measurement Uncertainty in a Reverberation Chamber Including Frequency Stirring[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, 60(6): 1695-1703.
- [24] Lefterink F. Fast, Broadband, and High-Dynamic Range 3-D Field Strength Probe[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(6): 1015-1021.
- [25] 杭晨哲, 徐定华, 原遵东. 实验室比对数据处理中卡方统计量研究 [J]. *计量科学与技术*, 2021, 65(5): 108-114.
- [26] 苏腾, 郭敏, 刘贵斌, 等. 信号源端口电压驻波比测量方法研究 [J]. *计量科学与技术*, 2022, 66(7): 33-37.
- [27] International Electrotechnical Commission. Electromagnetic Compatibility (EMC)—Part 4-21: Testing and Measurement Techniques—Reverberation Chamber Test Methods: IEC 61000-4-21[S]. EMC, 2011.
- [28] The International Organization for Standardization. Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy—Part 1: General principles and terminology: ISO 11451-1[S]. ISO, 2015.
- [29] The International Organization for Standardization. Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy—Part 1: General principles and terminology: ISO 11452-1[S]. ISO, 2005.
- [30] CTIA Certification. Test Plan for Wireless Device Over-the-Air Performance—Method of Measurement for Radiated RF Power and Receiver Performance, Large-Form-Factor Integrated Device Addendum[Z]. CTIA, 2020.
- [31] 周鑫, 唐维, 张妍, 等. 网络线缆分析仪功率损耗校准标准器的研究 [J]. *计量科学与技术*, 2022, 66(9): 33-39.
- [32] Adardour A, Andrieu G, Reineix A. On the Low-Frequency Optimization of Reverberation Chambers[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, 56(2): 266-275.
- [33] Monsef F, Cozza A. A Possible Minimum Relevance Requirement for a Statistical Approach in a Reverberation Chamber[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, 57(6): 1728-1731.
- [34] Remley K A, Pirkel R J, Shah H A, *et al.* Uncertainty From Choice of Mode-Stirring Technique in Reverberation-Chamber Measurements[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(6): 1022-1030.
- [35] Senic D, Remley K A, Wang C M J, *et al.* Estimating and Reducing Uncertainty in Reverberation-Chamber Characterization at Millimeter-Wave Frequencies[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(7): 3130-3140.
- [36] Xu Q, Xing L, Zhao Y, *et al.* A General Method to Calculate the Source-Stirred Correlations in a Well-Stirred Reverberation Chamber[J]. *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, 2020, 2(4): 169-173.
- [37] 陈钧, 曾博, 邓俊泳, 等. 样品长期稳定性等引入的不确定度对电磁兼容能力验证计划结果评价影响的探讨 [J]. *计量科学与技术*, 2022, 66(11): 64-67.