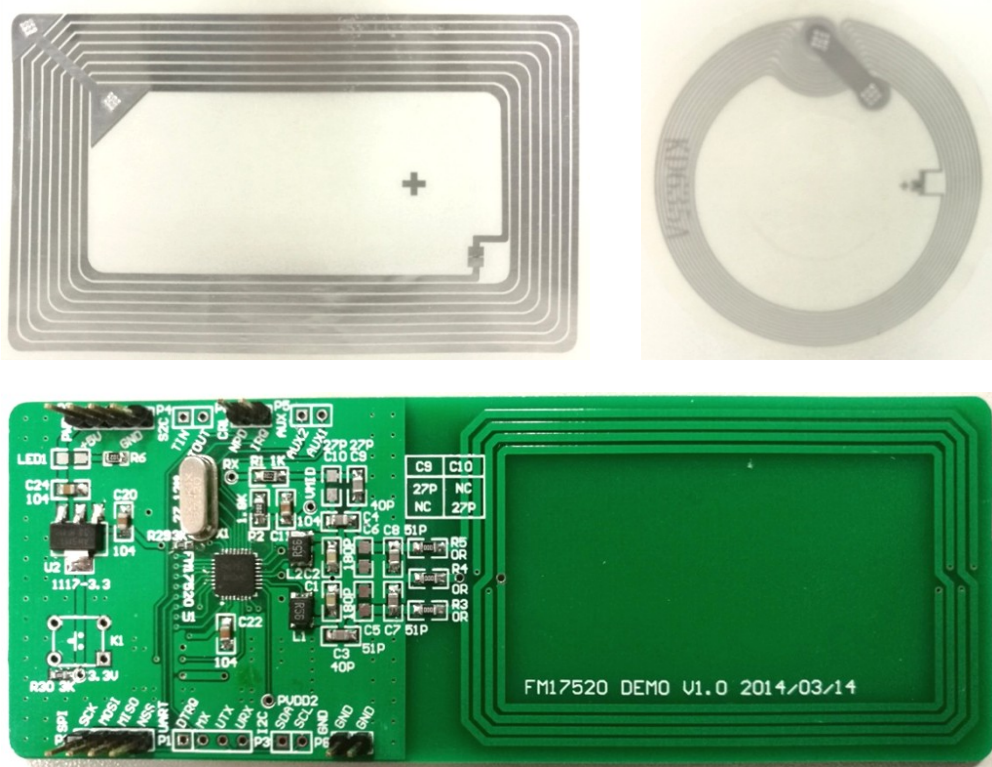


RFID 芯片天线设计与匹配简单参考资料

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



一、13.56MHz RFID/NFC 标准简介

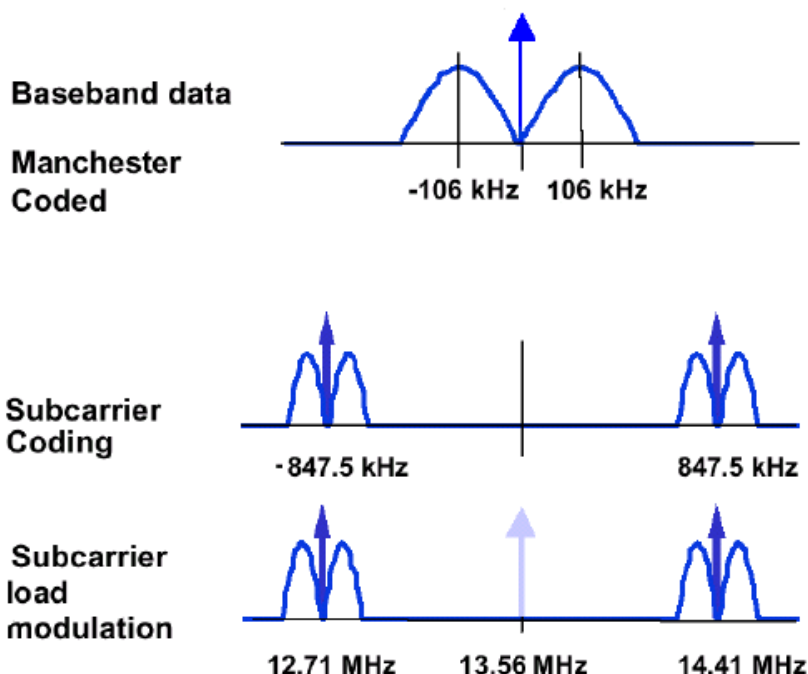
- . 13.56MHz RFID/NFC 国际标准
- . ISO/IEC 14443 - Type A, ISO/IEC 14443 - Type B, ISO/IEC 15693
- . ISO - International Organization for Standardization, 国际标准化组织
- . IEC - International Electrotechnical Commission, 国际电子科技化委员会

- . 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。

. 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	$\pm 7\text{KHz}$	$\pm 7\text{KHz}$	$\pm 7\text{KHz}$
副载波频率	847.5 kHz	847.5 kHz	423KHz
数据率	106kbps	106kbps	27kbps



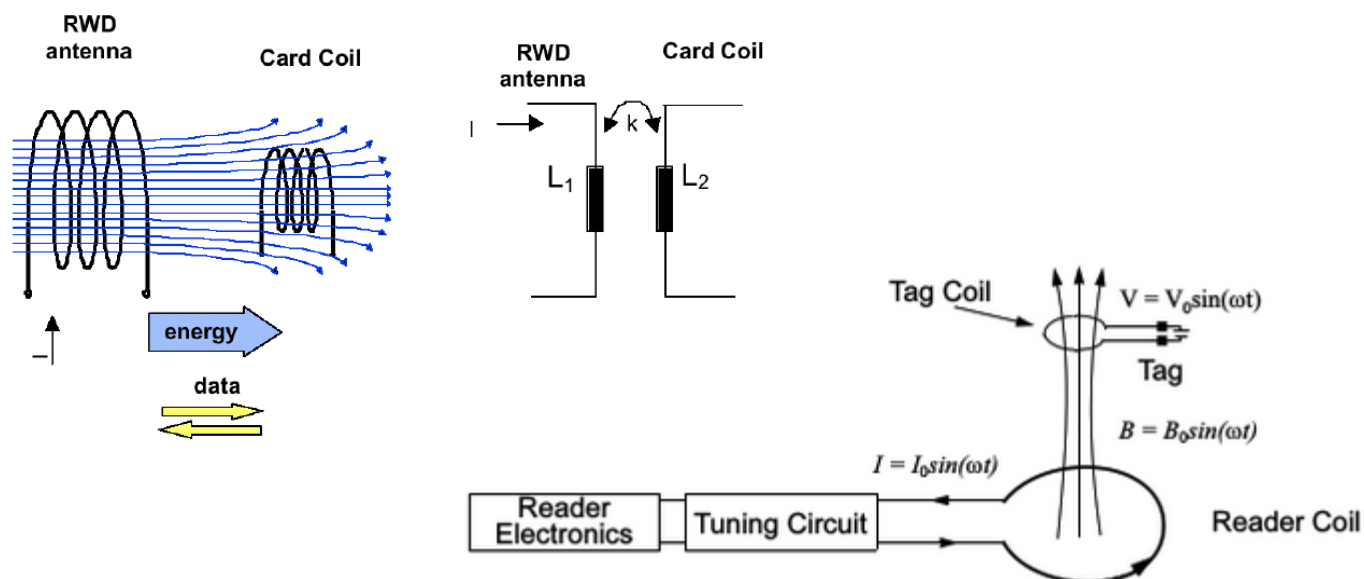
二、 13.56MHz NFC/RFID 天线和传统天线的区别

. 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

13.56MHz NFC/RFID 天线不是传统意义上的天线！

. 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 工作距离最远只有 10cm 左右（与芯片工作电压，天线设计有关），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

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)

$$B_{\phi} = \frac{\mu_o I}{4\pi r} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (\text{Weber}/m^2)$$

where:

I = current

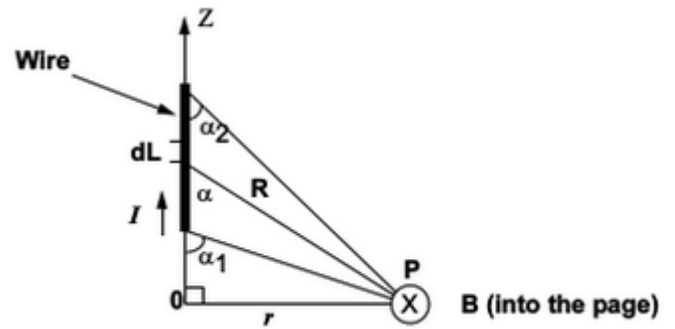
r = distance from the center of wire

μ_0 = permeability of free space and given as $4\pi \times 10^{-7}$ (Henry/meter)

In a special case with an infinitely long wire where:

$\alpha_1 = -180^\circ$

$\alpha_2 = 0^\circ$



磁场的磁感应强度与流经导体的电流 I 成正比，与距导体的距离成反比，根据毕奥萨伐尔定律得，距环形或方形线圈中心垂直距离为 r 处的点的磁感应强度 B_x 的大小为：

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

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

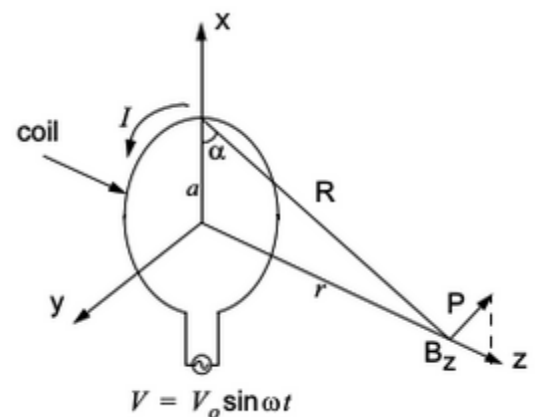
where

I = current

a = radius of loop

r = distance from the center of loop

μ_0 = permeability of free space and given as $4\pi \times 10^{-7}$ (Henry/meter)



. 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

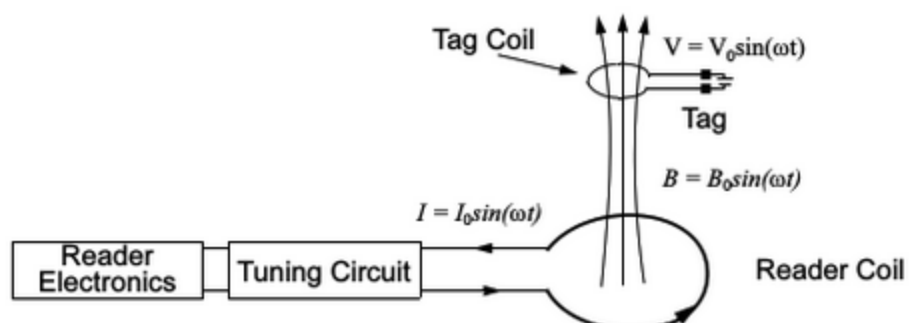
. 可见线圈产生磁感应强度：正比于线圈匝数和线圈面积 随着距离的 3 次方衰减

. 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

$$\psi = \int B \cdot dS$$

$$V = -N \frac{d\psi}{dt}$$



$$\begin{aligned}
V &= - N_2 \frac{d\Psi_{21}}{dt} = - N_2 \frac{d}{dt} \left(\int B \cdot dS \right) \\
&= - N_2 \frac{d}{dt} \left[\int \frac{\mu_o i_1 N_1 a^2}{2(a^2 + r^2)^{3/2}} \cdot dS \right] \\
&= - \left[\frac{\mu_o N_1 N_2 a^2 (\pi b^2)}{2(a^2 + r^2)^{3/2}} \right] \frac{di_1}{dt} \\
&= - M \frac{di_1}{dt}
\end{aligned}$$

where:

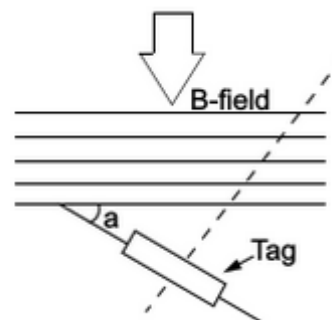
- V = voltage in the tag coil
- i_1 = current on the reader coil
- a = radius of the reader coil
- b = radius of tag coil
- r = distance between the two coils
- M = mutual inductance between the tag and reader coils, and given by:

$$V_0 = 2\pi f N S Q B_o \cos \alpha$$

where:

- f = frequency of the arrival signal
- N = number of turns of coil in the loop
- S = area of the loop in square meters (m^2)
- Q = quality factor of circuit
- B_o = strength of the arrival signal
- α = angle of arrival of the signal

In the above equation, the quality factor Q is a measure of the selectivity of the frequency of the interest. The Q will be defined in Equations 43 through 59.



.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

.最佳天线尺寸理论依据

.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

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

注：式中， i 为电流； N 为线圈匝数； a 为线圈边长； r 为离线圈中心的垂直距离； μ 为真空磁导率。

.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，可以求得此时每种 RFID 系统的可识别距离都对应有一个最佳的天线边长 a 。

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

以上也间接的证明了天线的尺寸对读卡器读写距离的直接影响。

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。

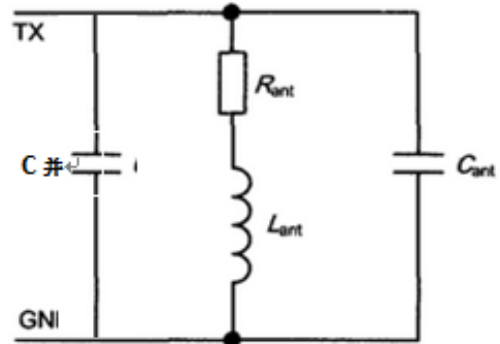
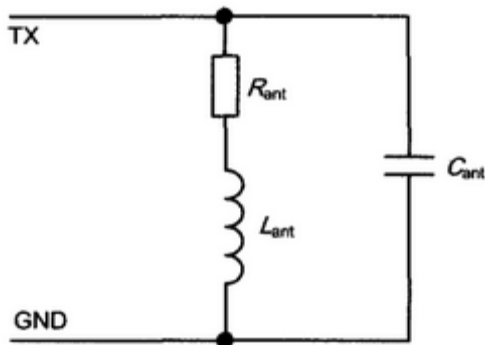


图 1 天线线圈等效电路

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

. 由汤姆逊公式：

可知，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 $5\mu\text{H}$ 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，一般建议天线电感的取值范围在 $0.5\sim 3\mu\text{H}$ ，电容匹配比较容易实现。

注：目前我们建议客户设计天线电感的取值为 $1\sim 1.5\mu\text{H}$ 左右。

Q 值和带宽的影响因素

. 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

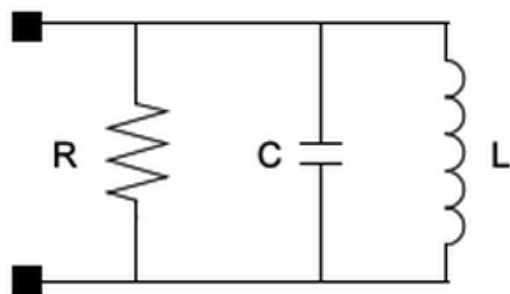
由公式 $BW=f_0/Q$ ，得知 Q 值越高，带宽越小。因为数据从 RWD 传输到卡使用脉宽 $T=3\mu\text{s}$ 的 Miller 编码，又用带宽 B 的定义 $BW=f_0/Q$ ，以及时间与带宽的乘积的规定 $B \cdot T \geq 1$

可以算出要求的 Q 因子是 $Q \leq fR \cdot T \leq 13.56\text{MHz} \cdot 3\mu\text{s} \leq 40.68$ 由于元件的容差和对温度的依靠建议 Q 因子的值取 35

. 并联谐振：等效电路的 R、C 决定工作带宽，3dB 功率带宽

$$B = \frac{1}{2\pi RC} \quad (\text{Hz})$$

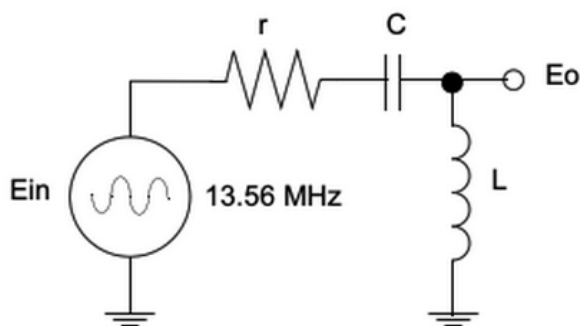
$$Q = \frac{f_0}{B} = \frac{R}{\omega L} = R\omega C$$



. 串联谐振：等效电路的 r 、 L 决定工作带宽， 3dB 功率带宽

$$B = \frac{r}{2\pi L} \quad (\text{Hz})$$

$$Q = \frac{f_0}{B} = \frac{\omega L}{r} = \frac{1}{r\omega C}$$



. 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

一、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

二、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

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：

一、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 $1 \sim 2\mu\text{H}$ 左右 .

注：目前推荐天线尺寸面积 $5\text{cm} \times 6\text{cm}$ ，线圈绕 3~4 圈，电感值 $1.5\mu\text{H}$ 。

. 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

二、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

三、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或直接匹配

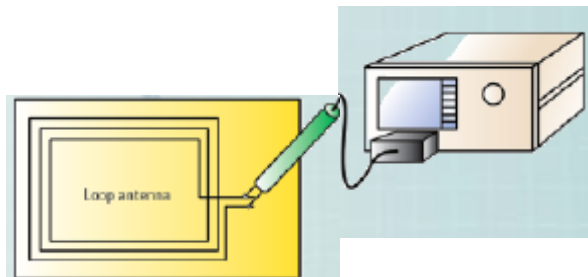
. 天线线圈的设计

. 一、是通过公式计算线圈的近似感值，对于方形和环形线圈

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

式中，L 为天线电感估计值，单位为 nH； l_1 为一圈天线导线环的长度，单位为 cm； D_1 为 PCB 线圈导线的宽度；关于 K 值：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

. 使用阻抗分析仪、矢量网络分析仪测试

. 直接测量出 13.56MHz 的等效电感值 L_{ant} 、损耗电阻 R_{s_ant} 、寄生电容 C_{ant} 、并联谐振电阻 R_{p_ant} 、自谐振频率 F_{ra} 和自谐振并联阻抗 R_p 。

. 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（并联/串联电容），使得谐振频率为 13.56MHz，同时和芯片阻抗达到共轭匹配

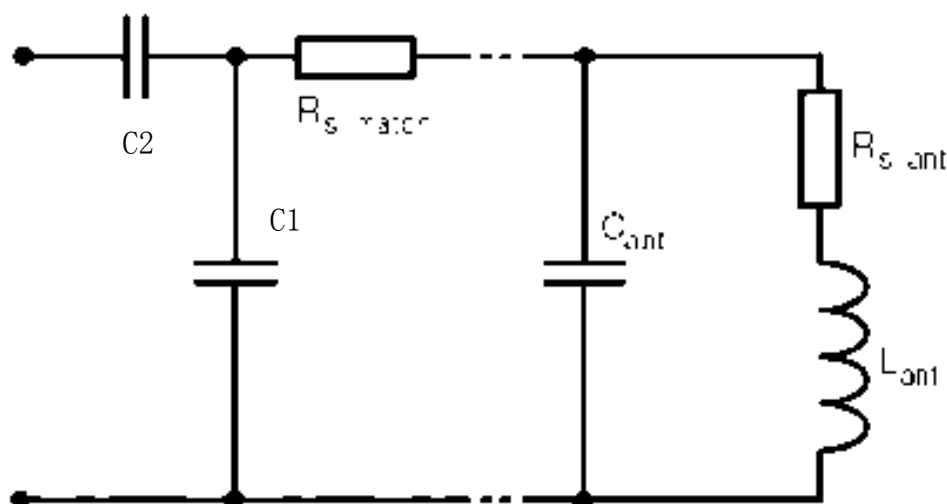
六、匹配电路的设计和调试

. 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，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

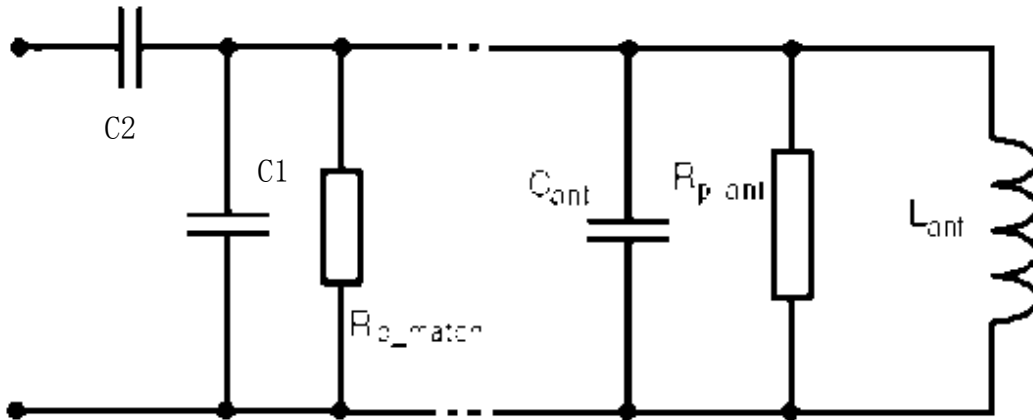
. 根据带宽/Q 值计算串联电阻的大小 $R_{s_tol} = \omega L/Q$ ，串联电阻大小 $R_{s_match} = R_{s_tol} - R_{s_ant}$



. 并联匹配

. 根据带宽/Q 值计算并联谐振电阻的大小 $R_{p_tol}=QX\omega L$, 并联电阻大小

$$R_{p_match} = \frac{1}{\frac{1}{R_{p_tol}} - \frac{1}{R_{p_ant}}}$$

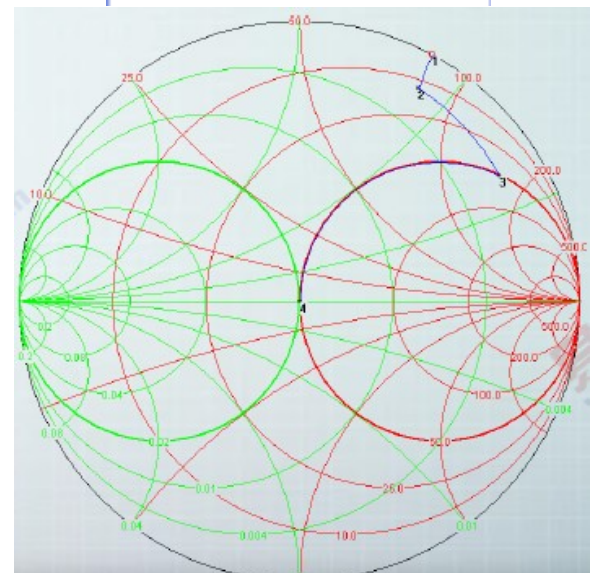
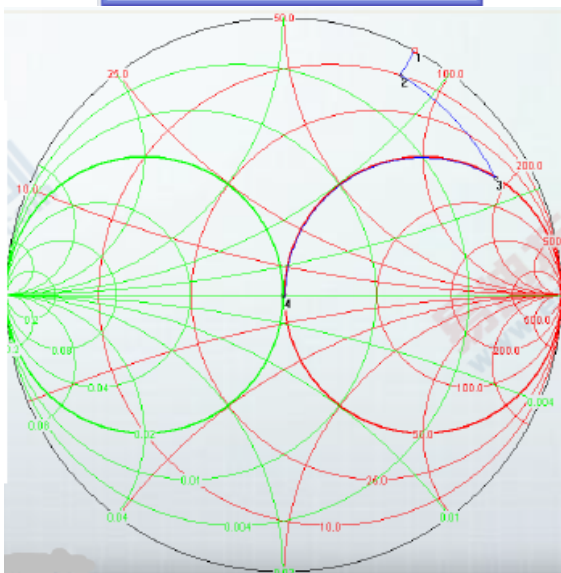
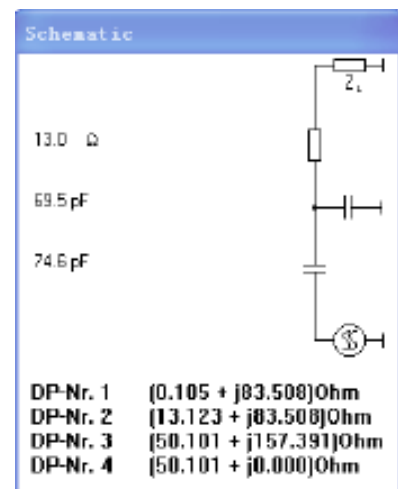
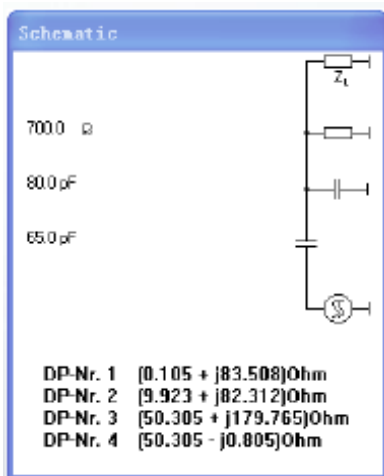


. 利用 Smith 圆图设计匹配电路

. 匹配电路中, 串联/并联电阻用于调试天线的 Q 值/带宽; 电容 C1、C2 用于把谐振频率调整到 13.56MHz, 把天线阻抗调整到共轭匹配

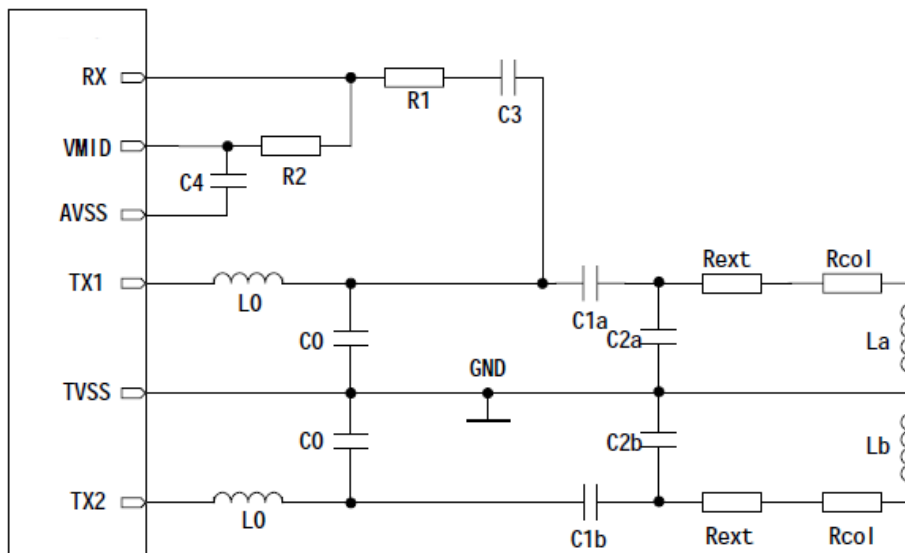
. 匹配电路中, 电阻值可以根据 Q 值/带宽要求直接计算, C1、C2 值可以利用 Smith 圆图工具确定

. Smith 圆图工具: Smith 2.0, ADS、Microwave Office

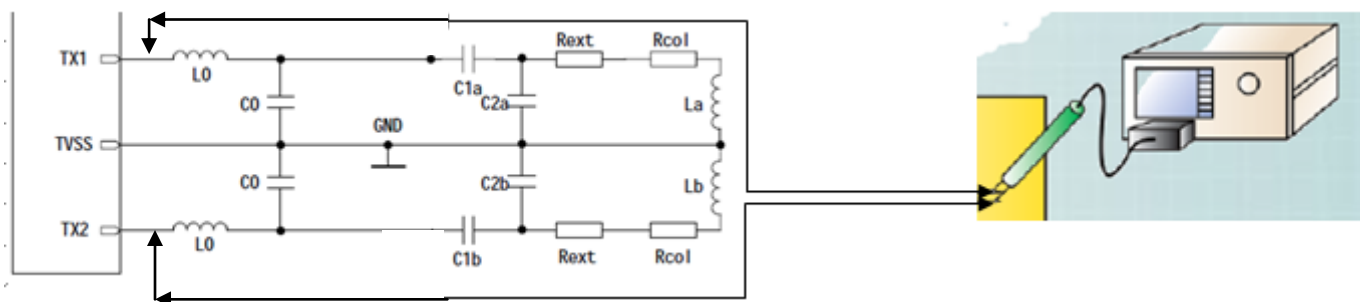


平衡匹配电路的设计

- 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
 - $L0$ 、 $C0$ 是低通滤波电路，滤除 13.56MHz 中的 3 次和 5 次谐波。（建议使用提供的 domo 原理图参数）
 - R_{ext} 是串联电阻，用于调整天线的 Q 值和带宽
 - $C1$ 、 $C2$ 是匹配电路用于工作频率和输入阻抗（建议使用 domo 原理图参数伟初始值进行调试）
 - 芯片的 Z_{match} 通常在 20~80 欧姆，可以使用阻抗分析仪或者矢网测量该值。
- 注：下图 $C1$ 、 $C2$ 分别分为两个原值一半的电容 $C1=C1a+C1b$ 、 $C2=C2a+C2b$ ，电阻同理。

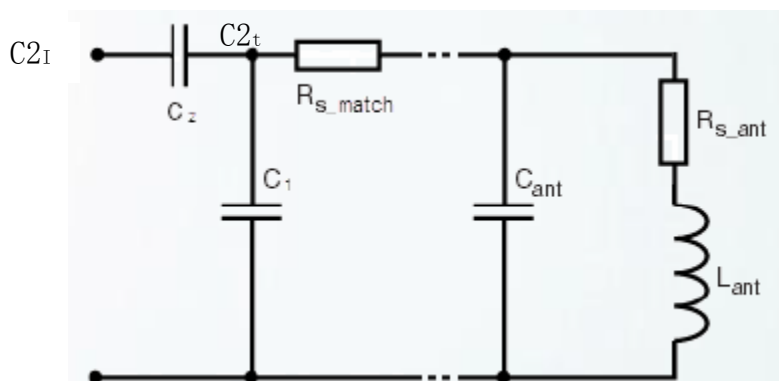


- 如图示测试方法测量 线圈的等效电感和损耗阻抗为单端的 1/2



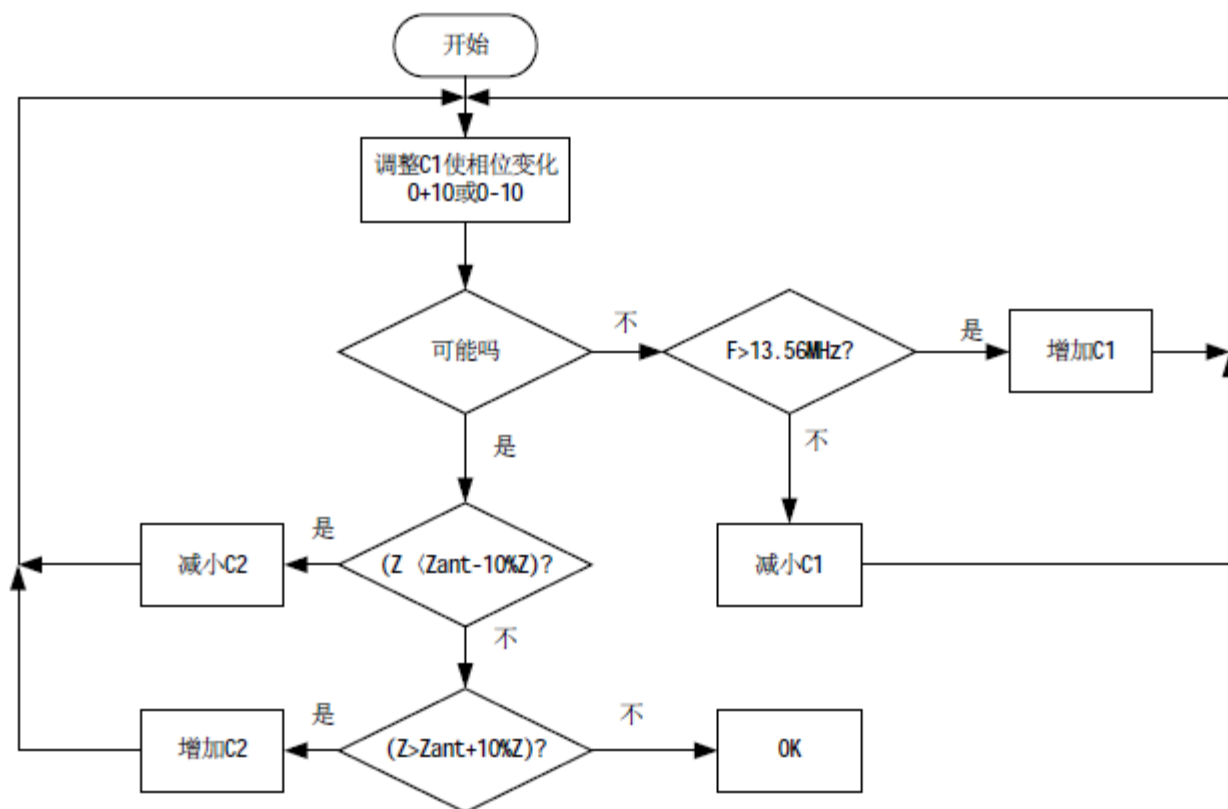
实例演示借助于 Smith 圆图设计匹配电路过程

- 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： $R_{s_match} = \omega L/Q - R_{s_ant} = 8.3 \text{ ohm}$ ，另：调试 $C1$ 使谐振频率为 13.56mHZ 至 14mHZ，微调 $C2$ 保持谐振频率，此时可以直接用示波器检测到 $C2$ 两端的电压幅值， $C2_t$ 端的电压幅值为 15V 至 30V 远大于 $C2_i$ 端的电压幅值，读写距离也明显提高。



简单方法天线电路调试

天线电路中的参数 L ， R_{ext} ， $C1a$ ， $C1b$ ， $C2a$ 和 $C2b$ ，可以用网络分析仪检测得，也可以计算得，但是理论和实际有偏差，所以我们将对天线电路进行调试，来补偿测量、计算中不确定因素和器件的误差。如果可以推荐使用阻抗分析仪，网络分析仪，但是简单方法就是用示波器和一个信号源来调试（芯片工作本身即有信号），详细步骤请看如下流程图：



另：建议 $L0$ 、 $C0$ 低通滤波电路使用提供的 domo 原理图参数， $C1$ 、 $C2$ 调试初始值可以使用 domo 原理图参数，调试 $C1$ 使谐振频率为 13.56mHZ 至 14mHZ，微调 $C2$ 保持谐振频率，此时可以直接用示波器检测到 $C2$ 两端的电压幅值 V_{pp} ， $C2_t$ 端的电压幅值 V_{pp} 为 15V 至 30V,甚至 50V 远大于 $C2_i$ 端的电压幅值，读写效果与距离也明显提高。