



13.56MHz NFC/RFID 天线及其匹配

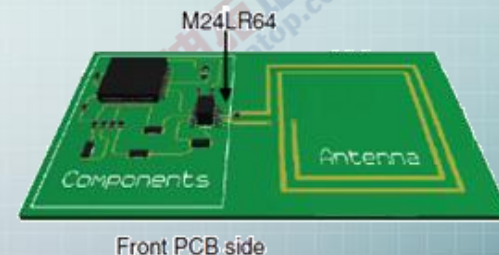
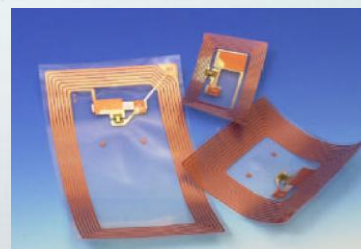
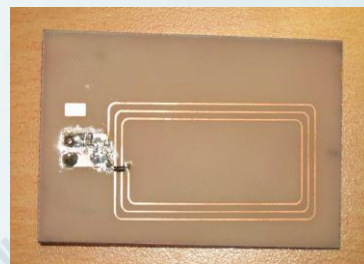
电路设计详解—视频培训课程

主讲：李明洋

易迪拓培训 (www.edatop.com)

概述

- 现在13.56MHz无线智能卡应用已经十分广泛，像二代身份证、手机支付、校园一卡通、公司员工工卡都是使用13.56MHz无线智能卡技术
- 对于13.56MHz无线智能卡，其天线基本都是采用都是下图所示线圈天线
- 这里，我们就来详细介绍13.56MHz线圈天线设计及其匹配电路的设计和调试，包括：
 - 13.56MHz NFC/RFID天线工作原理
 - 天线设计考量和如何设计
 - 匹配电路的设计和调试



课程内容

目录

Contents

- ① 13.56MHz RFID/NFC标准简介
- ② 13.56MHz NFC/RFID天线和传统天线的区别
- ③ 13.56MHz NFC/RFID天线工作原理
- ④ 天线等效电路
- ⑤ 天线设计考量和设计步骤
- ⑥ 天线线圈的设计
- ⑦ 天线相关参数测量
- ⑧ 匹配电路的设计和调试
- ⑨ 匹配电路的设计实例
- ⑩ 总结

课程内容

目录

Contents

- ① 13.56MHz RFID/NFC标准简介
- ② 13.56MHz NFC/RFID天线和传统天线的区别
- ③ 13.56MHz NFC/RFID天线工作原理
- ④ 天线等效电路
- ⑤ 天线设计考量和设计步骤
- ⑥ 天线线圈的设计
- ⑦ 天线相关参数测量
- ⑧ 匹配电路的设计和调试
- ⑨ 匹配电路的设计实例
- ⑩ 总结

一、13.56MHz RFID/NFC标准简介

➤ 13.56MHz RFID/NFC 国际标准

- ISO/IEC 14443 - Type A, ISO/IEC 14443 - Type B, ISO/IEC 15693
- ISO – International Organization for Standardization, 国际标准化组织
- IEC – International Electrotechnical Commission, 国际电子科技化委员会

➤ ISO/IEC 14443 - Type A / Type B

- ISO14443A/B:超短距离智慧卡标准，该标准订出读取距离<20cm的短距离非接触智慧卡的功能及运作标准。ISO14443定义了TYPE A, TYPE B两种类型协议，通信速率为106kbit/s，都是采用423KHz的副载波技术，它们的不同主要在于载波的调制深度及位的编码方式。
- Type A —— 手机支付，校园一卡通
- Type B —— 二代身份证

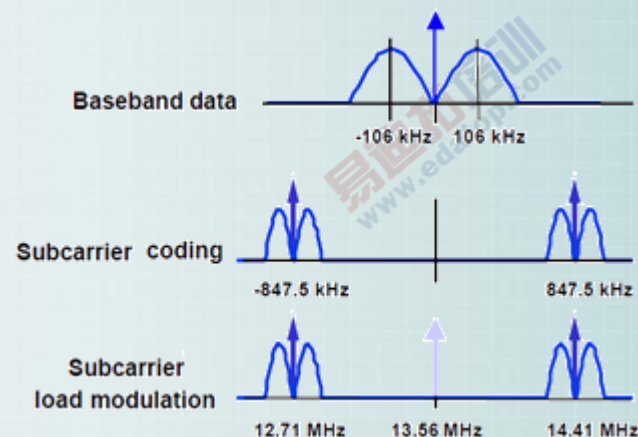
➤ ISO/IEC 15693

- ISO15693:短距离智慧卡标准，这标准订出读取距离可高达1米非接触智慧卡。

一、13.56MHz RFID/NFC标准简介 (cont.)

➤ 对于天线设计来说，重点关注其空中接口标准

	ISO14443-A	ISO14443-B	ISO15693
工作频率	13.56MHz	13.56MHz	13.56MHz
允许频偏	±7KHz	±7KHz	±7KHz
副载波频率	847.5 kHz	847.5 kHz	423KHz
数据率	106kbps	106kbps	27kbps



➤ 工作带宽

	ISO14443-A	ISO14443-B	ISO15693
带宽	1.921MHz	1.921MHz	0.914MHz

课程内容

目录

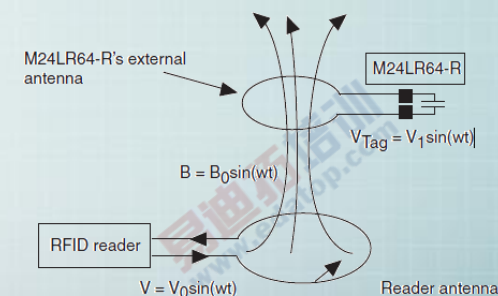
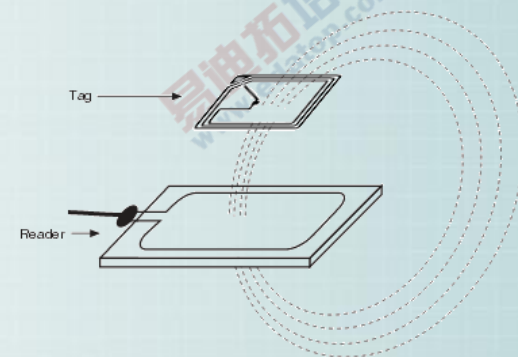
Contents

- ① 13.56MHz RFID/NFC标准简介
- ② 13.56MHz NFC/RFID天线和传统天线的区别**
- ③ 13.56MHz NFC/RFID天线工作原理
- ④ 天线等效电路
- ⑤ 天线设计考量和设计步骤
- ⑥ 天线线圈的设计
- ⑦ 天线相关参数测量
- ⑧ 匹配电路的设计和调试
- ⑨ 匹配电路的设计实例
- ⑩ 总结

二、 13.56MHz NFC/RFID天线和传统天线的区别

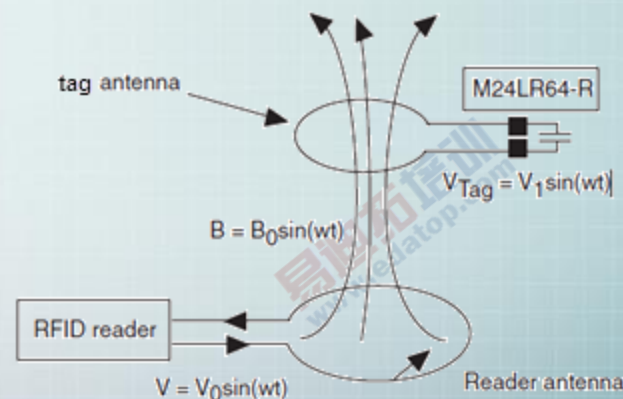
13.56MHz NFC/RFID天线不是传统意义上的天线！

- 传统天线是通过向空中辐射电磁波来传输电磁信号，天线工作于远区场，为了能把电磁信号辐射到空中，天线的长度需要和工作波长相比拟
- 例如简单的半波偶极子天线长度是 $\frac{1}{2}$ 波长，或者单极子天线长度是 $\frac{1}{4}$ 波长，对应到13.56MHz的工作频率，半波偶极子天线和单极子天线尺寸分别约为：11.06m 和5.03m
- 再看传统的环天线，其辐射电阻 $R_r \approx 31200 \times \left(\frac{A}{\lambda^2}\right)^2$ ，那么对于1m \times 1m的矩形环天线，其辐射电阻 $R_r \approx 0.1$ 欧姆



二、13.56MHz NFC/RFID天线和传统天线的区别 (cont.)

- 但是13.56MHz NFC/RFID天线工作距离远小于传统天线
- 传统天线工作距离远大于工作波长，工作于远场区
 - 手机天线，需要接收几百米直到十几公里外的基站信号
 - 收音机天线，更需要接收远达几十、几百公里外的发射塔信号
- 13.56MHz NFC/RFID天线工作距离远小于工作波长，工作于近场耦合区
 - ISO14443-A/B工作距离只有10cm左右，ISO15693最远工作距离也只有1m，远小于22.12m的工作波长，通过电磁耦合进行电磁能量的传输
- **结论：**
 - **13.56MHz NFC/RFID天线工作距离短，通过近场电磁耦合来传输电磁信号，可以看作是一个耦合线圈**



课程内容

目录

Contents

- ① 13.56MHz RFID/NFC标准简介
- ② 13.56MHz NFC/RFID天线和传统天线的区别
- ③ **13.56MHz NFC/RFID天线工作原理**
- ④ 天线等效电路
- ⑤ 天线设计考量和设计步骤
- ⑥ 天线线圈的设计
- ⑦ 天线相关参数测量
- ⑧ 匹配电路的设计和调试
- ⑨ 匹配电路的设计实例
- ⑩ 总结

三、13.56MHz NFC/RFID天线工作原理

➤ 13.56MHz NFC/RFID天线实际上可以看作一个耦合线圈，所以我们就从线圈耦合的角度讲解天线的工作原理，这里以圆环为例：

➤ 安培定律 (Ampère's law)

- 电流流经一段导体时会在导体周围产生磁场，磁感应强度大小：

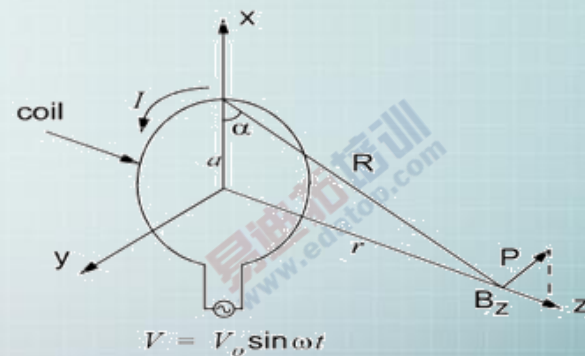
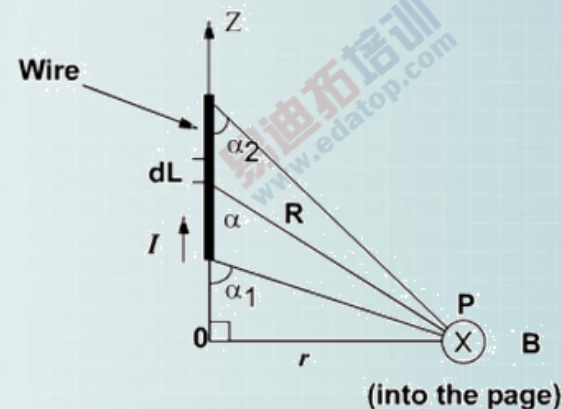
$$B = \frac{\mu_o I}{4\pi r} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)$$

- 以闭合圆环为例，在圆环沿着圆心的法线防线上，磁感应强度

$$B_z = \frac{\mu_o I N a^2}{2(a^2 + r^2)^{3/2}}$$

$$= \frac{\mu_o I N a^2}{2} \left(\frac{1}{r^3}\right) \quad \text{for } r^2 \gg a^2$$

- 可见线圈产生磁感应强度：正比于线圈匝数和线圈面积
随着距离的3次方衰减



三、13.56MHz NFC/RFID天线工作原理 (cont.)

➤ 法拉第电磁感应定律:

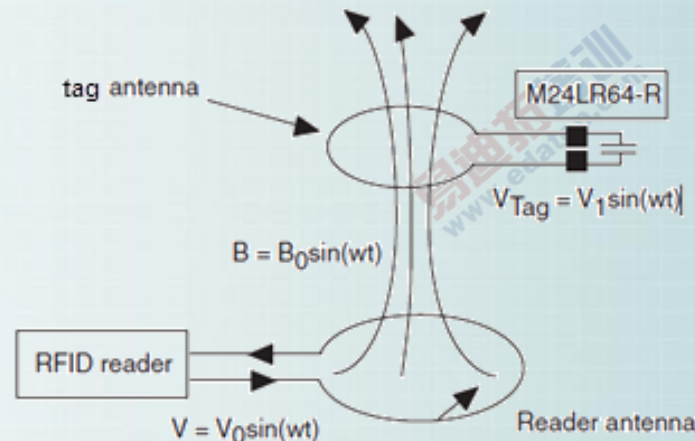
- 时变磁场穿过闭合空间会产生感应电压

$$\Psi = \int B \cdot dS \quad V = -N \frac{d\Psi}{dt}$$

$$V = -N_2 \frac{d\Psi_{21}}{dt} = -N_2 \frac{d}{dt} \left(\int B \cdot dS \right)$$

$$= -N_2 \frac{d}{dt} \left[\int \frac{\mu_0 i_1 N_1 a^2}{2(a^2 + r^2)^{3/2}} \cdot dS \right]$$

$$= - \left[N_2 (\pi b^2) \frac{\mu_0 N_1 a^2}{2(a^2 + r^2)^{3/2}} \right] \frac{di_1}{dt}$$



$$L = \frac{N\Psi}{I}$$

- 由此可见，在电流一定的条件下，欲让天线线圈产生较大的电压/磁通量，就必须增加天线线圈的匝数或增大天线的面积，这样会增大天线线圈的电感

三、13.56MHz NFC/RFID天线工作原理 (cont.)

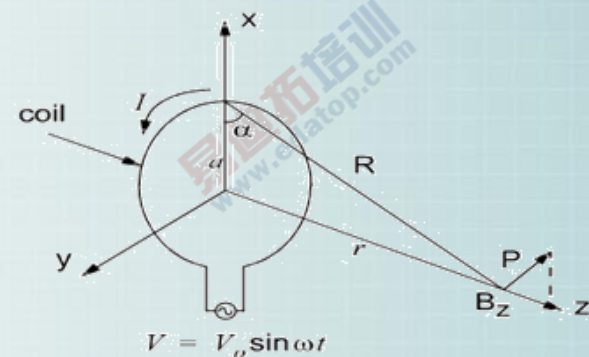
➤ 最佳天线尺寸

- 以圆环天线为例，给出在工作距离r固定的情况下，磁感应强度

$$B_z = \frac{\mu_0 I N a^2}{2(a^2 + r^2)^{3/2}}$$

- 要使得在距离为r处通量有极大值，也就是是此处磁感应强度B取得极大值，那么此时B相对于r导数应该为零，可以求得此时

$$a = \sqrt{2}r$$



课程内容

目录

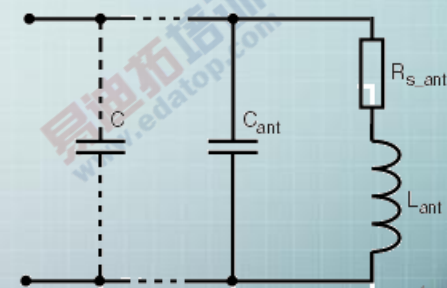
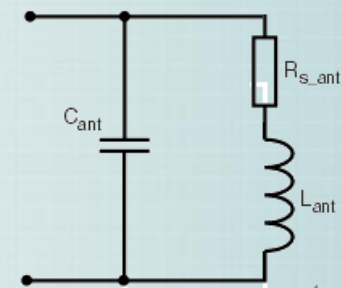
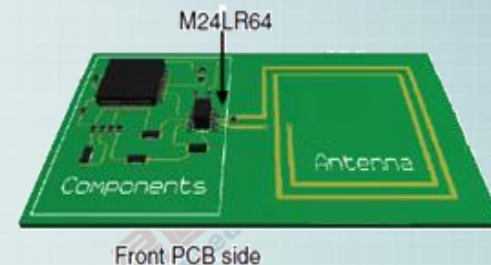
Contents

- ① 13.56MHz RFID/NFC标准简介
- ② 13.56MHz NFC/RFID天线和传统天线的区别
- ③ 13.56MHz NFC/RFID天线工作原理
- ④ 天线等效电路**
- ⑤ 天线设计考量和设计步骤
- ⑥ 天线线圈的设计
- ⑦ 天线相关参数测量
- ⑧ 匹配电路的设计和调试
- ⑨ 匹配电路的设计实例
- ⑩ 总结

四、天线等效电路

➤ 等效电路

- 13.56MHz NFC/RFID线圈天线可以用图示等效电路表示。线圈的电感为 L_{ant} ， R_{S-ant} 为线圈的损耗电阻， C_{ant} 为线圈之间和连接器之间的寄生电容。
- 要使得天线工作于13.56MHz，那么可以在天线外部并联或者串联一个电容，将电容与天线线圈组成LC 谐振电路，调整并联/串联电容大小使得谐振频率为工作频率13.56 MHz。那么此时，通过此谐振电路，读写器可将能量传输至射频卡。
- 由汤姆逊公式可知： $f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ ，所以，天线的工作频率（谐振频率）与 L_{ant} 、C有关。
- 天线尺寸越大，线圈的电感 L_{ant} 就越大，相对的调谐电容C则需减小。在谐振频率为13.56 MHz 时,如果天线的电感超过 $5\mu H$ 时，电容 C_{ant} 的取值很小，这使得调谐电容的匹配变得很困难。所以，电感的取值范围在 $0.5\sim 3\mu H$ ，电容匹配较容易实现



四、天线等效电路 (cont.)

➤ 串联/并联等效电路

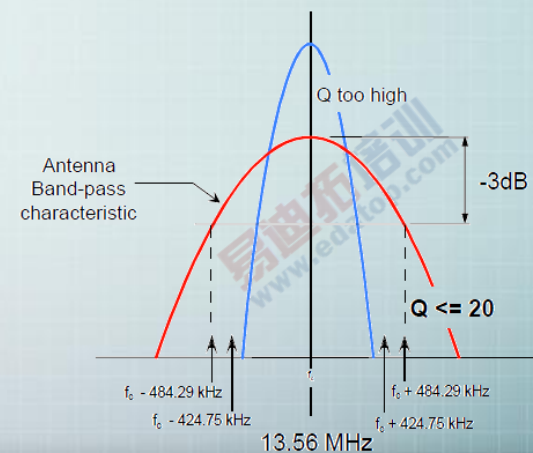
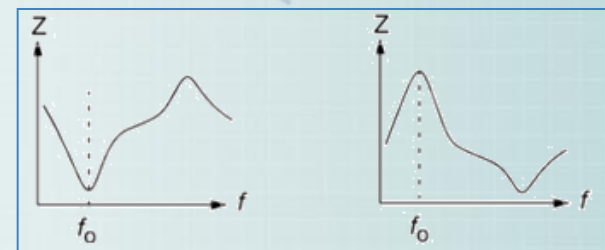
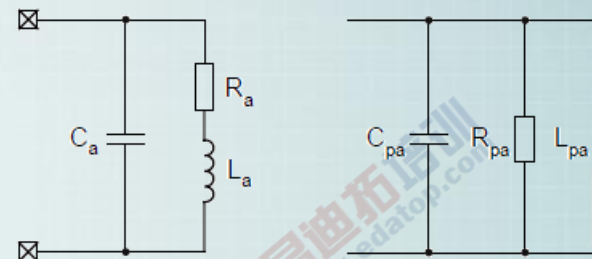
- $C_{pa} \approx C_a$, $L_{pa} \approx L_a$, $R_{pa} \approx R_a \times (1+Q^2)$

➤ 串联/并联谐振

- 串联谐振时, 阻抗最小, 为 R_a
- 并联谐振时, 阻抗最大, 为 R_{pa}

➤ Q值

- Q值定义为谐振电路中储存的能量与每个周期内消耗能量之比的 2π 倍, 故Q值越高, 意味着相对于储存的能量来说需要消耗的能量越少
- $BW=f_0/Q$, Q值越高, 带宽越小
- ISO14443: $Q \approx 10$, ISO15693: $Q \approx 20$
- 天线带宽的**经验法则**: 3dB的Q值带宽约为10dB回波损耗带宽的两倍



四、天线等效电路 (cont.)

➤ Q值和带宽的影响因素

- 并联谐振：等效电路的R、C决定工作带宽，3dB功率带宽

$$B = \frac{1}{2\pi RC} \quad (\text{Hz}) \quad Q = \frac{f_0}{B} = \frac{R}{\omega L} = R\omega C$$

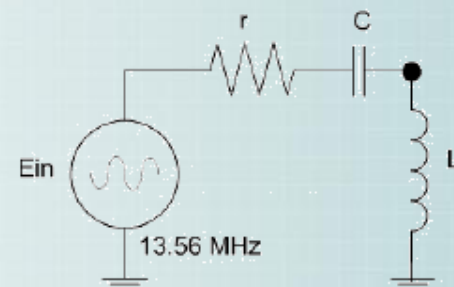
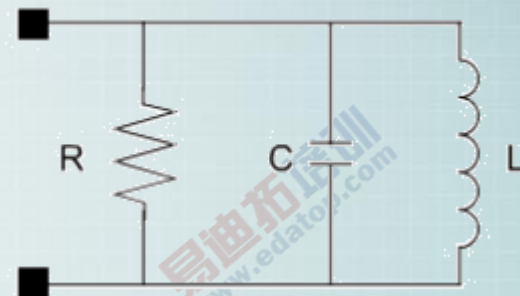
- 串联谐振：等效电路的r、L决定工作带宽，3dB功率带宽

$$B = \frac{r}{2\pi L} \quad (\text{Hz}) \quad Q = \frac{f_0}{B} = \frac{\omega L}{r} = \frac{1}{r\omega C}$$

- 工作于并联谐振时，减小电阻R值可以增加带宽、降低Q值；即并联谐振电路中，带宽与并联电阻成反比，Q值与并联电阻成正比。
- 工作于串联谐振时，增加电阻r值可以增加带宽、降低Q值；即串联谐振电路中，带宽与串联电阻成正比，Q值与串联电阻成反比。

➤ 小结

- 线圈天线等效于电感，增加天线线圈匝数和面积可以增加电感值，使得天线工作距离更远，但如果天线的等效电感值太大，使得天线工作于13.56MHz谐振点时，对应的电容值大小，不易匹配
- 调整匹配电路中的电容值，可以调整天线的工作频率；调整串联/并联电阻值，可以调整天线的Q值



课程内容

目录

Contents

- ① 13.56MHz RFID/NFC标准简介
- ② 13.56MHz NFC/RFID天线和传统天线的区别
- ③ 13.56MHz NFC/RFID天线工作原理
- ④ 天线等效电路
- ⑤ 天线设计考量和设计步骤**
- ⑥ 天线线圈的设计
- ⑦ 天线相关参数测量
- ⑧ 匹配电路的设计和调试
- ⑨ 匹配电路的设计实例
- ⑩ 总结

五、天线设计考量和设计步骤

➤ 13.56MHz RFID/NFC标签天线的设计有以下三点基本要求：

- 在天线电流一定情况下，天线线圈能产生较大的磁通量，满足一定的工作距离
 - 增大线圈的匝数和面积，能够产生较大的磁通，工作更远的距离
 - 增大线圈的匝数和面积，等效感值也随之增大，太大的感值不易于匹配
 - 感值通常设计在 1~2uH左右
 - 设计时，天线的面积通常是受限的，所以通过增加匝数来满足感值和工作距离的要求
- 足够的带宽，可以无失真地传送用于数据调制的副载波信号
 - 带宽受天线Q值影响，通过在天线匹配电路中串联/并联电阻来达到带宽要求
 - ISO14443: BW=1.921MHz, $Q \approx 10$,
 - ISO15693: BW=0.914MHz, $Q \approx 20$
- 功率匹配，即最小的能量损耗，最大程度利用阅读器输出的可用能量
 - 通过匹配电路设计，达到共轭匹配，从而使得传输到天线线圈的能量最大
 - 可以借助于Smith圆图来设计共轭匹配电路

五、天线设计考量和设计步骤 (cont.)

➤ 天线线圈的设计

- 一是通过公式计算线圈的近似感值，对于方形和环形线圈

$$L(nH) = 2 \times l_1 \times \left[\ln\left(\frac{l_1}{D_1}\right) - K \right] \times N^{1.8}$$

式中，L为天线电感估计值，nH； l_1 为一圈天线导线环的长度，cm； D_1 为PCB线圈导线的宽度；若线圈为环形，则 $K=1.07$ ，若线圈为矩形，则 $K=1.47$ ；N为线圈匝数

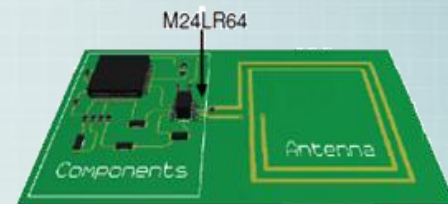
- 二是通过仿真软件，如HFSS、CST、ADS等仿真分析给出电感值 L_{ant} ，通过仿真软件还可以分析给出线圈等效电路中的 C_{ant} ， R_{s_ant} ，以及等效的并联谐振电阻 R_{p_ant}

➤ 参数测量

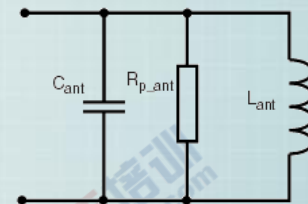
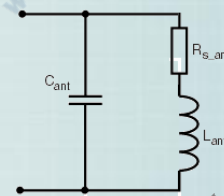
- 阻抗分析仪、矢量网络分析仪测试
- 测量等效电感值、损耗电阻 R_{s_ant} ，寄生电容 C_{ant} ，并联谐振电阻 R_{p_ant}

➤ 匹配电路设计和调试

- 根据需要的带宽或Q值确定并联/串联电阻值
- 调试匹配电容，使得谐振频率为13.56MHz，同时和芯片阻抗达到共轭匹配



Front PCB side



课程内容

目录

Contents

- ① 13.56MHz RFID/NFC标准简介
- ② 13.56MHz NFC/RFID天线和传统天线的区别
- ③ 13.56MHz NFC/RFID天线工作原理
- ④ 天线等效电路
- ⑤ 天线设计考量和设计步骤
- ⑥ 天线线圈的设计**
- ⑦ 天线相关参数测量
- ⑧ 匹配电路的设计和调试
- ⑨ 匹配电路的设计实例
- ⑩ 总结

六、天线线圈的设计

➤ 设计要求

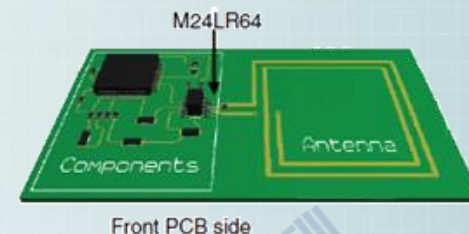
- 在天线电流一定情况下，天线线圈能产生较大的磁通量，满足一定的工作距离

➤ 设计需要考虑的因素

- 增加天线匝数和线圈面积，可以增大产生较大磁通量，工作更远距离
- 增加天线匝数和线圈面积，天线的等效电感值也会随之变大，因为天线要调试到13.56MHz谐振，过大的电感会导致外部调谐电容过小；天线的等效电感值通常设计在1~2uH左右。
- 天线的面积通常是受限的，所以在可用面积一定的情况下，可用通过增加匝数来满足感值和工作距离的要求
- 如果天线面积不受限制，对于环形或正方形线圈，可用通过 $a = \sqrt{2r}$ 该公式近似给出最佳的天线线圈半径/边长。

➤ 设计工具

- 确定天线的形状和匝数，计算线圈的电感值 $L(nH) = 2 \times l_1 \times [\ln(\frac{l_1}{D_1}) - K] \times N^{1.8}$
- 线圈电感值可以通过公式近似计算，也可以使用HFSS、CST、ADS等电磁软件仿真计算



课程内容

目录

Contents

- ① 13.56MHz RFID/NFC标准简介
- ② 13.56MHz NFC/RFID天线和传统天线的区别
- ③ 13.56MHz NFC/RFID天线工作原理
- ④ 天线等效电路
- ⑤ 天线设计考量和设计步骤
- ⑥ 天线线圈的设计
- ⑦ 天线相关参数测量**
- ⑧ 匹配电路的设计和调试
- ⑨ 匹配电路的设计实例
- ⑩ 总结

七、天线相关参数测量

➤ 需要测量的参数

- 电感值 L_{ant} 、寄生电容 C_{ant} 、欧姆损耗电阻 R_{s_ant} 、并联谐振电阻 R_{p_ant}

➤ 测试仪器

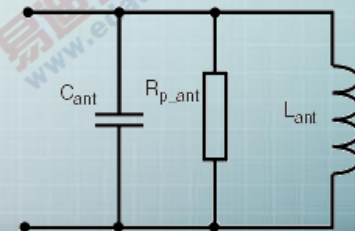
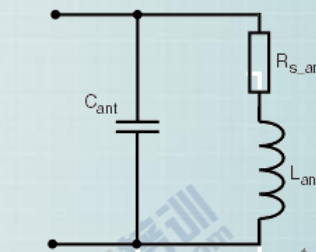
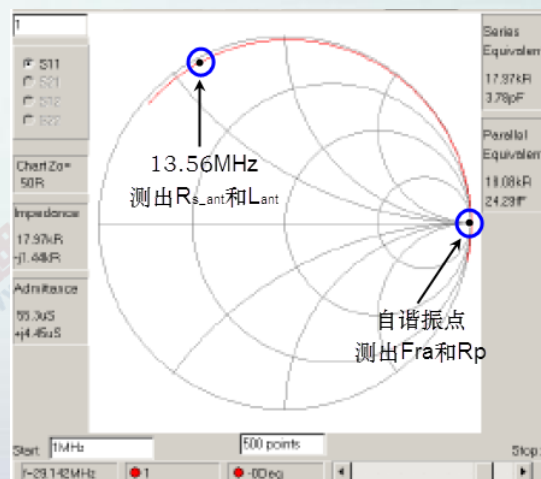
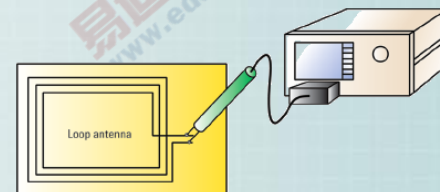
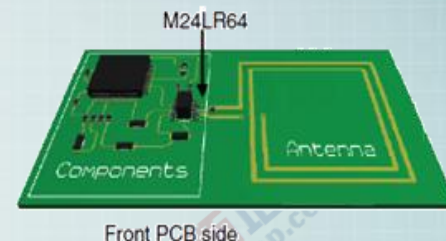
- 阻抗分析仪或者矢量网络分析仪

➤ 矢量网络分析仪测量方法

- 矢网的测试频率范围可以设置为1MHz~100MHz
- 通过矢网可以直接测量出13.56MHz的欧姆损耗电阻 R_{s_ant} 、电感值 L_{ant} 、自谐振频率 F_{ra} 和自谐振并联阻抗 R_p

$$R_p(13.56MHz) = \frac{R_p(f_{ra})}{\sqrt{\frac{13.56}{f_{ra}}}}$$

$$C_a = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_{ra})^2 L_a}$$



课程内容

目录

Contents

- ① 13.56MHz RFID/NFC标准简介
- ② 13.56MHz NFC/RFID天线和传统天线的区别
- ③ 13.56MHz NFC/RFID天线工作原理
- ④ 天线等效电路
- ⑤ 天线设计考量和设计步骤
- ⑥ 天线线圈的设计
- ⑦ 天线相关参数测量
- ⑧ **匹配电路的设计和调试**
- ⑨ 匹配电路的设计实例
- ⑩ 总结

八、匹配电路的设计和调试

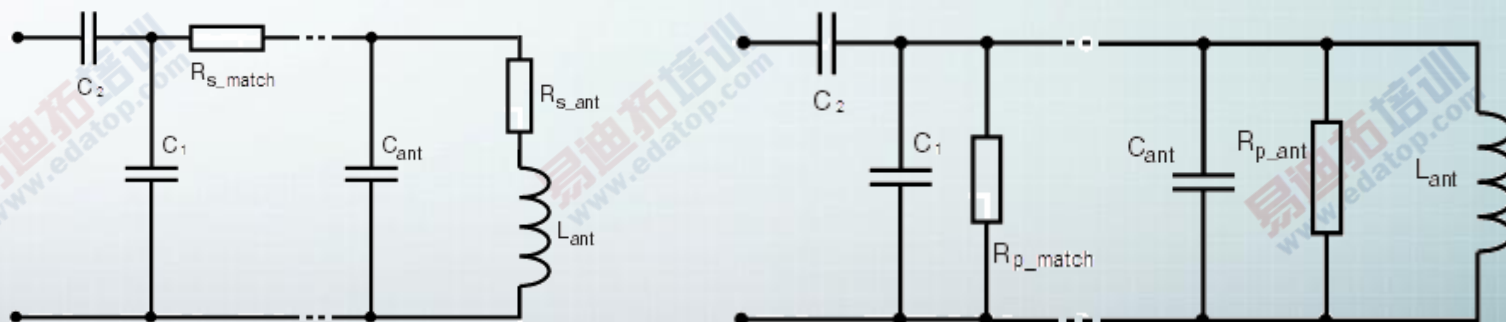
- 有效的利用Smith Chart工具可以简化匹配电路的设计，抛弃繁琐的公式计算
- 射频电路多工作于50欧姆，所以这里主要介绍如何利用Smith Chart把设计匹配电路，把线圈天线匹配50欧姆电路系统

➤ 串联匹配

- 根据带宽/Q值计算串联电阻的大小 $R_{s_tol} = \omega L / Q$ ，串联电阻大小 $R_{s_match} = R_{s_tol} - R_{s_ant}$

➤ 并联匹配

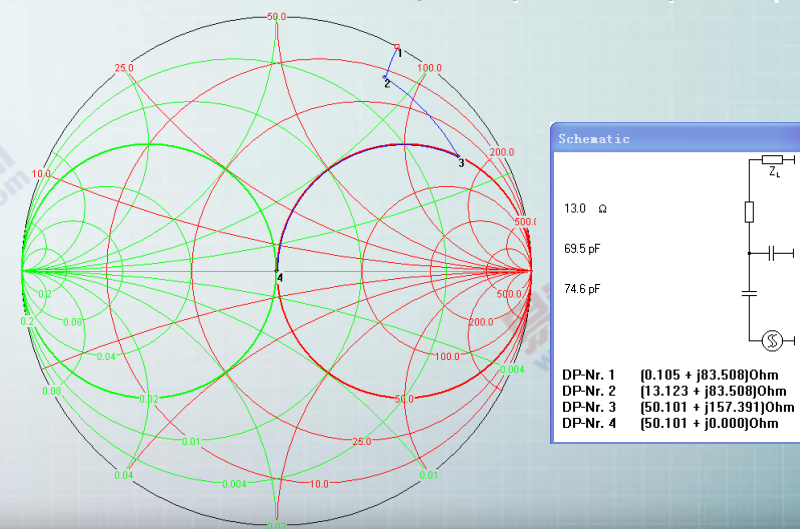
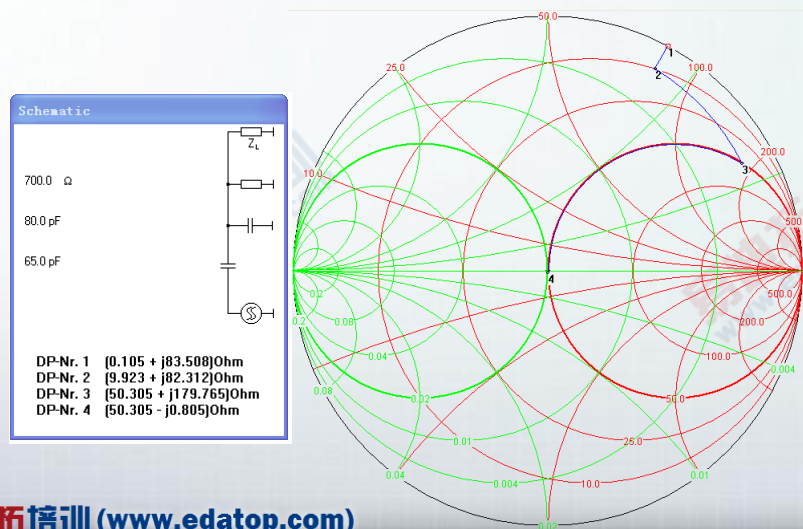
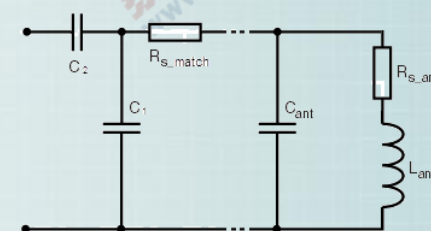
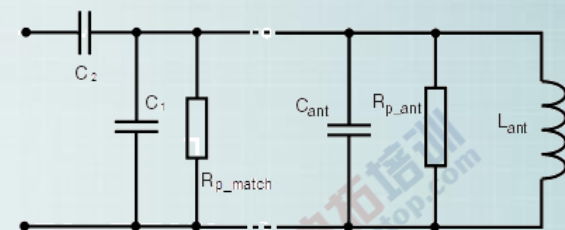
- 根据带宽/Q值计算并联谐振电阻的大小 $R_{p_tol} = Q \times \omega L$ ，并联电阻大小 $R_{p_match} = \frac{1}{\frac{1}{R_{p_tol}} - \frac{1}{R_{p_ant}}}$



八、匹配电路的设计和调试 (cont.)

➤ 利用Smith圆图设计匹配电路

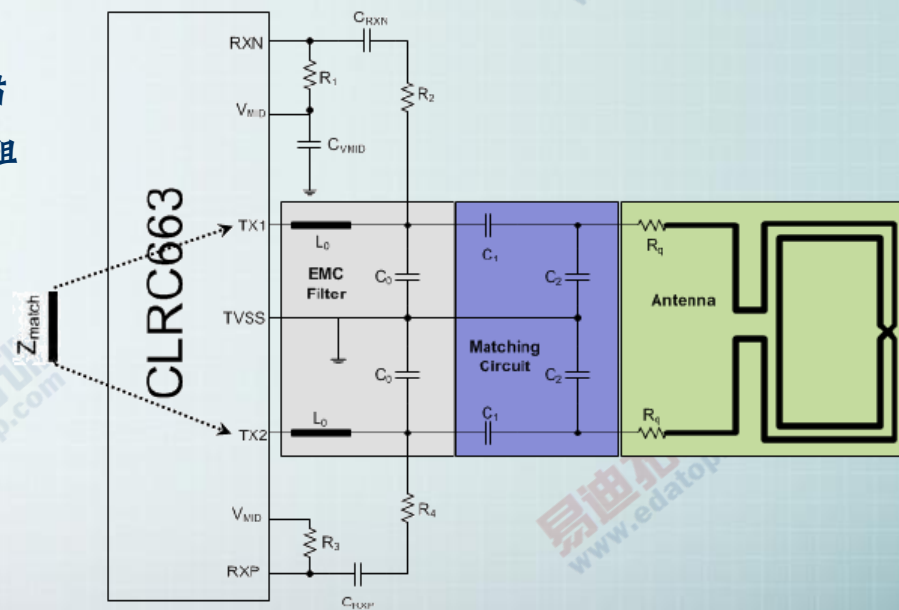
- 匹配电路中，串联/并联电阻用于调试天线的Q值/带宽；电容 C_1 、 C_2 用于把谐振频率调整到13.56MHz，把天线阻抗调整到共轭匹配
- 匹配电路中，电阻值可以根据Q值/带宽要求直接计算， C_1 、 C_2 值可以利用Smith圆图工具确定
- Smith圆图工具：Smith 2.0, ADS、Microwave Office



八、匹配电路的设计和调试 (cont.)

➤ 平衡匹配电路的设计

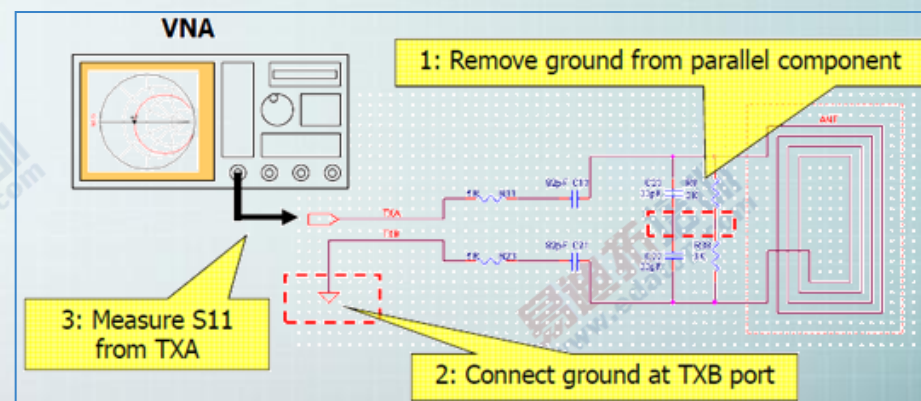
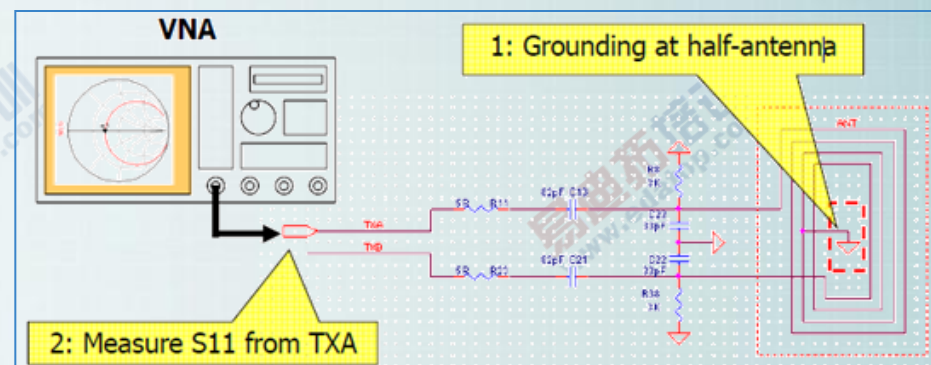
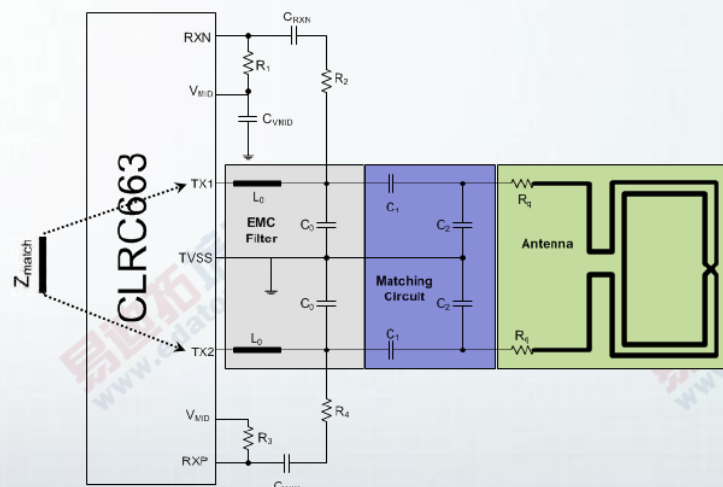
- 部分RFID/NFC芯片，为了增强抗干扰能力，天线输入信号匹配电路采用平衡电路
- L_0 、 C_0 是低通滤波电路，滤除13.56MHz晶振的3次和5次谐波
- R_q 是串联电阻，用于调整天线的Q值和带宽
- C_1 、 C_2 是匹配电路用于工作频率和输入阻抗，
- 芯片Datasheet一般会给出 Z_{match} 的值(NXP芯片的 Z_{match} 通常在40~80欧姆)，用户也可以使用阻抗分析仪或者矢量测量该值



八、匹配电路的设计和调试 (cont.)

➤ 平衡匹配电路的设计

- 有图示两种测试方法测量，推荐第一种
- 线圈的等效电感和损耗阻抗为单端的1/2
- 使用和单端匹配相同的方法即可设计出平衡匹配电路，此时单端匹配阻抗为 $Z_{match}/2$



课程内容

目录

Contents

- ① 13.56MHz RFID/NFC标准简介
- ② 13.56MHz NFC/RFID天线和传统天线的区别
- ③ 13.56MHz NFC/RFID天线工作原理
- ④ 天线等效电路
- ⑤ 天线设计考量和设计步骤
- ⑥ 天线线圈的设计
- ⑦ 天线相关参数测量
- ⑧ 匹配电路的设计和调试
- ⑨ **匹配电路的设计实例**
- ⑩ 总结

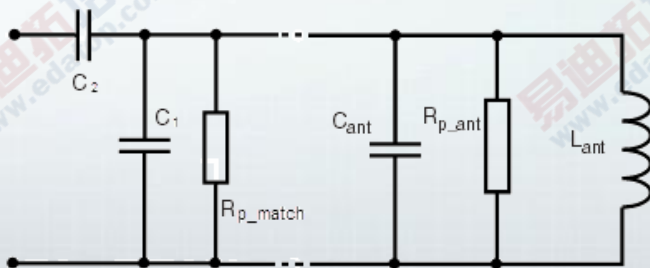
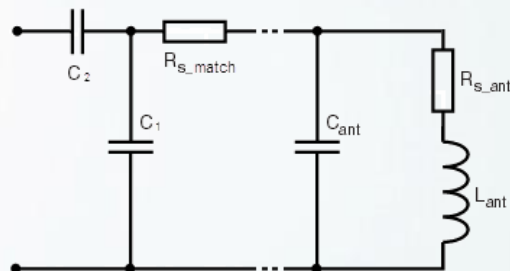
九、匹配电路的设计实例

实例演示借助于Smith圆图设计匹配电路的全过程

- 假设测量得到线圈的参数： $R_{s_ant} = 0.2 \text{ ohm}$ ， $R_{p_ant} = 2 \text{ kohm}$ ， $L_{ant} = 1\mu\text{H}$
- 假设天线的Q值设计为10，匹配到50欧姆阻抗

则： $R_{s_match} = \omega L/Q - R_{s_ant} = 8.3 \text{ ohm}$

$1/R_{p_match} = 1/Q\omega L - 1/R_{p_ant}$ ， $R_{p_match} = 1.5 \text{ kohm}$



课程内容

目录

Contents

- ① 13.56MHz RFID/NFC标准简介
- ② 13.56MHz NFC/RFID天线和传统天线的区别
- ③ 13.56MHz NFC/RFID天线工作原理
- ④ 天线等效电路
- ⑤ 天线设计考量和设计步骤
- ⑥ 天线线圈的设计
- ⑦ 天线相关参数测量
- ⑧ 匹配电路的设计和调试
- ⑨ 匹配电路的设计实例
- ⑩ **总结**

十、课程总结

➤ 课程主要讲述了13.56MHz NFC/RFID天线及其匹配电路的设计，内容包括：

• 天线设计

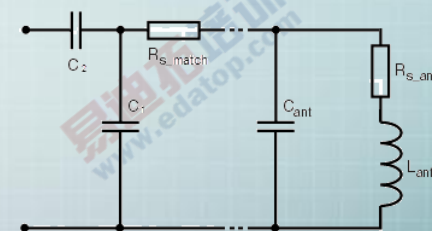
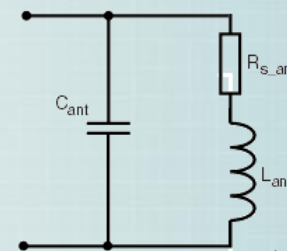
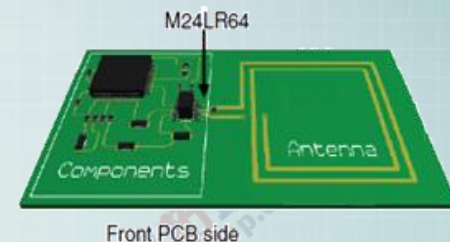
- 线圈天线，通过近场耦合传输信号，等效为一个电感
- 线圈面积、匝数越大，等效感值越大，耦合能量越大，传输距离越远
- 天线需要在13.56MHz的谐振，太大的感值导致调谐电容太小，所以通常感值设计在1~2uH左右 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
- 可以通过近似公式和专业软件（如HFSS，CST）来分析计算线圈的感值

• 天线带宽和Q值

- 由ISO 14443 A / B，ISO 15693 国际标准可以分析得出相应的工作带宽
- 并联谐振 $Q = \frac{f_0}{B} = \frac{R}{\omega L} = R\omega C$ ，串联谐振： $Q = \frac{f_0}{B} = \frac{\omega L}{r} = \frac{1}{r\omega C}$
- 所以调整匹配电阻可以调整天线的带宽和Q值

• 匹配电路设计

- 使用矢量网/阻抗分析仪可以测量计算给出天线线圈的等效电路
- 根据所需要的工作带宽或Q值可以确定匹配电路中的电阻值
- 借助于Smith Chart可以很方便的确定匹配电路中的C₁和C₂值





Thank You !

| 易迪拓培训 (www.edatop.com)

课程详情: www.edatop.com/peixun/antenna/114.html