

# 共形阵列天线振动条件下稳健的 DOA 估计及位置误差校正

侯青松 郭 英 王布宏 侯文林 刘 霞

(空军工程大学电讯工程学院 陕西西安 710077)

**摘 要:** 共形阵列天线比传统的线阵和面阵具有更优良的空气动力学性能、更宽的波束扫描范围、更小的雷达散射截面积和更大的阵列天线孔径等优势。然而共形天线载体受到飞行惯性和空气动力负载的相互作用很容易发生共形表面的变形和单元位置的扰动。更为重要的是平台的机械振动通常还会导致单元位置扰动的时变性, 严重影响了共形天线的分辨测向性能。因而针对此类载体共形天线设计稳健的 DOA 估计算法和位置误差校正算法十分必要和有意义。本文提出了一种共形天线振动条件下的稳健 DOA 估计和位置误差校正算法。结合共形线阵振动的数学模型, 得到修正的时变阵列导向矢量。采用时变的阵列导向矢量在一个振动周期内计算 MUSIC 谱, 搜索空时二维的 MUSIC 谱的谱峰, 得到本次采样快拍数据时阵列振动位于振动周期中的时刻和信源方位的联合估计。根据阵列振动的数学模型就可以进一步预测下一次采样快拍数据时阵列各阵元的位置误差, 从而实现振动条件下的阵元位置误差校正和稳健的 DOA 估计。计算机仿真结果表明了提出算法的有效性。

**关键词:** 共形阵列天线; 阵列校正; 振动; 位置误差校正

**中图分类号:** TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2010)11-1756-05

## Robust Direction Finding and Position Errors Calibration for Conformal Array Antenna in the Presence of Vibration

HOU Qing-song GUO Ying WANG Bu-hong HOU Wen-lin LIU Xia

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Compared to classical linear and planar arrays, conformal array antennas possess some potential advantages including reduction of aerodynamic drag, wide angle coverage, space-saving, potential increase in available aperture, reduction of radar cross section, elimination of radome-induced bore-sight error and so on. They will find their promising applications in a variety of fields ranging from space-borne, airborne, ship-borne, missile-borne radar, space vehicles and wireless communications to sonar, etc. However, conformal array antennas integrated onto aircrafts and some other supporting structures are usually subjected to static deformations and vibrations caused by inertial forces and aerodynamic loads. Furthermore, its position errors and orientations of the elements are time varying due to the platform's mechanical vibrations. As a result the performance of high-resolution direction finding algorithms such as MUSIC degrades severely. So this makes it essential to design robust DOA estimation and position errors calibration algorithm taking into account the influence of deformations and vibrations for such kind of conformal array antennas. This paper presents a robust direction finding and position errors calibration algorithm for conformal array antennas with time varying position errors. To obtain the modified time varying steering vector, mathematical model of vibrations for conformal linear array is given beforehand. The MUSIC spectrum is calculated with the time varying steering vector within a vibrating periodicity. By searching the peaks of the two dimensional (2-D) MUSIC

收稿日期: 2010 年 4 月 23 日; 修回日期: 2010 年 6 月 21 日

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60601016); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2010JQ8003); 空军工程大学电讯工程学院研究生学位论文创新基金 (200707)。

spectrum, the ambiguous initial value of time in the mathematical model of vibration are estimated together with the DOAs. To resolve the ambiguity of initial value of time estimation, repeat the previous process with the snapshots data sampled after a very short time interval. Accordingly the time varying position errors of the elements can be predicted with the mathematical model of vibration and calibrated as well. Computer simulation demonstrates that the proposed algorithm is effective.

**Key words:** Conformal Array Antennas; Array Calibration; Vibration; Position Errors Calibration

## 1 引言

共形阵列天线(CAA: Conformal Array Antennas)是将天线单元附着在非平面载体上,将有源电子扫描相控阵技术和多功能共形射频孔径技术结合为一体,形成载体上的“灵巧蒙皮”(smart skin)天线阵。相对于传统的线阵和面阵,它具有优良的空气动力学性能、更宽的波束扫描范围、更小的雷达散射截面积和更大的阵列天线孔径等优势。因此,它提高了导弹、航空、航天和邻近空间飞行器等的生存力和战斗力,成为各军事强国争相发展的核心军事技术之一<sup>[1]</sup>。

在实际工程应用中,由于阵元幅相误差、互耦、阵元位置误差等因素的存在,实际的阵列流形往往会出现偏差或扰动,阵列信号处理技术的性能将会严重恶化<sup>[2-3]</sup>,甚至失效。为了在实际的阵列系统中有效发挥各种阵列信号处理技术的优良性能,阵列校正往往是不可缺少的关键环节。针对经典的线阵和面阵,人们提出了许多阵列校正方法。然而,在共形阵列天线校正方面的文献则相对较少,文献[4]将旋转矢量法(REV)用于共形天线误差校正,该方法通过移相器改变某个天线单元的相位,从而引起总体信号幅度的改变,测量幅度的改变,可以计算出天线阵每一个天线单元的幅度和相位。并且现有算法的阵元位置误差都是固定的,未充分考虑共形天线阵元位置误差的时变性。

相对于经典的线阵和面阵,共形阵列天线的位置扰动是一个更加严重的阵列误差源。由于其严峻复杂的工作环境,飞行惯性(inertial forces)和空气动力负载(aerodynamic loads)的相互作用使得机载共形天线很容易发生共形表面的变形(deformations)和单元位置的扰动(vibrations)。而且,更为重要的是平台的机械振动通常还会导致单元位置扰动的时变性<sup>[5-7]</sup>。北大西洋公约组织(NATO)研究和技术组织的第087小组(RTO/SET-087)就此做了较多的研究,但提出的补偿

方法的缺陷在于只能对单一来波的情况进行补偿,当有多个来波信号时,各信号造成的相位误差耦合在一起,补偿方法失效。即使对单一来波信号补偿时,由于采用特殊的 $(\theta, \phi) = (0, 0)$ 假设,对大的方位角( $\theta \geq 70^\circ$ )也不再有效。

针对共形阵列天线工作于振动环境这一特殊难题,本文提出了一种共形天线振动条件下的稳健 DOA 估计和位置误差校正方法。首先结合共形线阵振动的数学模型<sup>[5]</sup>,得到修正的时变阵列导向矢量。然后将一个振动周期内的时变导向矢量用于 MUSIC 谱的计算,得到空时二维的 MUSIC 谱。依据 MUSIC 算法中的噪声子空间与真实的导向矢量正交,与含有位置误差的导向矢量不完全正交,从而得到本次采样快拍数据时阵列振动位于振动周期中的时刻和信源方位的联合估计。进而在下次采样快拍数据进行 DOA 估计时,就可以根据共形阵列天线振动的数学模型对阵元位置误差进行预测和校正。

## 2 共形线阵振动的数学建模

对于安装在机翼上的机载共形天线,飞机机翼受到飞行惯性和空气动力负载的双重影响,发生变形和振动。北大西洋公约组织(NATO)研究和技术组织的第087小组设计并制作了图1示意的八元贴片均匀线性阵列实验平台,来进行振动测试和补偿实验。该实验平台在铝制载体上安装贴片天线单元,构成八元均匀线性阵列。在计算机仿真中,铝制载体的变形和振动可以看作弯曲和第一振动模式的叠加。

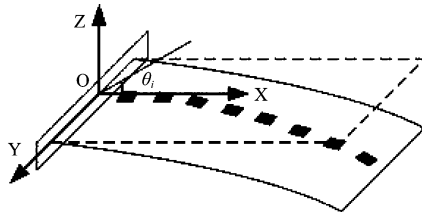


图1 振动基板上的八元均匀线阵示意图

坐标系定义如图1所示,假设阵列振动和变形时,只在Z轴方向上有位置误差。则载体的振动可以建模如下<sup>[5]</sup>

$$\mathcal{Z}(x, t) = Z_0(x) + \alpha(t) + q_1(t) Z_1(x) \quad (1)$$

其中  $\alpha(t) = \omega_0 \cos(\omega t)$  为坐标原点  $O$  引入的强制振动,  $Z_0(x)$  代表低频的弯曲模式为

$$Z_0(x) = \frac{1}{2} \frac{\rho g}{E} \frac{L^4}{h^2} \left\{ 3 - 4 \left( \frac{L-x}{L} \right) + \left( \frac{L-x}{L} \right)^4 \right\} \quad (2)$$

对于铝,系数  $\rho g/E = 0.378 \times 10^{-6}$ 。 $Z_1(x)$  代表高频的第一振动模式

$$Z_1(x) = \left( \cosh\left(\frac{x}{L}\right) + \cos\left(\frac{x}{L}\right) \right) \left( \sin\left(\frac{x}{L}\right) - \sinh\left(\frac{x}{L}\right) \right) - (\sinh\left(\frac{x}{L}\right) + \sin\left(\frac{x}{L}\right)) \left( \cos\left(\frac{x}{L}\right) - \cosh\left(\frac{x}{L}\right) \right) \quad (3)$$

其中  $\lambda = 1.875$ 。振动模式系数为

$$q_1(t) = \text{Re}(Q_1 e^{i\omega t}) = |Q_1| \text{Re}(e^{i(\omega t + \arg(Q_1))}) \quad (4)$$

其中  $Q_1$  如下

$$Q_1 = 0.19 \left( \frac{a^2}{1 + iG - a^2} \right) \omega_0 \quad (5)$$

$G$  表示基板的阻尼,  $a = \omega/\lambda$ ,  $\lambda$  为基板的第一特征频率。

### 3 DOA 估计与位置误差校正原理

共形天线载体振动发生变形将导致阵元单元方向图指向发生变化,本文着重考虑阵元位置误差的时变性,因此假定阵元单元方向图  $g_i(\theta, \phi) = 1$ 。因阵元位置为时间的函数,阵列流形矢量同时为方位和时间的函数

$$a(\theta, t) = e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} (r_x \cos(\theta) + r_z(x, t) \sin(\theta))} \quad (6)$$

$r_x$  和  $r_z(x, t)$  分别为各阵元在  $X$  和  $Z$  方向上的坐标矢量。时变的流形矩阵如下

$$A(\theta, t) = [a(\theta_1, t), \dots, a(\theta_n, t)] \quad (7)$$

窄带远场信号的 DOA 估计数学模型为

$$X(t) = A(\theta, t) S(t) + N(t) \quad (8)$$

$s(t)$  为信号矢量,  $N(t)$  为噪声矢量。假定在很短时间内,阵元位置可以认为不变。在时刻  $t_0$ , 得到  $L$  个快拍数据,数据协方差矩阵估计为

$$\hat{R}(t_0) = E[XX^H] = A(\theta, t_0) R_s A^H(\theta, t_0) + \sigma^2 I \quad (9)$$

由于信号与噪声相互独立,数据协方差矩阵可分解为与信号和噪声相关的两部分,  $A(\theta, t_0) R_s A^H(\theta, t_0)$  为信号部分,  $R_s$  为信号的协方差矩阵。 $\sigma^2 I$  为噪声部分,  $\sigma^2$  为噪声的方差。对  $\hat{R}(t_0)$  进行特征分解

$$\hat{R}(t_0) = \hat{U}_s(t_0) \Sigma_s \hat{U}_s^H(t_0) + \hat{U}_n(t_0) \Sigma_n \hat{U}_n^H(t_0) \quad (10)$$

$\hat{U}_s(t_0)$  为大特征值对应的特征矢量张成的子空间即信号子空间,  $\hat{U}_n(t_0)$  为小特征值对应的特征矢量张成的子空间即噪声子空间。MUSIC 算法的谱估计公式为

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta, t) = 1/[a^H(\theta, t) \hat{U}_n(t_0) \hat{U}_n^H(t_0) a(\theta, t)] \quad (11)$$

当  $t \neq t_0$  时,由于 MUSIC 算法中采用的流形矢量  $a(\theta, t)$  与  $t_0$  时刻得到的噪声子空间  $\hat{U}_n(t_0)$  不完全正交,因此只有当  $\theta$  取得真实来波方位和时间  $t = t_0$  同时满足时,空时二维 MUSIC 谱取得峰值,它同时表征了阵元振动位置的估计和信源的方位。

然而,在阵列运动和振动的一个周期  $T$  内,有两个时刻阵元位置取值相等,只是运动方向不同而已。按式(11)进行二维谱峰搜索时,将出现时刻估计的模糊性。为了分辨时刻估计的模糊性,分别对在间隔很短的两个时刻  $t_1$  和  $t_2$  得到的采样快拍数据进行式(11)的二维谱峰搜索。如图2所示,利用第一次采样快拍数据估计得到时刻  $t_{11}$  和  $t_{12}$ ,且  $t_{11} < t_{12}$ ;利用第二次采样快拍数据估计得到时刻  $t_{21}$  和  $t_{22}$ ,且  $t_{21} < t_{22}$ 。依据时间先后顺序,显然有  $t_{11} < t_{21}$  和  $t_{12} < t_{22}$ 。如果估计结果满足  $t_{21} > t_{11}$  ( $\angle t_{21} < \angle t_{11}$ ) 或者  $t_{22} < t_{12}$  ( $\angle t_{22} < \angle t_{12}$ ),则运动方向向下,初始时刻为  $t_{11}$ ;如果估计结果满足  $t_{21} < t_{11}$  ( $\angle t_{21} > \angle t_{11}$ ) 或者  $t_{22} > t_{12}$  ( $\angle t_{22} > \angle t_{12}$ ),则运动方向向上,初始时刻为  $t_{12}$ 。从而得到了初始时刻的无模糊正确估计。

在得到本次采样快拍数据时刻阵列振动位于振动周期中的时刻的正确估计之后,根据阵列振动的数学模型就可以得到下一次采样快拍数据时刻阵列各阵元的位置误差,从而实现振动条件下的阵元位置误差校正和稳健的 DOA 估计。

4 计算机仿真实验

图 1 中铝板长取  $L=90\text{cm}$ , 厚度  $h=0.5\text{cm}$ , 第一特征频率  $\lambda_1=5.1\text{Hz}$  和基板的阻尼系数  $G=0.03$ 。假设八元均匀线性贴片阵列位于  $X$  轴上, 振动时各阵元在  $X$  和  $Y$  方向上无位置误差。阵列第一阵元距离坐标原点  $10\text{cm}$ , 阵元间距  $0.5\lambda$ , 阵列工作频率为  $1.8\text{GHz}$ 。

图 2 为在坐标原点  $O$  处引入强制振动后, 载体基板变形和振动引起的阵列单元位置坐标在  $Z$  轴上的变化, 取长时间可以观察到振动的周期  $T=8\text{s}$ 。图 3 为阵列各阵元振动位置变化放大图, 可见离坐标原点最近的阵元 8 振动幅度达到了  $6\text{cm}$ 。

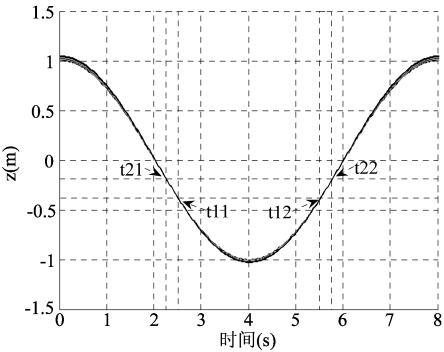


图 2 阵列运动和振动

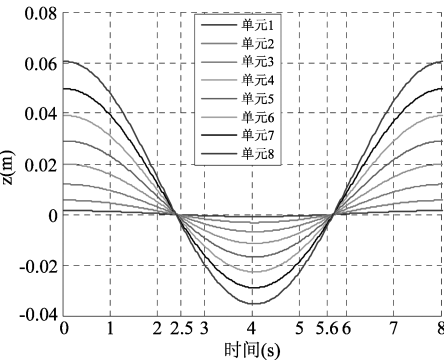
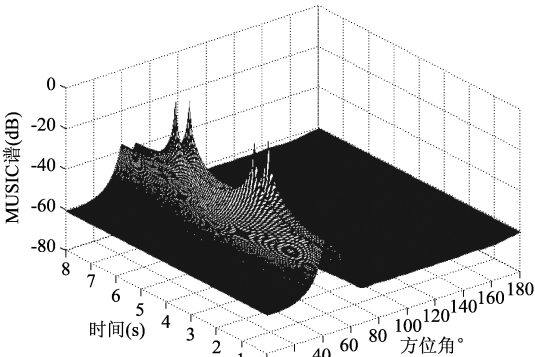
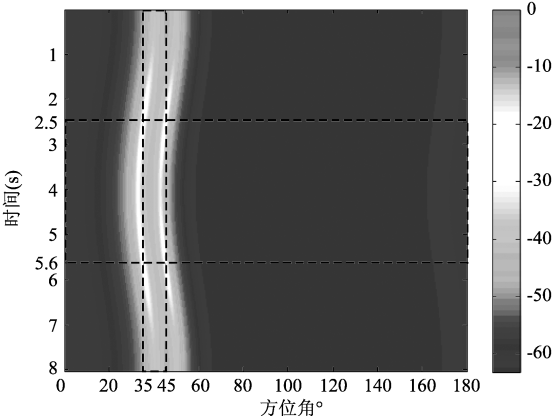


图 3 阵元振动位置轨迹

假定两个来波信号同时入射, 方位分别为  $\theta=35^\circ$  和  $\theta=45^\circ$ , 快拍数  $L=1000$ , 信噪比  $SNR=30\text{dB}$ , 数据采样时刻  $t_0=2.5\text{s}$ 。图 4 为据式 (11) 计算得到的阵列空时二维 MUSIC 谱, 图中的 4 个谱峰代表两个真实的 DOA 估计和时间估计的模糊性。对照图 3 可见, 本次采样快拍数据时刻, 阵列振动位于振动周期中的时刻也得到正确估计。



(a). MUSIC谱表面图



(b). MUSIC谱俯视图

图 4 二维空时 MUSIC 谱 ( $L=1000, SNR=30\text{dB}$ )

5 结束语

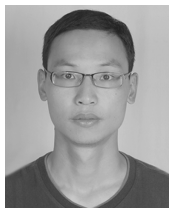
由于共形天线特有的工作环境, 共形载体平台的机械振动导致天线单元位置误差具有时变性, 严重影响了共形天线的分辨测向性能。因而针对共形天线振动条件下的稳健 DOA 估计和位置误差校正十分必要和有意义。共形线阵振动的数学模型, 采用弯曲和第一振动模式的叠加来表征共形天线阵列的低频和低频振动。本文在共形线阵振动数学模型基础上, 采用时变的导向矢量在一个振动周期内计算 MUSIC 谱, 搜索空时二维的 MUSIC 谱的谱峰, 得到了共形天线振动条件下的稳健 DOA 估计和位置误差校正算法。由于考虑了更加贴近实际的共形天线工作环境的影响, 本文所提算法对共形天线实用化具有一定的借鉴意义。

参考文献

[1] L. Josefsson and P. Persson. “Conformal Array Antenna Theory and Design”, Wiley-IEEE Press, February 2006.  
[2] A. L. Swindlehurst and T. Kailath. A performance analysis of subspace-based methods in the presence of model errors, part I: the MUSIC algorithm. IEEE Trans. on Signal Processing, 1992, Vol. 40, No. 7, pp. 1758-1773.

- [3] A. L. Swindlehurst and T. Kailath. A performance analysis of subspace-based methods in the presence of model errors; part II: multidimensional algorithms. IEEE Trans. On Signal Processing, 1993, Vol. 41, No. 9, pp. 2882-2890.
- [4] Shigeru Makino, Yoshihiko Konishi. Pattern Synthesis and Calibration methods for Conformal Array Antennas. First European Conference on Antennas and Propagation, Nice, France, 2006.
- [5] H. Schippers, W. Schaap, J. M. P. C. M Visser, G. Vos, Conformal phased array antennas on vibrating structures, Paper presented at 2nd European Workshop on Conformal Antennas, Bonn, 2003.
- [6] Knott, P. Deformation and Vibration of Conformal Antenna Arrays and Compensation Techniques. In Multifunctional Structures /Integration of Sensors and Antennas (pp. 19-1-19-12). Meeting Proceedings RTO-MP-AVT-141, Paper 19. Neuilly-sur-Seine, France; RTO.
- [7] H. Schippers, J. H. van Tongeren, P. Knott, T. Deloues, P. Lacomme, M. R. Scherbarth, Vibrating antennas and compensation techniques-Research in NATO/RTO/SET-087/RTG 50, IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 3-7 March 2007.

## 作者简介



侯青松(1981-),男,生于四川营山,空军工程大学电讯工程学院博士研究生,主要研究方向为阵列信号处理。

E-mail: cnhqs@163.com



郭英(1961-),女,生于山西临汾,教授,博士生导师,中国通信学会陕西省分会常务理事、陕西省信号处理学会常务理事、中国电子学会高级会员,发表学术论文五十余篇,其中SCI、EI检索十余篇。

主要研究领域为:通信信号处理、自适应信号处理等。E-mail:Guoying\_dsp@sina.com

王布宏(1975-),男,生于山西太原,副教授,博士(后),已发表论文40多篇,其中进入SCI、EI等三大索引的论文30多篇。主要研究领域为:阵列信号处理、阵列校正等。

E-mail:wbucx@yahoo.com.cn

侯文林(1986-),男,生于辽宁盖州,空军工程大学电讯工程学院硕士研究生,主要研究方向为阵列信号处理。

E-mail: wntygyss@163.com



## 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>