

矩形波导窄边倾斜缝隙天线阵的设计

隋立山,柴舜连,毛钧杰

(国防科技大学 电子科学与工程学院 湖南 长沙 410073)

摘要:介绍了矩形波导窄边倾斜缝隙天线阵设计的方法。简要阐述了矩形波导窄边倾斜缝隙天线阵列的相关理论,并使用HFSS软件对单个缝隙结构,无限阵列环境下缝隙单元的导纳参数进行数值仿真。然后按照仿真获得的等效谐振电导曲线,运用泰勒线元法综合求出非谐振式48元波导窄边倾斜缝隙天线阵,并对整个线阵进行了仿真和实测。仿真和实测结果表明,该天线阵列具有低副瓣、宽带宽、高增益等特点,并且实测结果与仿真吻合良好。

关键词:矩形波导;窄边;缝隙阵;泰勒线阵;谐振电导

中图分类号:TN822

文献标识码:B

文章编号:1004-373X(2008)03-014-03

Design of the Antenna Array of Inclined Slots in the Narrow Wall of a Rectangular Waveguide

SUI Lishan, CHAI Shunlian, MAO Junjie

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China)

Abstract: A kind of Tyler linear antenna array of inclined slots in the narrow wall of a rectangular waveguide is introduced here. The paper reviews the theory of antenna array with the structure of slots in the narrow wall briefly and simulates a single slot's conductance as well as the ones in the surrounding of infinite array by using HFSS. Then, the whole array, which designed to be a Tyler 48 cells excitation and nonresonant linear array based on the calculated curve, is simulated and measured. The simulated and measured results show that the antenna array has the capability of low sidelobe, wide bandwidth and high gain. Furthermore, there is a good agreement between simulation and measure.

Keywords: rectangular waveguide; narrow wall; slot arrays; tyler linear arrays; resonant conductance

波导缝隙天线阵结构紧凑、体积小、重量轻,被广泛应用于雷达及通讯领域,其中波导窄边缝隙行波阵列天线因其易于实现低副瓣乃至超低副瓣性能而受到越来越多的工程应用的重视。本文重点研究了波导窄边缝隙天线阵的分析与设计,采用有限元及等效网络理论对波导窄边缝隙天线阵作了精确的分析与仿真,对一般波导窄边缝隙天线阵的设计具有实际工程指导意义。

1 波导缝隙天线理论

波导窄边斜缝如图1所示,由推广的巴俾涅(Babinet)原理可知,理想缝隙的互补结构为相同尺寸的片状对称振子。假设片状对称振子的远场与圆柱对称振子的远场相同,根据对偶性原理,可得理想缝隙的远场为:

$$\begin{cases} E_{\theta} = j \frac{120}{\eta} U_m \frac{e^{-jkr}}{r} f(\theta, \varphi) \\ H_{\varphi} = -j \frac{120}{\eta} U_m \frac{e^{-jkr}}{r} f(\theta, \varphi) \end{cases} \quad (1)$$

其中 U_m 为缝隙间等效电压, $f(\theta, \varphi)$ 为对称振子的归一化方向图函数。

对比理想振子天线方向图,可知理想缝隙天线方向图与之相同,但 E 面和 H 面交换。

与理想缝隙不同,波导缝隙是开在有限尺寸的波导壁

上,对于窄边斜缝,缝隙切入宽边一定的深度,因而实际的窄边斜缝天线的主平面方向图较之理想缝隙天线存在较大的差异。并且,由于波导缝隙仅向外空间单向辐射,其辐射功率近似等于理想缝隙辐射功率的一半,从而其辐射电导也是理想缝隙的一半。

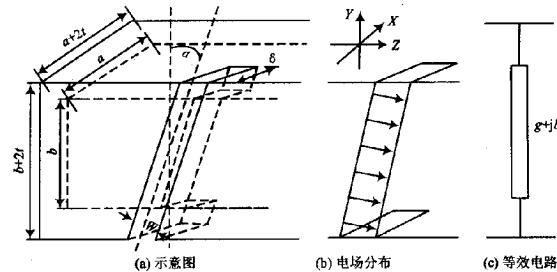


图1 波导窄边缝隙

在分析设计中,特别是对于大型天线阵列来说,以理想缝隙模型近似波导缝隙所带来的误差不是很明显,因而在以下的分析中,仍将波导窄边斜缝当作理想缝隙。由图1(b)缝隙口径的电场分布及式(2)可以得到斜缝阵列辐射电场的两个分量为:

$$\begin{cases} E_{\theta} = \sum_{n=1}^N E_n(n) \cos(\alpha(n)) \\ E_{\varphi} = \sum_{n=1}^N E_n(n) \sin(\alpha(n)) \end{cases} \quad (2)$$

收稿日期:2007-07-23

式中 $\alpha(n)$ 为第 n 个缝隙的倾斜角。

波导缝隙天线阵大致可以分为谐振式(驻波阵)和非谐振式(行波阵)两类。非谐振式缝隙阵的缝隙间距小于 λ_g (λ_g 为波导波长) 或大于(小于) $\lambda_g/2$, 波导末端接匹配负载, 缝隙由行波激励能在较宽的频带内保持良好的匹配, 由于缝隙之间存在线性相差, 方向图主瓣偏离缝隙面的法线, 主瓣最大值方向偏离法线夹角为 $\theta_0 = \arcsin(\varphi_0/kd)$, 其中 k 为自由空间波的传播常数, d 是相邻缝隙的中心间距, φ_0 是相邻缝隙的激励相位差。

由于窄边缝隙的间距一般略小于(或大于) $\lambda_g/2$, 相邻缝隙激励有约 180° 的相移。为了使各缝隙辐射在主瓣方向同相叠加, 应当采取措施, 使相邻缝隙再获得 180° 的附加相移。采用斜缝交替倾斜的办法可以实现获得 180° 的附加相移的目的。

2 缝隙阵列的设计

2.1 缝隙参数分析及确定

确定每个缝隙的等效导纳值是缝隙阵列天线设计最为基础也是最为重要的步骤, 运用史蒂文森(A. F. Stevenson)法^[1], 能比较严格地推导计算出多种波导缝的等效电导值, 波导窄边斜缝的等效电导理论式如式(3)所示:

$$g = 0.131 \frac{k}{\gamma} \frac{\lambda^4}{a^3 b} \left[\sin \alpha \cdot \frac{\cos(\frac{\pi \gamma}{2k} \sin \alpha)}{1 - (\frac{\gamma}{k} \sin \alpha)^2} \right]^2 \quad (3)$$

式中 $\gamma = k \sqrt{1 - (\lambda_0/\lambda_c)^2}$, a 为宽边长, b 为窄边长, α 为缝隙倾斜角, λ_c 为波导截止波长。

然而, 这种计算仅仅适用于单个缝隙, 并且假设缝隙的谐振长度 $L = \lambda/2$, 忽略缝隙宽度波导壁厚以及切入宽边深度带来的影响。工程中依据这样的数据的设计已经越来越不能满足设计指标要求。

在缝隙阵列天线中缝隙间的互耦是影响天线指标的又一个重要因素。1978年, Elliott^[3]首次公开发表了计入互耦效应的波导宽边缝隙阵设计方法, 国内张仲西^[4]先生也于5年后提出了计入互耦的窄边缝隙阵设计方法, 在数值算法日趋成熟, 硬件的速度效率日益成熟的今天, 采用文献[5]提到的周期边界条件模型(图2), 其中 master 与 slave 平面相位相差 $\Delta\varphi = 4\pi d/\lambda_g$, 应用有限元的方法仿真无限阵列环境下波导的缝隙导纳, 可以得到比较符合实际的缝隙电导值。

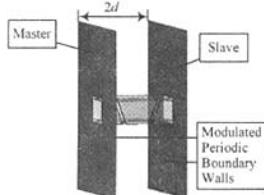


图2 周期边界模型

图3为10 GHz下采用WR90波导($a=22.86\text{ mm}$, $b=10.16\text{ mm}$, $t=1.27\text{ mm}$)得到的谐振电导曲线, 其中(a)曲线为式(3)理论计算曲线, (b)曲线为单缝仿真值, (c)曲线为缝隙间距 $d=0.45\lambda_g$ 时的仿真值。

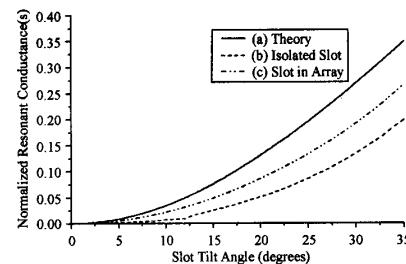


图3 缝隙倾斜角与谐振电导对应关系

对比三条曲线, 不难看出, 在谐振电导很小的情况下, 三种方法获得的缝隙的归一化谐振电导曲线存在很大的差异, 在设计缝隙阵列天线时, 本文采用和实际最为接近的周期边界模型获得的数据曲线来设计每个缝隙的具体参数。

2.2 阵列参数的确定

2.2.1 泰勒线阵的设计

N 元线性相位渐变等间距线阵方向图阵因子为:

$$f_a(\varphi) = \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{j\varphi n} \quad (4)$$

其中 A_n 为各元激励的大小, $\varphi = kd \cos \theta + \varphi_0$, 泰勒线元方向图零点位置由式(5)确定^[1]:

$$x_n = \begin{cases} \pm \sigma \sqrt{A^2 + (\frac{1}{n} - \frac{1}{2})^2} & 1 \leq n \leq \bar{n} \\ \pm n & \bar{n} \leq n \leq \infty \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\sigma = \bar{n} / \sqrt{A^2 + (\bar{n} - \frac{1}{2})^2}$ 为波瓣展宽因子, $A = \frac{1}{\pi} \cosh^{-1} R$, R 为主副瓣比, 即 $R = 10^{-SLL/20}$ 。零点位置在谢昆诺夫单位圆上的对应根为 $Z_n = e^{j2\pi x_n/N}$, 令 $Z = e^{j\varphi}$, 阵因子可以写成:

$$f_a(\varphi) = \sum_{n=1}^N A_n Z^{n-1} = A_N \prod_{n=2}^N (Z - Z_n) \quad (6)$$

将 $\prod_{n=2}^N (Z - Z_n)$ 多项式展开, Z 的各次幂系数即为相对激励幅度。

2.2.2 确定缝隙单元归一化谐振电导

根据窄边缝隙等效电路及传输线理论, 非谐振式波导窄边斜缝阵等效电路如图4所示。

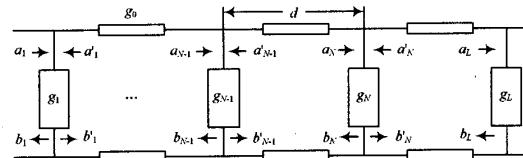


图4 非谐振式波导窄边缝隙阵等效电路

其中 g_0 是传输线的特性导纳, a_n 为二端口输入电平, b_n 为二端口输出电平, $g_1, g_2 \dots g_N$ 为缝隙的归一化等效谐振电导, $g_L = 1$ 为匹配吸收负载的归一化等效电导。

设匹配负载吸收总输入功率的 η , 没有反射。以输入功率归一化, 则 $a_L = \sqrt{2\eta}, b_L = 0$ 。

之前已经求得了每个辐射缝隙源的相对口径分布 A_n , 则第 n 个缝隙的归一化辐射功率为(忽略波导传输损耗及储能):

$$p_n = \frac{(1-\eta)A_n^2}{A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_N^2} \quad (7)$$

又:

$$p_n = \frac{1}{2} |a_n + b_n|^2 g_n \quad (8)$$

则:

$$g_n = \frac{2(1-\eta)A_n^2}{|a_n + b_n|^2 (A_1^2 + A_2^2 + \dots + A_N^2)} \quad (9)$$

如果把包含每个缝隙的每段波导等效为一个二端口网络, 由末端倒推, 求解出每个网络的输入、输出电平, 就能由式(9)得到每个波导缝隙的等效谐振电导, 之后就可以参照相应的设计曲线进行线阵的设计。

3 交叉极化分析

忽略式(1)中 $E_\theta(n)$ 的常数项, 并将图 1(b)所示电场分解, 式(2)可以写为:

$$\begin{cases} E_\theta = \sum_{n=1}^N A(n) \cos(\alpha(n)) f(\theta, \varphi) e^{j\varphi} \\ E_\varphi = \sum_{n=1}^N A(n) \sin(\alpha(n)) f(\theta, \varphi) e^{j\varphi} \end{cases} \quad (10)$$

其中 $\varphi_1 = kd \cos \theta + \varphi_0$, $\varphi_2 = kd \cos \theta + \varphi_0'$, $A(n), \alpha(n)$ 分别为第 n 个缝隙的相对激励和倾斜角, φ_0, φ_0' 为 E_θ 和 E_φ 分量相邻缝隙激励的相位差。

(1) 主极化: E_θ 分量同相相加, 则:

$$\varphi_1 = kd \cos \theta + \frac{2\pi}{\lambda_g} \left(\frac{\lambda_g}{2} - d \right) = 2n\pi \quad (11)$$

$$\theta_1 = \arccos \left(\frac{(n+d/\lambda_g - 1/2)\lambda}{d} \right) \quad (12)$$

(2) 交叉极化: E_φ 分量同相相加, 则:

$$\varphi_2 = kd \cos \theta + \frac{2\pi}{\lambda_g} \left(\frac{\lambda_g}{2} - d \right) + \pi = 2n\pi \quad (13)$$

$$\theta_2 = \arccos \left(\frac{(n+d/\lambda_g - 1)\lambda}{d} \right) \quad (14)$$

式(11)~式(14)中, $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。

按照 $f_0 = 10$ GHz, $a = 22.86$ m, $b = 10.16$ mm, $d = 0.45\lambda_g$ 参数代入式(12), 式(14)进行计算, 得到如下解:

$n=0$ 时, $\theta_1 \triangleq 94.8^\circ$, 主极化电平同相叠加, 实际上, θ_1 就是天线主波束的辐射方向; $\theta_2 \triangleq 157.3^\circ$, 交叉极化电平同相叠加, 在这个辐射方向会出现一个较大的副瓣, 但是他可以通过调节间距把他挤出可见范围来进行抑制。

$n=1$ 时, 只有 $\theta_2 \triangleq 41.0^\circ$ 有解, 这个方向也会出现一个较大的副瓣, 但这个方向的极化是波导结构所固有的, 无法通过改变间距来进行抑制。

在工程中, 往往不会仅使用单根缝隙线阵直接作为天线使用, 采用两根对称线阵构成一个新的子单元。在新构成的子单元中, 两个线阵平行放置, 激励端口在波导同一侧并激励反相, 相对应开有缝隙的位置缝隙的倾斜方向相反, 倾斜角度相同。应用此单元或者采用更复杂的对消而组成更大的波导缝隙面阵, 就能有效交叉极化分量。

4 测试结果

采用 BJ100($a=22.86$ m, $b=10.16$ mm, $t=1$ mm)二级波导管, 缝隙中心间距 $d=0.45\lambda_g$, 缝隙宽度 $\omega=1.6$ mm, 48 元素勒线阵($n=3$, SLL=−20 dB), 辐射效率 90% 的设计参数及指标, 加工非谐振式波导窄边缝隙线阵(加工误差: $\Delta d=\pm 0.05$ mm, $\Delta \omega=\pm 0.03$ mm, 倾斜角 $\Delta \alpha=\pm 5'$, 切入宽边深度 $\Delta \sigma=\pm 0.03$ mm), 得到天线主要参数如图 5 所示。

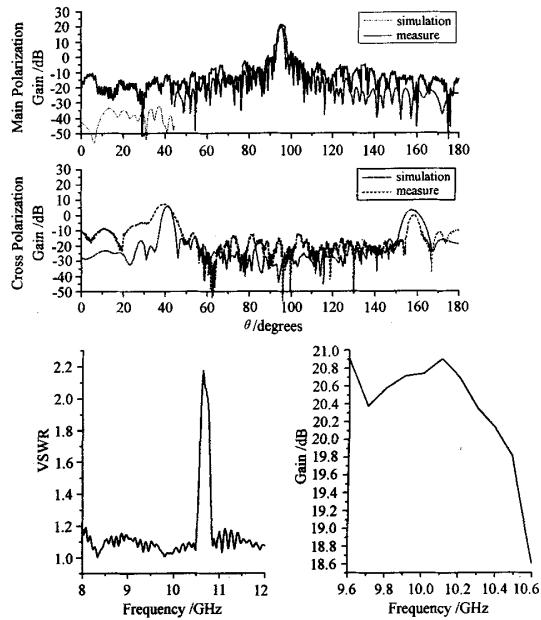


图 5 非谐振式波导窄边缝隙线阵实际测量结果

5 结语

本文分析研究了非谐振式波导窄边缝隙天线的相关理论, 给出了一般设计步骤, 在天线工程设计实践中有较高的指导价值和实用价值。该天线阵是验证性试验阵, 仿真及实测结果表明: 该阵列与理论分析吻合, 对于更为大型的波导缝隙面阵, 通过采用更为复杂的馈电结构及单元子阵的应用, 可以综合出各种需要的辐射波形。但是, 波导天线性能对由于机械加工带来结构尺寸的误差比

(下转第 20 页)

多问题有待进一步的研究和解决^[8,9]。

(1) 带噪混合信号 ICA 问题。实际环境中,混合声信号不仅包括多个声源的声音,还要考虑环境噪声的影响,尽管目前有一些算法在含噪情况下有良好的性能,但由于噪声的种类繁多,包括非高斯、有色、乘性、脉冲等,在此情形下实现混合信号的分离,提取各源声信号是困难的。

(2) 欠定 (Under - Complete) ICA 问题。大多数的 BSS,ICA 研究都是假设传感器数大于源信号数目的情况。而如何求解传感器数目小于源信号数目的欠定问题是比较困难的。在 EEG 处理中就存在此情况,且在工程实际中,源信号个数可能会随时间动态变化,此时如何确定源信号个数及如何估计源信号都是亟待解决的问题。

(3) 全局收敛性问题。由于声信号分离是一个时空域上的问题,因此存在着空间上的盲分离和时域上的反卷积双重任务,使得算法在回响环境中很容易陷入局部最小值,导致算法性能下降。

(4) 混合系统是时变的。当信源是运动状态时,信号混合系统就是一个时变系统。而目前的算法是针对非时变系统设计,要得到实用的盲分离算法,必须设计出能够跟踪时变的自适应算法。

6 结语

独立分量分析在信息处理诸多领域都显示出独特的优势,展现出诱人的发展前景,值得我们对其理论和算法进一步研究和完善。将理论上的突破与实际应用相结合,

会对信息处理以及神经网络的发展起到积极的促进作用。

参 考 文 献

- [1] Hyvärinen A, Karhunen J, Oja E. Independent Component Analysis[M]. John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [2] Comon P. Independent Component Analysis: A New Concept[J]. Signal Processing, 1994, 36(3): 287 - 314.
- [3] Hyvärinen A. A Fast Fixed - point Algorithm for Independent Component Analysis[J]. Neural Computation, 1997, 7 (9): 1 482 - 1 483.
- [4] Bell A J, Sejnowski T J. An Information - maximization Approach to Blind Separation and Blind Deconvolution [J]. Neural Computation, 1995, 7(6): 1 129 - 1 159.
- [5] Cardoso J F. Infomax and Maximum Likelihood for Blind Source Separation [J]. IEEE Signal Processing Letters, 1997, 4(4): 112 - 114.
- [6] Hyvärinen A, Oja E. Independent Component Analysis by General Nonlinear Hebbian - like Learning Rules[J]. Signal Processing, 1998, 14(3): 301 - 313.
- [7] Cardoso J F, Souloumiac A. Blind Beamforming for Non - Gaussian Signals [J]. IEE Proc. - F, 1993, 140 (6): 362 - 370.
- [8] 张贤达, 保铮. 盲信号分离[J]. 电子学报, 2001, 29(12A): 1 766 - 1 771.
- [9] 马建仓, 牛奕龙, 陈海洋. 盲信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

作者简介 梁端丹 女, 1982 年出生, 湖北大悟人, 硕士研究生。主要研究方向为智能信息处理。

韩 政 男, 1965 年出生, 河南安阳人, 副教授, 研究生导师。主要研究方向为通信与信息系统、智能信息处理。

(上接第 16 页)

较敏感, 主要体现在缝隙宽度 ω 上, 要获得比较理想的设计, 需采用精密加工, 并尽可能提高精度。



图 6 线阵实物照片

参 考 文 献

- [1] 康健. 天线原理与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [2] 易大方, 任朗, 汪文秉. 壁厚对矩形波导窄边斜缝导纳特性的影响[J]. 无线电工程, 1992, 22(2): 9 - 16.
- [3] Elliot R S. The Design of Small Slot Arrays [J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 1978, Ap - 26(2): 214 - 218.
- [4] 张仲西. 高效率低副瓣波导窄边缝隙阵列的设计[J]. 雷达与导航, 1983(4): 40 - 48.
- [5] John C Young, Jiro Hirokawa, Makoto Ando. Analysis of Rectangular Waveguide, Edge Slot Array With Finite Wall Thickness [J]. IEEE Trans. Antennas Propag., 2007, 55(3): 812 - 819.
- [6] 肖科, 田立松. 探针激励矩量法分析[J]. 现代电子技术, 2006, 29(2): 110 - 112.

作者简介 隋立山 男, 1981 年出生, 新疆哈密人, 现就读国防科技大学硕士研究生。主要从事微波天线方面的研究。

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>