



近耦合射频识别系统的工作原理及天线设计

国瑞数码安全有限公司 尹寒
北京恒基伟业产品开发中心 陈峰

摘要 介绍一种近耦合射频识别系统（典型读写距离 25mm 的非接触读写卡系统）的两个重要组成部分——邻近耦合设备和邻近卡的工作原理及由此设计的天线尺寸和匹配电路。

关键词 PICC 邻近卡 PCD 邻近耦合设备 MCM 核心模块

近耦合射频识别系统由邻近耦合设备（PCD, Proximity Coupling Device, 也称读写器）和邻近卡（PICC, Proximity Card）组成，数据存储在 PICC 中。它的能量供应及 PICC 与 PCD 之间的数据交换不是通过电流的触点接通而是通过电磁场，因此，避免了与触点接触所造成的污染、费时等缺点，与其它系统相比具有方便、快捷、卫生等很多优势，广泛应用于交通、门禁、身份识别等多种应用领域。

由于 PICC 是由耦合元件及微电子芯片组成的，无供电电源（电池）的 IC 卡，在 PCD 的响应范围内，才是有源的；它的能量，如同时钟脉冲和数据一样，是通过耦合单元（非接触的）传递给 PCD 的，因此，实现耦合的元件——天线，在本系统中具有非常关键的作用。

1 射频识别系统的物理基础

相距较近的两个线圈，若其中一个通以电流时，所产生的磁通部分或全部穿过另一个线圈，则称此两线圈之间有磁的耦合，或称有互感。PICC 与 PCD 的天线线圈相互接近，两个电路经过磁场产生的耦合是本系统——电感耦合射频识别系统的物理基础。

图 1 是耦合的导体回路的等效电路图。在电感耦合射频识别系统中， L_1 是 PCD 的发送天线， L_2 是 PICC 的天线。

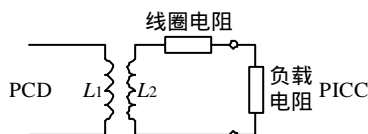


图1 等效电路

我们引入了耦合系数 k 来对导体回路的耦合作

定性说明，使其与几何尺寸无关。关系式如下：

$k = M / \sqrt{L_1 L_2}$ (L_1 、 L_2 分别为两个线圈的自感系数； M 为互感系数)

耦合系数总在两个极限情况 $0 < k < 1$ 之间变化。

$k=0$ ：由于距离太远或磁屏蔽导致完全去耦。

$k=1$ ：全耦合。两个线圈紧密耦合，处于相同的磁通量中。

只有很简单的天线配置才能进行分析计算。两个平行的、在 x 轴上同芯的导体回路的耦合系数可按照以下公式计算。式中 r 为天线半径， x 表示在 x 轴上的两个导体回路之间的距离。

$$k(x) = (r_{\text{PICC}}^2 r_{\text{PCD}}^2) / [r_{\text{PICC}}^2 r_{\text{PCD}}^2 + (\sqrt{x^2 + r_{\text{PICC}}^2} \sqrt{x^2 + r_{\text{PCD}}^2})^2]$$

当导体回路之间的距离为 0 而天线半径相等时，耦合系数 $k=1$ 。此时，导体回路互相重叠，并有相同的磁通量通过。

实际上，电感耦合的 PICC 系统工作时的耦合系数可低至 0.01 以下。

2 PICC 的天线计算（以 Mifare 1 卡片为例）

如图 2 所示，PICC 由微晶片与天线组成。微晶片的外面一般封装了保护层。保护层可以防止微晶片被折叠、扭曲等众多对卡片实施的非正常的物理性损坏；同时，也防止微晶片受到紫外线的辐射，使卡片能长久地被使用。但从电性能的角度来看，由于加入了保护层，使 IC 与卡片上天线组成的振荡回路的频率将发生变化。因为，保护层给 IC 微晶片增加了一个输入回路电容 C_{mount} 。尽管这个电

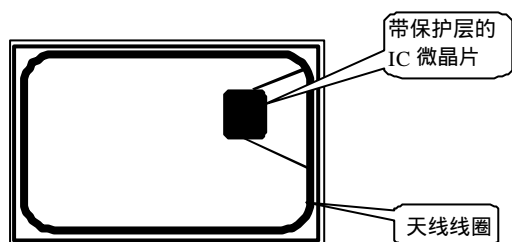


图2 Mifare 1 IC 智能(射频)卡

容只有几 pF~几十 pF,但对于要求频率精度、稳定度等都很高的非接触式 IC 智能射频卡来说,也将是很重要的。

卡片上的等效电路如图 3 所示。

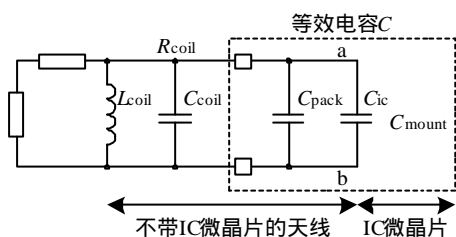


图3 卡片上的等效电路

PICC 线圈 L_{coil} 上并联电容以构成并联振荡电路,感应电压用于给无源的 PICC 微晶片供电。并联振荡回路的谐振频率可由汤姆逊公式算出:

$$f_{res} = 1/(2 \sqrt{L_{coil} \cdot C})$$

对于 13.56 MHz 这种较高的频率来说,所需电容大多数是很小的,包括数据载体的输入电容、线圈的寄生电容等。

等效电容: $C = C_{coil} + C_{pack} + C_{ic} + C_{mount}$

说明:

f_{res} : 卡片的振荡频率,应为 13.56 MHz;

R_{coil} : 天线线圈的电阻,约 6.07 ;

L_{coil} : 天线线圈的电感,约 3.6 μ H;

C_{coil} : 天线线圈的电容,约 5 pF,可通过改变导线直径来改变;

C_{pack} : 天线线圈封装后引入的电容,约 5 pF;

C_{ic} : IC 微晶片的电容,约 16 pF;

C_{mount} : IC 微晶片安装后引入的电容,约几 pF~几十 pF;

a: 天线线圈与 IC 微晶片的接触点;

b: 天线线圈与 IC 微晶片的接触点。

其中,天线线圈的电感:

$$L_{coil} = 2L \ln(L/D - 1.04) \cdot N^2$$

L : 天线线圈一圈的长度,单位为 cm(L/D 项中 L 的单位为 mm);

N : 天线线圈圈数,一般为 4 圈;

D : 天线线圈直径或导体的宽度,单位为 mm;

P : 由天线线圈的技术而定的 N 的指数因子,如表 1 所列。

上述天线线圈的电感的公式只能作为首次估测之用,实际天线线圈的电感必须通过仪器测量而定,但偏差不会很大。

表 1

P 值	天线线圈结构
1.8	环绕线圈
1.7	Etched(蚀刻)线圈
1.5~1.7	印刷电路板线圈

一般天线线圈的电感: $L_{coil} < 4.2 \mu$ H,实际中推荐在 3.6 μ H 左右为最优。

天线线圈的品质因数 Q_{coil} :

$$Q_{coil} = \frac{\omega L_{coil}}{R_{coil}} = \frac{2 \pi f_{res} L_{coil}}{R_{coil}} = \frac{2 \pi \cdot 13.56 \cdot L_{coil}}{R_{coil}}$$

一般天线线圈的品质因数 $30 < Q_{coil} < 60$ 。

实际中,在品质因数 Q_{coil} 大于 30 后的增加量,对卡片的操作距离的增加无明显帮助;必须品质因数 Q_{coil} 小于 60,以确保数据通信稳定、可靠,否则天线的有效工作距离内有死区,而不能可靠地进行数据通信。一些卡结构中 R_{coil} 很高,导致 Q_{coil} 很小,这时可通过增加天线区域来调整。

天线线圈的矩形面积 S 必须大于 11 200 mm^2

$$S = S_{av} \cdot N$$

式中 S_{av} 为矩形面积 S 的平均值,所以必须 $S_{av} > 11 200 mm^2/N$ 。一般, $S_{av} = 2 778 mm^2$ (当卡片上的天线线圈矩形面积的长 \times 宽 = 40 mm \times 70 mm 时)。

实际中,推荐 S_{av} 在 3 330 mm^2 左右,即实际设计时卡片上的天线线圈的矩形面积的长和宽应为 74 mm 和 45 mm,天线线圈的圈数 N 为 4 圈。这样制作出的卡片将能保证通信的距离。

3 PCD 的天线设计

3.1 PCD 的组成

PCD 的结构框图如图 4 所示。

邻近耦合设备 PCD 的基本任务就是启动 PICC,与这个数据载体建立通信并且在应用软件和一个非接触的数据载体之间传送数据。所有的 PCD 都可简化为三个基本的组成部分:控制单元、由发送器和接收器组成的高频接口、天线。

PCD 的高频接口担负以下任务:

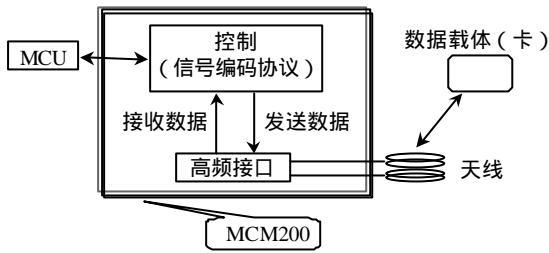


图4 PCD的结构框图

产生高频的发射功率，以启动 PICC，并为其提供能量；

对发射信号进行调制，用于将数据传送给 PICC；

接收并解调来自应答器的高频信号。

PCD的控制单元担负以下任务：

- 与 MCU 通信，并执行 MCU 发出的命令；
- 控制与 PICC 的通信过程（主 - 从原则）；
- 信号的编码解码；
- 执行反碰撞算法；

对 PICC 与 PCD 之间传递的数据进行加密和解密。

高频接口与控制单元之间的接口将高频接口的状态以二进制的形式表示出来，如图 5 所示。ASK 调制的系统可以据此利用高频接口调制输入端的逻辑“1”来表示“有高频信号”的状态，用逻辑“0”来表示“无高频信号”的状态。

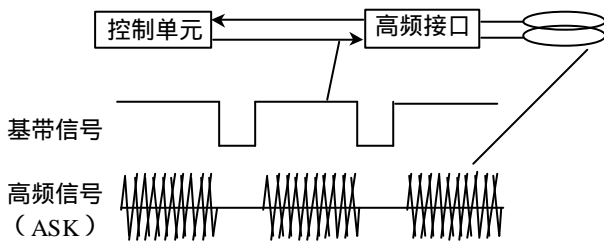


图5 基带信号的编码与解码由PCD的控制单元进行

MCM200 (Mifare Core Module) 是一种用于读写非接触式 IC 卡 (如 MF1) 的智能模块。它实际上包括了 PCD 所应有的控制单元和 高频接口，一般在读写器中还必须有 MCU (单片机) 来对 MCM 进行控制，及实现通信的天线。MCM200 模块主要应用于对卡片操作距离在 25 mm 的卡片读写器中，Mifare 所具有的独特 MIFARE RF (射频) 非接触式接口标准已被制定为国际标准：ISO/IEC 14443 TYPE A 标准。

图 6 所示为 MCM200 模块的引脚图。

D7	1	32	KPROG
D6	2	31	NCS
D5	3	30	NWR
D4	4	29	NRD
D3	5	28	A0
D2	6	27	A1
D1	7	26	A2
D0	8	25	A3
BP	9	24	ALE
NPAUSE1	10	23	USEALE
KOMP1	11	22	MODE
NRST	12	21	NANT
DVDD	13	20	ANT
DGND	14	19	AVDD
NIRQ	15	18	AGND
TP	16	17	RX

图6 MCM200 模块

3.2 天线的设计

电感耦合射频识别系统的 PCD 中的天线用于产生磁通量，而磁通量用于向 PICC 提供电源并在 PCD 与 PICC 之间传送信息。因此，对 PCD 天线的构造有以下几个基本要求：

使天线线圈的电流最大，用于产生最大的磁通量；

功率匹配，以最大程度地利用产生磁通量的可用能量；

足够的带宽，以无失真地传送用数据调制的载波信号。

一般说来，天线是有一定负载阻抗的谐振回路，阅读器又具有一定的源阻抗。为了获得最好的性能，必须通过无源的匹配回路将线圈阻抗转换为源阻抗。然后，通过同轴电缆即可无损且无辐射地将功率从读写器末级传送到匹配电路。

下面以 MF CM200 为例，进行天线的设计。图 7 中显示了该系统的天线电路设计。这里未使用同轴电缆，因为这样短的一条馈线通过合理的布局（带状线）就可实现了。

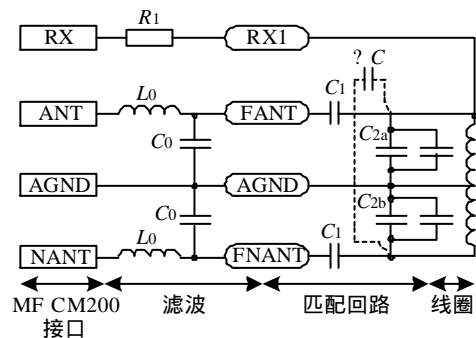


图7 MF CM200 天线耦合回路

图中的滤波电路采用 LC 低通滤波， $L_0=2.2 \mu H$ ， $C_0=47 pF$ ，其中 RX 脚处的滤波电路简化为一个电阻



$R_1 = 10 \Omega$ 。

匹配电路的设计是整个设计的关键。首先，计算天线线圈的电感：

$$L = 2l \cdot \ln(l/D) \cdot N^{1.8}$$

L ——天线电感，单位为 nH；

l ——天线导体一圈的长度，单位为 cm；

D ——天线导体的宽度（0.5~1.5 mm）；

N ——天线圈数。

可见，天线的电感与天线的结构（印刷电路板类型）、导体厚度、圈间距、屏蔽层、金属或铁氧体环境都有关。本系统的天线尺寸为 65 mm × 54 mm，导体宽度为 1 mm，因此，计算结果为 $L_{\text{antenna}} = 2 \times 23.8 \times \ln(23.8/1) \times 3^{1.8} = 1.09 \mu\text{H}$

由 $f = 1/[2 \pi \sqrt{LC}]^{1/2}$ ，其中 $f = 13.56 \text{ MHz}$ ， L 为 L_{antenna}

得 $C = (C_{2a} + C_1)/2 = 1/[2 \pi f^2 L] = 126 \text{ pF}$

因为 $C_1 = 27 \text{ pF}$

所以得 $C_{2a} = C_{2b} = 2 \times (126 - 27) = 226 \text{ pF}$

实验以 226 pF 作为初始值，逐渐减小 C_{2a} 与 C_{2b} 的值，使性能达到最优。

表 2 是实验参考值。

在天线设计中，还有一个参数很重要，那就是

表 2 实验参考值

L_{antenna}	C_1/pF	C_{2a}/pF	C_{2b}/pF
0.8	27	270	330
0.9	27	270	270
1.0	27	220	270
1.1	27	180/22	220
1.2	27	180	180/22
1.3	27	180	180
1.4	27	150	150

品质因数 Q 。用于电感耦合式射频识别系统的 PCD 天线，其特征值就是它的谐振频率和品质因数的值。较高的品质因数的值会使天线线圈中的电流强度大些，由此改善对 PICC 的功率传送。与之相反，天线的传输带宽刚好与品质因数 Q 值成反比例变化，选择的品质因数过高会导致带宽缩小从而明显地减弱 PICC 接收到的调制边带。

品质因数可以通过电感线圈的电抗与电阻的比值计算出来，公式如下：

$$Q = (2 \pi f_0 \cdot L_{\text{coil}}) / R_{\text{coil}}$$

许多系统给出的最佳品质因数为 10~30。本系统没有 R_{ext} 的 Q 值最高为 50~60，如果太高，将无法准确地识别复位响应。

以上分析了卡和机具的原理及其设计方法。实验表明，由此方法设计的电路运行稳定，读写数据准确，典型的交易时间不超过 100 ms。希望本文可

为更多从事射频系统开发的人员提供有力的技术支持。

参考文献

- 1 [德] Klaus Finkenzeller. 射频识别技术（第 2 版）陈大才编译. 北京：电子工业出版社，2001
- 2 杨山主编. 电路基础理论（修订本）. 天津：天津大学出版社，1993