

文章编号:1000-5854(2016)06-0490-03

# 电波混响室最低可用频率估算方法研究

张成怀

(河北科技大学 信息科学与工程学院,河北 石家庄 050018)

**摘要:**为了满足混响室场均匀性要求,每个混响室都有一个最低可用频率。混响室最低可用频率一般与混响室的大小以及搅拌器的搅拌效率有关,混响室体积越大,最低可用频率越小。对最低可用频率的估算,目前相关标准介绍了 2 种方法:一种方法是在最低可用频率处,保证混响室内至少有 60 个模,另一种方法规定混响室最低可用频率是最低谐振模频率的 3~4 倍。若混响室尺寸一定,2 种方法估算的结果可能不同。针对一个已知尺寸的混响室进行了仿真研究,结果表明,对于所选混响室,2 种估算方法所得结果基本一致,且估算结果对应的场均匀性满足标准对容许偏差的要求。

**关键词:**混响室; 最低可用频率; FEKO; 场均匀性

中图分类号:O 441.4; TN 011 文献标志码:A doi:10.13763/j.cnki.jhebnu.nse.2016.06.006

## Estimation Method Study of the Lowest Usable Frequency of the Reverberation Chamber

ZHANG Chenghuai

(Institute of Information Science & Engineering, Hebei University of Science and Technology, Hebei Shijiazhuang 050018, China)

**Abstract:** In order to satisfy the need of field uniformity, every reverberation chamber has a lowest usable frequency. The lowest usable frequency is often relevant to the size of the reverberation chamber and stirring efficiency of the stirrers. The more the size of the reverberation chamber is, the lower the lowest usable frequency is. The estimation of the lowest usable frequency plays an important role in the devising and making reverberation chamber and finding the size of a reverberation chamber in advance. In relevant standards, there are two methods used to estimate the lowest usable frequency at present. One method is that there are 60 modes at least in the reverberation chamber at the lowest usable frequency. The other method is that the lowest usable frequency is 3 to 4 times than the lowest resonance frequency. Which method is more reasonable? To size-different reverberation chamber, the answer may be different. But if the size of the reverberation chamber is confirmed, the estimating results of the two methods may be different. Here we can choose the more effective estimating method. This paper does a deeper simulation study to a size-known reverberation chamber. The study indicates the result by the two estimating methods is uniform.

**Key words:** reverberation chamber; lowest usable frequency (LUF); FEKO; field uniformity

电波混响室作为一种新兴的电磁兼容测试场地,具有其他测试场地(GTEM 室、电波暗室和开阔场等)无可比拟的优越性<sup>[1-3]</sup>:1)以相对较小的输入功率可以在大的测试空间获得高场强,不但节省了宽带功放的

收稿日期:2016-03-03

基金项目:国家自然科学基金(61300120);河北省自然科学基金(F2013208137)

作者简介:张成怀(1974-),男,河北曲阳人,讲师,博士,研究方向为电磁兼容原理与实验技术。

投资,尤其适合对大型设备进行高场强测试;2) 测试时无需改变待测设备的位置,节省了测试时间,提高了测试效率。正因如此,国内混响室技术在近几年发展迅速且得到了比较广泛的应用,相关研究单位纷纷建立了自己的混响室。混响室内形成的是一个统计均匀的场,要使场均匀性满足标准要求,混响室工作频率不能过小,即存在最低可用频率<sup>[4-6]</sup>(lowest usable frequency,简称 LUF)。IEC61000-4-21(2011)将 LUF 的定义为:在 8 个位置确定的长方体工作空间中,通过验证性测试证明可以达到相关标准对场均匀性要求的工作频率。

混响室最低可用频率一般与混响室的大小以及搅拌器的搅拌效率有关,混响室体积越大,最低可用频率越小。混响室最低可用频率的估算对混响室的设计和制造、事先确定混响室的大小和尺寸具有重要意义。

对于最低可用频率的估算,目前有 2 个标准分别采纳了 2 种不同的方法:

1) IEC61000-4-21 标准规定,在最低可用频率处混响室至少要有 60 个模;

2) 美国航空方面 RTCA DO-160D《空中设备试验程序与环境条件》,建议混响室最低可用频率为混响室最低谐振模频率的 3~4 倍。

对于同一个尺寸的混响室,最低可用频率 LUF 确定方法的选择是关键问题。本文中,笔者以一个长宽高分别为 9.6 m×7.7 m×4.2 m 的机械搅拌混响室为研究对象,对此进行了理论计算和仿真分析。

## 1 2 种方法对最低可用频率(LUF)的估算

一个长宽高分别为  $L \times W \times H$  的矩形腔体,在频率为  $f$  的电磁波激励下,其内部的模式数为<sup>[7]</sup>

$$n = \frac{8\pi}{3} LWH \frac{f^3}{c^3} - (L+W+H) \frac{f}{c} + \frac{1}{2},$$

其中  $c$  为光速,单位 m/s,  $L, W, H$  分别为矩形腔体的长、宽、高,单位为 m。

若按照第 1 种估算 LUF 的方法,则  $N=60$ ,即下式成立,

$$60 = \frac{8\pi}{3} LWH \frac{f^3}{c^3} - (L+W+H) \frac{f}{c} + \frac{1}{2}.$$

当  $L \times W \times H = 9.6 \text{ m} \times 7.7 \text{ m} \times 4.2 \text{ m}$  时,将  $L, W, H$  以及  $c$  代入上式,得  $f=88 \text{ MHz}$ ,即  $LUF=88 \text{ MHz}$ 。

另外,一个长宽高分别为  $L \times W \times H$  的矩形混响室壳体,其谐振频率为<sup>[8]</sup>

$$f_{mnp} = 150 \sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{W}\right)^2 + \left(\frac{p}{H}\right)^2},$$

其中  $m, n, p$  为非负整数,且不全为 0。

当  $L \times W \times H = 9.6 \text{ m} \times 7.7 \text{ m} \times 4.2 \text{ m}$  时,其最低谐振频率为

$$f_{110} = 150 \sqrt{\left(\frac{1}{9.6}\right)^2 + \left(\frac{1}{7.7}\right)^2}.$$

按照第 2 种估算最低可用频率的方法,LUF 为  $f_{110}$  的 3~4 倍,则其 LUF 为 75~99.88 MHz,研究中取其平均值 87.44 MHz,和第 1 种方法所得结果基本一致。

可见,由 2 种估算方法得到的结果基本相同,如果在该频率激励源激励下电磁场满足标准对场均匀性的要求,说明 2 种估算方法都是有效的。

随着计算机技术的发展,可以不必实际测试而通过电磁仿真的方法来研究上述尺寸的混响室在 88 MHz 激励源下的场均匀性,确定是否满足相关标准对场均匀性的要求,当然,这种均匀是一种统计均匀。

## 2 混响室场均匀性仿真实验

用电磁仿真软件 FEKO 建立混响室模型,包括长宽高分别为  $L \times W \times H = 9.6 \text{ m} \times 7.7 \text{ m} \times 4.2 \text{ m}$  的矩形壳体模型和 2 个机械搅拌器模型,以及发射天线模型,发射天线用五元八木天线,天线馈源电压 100 V,功率 100 W,天线对着混响室一角进行发射。所有模型采用理想导体。仿真研究同一混响室分别在上述 2 种估算法所得最低可用频率  $f=60, 88 \text{ MHz}$  时的场均匀性。

以位于混响室工作区的一个长方体 8 个顶点作为场点,同时计算 8 个场点的电场分量  $E_x, E_y, E_z$ ,搅拌器步进转动,步进角度为 30°,在每个搅拌器步进转动位置计算一次称为一次采样,搅拌器旋转一周共采样

12 次。记录每个场点 12 次采样的最大场强值,以此为基础来讨论混响室的场均匀性。

通常用场强的标准偏差  $\sigma$ (单位为 dB)来衡量混响室的场均匀性,标准偏差  $\sigma$  越小,场均匀性越好。表 1 给出了 IEC61000-4-21 标准规定的混响室在不同频段的均匀性限值,此标准要求混响室内场强的标准偏差  $\sigma$  不能高于表 1 所示的值。

经过仿真计算,当  $f=88$  MHz 时,各场点各电场分量在 12 次采样的最大值见表 2。

表 1 场均匀性限值

频率范围/MHz	标准偏差限值/dB
80~100	4
100~400	由 4 线性递减到 3
$\geq 400$	3

表 2 88 MHz 时各电场分量最大值

(V·m<sup>-1</sup>)

电场	场点							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$E_x$	9.68	21.54	23.70	30.60	28.92	35.90	30.90	25.87
$E_y$	29.98	52.68	36.16	39.19	22.84	21.23	35.47	27.75
$E_z$	9.72	13.22	15.18	26.22	10.97	15.78	35.52	12.50

由表 2 的数据可求得 88 MHz 激励下场的总的标准偏差为  $\sigma=3.08$  dB,达到了表 1 所示的场均匀性要求。

对所选尺寸混响室,用 2 种估算方法所得的最低可用频率 88 MHz 下场均匀性满足标准规定的场均匀性要求,说明 2 种估算方法都是有效的。

### 3 结束语

根据混响室最低可用频率常用的 2 种估算方法,估算了一个尺寸为 9.6 m×7.7 m×4.2 m 的混响室的最低可用频率,并进行了仿真实验研究,2 种估算方法得到的最低可用频率(LUF)基本一致,均为 88 MHz。通过仿真计算,确定这个频率下得到的场的标准偏差,证实了最低可用频率 88 MHz 的场均匀性达到了标准规定的场均匀性要求。

对不同尺寸的混响室都可采用这 2 种估算方法进行最低可用频率的估算,同样可对 2 种不同的估算结果进行比较分析,得出较合理的估算结果。

### 参考文献:

- [1] 张林昌. 混响室及其进展[J]. 安全与电磁兼容, 2001(4):2-8. doi:10.3969/j.issn.1005-9776.2001.04.002
- [2] 沈涛, 姚利军. 混响室设计技术研究[J]. 宇航计测技术, 2005, 25(3):26-31. doi:10.3969/j.issn.1000-7202.2005.03.007
- [3] 袁智勇, 何金良, 曾嵘, 等. 电磁兼容试验中的混响室技术[J]. 高电压技术, 2005, 31(3):56-58. doi:10.13336/j.1003-6520. hve.2005.03.018
- [4] CANDACE S, GARY A T, JPHN R S. Predicting Low Frequency Behavior of Arbitrary Reverberation Chamber Configurations[C]//IEEE Symposium on EMC. Canada: IEEE Conference Publication, 2001: 757-761. doi:10.1109/ISEMC.2001.950469
- [5] 丁坚进, 沙斐. EMC 混响室电磁场模态研究[J]. 电波科学学报, 2005, 20(5):557-560. doi:10.13443/j. cjors. 2005.05.002
- [6] 王庆国, 程二威, 张成怀, 等. 电波混响室理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [7] IEC61000-4-21 Testing and Measurement Techniques-reverberation Chamber Test Methods[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [8] 郭硕鸿. 电动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.