

# 超低频拖曳磁场天线设计中的热噪声研究

陈卫东,王永斌,屈晓旭

( 海军工程大学 电子工程学院,湖北 武汉 430033 )

摘 要:通过对产生超低频拖曳磁场天线热噪声的原理以及各种天线构造参数对热噪声影响的研究,得出了在电缆浮力条件下保证最小热噪声 ENF 的最优化基本参数的表达式. 结合对天线其它电参数的要求,探讨了利用最优化参数的可行性. 分析结果表明,获得高可逆磁导率的磁芯是实现最优化参数的关键,并给出了解决这一问题的途径.

关键词:拖曳天线;磁场天线;热噪声

中图分类号:TN82

文献标识码:A

## Thermal noise on design of extremely low frequency trailing H-field antenna

CHEN Wei-dong, WANG Yong-bin, QU Xiao-xu

( Electronic Eng. College, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China )

**Abstract** : The theory for thermal noise generation of the extremely low frequency ( ELF ) trailing H-field antenna and the influence of the various parameters of the antenna's structure on the thermal noise are studied , and the optimal expression of the basic antenna parameters is obtained under the buoyant condition of the cable when the thermal noise ENF is the minimum. Considering the other main electric parameters of the antenna , this paper discusses the feasibility of the optimal parameters. The analytical results show that the key point to realize the optimal parameters is to obtain the high reversible permeability of the core , and some methods to resolve this problem are given.

**Key words** : trailing antenna ; loop antenna ; thermal noise

水下进行超低频( ELF ,波段 30 ~ 300 Hz )收信的潜艇迫切希望能够实现全向接收,但现有的潜艇拖曳 ELF 电场天线不能完成这个任务,它的接收方向图是 8 字型,最大接收方向与天线的拖曳方向平行. 海水中 ELF 信号向下传播时具有平面线极化波的特点,当潜艇航向垂直于连接收发信点的地球大圆路径时,电场天线就处于收信盲区<sup>[1]</sup>. 磁场天线与电场天线的方向图相同,但它的最大接收方向与拖曳方向垂直. 因此,磁场和电场天线设计在同一个拖曳电缆中可以构成全向接收天线.

ELF 拖曳天线工作在较深的海水中<sup>[2]</sup>,天线噪声和衰减后的大气噪声电平相当,它决定了潜艇的收信深度. 磁场天线的噪声主要有热噪声、运动感应噪声和磁致伸缩噪声等,其中热噪声与天线的基本构成有着最直接的关系,降低热噪声是设计拖曳磁场天线时首先面临的问题. 文中针对一个具有抛物线型灵敏度的磁场天线,在电缆浮力条件下,寻求改善天线热噪声性能的途径,得出了磁场天线最优化构造参数曲线,深入分析了实现构造参数的难点,并针对天线主要电参数的要求,给出了满足热噪声 ENF 和天线电气性能的最有利的平衡点.

## 1 设计磁场天线的物理环境和热噪声指标要求

等效噪声场( ENF )是能够比较不同类型收信天线噪声性能的指标. 假定天线本身产生的噪声电压

\* 收稿日期 2003-09-09 ;修订日期 2003-10-10

作者简介 陈卫东( 1967- )男,硕士生.

完全是由一个入射噪声电场引起的,噪声电场的强度等于单位有效长度天线上的噪声均方根电压。ENF 表示了天线的噪声性能,ENF 越大,说明天线在同样的有效长度时,天线本身的噪声越大。等效噪声场强度为:

$$E = V/l_e \quad (1)$$

式中:  $V$  为天线输出的噪声电压,  $l_e$  为天线有效长度。当  $V$  为信号电压,而  $E$  为入射的信号场强(1)式同样可用作计算天线有效长度的公式。

设计磁场天线的目的是为了和现有的电场天线合成全向拖曳天线,所以磁场天线存在的物理环境实质上就是 ELF 电场拖曳天线的环境,对它的噪声要求也是电场天线的噪声指标。ELF 电极对天线<sup>[3]</sup>以聚氯乙烯材料为外套和绝缘层,以绝缘双绞线构成连接电极对的传输线,还包括 2 个电极对和玻璃纤维加强单元。电场天线的噪声主要是运动感应噪声<sup>[3]</sup>,在 12 kn 航速和 45 Hz 处,电场天线 ENF 电压谱是 -207 dB(相对于  $V/m \cdot \sqrt{Hz}$ )。在设计磁场天线时,要求增加磁场天线后电缆的外型尺寸不变、电缆的密度仍能保证应有的浮力、磁场天线的有效长度接近电场天线的有效长度,而且热噪声 ENF 要小于电场天线 ENF。这是设计磁场天线的前提。

为分析方便,假设磁场天线的模型仅由 3 个部分构成,纵向简化剖面如图 1 所示。由内向外依次为磁芯、信号线圈和电缆外套。拖曳电缆中的玻璃纤维加强单元和绝缘层没有画出,而磁芯部分也不是指纯粹的铁磁材料,它定义为线圈内的材料,当存在直流退磁线圈时,退磁线圈也算为磁芯的一部分。

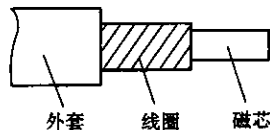


图 1 磁场天线构成简图

空芯磁场天线要达到 -207 dB 的噪声指标,它巨大的长度是不可能在潜艇上应用的。只有采用高可逆磁导率(以下简称磁导率)的铁磁材料作为磁芯,才能增加天线的有效长度,从而降低磁场天线热噪声 ENF。磁场天线的灵敏度反映了天线各点对磁场分量的敏感程度,降低运动感应噪声要求天线灵敏度曲线具有抛物线形式<sup>[4]</sup>。实现抛物线形式分布的灵敏度的一个方法是:保持磁芯面积和磁导率不变,而使天线线圈匝密度为抛物线型(线圈采用单层绕线)。

$$N(z) = \begin{cases} N(0) [1 - (z/l)^2] & |z| \leq l \\ 0 & |z| > l \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $z$  为天线上的位置,  $z$  坐标轴是以天线中心为原点,平行于天线的轴向;  $N$  为匝密度;  $l$  为天线长度的一半;  $N(0)$  为天线中点处的匝密度,也是天线上的最大匝密度值。热噪声性能分析就是建立在上述天线模型上进行的。

## 2 热噪声 ENF 与天线构造参数的关系

磁场天线的热噪声是由天线在 ELF 波段内的所有交流电阻引起的,这个总电阻包括接收信号的线圈电阻、连接线圈的导线电阻、天线辐射电阻和磁芯损耗电阻等。磁芯损耗电阻可以通过对磁芯不断地细分而减小,实际的磁芯可由薄带或合金线形式的铁磁材料制作<sup>[5]</sup>,故磁芯损耗电阻可以忽略。在信号线圈的平均匝密度较大条件下,以海水为媒介的天线幅射电阻和连接导线电阻都可以忽略,天线的总电阻就由线圈电阻决定。在 ELF 波段,交流电阻可以用线圈的直流电阻表示。由法拉第定律得到天线电压与有效长度  $l_e$  的关系为:

$$V = \omega H \int \mu_0 \mu_a A \cdot N(z) \cdot dz = l_e E \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为角频率,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\mu_a$  为磁芯相对磁导率;  $H$  为入射信号磁场在轴向上的磁场分量;  $A$  为磁芯的截面积。积分沿整个天线长度进行,平面波的电场和磁场分量的关系由海水的波阻抗  $\eta$  确定,即  $E = \eta H$ ,其中:  $\eta = (\omega \mu_0 / \sigma_s)^{1/2}$ ,  $\sigma_s$  为海水电导率,则天线的有效长度为:

$$l_e = \frac{\sqrt{2} \mu_a A}{\delta} \int N(z) \cdot dz = \frac{4 \sqrt{2} A \mu_a l \cdot N(0)}{3 \delta} \quad (4)$$

式中:  $\delta$  为海水中的电磁波集肤深度,  $\delta = [2 / (\omega \sigma_s \mu_0)]^{1/2}$ 。

设磁芯和线圈的外半径分别为  $a$  和  $b$ , 则线圈的总长度为  $\int \sqrt{[\pi(a+b)N(z)]^2 + 1} \cdot dz$ , 平均匝密度为  $2N(0)/3$ , 当  $a+b$  大于 5 mm, 最大匝密度远大于 100 匝/m 时, 总长度可近似用  $4\pi(a+b)N(0) \cdot l/3$  表示, 其截面积为  $\pi(b-a)^2/4$ , 线圈电阻为:

$$R = \frac{16N(0)(b+a)l}{3\sigma_w(b-a)^2} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_w$  为线圈的电导率, 天线电阻热噪声功率谱为  $4k_b T_k R$ , 其中  $k_b$  为 Boltzmann 常数,  $T_k$  为绝对温度. 则由(4)(5)式得到热噪声 ENF 功率谱( $V^2/m^2 \cdot Hz$ )

$$S_e(\omega) = \frac{6k_b T_k \delta^2}{\pi^2 \sigma_w \mu_a^2 l} \times \frac{(b+a)}{a^4(b-a)^2 N(0)} \quad (6)$$

忽略导线的绝缘层的厚度, 导线的直径就是  $b-a$ . 为了有效地利用线匝, 线圈应尽可能采用密绕方式, 但最大匝密度  $N(0)$  受到导线直径的制约. 定义导线的直径与匝距的比值为导线在天线轴向上的占空比, 则磁场天线中点处为最大占空比  $\xi$ , 且

$$\xi = (b-a)N(0) \quad (7)$$

导线密绕时  $\xi$  在不大于 1 的小范围内变化. 因此, (6)式可简化为:

$$S_e(\omega) = \frac{6k_b T_k \delta^2}{\xi \pi^2 l \sigma_w \mu_a^2} \times \frac{(b+a)}{a^4(b-a)} \quad (8)$$

为了减小 ENF, 首先可将(8)式右端第一项中磁场天线的物理长度增加, 其最大长度可达到拖曳电缆中电场天线的长度; 也可以适当增加占空比  $\xi$ . 受到电缆最小弯曲半径<sup>[6]</sup>的限制不可能为 1, 要防止在潜艇收卷电缆时线匝之间碰压挤伤. 不能单纯地采用电导率大的导线, 铜的电导率虽大, 但密度较大, 不利于电缆的浮力. 同样重量下的铝线要比铜线的电阻小, 所以选用铝线是合适的. 虽然磁芯磁导率越大越好, 但在后面的分析中可以看出它受到磁芯的半径和密度的极大限制, 因此要获得最小的热噪声 ENF, 还必须对(8)式右端的第二项中外半径  $a$  和  $b$  进行最优化, 它们与磁芯和线圈的密度共同形成天线的构造参数. 最优化的天线构造参数将保证热噪声 ENF 最小, 并决定满足噪声指标的最小磁导率的数值.

### 3 天线构造参数的最优化及结果分析

设现有的拖曳电场天线电缆的构造仅包括传输线、电极对、必要的加强单元以及聚氯乙烯材料(作为浮力及绝缘用), 它的质量密度为  $\rho_E$ . 在电场天线电缆基础上附加磁场天线的理想方法是将构成磁场天线磁芯和线圈的材料取代现有电场电缆中的浮力材料, 组合后的电缆质量密度为  $\rho_c$ . 这一过程会增加电缆单位长度上的质量, 定义所增加的质量为加重. 拖曳电缆在收信时必须具备一定的浮力(电缆密度要小于海水密度), 设这个浮力条件允许组合电缆单位长度上最大允许加重为:

$$w_{\max} = \pi c^2(\rho_c - \rho_E) \quad (9)$$

而附加磁场天线带来的实际加重为:

$$w = \pi a^2(\rho_m - \rho_f) + \frac{\xi \pi}{6} \pi(b^2 - a^2)(\rho_w - \rho_f) = \pi a^2 \rho'_m + \frac{\xi \pi^2}{6} (b^2 - a^2) \rho'_w \quad (10)$$

式中:  $c$  为电缆半径,  $\rho_m$  和  $\rho_w$  为磁芯和线圈的密度,  $\rho_f$  为被取代的浮力材料的密度,  $\rho'_m$  和  $\rho'_w$  分别是磁芯和线圈密度与浮力材料密度之差. 令  $w = w_{\max}$ , 求出 ENF 为最小值时的解:

$$\frac{\xi \pi}{6} (2a^2 + ab - 2b^2) \rho'_w b + a^3(\rho'_m - \frac{\xi \pi}{6} \rho'_w) = 0$$

设磁芯与线圈的半径比  $\alpha = b/a$ , 对应密度差的比  $\beta = \rho'_m/\rho'_w$ , 上式简化为:

$$2\alpha^3 - \alpha^2 - 2\alpha - \frac{6}{\xi \pi} \beta + 1 = 0 \quad (11)$$

从以上推导可以得出, 当  $\alpha$  和  $\beta$  之间符合(11)式的要求时, 就能够使设计的电缆保证天线热噪声 ENF 最小, 所以(11)式就是我们需要的最优化参数关系的基本表达式. 确定天线构造具体参数关系的

方法是,从部分已知条件出发,以半径比  $\alpha$  为变量,利用以上各式推导出天线构造的最优化参数,即:磁芯和线圈的外半径、磁芯密度和热噪声 ENF 满足电场天线噪声指标时的最小磁芯磁导率(公式略)。得到的关于典型磁场天线的最优化参数曲线如图 2 所示。

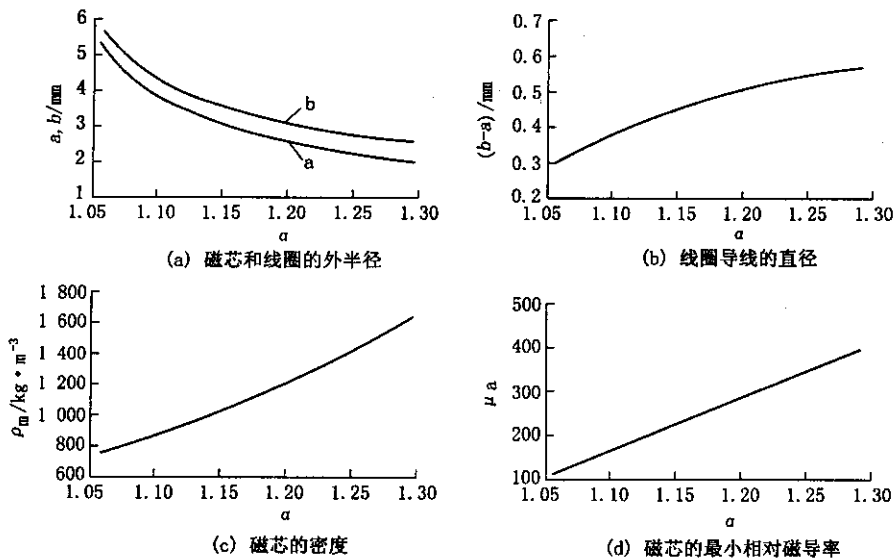


图 2 线圈和磁芯的优化参数关系

分析图 2 可以看出最优参数保证 ENF 最小的原理:在  $\alpha$  增大的过程中,磁芯外半径的减小和磁导率接近线性的增大总体上使有效长度变短,但导线半径的增大又有助于天线电阻下降,从而使热噪声 ENF 维持在最小。

值得注意的是磁芯参数的变化,在热噪声 ENF 满足电场噪声指标时,图 2(d)中的最小相对磁导率只有几百,似乎容易实现,其实不然。高磁导率的纯铁磁材料的密度一般较大,与水相比的相对密度约在 7.0,而图 2(c)中的磁芯密度只允许相对密度为 0.8~1.8。如果退磁线圈也必须占有磁芯一定的比例,那么纯铁磁材料在磁芯中只能是极小的一部分,图 3(c)给出了将磁芯折算成磁通量相等的等效空芯线圈的面积  $A_e$ 。若用  $1 \text{ mm}^2$  的铁磁材料作磁芯的有效部分,则要求退火后的铁磁材料的磁导率在 4~5 万之间。同时,为了减小在电缆弯曲拉伸中磁芯的应变,要求铁磁材料必须以特定的零应变螺旋结构形成磁芯,加工和结构的因素又进一步使铁磁材料的实际磁导率下降。可见,热噪声 ENF 对磁芯的要求是很高的。

所以,最优化参数中所要求的最小磁导率的实现是设计磁场天线并降低热噪声 ENF 的关键和难点。解决这一难点的途径有:采用先进的磁性材料冷加工工艺,选择在冷加工后仍能保持较大磁导率的铁磁材料;尽可能加大纯铁磁材料在磁芯中的比例,同时注意对磁性材料进行细分,以减小磁芯损耗;磁导率受磁芯轴向地磁偏的影响,在零偏置时磁导率最大,所以要采用退磁线圈抵消天线轴向地磁场分量,使磁导率保持在最大值——初始磁导率。后面两个途径显然要求磁芯的密度较大而等效空芯面积较小。图 2(c)和图 3(c)显示出在半径比 1.2 以上,磁芯密度较大且等效空芯面积较小时,采用小尺寸的磁芯和线圈是可行的。

在设计磁场天线中应用最优化参数理论上都能得到最小的热噪声 ENF,但在保证热噪声指标的同时,应考虑其它电参数的优劣。如图 3(d),当  $\alpha$  大于 1.25 后,由于磁场天线和电场天线有效长度(300 m)相比很小而不利于天线接收信号的能力,电阻过小会影响线圈电阻的主导地位;而在图 3(b)中  $\alpha$  小于 1.15 前,磁场天线电感增加很快,天线电感  $L$  过大会使天线呈现传输线效应而不利于天线各匝的信号电压合成,又因为所需要的等效空芯面积较大、磁芯密度较小,不利于退磁线圈和铁磁材料的加入。图 3(d)还说明,即使达到了最小磁导率的要求,磁场天线有效长度也普遍比电场天线的有效长度短,所以为了得到较长的有效长度,磁芯最小磁导率还要有相应的提高。

综合以上分析的结果表明,在设计磁场天线时选择半径比在 1.2 处的天线构造参数最为合适。它一方面满足了拖曳电缆的浮力要求,另一方面既可以提供实现更大的磁导率的密度空间而得到最小热噪

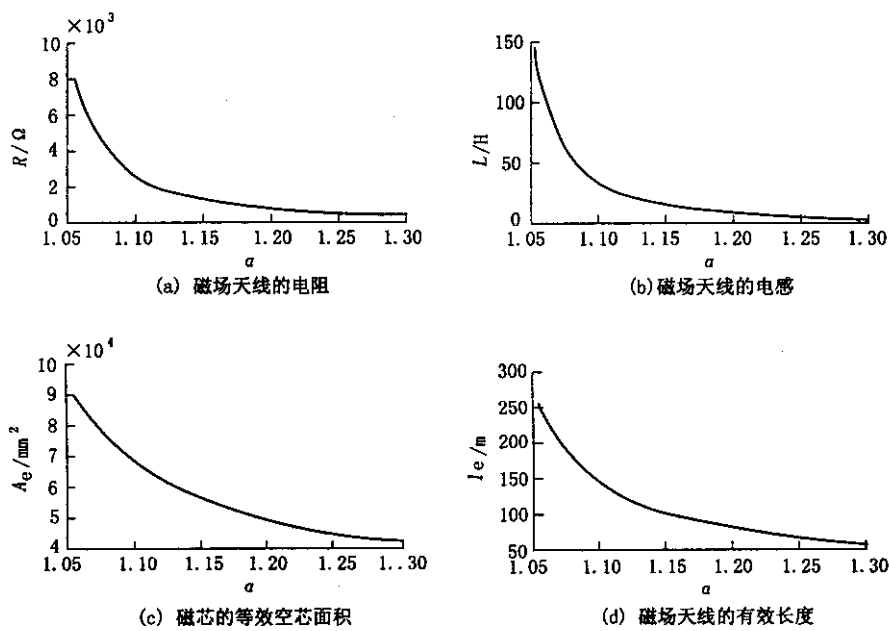


图 3 最优化参数对应的天线参数及等效空芯面积

声 ENF ,又具有较合适的天线有效长度和电感量 ,是保证热噪声指标和天线电参数的最佳平衡点.

4 结 论

研究拖曳磁场天线的热噪声的目的是要寻求解决潜艇在 ELF 波段的全向接收问题. 产生磁场天线热噪声的主要原因是信号线圈的电阻 ,天线热噪声性能除了与天线长度有关外 ,更取决于信号线圈和磁芯的物理电磁参数. 由于受到拖曳电缆特有的空间和浮力条件的限制 ,降低热噪声 ENF 的主要途径是通过最优化天线构造参数的方法来进行. 研究结果表明 ,设计最优化参数磁场天线的关键和难点是 :在限定尺寸、密度和结构条件下 ,能否实现磁芯最小磁导率 ;只有在半径比  $\alpha$  为 1.2 左右才能兼顾天线热噪声 ENF 和其它电气性能 ,才具有现实意义.

参考文献 :

[ 1 ] 梁高权. 甚低频波和超低频波的辐射与传播 [ M ]. 南京 :海军工程大学电子工程学院 ,2002.

[ 2 ] Jones D L. Sending signals to submarines [ J ]. New Scientist ,1985 ,1463( 4 ) 37 - 41.

[ 3 ] Burrows M L. Motion-induced noise in electrode-pair extremely low frequency [ J ]. IEEE Trans. on Com. ,1974 22( 4 ) : 540 - 542.

[ 4 ] Burrows M L. ELF Communications Antennas [ M ]. England :Peter Peregrinus Ltd. ,1978.

[ 5 ] 张玉魁 ,张长安 ,董学智 ,等. 金属软磁材料及其应用 [ M ]. 陕西 :冶金工业出版社 ,1986.

[ 6 ] GJB3041 - 1997 ,潜艇拖曳天线通用规范 [ S ].

## 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>