

车载鞭天线电磁特性及耦合度的仿真研究

俞集辉,马晓雷

(重庆大学高压与电工新技术教育部重点实验室,重庆 400030)

摘要:天线是现代汽车上经常使用的设备之一,研究天线电磁特性受车体影响的情况和多部天线间的干扰情况是十分重要的。文中建立了逼真的汽车模型,利用以有限积分法为基础的 CST 微波工作室对模型上不同位置的鞭天线电磁特性及多部天线间的耦合度进行了仿真研究,最终通过仿真结果分析出最佳的天线位置。分析过程和所得到的结果可作为汽车电磁兼容研究及车载天线设计的手段和依据。

关键词:车载天线;有限积分技术;电磁特性;耦合度

中图分类号:TP391.9 文献标识码:A

Simulation of Electromagnetic Character and Coupling Degree of Vehicle Whip Antennas

YU Ji-hui, MA Xiao-lei

(Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

ABSTRACT: Antennas have become a frequently used component in modern vehicles. It is very important to research the electromagnetic character of antenna affected by vehicle body and the interference among the antennas. In this paper, a lifelike vehicle model was constructed, then the electromagnetic character of whip antenna at different position on model and the coupling degree among antennas are simulated by using CST based on FIT technology. The best antenna position was obtained by simulation results at last. The analysis process and simulation results can be regarded as the way and means for vehicle electromagnetic compatibility research and vehicle antenna's design.

KEYWORDS: Vehicle antennas; FIT technology; Electromagnetic character; Coupling degree

1 引言

随着当今汽车工业的发展,对汽车安全性、舒适性和功能性要求的不断提高,各种各样的广播、无线通讯、卫星和雷达系统等设备被运用在汽车之上,伴随这些设备而来的是不同安装位置、不同工作频率,不同类型的天线在汽车上的广泛使用^[1]。车体会对安装在其上的天线电磁特性产生影响,通过仿真来分析这些影响,从而选择合理的天线安装位置对改善天线性能是至关重要的。另外,当车辆上安装多部天线时,准确预测天线间干扰的程度,通过对天线安装位置的优化来减少干扰也是汽车电磁兼容设计中的重要问题之一。

车载天线相对于单纯的天线研究有其特殊性,考虑到车体结构的影响,天线必须结合车体共同进行分析,分析的难点在于天线结构十分精细,电尺寸小,而车体尺寸大,属于电大尺寸。文献[3~5]分别利用矩量法(MoM),时域有限差

分法(FDTD)对车体上的单一线天线的电参数进行了分析,文献[6]中用 FDTD 法分析了飞机体上的线天线间的耦合问题。总的来说,针对车载天线的仿真研究中,车体模型设置都很简单,分析的是位置固定天线的相关问题。本文中,建立了逼真的汽车模型,着重分析了汽车上不同安装位置处鞭状天线电参数的变化情况,并提出最佳安装位置。另外分析了汽车上工作频率不同的天线间的干扰情况,通过天线耦合度的分析来实现天线位置的优化。文中的仿真工具选用的是 CST 微波工作室。其算法基础是有限积分法,下面先介绍其算法原理。

2 有限积分法原理

有限积分技术(Finite Integration Technique, FIT)是由 T. Weiland 等人于 1977 年提出的,这种电磁场数值计算方法是建立在对麦克斯韦积分方程组离散处理的基础之上的^[2]。首先对计算空间进行离散化处理,即将计算区域划分成图 1 所示的成对出现的网格 G 和复合网格 \bar{G} 所组成的网格。在图

1 中, \hat{e} 表示网格 G 某棱边上的电场沿该棱边的积分, 也就是相邻两网格之间的电压。 \hat{a} 表示网格 G 某面上的电通密度在该面上的积分, 即该面上的电通。同理, \hat{h} 和 \hat{b} 表示的分别是 G 上的磁压和 G 上的磁通。

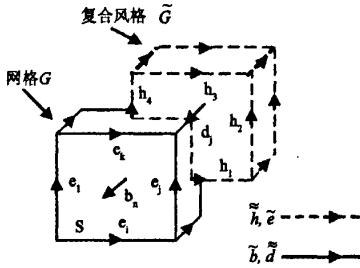


图 1 空间离散网格和场量分布

对于法拉第电磁感应定律:

$$\int \vec{E}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{l} = - \iint_S \frac{\partial}{\partial t} \vec{B}(\vec{r}, t) \cdot d\vec{S} \quad (1)$$

其中 l 表示 S 面上四条棱边组成的闭合环路, e_i, e_j, e_k 和 e_l 为相邻两网格点间的电压, 可以得到:

$$e_i + e_j - e_k - e_l = - \frac{d}{dt} b_n \quad (2)$$

同理可以得到麦克斯韦积分方程组的其它三个方程的离散形式。

如果在每一个网格的各个面上都写出这样的方程, 就能构成矩阵方程组:

$$C\hat{e} = - \frac{d}{dt} \hat{b} \quad (3)$$

$$\bar{C}\hat{h} = - \frac{d}{dt} \hat{d} + \hat{j} \quad (4)$$

$$S\hat{b} = 9 \quad (5)$$

$$\bar{S}\hat{d} = q \quad (6)$$

其中 $C(\bar{C})$ 和 $S(\bar{S})$ 可看作是网格 $G(\bar{G})$ 中对应麦克斯韦方程组中旋度算子和散度算子的矩阵算子, \hat{j} 是电流算子。

电(磁)压和电(磁)通量通过材料矩阵 $M_e M_\mu$ 和 M_o 联系起来:

$$\hat{d} = M_e \hat{e} \quad \hat{h} = M_\mu \hat{b} \quad \hat{j} = M_o \hat{e} \quad (7)$$

本文是在时域内解算网格方程, 要对时间轴进行离散, 运用的是蛙跳算法, 如图 2 所示。

在蛙跳算法中, 电场磁场在时间顺序上交替抽样, 抽样时间间隔彼此相差半个时间步, 根据这个算法, 网格方程重写为

$$e^{n+1/2} = e^{n-1/2} + \Delta t M_s^{-1} [\bar{C} M_\mu^{-1} b^n + f_s] \quad (8)$$

$$b^{n+1} = b^n - \Delta t C e^{n+1/2} \quad (9)$$

式中, n 代表时间步, Δt 是时间步长, 满足以下条件就能保证

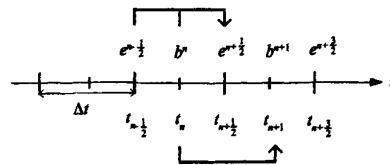


图 2 蛙跳算法图示

迭代稳定:

$$\Delta t \leq \left(c \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}} \right)^{-1} \quad (10)$$

FIT 法的特点是不需要矩阵求逆, 保证了可计算的区域大, 另外结合局部加密技术, 可以确保逼真车体模型上鞭天线的精确仿真得以快速的进行。

3 建模仿真分析

3.1 汽车模型和天线模型的建立

以典型轿车车体为原型, 建立用于电磁仿真的车体模型如图 3 所示, 车体的外部尺寸为 $5.03\text{m} \times 1.88\text{m} \times 1.44\text{m}$, 为进行电磁仿真, 对模型进行了必要的简化。车体上的细小空洞, 接缝被填满。车体的曲面结构由多块平面构成, 这样可减少数值仿真时曲面逼近所带来的误差。车厢内部保留前后座椅和驾驶盘这些部件, 忽略其它细小构件的影响。引擎箱和行李箱建为金属实体。车体材料如车身, 支柱, 顶蓬, 驾驶盘等设为良导体, 车轮胎, 前后座椅设置为相对介电系数 $\epsilon_r = 2.3$, 相对磁导率 $\mu_r = 1$ 的绝缘材料。车窗的影响不考虑。车体内外的计算区域均为真空。按上述建立的模型既保留了原车的特征, 又减少对计算机内存的需求, 加快仿真速度并且对结果的精确度影响不大。

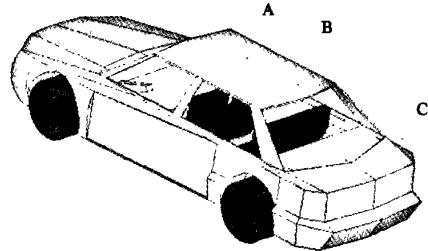


图 3 三维电磁仿真实体模型

车载天线为鞭状天线, 文中涉及的工作频率从甚高频的 100MHz 到特高频的 900MHz , 模型建为一个 $\lambda/4$ 单极天线。天线底端选择高斯脉冲源激励, 激励源函数的时域形式为:

$$E(t) = \exp\left(-\frac{4\pi(t - t_0)^2}{\tau^2}\right) \quad (11)$$

τ 决定了脉冲的宽度, 通过选择它可以激励出满足需要的频率范围。这里是取 $f = 2.1/\tau$, 此时高斯脉冲频谱振幅下降到直流分量振幅的 $\exp(-1.1\pi) \approx 3.14\%$, 定为高斯脉冲

的最高频率 f_{max} ,根据本文中天线的使用频率,当取 $\tau = 1.9993\text{ns}$ 时,频率上限可达到1050MHz,覆盖了天线的使用频率范围,可用于文中的天线计算。确定了频率上限,空间离散网格的尺寸由 $\delta = \lambda/N$ 确定,其中 λ 为计算频率上限对应的波长。网格尺寸的选择既要考虑精度要求,也要考虑计算资源的限制,一般取 $N \geq 10$,就满足数值色散对空间离散间隔的要求,当取 $N = 10$,相应离散网格的最大尺寸大致在3.0cm。整个计算区域离散网格数达到六百四十万个左右。

3.2 不同位置鞭天线仿真分析

选择通讯天线的安装位置,既要方便汽车的正常行驶,又要使天线特性受车体影响最小。首先考虑的GSM频段的900MHz鞭状天线,拟安装位置如图3所示,分别位于车顶篷中心(A处),顶篷后边沿处(B处),后行李箱右侧(C处)。因为六百万以上的离散网格数量计算起来有困难,所以对激励源和天线附近区域的结构采用0.1cm的密网格划分,而在其余计算区域采用较稀疏的网格划分,按不同网格设置计算的天线反射参数如图4所示。

可看出,网格尺寸设置为 $\lambda/8$ 时的反射系数曲线与网格尺寸设置为 $\lambda/10$ 时的反射系数曲线基本一致,平均误差小于0.2dB,说明结果已经收敛。所以对激励源和天线附近区域以外的计算区域网格尺寸均取 $\lambda/8$,这样,总网格数量降低到400万个左右,计算可以较快进行。

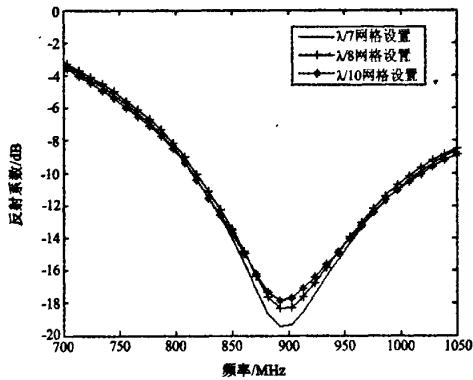


图4 不同网格设置反射参数比较

天线增益方向图是反映天线特性的重要电参数,三种不同安装位置的天线增益方向图计算结果如图5~7所示。为方便比较,方向图绘于直角坐标中,绘制出仰角 $\theta = 88^\circ$,频率900MHz的鞭状天线水平面增益方向图。 $\Phi = 90^\circ$ 时,辐射方向为坐标的 $+y$ 方向,即汽车的正后方, $\Phi = 270^\circ$ 时,辐射方向为坐标的 $-y$ 方向,为汽车的正前方。

对于安装在顶篷中心的天线来说,由图5可看出,增益值曲线最大值在局部区域为1.2dB,最小值在局部区域为-1.2dB,当 Φ 从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内变化时围绕0值波动,方向图曲线基本平滑,比较符合全方向天线对水平方向图特性要求。当天线安装在顶篷边,顶篷对天线的镜像作用减弱,再加上边缘绕射和车子C柱的影响,增益方向图曲线发生变化,

图6中当 Φ 在 $180^\circ \sim 360^\circ$ 范围内,增益方向图曲线相对图5中的增益方向图曲线波动略微增大,但图线趋势基本一致,而当 Φ 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围时,即在车顶篷后边缘和C柱的方向上,增益方向曲线产生较大波动,在最小值-2.1dB到最大值4dB之间波动,方向图曲线在这个方向上已不是十分均匀平滑。当天线安装在车后箱上时,由图7可看出增益方向图局部产生较大变化,曲线值在 $280^\circ \sim 325^\circ$ 之间变得很小,为-11dB左右,这是由于此方向刚好是汽车成员箱的位置,由于车体的遮挡影响,使天线的全方向辐射特性在这个方向上恶化。根据以上分析,可以看出,天线安装在车顶棚中心位置时,天线的全方向辐射特性保持的最好,因此,车顶棚中心是最佳的安装位置。

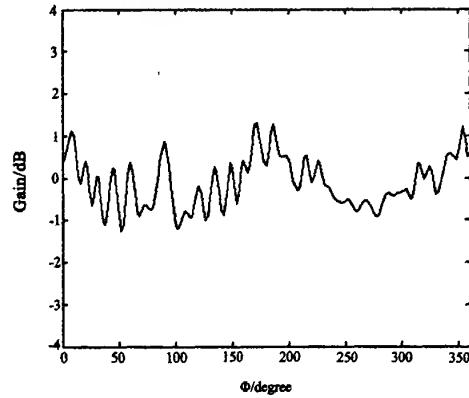


图5 车顶篷中心(A处)鞭状天线水平增益方向图

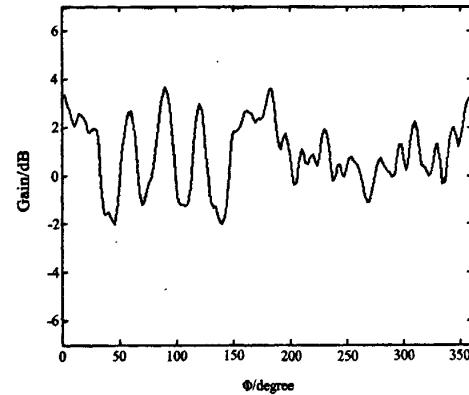


图6 车顶篷后边沿(B处)鞭状天线水平增益方向图

3.3 多天线耦合度分析

汽车上安装多部天线时,天线间会产生干扰,这种干扰用天线耦合度来表示,通过预测耦合度的大小,可以优化敏感天线的安装位置,从而提高天线间电磁兼容性。考虑多天线系统如图8所示,其中1天线为900MHz鞭天线,作为发射天线,2~4天线为100MHz鞭天线,作为敏感天线。目的是通过耦合度分析找到2~4位置哪个为最佳安装位置。

共址多部天线可以看为广义多端口网络,每副天线对

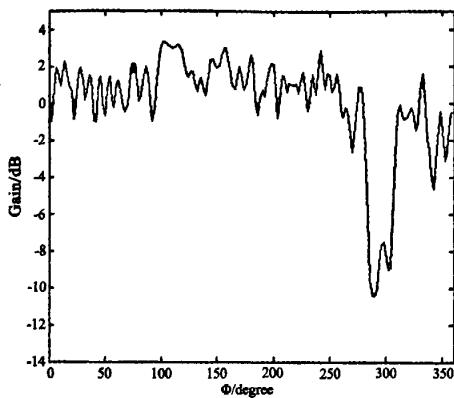


图7 车后箱上(C处)鞭状天线水平增益方向图

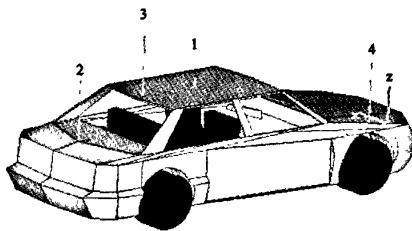


图8 车上多部鞭状天线安装位置图

应广义网络的一个端口,天线馈线等效为端口传输线,这样天线间的耦合度就转化为求解天线馈线参考面间的耦合度。天线馈线参考面间的耦合度可以用多端口网络S参数来表示^[6]。根据广义网络定义,n端口网络各端口归一化入射波和反射波关系可由S参数矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中 S_{ii} 表示除 i 端口外,其余各端口匹配时 i 端口的反射系数, S_{ij} 表示除 j 端口外其余端口匹配时, j 端口到 i 端口的传输系数,天线耦合度计算公式为:

$$L(\omega) = 20 \lg |S_{ij}| \quad (13)$$

图8所示模型中有四部车载天线,可以等效为四端口网络。每部天线都选用高斯脉冲源激励,天线被依次激励,各端口的时域输入输出信号被记录,再通过傅立叶变换得到频域内的结果。因为考虑发射天线1对敏感天线2~4的干扰情况,所以只考虑完整S参数矩阵中 S_{21}, S_{31}, S_{41} 的值,相应的耦合度计算结果如图9所示。由图9可看出,各敏感天线在其谐振频率附近(天线长为 $\lambda/4$ 奇数倍)时耦合度达到局部最高点,如100MHz,300MHz,500MHz等等点处,说明敏感天线在谐振频率附近可以耦合到更多的能量。另外,天线间的间距直接影响到耦合度的大小,模型中天线1~3间距最小,天线

1~4间距最大,反映在耦合度曲线图中,在整个频段内,1~3天线间耦合度最大,1~4天线耦合度最小,平均后者比前者值小10dB左右,1~2天线间距大小居中,所以耦合度曲线值分布中间。由于汽车模型比较复杂,受安装位置处车体影响,天线间能量传播存在入射场,反射场和绕射场等等,所以耦合情况也很复杂,这就是耦合度曲线在局部出现了交叉的原因。总体来说,可以看出若敏感天线放在位置4处,与发射天线间耦合度最小,因此,位置4是敏感天线最佳安装位置。

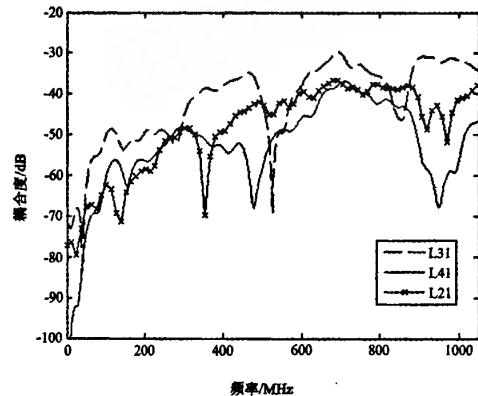


图9 发射天线1与敏感天线2~4耦合度曲线图

4 结论

本文建立了用于电磁计算的全尺寸仿真汽车模型和车载鞭天线模型,分析了鞭状通信天线在汽车不同安装位置时辐射方向图的变化情况及多天线间的耦合情况,得到如下结果:

1)鞭天线增益方向图受车体影响较大,由于车体的反射和散射影响,会恶化附近安装的鞭天线的全方向特性,比较来说最佳安装位置应为车顶篷中心处。

2)敏感天线在谐振频率处会从发射天线耦合更多的能量,天线间距直接影响天线间耦合度的大小,在有限空间内天线位置应尽量远离,可减少天线间耦合度的大小。

3)对仿真模型的必要简化并结合局部加密网格技术,可以在合理的计算时间内获得满足精度要求的结果。

文中的建模方法和仿真研究过程可以运用到不同的车型和不同类型车载天线的研究中去,从而为车载天线的设计和汽车电磁兼容设计提供有益的指导。

参考文献:

- [1] M L Djordjevic, B M Notaros. Highly efficient large - domain moment - method analysis and CAD of radio - frequency antennas mounted on or situated in vehicles [C]. Vehicular Technology Conference, 2000. IEEE VTS - Fall VTC 2000. 52nd, Volume 5, ?24 - 28 Sept. 2000:2373 - 2377.

(下转第319页)

dinate dynamic analysis[J]. Journal of Solid & Structures, 197, 8: 709 - 731.

- [4] 刘延柱,洪嘉振,杨海兴. 多刚体系统动力学[M]. 北京:高等教育出版社,1980.
- [5] 李普,孙应鸿,陈南. 应用模态坐标求解天线系统动力学响应[J]. 东南大学学报(英文版),2002, 18(4): 306 - 309.
- [6] 刘明治,高桂芳. 空间可展开天线结构研究进展[J]. 宇航学报,2003, 24(1): 82 - 87.
- [7] 李洲洋,陈国定,王三民,肖勇. 大型可展开天线的展开过程仿真研究[J]. 机械设计与制造,2006, vol. 7: 67 - 69.

(上接第 232 页)

- [5] A Renyi. On measures of entropy and information[C]. in: Proceedings of the Fourth Berkeley Symposium on Math. Statist. Prob. Vol. 1, 1960, University of California Press, Berkeley, 1961. 547 - 561.
- [6] C Tsallis, Possible generalization of Boltzman - Gibbs statistics [J]. J. Statist. Phys. 1988, 52: 479 - 487.
- [7] C Tsallis, R S Mendes and A R Plastino. The role of constraints within generalized non - extensive statistics[J]. Phys. A. 1998,



[作者简介]

朱大炜(1982 -),男(汉族),江苏南通人,硕士研究生,车辆工程专业,主要研究方向为多体系统动力学;

朱平(1966 -),男(汉族),浙江宁波人,工学博士,教授,博导,主要研究方向为汽车结构性能数值仿真、车身轻量化设计制造以及制造质量控制技术;

缪建成(1968 -),男(汉族),江西上饶人,博士研究生,副教授,主要研究方向:机械设计技术,机械振动。

(上接第 284 页)

- [2] T Weiland. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six - component Fields[J]. Electronics and Communications AEUE, 1977, 31(3): 116 - 120.
- [3] Panayiotis A Tirkas and Constantine A Balanis. Finite Difference Time - Domain Method for Antenna Radiation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, March 1992, 40(3).
- [4] M Hussein, A Sebak. Application of the Finite - Difference Time - Domain Method to the Analysis of Mobile Atennas. [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, August 1996, 45(3).
- [5] R G Jobava, F G Bogdanov, A L Cheonjian, S Frei. Analysis of influence of vehicle bodyshell on the characteristics of wire antennas using a new MoM - based EM/EMC solver[C]. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Society, June 2003, 4(22 - 27): 831 - 834.

- [6] S V Georgakopoulos, C A Balanis, C R Birtcher. Cosite Interference Between Wire antennas on Helicopter Structures and Rotor Modulation Effects: FDTD Versus Measurements[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Aug. 1999, 41, (3): 221 - 233.



[作者简介]

黎燕(1976 -),女(汉族),广西人,博士生,讲师,研究方向:智能控制、图像处理等;

樊晓平(1961 -),男(汉族),浙江人,博士,教授,博士生导师,研究方向:智能控制、机器人控制、虚拟现实等。

(上接第 296 页)

的合理性将有所帮助。

参考文献:

- [1] 祝江汉,凌云翔. 指挥自动化系统效能仿真环境研究[J]. 计算机工程与科学,2003, 25(1): 58 - 61.
- [2] 朱海滨,等. 分布式系统原理分析与设计[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1999.
- [3] 程健庆,等. 海上区域 C3I 系统仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2000, 12(3): 259 - 261.
- [4] 罗雪山,等. C3I 系统理论基础[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2000.
- [5] 张翠侠,毛少杰. 采用半实物仿真方法建立 C3I 系统仿真试验

床[J]. 计算机仿真,2002, 19(6): 100 - 102.

- [6] 古西睿,等. 指挥自动化效能评估系统中的仿真引擎研究[J]. 计算机工程与科学,2004, 26(3): 90 - 93.



[作者简介]

周丰(1972 -),男(汉族),江苏连云港人,博士,副教授,研究方向为信息挖掘、指控系统等;

鲜明(1970 -),男(汉族),四川南充人,博士,副教授。研究方向为网络安全、电子信息系统仿真等;

肖顺平(1964 -),男(汉族),江西南昌人,博士,教授,博士生导师。研究方向为电子信息系统仿真、新体制雷达等。

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>