

# 天线 - 天线罩系统的方向性图计算

宋 银 锁

(中国空空导弹研究院 洛阳, 471009)

**摘要:** 运用几何光学法建立了天线 - 天线罩系统的数学模型, 并对所关心的几种情况计算了该系统的单脉冲和差方向性图。对无罩情况, 给出了理论计算与实验曲线的比较; 对有罩情况, 比较了无罩和有罩情况下天线和差方向性图的理论计算结果。

**关键词:** 方向性图计算 天线 - 天线罩系统 几何光学法

## 1 前 言

在战术雷达导弹中, 天线和天线罩都是极为重要的微波部件, 它们的相互作用在很大程度上影响了导弹系统的性能品质。因此, 它们的辐射特性或方向性图的分析与计算一直是雷达专业领域所十分关心的研究课题。

由于天线和天线罩的类型不同, 因此, 并不存在一种可以简单“套用”的方法或数学公式用于它们的组合特性的计算, 研究人员必须根据具体的天线 - 天线罩的几何尺寸、结构形式和相对位置关系, 运用现有的电磁理论建立特定组合的数学模型。在建模过程中, 由于天线 - 天线罩的极为复杂的电磁结构, 极大地限制了可供选用的理论方法。目前可供选用的计算方法有几何光学法<sup>[1]</sup>、平面波谱法<sup>[2]</sup>。每种方法都有各自的优点和局限性, 因而必须根据具体情况选用。

本文所处理的是有着 100 多个单元的单脉冲平板裂缝天线和大长径比的卵形天线罩。与常规单脉冲天线不同的是, 它的四个独立馈电的象限倾斜了 45°(以下称为“45°分区”天线), 因而表现出某些独特的方向性特征。

为建立适合工程应用的数学模型, 避免过分复杂化, 本文采用了较为简单的几何光学法。其计算步骤如下: 首先, 把天线的每个辐射缝隙用“点源”代替, 把天线口径的辐射场用一组平行射线代替, 射线的强度由口径场的幅度加权获得。然后, 将射线入射在天线罩内表面上, 用“局部平板”代替入射点

处的天线罩曲面, 即用平板介质的传输系统(透过率和插入相移)表征入射点处罩壁的特性, 进而从内表面的入射场求出外表面的出射场, 由此形成一个新的“等效口径场”。最后再运用常规的天线方向图计算方法, 求出天线 - 天线罩系统的方向性图。

## 2 数学公式的推导

### 2.1 坐标系和坐标变换

计算用的天线 - 天线罩坐标系如图 1 所示。在天线罩坐标系( $X_R$ ,  $O_R$ ,  $Z_R$ )下, 当用  $\omega$  和  $\Omega$  分别表示天线绕  $Y_R$  和  $X_R$  轴转动的角度时, 有如下的坐标变换关系:

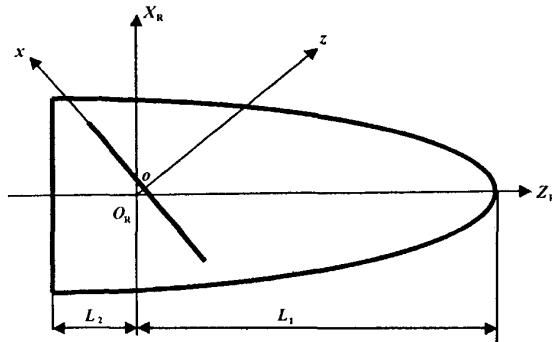


图 1 天线 - 天线罩坐标系

$$\begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & \sin\omega \\ 0 & -\sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Omega & 0 & \sin\Omega \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\Omega & 0 & \cos\Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z + r_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

## 2.2 入射角和极化角

经过推导, 由口径发出的射线在天线罩内表面  $M$  点的入射角  $\theta_{OM}$  和极化角  $\Phi_{OM}$  表达式如下:

$$\theta_{OM} = \arccos \left[ \frac{1}{A_{OM}} \left( \frac{X_{RM}}{\rho_{RM}} U_1 + \frac{Y_{RM}}{\rho_{RM}} U_2 + F_{ZRI} U_3 \right) \right] \quad (2)$$

$$\Phi_{OM} = \arcsin (P_{OM} \cdot E_i + Q_{OM} \cdot E_j + \gamma_{OM} \cdot E_k) \quad (3)$$

式中:  $A_{OM} = \sqrt{1 + F_{ZRI}^2}$ ;

$$U_1 = \sin \Omega;$$

$$U_2 = \cos \Omega \sin \omega;$$

$$U_3 = \cos \Omega \cos \omega;$$

$$\rho_{RM} = \sqrt{X_{RM}^2 + Y_{RM}^2};$$

$$X_{RM} = X_{Ra} + T_{OM} U_1;$$

$$Y_{RM} = Y_{Ra} + T_{OM} U_2;$$

$$Z_{RM} = Z_{Ra} + T_{OM} U_3;$$

$$X_{Ra} = X' \cos \Omega + (Z' + r_0) \sin \Omega$$

$$Y_{Ra} = -X' \sin \omega \sin \Omega + Y' \cos \omega + \sin \omega \cos \Omega (Z' + r_0)$$

$$Z_{Ra} = -X' \cos \omega \sin \Omega - Y' \sin \omega + \cos \omega \cos \Omega (Z' + r_0)$$

$$P_{OM} = \frac{1}{A_{OM} \cdot \sin \theta_{OM}} (U_2 F_{ZRI} - U_3 \frac{Y_{RM}}{\rho_{RM}})$$

$$Q_{OM} = \frac{1}{A_{OM} \cdot \sin \theta_{OM}} (U_3 \frac{X_{RM}}{\rho_{RM}} - U_1 F_{ZRI})$$

$$\gamma_{OM} = \frac{1}{A_{OM} \cdot \sin \theta_{OM}} (U_1 \frac{Y_{RM}}{\rho_{RM}} - U_2 \frac{X_{RM}}{\rho_{RM}})$$

$$E_i = E_x \cos \Omega$$

$$E_j = -(E_x \sin \Omega \sin \omega - E_y \cos \omega)$$

$$E_k = -(E_x \sin \Omega \cos \omega + E_y \sin \omega)$$

以上表达式中,  $X'$ ,  $Y'$  和  $Z'$  是天线坐标系中口径上源点(即射线起点)的坐标( $Z' \equiv 0$ );  $F_{ZRI}$  是天线罩外形方程的一阶导数,  $E_x$  和  $E_y$  是天线口径场的幅度值;  $T_{OM}$  是天线口径上源点到天线罩内表面入射点的距离, 它由射线方程和天线罩外形方程联立求得, 导出的结果一般为超越方程, 必须迭代求解。

## 2.3 天线罩传输系数

在确定了天线口径场的极化方向后, 可推导出天线罩的主极化和交叉极化平面的复数传输系数, 忽略交叉极化的影响, 以下仅给出主平面的复数传输系数。

$$T_{main} = |T_{main}| \cdot e^{-j\psi_{main}} \quad (4)$$

$$|T_{main}| = (T_{PO}^2 \cos^4 \Phi_{OM} + T_{VO}^2 \sin^4 \Phi_{OM} + 2 T_{PO} \cdot T_{VO} \cos \delta \sin^2 \Phi_{OM} \cos^2 \Phi_{OM})^{1/2}$$

$$\Psi_{main} = IPD_{PO} -$$

$$\arctan \left( \frac{T_{VO} \sin \delta \sin^2 \Phi_{OM}}{T_{PO} \cos^2 \Phi_{OM} + T_{VO} \cos \delta \sin^2 \Phi_{OM}} \right)$$

$$\delta = IPD_{PO} - IPD_{VO}$$

式中,  $T_{PO}$  与  $IPD_{PO}$  是平行极化(相对于入射面)分量的传输系数模值与插入相位延迟;  $T_{VO}$  与  $IPD_{VO}$  是垂直极化时的相应表示。它们可从天线罩参考书中查出<sup>[3]</sup>。

## 2.4 透射场

在求得入射角、极化角和传输系数后, 就可以求出天线罩外部的场, 为了简化计算, 仅考虑与天线口径平行平面上形成的“等效口径”。按照天线方向图的一般解法, 把等效口径上的场积分, 即可求出远区辐射场。由于这里处理的天线口径场为离散性幅度分布(即阵列式分布), 故用迭加代替积分。单个象限的主极化平面透射场近似表示如下:

$$E_{main}(\theta_0, \Phi_0) = d_x d_y \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M T_{main} \cdot E_t(m, n) e^{j\psi(m, n)} \quad (5)$$

$$\Psi(m, n) = K_0 [ \alpha_0 X(m, n) + \beta_0 Y(m, n) ]$$

$$\alpha_0 = \sin \theta_0 \cos \phi_0, \beta_0 = \sin \theta_0 \sin \phi_0$$

式中,  $K_0$  是波数,  $K_0 = 2\pi/\lambda_0$  ( $\lambda_0$  是自由空间波长),  $\theta_0$  与  $\phi_0$  是空间视场角。 $X(m, n)$  与  $Y(m, n)$  是源点的坐标(相当于前文中的  $X'$  与  $Y'$ , 但这里的标记更方便迭加公式的编程)。 $E_t(m, n)$  是口径场幅度值, 对不同的源点它有不同的值。 $d_x$  与  $d_y$  是口径上裂缝之间的间距。

## 2.5 单脉冲和差方向图

设天线口径的四个象限分别记为  $A$ ,  $B$ ,  $C$  和  $D$ , 则和差信号场强表示如下:

$$\left. \begin{aligned} E_s &= E_{main, A} + E_{main, B} + E_{main, C} + E_{main, D} \\ E_{DI} &= (E_{main, A} + E_{main, B}) - (E_{main, C} + E_{main, D}) \\ E_{DII} &= (E_{main, A} + E_{main, D}) - (E_{main, B} + E_{main, C}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

上述场强不仅是空间视场角( $\theta_0, \phi_0$ )的函数, 也是天线相对于天线罩转角  $\Omega$  与  $\omega$  的函数, 它们不仅与天线口径参数有关, 还与天线罩的几何尺寸及介电特性有关, 进而与天线-天线罩的相对位置有关。由(6)式可知, 在一定的视场角( $\theta_0, \phi_0$ )范围内, 计算不同天线-天线罩相对转角( $\Omega, \omega$ )时的场强值, 即可以求得单脉冲和差方向图, 显然, 上述计算过程要比单独计算(无罩时)天线方向图要复杂得多。

## 3 计算结果和分析

计算分为两部分, 第一部分计算了无罩天线的

单脉冲和差方向图，并与相应的实测曲线作了比较，第二部分计算了带罩天线的单脉冲和差方向图，其结果分别示于图2~7。图例字母“S”与“D1(或D)”分别表示单脉冲天线的“和”与“差”方向性图，“H”与“E”分别表示H与E观察平面，“t”与“exp”分别表示“理论”计算与“实验”曲线。

图2、图3分别示出了无罩天线的和方向性图在H及E平面上的理论和实验曲线的比较；图4、图5是相应的差方向性图的比较。值得指出的是：计算结果表明，对于E或H平面，天线的两个差通道方向图是相同的，但45°平面时则不相同，这是45°分区单脉冲天线不同于常规单脉冲天线之处。为节省篇幅，这里省去了45°平面的方向性图曲线。

从图2~5可以看出，在方向性图主瓣范围内，理论计算与实验曲线吻合得很好，说明了理论计算的正确性；但在主瓣之外，尤其是远区副瓣，理论与实验曲线存在较大偏差。造成这种偏差主要有两个方面的来源：一是理论的近似性，尤其是用“点源”代替实际的口径场分布，可能引入较大误差；二是实验曲线本身的误差，尤其是天线方向性图的测量环境与理想的自由空间环境存在较大差异（这一点可以从实验曲线看出）。

计算结果表明：这种45°分区单脉冲天线在E/H平面上有比45°平面上更低的副瓣电平，这正是这类天线比常规分区单脉冲天线的优越之处。

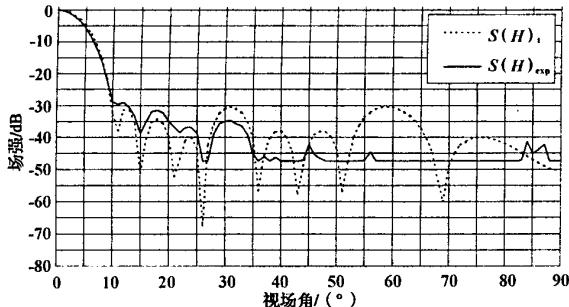


图2 无罩天线和方向性图理论和实验曲线的比较(H平面)

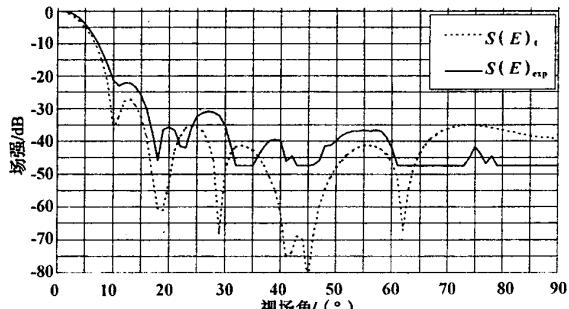


图3 无罩天线和方向性图理论和实验曲线的比较(E平面)

图6、图7显示了无罩与有罩天线的和、差方向性图理论计算曲线的比较。图例中字母的意义同前，但S(0, H)与S(30, H)表示天线相对天线罩轴线分别转动了0°和30°时的H平面方向性图。对差方向性图D1也有类似的表示（为节省篇幅，省去了E平面方向性图的比较）。应指出的是：在天线罩存在的条件下，当天线相对于天线罩轴线的转角不等于0时，两个通道的E/H面方向性图D1与D2将不再相同。但限于篇幅，这里不再给出更多的计算曲线。

在天线罩的计算中，取 $\epsilon_R = 3.3$ ， $\tan\delta = 0.001$ ，壁厚为半波设计。从图6、图7可见：天线罩的存在使方向性图的零点明显抬高；将零点处比例尺放大，也可观察到由于天线相对于天线罩转动引起的零点的偏移。对于单脉冲测角导引头来说，零点的抬高

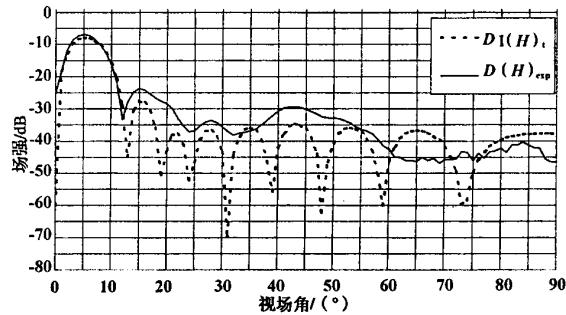


图4 无罩天线差方向图理论和实验曲线的比较(H平面)

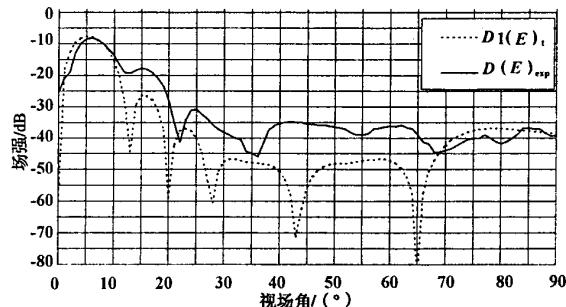


图5 无罩天线差方向性图理论和实验的比较(E平面)

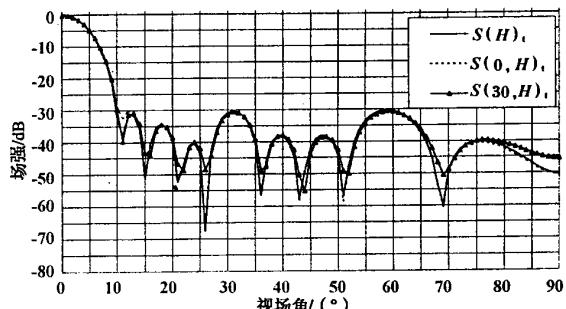
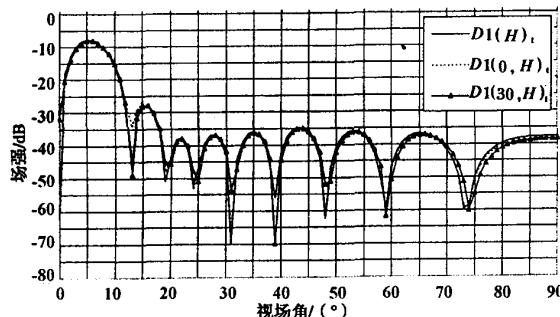


图6 无罩与有罩天线和方向图的比较(H平面)

图 7 无罩与有罩天线差方向图的比较( $H$  平面)

将使导引头分辨率降低; 而零点的偏移, 将使天线视线产生误差, 从而造成脱靶量增大。

天线罩的另一影响是使方向性图的主瓣最大值降低。对于本文情况, 天线罩采用了低损耗材料, 在  $30^\circ$  转角时主瓣降低了约 0.3 dB。

## 4 结 论

推导了天线 - 天线罩系统相互作用的数学模型, 并对所关心的几种情况给出了计算的单脉冲和

(上接第 7 页) 液化层的质量蒸发率类似, 则根据文献[5]计算可知 TaC 液化层的质量蒸发率为

$$m_{w(TaC)} = \alpha_c(0) B_{TaC} \quad (12)$$

其中,  $\alpha_c(0)$  的计算见文献[5], 它与外界流场有关, 与文献[5]中不同的是边界条件, 因为表面上有液体流动, 即  $y=0$ ,  $u=v_2$ ,  $v=v_w$ .  $u$  是液体表面的切向速度,  $v$  是液体表面的法向速度,

烧蚀循环的第三步, 表面上熔化 TaC 液体的单位面积最大质量为  $\delta_0 \cdot \rho$ , 由于蒸发和剥蚀同时进行, 则 C/TaC/C 复合材料表面上熔化的 TaC 液体的单位面积蒸发量  $m_v$  为

$$m_v = \alpha_c(0) B_{TaC} \frac{\delta_0 \cdot \rho}{\rho \cdot v_2 + \alpha_c(0) B_{TaC}} \quad (13)$$

表面上熔化的 TaC 液体的单位面积剥蚀量  $m_b$  为

$$m_b = \rho v_2 \frac{\delta_0 \cdot \rho}{\rho \cdot v_2 + \alpha_c(0) B_{TaC}} \quad (14)$$

## 4 C/TaC/C 复合材料质量烧蚀率

C/TaC/C 复合材料的烧蚀机理是一层一层循环烧蚀。根据以上分析, 利用式(5)~(8)、(12)可推出 C/TaC/C 复合材料质量烧蚀率  $m$  为

$$m = \frac{m_1 \cdot t_1 + (\rho v_2 + \alpha_c(0) B_{TaC}) \cdot t_2}{t_1 + t_2} \quad (15)$$

差方向性图。对无罩情况, 给出了理论计算与实验曲线的比较, 证明了计算方法的正确性和应用的局限性; 对有罩情况, 比较无罩和有罩两种情况下天线和差方向性图的理论计算曲线。通过对上述曲线的分析和比较, 说明了这种  $45^\circ$  分区单脉冲天线的某些方向图特性, 以及天线罩对方向图的某些影响。

本文的工作对于理解天线 - 天线罩系统相互作用的电磁现象是有帮助的, 同时也为采用几何光学法计算差方向图零点的偏移, 进而计算由天线罩引入的瞄准误差奠定了基础。

## 参 考 文 献

- 1 Kozakoff D J. Analysis of Radome - Enclosed Antennas. Artech House, Boston, London, 1997
- 2 Fowu D C, Rudduck R C. Plane Wave Spectrum - Surface Integration Technique for Radome Analysis. IEEE Transactions on AP - 22, 1974: 497~500
- 3 Walton J D. Radome Engineering Handbook. Marcel Dekker Inc. New York, 1970

式中:  $m_1$  ——与烧蚀机理的第一步对应的质量烧蚀率, 计算见文献[5];

$$t_1 = \frac{x_1 + x_2}{2v_2};$$

$$t_2 = \frac{\delta_0 \cdot \rho}{\rho v_2 + \alpha_c(0) \cdot B_{TaC}}.$$

## 5 结 论

在分析 C/TaC/C 复合材料的烧蚀机理基础上建立了烧蚀模型; 利用流体动力学和质量守恒定律推导出了 C/TaC/C 复合材料质量烧蚀率公式; 本文的分析有助于战略导弹防热层的精确设计。

## 参 考 文 献

- 1 王国雄主编. 弹头技术. 北京: 宇航出版社, 1993
- 2 Laub B. Thermochemical Ablation of Tantalum Carbide Loaded Carbon - Carbons. AIAA - 80 - 1476, 1980
- 3 Stull D R, Prophet H. JANAF Thermochemical Tables. AD732043, 1971
- 4 黄海明, 杜善义, 吴林志. C/C 复合材料烧蚀性能分析. 复合材料学报, 2001, 18(3)
- 5 Huang H M, Wang J X, Wu L Z, et al. The Thermochemical Ablation of Spherical Cone during Reentry. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001, 8(1): 18~22

## 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](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>