

文章编号: 1001-4322(2011)08-2130-05

混响室发射天线位置优化仿真及实验^{*}

崔耀中, 魏光辉, 范丽思, 刘小强, 潘晓东, 陈亚洲

(军械工程学院 强电磁场环境模拟与防护技术国防科技重点实验室, 石家庄 050003)

摘要: 为提高混响室测试区域的场均匀性, 在分析发射天线影响场均匀性原理基础上, 采用基于矩量法的电磁仿真软件 FEKO 对混响室仿真模型进行数值计算, 通过与遗传算法相结合研究了混响室发射天线的位置对测试区域场均匀性的影响, 得到了优化后发射天线位置及相应的表征混响室测试区域场均匀性的电场标准偏差值。优化后, 测试区域场均匀性较优化前有所改善, 并通过实验验证了该优化仿真方法的正确性。

关键词: 混响室; 发射天线; 遗传算法; 矩量法; 场均匀性

中图分类号: TN011; O441

文献标志码: A doi:10.3788/HPLPB20112308.2130

混响室是一种能在屏蔽腔体内产生空间统计均匀、各向同性、随机极化电磁环境的模拟设备^[1-2], 因其在造价、强场模拟、整机测试等方面的优势, 逐渐成为当前电磁兼容领域研究的热点^[3-5]。混响室内电磁场的均匀性是评价其性能的决定性指标, 国内外学者对此也进行了大量的相关研究, 如改变搅拌器的设计来提高混响室场均匀性等^[6-7]。但这些因素的改变通常是根据工程技术人员经验, 并没有达到最优解, 且工程应用价值受限。另一方面, 之前混响室性能方面的研究多集中于改变混响室边界条件, 即改变混响室内模式分布来改善场均匀性, 而发射天线作为混响室内激励源, 其位置决定了各模式前的加权系数, 因此发射天线位置同样影响场均匀性。本文介绍了发射天线位置影响场均匀性原理, 采用基于矩量法的电磁仿真软件 FEKO 对混响室仿真模型进行数值计算, 并结合遗传算法对混响室发射天线位置进行优化, 得到了优化后发射天线位置及相应的表征混响室场均匀性的电场标准偏差值, 并通过实验进行验证。

1 发射天线位置影响场均匀性原理

根据 Maxwell 方程和本构关系可推得混响室内电磁场分布公式为^[8]

$$\mathbf{E} = \sum_{m,n,p} (c_{xmn} A \hat{\mathbf{e}}_x + c_{ymn} B \hat{\mathbf{e}}_y + c_{zmn} C \hat{\mathbf{e}}_z) \quad (1)$$

式中: A, B, C 为有源谐振腔的电磁场分布解析本征解; m, n, p 为 0 或正整数; $c_{xmn}, c_{ymn}, c_{zmn}$ 为各模式的加权系数

$$c_{xmn} = \frac{c^2}{4\pi^2(f^2 - f_{mn}^2)} \frac{8}{LWH} \iiint_{r \in D} j\omega\mu J_x A dx dy dz \quad (2)$$

$$c_{ymn} = \frac{c^2}{4\pi^2(f^2 - f_{mn}^2)} \frac{8}{LWH} \iiint_{r \in D} j\omega\mu J_y A dx dy dz \quad (3)$$

$$c_{zmn} = \frac{c^2}{4\pi^2(f^2 - f_{mn}^2)} \frac{8}{LWH} \iiint_{r \in D} j\omega\mu J_z A dx dy dz \quad (4)$$

式中: c 为光速; f 为混响室工作频率; f_{mn} 为混响室谐振频率; L, W, H 分别为混响室长、宽、高; J_x, J_y, J_z 分别为混响室激励电流在 x, y, z 方向的分量。由式(1)~(4)可以看出, 影响混响室电场分布有 3 个方面因素: 混响室形状尺寸、混响室工作频率、激励源位置及电流的幅值和相位。因此改变发射天线即激励源位置, 其实是改变混响室内各模式的加权系数 c_{xmn}, c_{ymn} 和 c_{zmn} , 从而改变混响室内场分布。优化发射天线位置, 其本质是通过优化各模式的加权系数从而得到各模式最佳的叠加效果, 提高场均匀性。

2 仿真计算

2.1 建立混响室仿真模型

以实验室现有的混响室为依据, 建立 1:1 混响室仿真模型, 其内部结构如图 1 所示。其中矩形屏蔽腔体

* 收稿日期: 2011-04-18; 修订日期: 2011-06-06

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目(9140C87030310JB3402); 国家自然科学基金项目(51077132)

作者简介: 崔耀中(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事电磁环境模拟与测试技术研究; cuiyaozhongcui@163.com。

尺寸为 $10.5 \text{ m}(L) \times 8 \text{ m}(W) \times 4.3 \text{ m}(H)$, 其 3 维尺寸都非整数且不成简单比例, 这样可以避免简并模式存在。根据谐振腔理论^[9], 其谐振频率 f_{mnp} 为

$$f_{mnp} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{W}\right)^2 + \left(\frac{p}{H}\right)^2} \quad (5)$$

由式(5)可知, 此屏蔽腔体最低谐振频率 f_{110} 为 23.6 MHz。为满足混响室场均匀性要求, 最低工作频率一般取最低谐振频率的 3 倍, 即其工作频率应大于 70.7 MHz, 本文选择工作频率 80 MHz 进行研究。腔体材料选择镀锌钢板, 其电导率与相对磁导率之比 σ/μ_r 为 $4.4 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

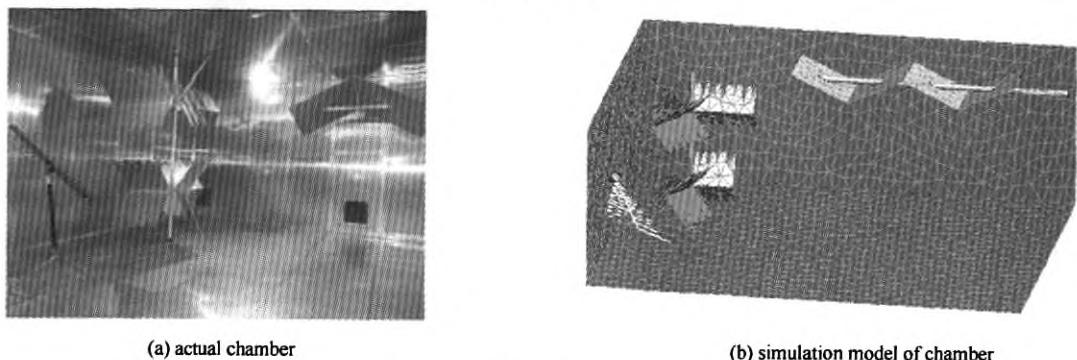


Fig. 1 Inner structure of reverberation chamber

图 1 混响室内部结构

设计工作频率 60 MHz~1.9 GHz 对数周期偶极子阵列作为发射天线, 如图 2 所示。其中最短振子长 0.08 m, 最长振子长 2.52 m, 增长因子 0.88, 天线全长 1.60 m。

建立两个结构不同的搅拌器, 如图 3 所示。其中横向放置的搅拌器为 Z 型结构, 由 4 个叶片组成, 叶片夹角为 128.3° ; 竖直放置的搅拌器由 6 个 V 型桨叶组成, 桨叶夹角 90° , 为增大搅拌效率, 桨叶采用 V 型切口设计。

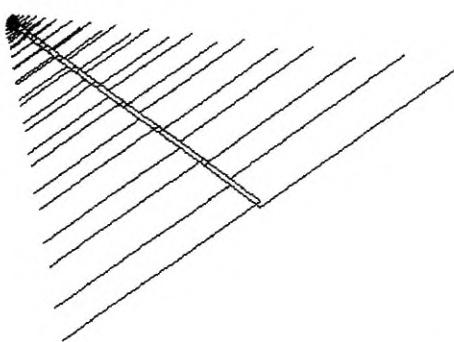


Fig. 2 Sketch of log-periodical dipole antenna

图 2 对数周期天线示意图

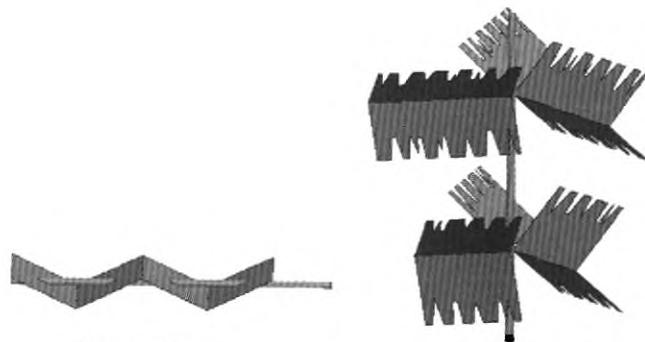


Fig. 3 Stirrers

图 3 搅拌器

2.2 目标函数及综合评价函数计算

遗传算法通过调用 FEKO 建立的混响室仿真模型, 优化发射天线在混响室中的位置, 使得评价混响室场均匀性的电场标准偏差在满足标准 IEC61000-4-21^[10] 要求基础上尽可能小, 测试区域 8 个顶点位置处对输入功率归一化的最大电场值的标准偏差越小, 说明测试区域场均匀性越好。测试区域距离腔室 6 个面、天线及搅拌器的最短距离应大于 $\lambda/4$ 或者 1 m, λ 为最低工作频率波长。在此选择矩形测试区域坐标区间 $x \in [2.9, 7.0]$; $y \in [4.3, 9.5]$; $z \in [1.0, 3.3]$ 。

IEC61000-4-21 介绍了两种搅拌方式, 即连续搅拌和步进搅拌, 本文选择步进搅拌。通过编写 Matlab 程序控制 FEKO, 实现仿真模型中搅拌器的自动步进, 依据 IEC61000-4-21, 共步进 50 个位置。在搅拌器步进一周内, 记录测试区域 8 个顶点位置在正交轴上的最大电场强度 $E_{ik\max}$ (i 代表正交轴 x, y, z 方向, k 代表顶点位置 1 到 8) 及平均输入功率 P_{input} , 求出各顶点处 $E_{ik\max}$ 对 P_{input} 的归一化最大电场值

$$E_{ik} = \frac{E_{ik\max}}{\sqrt{P_{\text{input}}}} \quad (6)$$

分别对 E_{ik} 在 8 个顶点位置求平均值 $\langle E_{ik} \rangle_8$ 及对 E_{ik} 在 8 个顶点, 每个顶点 3 个正交轴位置求平均值 $\langle E_{ik} \rangle_{24}$

$$\langle E_{ik} \rangle_8 = \frac{1}{8} \sum_{k=1}^8 E_{ik} \quad (7)$$

$$\langle E_{ik} \rangle_{24} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^8 E_{ik} \quad (8)$$

各正交轴向归一化最大电场值标准偏差为

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^8 (E_{ik} - \langle E_{ik} \rangle_8)^2}{8-1}} \quad (9)$$

8 个顶点, 每个顶点 3 个正交轴的归一化电场最大值 E_{ik} 标准偏差为

$$\sigma_{24} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^8 (E_{ik} - \langle E_{ik} \rangle_{24})^2}{24-1}} \quad (10)$$

标准偏差 σ 相对于平均值可以表示为单位为 dB 的量

$$\sigma(\text{dB}) = 20 \lg \left[\frac{\sigma + \langle E_{ik} \rangle}{\langle E_{ik} \rangle} \right] \quad (11)$$

将各轴向电场标准偏差 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 及总标准偏差 σ_{24} 作为遗传算法优化多目标函数。根据多目标优化问题的权重系数变换法^[11], 在此将综合评价函数即适应度函数定义为各目标函数的加权和, 即综合评价函数

$$F = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z + \sigma_{24} \quad (12)$$

这样将多目标优化转化为单目标优化, 即 $F \rightarrow \min$, F 越小, 即 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 及 σ_{24} 越小, 说明测试区域场均匀性越好。根据标准 IEC61000-4-21 的场均匀性限值, 当工作频率在 80 MHz 时, 可用工作区的标准偏差 σ 应低于 4 dB。

2.3 优化计算

优化过程中, 遗传算法调用 FEKO 建立的混响室仿真模型, 待 FEKO 完成对混响室的数值分析后再返回遗传算法, 如图 4 所示。根据标准 IEC61000-4-21, 发射天线应对准墙角。在此选择发射天线底部坐标, 即与腔体后墙、左墙及腔体底面之间距离 a, b, c 为遗传算法优化对象, 且优化过程中发射天线始终保持对准墙角, 如图 5 所示, 同时测试区域在优化过程中不变。具体过程如下: (1) 随机生成一组初始个体作为初始群体 $P(0)$, 在此选择种群个体数为 30; (2) 程序调用混响室仿真模型, 将各个个体值赋给模型中的变量 a, b, c , 并进行混响室数值分析计算; (3) 程序读取仿真结果文件, 并计算各个个体的目标函数值及适应度值; (4) 选择、交叉、变异; (5) 终止条件判断。若进化代数 t 不大于最大进化代数, 转到步骤(2), 否则将具有最小适应度的个体作为最优解输出, 终止运算。

图 6 分别为发射天线在优化前及优化后, 搅拌器在起始位置时测试区域的电场分布情况。可以看出, 发射天线位置改变后, 测试区域电场分布发生改变, 说明改变发射位置会影响混响内电场分布, 与理论分析一致。

初始及优化计算得到的发射天线位置、各轴向电场标准偏差、总标准偏差及适应度值如表 1 所示。从表 1 中可知, 优化后测试区域电场标准偏差较优化前下降, 说明通过优化改善了测试区域场均匀性。

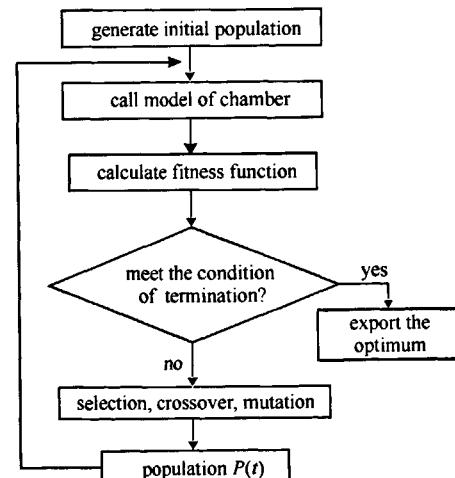


Fig. 4 Flow chart of optimization

图 4 优化流程图

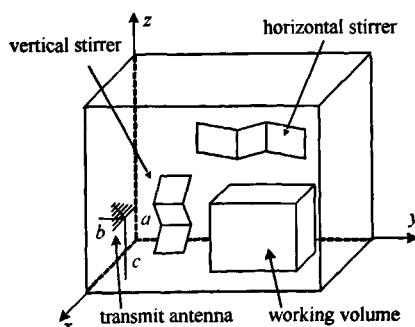


Fig. 5 Antenna position

图 5 天线位置

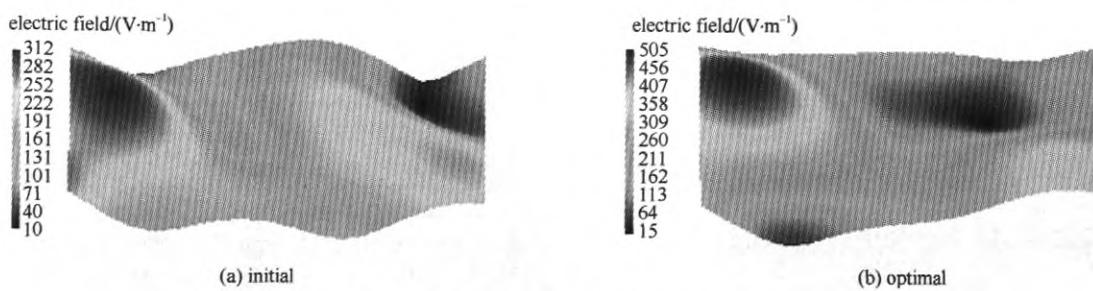


Fig. 6 Field distribution of working volume

图 6 测试区域场分布

表 1 优化前与优化后仿真结果比较

Table 1 Comparison of simulation results before and after optimization

	a/m	b/m	c/m	σ_x/dB	σ_y/dB	σ_z/dB	σ_{24}/dB	F/dB
initial	5.72	2.20	1.13	3.22	2.35	2.30	3.45	11.31
optimal	6.54	2.31	1.70	1.65	2.04	2.48	2.64	8.80

3 实验验证及结果分析

为验证优化仿真的正确性,需要对实际混响室进行测试。采用 Lab Windows/CVI 软件平台开发了混响室场均匀性测试程序,通过 GPIB 卡对信号源、功率计、搅拌器以及场强计进行控制,自动采集数据并进行处理,最后输出电场强度及电场标准偏差数据文件。测试流程如图 7 所示。

利用实验室现有混响室分别对优化前和优化后的发射天线位置进行验证。图 8 给出了实际测试中发射天线分别位于优化前和优化后位置时,测试区域 8 个顶点位置在搅拌器步进一周 50 次采样的每个位置电场分量归一化最大值 E_{xk}, E_{yk}, E_{zk} 的比较。表 2 给出了实际测试中发射天线位置优化前和后的各轴向电场标准偏差、总标准偏差及适应度值。

由图 8 可知,优化前和优化后各顶点归一化最大值趋势具有一定的相似性,并且优化后的曲线较优化前曲线平稳,这说明优化后场分布较优化前更加均匀。比较表 1 和表 2 可知,实际测试与仿真计算中得到的电场标准偏差基本吻合,反映了所建仿真模型的正确性;同时,实测中优化后的电场标准偏差较优化前有所下降,并且与仿真结果偏差不大,说明通过遗传算法优化发射天线位置改善了测试区域场均匀性,验证了此优化仿真方法的可行性;优化后, σ_x, σ_y 有所下降,说明 x, y 方向电场均匀性有所改善,而 σ_z 有所上升,代表 z 方向场均匀性的恶化,但 σ_{24} 下降表示测试区域场均匀性各个方向整体有所提高。

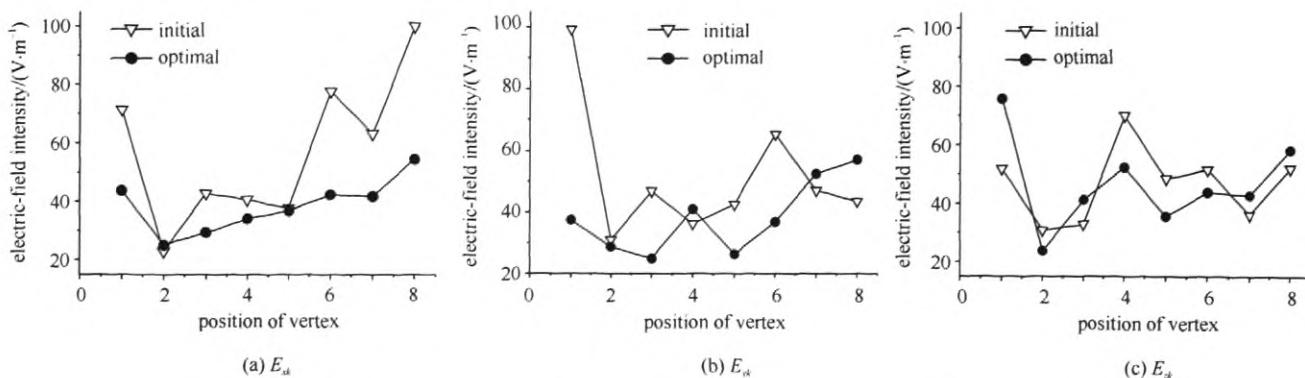


Fig. 8 Maximal field strength normalized on the 8 vertexes of working volume

图 8 测试区域 8 个顶点位置电场归一化最大值

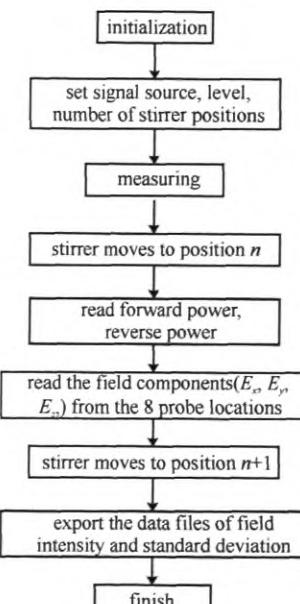


Fig. 7 Flow chart of testing

图 7 测试流程图

表 2 优化前与优化后实验结果比较

Table 2 Comparison of experiment results before and after optimization

	a/m	b/m	c/m	σ_x/dB	σ_y/dB	σ_z/dB	σ_{2z}/dB	F/dB
initial	5.72	2.20	1.13	3.19	3.06	2.14	2.87	11.26
optimal	6.54	2.31	1.70	1.86	2.35	2.51	2.32	9.04

4 结 论

本文在分析发射天线位置影响混响室场均匀性原理基础上,将遗传算法与混响室数值模拟相结合,对发射天线位置进行优化。研究表明:发射天线位置改变时,测试区域电场标准偏差随之改变,这是由于发射天线位置的变化改变了混响室内已存各模式前的加权系数,从而改变混响室内场分布。因此对发射天线进行优化,其本质是通过优化各模式前加权系数以得到各模式最佳的叠加效果,以提高场均匀性。优化后,测试区域场均匀性较优化前有所改善。最后通过实验验证了该优化仿真方法的正确性,对混响室优化设计具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] Avila S L, Santos Jr M A, Weinzierl D, et al. Maximum working volume evaluation in a non-canonical reverberation chamber[J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 2009, **45**(3): 1646-1649.
- [2] Leroosey G, Rosny J D. Scattering cross section measurement in reverberation chamber[J]. *IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility*, 2007, **49**(2): 280-284.
- [3] Madsen K, Hallbjørner 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 Lett*, 2004, **33**: 48-51.
- [4] Bruns C, Vahldieck R. A closer look at reverberation chambers 3-D simulation and experimental verification[J]. *IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility*, 2005, **47**(5): 612-626.
- [5] Coates A, Sasse H G, Coleby D E, et al. Validation of a three-dimensional transmission line matrix (TLM) model implementation of a mode-stirred reverberation chamber[J]. *IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility*, 2007, **49**(4): 734-744.
- [6] Yuan Z Y, He J L, Chen S M, et al. Evaluation of transmit antenna position in reverberation chamber[J]. *IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility*, 2007, **49**(1): 86-93.
- [7] Hill D A. Boundary fields in reverberation chamber[J]. *IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility*, 2005, **47**(2): 281-290.
- [8] 丁坚进. 混响室理论、设计和测试[D]. 北京: 北京交通大学, 2006. (Ding Jianjin. Theory, measurement and design of reverberation chamber. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006)
- [9] 袁智勇, 李暾, 陈水明, 等. 混响室设计与校准测试[J]. 电波科学学报, 2007, **22**(4): 571-576. (Yuan Zhiyong, Li Tun, Chen Shuiming, et al. Design and calibration of reverberation chamber. *Chinese Journal of Radio Science*, 2007, **22**(4): 571-576)
- [10] IEC61000-4-21, Testing and measurement techniques reverberation chamber test methods[S]. 2003.
- [11] 王小平, 曹立明. 遗传算法理论、应用软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002. (Wang Xiaoping, Cao Liming. Genetic algorithm theory, application and software implementation. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002)

Simulation and experiment on optimization of position of emission antenna in reverberation chamber

Cui Yaozhong, Wei Guanghui, Fan Lisi, Liu Xiaoqiang, Pan Xiaodong, Chen Yazhou

(National Key Laboratory of High Electromagnetic Field Environment Simulation and Protection Technology, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to improve the field uniformity in the work space of a reverberation chamber, the mechanism of the position of emission antenna affecting the field uniformity was analyzed, and the simulation model was constructed and analyzed with FEKO software based on the method of moments combining genetic algorithm(GA) with MOM was put forward to analyze and optimize the reverberation chamber, and the effect of the position of emission antenna on the field uniformity in the work space was investigated. The optimal results show that the field uniformity of working volume is improved by optimization. The experiments verify that the method could be used to optimize the design of a reverberation chamber.

Key words: reverberation chamber; emission antenna; genetic algorithm; method of moments; field uniformity

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>