

# 基于 HFSS 密度测量同轴谐振腔磁耦合环优化设计

姜 宇, 刘兴鹏, 肖 鸿, 滕 巍

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘 要:**基于同轴谐振腔密度测量原理建立了应用于密度测量的同轴谐振腔传感器模型,采用 HFSS 仿真软件对具有不同磁耦合环结构尺寸的同轴谐振腔进行仿真,通过比较磁耦合环  $S_{21}$  曲线得出的优化参数为,耦合环起始点到腔体轴心距离  $L=24$  mm,耦合环半径  $R=2$  mm,耦合环角度  $\theta=260^\circ$ ,同轴谐振腔在该参数下具有较优越的电磁特性,且分辨力较强.同时,以粉末硅为该同轴谐振腔的加载物料,采用得出的优化同轴谐振腔模型进行 HFSS 仿真.仿真结果表明,加载物料之后,同轴谐振腔  $S_{21}$  曲线的谐振特性明显改变,其谐振频率  $f$  变化显著,而且,其变化幅度可以在 HFSS 得出的  $S_{21}$  仿真曲线上得出,通过检测这种变化就可以利用经验公式推求出加载物料的密度.

**关键词:** HFSS; 同轴谐振腔; 密度测量; 磁耦合环

中图分类号: TP 212

文献标识码: A

文章编号: 1672-0946(2010)05-0555-06

## Optimal design for electromagnetic coupling ring of coaxial resonant cavity used for density measurement based on HFSS

JIANG Yu, LIU Xing-peng, XIAO Hong, TENG Wei

(School of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** This paper sets a model of coaxial resonant cavity used for density measurement based on the density measurement principle using coaxial resonant cavity. The emulation of different configuration coaxial resonant cavity adopt HFSS software educe  $S_{21}$  curve. The optimal parameter according to comparing the different  $S_{21}$  curve is  $L=24$  mm,  $R=2$  mm and  $\theta=260^\circ$ . The coaxial resonant cavity has better electromagnetism characters and differentiate ability. Using dust silicon as the loading materiel did emulation for the optimal coaxial resonant cavity model. The emulation results indicate that the syntonice character of the  $S_{21}$  curve changed obviously after setting material into the coaxial resonant cavity and the resonant frequency also changed dramatically. The change extent can be received in the  $S_{21}$  curve. To measure this variety can ascertain the density of the setting material by using the experience formula.

**Key words:** HFSS; coaxial resonant cavity; density measurement; electromagnetic coupling ring

密度是表征物质特性的一个基本物理量.在实际生产过程中为了保证产品质量,必须对物料密度

收稿日期: 2010-03-19.

基金项目: 哈尔滨工程大学基础研究基金(HEUFT06024); 哈尔滨市科技创新人才研究专项资金(2007RFQXG026); 黑龙江省博士后科研启动基金(323630249).

作者简介: 姜 宇(1974-),女,副教授,博士,硕士生导师,研究方向: 宽带微波网络通信及通信信号检测.

等指标进行在线检测与控制. 目前国内外生产设备大多采用红外技术、核扫描技术和微波技术来实现物料密度的在线测量<sup>[1]</sup>. 红外技术的测量精度不够高、易受外界干扰;核扫描技术存在一定的风险, 企业管理成本较高;微波技术基本上克服了上述缺陷, 其长期稳定性和可维护性等指标明显提高, 因而越来越受到用户的青睐<sup>[2]</sup>.

作为微波器件, 同轴谐振腔结构简单, 易于加工, 可作为密度测量的传感器. 同轴谐振腔的腔体结构和耦合结构是影响其测量性能的重要因素<sup>[3]</sup>, 其合理的参数选择需要通过反复实验获得. 如果对每一组实验参数都进行实物模拟, 势必要增加产品的设计周期及成本, 这对于当前研制周期紧、产品数量大的要求是一个制约<sup>[4]</sup>. 利用仿真工具进行辅助设计成为目前一种非常有效的解决途径<sup>[5]</sup>.

以同轴谐振腔密度测量原理为基础建立磁耦合同轴谐振腔模型, 利用 HFSS 软件对不同的磁耦合环结构尺寸进行仿真, 通过比较仿真得出的  $S_{21}$  曲线获得具有优越电磁特性的磁耦合环结构, 并以粉末硅为加载物料, 验证该同轴谐振腔模型应用于密度测量的可行性.

## 1 密度测量原理

同轴谐振腔传感器测量原理建立在电磁谐振原理之上, 电磁谐振依赖 2 个重要的参数来标志其性能和工作状态: 其一为谐振频率  $f$ , 即在谐振频率的信号经过谐振系统时, 其电场和磁场互相转化的效率最高; 其二为品质因数  $Q$ , 品质因数标志谐振腔是否容易进入谐振状态<sup>[6]</sup>. 通过调节外部微波激励源的信号, 可使同轴谐振腔处于强迫振荡状态, 当调节激励源信号频率使其与同轴谐振腔振荡频率一致时, 便发生谐振现象.

物料密度可表示为:

$$\rho = \frac{m_w + m_D}{V} \quad (1)$$

其中:  $m_w$  是物料中含水的质量,  $m_D$  是干燥物料的质量,  $V$  是含水物料体积.

当同轴谐振腔加载物料后, 物料作为腔壁的一部分, 腔的开口与物料耦合, 引起同轴谐振腔内部介电常数  $\epsilon$  发生微小的变化, 进而使谐振腔的谐振频率  $f$  和品质因数  $Q$  发生相应变化. 同轴谐振腔可以等效为图 1 所示的电路图.

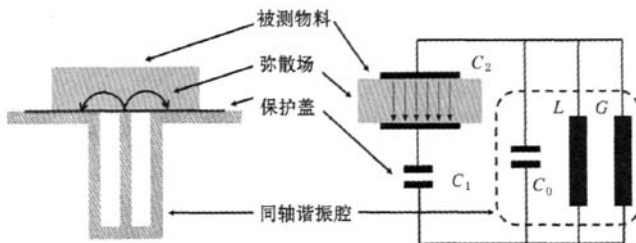


图1 同轴谐振腔等效电路图

其中:  $L$ 、 $G$ 、 $C_0$ 、 $C_1$  和  $C_2$  分别等效为同轴谐振腔的电感、内部损耗、内部电容、保护盖等效电容以及被测等效电容. 由同轴谐振腔的等效电路可以得到同

轴谐振腔的谐振频率  $f$  和品质因数  $Q$  的表达式如下:

$$f = \frac{2}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L[C_0 + C_1 C_2 \frac{C_2(\epsilon'^2 + \epsilon'^2)}{C_2^2(\epsilon'^2 + \epsilon'^2)} + C_1 \epsilon']}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{2\pi f_0} \cdot \frac{G + 2\pi f C_1^2 C_2 \frac{\epsilon''}{C_2^2(\epsilon'^2 + \epsilon'^2)} + 2C_1 C_2 \epsilon' + C_1^2}{C_0 + C_1 C_2 \frac{C_2(\epsilon'^2 + \epsilon'^2)}{C_2^2(\epsilon'^2 + \epsilon'^2)} + C_1 \epsilon'} \quad (3)$$

其中: 物料的介电常数一般都是复数, 可以表示成  $\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$ . 同时, 物料的密度可以表述为式

(4)<sup>[7]</sup>,如果物料确定,那么  $a, b, c, d$  即为常数.

$$\rho = \frac{\varepsilon''}{b + \frac{a\varepsilon'' - b\varepsilon' + b}{c\varepsilon' - c - \varepsilon''}d} \quad (4)$$

由式(2)、(3)、(4)联立即可得出加入同轴谐振腔的物料密度与谐振频率  $f$  和品质因数  $Q$  的关系为:

$$\rho = \frac{\frac{C_0 + \frac{1}{C_1}}{2\pi f C_1^2 C_2} [\frac{1}{2\pi f Q L} - G]}{b + \frac{a \frac{C_0 + \frac{1}{C_1}}{2\pi f C_1^2 C_2} [\frac{1}{2\pi f Q L} - G] - b \frac{1}{C_1 C_2} \{ (C_0 + \frac{1}{C_1}) [C_0 + C_1 - \frac{1}{(2\pi f)^2 L}] - C_1^2 \} + b}{a \frac{1}{C_1 C_2} \{ (C_0 + \frac{1}{C_1}) [C_0 + C_1 - \frac{1}{(2\pi f)^2 L}] - C_1^2 \} - c - d \frac{C_0 + \frac{1}{C_1}}{2\pi f C_1^2 C_2} [\frac{1}{2\pi f Q L} - G]}} \quad (5)$$

当同轴谐振腔的尺寸和加入其中的物料确定后,式(5)中的  $L, G, C_0, C_1$  和  $C_2$  便为定值,由此可以得出放入同轴谐振腔的物料的密度与同轴谐振腔的谐振频率  $f$  和品质因数  $Q$  的关系.

## 2 同轴谐振腔结构设计

同轴谐振腔的工作模式采用 TEM 模(主模),这种模式的优点是场结构简单、稳定、无色散、无频率下限,工作频率范围较宽.为减小体积和便于安装,一般采用  $1/4\lambda$  同轴谐振腔结构,该结构谐振波长  $\lambda_r$  与腔体长度  $l$  的关系可以表述为:

$$\lambda_r = \frac{4l}{2p-1}, (p=1,2,3,\dots) \quad (6)$$

同时,同轴谐振腔结构尺寸参数选择一般遵循以下原则<sup>[8-9]</sup>:避免高次模、满足功率容量、损耗要小.因此,同轴谐振腔横截面的尺寸不宜过大,在给定的工作频带内只传输 TEM 波型,波长与同轴谐振腔截面尺寸的关系可以表述为:

$$(a+b) \leq \lambda_{\min}/\pi. \quad (7)$$

其中: $a$  为腔中内导体的外半径,  $b$  为外导体的内径,  $\lambda_{\min}$  为工作频带内最短的波长.当  $b/a=1.65$  时谐振腔功率容量最大,  $b/a=3.6$  时损耗最小.

由式(7)可知,要求大的功率容量与要求小的损耗,在尺寸选择上是不一致的.为了兼顾这两方面的要求,一般采取折中尺寸,即  $b/a \approx 2.3$ .根据式(6)和式(7)选取同轴谐振腔内导体的外半径  $a=11.6 \text{ mm}$ ,外导体的内半径  $b=26.7 \text{ mm}$ ,腔长  $l=30 \text{ mm}$ ,选择黄铜作为同轴谐振腔的材料,其腔体模型如图2所示.

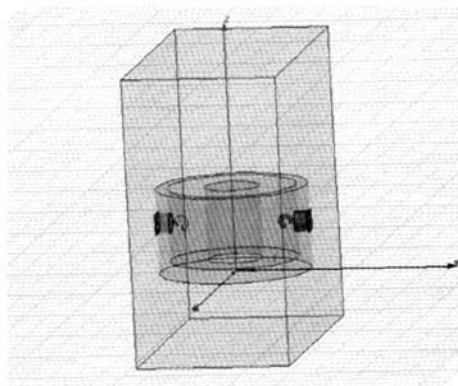


图2 同轴谐振腔腔体模型

## 3 HFSS 仿真

由上述同轴谐振腔传感器密度测量原理可知,同轴谐振腔放入物料前后其谐振频率  $f$  和品质因数  $Q$  的变化是反映加载物料密度的主要参数,而观察谐振腔的谐振频率和品质因数的变化比较直观的方法就是观察同轴谐振腔的  $S_{21}$  曲线.  $S_{21}$  曲线的变化反映了谐振体能量损耗特性,应用于密度测量的同轴谐振腔的较理想的  $S_{21}$  曲线应具有曲线的尖峰的尖锐程度高、尖峰之间的间距大等特点,这也是判断谐振腔模型电磁特性好坏的依据.因此,选取  $S_{21}$  曲线作为衡量不同的磁耦合环结构尺寸下同轴谐振腔模型电磁特性好坏的依据.

### 3.1 磁耦合环参数仿真优化

采用上述同轴谐振腔模型,利用 HFSS 软件对不同的耦合环结构参数进行仿真,通过仿真得出的  $S_{21}$  特性曲线得出优化的耦合环结构参数.

1) 选择耦合环角度  $\theta=260^\circ$ ,耦合环半径  $R=2$

mm,验证不同的耦合环起始点到腔体轴心距离  $L$  21、24 mm,其仿真结果如图3所示。  
对于谐振腔电磁特性的影响。选取  $L$  分别为 18、

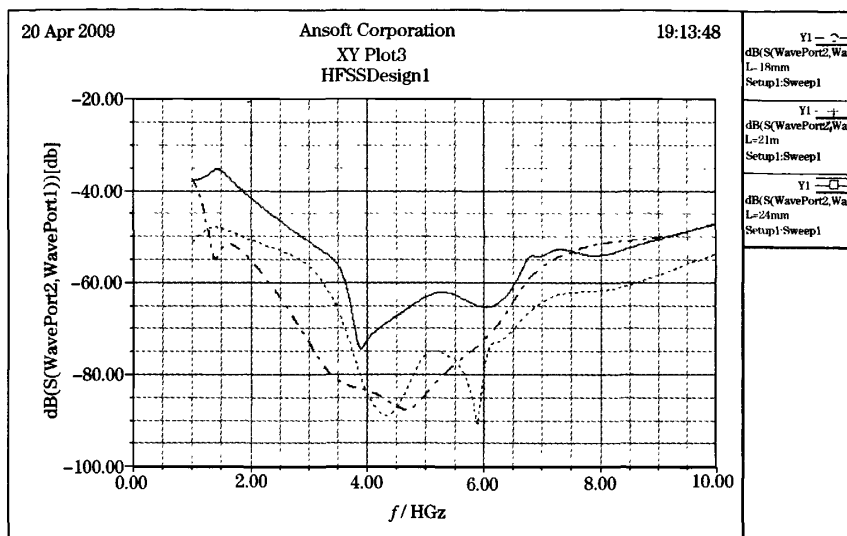


图3 不同耦合环起始点位置下同轴谐振腔的  $S_{21}$  曲线

2) 选择耦合环角度  $\theta = 260^\circ$ , 耦合环起始点到腔体轴心距离  $L = 24$  mm, 验证不同的耦合环半径  $R$  对于谐振腔电磁特性的影响。选取  $R$  分别为 2、3.5、4、5 mm, 其仿真结果如图4所示。

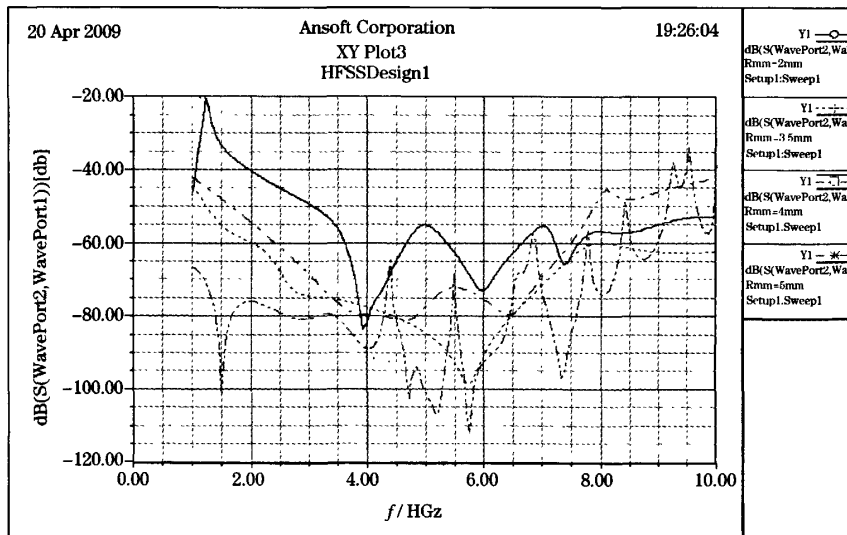


图4 不同耦合环半径下同轴谐振腔的  $S_{21}$  曲线

3) 选择耦合环起始点到腔体轴心距离  $L = 24$  mm, 耦合环半径  $R = 2$  mm, 验证不同的耦合环角度  $\theta$  对于谐振腔电磁特性的影响。选取  $\theta$  分别为  $255^\circ$ ,  $260^\circ$  和  $265^\circ$ , 其仿真结果如图5所示。

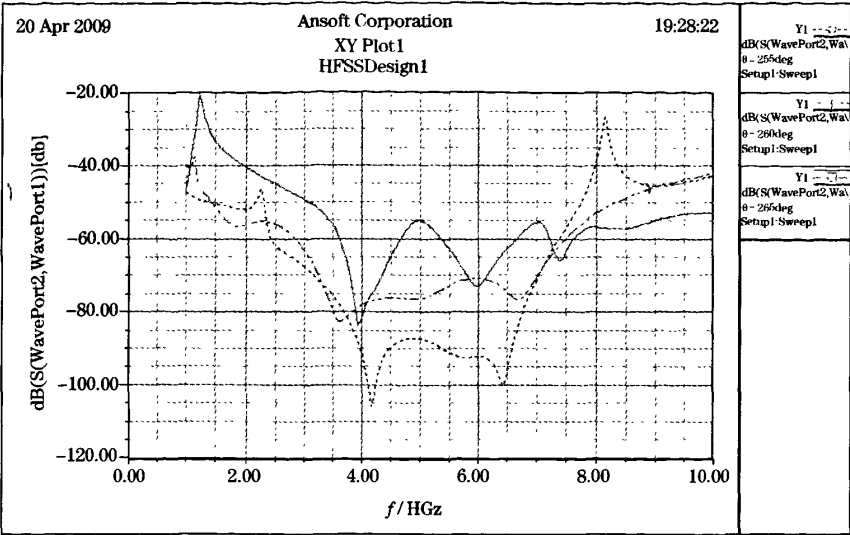


图 5 不同耦合环角度下同轴谐振腔的  $S_{21}$  曲线

由上述仿真结果表明,耦合环起始点到腔体轴心距离  $L=24\text{ mm}$ ,耦合环半径  $R=2\text{ mm}$ ,耦合环角度  $\theta=260^\circ$  时,同轴谐振腔具有较优越的电磁特性,因此,选择该尺寸作为用于密度测量的同轴谐振腔磁耦合环的设计尺寸。

3.2 实验与分析

采用 3.1 得出的优化模型参数,以粉末硅为加载物料,加载物料厚度为  $10\text{ mm}$ ,采用 HFSS 软件对谐振腔放入物料后的模型进行仿真,仿真结果如图 6 所示。

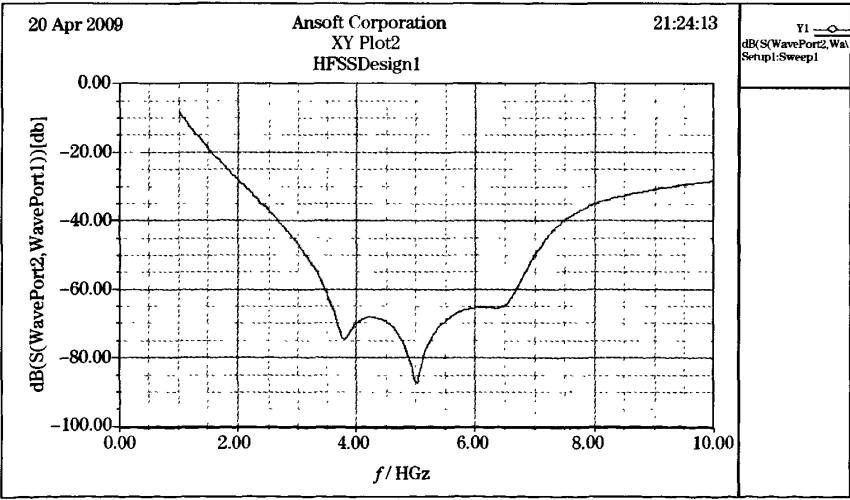


图 6 加载物料后同轴谐振腔  $S_{21}$  曲线

由图 6 可知,加载物料之后,同轴谐振腔  $S_{21}$  曲线的谐振特性明显改变,谐振频率发生明显变化,第一个尖峰的尖锐程度明显降低,表明加载的物料导致了谐振腔谐振过程中能量的损耗.该同轴谐振腔模型加载物料前后  $S_{21}$  曲线变化显著,具有较强

的分辨力,因此该模型适合应用于物料密度测量。

同轴谐振腔是具有储能与选频特性的微波谐振元件,如将样品引入腔内,将引起同轴谐振腔的谐振频率  $f$  和品质因数  $Q$  发生相应变化,通过测量谐振频率  $f$  的偏移和品质因数  $Q$  值的改变可以确

定材料的物理特性.因此,可以通过不断的改变加载物料的介电特性,记录通过 HFSS 仿真得到的谐振频率和品质因数来获得物料密度变化与谐振腔谐振参数变化的关系,从而推求出物料密度与谐振腔谐振参数的函数关系.

## 4 结 语

采用同轴谐振腔技术在线测量物料密度具有稳定性高和可操作性强的特点.本文采用 HFSS 仿真技术对同轴谐振腔的磁耦合环结构参数进行优化,得出了较优的结构尺寸.以粉末硅为实物模型,对加载物料后的同轴谐振腔模型进行仿真,仿真结果表明加载物料前后,同轴谐振腔的谐振频率变化明显,具有较强的分辨力,适合应用于物料密度测量,物料密度和同轴谐振腔谐振参数的关系需通过具体实验得出.

## 参考文献:

- [1] 陈世勇.微波在线密度检测技术的研究及应用[D].重庆:

重庆大学,2002.

- [2] 董树义.微波测量技术[M].北京:北京理工大学出版社,1990.
- [3] 张淑娥,李舒毅.微波谐振腔湿度测量同轴环耦合设计与实现[J].国外电子器件,2008,11:6-8.
- [4] 刘鹏宇,张玉虎,沈海根.基于 HFSS 设计同轴腔滤波器[J].电子器件,2007,30(2):430-432.
- [5] 廖承恩,陈达章.微波技术基础[M].北京:国防工业出版社,1979.
- [6] 顾茂章.微波技术[M].北京:清华大学出版社,1989.
- [7] 姜 宇.基于微波同轴谐振腔物料水分测量若干关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [8] 闫润卿.微波技术基础[M].3版.北京:北京理工大学出版社,2004.
- [9] 姜 宇,曹 军,杨国辉.IA-BP 算法在谐振腔物料水分测量中的应用[J].哈尔滨商业大学学报:自然科学版,2006,22(2):71-75.

(上接 531 页)

技术组合.通过延长 PAC 的吸附时间或增大 PAC 投量,均可以提高苯胺的去除效果.另外预氧化和 PAC 联用技术可以大大提高苯胺的去除率.在实际处理中应根据应急水厂的实际情况及供水安全性和经济性原则来确定最佳的应急方案.

## 参考文献:

- [1] 王东红,原盛广,马 梅,等.饮用水中有毒污染物的筛查和健康风险评估[J].环境科学学报,2007,27(12):1937-1943.
- [2] 翟平阳,刘玉平,倪艳芳,等.松花江水中优先污染物的筛选研究[J].北方环境,2000,3:19-21.
- [3] CHEN G, DUSSERT B W, SUFFET I H. Evaluation of granular activated carbons removal of methylisoborneol to below odor threshold concentration in drinking water[J]. Water Research, 1997,31(5):1155-1163.
- [4] 崔福义,李伟光,张 悦,等.哈尔滨气化厂(达连河)供水系统应对硝基苯污染的措施与效果[J].给水排水,2006,32

(6):13-17.

- [5] 崔福义.城市给水厂应对突发性水源水质污染技术措施的思考[J].给水排水,2006,32(7):7-9.
- [6] 陈忠林,马 军,李圭白,等.受硝基苯污染松花江原水的应急工艺研究[J].中国给水排水,2006,22(13):1-5.
- [7] 张晓健.松花江和北江水污染事件中的城市供水应急处理技术[J].给水排水,2006,32(6):6-9.
- [8] LI L, QUINLIVAN P A. Effects of activated carbon surface chemistry and pore structure on the adsorption of organic contaminants from aqueous solution[J]. Carbon, 2002,40(12):2085-2100.
- [9] 赵志伟,崔福义,张震宇,等.粉末活性炭吸附去除水源水中硝基苯的优选试验[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2007,23(1):134-137.
- [10] 张金松.饮用水二氧化氯净化技术[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [11] 张晓彦,王广智,李伟光,等.生物增强活性炭滤池的反冲洗方式研究[J].哈尔滨商业大学学报:自然科学版,2009,25(2):146-149.

## HFSS 视频培训课程推荐

HFSS 软件是当前最流行的微波无源器件和天线设计软件, 易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))是国内最专业的微波、射频和天线设计培训机构。

为帮助工程师能够更好、更快地学习掌握 HFSS 的设计应用, 易迪拓培训特邀李明洋老师主讲了多套 HFSS 视频培训课程。李明洋老师具有丰富的工程设计经验, 曾编著出版了《HFSS 电磁仿真设计应用详解》、《HFSS 天线设计》等多本 HFSS 专业图书。视频课程, 专家讲解, 直观易学, 是您学习 HFSS 的最佳选择。



### HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程, 是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装, 可以帮助您从零开始, 全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装, 更可超值赠送 3 个月免费学习答疑, 随时解答您学习过程中遇到的棘手问题, 让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

### 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, 可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线, 让天线设计不再难...

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



### 更多 HFSS 视频培训课程:

- **两周学会 HFSS —— 中文视频培训课程**

课程从零讲起, 通过两周的课程学习, 可以帮助您快速入门、自学掌握 HFSS, 是 HFSS 初学者的最好课程, 网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/1.html>

- **HFSS 微波器件仿真设计实例 —— 中文视频教程**

HFSS 进阶培训课程, 通过十个 HFSS 仿真设计实例, 带您更深入学习 HFSS 的实际应用, 掌握 HFSS 高级设置和应用技巧, 网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/3.html>

- **HFSS 天线设计入门 —— 中文视频教程**

HFSS 是天线设计的王者, 该教程全面解析了天线的基础知识、HFSS 天线设计流程和详细操作设置, 让 HFSS 天线设计不再难, 网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/4.html>

- **更多 HFSS 培训课程**, 敬请浏览: <http://www.edatop.com/peixun/hfss>

## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、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](http://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相关培训课程和 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讲授,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>