

· 结构技术 ·

中图分类号: TN823; O351.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-7859(2010)05-0079-05

天线风洞试验阻塞比的仿真计算与分析

高延龙, 杜平安, 杜 强

(电子科技大学机械电子工程学院, 成都 610054)

摘要: 基于标准 κ - ε 湍流模型和不同进口风速, 利用计算流体动力学方法分别对平板天线和抛物面天线进行风洞试验的仿真计算, 分析了天线工作面及背风面的风载, 在此基础上得出最佳的阻塞比范围, 并对其成因进行了详细分析。计算结果表明: 实体天线模型的截面积不应超过风洞试验段的4%。对于抛物面天线, 只是它的阻力系数大于平板天线, 但在阻力系数随阻塞比变化的趋势上是一样的。而且阻塞比对背风面载荷的影响比迎风面更为严重。

关键词: 风洞; 阻塞比; 标准 κ - ε 湍流模型; 风载荷; 仿真

Simulation and Analysis of the Blockage Ratio for Antenna Wind Tunnel Test

GAO Yan-long, DU Ping-an, DU Qiang

(School of Mechatronics Engineering, UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The numerical simulation of a plane antenna and a circular aperture parabolic antenna wind tunnel test is performed using the software of FLUENT, based on standard κ - ε model and varied inlet velocities. The wind loads on the forward and back antenna are analyzed to gain a better zone of the blockage ratio, and then its forming reason is found. The simulation results show that cross-sectional area of the antenna model should be less than 4 percent of that of wind tunnel. The trend that the drag coefficient of the circular parabolic antenna follows the blockage ratios is similar to that of the plane antenna, just the former drag coefficient is higher than the latter one. The blockage ratio affects the leeward more seriously than the windward.

Key words: wind tunnel; blockage ratio; standard κ - ε model; wind loads; simulation

0 引言

工作在露天的天线, 风载是必须考虑的一种主要载荷。风载会造成反射面和背架变形, 影响反射面精度, 引起偏焦和指向误差^[1]。

目前风载获得的途径主要有风洞试验、现场实测、经验公式计算和计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)数值计算。采用经验公式计算误差较大, 直接在大气中进行现场实测不方便甚至不大可能, 对于较重要的天线结构风载, 通常用天线模型进行风洞试验方式获得^[2-3]。然而, 在风洞试验中, 风洞口径有限, 要保证风洞内风场不受洞壁影响以使其流动特性与实际风场相似, 模型的大小就要根据风洞口径进行适当选取。随着CFD技术的不断改进, 数值计算方法在天线风载计算中得到越来越多的应用。

本文运用CFD方法, 使用FLUENT软件, 基于Reynolds时均纳维-斯托克斯方程(N-S方程), 采用

标准 κ - ε 湍流模型对天线上的风压分布进行了数值模拟, 利用有限体积法和压力校正算法(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations, SIMPLE)来实现非线性离散化方程组的离散和迭代求解, 选取不同口径的计算区域模拟风洞试验, 找出合适的阻塞比(实体天线模型的截面积与风洞试验段的截面积之比为阻塞比), 为进行数值计算及风洞试验提供依据^[4]。

1 风压数值计算原理

本文为近地面的风场, 流体为低速、不可压缩的粘性牛顿流体, 其基本控制方程 N-S 方程为基于质量守恒原理的连续方程^[5-6]

$$\nabla U = 0, U = (u_1, u_2, u_3) \quad (1)$$

和基于动量守恒的运动方程

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \nabla(\rho u_i U) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2)$$

流体内部不同尺度的涡造成了湍流物理量的脉动, 对于脉动量的影响, 目前广泛采用的方法是时间平均法, 即把湍流运动看作由平均流动和脉动流动叠加而

基金项目: 军事预研基金资助项目

通信作者: 高延龙 Email: 742733516@qq.com

收稿日期: 2010-01-22 修订日期: 2010-04-20

成,即

$$U = \bar{U} + U' \quad (3)$$

将式(3)代入瞬时状态下的连续方程(1)和动量方程(2),并对时间取平均,得到湍流时均流动的控制方程如下

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (5)$$

式中: \bar{u} 表示时均值; u' 表示脉动值; $\overline{u'}$ 表示脉动值的时均值; $u_i (i=1,2,3)$ 分别为在直角坐标 $x(x_1)$ 、 $y(x_2)$ 、 $z(x_3)$ 方向的分量。

由式(4)、式(5)构成的方程组共有 5 个方程,和 N-S 方程相比,新增了 6 个 Reynolds 应力,加上原来的时均未知量,方程组共有 10 个未知量,因此方程组不封闭,必须引入湍流模型(方程)才能进行求解。

κ - ε 湍流模型是目前应用最广的湍流模型^[7]。本文采用标准 κ - ε 模型^[8],它是由 Launder 和 Spalding 在 1972 年提出的, κ 和 ε 对应的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_k + G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (7)$$

式中: $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数; σ_κ 和 σ_ε 分别是湍动能 κ 和湍流耗散率 ε 对应的 Prandtl 数;根据 Launder 等的推荐值及后来的试验验证;模型常数取值如下

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_{3\varepsilon} = 0, \sigma_\kappa = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3;$$

$$G_k = \nu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

是由于平均速度梯度引起的湍动能 κ 的产生项;

G_b 是由于浮力引起的湍动能 κ 的产生项,对于不可压流体, $G_b = 0$;

Y_M 代表可压湍流中脉动扩张的贡献,对于不可压流体, $Y_M = 0$;

对于固体壁面对流场计算的影响,本文选用标准壁面函数(Standard Wall Functions)来修正 κ - ε 模型,以模拟壁面附近的复杂流动。

数值模拟依据的控制方程是连续方程和纳维-斯托克斯方程(N-S 方程),不考虑热交换,即屏蔽能量方程。流体介质是低速空气,具有不可压缩性,密度为常数,材料参数使用缺省值。

对控制微分方程离散时,采用 FLUENT 软件默认的设置,即采用有限体积法将微分方程分解成一系列关于多个变量的非线性耦合代数方程组,采用一阶迎风格式离散对流项,用具有有一阶精度的中心差分格式离散扩散项。对于压力-速度耦合方程,采用 SIMPLE 算法实现各联立方程的解耦及压力场和速度场的校正。

2 天线风载荷的数值计算

2.1 计算模型

本文采用 2 种计算对象:

(1) 平板天线,尺寸 1 000 mm × 1 000 mm,厚度为 50 mm;

(2) 抛物面天线, $f/d = 0.25$, $d = 1 000$ mm,厚度为 50 mm。

计算区域(风洞)长 12 m,天线工作面面向入风口,置于计算区域总长的前端 1/3 处,截面位置处于计算区域中心。简化过的计算模型如图 1 所示。

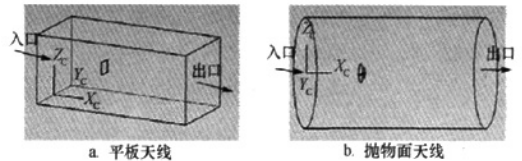


图 1 在 UG 中生成的计算模型

混合网格具有很好的灵活性和适应性,易于进行网格自适应,故本文在 GAMBIT 中采用混合网格对其周围流体划分网格。在流域中采用由面到体的逐级划分,对天线进行细化,远离天线的区域网格逐渐变稀。网格纵剖面如图 2 所示。

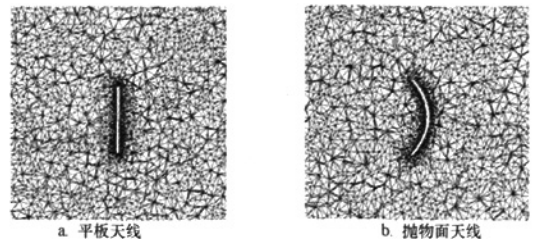


图 2 在 GAMBIT 中生成的网格纵剖面

2.2 边界条件

入口边界条件:来流剪切流采用均布定常风,速度进口边界条件(velocity-inlet)。

出口边界条件:采用完全发展出流边界条件(out-flow)。
计算域左右两侧、顶底:无滑移的壁面条件(wall)。天线表面:无滑移的壁面条件(wall)。

2.3 计算结果

利用 FLUENT6.1 对上述模型进行计算,得到风速分别为 10 m/s、20 m/s 时,平板天线和抛物面天线分别所受的风载荷数据见表 1~表 2。

表 1 平板天线所受风载的计算数据

倍于 天线 边长	阻 塞 比 /(%)	V=10 m/s					V=20 m/s				
		正面	背面	侧面	总风载	阻力系数	正面	背面	侧面	总风载	阻力系数
2	25.00	50.749	135.492	0.034	186.275	3.012	189.649	536.691	0.091	726.431	2.936
3	11.11	56.510	65.276	0.015	121.801	1.969	212.860	256.480	0.030	469.370	1.897
4	6.25	57.239	48.826	0.013	106.079	1.715	216.689	189.565	0.026	406.280	1.642
5	4.00	57.801	42.784	0.011	100.597	1.626	219.490	165.273	0.019	384.782	1.555
6	2.77	58.109	39.645	0.011	97.765	1.581	221.054	152.697	0.017	373.768	1.511
7	2.04	58.434	37.842	0.011	96.287	1.557	222.668	145.530	0.017	368.215	1.488
8	1.56	58.957	37.446	0.010	96.413	1.559	224.706	143.829	0.013	368.548	1.490
9	1.23	58.844	36.592	0.011	95.447	1.543	224.185	140.531	0.017	364.733	1.474
10	1.00	59.196	36.206	0.011	95.413	1.543	225.844	138.866	0.018	364.727	1.474
11	0.82	59.251	35.748	0.011	95.010	1.536	226.131	137.419	0.018	363.568	1.470

表 2 抛物面天线所受风载的计算数据

倍于 天线 边长	阻 塞 比 /(%)	V=10 m/s					V=20 m/s				
		正面	背面	侧面	总风载	阻力系数	正面	背面	侧面	总风载	阻力系数
2	25.00	49.899	116.110	-0.031	165.977	3.417	191.765	468.822	-0.151	660.437	3.399
3	11.11	51.014	55.707	-0.019	106.702	2.197	195.345	222.658	-0.097	417.905	2.151
4	6.25	51.249	41.492	-0.018	92.722	1.909	196.627	164.357	-0.090	360.894	1.857
5	4.00	51.282	36.203	-0.017	87.468	1.801	196.860	142.380	-0.086	339.153	1.746
6	2.77	51.245	33.548	-0.017	84.776	1.745	196.837	131.740	-0.084	328.493	1.691
7	2.04	51.256	32.554	-0.015	83.795	1.725	196.796	127.585	-0.079	324.303	1.669
8	1.56	51.251	31.623	-0.017	82.857	1.706	196.897	123.874	-0.083	320.689	1.650
9	1.23	51.196	31.254	-0.018	82.432	1.697	196.655	122.458	-0.084	319.030	1.642
10	1.00	51.172	31.132	-0.017	82.286	1.694	196.623	122.006	-0.085	318.544	1.639
11	0.82	50.937	30.790	-0.016	81.710	1.682	195.612	120.648	-0.080	316.181	1.627

天线受到的风载荷由摩擦阻力与压差阻力所组成。本文分析的天线均属于非流线型物体,摩擦阻力比压差阻力小很多,因此主要考虑压差阻力。由于天线完全与风向对称,则只有迎风阻力,而没有升力和侧向力。图 3 是根据表 1 得出的阻力系数随阻塞比变化的趋势曲线。

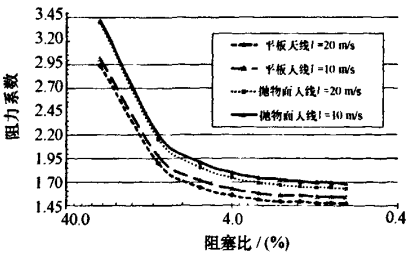


图 3 阻力系数随阻塞比变化曲线图

由图 3 变化曲线可以看出,平板天线和抛物面天线在阻力系数随阻塞比变化的趋势上是相似的,只是前者的阻力系数小于后者。并且当天线与风洞的阻塞比小于 4% 时,阻力系数趋于稳定,变化不明显。这样

的趋势也并不随进口风速的变化而发生明显的变化。而且,这种采用数值分析的方法实现天线风洞试验的数值化,是可行的^[9]。

3 计算结果分析

现以两天线中的抛物面天线为分析对象,进口风速采用 20 m/s,分析阻塞比对风载产生的影响。

天线在气流中的情况如图 4 所示。气流从前方向天线时,开始气流沿着天线表面,但到达某一点便与天线分离,在天线后面形成充满漩涡的尾流。由于漩涡消耗了部分能量,在漩涡区形成了负压。而在天线前面,流体速度由于物体阻挡而减小,甚至变为零,气流动能转化为压能,故在天线的前面形成了正压。这样,天线前后有一压力差,气流就对天线作用有一合力,此合力在气流方向投影即为风的迎面阻力(忽略摩擦阻力)。

根据表 1 中的数据,画出进口风速为 20 m/s 时,抛物面天线迎风面、背风面及总载荷(迎面阻力)随阻塞比的变化趋势曲线,如图 5 所示。天线侧面所受风

载荷很小,故而忽略不计。

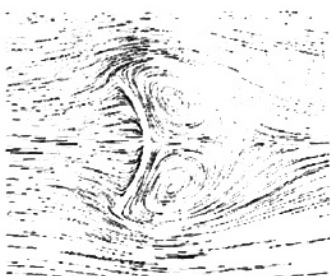


图4 天线附近的气流流线图

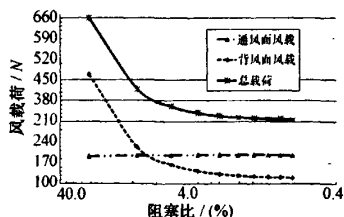


图5 天线风载荷阻塞比变化曲线图

由图5可以看出,随着阻塞比的变化,迎风面风载变化很小,最大幅度仅为2.62%,天线总载荷主要随着背风面载荷的变化而变化。

现在通过 FLUENT 仿真结果的后处理分析,分别研究天线迎风面和背风面风载随不同阻塞比的变化情况。图6是阻塞比分别为25%和4%时的天线周围的风速矢量图。

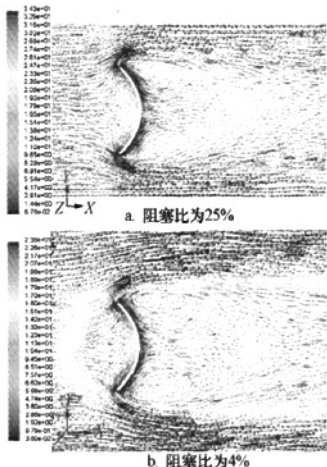


图6 天线周围风速矢量图

对比图6a、6b不难发现,在迎风面附近的风速大小和方向几乎是一样的,从下面的图7天线迎风面的压力云图上也可以看出,虽然阻塞比发生了很大变化,但天线迎风面的载荷几乎没什么变化。

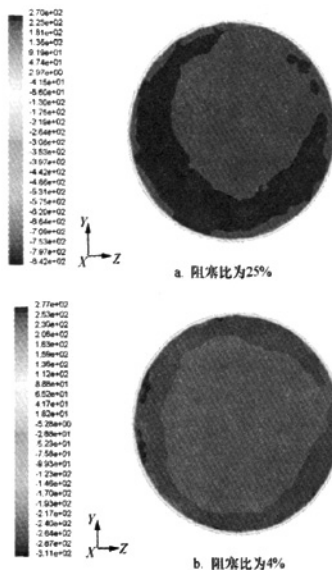


图7 天线迎风面的压力云图

接下来研究背风面风载的变化。背风面风载的大小与尾流有关。尾流的尺寸越大,湍动能就越大,背风面风载也就越大。

对于尾流部分,图6a中由于阻塞比较大,天线距离风洞壁较近,洞壁干扰大,壁压信息强^[10],气流脱离天线之后随即碰到风洞壁。风洞壁的反射与压缩的干扰作用,使一部分气流转到天线背面,形成较大的漩涡区。尾流尺寸增加,故背面风载荷增加。图6b中,由于阻塞比较小,气流脱离天线的分离点也比较靠后,脱离后沿速度方向向外自由散开,只有一小部分气流在天线背面附近形成较小的漩涡。

尾流的漩涡以湍动能的形式作用在天线上。下面的图8是阻塞比分别为25%和4%时的天线背风面的湍动能云图,可以看出当阻塞比为25%时,天线背风面的湍动能明显要大于阻塞比为4%时。综合上面图6尾流的情况,由此可以解释图5中天线背风面载荷曲线随阻塞比变化的原因。

4 结束语

本文利用 CFD 方法,采用 FLUENT6 软件平台,基于标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型来模拟风洞试验,研究了不同阻塞比下天线风载荷的变化情况,并从中找出了其变化的原因。主要结论如下:

(1) 实体天线模型的截面积小于风洞试验段的4%为佳。这样能较可靠的保证测试数据的准确性。这相对于参考书上5%~8%更为合理。

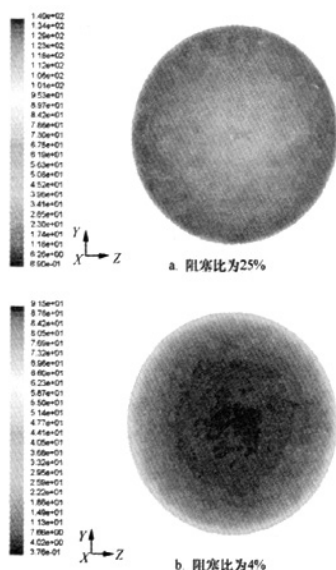


图8 天线背风面的湍动能云图

(2) 对于抛物面天线,只是它的阻力系数大于平板天线的阻力系数,而在阻力系数随阻塞比变化的趋势上是一样的。

(3) 天线阻力系数随阻塞比变化的趋势,并不受进口风速的影响。

(4) 不同的阻塞比主要影响天线背风面的载荷,而对迎风面的风载影响很小,几乎可以忽略不计。如果只是考虑天线迎风面风载的话,阻塞比可以取很大,取 25% 亦可。

参考文献

- [1] 叶尚辉,李在贵. 天线结构设计[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社,1986.
Ye Shanghui, Li Zaigui. Design of antennae structure[M]. Xi'an: Northwest Communication Engineering Institute Press,1986.
- [2] 秦云,张耀春,王春刚. 计算流体动力学在建筑风工程中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(8):977-981.
Qin Yun, Zhang Yaochun, Wang Chungang. Application of computational fluid dynamics in building wind engineering[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(8): 977-981.
- [3] 李潜. 飞行器动态气动特性研究的问题[J]. 实验流体力学,2008,22(B12):111-120.
Li Qian. Progress and problem of dynamic characteristics of flight vehicles[J]. Experiments and Measur in Fluid Me-

chanics, 2008,22(B12):111-120.

- [4] 陈谟. 如何使用 CFD 来确定风洞实验模型的缩比尺寸[J]. 宇航学报,2007,28(3):594-597.
Chen Mo. How to determine the scale ratio of wind tunnel test models by CFD[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(3):594-597.
- [5] 雷林,孙鹏. 湍流入口条件对 CFD 计算结果影响的数值分析[J]. 舰船科学技术,2009,31(7):32-36.
Lei Lin, Sun Peng. The numerical analysis of the impact of the onflow entrance condition on CFD calculation[J]. Ship Science and Technology, 2009,31(7):32-36.
- [6] John D, Anderson J R. Computational fluid dynamics (The Basics with Applications)[M]. Beijing: Tshinghua University Press, 2002.
- [7] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
Wang Fujun. Analysis of computational fluid dynamics-the principle and applications of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [8] 白桦,胡兆同,胡庆安. 塔桅结构三维定常风场风洞试验及数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报,2008,25(1):60-64.
Bai Hua, Hu Zhaotong, Hu Qingan. Wind tunnel test on 3D steady wind fow field of tower mast structure and numerical simulation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(1):60-64.
- [9] 梅启元,胡长明,秦国良. 地面雷达数值风洞技术实现方法[J]. 电子机械工程,2008,24(5):47-50.
Mei Qiyuan, Hu Changming, Qin Guoliang. Application of numerical wind tunnel for ground based radar[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2008, 24(5):47-50.
- [10] 袁建昆,韩延良,周杰,等. 圆柱绕流洞壁干扰修正研究[J]. 空气动力学学报,1994,12(2):219-224.
Yuan Jiankui, Han Yanliang, Zhou Jie, et al. The corrected investigation of wall interference on cylinder flows[J]. Acta Aerodynamica Sinica, Jun, 1994, 12(2):219-224.

高延龙 男,1978 年生,硕士研究生。研究方向为风载荷的数值分析。

杜平安 男,1962 年生,教授,博士生导师。研究方向为数字化设计、仿真与制造等。

杜强 男,1969 年生,博士研究生。研究方向为计算流体力学。

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),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>