

# HL-2M 装置低杂波天线子波导设计与波谱计算

白兴宇<sup>1</sup>, 曾建尔<sup>2</sup>, 饶军<sup>2</sup>

(1. 清华大学, 北京 100084; 2. 核工业西南物理研究院, 成都 610041)

**摘 要:** HL-2M 装置低杂波天线被设计为多栅阵列天线, 天线由 4 行波导组成, 每行 32 个子波导。子波导宽度为 0.99cm, 壁厚 0.3cm, 相邻子波导相差取 90°。计算得到的反射系数  $R=0.0261$ ,  $N_0$  峰值中心为 2.375。边缘等离子体电子密度梯度对波谱峰值中心位置没有影响, 波峰相对宽度则随之增大而减小。在边缘等离子体电子密度梯度  $\nabla n_e = 2 \times 10^{12} \text{cm}^{-4}$  的情况下, 相邻子波导相差为 81° 时, 天线方向性系数最好, 为 0.2010; 反射最小, 为 0.0223, 此时波谱峰值中心为 2.125。

**关键词:** HL-2M 装置; 低杂波天线设计; 波谱计算

**中图分类号:** TL62<sup>+</sup>4

**文献标识码:** A

## 1 引言

低杂波是磁约束聚变装置最主要的电流驱动手段之一, 天线是其馈能的核心部分。当前国际上低杂波多使用多结波导阵列天线属第二代天线, 其特点为由一个共同的波源馈能, 在天线处将矩形非标波导 E 面均匀分割成几路扁波导, 再通过收缩扁波导宽边尺寸以改变各路的相位, 中国的 HL-1M、HL-2A、HT-7 等托卡马克装置都使用了这种天线。当然, 国际上最先进的还是第三代天线, 这种天线能对所有相邻子波导进行全相位控制, 从而可以随意调节波功率谱。当前流行的 PAM 天线<sup>[1]</sup>和 C-MOD 使用的低杂波新天线<sup>[2]</sup>对反射波的处理适当, 能够更好地保护天线。第三代低杂波天线依赖于高水平的加工工艺和大量的资金支持, 所以 EAST 低杂波天线只引用了小部分 PAM 的理念, 主体还是设计为多结波导阵形式。

HL-2A 装置是中国第一个具有轴对称偏滤器的大型托卡马克装置。为进一步满足物理实验的需求, 计划对其升级改造。改造后的装置称为 HL-2M 装置, 其大半径  $R$  从 1.65m 增加到 1.8m, 小半径  $r$  从 0.45 增加到 0.5m, 等离子体截面变成非圆截面, 初步设计拉长比  $\kappa$  为 1.6~1.8; 等离子体环电流  $I_p$

从 250~450kA 增加到 1.2MA。升级改造计划也包括对加热和电流驱动功率的加大, 其中, 低杂波功率从 1MW 增加到 2MW 或 4MW, 相应的低杂波窗口由 HL-2A 装置的  $\varnothing 600\text{mm}$  的圆形变化为 700mm×600mm 的矩形。HL-2A 低杂波天线沿用了 HL-1M 装置的设计<sup>[3-5]</sup>, 面对 HL-2M 更高的功率需求, 更大的天线窗口以及更高的等离子体参数, 需要重新设计。考虑国内现有的加工工艺水平和资金状况, HL-2M 装置的低杂波天线也设计为多结波导阵形式。

HL-2M 装置低杂波天线的设计工作包括子波导尺寸设计、波谱计算、相差分析、真空分析, 天线支撑结构设计, 天线结构设计以及等离子体内部的波功率沉积计算等多项内容。本文只是其中的一部分工作, 主要包括子波导尺寸设计, 波谱计算, 反射系数分析等内容。

## 2 计算原理和程序介绍

### 2.1 波谱计算原理简介

波谱计算原理<sup>[6]</sup>如图 1 所示, 将波传播过程中的电磁场分为三部分: 波导内部场、波导外到等离子体之间场、等离子体内部场。

收稿日期: 2008-11-20; 修订日期: 2009-04-27

作者简介: 白兴宇(1980-), 男, 辽宁省新民市人, 清华大学在读博士研究生, 研究方向: 波与等离子体耦合和加热工程技术。

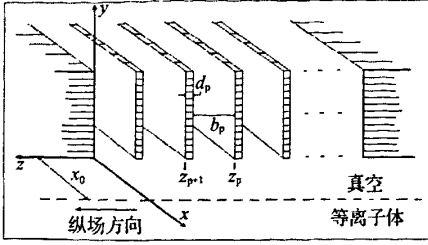


图1 波谱计算原理图

物理量说明:  $E_z^{ws}(x, z)$ 、 $B_y^{ws}(x, z)$ 、 $E_x^{ws}(x, z)$  分别为波导内部  $z$  向电场、 $y$  向磁感应强度、 $x$  向电场;  $E_z(x, z)$ 、 $B_y(x, z)$ 、 $E_x(x, z)$  分别为波导口到等离子体边缘之间的  $z$  向电场、 $y$  向磁感应强度、 $x$  向电场;  $k_0$ 、 $k_1$ 、 $k_\perp$  分别为波矢及其平行和垂直分量。

假设子波导高度远大于宽度, 波导内部场:

$$E_z^{ws}(x, z) = \sum_{p=1}^N e^{i\phi_p} \theta_p(z) \left\{ \sum_{n=0}^v (\alpha_{np} e^{ik_n x} + \beta_{np} e^{-ik_n x}) \cos \frac{n\pi(z-z_p)}{b} + \sum_{n=v+1}^\infty \beta_{np} e^{\gamma_n x} \cos \frac{n\pi(z-z_p)}{b} \right\} \quad (1)$$

$$B_y^{ws}(x, z) = -ik_0 \sum_{p=1}^N e^{i\phi_p} \theta_p(z) \left\{ \sum_{n=0}^v \frac{1}{ik_n} (\alpha_{np} e^{ik_n x} - \beta_{np} e^{-ik_n x}) \cos \frac{n\pi(z-z_p)}{b} - \sum_{n=v+1}^\infty \frac{\beta_{np} e^{\gamma_n x}}{\gamma_n} \cos \frac{n\pi(z-z_p)}{b} \right\} \quad (2)$$

$$E_x^{ws}(x, z) = -\frac{i}{k_0} \frac{\partial B_y}{\partial z} \quad (3)$$

其中,  $k_n = \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$ ;  $\gamma_n = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - k_0^2}$ ;

$\theta_p(z) = \begin{cases} 1 - z_p \leq z \leq z_p + b \\ 0 - \text{其他情况} \end{cases}$ ;  $v \geq 1$  为满足  $\left(\frac{v\pi}{b}\right)^2$

$< k_0^2 = \frac{\omega^2}{c^2}$  的最大值;  $\alpha_{np}$  为入射振幅, 为已知量;

$\beta_{np}$  为反射和消散系数, 为待定量。

从波导口到等离子体之间场的傅里叶表达式为:

$$E_z(x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} [\sigma(k_1) e^{ik_1 x} + \rho(k_1) e^{-ik_1 x}] e^{ik_1 z} dk_1 \quad (4)$$

$$B_y(x, z) = -k_0 \int_{-\infty}^{\infty} [\sigma(k_1) e^{ik_1 x} - \rho(k_1) e^{-ik_1 x}] e^{ik_1 z} \frac{dk_1}{k_\perp} \quad (5)$$

$$E_x(x, z) = -\frac{i}{k_0} \frac{\partial B_y}{\partial z} \quad (6)$$

其中,  $k_\perp^2 = k_0^2 - k_1^2$ ;  $Y(k_1)$  为反射率,  $Y(k_1)$

$= -\frac{\rho(k_1)}{\sigma(k_1)}$ , 且  $|Y(k_1)|^2 \leq 1$ ;  $\sigma(k_1)$  为耦合系数;  $\rho(k_1)$

为反射系数。

在二维冷等离子体模型下, 等离子体的内部场满足:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + k_\perp^2 \left(1 - \frac{x - x_0}{L}\right) E_z = 0 \quad (7)$$

式中,  $L = \frac{\varepsilon_0 m_e \omega_0^2}{e^2 dn_e / dx}$  为截止长度, 与等离子体电子

密度梯度  $dn_e / dx$  有关,  $dn_e / dx$  则由等离子体模型决定。

综合以上三部分场, 代入边界条件, 可得到功率谱:

$$P(k_0) = \begin{cases} 0 & |k_1| < k_0 \\ \frac{k_0 E_0^2}{\mu_0 c} \frac{|T|^2}{\sqrt{k_1^2 - k_0^2}} \frac{\text{Im}(Y)}{|1 - Y|^2} & |k_1| > k_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $T$  为与  $\alpha_{np}$ 、 $\beta_{np}$  有关的量, 表达式比较复杂。

## 2.2 参数介绍

根据上述导出的基本方程<sup>[7, 8]</sup>, 可以对满足 HL-2M 装置要求的有关低杂波系统的主要参数进行计算。在计算过程中主要有以下一些变量: 每层子波导数量  $N$ (个), 低杂波频率  $F_{\text{REGHZ}}$ (GHz), 等离子体边缘电子密度梯度  $D_{\text{NDX}}(10^{10} \text{cm}^{-4})$ , 相邻子波导相差  $D_{\text{ON}}(^{\circ})$ , 子波导宽度  $B_p(\text{cm})$ , 子波导壁厚  $D_p(\text{cm})$ 。原来的程序只能输出一个计算结果, 修改后的程序可以按照使用者意愿输出多个结果, 并能根据不同的循环方式修改成不同的形式。最主要的输出包括一个各参数的综合描述文件和一个波谱分布数据文件。

## 3 子波导尺寸选择和分析

考虑 HL-2M 装置窗口大小以及速调管数量, 天线后接输入窗口设计为  $4 \times 4$  结构, 这样方便每只速调管对应一层(4 管 2MW)或者半层(8 管 4MW),

子波导阵列设计为  $4 \times 32$  结构, 每个标准波导通过窄边扩展后分成 8 个子波导, 如图 2 所示。

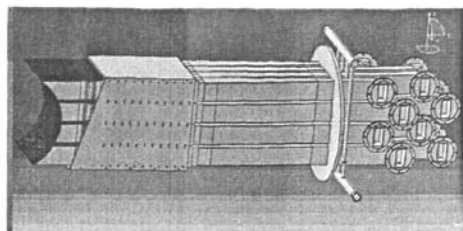


图 2 天线总体结构图

令  $N=32$ ,  $F_{\text{REGHZ}}=2.45$ ,  $D_{\text{NDX}}=200$ ,  $D_{\text{ON}}=90$ , 对  $B_p$  和  $D_p$  进行双重循环编程计算:  $B_p=0.46$ , 每次循环增加 0.03, 40 次,  $D_p=0.11$ , 每次循环增加 0.01, 40 次, 可以得到 1600 个结果, 编程序从结果里面选择适当的  $B_p$  和  $D_p$ 。

考虑机械加工的要求和合理的空间分配, 并考虑波谱分布和反射影响, 最终选择的参数为  $B_p=0.99$ ,  $D_p=0.30$ 。此时的反射系数为  $R=0.0261$ , 波谱分布如图 3 所示,  $N_0$  峰值中心为 2.375。

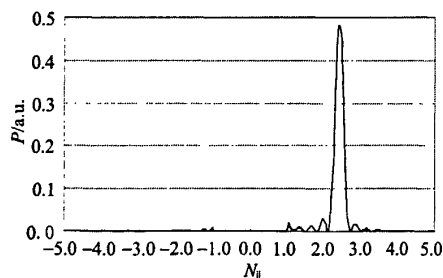


图 3 理论设计波谱分布

### 3.1 等离子体密度梯度影响

在编程计算时, 令  $N=32$ ,  $F_{\text{REGHZ}}=2.45$ ,  $B_p=0.99$ ,  $D_p=0.30$ ,  $D_{\text{ON}}=90$ 。将  $D_{\text{NDX}}$  作为变量, 程序设计如下:

$D_{\text{NDX}}=0$ , 每次循环增加 5, 共循环 200 次, 可以得到 200 个结果, 作出不同  $D_{\text{NDX}}$  条件下波谱图如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 电子密度梯度对波谱分布的影响主要集中在  $N_0$  峰相对宽度上, 总的来说, 电子

密度梯度越大,  $N_0$  峰相对宽度也就越窄。

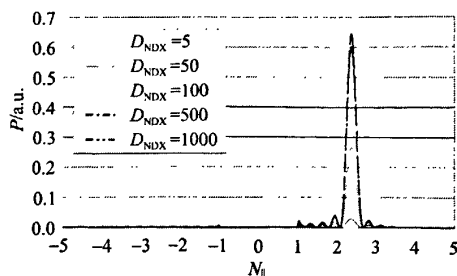


图 4 不同  $\nabla n_e$  下的波谱

### 3.2 相邻子波导相差影响

令  $N=32$ ,  $F_{\text{REGHZ}}=2.45$ ,  $B_p=0.99$ ,  $D_p=0.30$ ,  $D_{\text{NDX}}=200$ , 对  $D_{\text{ON}}$  在正负  $180^\circ$  之间的情形进行循环编程计算, 可以得到  $D_{\text{ON}}-R$ ,  $D_{\text{ON}}-\langle 1/N_0^2 \rangle$  以及  $D_{\text{NDX}}-N_{\text{limax}}$  图像, 其中,  $\langle 1/N_0^2 \rangle$  表示方向性系数, 定义为:

$$\langle 1/N_0^2 \rangle = \frac{\int_{N_0^{\text{acc}}}^{\infty} \frac{P(N_0)}{N_0^2} dN_0 - \int_{-\infty}^{N_0^{\text{acc}}} \frac{P(N_0)}{N_0^2} dN_0}{\int_{-\infty}^{\infty} P(N_0) dN_0} \quad (9)$$

式中,  $N_0^{\text{acc}}$  表示可近性条件, 可以用

$$N_0^{\text{acc}} = 1 + \frac{\omega_{pe}^2}{\Omega_e^2} = 1 + \frac{n_e m_e}{\epsilon_0 B_0^2} \bigg|_{\text{中心}} \quad (10)$$

来计算出实际数值。

对于 HL-2M 装置,  $B_0=2.6\text{T}$ 。在低杂波驱动状况下, 中心电子密度不高于  $6 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ , 代入式(10)中可得  $N_0^{\text{acc}} \leq 1.912$ 。

以此为基准, 对每个得到的波谱数据进行计算处理, 可以得到一系列的方向性系数。

相邻子波导相差对反射系数的影响如图 5 所示。从图 5 中可知, 在相邻子波导相差  $\Delta\phi$  变化时, 反射系数的变化非常大。当  $\Delta\phi=0^\circ$  时反射系数最大为 0.9356, 而当  $\Delta\phi=81^\circ$  时反射系数最小为 0.0223。

相邻子波导相差对方向性系数的影响如图 6 所示。从图 6 中可知, 方向性系数最大为 0.2010, 此时  $\Delta\phi=80^\circ$ ; 在其左边, 方向性系数下降剧烈, 而在其右边则下降相对平缓。

相邻子波导相差对波谱峰值位置的影响如图 7

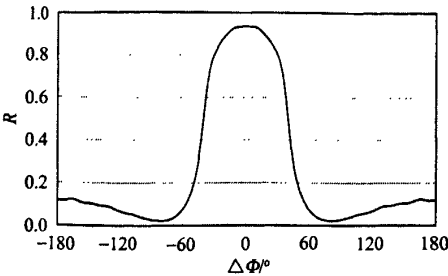


图5 相邻子波导相差对反射系数的影响

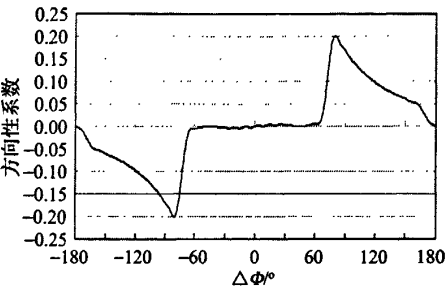


图6 相邻子波导相差对方向性系数的影响

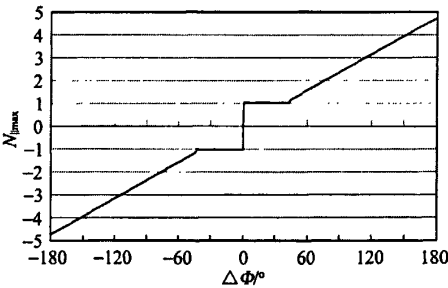


图7 相邻子波导相差对波谱峰值位置的影响

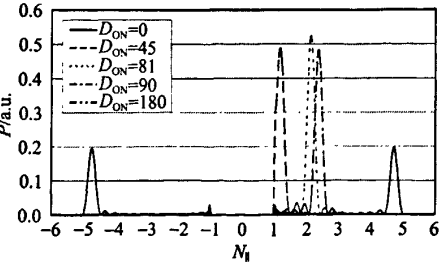


图8 不同相邻子波导相差下的波谱

所示,不同相邻子波导相差下的波谱如图8所示。从图7和图8可知,在 $\Delta\Phi=0\sim45^\circ$ 之间, $N_i$ 峰值基本不变,在 $\Delta\Phi=45\sim180^\circ$ 之间, $N_i$ 峰值基本上是线性变化的;而在 $\Delta\Phi=0\sim180^\circ$ 之间,波谱从对称到不对称再到对称,在 $\Delta\Phi=81^\circ$ 时这种不对称性达到最大。

4 小结

HL-2M 装置低杂波计划输出功率 2MW 或者 4MW,天线窗口为 600mm×700mm 矩形。设计的新天线为多结波导阵列,窗口 4×4 结构(四排四列),多结波导阵列为 4×32 结构,每个标准波导分成 8 个子波导。

子波导的参数如下:宽度为 0.99cm,壁厚为 0.3cm,而相邻子波导相差取 90°。经计算得到反射系数  $R=0.0261$ ,  $N_i$ 峰值中心 2.375。边缘等离子体电子密度梯度对波谱峰值中心位置没有影响,波峰相对宽度则随之增大而减小。边缘等离子体电子密度梯度  $\nabla n_e=2\times10^{12}\text{cm}^{-4}$  的情况下,相邻子波导相差为 81°时,天线方向性系数最好为 0.2010,反射最小为 0.0223,此时波谱峰值中心为 2.125。从上述计算得到的初步结果看,所选择的低杂波的设计尺寸,基本上能满足 HL-2M 装置进行大功率低杂波输送的要求。

对提供意见和建议的曾浩和陆志鸿老师,对提供 HL-2M 装置各参数指标的冉红和丁玄同老师表示感谢。

参考文献:

[1] Belo J H, Bibet Ph, Missirlan M, et al. ITER-like PAM launcher for Tore Supra's LHCD system [J]. Fusion Engineering and Design, 2005, 74: 283-288.  
[2] Bernaber S, Hosea J, Kung C. A thrid generation lower hybrid coupler [R]. PPPL-3638, UC-70.  
[3] 胡玉民, 赵海波, 段修明, 等. 用于托卡马克低混杂波电流驱动的多结波导阵天线 [J]. 原子能科学技术, 1998, 32(4): 289-293.  
[4] 焦一鸣, 石秉仁. HL-1 装置低杂波电流驱动波导阵列优化设计 [J]. 核聚变与等离子体物理, 1991, 11(1): 16-23.  
[5] 刘永, 李晓东, 袁勇, 等. 用于HL-1M装置LHCD的多结发射天线阵 [J]. 核聚变与等离子体物理, 1997, 17(4): 41-45.  
[6] BRAMBILLA M. Slow-wave launching at the lower hybrid frequency using a phased waveguide array [J].

- Nucl. Fusion, 1976, 16(1): 47–54.
- [7] 曾建尔, 陆志鸿, 袁勇, 等. HL-2A 装置 LHCD 天线波谱测量与数值计算 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2005, 25(1): 37–41.
- [8] Boley C D. A code to calculate the spectrum of lower-hybrid waves launched by a Brambilla waveguide array [R]. ANL/FPP/TM-135, 1980.

## Grill design and spectrum calculation of LHW antenna on HL-2M tokamak

BAI Xing-yu<sup>1</sup>, ZENG Jian-er<sup>2</sup>, RAO Jun<sup>2</sup>

(1. Tsinghua University, Beijing 100084; 2. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041)

**Abstract:** The antenna for lower hybrid current driving on HL-2M tokamak is designed as  $4 \times 32$  waveguide arrays. The width of grill is 9.9mm, the wall thickness is 3mm and the phase difference between two adjacent grills is  $90^\circ$ . The calculation shows that the reflectance  $R$  is 0.026 and the  $N_{\parallel}$  corresponding the peak value is 2.375. The gradient of edge electron density has nothing to do with the  $N_{\parallel}$  corresponding the peak value. But the larger electron density gradient of the plasma edge is, the smaller peak width is. When the phase difference between two adjacent grills is  $81^\circ$  and  $\nabla n_e = 2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-4}$ ,  $\langle 1/N_{\parallel}^2 \rangle$  is optimum, 0.2010,  $R$  is minimum, 0.0223 and the  $N_{\parallel}$  corresponding the peak value is 2.125.

**Key words:** HL-2M tokamak; LHW antenna design; Spectrum calculation

## 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](http://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](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>