



·高功率微波技术·综述·

电磁混响室搅拌方式研究综述^{*}

赵翔，茹梦圆，闫丽萍，刘长军

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

摘要：电磁混响室是进行有限空间内电磁兼容、电磁效应测试以及无线信道模拟的重要设备。搅拌方式是混响室的核心内容。主要从改变混响室边界条件和激励源配置的角度, 对国内外混响室搅拌方式的研究历史和现状进行分类介绍, 列举了一些具有代表性的实现方案, 总结了各种方式的特点, 介绍了混合搅拌方式的研究进展。

关键词：混响室; 边界条件; 激励源; 搅拌器; 搅拌方式

中图分类号: TM152

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.200079

A review of research on stirring methods of electromagnetic reverberation chamber

Zhao Xiang, Ru Mengyuan, Yan Liping, Liu Changjun

(School of Electronic Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: This paper presents a review summary of the current state-of-the-art stirring in reverberation chamber (RC). An RC is an important device for conducting electromagnetic compatibility, electromagnetic effect testing and wireless channel simulation in a limited space. The stirring technique is the soul of a RC. The focus is introducing the research history and current situation of the stirring techniques at home and abroad from two perspectives, i.e. changing the boundary conditions and the configuration of the excitation source in an RC. In particular, some representative implementation schemes are discussed, and the characteristics of various methods are summarized. Finally, the research progress of mixed stirring techniques is also introduced.

Key words: reverberation chamber; boundary conditions; excitation source; stirrer; stirring technique

混响室是一个电大多模、高 Q 值的金属腔体, 由金属外壳和搅拌装置组成。各种搅拌装置的存在使得混响室的电磁环境不断发生变化, 从而产生随机变化的电磁环境。最早关于电磁混响室的研究能够追溯到 1976 年, Corona 在意大利那不勒斯海军研究学院进行的第一个混响室实验^[1]。相比于开阔场地、TEM 室、电波暗室等其他电磁兼容测试设备, 混响室可以提供良好屏蔽的、便宜的、简单快速和彻底的测量, 这使得混响室成为目前电磁兼容领域最热门的课题之一。根据统计, 截止 2019 年 10 月, IEEE 上已有 1 831 篇电磁混响室相关的文献, 中国知网上也有 225 篇相关中文文献。随着学术领域对混响室研究的深入, 混响室也逐渐被纳入了各项工业标准^[2-7]。相应地, 诸多混响室工业产品也逐渐被推出。目前在工业界, 瑞典的 Bluetest 公司、美国 Comtest Engineering 公司、ETS-Lindgren 公司等都推出了用于各种测试的多种型号混响室。

混响室本质上是一个谐振腔, 各种搅拌方式的存在使其场型结构不断发生变化, 从而赋予了混响室进行电磁兼容测试和模拟无线信道的能力。因此, 搅拌方式是混响室的核心内容。2017 年, IEEE 对混响室做了专题报道^[8-9], 报道中从机械搅拌和电搅拌的角度对单一搅拌方式进行了介绍。本文从决定电磁场分布的两个基本要素——边界条件和激励源出发, 对混响室单一搅拌方式进行了介绍, 同时介绍了研究人员可能感兴趣的混合搅拌方式。

1 单一搅拌方式

显著改变腔体内有效模式的组合是混响室产生统计均匀场的关键。组合中模式的种类和各模式之间的能量

* 收稿日期: 2020-03-26; 修订日期: 2020-05-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61877041)

作者简介: 赵翔(1973—), 女, 教授, 从事电磁兼容分析与电磁效应评估研究; zhaoxiang@scu.edu.cn。

分配则取决于激励源的配置和腔体的边界条件。因此,从理论上讲,改变腔体边界条件和激励源的频率、位置、数量、幅值和相位,可以使有效模式的组合发生足够明显的变化,从而对腔体内的场分布产生搅动效果以实现统计均匀场。基于此,本文从改变混响室边界条件和激励源配置两个方面进行分类介绍。

1.1 改变混响室边界条件的搅拌方式

1.1.1 内置机械搅拌器搅拌

内置机械搅拌器搅拌是通过在腔体内放置机械搅拌器来改变腔体边界条件的搅拌方式,如图1所示。1976年,Corona进行的第一个混响室实验就是采用的内置机械搅拌器搅拌。内置机械搅拌器搅拌也是目前研究最多、最成熟的搅拌方式。搅拌器是内置机械搅拌混响室的核心内容,关于搅拌器的设计与优化也一直是研究的热点。搅拌器一般是由金属板或铝箔制成,其结构多种多样,几乎每个实验室中的混响室搅拌器都带有自己的设计特色。其中,Z字型搅拌器、弯板式搅拌器、不规则可重构搅拌器、旋转木马搅拌器是几种具有代表性的搅拌器。

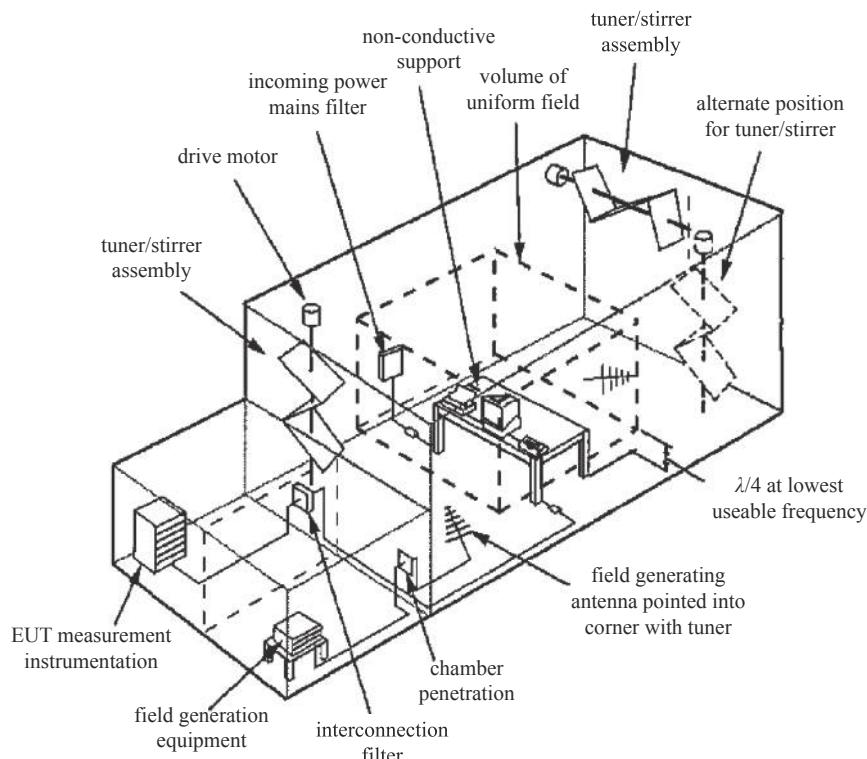


Fig. 1 Mechanical mode stirrer reverberation chamber as described in IEC-61000-4-21, 2002, picture extracted from Ref. [5]

图1 IEC 61000-4-21(2002)标准中的混响室原理图

Z字型搅拌器因其形如英文字母Z而得名,是由美国Lindgren RF公司(现为ETS-Lindgren)和美国海军水面战争中心(NSWC)于1997年合作研发的,在2004被国际无线电干扰特别委员会(CRADA)申请为专利^[10]。Z字型搅拌器是目前使用最广泛的搅拌器,IEC 61000-4-21标准里使用的也是这种搅拌器。一个典型的Z字型搅拌器如图2所示。

弯板式搅拌器在1996年由Bäckström和Lundén提出^[11],如图3所示。这种搅拌器有四个臂,这四个臂上固定了八个面板,每个面板与竖直方向的夹角都不相同。这些夹角都可以作为设计参数而改变,因此这种搅拌器更便于优化。英国约克大学的Clegg, Marvin和Dawson等人用遗传算法对搅拌器进行了优化^[12]。Arnaut将优化过的搅拌器与没有经过优化的搅拌器进行了比较,结论是经过优化的搅拌器可以使腔体内的场均匀性更好^[13]。

不规则可重构搅拌器在2003年由英国国家物理实验室(NPL)的Lunden和Backstrom提出^[14],如图4所示。这种搅拌器用绑带将金属板固定在圆盘上,每个金属板如何放置并没有具体的要求,但是放置方式会影响混响室的性能。例如,当金属板的竖直倾角在30°到45°之间时,最低可用频率要比完全垂直低175 MHz到165 MHz。目前最佳的配置方法仍不确定,对不同配置还需要进行大量的实验优化。2006年,Arnaut对优化方法进行了理论研究^[15]。



Fig. 2 Z-fold stirrer at Sichuan University

图 2 四川大学建造的 Z 字形搅拌器

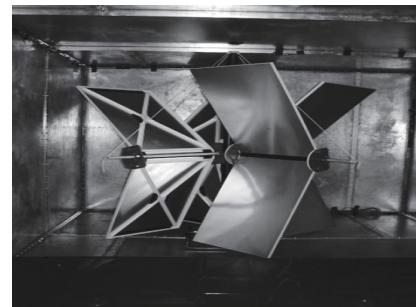
Fig. 3 "Bent-Plates" stirrer at the University of York,
picture extracted from Ref. [12]

图 3 约克大学建造的弯板式搅拌器

旋转木马搅拌器是将多个 Z 字型搅拌器按圆周排布，像旋转木马一样旋转的搅拌器。如图 5 所示，中间的空心区域即为工作区域。在 2007 年到 2010 年之间，Wellander, Lundén 和 Backstrom 对搅拌器的设计进行了深入研究^[16-17]。研究得到搅拌器的搅拌效率取决于搅拌器的尺寸、旋转量和偏心距，所以可以通过增加搅拌器的尺寸来提高搅拌效率，但同时这也会让可用的测试空间减小。同时，他们还发现搅拌器表面各部分对搅拌的贡献也不同，搅拌器边缘部分是对独立采样点贡献最大的部分。结合这两个条件，Fedeli, Iualè 和 Primiani 在 2012 年提出了将工作区域嵌套进搅拌器旋转空间内的方案，即旋转木马搅拌器的设计^[18]。这种搅拌器相当于将几组与混响室等高、直径略小于其宽的扇叶中间挖空，中间被挖空的区域即为工作区域，这样在尽可能地增加桨叶旋转直径的同时也增大了工作空间。

Fig. 4 Irregular reconfigurable stirrer in the RC at NPL,
picture extracted from Ref. [8]

图 4 英国国家物理实验室所搭建的不规则可重构搅拌器

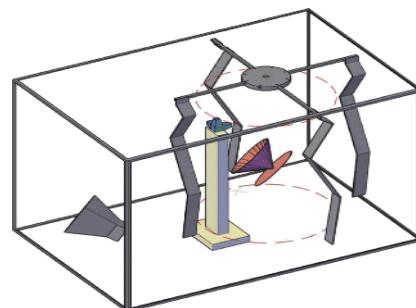
Fig. 5 Carousel stirrer at the DII, Università Politecnica
delle Marche, picture extracted from Ref. [18]

图 5 意大利马尔凯理工大学所搭建的旋转木马搅拌器

1.1.2 改变腔体结构的搅拌方式

不使用内置的机械搅拌器，通过改变腔体固有形状同样能够改变场结构来实现统计均匀场。1993 年，Huang 提出了改变腔壁的搅拌技术并详细介绍了工作原理^[19]。源于其特殊的搅拌方式，这类混响室本身就是一种搅拌技术。其中，振动固有混响室、体育馆型混响室、振荡搅拌器、开关搅拌是几种具有代表性的搅拌技术。

振动固有混响室是用柔性导电材料作为室壁的混响室。如图 6 所示。该混响室由 Leferink 提出，比较奇特的是：这种混响室没有搅拌器，是通过摇动室壁的方式实现随机极化、统计均匀、各向同性的场环境^[20-22]。



Fig. 6 Vibrating intrinsic reverberation chamber hanging on strings, picture extracted from Ref. [23]

图 6 用绳子悬挂的振动固有混响室

体育馆型腔体采用了类似体育馆的球形结构,通过旋转底座来不断改变腔体结构从而实现搅拌。这种搅拌方式于1998年由Arnaut提出^[24]。在Arnaut的实验中,体育馆型混响室是使用了两个半球体结合而成,在传送带的拉动下,下半球体可以进行旋转,如图7所示。一般的混响室都是基于矩形腔结构,但是如果使用具有更复杂表面的结构,可以改善混响室的性能。对于体育馆型这种球形来讲,弯曲的表面不仅具有漫射和聚焦的特性,还能在低频频段增加平均模式密度^[13],这有助于降低最低可用频率。Arnaut还对场各向同性和统计均匀性等方面进行了进一步研究^[25-27]。

振荡搅拌器是将几组类似于Z字型搅拌器的桨叶固定在腔壁附近,用直流电机通过铰链来拉动桨叶进行伸缩运动。虽然同样使用了桨叶,但与内置机械搅拌器搅拌混响室不同的是,这里的桨叶仅仅被当作了内部散射体,并不进行旋转。这种搅拌器在2017年由Barakos和Serra提出^[28],如图8所示。虽然出现较晚,但是振荡器混响室备受工业界的青睐,美国Comtest Engineering公司、英国Delta Engineering公司均推出此类产品,如图9所示。

开关搅拌在2005年由Klingler提出^[30]。这种混响室用开关来控制金属板与腔壁的连接。每个开关的通断都会来改变腔体内的边界条件,如图10所示。每种开关状态的组合都会对应一种场分布。因此,一个完整的搅拌周期包括所有开关状态的组合。对于由N个板组成的开关搅拌混响室,搅拌状态的总数为 2^N 。



Fig. 7 Stadium RC at NPL, picture extracted from Ref. [24]

图7 英国国家物理实验室所搭建的体育馆型混响室

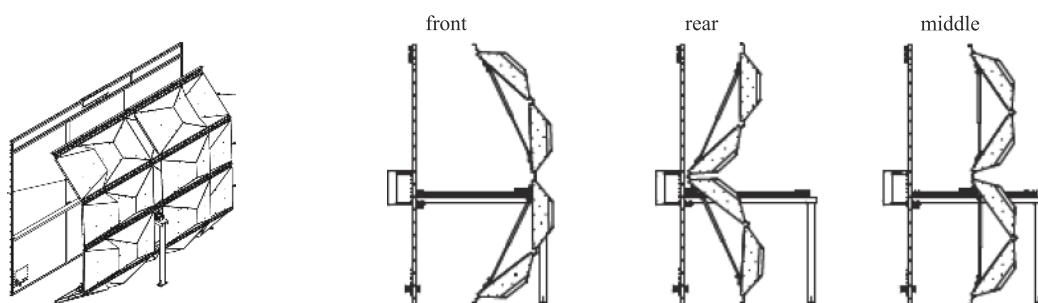


Fig. 8 Oscillating stirrer at the RC facility of Eindhoven University of Technology, picture extracted from Ref. [28]

图8 荷兰埃因霍芬理工大学所搭建的振荡型混响室



Fig. 9 Oscillating stirrer at the RC facility of Comtest Engineering, picture extracted from Ref. [29]

图9 美国Comtest Engineering公司所搭建的振荡型混响室

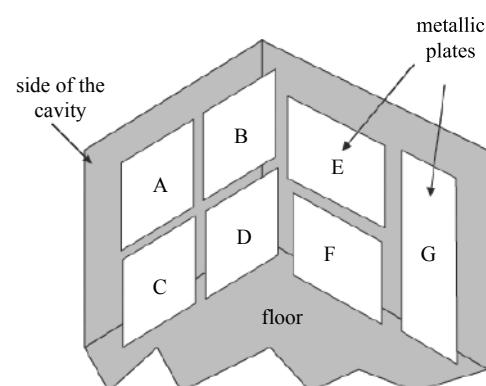


Fig. 10 Schematic diagram of a switch stirred reverberation chamber, picture extracted from Ref. [8]

图10 开关搅拌混响室原理图

1.2 改变激励源配置的搅拌方式

1.2.1 频率搅拌

频率搅拌是通过控制混响室激励信号频率来改变混响室的电尺寸,从而实现对混响室内场环境的扰动(搅拌)。1991年,Loughry首次提出了频率搅拌^[31]。Loughry使用了窄带高斯白噪声信号,当信号带宽远远大于单一频率对应的品质因数带宽时,在该宽度内的电磁模式均被同时激发出来,从而获得“实时均匀”的场环境。这种实时

场均匀使得频率搅拌混响室可以大幅度减少测试时间，无需像内置机械搅拌器搅拌中需要等搅拌器旋转一周才能完成测试。在 Loughry 的实验中，测试时间仅为内置机械搅拌器搅拌的 1/200。1996 年，Crawford, Loughry 和 Hatfield 等人使用带限高斯白噪声进行了实验^[32]。除了使用调制信号的方式，Hatfield 和 Slocum 还发现通过连续波扫频的方式同样可以实现频率搅拌^[33]。2003 年，Yu 和 Bunting 发现增大搅拌带宽和降低腔体品质因数能改进搅拌效率^[34]。2012 年，解放军军械工程学院刘逸飞和程二威等人对连续波扫频的扫频带宽进行了研究。他们发现在同一中心工作频率时，随着搅拌带宽的增加，场均匀性可以得到一定程度的改善，但当搅拌带宽足够产生统计均匀场的时候，此时搅拌带宽再增加，场均匀性并不能显著改善，即频率扫描存在一个最优扫频带宽^[35-36]。随后他们在同一个 $10.5 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 4.3 \text{ m}$ 的混响室里进行了实验，得到了不同工作频率下的最优扫频带宽^[37]。

1.2.2 源搅拌

源搅拌是通过改变激励源在腔体内的位置、数量、相位、极化等来改变场结构的方式。源搅拌是由 Huang 和 Edwards 在 1992 提出^[38]。自从源搅拌的概念提出以来，关于这种方法的理论机制和实现方法，学界都做了大量研究。在 2005 年，Cerri, Primiani 和 Pennesi 等人通过实验和理论分析展示了通过源搅拌来控制场统计特性^[39]。此后，Cerri 等人还进行了进一步的研究^[40]。但将单个源移动到多个位置难以实现，多种替代方法被逐渐提出，例如使用不同的天线类型、不同的发射信号等。其中，随机多天线搅拌、电抗性负载天线搅拌是两种具有代表性的搅拌方式。

随机多天线搅拌是使用多个天线随机组合发射信号来改变腔体内场环境的方法。Hill 在 1994 年采用多个天线搅拌方式，每个天线发射的信号独立随机，但结果却并不理想^[41]。Cozza, Koh 和 Ng 在 2012 年进行了改进，他们在实验中发现每个天线发射的信号需要有一定的相关性，完全独立随机的信号反而不能形成良好的场环境^[42]。

电抗性负载天线搅拌是将许多接收天线安装在室壁上，每个天线终端都接一个可变负载，每个天线都会接收到腔体内的电磁波，然后以不同相位重新辐射回去，从而改变腔体电磁环境，如图 11 所示。这种方案实际上是在用电子搅拌的方式模拟腔壁运动，改变每个天线的负载相当于改变边界条件。Voges 和 Eisenburger 在 2007 年提出了这种方案^[43]。这个方案的优点在于他们同时还提供了电路模型(如图 12 所示)，便于研究场均匀性。

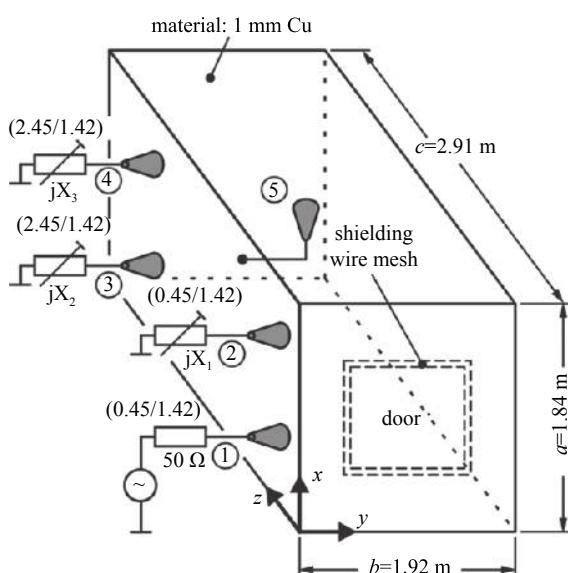


Fig. 11 Schematic diagram of an RC implementing the reactively-loaded, picture extracted from Ref. [43]

图 11 电抗性负载天线搅拌混响室原理图

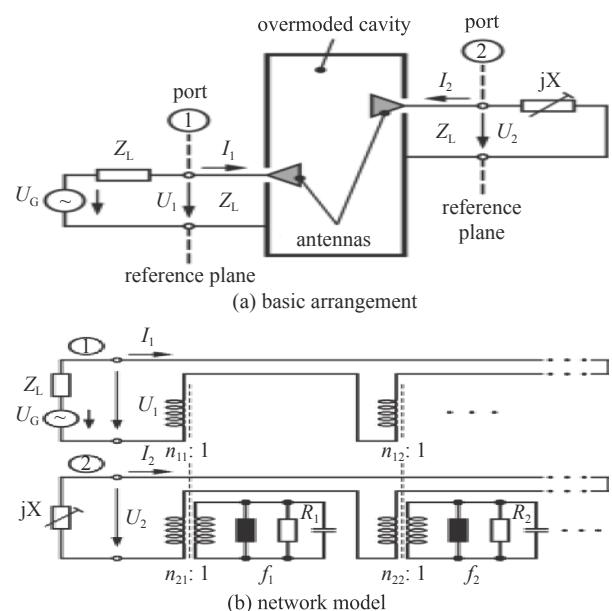


Fig. 12 Basic arrangement of overmoded cavity(chamber) with two coupling antennas and simplified network model, picture extracted from Ref. [43]

图 12 两天线的混响室及其等效电路模型

表 1 对各种单一搅拌方式做了总结。

2 混合搅拌

混合搅拌是将多种搅拌方式结合起来使用的方法。直观的来看，在混响室内同时使用多种具有不同搅拌原理的搅拌方式或许能有效地改善场环境，多位研究人员对此展开了研究。其中，内置机械搅拌器搅拌和改变腔体结构的搅拌方式进行混合使用是研究最多的方案，其他混合搅拌方式也有所研究。

表 1 各种单一搅拌方式及其特点

Table 1 Various single stirring methods and their characteristics

搅拌方式		特点
改变腔体边界条件的搅拌方式	Z字型搅拌器	所需的机械阻尼时间少; 驱动系统规模小。
	弯板式搅拌器	搅拌器便于优化。
	内置机械搅拌器搅拌	搅拌器桨叶可拆卸, 易于拆除和重新配置。
	旋转木马搅拌器	相比于传统的Z字形搅拌器, 这种搅拌器能提高场环境均匀性, 旋转一周中的独立采样点位置也更多。
改变腔体结构搅拌	振动固有混响室	结构简单, 便于在待测器件处现场搭建。
	体育馆型混响室	搅拌过程中模密度保持恒定, 腔内所有状态在统计上等价, 有助于场统计特性的计算。
	振荡器搅拌	需要大量搅拌器, 成本高。
	开关搅拌	结构复杂, 设计实现较为困难。
改变源配置的搅拌方式	窄带高斯白噪声信号搅拌	能实现“实时均匀”场环境。
	连续波信号搅拌	扫频信号所需带宽可能会大于被测试器件的响应带宽。
	改变源位置搅拌	建造简单; 成本较低; 工作空间占比较大, 操作繁琐。
	源搅拌	成本较高。 优点: 有较低最低可用频率。 缺点: 实现困难。
	随机多天线搅拌	有等效电路模型, 便于研究场均匀性; 成本较高。
	电抗性负载天线搅拌	

2.1 内置机械搅拌器搅拌和改变腔体结构搅拌的混合搅拌方式

使用改变腔体结构搅拌的混响室都具有复杂的室壁结构, 这种结构可以增强电磁波的散射从而改善混响室的性能。内置机械搅拌器搅拌能形成很好的场环境, 但是低频性能较差。于是在内置机械搅拌器搅拌混响室里增加散射体来改善低频性能的方案被提出。主要有波纹墙混响室、使用 Schroeder 散射体、使用超表面材料和加金属球散射体的内置机械搅拌器搅拌混响室。

2.1.1 波纹墙混响室

波纹墙混响室是 Godfrey 在 1999 年提出的将内置机械搅拌器搅拌和改变腔体结构的搅拌方式结合起来使用的混响室^[44]。该混响室将内置机械搅拌器搅拌混响室的室壁改为波纹状, 通过增加腔壁的散射、反射来改善混响室的性能。虽然在该实验中场均匀性确实得到了改善, 但是在低频频段出现了严重的简并现象。

2.1.2 使用 Schroeder 散射体的内置机械搅拌器搅拌混响室

Schroeder 散射体是 20 世纪 70 年代 Schroeder 通过数学方法得到的一种制作简单、效果显著的声学散射体。最常用的有二次剩余序列散射体 (QRD)、原根剩余序列散射体 (PRD)、最大长度序列散射体 (MLD)。2009 年, 东南大学何鹏、蒋全兴、周香等人用 FDTD 方法和实验的方式分析了加入 MLD 散射体的内置机械搅拌器电磁混响室的性能^[45], 如图 13 所示。实验结果表明加入散射体后, 内置机械搅拌器搅拌混响室在低频的场均匀性有了明显提高。这种混合搅拌方式的缺点在于放置散射体会导致可用测试空间的减小。2011 年, 西安电子科技大学黄华、牛中奇和白冰等人通过 FDTD 方法研究了顶角设置 QRD 散射体的内置机械搅拌器混响室的性能^[46]。研究发现该方法不仅有效地进一步提高了混响室中场均匀性, 同时减少了利用混响室进行测试的时间。

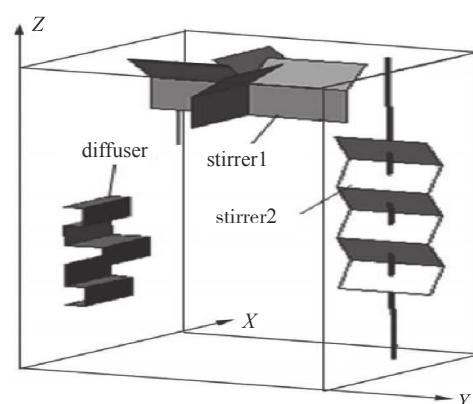


Fig. 13 Mechanical reverberation chambers with Schroeder diffuser, picture extracted from Ref. [45]

图 13 使用 Schroeder 散射体的机械搅拌混响室

2.1.3 柔性屏蔽材料混响室

传统的混响室是由高电导率的金属板搭建而成，这样不仅成本高，搭建也比较困难。2018年，四川大学苏政铭、闫丽萍和杨旭萍等人将内置机械搅拌器和振动固有混响室结合在了一起，使用柔性屏蔽材料搭建了一个 $3.3\text{ m}\times 2\text{ m}\times 2.2\text{ m}$ 的振动固有混响室^[47]。实验中设计了Z字形搅拌器，通过搅拌器的转动代替摇动室壁，实现混响室内边界条件的改变。这种混响室便于安装拆卸，低成本，而且避免了摇动室壁的不确定性和伪随机性。

2.1.4 使用电磁超表面材料的内置机械搅拌器搅拌混响室

2018年，Song, Li 和 Sun 提出了使用电磁超表面材料作为内置机械搅拌器搅拌混响室的室壁来改善其低频性能的方案^[48]。电磁超表面是由亚波长电磁结构单元在平面上排布构成的二维人工电磁结构。作为调控电磁波散射的新途径，电磁超表面拥有对电磁波散射进行任意调控的能力^[49]。从体育馆型混响室可知，通过复杂的表面结构增加电磁波的散射，会改善腔体内的场环境。使用电磁超材料可以达到同样的目的。Song 等人分别对没有超表面材料、有一面室壁是超表面材料、有两面室壁是超表面材料的三种混响室进行了仿真，结果说明有两面室壁是超表面材料的混响室能有更好的低频性能，如图14所示。Sun, Wei 和 Gu 在2019年对此进行了实验验证^[50]。Sun 等人设计制造了基于单个单元结构的超宽带和广角特性的相均匀超表面材料。这种材料是一种多层次结构，由顶部金属、中间介电层、底部接地金属层组成，如图15所示。在一个 $1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}\times 0.8\text{ m}$ 的混响室里使用 $61.5\text{ cm}\times 61.5\text{ cm}\times 3.1\text{ cm}$ 的相均匀超表面材料进行了实验，如图16所示。实验结果和仿真结果一致。这种混响室最大的优点在于改善内置机械搅拌器搅拌混响室低频性能的同时，使用这种材料不会减少工作空间，缺点在于建造成本会增加。超表面材料除了作为室壁之外还可以直接放置在腔体内。在2019年，Chen, Xue 和 Shi 提出将轨道角动量(OAM)超表面材料直接放置在内置机械搅拌器搅拌混响室体内的方案^[51]，如

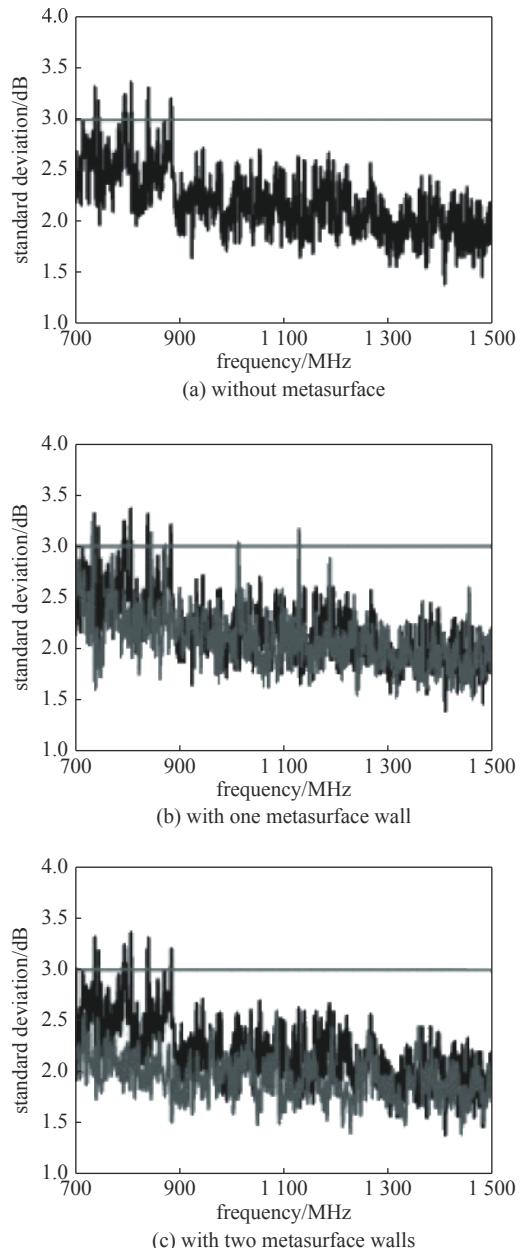


Fig. 14 Comparison of electric field standard deviation, picture extracted from Ref. [50]

图14 实验测得的电场标准差对比

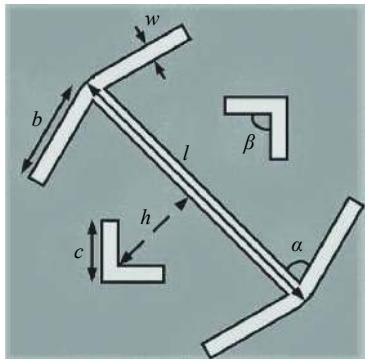


Fig. 15 Front view of metasurface unit structure, picture extracted from Ref. [50]

图15 超表面材料单元结构的前视图

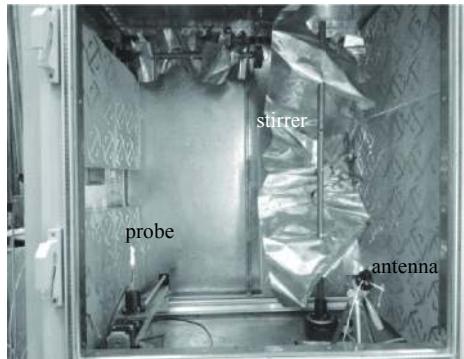


Fig. 16 Mechanical reverberation chamber with metasurface walls, picture extracted from Ref. [50]

图16 使用超表面材料的内置机械搅拌器搅拌混响室

图 17 所示。实验中为了不占用测试空间, 超表面材料放在了源附近, 这导致 OAM 的纯度有所下降, 但是依然能有效改善场环境。相比于将超表面材料作为室壁, 这种方案显然要节省得多。在实验中还可以通过手动改变超表面材料的方式来改变 OAM 的模式。不过 Chen 提出以后可以使用 FPGA 或其他控制器件来自动改变 OAM 模式。

2.1.5 加金属球散射体的内置机械搅拌器搅拌混响室

从体育馆型混响室可知, 弯曲的表面结构可以更为有效地散射电磁波。2018 年, Magdowski, Immidisetti 和 Vick 在一个矩形内置机械搅拌器混响室里通过在腔壁上固定 2 个半径为 300 mm、厚 1.5 mm 的半球型金属散射体来改善场环境^[51], 如图 18 所示。Andrieu 和 Ticaud 在此基础上又进行了进一步研究, 在四个半球体和一个完整球体的情况下得到了 4.3% 的增益^[52](通过天线 S_{11} 法测量场均匀性), 如图 19 所示。

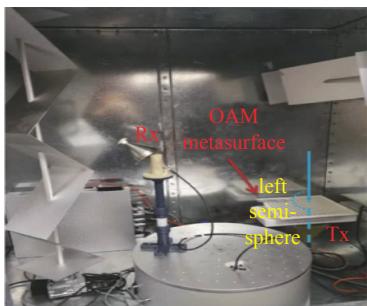


Fig. 17 Mechanical reverberation chamber with the orbital angular momentum, picture extracted from Ref. [51]

图 17 使用轨道角动量超表面材料的内置机械搅拌器搅拌混响室



Fig. 18 Mechanical reverberation chamber with two hemispherical diffractors, picture extracted from Ref. [52]

图 18 加 2 个金属球散射体的内置机械搅拌器搅拌混响室

2.2 其他混合搅拌方式

2001 年, Rosengren, Kildal 和 Carlsson 用内置机械搅拌器搅拌和频率搅拌混合的方式在一个小型混响室内对天线的辐射效率进行了测量, 得到了相当精确的结果^[54]。2004 年, Madsen, Hallbjørner 和 Orlenius 用内置机械搅拌器搅拌和频率搅拌混合的方式对独立采样点的数量进行了研究。结论是采用混合的方式所能得到的最大独立采样点数是各自单独搅拌时数量的乘积^[55]。2018 年, Serra 和 Barakos 在振荡搅拌器混响室里添加了源搅拌的方式^[56]。

与单独的振荡搅拌器相比, 加入源搅拌后的混合搅拌在最低可用频率方面有细微的降低, 在可用工作空间占比方面有很大提高。在该实验中, 搅拌器空间占比 11%, 工作空间占比 44%, Serra 等人声称这是目前所有文献中可用空间占比最高的混响室, 如图 20 所示。



Fig. 19 Mechanical reverberation chamber with fixed metallic spheres, picture extracted from Ref. [53]

图 19 固定多个金属球散射体的内置机械搅拌器搅拌混响室

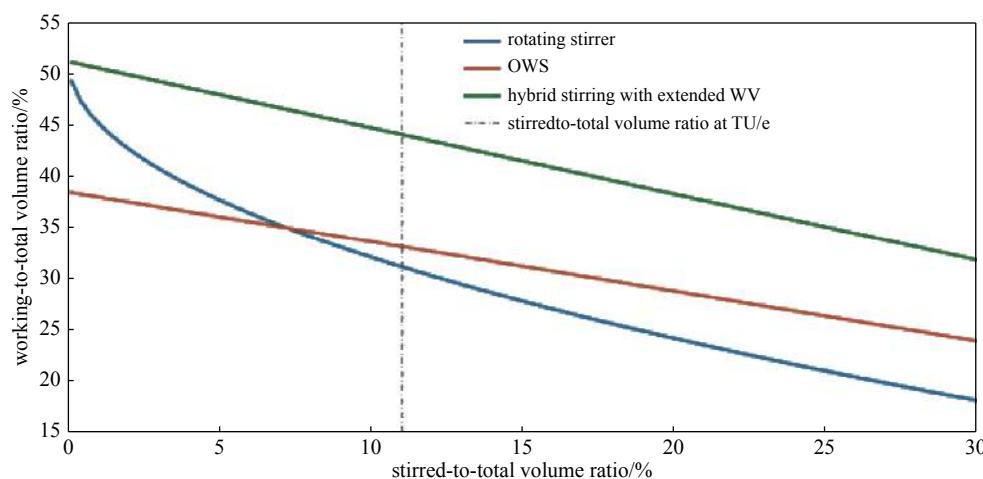


Fig. 20 Working-to-total volume ratio as a function of the stirred-to-total volume ratio for three different stirring strategies: A classical rotating stirrer, the OWS, and the hybrid source-tuner stirring technique, picture extracted from Ref. [56]

图 20 在内置机械搅拌器搅拌方式、振荡搅拌方式和两种搅拌方式一起使用时的混响室内工作空间占比情况

3 结 论

搅拌方式是混响室的核心内容。混响室的搅拌方式主要分为：内置机械搅拌器搅拌、改变腔体结构搅拌、频率搅拌、源搅拌和混合搅拌。内置机械搅拌器搅拌方式最成熟，应用最广泛。改变腔体结构搅拌可以改善场环境也可以提供便捷的搭建方式。频率搅拌和源搅拌能增加工作空间，缩短测量时间。混合搅拌可以取长补短，提升混响室的性能。每种搅拌方式都有多种实现方法，每种实现方法又有多个参数可以调节。本文还列举了一些具有代表性的实现方案，为混响室相关研究人员和从业者选择搅拌方式时提供参考。

参 考 文 献：

- [1] Corona P, Latmiral G. Valutazione ed impiego normativo della camera riverberante dell'Istituto Universitario Navale[J]. Atti I Riunione Nazionale di Elettromagnetismo Applicato, 1976: 103-108.
- [2] CISPR/A(Sec.)82, Specifications for radio disturbance and immunity measuring apparatus[S].
- [3] GB/T 6113.1-1995, 无线电骚扰和抗扰度测量设备规范[S]. (GB/T 6113.1-1995, Specifications for radio disturbance and immunity measuring apparatus)
- [4] MIL-STD-46IE, Military Standard: electromagnetic interference characteristics requirements for equipment[S].
- [5] IEC-61000-4-21(2002), Electromagnetic compatibility (EMC)-Part4-21: Testing and measurement techniques-Reverberation chamber test methods(2002)[S].
- [6] IEC-61000-4-21(2011), Electromagnetic compatibility (EMC)-Part4-21: Testing and measurement techniques—Reverberation chamber test methods(2011)[S].
- [7] Cellular Telecommunications and Internet Association. Test plan for wireless device over-the-air performance method of measurement for radiated RF power and receiver performance (Version 3.5)[S].
- [8] Serra R, Marvin A C, Moglie F, et al. Reverberation chambers a la carte: An overview of the different mode-stirring techniques[J]. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2017, 6(1): 63-78.
- [9] Serra R. Reverberation chambers through the magnifying glass: An overview and classification of performance indicators[J]. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2017, 6(2): 76-88.
- [10] International Special Committee on Radio Interference. Reverberation chamber tuner and shaft with electromagnetic radiation leakage device: US6, 686, 818 B1[P]. 2004-04-26.
- [11] Bäckström M, Lundén O. Transmission cross sections of apertures measured by use of nested mode-stirred chambers[R]. FOA-R-96-00359-3.2-SE, 1996.
- [12] Clegg J, Marvin A C, Dawson J F, et al. Optimization of stirrer designs in a reverberation chamber[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2005, 47(4): 824-832.
- [13] Arnaut L R. Operation of electromagnetic reverberation chambers with wave diffractors at relatively low frequencies[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2001, 43(4): 637-653.
- [14] Lundén O, Backstrom M. A factorial designed experiment for evaluation of mode-stirrers in reverberation chambers[C]//IEEE 2003 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2003. EMC'03. 2003, 1: 465-468.
- [15] Arnaut L R. Effect of size, orientation, and eccentricity of mode stirrers on their performance in reverberation chambers[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2006, 48(3): 600-602.
- [16] Wellander N, Lundén O, Backstrom M. Experimental investigation and mathematical modeling of design parameters for efficient stirrers in mode-stirred reverberation chambers[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2007, 49(1): 94-103.
- [17] Lundén O, Wellander N, Bäckström M. Stirrer blade separation experiment in reverberation chambers[C]// IEEE 2010 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2010: 526-529.
- [18] Fedeli D, Iualè M, Primiani V M, et al. Experimental and numerical analysis of a carousel stirrer for reverberation chambers[C]//IEEE 2012 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2012: 228-233.
- [19] Huang Y. The investigation of chambers for electromagnetic systems[D]. Oxford: University of Oxford, 1993: 70-76.
- [20] Leferink F B J. Test Chamber: Patent NL1010745[P]. 1998-12-07.
- [21] Leferink F B J, van Etten W. Optimal utilization of a reverberation chamber[C]//4th European Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2000: 201-206.
- [22] Leferink F, van Etten W C. Generating an EMC test field using a vibrating intrinsic reverberation chamber[J]. EMC Society Newsletter, 2001: 19-25.
- [23] Serra R, Rodriguez A. Vibrating intrinsic reverberation chamber for electromagnetic compatibility measurements[J]. IEEE Latin America Transactions, 2013, 11(1): 389-395.
- [24] Arnaut L R, West P D. Evaluation of the NPL untuned stadium reverberation chamber using mechanical and electronic stirring techniques [R]. NPL Report CEM 11, 1998.
- [25] Arnaut L R. Untuned 3D stadium reverberation chamber for microwave and millimeter-wave frequencies[C]//Proc 1999 Mode-stirred Chamber, Anechoic Chamber and OATS Users Meeting. 1999: 3-9.
- [26] Arnaut L R, West P D. Electromagnetic reverberation near a perfectly conducting boundary[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2006, 48(2): 359-371.
- [27] Arnaut L R, Serra R, West P D. Statistical anisotropy in imperfect electromagnetic reverberation[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2016, 59(1): 3-13.
- [28] Barakos D, Serra R. Performance characterization of the oscillating wall stirrer[C]//IEEE 2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE. 2017: 1-4.
- [29] <https://www.comtest.eu/components/mode-stirring-systems>.

- [30] Klingler M. Dispositif et procédé de brassage électromagnétique dans une chambre réverbérante à brassage de modes: FR 2887337[P]. 2005-06-17.
- [31] Loughry T A. Frequency stirring: An alternate approach to mechanical mode-stirring for the conduct of electromagnetic susceptibility testing[R]. Phillips Lab Kirtland AFB NM, 1991.
- [32] Crawford M L, Loughry T A, Hatfield M O, et al. Band-limited, white Gaussian noise excitation for reverberation chambers and applications to radiated susceptibility testing[R]. National Institute of Standards and Technology, 1996.
- [33] Hatfield M O, Slocum M B. Frequency characterization of reverberation chambers[C]//IEEE Proceedings of Symposium on Electromagnetic Compatibility. 1996: 190-193.
- [34] Yu S P, Bunting C F. Statistical investigation of frequency-stirred reverberation chambers[C]//IEEE 2003 Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2003, 1: 155-159.
- [35] 刘逸飞, 陈永光, 王庆国, 等. 频率搅拌混响室场均匀性与搅拌带宽选取方法分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2354-2359. (Liu Yifei, Chen Yongguang, Wang Qingguo, et al. Analysis of field uniformity and stirring bandwidth selection method in frequency stirring reverberation chamber[J]. High Voltage Technology, 2012, 38(9): 2354-2359)
- [36] 徐鑫, 魏明, 程二威, 等. 扫频实现混响室频率搅拌的仿真和实验研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(34): 10162-10166. (Xu Xin, Wei Ming, Cheng Erwei, et al. Simulation and experimental study of frequency mixing in reverberation chamber with frequency sweeping[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(34): 10162-10166)
- [37] 刘逸飞, 陈永光, 王庆国, 等. 基于线性扫频的频率搅拌混响室搅拌参数选取[J]. 电波科学学报, 2014, 29(2): 363-368. (Liu Yifei, Chen Yongguang, Wang Qingguo, et al. Stirring parameter selection of frequency stirring reverberation chamber based on linear sweep[J]. Journal of Radio Science, 2014, 29(2): 363-368)
- [38] Huang Y, Edwards D J. A novel reverberating chamber: the source-stirred chamber[C]//Eighth International Conference on Electromagnetic Compatibility. 1992: 120-124.
- [39] Cerri G, Primiani V M, Pennesi S, et al. Source stirring mode for reverberation chambers[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2005, 47(4): 815-823.
- [40] Cerri G, Primiani V M, Monteverde C, et al. A theoretical feasibility study of a source stirring reverberation chamber[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2009, 51(1): 3-11.
- [41] Hill D A. Electronic mode stirring for reverberation chambers[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 1994, 36(4): 294-299.
- [42] Cozza A, Koh W J, Ng Y S, et al. Controlling the state of a reverberation chamber by means of a random multiple-antenna stirring[C]//IEEE 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2012: 765-768.
- [43] Voges E, Eisenburger T. Electrical mode stirring in reverberating chambers by reactively loaded antennas[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2007, 49(4): 756-761.
- [44] Godfrey E A. Reverberation chambers at low frequencies[C]//IEEE 1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 1999, 1: 23-28.
- [45] 何鹏, 蒋全兴, 周香, 等. 声学散射体对混波室场均匀性的影响[J]. 微波学报, 2009, 25(2): 38-42. (He Peng, Jiang Quanxing, Zhou Xiang, et al. Influence of reverberation chamber field uniformity using acoustic diffuser[J]. Journal of Microwaves, 2009, 25(2): 38-42)
- [46] 黄华, 牛中奇, 白冰. 顶角设置QRD散射体的混响室内场均匀性分析[J]. 微波学报, 2011, 27(2): 38-41. (Huang Hua, Niu Zhongqi, Bai Bing. Analyzing the field uniformity with QRD in the corner of a reverberation chamber[J]. Journal of Microwaves, 2011, 27(2): 38-41)
- [47] 苏政铭, 闫丽萍, 杨旭萍, 等. 实验室用简易混响室设计[C]//2018年全国微波毫米波会议论文集(上册). 2018. (Su Zhengming, Yan Liping, Yang Xuping, et al. Design of a simple reverberation room for laboratory use[C]//Proc of the 2018 National Conference on Microwave and Millimeter Wave (Vol.1). 2018)
- [48] Song J, Li Z, Sun H, et al. Field uniformity improvement at lower frequencies in a reverberation chamber using metasurfaces[C]// IEEE 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility and IEEE 2018 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility(EMC/APEMC). 2018: 1156-1159.
- [49] 冯一军. 电磁超表面: 电磁波散射调控新途径[C]//2017年全国微波毫米波会议论文集(上册). 2017: 610. (Feng Yijun. Electromagnetic metasurfaces: a new way to regulate electromagnetic wave scattering[C]//2017 Proceedings of the National Microwave and Millimeter Wave Conference (Vol.1). 2017: 610.)
- [50] Sun H, Wei M, Gu C, et al. Experimental investigation of the field uniformity in mode reverberation chambers with metasurface walls for low frequency regime[C]//IEEE 2019 European Microwave Conference in Central Europe (EuMCE). 2019: 31-34.
- [51] Chen X, Xue W, Shi H, et al. Improving field uniformity using source stirring with orbital angular momentum modes in a reverberation chamber[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019, 29(8): 560-562.
- [52] Magdowski M, Immidisetti J, Vick R. Experimental analysis of the field homogeneity and isotropy inside a reverberation chamber with two hemispherical diffraction gratings[C]//IEEE 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE). 2018: 683-688.
- [53] Andrieu G, Ticaud N. Improvement of performances of a reverberation chamber with fixed metallic spheres using the “well-stirred” condition method[C]// IEEE 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility—EMC EUROPE. 2019: 237-240.
- [54] Rosengren K, Kildal P S, Carlsson C, et al. Characterization of terminal antennas in reverberation chambers: Methods and results[C]//Nordic Radio Symposium. 2001.
- [55] Madsen K, Hallbjorner P, Orlenius C. Models for the number of independent samples in reverberation chamber measurements with mechanical, frequency, and combined stirring[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2004, 3(1): 48-51.
- [56] Serra R, Barakos D. A novel hybrid source-tuner stirring allows for an extended working volume in RCs[C]//IEEE 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE). 2018: 699-703.