

# GIS 局部放电检测的微带贴片天线研究<sup>\*</sup>

张晓星 唐 炬 彭文雄 孟延辉 孙才新

(重庆大学电气工程学院高电压与电工新技术教育部重点实验室 重庆 400044)

**摘要** 本文结合实际气体绝缘组合电器(GIS)结构、运行特点,设计了用于 GIS 局部放电检测的外置超高频微带贴片天线(MPA)传感器,该传感器安装在 GIS 盆式绝缘子处,接收盆式绝缘子处泄漏的电磁波,并对周围空间电磁干扰抑制;在选择天线基板材料、厚度、形状,以及附加阻抗匹配网络等方面进行了频带展宽。计算和实测表明,天线的有效工作频带展宽为 340~440 MHz,中心频率为 390 MHz,相对带宽 25.6%,达到宽频带天线范围,并且最大辐射和接收方向上的增益达到了 5.38。实验室 GIS 模拟装置测量表明该天线传感器性能良好,具有较高灵敏度,可用于 GIS 局部放电在线监测。

**关键词** 全体绝缘组合电器 局部放电 微带贴片天线 超高频

中图分类号 TM835 文献标识码 A 国家标准学科分类代码 470.40

## Study on the outer UHF microstrip patch antenna for partial discharge detection in GIS

Zhang Xiaoxing Tang Ju Peng Wenxiong Meng Yanhui Sun Caixin

(The Key Laboratory of High Voltage Engineering & Electrical New Technology, Ministry of Education, Electrical Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract** Based on the structure and operating characteristic of Gas Insulation Substations (GIS), an outer UHF microstrip patch antenna (MPA) sensor for detecting the partial discharge in GIS was designed, the sensor is fixed at the basin insulator to receive the electromagnetic wave leaked from the basin insulator, and suppress the electromagnetic interference from surrounding environment. Some effective methods for expanding bandwidth are utilized in the design process, such as choosing the material, thickness and shape of the antenna base plate and adding impedance matching network. Calculation and testing show that the effective working bandwidth of the antenna is 340~440 MHz, the center frequency is 390 MHz, and the relative bandwidth is 25.6%, which reach the range of broadband antenna. Especially the gain reaches 5.38 in its maximum transmitting and receiving direction. Comparing with loop coupler built in GIS, the test results show that the proposed microstrip patch antenna satisfies the requirement of partial discharge detection; it can detect the PD signal in effective band with high sensitivity for on-line detecting in GIS.

**Key words** GIS partial discharge microstrip patch antenna UHF

## 1 引言

局部放电是气体绝缘组合电器(GIS)绝缘监测的重要内容。GIS 中发生放电时,局部放电脉冲宽度可达 1~2 ns,可激发频率为 1 GHz 以上的电磁波<sup>[1]</sup>,因此,可以

运用超高频法(UHF)对 GIS 进行局部放电的检测。

超高频法检测局放的关键是传感器。目前用于超高频检测的传感器主要有内置传感器<sup>[2]</sup>和外置天线<sup>[3-4]</sup>两类,外置天线不影响 GIS 内部电场且安装方便,故外置天线更有利于现场实现。由于局放信号可沿着 GIS 传播,在盆式绝缘子处泄漏,因此外置天线安装的最佳位置是

<sup>\*</sup> 本文于 2006 年 12 月收到,系国家自然科学基金(50577069)、重庆市自然科学基金(CSTC2005BB3170)资助项目。

盆式绝缘子处。本文研制了一种安装在 GIS 盆式绝缘子处,用于 GIS 外置 UFH 局放检测的微带贴片天线(MPA),在实验室 GIS 模拟装置上实测表明,可用于局部放电检测的研究。

## 2 微带贴片天线(MPA)的设计与分析

### 2.1 超高频外置天线的选择

为了使传感器比较好地耦合到发生局部放电时所激发的电磁信号,必须满足以下要求:(1)较好接收信号的同时抑制干扰;(2)带宽和中心频率要合适;(3)驻波比小于2,并且具有较高的增益和灵敏度;(4)整个天线接收系统阻抗要匹配,且现场安装要方便。

根据上述要求,要能有效地检测 GIS 局部放电超高频段的信号,应在线元天线、行波天线及阵列天线中选择。考虑到现场的安装和实际的尺寸以及微带天线(属线元天线的一种)具有的优点(剖面薄、体积小、重量轻,具有平面结构,馈电网络可与天线结构一起制成,便于获得圆极化等)<sup>[5-6]</sup>,所以选用微带天线,而它的主要缺点(频带较窄)可通过本文所述的方法来克服。

### 2.2 微带贴片天线的结构与工作原理

本文设计的微带贴片天线由矩形金属贴片、介质板、金属底板和馈线4部分构成,如图1所示。

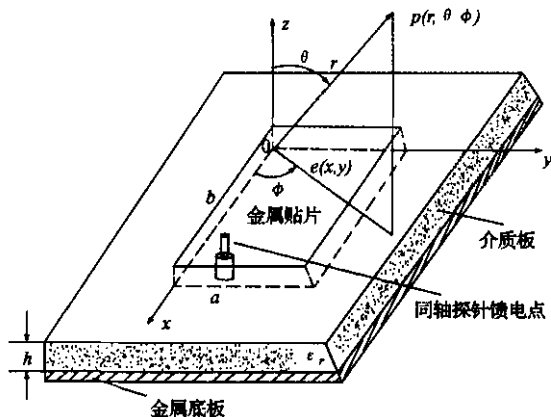


图1 微带贴片天线结构示意图

微带贴片天线是由矩形金属贴片粘贴在背面有导体接地板的介质板上形成的。介质板选用介电常数较低的聚苯乙烯材料,其介电常数为2.62。天线利用金属贴片和金属底板之间的缝隙接收电磁波,并转化为高频电流,用同轴探针作为馈线进行馈电,通过50Ω同轴射频电缆把信号引给检测设备。

### 2.3 天线的带宽

天线带宽可用高端频率与低端频率之差与中心频率之比的百分数表示,即<sup>[5]</sup>:

万方数据

$$B = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_0} \quad (1)$$

式中: $f_0$ 为中心频率。

局部放电的脉冲能量几乎与频带宽度成正比<sup>[7]</sup>,而微带天线是窄频带天线,微带贴片天线的窄频带特性是有其高Q的谐振本性所决定的,即存储于天线结构中的能量比辐射和其他的能量损耗大得多,这意味着谐振时实现了匹配,而频率偏离谐振时电抗分量急剧变动使之失配。天线的总品质因数Q为<sup>[6]</sup>:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_r} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} \quad (2)$$

式中: $Q_r$ 、 $Q_c$ 和 $Q_d$ 分别代表由辐射功率 $P_r$ 、导体损耗功率 $P_c$ 、介质损耗功率 $P_d$ 所引起的相应的Q值。

常规设计的微带天线相对带宽约为中心频率的1%~6%,满足不了GIS局部放电检测的要求,所以为了获取更多的局放信息,在设计时应该展宽频带。展宽频带的方法可以从降低总的Q值的各个方面去探求,也可以用附加的匹配措施来实现。

本设计采用如下方法进行展宽频带:

(1)采用介电常数 $\epsilon_r$ 较小的基板:介质基板选用了介电常数较低的聚苯乙烯材料,目的是降低 $\epsilon_r$ ,天线的储能因 $\epsilon_r$ 的减小而变小,使辐射对应的 $Q_r$ 降低,从而使频带变宽。

(2)采用厚基板:厚度 $h$ 的增加辐射电导也随之增大,辐射对应的 $Q_r$ 和总的Q值降低,使得频带加宽。

(3)选用了楔形基板:在相同馈电点位置,楔形介质基板谐振器的驻波比小于2的频带比普通的矩形要宽很多。文献[8]表明采用该方法可将频带展宽一倍左右,这种基板形状变化使频带展宽的原因是:由于两辐射端口处基板厚度不同的2个谐振器经阶梯电容耦合产生的双回路现象造成的。

(4)采用附加阻抗匹配网络:微带贴片天线的等效电路可以用一个RLC并联谐振电路来描述,在背馈情况下,馈电探针可视为一个电抗,此时可附加一个串联电容,与天线探针电感形成一串联谐振电路,并使它与微带贴片天线所等效的并联谐振电路在同一频率上谐振,串并联谐振回路在谐振频率附近的电抗趋于抵消,使之避免了偏离谐振时电抗的迅速变化,从而展宽了频带。

### 2.4 天线的输入阻抗

天线输入阻抗的大小表征了天线与发射机或接收机的匹配状况,即表示了导行波与辐射波之间能量转换的好坏,故是天线的一个重要参数。

在薄微带天线( $h \ll \lambda_0$ ,其中 $h$ 是介质基板 $k$ 的厚度, $\lambda_0$ 是中心频率对应的波长)的前提下,可将微带贴片与接地板之间的空间看成是上下为电壁、四周为磁壁的漏波空腔,于是便可根据边界条件用模展开法或模匹配法解

出该区域的内场。天线辐射场由空腔四周的等效磁流的辐射得出,天线输入阻抗可根据空腔内场和馈源激励条件求得。

采用如图 1 所示的坐标系,考虑到微带天线通常都工作在低阶模(如  $TM_{01}$ )谐振频率附近,而远离其他谐振点,微带天线的基本特征就如同一个 RLC 简单并联谐振电路,工作在  $TM_{01}$  模时,输入电阻可简写为:

$$R_{01}=\frac{120\lambda_0hQ}{\epsilon_rab}\cos^2\left(\frac{\pi y}{b}\right)$$

(3)

式中: $a$  为金属贴片的宽度; $b$  为金属贴片的长度。

2.5 天线的增益

微带贴片天线的增益公式为:

$$G_r=\frac{\epsilon_rab}{120\lambda_0hQ_r}$$

(4)

式中: $Q_r=c\sqrt{\epsilon_r}/(4f_rh)$ ;  $f_r$  为谐振频率,一般可取中心频率; $c$  为电磁波传播速度。

天线的方向性系数为:

$$D=\frac{2}{15G_r}\left(\frac{a}{\lambda_0}\right)^2$$

(5)

天线的效率为:

$$\eta_r=\frac{Q}{Q_r}$$

(6)

天线的增益等于方向性系数与效率的乘积:

$$G=D\eta_r$$

(7)

3 微带贴片天线参数计算与性能分析

3.1 驻波比

工程上常用电压驻波系数 VSWR 表征天线与馈线匹配情况,其计算公式为<sup>[5]</sup>:

$$VSWR=\frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}$$

(8)

式中: $\Gamma$  是反映反射损耗的反射系数,是一个复数,其与传输特性阻抗的关系是:

$$Z_i=Z_c\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}$$

(9)

式中: $Z_i$  是天线的输入总阻抗; $Z_c$  是传输线特性阻抗。

图 2 中曲线 1 是微带天线展宽频带前的理论驻波比,曲线 2 是展宽频带后的理论驻波比,曲线 3 是利用 HP8720D 标准网络分析仪测得的展宽频带后的驻波比。由图 2 可知,微带矩形贴片天线的中心频率为 390 MHz,驻波比小于 2 的绝对带宽为 340~440 MHz,且理论曲线和实测曲线基本吻合。

在天线工程中,相对带宽  $B<0.1$  为窄带天线,而本文设计的 MPA 传感器的相对带宽为 25%,达到宽频天线范围,另外从图中展宽频带前后的驻波比曲线可以看出,在前面天线设计过程中所采用的频带展宽方法得当、

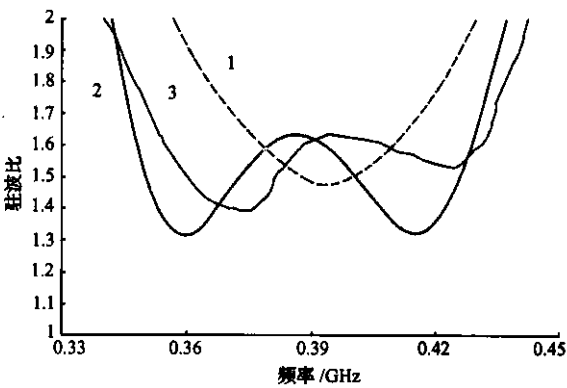


图 2 微带贴片天线理论和实测驻波比曲线

效果明显。

3.2 方向图

使用 Ansoft HFSS 计算可以得到 MPA 天线在  $\phi=0^\circ$  时  $x-z$  平面和  $\phi=90^\circ$  时  $y-z$  平面的方向图,如图 3 所示。参照图 1 的坐标系,其中  $\theta, \phi$  是球坐标中的角度变量, $P$  点是辐射点, $r$  为辐射点到原点的距离。

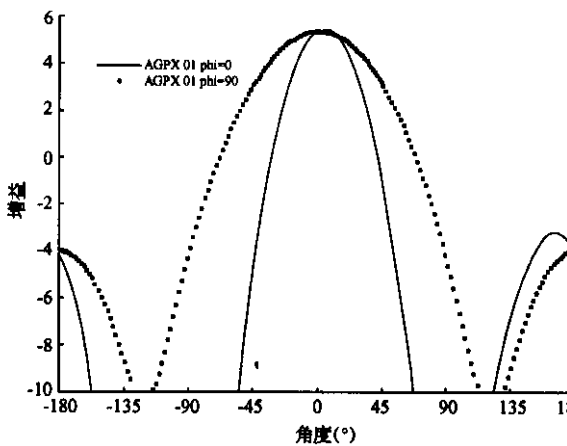


图 3 微带贴片天线方向图

从图 3 中可看出,MPA 传感器在  $\theta=0^\circ$  时,具有最佳方向性;当  $\phi=0^\circ$  时、 $\theta=90^\circ$  时和  $\phi=90^\circ$ 、 $\theta=120^\circ$  时方向性最差。从图中还可知 MPA 对方向性要求较高,当没有处于最佳检测方向时,接收性能下降较快,所以在接收信号时要正确调整天线的方向,来获得最大的增益。

本文在外观结构设计和材料选用上,考虑到 MPA 要有效接收盆式绝缘子处泄漏的电磁波,而对周围空间电磁干扰抑制,因此在 MPA 天线背面和部分侧面采用金属材料对天线进行了屏蔽,如图 4 所示。屏蔽时留出靠近 GIS 盆式绝缘子缝隙的这一面,由于 MPA 的方向性,盆式绝缘子泄漏的电磁波得到最大增益,而从侧面耦合的干扰信号增益较小。在 GIS 局放监测现场,MPA 传感器用环氧树脂制成的支撑架固定在 GIS 的盆式绝缘子法兰上,这样就尽可能在远场区范围内使 MPA 传感器测量局放产生的泄漏电磁波,同时方向性好。

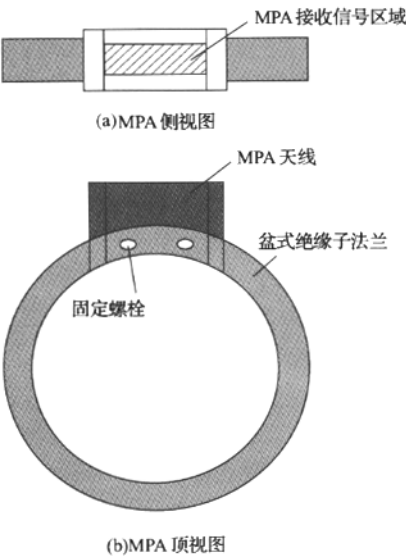


图 4 微带贴片天线的外观

3.3 增益

为验证所计算的增益值,采用两相同天线法来实测天线的增益,涉及的参数主要有:波长 $\lambda_0$ 、间距 $R$ 、发射功率 $P_t$ 、发射端插损 $L_1$ 、接收功率 $P_r$ 和接收端插损 $L_2$ ,实测数据如表 1 所示。

两相同天线法实测天线增益的计算公式为:

$$L_0 = 20 \lg \left( \frac{\lambda_0}{4\pi R} \right) \tag{10}$$

$$G = \frac{1}{2} (P_r - P_t - L_2 - L_1 - L_0) \tag{11}$$

表 1 天线增益实测数据

$\lambda_0/\text{m}$	$R/\text{m}$	$P_t/\text{dB}$	$L_1/\text{dB}$	$P_r/\text{dB}$	$L_2/\text{dB}$
0.776	4.86	15.36	-0.78	-11.8	1.04

把表 1 中实测数据代入式(10)、(11)可得实际增益为 5.38,由式(7)计算可得天线增益的理论值为 5.7,两者基本接近。由理论值和实测值可以看出,MPA 传感器的增益较高,有利于检测微弱信号和后续阶段的信号处理。

4 微带矩形贴片天线的实测研究

为考核 MPA 传感器检测 UFH 局放信号的能力,采用 GIS 局部放电检测系统对其进行测试,实验回路如图 5 所示。实验中,在 GIS 模拟装置中充以 0.5 MPa 的 SF<sub>6</sub> 和 N<sub>2</sub> 的混合气体(体积比 4:1),用内置圆环传感器<sup>[2]</sup>和 MPA 进行检测对比,局放信号波形用高速数字示波器(Iecroy wavepro7100,带宽 1 GHz,最大采样率 20 GS/s,存储深度 48 M)记录波形,并引入工频信号作为相位参考。

由实验可知,针缺陷的起始放电电压为 12.5 kV,随着电压的升高,放电重复率和幅值增大,信号的波形和频

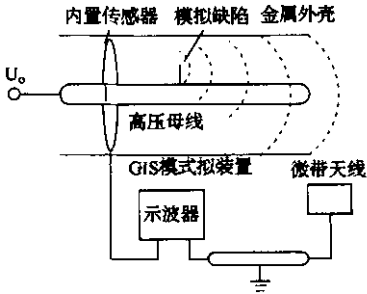


图 5 GIS 局部放电检测系统

谱的形状变化不大。实测结果如图 6 所示,图 6(a)为内置圆环在 19.6 kV 时测得的局放波形及其频谱图,图 6(b)为 MPA 测得的局放波形和频谱图。MPA 测得的信号幅值和信噪比都稍差于内置传感器,但是可以检测到清晰的局部放电信号,能满足局放检测的需要,具有较高灵敏度,且可避开一定的窄带和随机干扰。从频谱图还可以看到信号的频谱主要分布在 440 MHz 之前,这与天线的理论截止频率相吻合。

图 7 是实测信号波形与相位图,针缺陷导致的放电主

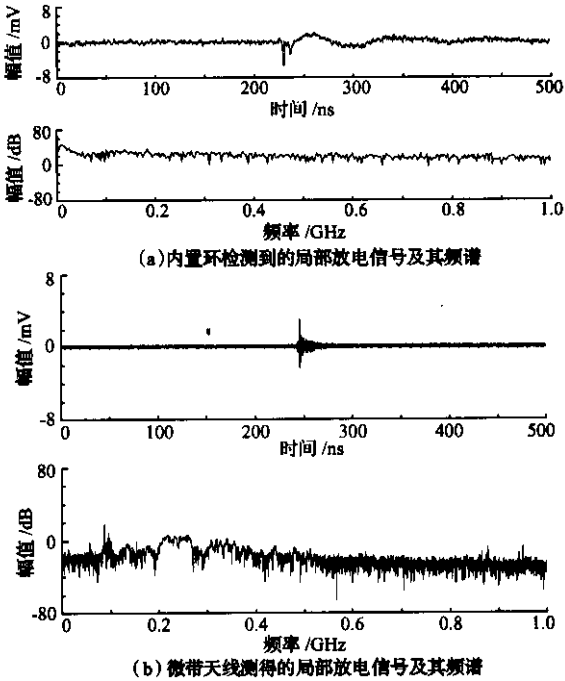


图 6 两种传感器测得的局部放电信号和频谱

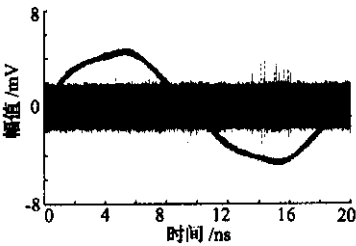


图 7 局部放电信号波形与相位

要发生在正负半周幅值最大处附近,正半周放电发生的很稀疏且放电幅值小于负半周。

## 5 结 论

本文采用选择天线基板材料、厚度和形状、附加阻抗匹配网络等方法进行了频带展宽,频带展宽后的微带天线的工作频带 340~440 MHz,中心频率为 390 MHz,相对带宽 25.6%,达到宽频带天线范围;在实验室与内置圆环传感器对比测试表明,MPA 传感器具有较高的灵敏度,实测增益达到了 5.38 dB,有利于微弱局放信号的检测;在结构上,对 MPA 天线背面和部分侧面采用金属材料屏蔽封装设计,提高了 MPA 天线的抗干扰能力。

## 参考文献

- [1] 唐炬,宋胜利,孙才新,等.局部放电离散谱干扰的熵阈值抑制法[J].电力系统自动化,2003,27(3):54-57.
- [2] 孙才新,许高峰,唐炬,等.检测 GIS 局部放电的内置传感器的模型及性能研究[J].中国电机工程学报,2004,24(8):89-94.
- [3] 唐炬,朱伟,孙才新,等.检测 GIS 局部放电的超高频屏蔽谐振式环天线传感器研究[J].仪器仪表学报,

2005,26(7):705-709.

- [4] 唐炬,魏刚,孙才新,等. GIS 局部放电检测用超宽频带振子天线传感器研究[J]. 高电压技术,2004,30(3):29-31.
- [5] 林昌禄,聂在平. 天线工程手册[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [6] 张钧,刘克诚,张贤铎,等. 微带天线理论与工程[M]. 北京:国防工业出版社,1988.
- [7] POMPILI M, MAZZETTI C, BARTNIKAS R. Simultaneous ultrawide and narrowband detection of pd pulses in dielectric liquids[J]. IEEE Trans. on Dielect. and lect. Insul, 1998(5):402-407.
- [8] RPODAR D, CHATTERJEE J S, CHOWDHURY S K. On some broad-band microstrip resonators[J]. IEEE Trans on Antenna Propagate, 1983, 31(5):193-194.

## 作者简介



张晓星,男,1972 年出生,博士,副教授,主要研究方向为高压电气设备绝缘在线监测和故障诊断技术。

E-mail: mikezxx@tom.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>