

## 5.4 电磁波的极化、色散与群速

### 5.4.1 电磁波的极化

前面讨论的无限大均匀媒质中的平面电磁波，都是假定空间任一点的电场和磁场的矢量方向不变，但这只是一种特殊情形，有的天线(如螺旋天线，双波型喇叭辐射器等)发射的电磁波的电场或磁场方向则是随时间变化的，因此有必要研究一下平面波场强的方向问题，研究这一问题对于如何架设和选择天线等都有重要的现实意义。例如，一根与地面垂直架设的线天线，将接收不到另一根天线发射的电场方向与此线天线垂直的电磁波。飞机相对地面的方向经常变化，如选用螺旋天线，就能保证通信连续不断，因为螺旋天线的电磁波的电磁场是旋转的，各个方向均有。

#### (1) 极化的概念

为了说明电磁波的场强方向的取向，接下来引入波的极化的概念。**波的极化**是指空间固定点上场强方向随时间变化的方式，通常用电场强度矢量端点随着时间在空间描绘出的轨迹来表示电磁波的极化，波的极化也叫**波的偏振**。前面介绍的均匀平面电磁波的电场强度矢量端点在空间沿直线变化，画出的轨迹是一条直线，称此种波为**线极化波**。一般情况下，对于沿  $z$  轴方向传播的均匀平面波，电场强度矢量应写成两个分量，其表达式为

$$\mathbf{E} = \hat{x}E_x + \hat{y}E_y = (\hat{x}E_{0x} + \hat{y}E_{0y})e^{-jkz} = (\hat{x}E_{xm}e^{j\varphi_x} + \hat{y}E_{ym}e^{j\varphi_y})e^{-jkz} \quad (5-4-1)$$

两个分量写成瞬时值为

$$\begin{cases} E_x = E_{xm} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \\ E_y = E_{ym} \cos(\omega t - kz + \varphi_y) \end{cases} \quad (5-4-2)$$

此时合成矢量  $\mathbf{E}$  随时间变化的矢量端点轨迹就不一定是一条直线，有可能是一个椭圆，也有可能是一个圆，也就是说波的极化不一定是直线极化。对于按正弦规律变化的电磁波，波的极化可分为直线极化、圆极化及椭圆极化三种。

#### (2) 平面电磁波的极化方式

##### 直线极化

当电场的两个分量没有相位差(同相)或相位差  $180^\circ$  (反相)时，合成电场矢量是**直线极化**。

先讨论同相的情况，即  $\omega t - kz + \varphi_x = \omega t - kz + \varphi_y$ ，也就是  $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_0$ ，则合成电磁波的电场强度矢量的模为

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{E_{xm}^2 + E_{ym}^2} \cos(\omega t - kz + \varphi_0) \quad (5-4-3)$$

电场强度矢量与  $x$  轴正向夹角  $\theta$  的正切为

$$\tan \theta = \frac{E_y}{E_x} = \frac{E_{ym}}{E_{xm}} = \text{常数} \quad (5-4-4)$$

即  $\theta = \text{常数}$ 。如图 5-4-1(a)所示(图中取  $z = 0$ )，虽然电场矢量  $\mathbf{E}$  的大小随时间作正弦变化，但其矢端轨迹是一条直线，故称为线极化(Linear Polarization)。因此直线位于一、三象限，所以也称为一、三象限线极化。

同理反相时，有  $\varphi_x - \varphi_y = \pm\pi$ ， $\tan \theta = \frac{E_y}{E_x} = -\frac{E_{ym}}{E_{xm}} = \text{常数}$ ，如图 5-4-1(b)所示，矢端

轨迹也是一条直线，不过此直线位于二、四象限，为二、四象限线极化。

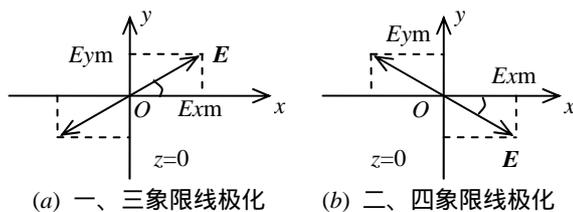


图 5-4-1 线极化

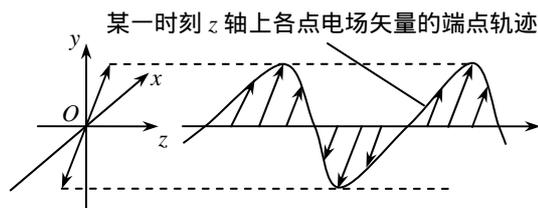


图 5-4-2 线极化波波形

当  $E_{ym} = E_{xm}$  时,  $\theta = \frac{\pi}{4}$  (同相) 或  $\frac{3\pi}{4}$  (反相); 如果  $E_y = 0$ , 则  $\theta = 0$ , 电场  $E$  只有  $E_x$

分量, 称  $E$  为  $x$  轴取向的线性极化波; 如果  $E_x = 0$ , 则  $\theta = \frac{\pi}{2}$ , 电场  $E$  只有  $E_y$  分量, 称  $E$  为  $y$  轴取向的线性极化波。

对于时谐变电磁场的线极化波, 某一时刻, 在沿着传播方向的某一直线上各点的电场强度矢量端点的轨迹如图 5-4-2 所示, 此即线极化波的波形。

圆极化

当电场的两个分量振幅相等, 相位相差  $\pm \frac{\pi}{2}$  时, 合成的电场矢量端点的轨迹为一个圆, 称这样的波为**圆极化波**。

设  $E_{xm} = E_{ym} = E_m$ ,  $\varphi_x - \varphi_y = \pm \frac{\pi}{2}$ ,  $z = 0$ , 则

$$E_x = E_m \cos(\omega t + \varphi_x), E_y = E_m \cos(\omega t + \varphi_x \mp \frac{\pi}{2}) = \pm E_m \sin(\omega t + \varphi_x) \quad (5-4-5)$$

消去  $t$  得  $E_x^2 + E_y^2 = E_m^2$ , 此为圆心在原点, 半径为  $E_m$  的圆方程。合成电磁波的电场强度矢量  $E$  的模及与  $x$  轴正向夹角  $\theta$  分别为

$$|E| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = E_m, \theta = \arctan \frac{\pm \sin(\omega t + \varphi_x)}{(\omega t + \varphi_x)} = \pm(\omega t + \varphi_x) \quad (5-4-6)$$

可见  $E$  的大小不随时间变化, 而  $E$  与  $x$  轴正向夹角  $\theta$  随时间变化。因此合成电场强度矢量的矢端轨迹为圆, 称为**圆极化**(Circular Polarization)。

由于  $\theta$  的变化方式有两种, 即  $\theta$  以角速度  $\omega$  随时间线性增加或线性减小, 因此  $E$  矢端沿圆轨迹的旋转方向不一样。如果

$\theta = +(\omega t + \varphi_x)$ , 如图 5-4-3(a) 所示, 电场矢量端点将以角速度  $\omega$  在  $xOy$  平面上沿逆时针方向作等角速旋转。此时  $\varphi_x - \varphi_y = \frac{\pi}{2}$ , 即

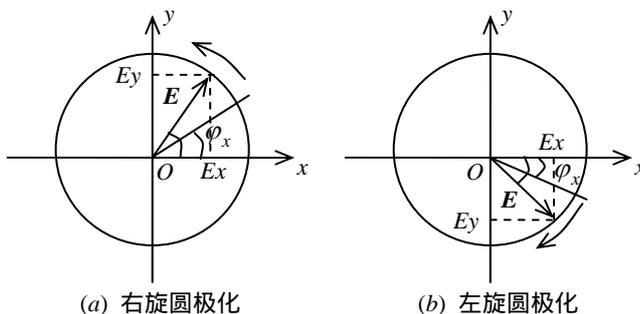


图 5-4-3 圆极化

$E_x$  的相位比  $E_y$  超前  $\frac{\pi}{2}$ ,  $\theta$  取正

值, 并随时间的增加而增加。电场旋转方向与传播方向(此处为  $+z$  方向)符合右手定则, 称此情况为右旋圆极化。如果  $\theta = -(\omega t + \varphi_x)$ , 如图 5-4-3(b) 所示,  $E$  将以角速度  $\omega$  在  $xOy$  平

面上沿顺时针方向作等角速旋转，此时  $\varphi_x - \varphi_y = -\frac{\pi}{2}$ ，即  $E_x$  的相位比  $E_y$  滞后  $\frac{\pi}{2}$ ， $\theta$  取负值，并随时间的增加而减小，电场旋转方向与传播方向符合左手螺旋关系，称此情况为左旋圆极化<sup>[1]</sup>。具体判断时也可按如下方式进行：将右手大拇指指向电磁波的传播方向，其余四指指向电场强度  $E$  的矢端并旋转，若与  $E$  的旋转一致，则为右旋圆极化波；若与  $E$  的旋转相反，则为左旋圆极化波。

对于圆极化平面波，某一时刻，在沿着传播方向的某一直线上各点的电场强度矢量端点的轨迹如图 5-4-4 所示，此即圆极化波的波形，此波形为螺旋形，螺旋天线就可以辐射这样的电磁波。

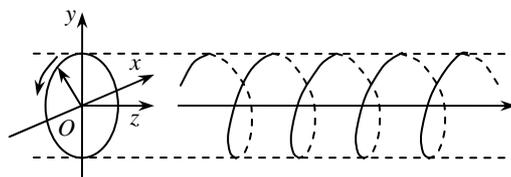


图 5-4-4 圆极化波波形(右旋)

### 椭圆极化

如果  $E_x$  和  $E_y$  的振幅和相位为除  $\frac{\pi}{2}$  以外的任意数值，则合成电场矢量端点的轨迹为椭圆，称这样的波为椭圆极化波。

取  $z = 0$ ，消去式(5-4-2)中的  $t$ ，得

$$\left(\frac{E_x}{E_{xm}}\right)^2 - \frac{2E_x E_y}{E_{xm} E_{ym}} \cos \varphi + \left(\frac{E_y}{E_{ym}}\right)^2 = \sin^2 \varphi \quad (5-4-7)$$

式中  $\varphi = \varphi_x - \varphi_y$ 。该式表示以  $E_x$  和  $E_y$  为变量的椭圆方程，

如图 5-4-5 所示。

该椭圆的中心在坐标原点，当  $\varphi = \varphi_x - \varphi_y = \pm \frac{\pi}{2}$  时，椭圆的长短轴在坐标轴上，当  $\varphi = \varphi_x - \varphi_y \neq \pm \frac{\pi}{2}$  时，则长短轴不在坐标轴上。根据左、右旋的定义，可知当  $0 < \varphi_x - \varphi_y < \pi$

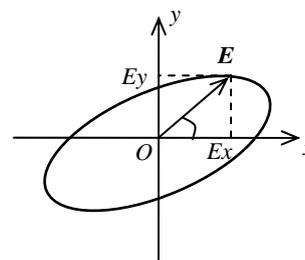


图 5-4-5 椭圆极化

时为右旋椭圆极化，当  $-\pi < \varphi_x - \varphi_y < 0$  时，为左旋椭圆极化。此时旋转的角速度不能简单地认为还是常数  $\omega$ ，而是时间的函数。

通常用椭圆极化角和椭圆率这两个参量来表示椭圆极化特性。定义椭圆极化角为椭圆长轴与  $x$  轴所夹的角，用  $\theta$  表示，可以求得

$$\tan 2\theta = \frac{2E_{xm} E_{ym} \cos \varphi}{E_{xm}^2 - E_{ym}^2} \quad (5-4-8)$$

定义椭圆率为椭圆短轴与长轴之比，用  $\rho$  表示，即

$$\rho = \frac{\text{短轴}}{\text{长轴}}$$

由定义可知极化角  $\theta$  表示了椭圆的取向，椭圆率表示出了椭圆是扁的还是趋向于圆的，若  $\rho \rightarrow 1$  则椭圆趋向于圆，若  $\rho \rightarrow 0$  则椭圆趋向于直线。其实直线极化与圆极化只是椭圆极

[6] 有关左、右旋的定义并不统一，在阅读有关参考书时须注意。这里采用 IRE 标准，此标准规定：观察者顺着波传播方向看去，电场矢量在横截面内的旋转方向为顺时针，则定为右旋极化，反之则为左旋极化。

化的一种特例。

前面讨论的不同极化(偏振)可看作若干个具有同传播方向同频率的平面电磁波合成的结果。若场矢量具有任意的取向,任意的振幅和杂乱的相位,则合成波将是杂乱的。

圆极化波在雷达、导航、制导、通信和电视广播上被广泛采用。因为一个线极化波可以分解为两个振幅相等、旋向相反的圆极化波,一个椭圆极化波可以分解成两个不等幅的、旋向相反的圆极化波。用圆极化天线来接收信号的话,不管发射的极化方式如何肯定能收到信号,不会出现失控的情况。

**例 5-4-1** 判断下列平面电磁波的极化方式

$$(1) \quad \mathbf{E} = \hat{y}3 \cos(\omega t - \beta x - \frac{\pi}{4}) + \hat{z}4 \sin(\omega t - \beta x + \frac{\pi}{4})$$

$$(2) \quad \mathbf{E} = E_0(-\hat{x} + j\hat{y})e^{-jkz}$$

$$(3) \quad \mathbf{E} = E_0(\hat{x} + 2j\hat{z})e^{-jky}$$

$$(4) \quad \mathbf{E} = (-\hat{x}25j + \hat{z}25)e^{-(0.01+j120)y}$$

**解** (1)  $E_y = 3 \cos(\omega t - \beta x - \frac{\pi}{4})$ ,  $E_z = 4 \sin(\omega t - \beta x + \frac{\pi}{4}) = 4 \cos(\omega t - \beta x - \frac{\pi}{4})$ , 波沿  $x$  轴正向传播,  $\varphi_y = \varphi_z = -\frac{\pi}{4}$ ,  $E_x$  与  $E_y$  同相, 所以波为一、三象限的直线极化波。

(2) 此为复数形式, 由于  $\mathbf{E} = jE_0(j\hat{x} + \hat{y})e^{-jkz} = E_0(\hat{x}e^{j\frac{\pi}{2}} + \hat{y})e^{-jkz}e^{j\frac{\pi}{2}}$ , 可以看出  $E_x$  和  $E_y$  振幅相等, 且  $E_x$  相位超前  $E_y$  相位  $\frac{\pi}{2}$ , 电磁波沿  $+z$  方向传播, 故为右旋圆极化波。

$$(3) \quad \mathbf{E} = E_0(\hat{x} + 2\hat{z}e^{j\frac{\pi}{2}})e^{-jky}, \quad E_z \text{ 相位比 } E_x \text{ 超前 } \frac{\pi}{2}, \text{ 振幅}$$

不相等, 所以为椭圆极化, 又从  $e^{-jky}$  可知波沿  $+y$  方向传播, 所以  $\mathbf{E}$  的旋转方向如图 5-4-6 所示, 可见此电磁波为右旋椭圆极化波。

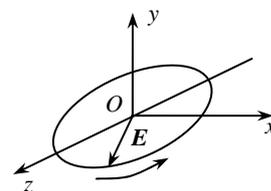


图 5-4-6 例 5-4-1(3)用图

(4)  $\mathbf{E} = 25e^{-0.01y}(\hat{x}e^{-j\frac{\pi}{2}} + \hat{z})e^{-j120y}$ , 在空间固定点,  $E_x$  与  $E_z$  振幅相等, 且  $E_z$  相位比  $E_x$  超前  $\frac{\pi}{2}$ , 波沿  $+y$  方向传播, 所以此波为右旋圆极化波。顺便提一下,  $e^{-0.01y}$  在此表明波沿  $+y$  方向衰减程度。

#### 5.4.2 色散与群速

我们熟知, 当一束太阳光射到三棱镜上时, 在三棱镜的另一边就可看到红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫的彩色光, 这就是光谱段电磁波的色散现象, 原因是由于不同频率的单色光在同一媒质中具有不同的折射率(即具有不同的相速度)所导致的。

**媒质的色散**是由于媒质的参数  $\epsilon$ 、 $\mu$  和  $\sigma$  与频率有关。理想媒质其参数不随频率而变, 则称是非色散媒质。如果是有耗媒质, 在交变电磁场情况下, 媒质的带电粒子的运动跟不上交变场的变化而产生滞后现象, 此时要引入复介电常数, 此复介电常数与频率有关, 所以有耗媒质有色散特性。当交变电磁场的频率接近于媒质的固有频率时, 带电粒子将从交

变场中吸收能量而造成散射损耗。

**波的色散**是指波的相速与频率有关。在有耗媒质中的电磁波，相速与频率有关，所以其中传播的电磁波必然要发生色散。由于  $v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$ ，波的相速度只取决于媒质的参数  $\varepsilon$  和  $\mu$ ，因此对于理想媒质波的相速与频率无关。对于非理想媒质，介电常数  $\varepsilon$  是频率  $\omega$  的函数， $\beta$  为  $\omega$  的复杂函数，在这种情况下相速  $v_p$  与频率有关。如良导体中的相速为

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}}$$

引起波的色散的原因是多方面的，这里讨论的是由于媒质的色散引起波的色散。要了解更详细的介绍请读者自行查阅有关参考书。

当包含不同频率的信号加到电磁波载体上时，如果信号所包含的各频率分量相速不等，那么信号传播一段距离后，信号各分量合成的波形将与起始时的波形不同，引起信号的波形失真，称这种失真为**色散失真**。图 5-4-7 表示矩形脉冲波(可利用傅里叶展开将其表示为无数不同频率正弦波的叠加)经过光纤长距离传输后因色散而畸变为钟形波(各种不同频率正弦波叠加后不再是矩形脉冲波)。光脉冲变宽后有可能使接收端的前后两个脉冲无法分辨。

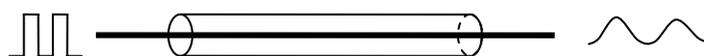


图 5-4-7 矩形脉冲波经过光纤传输后变成钟形波

场强表达式以  $E = \hat{x}E_0 \cos(\omega t - kz)$  形式表示的平面波是在时间、空间上无限延伸的单

一频率的电磁波，称之为**单色波**，一个单一频率的正弦电磁波不能传播信号，并且理想的单频正弦电磁波实际上是不存在的，信号加到电磁波上就不再是单色波。实际工程中的电磁波在时间和空间上是有限的，它由不同频率的正弦波(谐波)叠加而成，称为**非单色波**，是以某种频率  $\omega_0$  为载波频率的有狭窄频带  $\Delta\omega$  的波，称为**波包**，如图 5-4-8 所

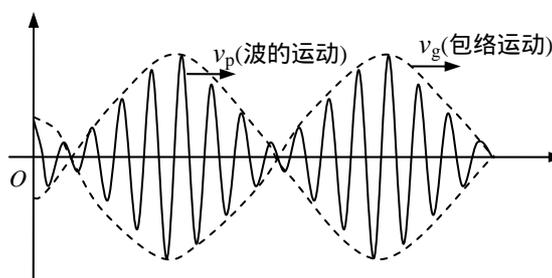


图 5-4-8 相速与群速

示，这是按正弦变化的调制波，虚线为信号的包络，此包络移动的相速度称为**群速**，用  $v_g$  表

示，从图可以看出  $v_g$  与相速度  $v_p$  是不一样的概念。 $v_p$  是信号等相位面的速度，而  $v_g$  是包络波等相位点推进的速度。由于群速是波的包络上一个点的传播速度，对于频谱很宽的信号，其包络在传播过程中发生畸变，即包络形状将随波的传播而变化，此时群速已无意义，所以群速只对窄频带信号有意义。

对于窄频带信号( $\Delta\omega \ll \omega$ )群速的表达式为

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} \tag{5-4-9}$$

而相速  $v_p = \frac{\omega}{\beta}$ ，相速与群速之间的大小关系由相速随频率的变化关系决定。可以证明，当

相速不随频率变化时，即  $\frac{dv_p}{d\omega} = 0$ ，则  $v_g = v_p$ ，群速等于相速，此时的媒质为非色散媒质；

当  $\frac{dv_p}{d\omega} < 0$  时， $v_g < v_p$ ，即群速小于相速，称此种情况为正常色散；当  $\frac{dv_p}{d\omega} > 0$  时， $v_g > v_p$ ，

即群速大于相速，称此种情况为反常色散，导体中的色散就是反常色散。可以对正常色散及反常色散现象加以利用，使其相互补偿，从而改善相位频率特性。

### 思考题

1、直线极化与圆极化是椭圆极化的两种特例，试就式(5-4-7)讨论什么情况下是直线极化？什么情况下是圆极化，又如何判断左旋还是右旋？什么情况下是正椭圆(长短轴在坐标轴上的椭圆)极化。

2、试画出左旋圆极化波波形。

3、简述相速与群速的区别。

## 射频和天线设计培训课程推荐

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,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 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。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



### 射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

### ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



### HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

## CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



## 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,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.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>



### 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并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
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,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>