



线圈天线设计

在无源 RFID 电子标签中,低频和高频电子标签占据很大的一块应用市场,例如,在牲畜养殖中使用的耳标,在图书馆中使用的书本电子标签,人员进出门禁使用的人员卡,在校园内广泛使用的校园卡等,因此有必要对这些标签天线的设计理论和方法进行讨论。本节将从低频和电磁波的特点出发,介绍线圈天线的理论计算方法,并结合具体的案例介绍低频和电磁波的实际工程设计方法。

这里所说的低频电子标签是工作频率为 125kHz 附近的标签,高频标签是工作频率为 13.56MHz 附近的标签。区分是否属于线圈天线的适用范围,还要跟导体的趋肤深度相联系,一般来说,如果导体的导电厚度远小于电磁波的趋肤深度,那么就可以划到线圈天线的适用范围,如果导体的厚度与趋肤深度相当或者远大于趋肤深度,那么就不能划分到线圈天线的适用范围,当然特定设计的近场标签除外。

本章所提到的计算磁通、电感等参数的方法均基于导体厚度远小于电磁波的趋肤深度的假设。这样的电子标签获取能量的方式主要是在近场区域通过电磁耦合的方式。因此这些电子标签天线都是采用线圈的结构。这些线圈可以由有一定直径的金属导线组成的,也可以是由在介质上的金属层构成,本章将对这些不同的情况做具体的分析。

线圈型天线根据实际的使用需要,有可能是圆形的,也有可能是方形的,这些线圈的电感计算方法有一些差异,本章将做具体分析。由于线圈天线在设计时需要采用电感的计算方法,本章的 3.3 节和 3.4 节部分内容节选自《电感计算手册》。

3.1 线圈类电子标签

为了使读者能够对线圈类电子标签和天线能够有初步的认识,以便更好地了解线圈天线的设计思路和方法,本节将从标签组成和构造的角度,介绍各种不同类型的线圈类电子标签。

线圈类电子标签从组成和构造的角度可以分为圆截面金属导线类、矩形截面平面盘式、带匹配电路的线圈类等,具体的分类如图 3-1 所示。

从构成上来说,低频和电磁波电子标签通常是由一个电感线圈和一个标签芯片组成的,标

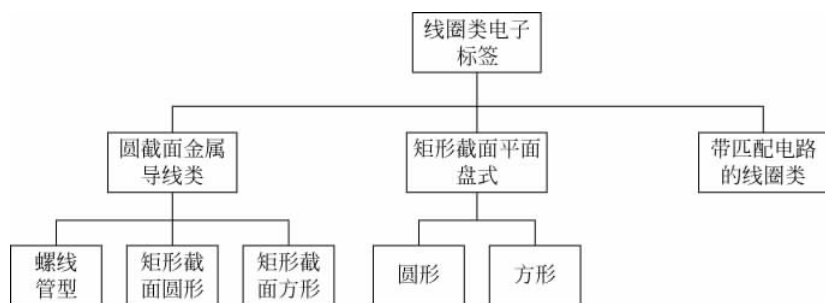


图 3-1 线圈类标签分类

签芯片的射频输出端口直接连接在电感线圈的两端,如图 3-2 所示,为了便于加工,通常将标签芯片绑定在一块 PCB 板上。当然根据不同类型的线圈材料及其加工工艺方法,线圈的构成和外形也会有非常大的不同。



图 3-2 圆截面金属导线类电子标签示例

1. 圆截面金属导线类电子标签

根据圆形截面金属导线的绕制方法,可以将这种电子标签分为以下三类:

- (1) 螺线管型;
- (2) 多匝圆形;
- (3) 多匝方形。

圆截面金属导线类线圈,指的是由圆形截面的金属导线沿顺轴向或者垂直轴向方向缠绕的一匝或多匝线圈。与之相对应的是平面盘式线圈,其指的是由截面为方形且依附在一定的介质上的导体绕制形成的一匝或多匝线圈。

需要说明的是,此处所说的圆截面金属导线类指的是绕制线圈的导线截面是圆形的,并非指线圈本身的截面。在无特殊说明的情况下,本书所说的金属导线均默认为圆形截面。

螺线管型线圈如图 3-3 所示,其是由一根圆形截面的金属导线围绕一个中心轴按照一定的半径和线间距绕制而成的,同时其沿轴向方向的长度尺寸远大于径向尺寸。

图 3-3 所展示的是螺线管线圈的简单构造,实际的螺线管线圈可能是由图中绕 z 轴旋转的不同半径的线圈连接而成的,即线圈不仅在 z 轴方向上会有匝数,在半径方向上也会有匝数的变化。

螺线管线圈通常会与电子标签芯片电连接在一起,电子标签芯片通常会被绑定在一块 PCB 板上,称为 strip,螺线管与 strip 的连接方式通常为焊接。

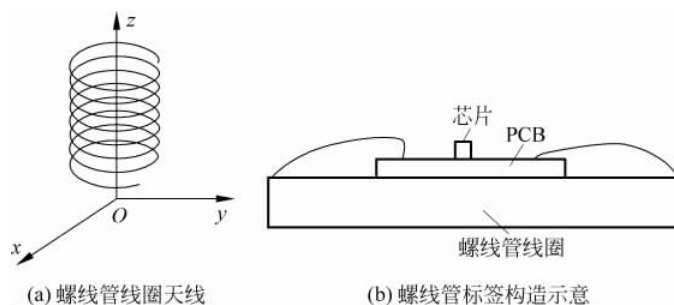


图 3-3 螺线管型电子标签构造

通常除螺线管线圈外,金属导线绕制的电子标签其本身的截面是矩形的,本书所讨论的线圈本身的截面形式也仅限于矩形。

矩形截面的多匝圆形线圈,表示的是圆截面导线所绕制的线圈,其成品的截面形状为矩形,但是绕制出来的线圈形状为圆形;矩形截面的多匝矩形线圈,表示的是圆截面导线所绕制的线圈,其成品的截面形状为矩形,但是绕制出来的线圈形状为矩形,如图 3-4 所示。

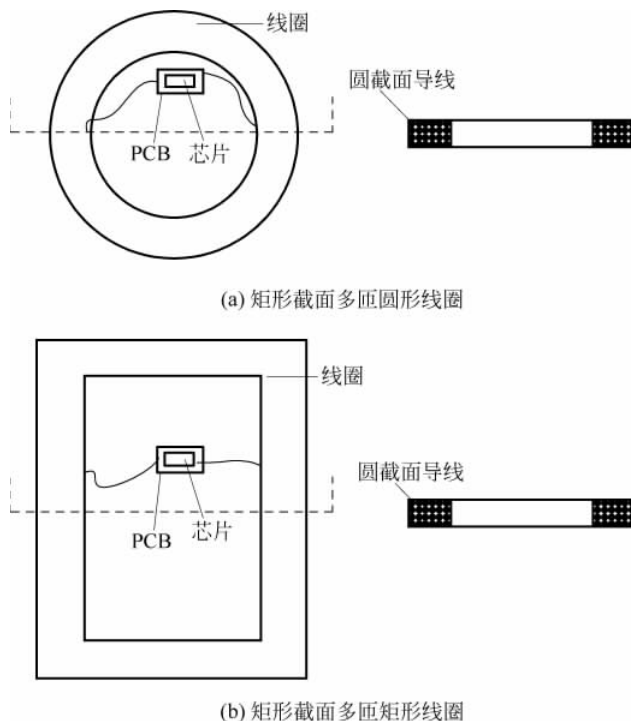


图 3-4 矩形截面的多匝线圈

与螺线管标签相同,圆形和矩形多匝线圈与芯片连接所采用的方式也是 strip 方式,并且通常采用焊接工艺。

以上对于由圆截面导线绕制的线圈做了简要的介绍,后续的章节将具体对这些线圈如何区分和计算进行详细介绍。

2. 矩形截面平面盘式标签

采用蚀刻工艺或者印刷工艺制作的平面线圈,其导线一般是矩形截面的。这种矩形截面的电子标签通常称为平面盘式标签。平面盘式标签与前文所提的圆截面多匝线圈天线在加工工艺、标签形式等方面均有非常大的差异。典型的平面盘式标签如图 3-5 所示。

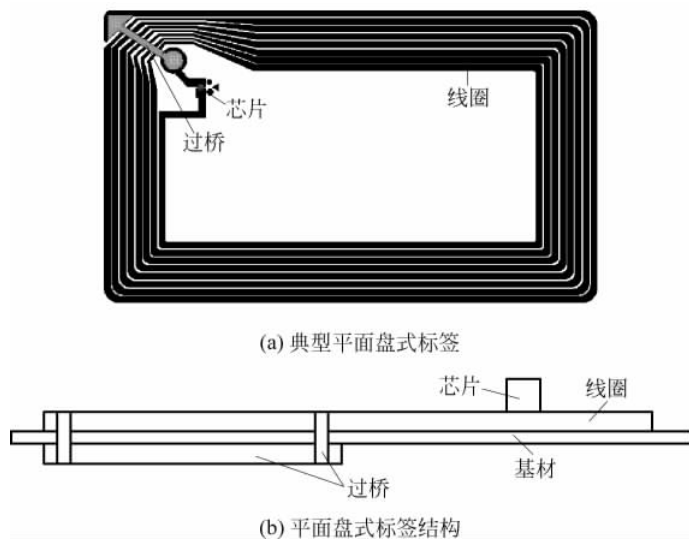


图 3-5 典型的平面盘式标签

不论是圆形还是方形的平面盘式标签,其大概由基材、线圈天线、过桥与芯片 4 部分组成。线圈天线通过导线层附着在一定的基材上,基材可以是纸张或者其他的塑料材料,过桥是连接芯片两端的部份,通常可以看作线圈天线的一部分,并且加工工艺也基本相同,芯片通常是通过倒封装工艺与线圈天线进行电连接的。

与圆形截面的导线绕制的线圈相比,平面盘式标签具有结构简单、加工容易、成本低廉、低剖面等非常明显的优势,因此其广泛地应用于图书、门票、白卡等应用场合。NFC 标签的广泛使用,更是极大地拓展了这类标签的使用范围。

3. 带匹配电路的线圈类标签

在线圈类电子标签的设计中,轮廓尺寸的大小、线宽和芯片端口的电容是相互制约的三个因素,它们严重影响到标签的设计和性能。在这三个因素无法达到平衡的时候,需要使用匹配电路来调和三者之间的矛盾。典型的带匹配电路的线圈类标签如图 3-6 所示。

带匹配电路的线圈电子标签与通常的线圈型电子标签的不同之处在于,这种标签天线的绕线线圈往往只有一匝或者几匝,光靠绕线线圈是无法达到与芯片电容之间谐振的,其绕

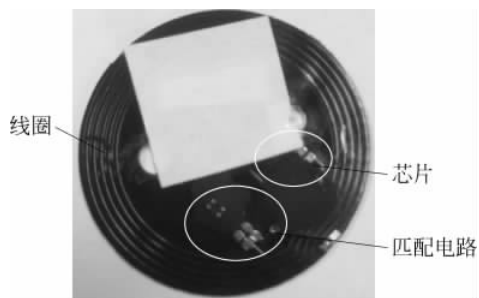


图 3-6 典型的带匹配电路的线圈型电子标签

线的基材往往是 PCB 板,同时在 PCB 板上带有匹配电路,匹配电路通常是通过集总参数来完成匹配的,标签芯片往往是通过绑定工艺与线圈连接在一起的。

由于使用环境和使用年限的问题,带有匹配电路的线圈类电子标签往往需要用一定的外壳进行保护,其成品标签的加工工艺往往需要使用有别于热压和层合的注塑工艺。

以上从线圈类电子标签的结构和构成的角度出发,简要介绍了各种不同的线圈类电子标签及其特点,希望通过这样的介绍,读者能够对于线圈类电子标签建立一些直观的概念,以便对后文中关于线圈类电子标签的设计方法能够有更深入的理解。

3.2 线圈天线与电感

线圈天线耦合空间中的电磁场,通过与芯片连接成的回路给整个电子标签提供需要的电压和电流,电感线圈就是这种电子标签的天线。式(2-1)已经描述了电感线圈获取感应电动势的方式。

电子标签芯片射频端口阻抗一般是呈容性电抗的,而线圈在低频和高频频段一般是呈感性的,因此电子标签可以用电感和电容谐振电路进行等效,如图 3-7 所示。

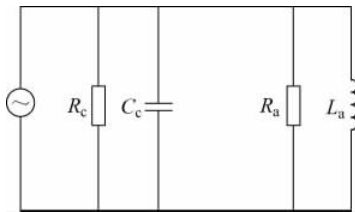


图 3-7 线圈天线的电子标签等效电路

图 3-7 中, R_c 为芯片射频端口的电阻; C_c 为芯片射频端口的电容; R_a 为线圈天线的电阻; L_a 为线圈天线的电感。

从电路的角度来说,只要以上 LC 谐振电路满足

$$\omega L_a = \frac{1}{\omega C_c} \quad (3-1)$$

那么该谐振回路就可以在频率为 $f = \frac{1}{\sqrt{L_a C_c}}$ 的频点附近谐振。如果同时能够做到

$$R_c = R_a \quad (3-2)$$

那么电路就处于共轭匹配的状态,可以做到能量的最大传输。在频率不高的状态下,特别是像 125kHz 的情况,线圈天线的电阻是可以通过电阻计算公式得到的,即

$$R_a = \frac{\rho l}{s} \quad (3-3)$$

其中, ρ 为线圈天线金属导体的电阻率; l 为线圈天线的金属导线长度; s 为线圈天线的导体截面积。

在根据芯片射频端口电容计算出需要的线圈天线电感后,线圈的直径就成为了影响电子标签性能的关键因素。

下面介绍线圈天线的面积对磁通和电压的影响。不同直径或长宽的线圈根据绕线匝数的不同,可以得到相同的电感,即在芯片射频端口电容相同的情况下,电子标签可以在相同的频率谐振,但是根据线圈绕线面积的不同,线圈天线所获取的磁通量是不同的。对于一个闭合的几何回路 l ,以及以此回路为边界的任一面 s ,假设穿过面 s 的磁感应强度矢量 B 的方向与面 s 按照右手螺旋定则确定的正法向方向相同,那么通过面 s 的磁通量为

$$\Phi = \int_s B ds \quad (3-4)$$

对于实际的电感线圈,线圈都是有截面积的,对于这样的实际线圈,可以先将电流 i 分为无数具有无穷小截面的元素电流管,如图 3-8 所示,然后找出与每根元素线相链的全磁通 Φ 。这样,与回路相链的全磁通 Ψ 为

$$\Psi = \frac{1}{i} \int \Phi di \quad (3-5)$$

其中, di 为任一元素线的电流; Φ 是与该元素线相链的磁通。

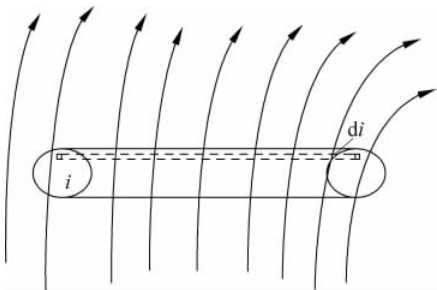


图 3-8 截面积不可忽略的导线

在导体横截面积为 0 的理想情况下, $\Psi = \Phi$, 在线径极细的情况下,两者也接近相等。如果导线在横截面积上的电流分布均匀,那么 di 可以表述为

$$di = i \frac{ds}{s} \quad (3-6)$$

由此可以得到

$$\Psi = \frac{1}{s} \int_s \Phi ds \quad (3-7)$$

其中, ds 为与 di 相对应的导体横截面积。

对于有 N 匝绕线的闭合线圈来说,其感应电动势为

$$E = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = N \frac{\Delta B}{\Delta t} S \quad (3-8)$$

其中, S 为 N 匝线圈的有效口径面积; $\frac{\Delta B}{\Delta t}$ 表示磁感应强度矢量随时间变化的快慢。

式(3-8)看出,在线圈匝数相同的情况下,线圈口径的有效面积越大,线圈所获得的感应电动势就越大。在线圈口径的有效面积相同的情况下,线圈的匝数越大,线圈所获得的感应电动势也越大。

磁通可以是本闭合线圈中的电流产生的,也可以是附近其他的电流产生的,由自身回路电流产生并且与该回路自身相连的磁通称为自感磁通,由其他回路电流产生的,并且与这个回路相连的磁通称为互感磁通。回路自感磁通与其自身回路电流之比称为自感或自感系数,对于有两个回路的系统而言,其中一个线圈的互感磁通与另一个线圈的回路电流之比称为互感或互感系数,如式(3-9)所示。

$$\begin{cases} L = \frac{\Psi}{i} \\ M_{12} = \frac{\Psi_{2M}}{i_1} \\ M_{21} = \frac{\Psi_{1M}}{i_2} \end{cases} \quad (3-9)$$

其中, Ψ 为回路的自感磁通; i 为回路的电流; Ψ_{2M} 为回路电流 i_1 在线圈 2 中产生的磁通; Ψ_{1M} 为回路电流 i_2 在线圈 1 中产生的磁通。对于自感 L 而言,其一定是一个正数,而对于互感 M 来说,其受到线圈摆放位置、线圈形状、电流流向等因素的影响,因此互感系数可能出现负值。如果电流方向发生改变,互感系数的正负号会发生改变。通常情况下 M_{12} 与 M_{21} 是相等的。自感和互感的概念对于使用线圈类天线的 RFID 标签很重要,因为只有存在两个闭合线圈之间的互感,才能进行能量的交互和传递,如图 3-9 所示。

互感系数的大小直接决定了两个线圈之间耦合能力的强弱。在线圈中的介质磁导率不随频率和电流变化的前提下,磁通与产生该磁通的电流成正比,因此实际上自感 L 与互感 M 将只与线圈回路的形状、位置、尺寸、相对角度、电流分布特性等参数相关。如图 3-9 所示,如果两个线圈法向方向相同,并且在某一个方向上的投影相互重叠,即两个线圈的有效口径面是平行的,那么这两个

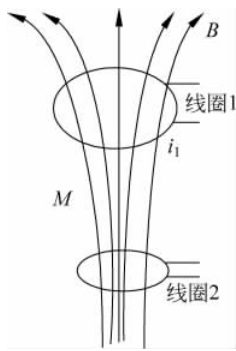


图 3-9 闭合线圈互感

线圈之间的互感能力是比较强的。

以图 3-9 中的两个圆形线圈为例,假设线圈 1 的有效半径为 a ,线圈 1 的匝数为 N_1 ,线圈 2 的有效半径为 b ,线圈 2 的匝数为 N_2 , r 为两个线圈之间的距离,并且两个线圈是同轴且平行于水平面的,当 r 远大于两个线圈的半径时,那么这两个线圈之间的互感系数为

$$M = \frac{\mu_0 \pi N_1 N_2 a^2 b^2}{2r^3} \quad (3-10)$$

其中, μ_0 为真空中的磁导率。从式(3-10)也可以看出,两个线圈之间互感的衰减与两个线圈之间的距离 r 的三次方成反比,这也是为什么通常在线圈耦合型电子标签系统中,标签的识读距离不会太远的原因。

在电子标签的线圈天线设计中,线圈的匝数、有效口径面积和电感量紧密相连,即任何一个量的变化都会导致其他两个参数的变化。在工程中,由于芯片射频端口的电容基本上是固定的,因此线圈天线的电感量基本也是固定的,因此在使用条件相同的条件下,增加线圈匝数和增加线圈的有效口径面积都会使电子标签线圈天线的感应电动势增加,但是在实际的使用中,由于电感量已经确定了,那么很难同时增加线圈的匝数和有效口径面积。

由图 3-7 可以将线圈天线等效为一个电阻 R_a 和电感 L_a 的串联电路,如图 3-10 所示。此处省略了线圈天线的寄生电容。

那么线圈等效电路的 Q 值为

$$Q = \frac{2\pi f L_a}{R_a} \quad (3-11)$$

对于线圈天线而言, R_a 越小,线圈天线的 Q 值就越高,那么线圈本身所损耗的功率就越小,同时线圈天线本身的工作带宽就越窄。对于低频或者直流情况而言,线圈的电阻可以用式(3-3)计算得到。对于频率稍高的情况,即导体上电流分布不均匀的情况,需要考虑金属表面的趋肤效应。趋肤深度表示导体内的电流密度下降到导体表面的 $1/e$ 时的深度,其与电磁波的频率和导体的电导率有关,即

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (3-12)$$

其中, f 为工作频率; μ 为磁导率,一般为真空中的磁导率; σ 为金属的电导率。以铜为例,频率 $f=13.56\text{MHz}$ 时,其趋肤深度为 $18\mu\text{m}$,当频率为 125kHz 时,其趋肤深度为 $187\mu\text{m}$ 。有别于直流电阻,在这种交流的情况下,交流电阻为

$$R_{ac} = \frac{l}{2a} \sqrt{\frac{f\mu}{\pi\sigma}} \quad (3-13)$$

其中, l 为导体的长度, a 为导体截面半径。在交流情况下导体的有效截面积为

$$A \approx 2\pi a \delta \quad (3-14)$$

对于在一定介质基材上的平面导体,其交流阻抗为

$$R_{ac} = \frac{l}{(w+t)} \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}} \quad (3-15)$$

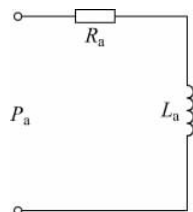


图 3-10 线圈天线等效电路

其中, w 为平行导体的宽度; t 为平行导体的厚度。

工程实践中,线圈标签天线的外轮廓尺寸往往是指定的,那么实际上也就限制了线圈的有效口径面积,在这样的情况下,线圈天线的设计往往就变成了一个计算和测试线圈电感的过程。从以上分析中可以知道,磁通量取决于线圈天线的有效口径面积,感应电动势与线圈的匝数成正比关系,在线圈的实际中,导体本身的电阻越小,那么天线所能提供给芯片的能量就越大,导体的电阻与线径或者平行导体的宽度和高度成反比,在不考虑加工工艺的情况下,金属导体的价格与导体的重量是成正比的,即相同导体的截面积越大,其成本也越高。通过以上分析,可以了解到,一个好的线圈天线其实是在尺寸、形状、阻抗、价格、工艺等方面进行取舍的结果。

在实际的工程应用中,线圈天线可以由一定截面积的圆柱形导线绕线形成的,也可以通过附着在一定基材上的平面导体构成的。根据不同的工作频率和加工方法,需要选择不同的材料和加工方法来设计和制造线圈天线。

3.3 单圈直导线电感

如图 3-11 所示,在给定的两个回路中,将回路的电流分为许多电流元素线,与任一电流元素线 di' 相链的磁通 Φ 可被视为由其他元素线 di'' 所产生的互感磁通 ($\bar{M}di''$) 之和, \bar{M} 为元素线 di' 与 di'' 之间的互感。在计算自感 L 时,求和的过程遍及该回路自身全部的元素线,在计算互感 M 时,求和的过程应遍及另一回路全部的元素线。

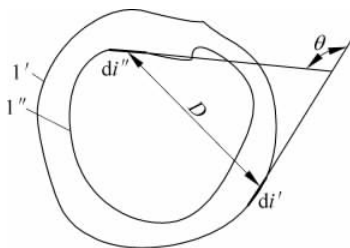


图 3-11 回路电流元素线

磁通 Φ 可以表示为

$$\Phi = \int \bar{M} di'' \quad (3-16)$$

那么根据式(3-16)可以得到

$$\begin{cases} L = \frac{1}{i_1^2} \int_i di' \int_i \bar{M} di'' \\ M = \frac{1}{i_1 i_2} \int_{i_1} di' \int_{i_2} \bar{M} di'' \end{cases} \quad (3-17)$$

其中, i_1, i_2 表示两个线圈的电流; \bar{M} 表示两条元素线之间的互感,表示为

$$\bar{M} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{i'} \oint_{i''} \frac{dl' dl''}{D} \cos\theta \quad (3-18)$$

其中, dl' 与 dl'' 是元素线 l' 与 l'' 的长度元素; D 是这两个长度元素之间的距离; θ 为这两个长度元素间的夹角。在计算自感的公式里, l' 与 l'' 属于同一回路, 在计算互感的公式里, l' 与 l'' 属于不同的回路。上述公式应用的前提是各条回路各点交流电流密度相位相同。

在低频的情况下, 可以假设

$$\frac{di}{i} = \frac{ds}{s} \quad (3-19)$$

其中, ds 为对应于导线截面积 s 的面积元素。在这种情况下, 自感和互感分别为

$$\begin{cases} L = \frac{1}{s^2} \int_s ds' \int_s \bar{M} ds'' \\ M = \frac{1}{s_1 s_2} \int_{s_1} ds' \int_{s_2} \bar{M} ds'' \end{cases} \quad (3-20)$$

在频率较高的情况下, 电流集中在导体的表面, 可以假设电流沿着每根导线截面的周长 λ 均匀分布, 那么

$$\frac{di}{i} = \frac{d\lambda}{\lambda} \quad (3-21)$$

其中, $d\lambda$ 为对应于导线截面周长 λ 的长度元素。在这种情况下, 自感和互感分别为

$$\begin{cases} L = \frac{1}{\lambda^2} \int_{\lambda} d\lambda' \int_s \bar{M} d\lambda'' \\ M = \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2} \int_{\lambda_1} d\lambda' \int_{\lambda_2} \bar{M} d\lambda'' \end{cases} \quad (3-22)$$

如果回路本身的尺寸及一条回路的元素线到另一条回路的元素线之间的距离 D 都远远大于导线的截面尺寸, 那么不管电流在截面上是怎样分布的, 回路之间的互感 M 都将与 \bar{M} 相等。

对于由若干线段组成的回路, 在计算 n 段线组成的回路的自感和由 n 段线和 m 段组成的两个回路的互感时, 可以使用在各段线上积分求和的方式进行计算, 即

$$\begin{cases} L = \sum_{k=1}^n L_k + \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n M_{ki} & i \neq k \\ M = \sum_{k=1}^n \sum_{i=n+1}^{n+m} M_{ki} \end{cases} \quad (3-23)$$

其中, L_k 为 n 段线中的第 k 段自电感; M_{ki} 为第 k 段与第 i 段的互感。根据式 (3-20) 和式 (3-22), 在低频和较高频率的情况下 L_k 和 M_{ki} 可以表示为

$$\text{低频} \begin{cases} L_k = \frac{1}{s_k^2} \int_{s_k} ds' \int_{s_k} \bar{M}_k ds'' \\ M_{ki} = \frac{1}{s_k s_i} \int_{s_k} ds' \int_{s_i} \bar{M}_{ki} ds'' \end{cases} \quad (3-24)$$

$$\text{较高频率} \begin{cases} L = \frac{1}{\lambda_k^2} \int_{\lambda_k} d\lambda' \int_{\lambda_k} \bar{M}_k d\lambda'' \\ M = \frac{1}{\lambda_k \lambda_i} \int_{\lambda_k} d\lambda' \int_{\lambda_i} \bar{M}_{ki} d\lambda'' \end{cases} \quad (3-25)$$

其中, \bar{M}_k 是穿过第 k 段截面 s 的元素 ds' 和 ds'' 或相应周长 λ 的元素 $d\lambda'$ 和 $d\lambda''$ 的两根电流元素线 l' 和 l'' 之间的互感, 其计算方法为

$$\bar{M}_k = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{l'} \oint_{l''} \frac{dl' dl''}{D} \cos\theta \quad (3-26)$$

\bar{M}_{ki} 是第 k 和第 i 段截面 s_k 和 s_i 的元素, 或相应周长 λ_k 和 λ_i 的元素的各电流元素之间的互感。 D 为元素线 l' 和 l'' 的长度元素 dl' 和 dl'' 之间的距离和夹角。

线型导线之间的互感在任何频率下, 都可以认为与这两根导线的中心元素 l' 和 l'' 之间的互感相等。

在计算复杂形状回路的电感时, 可以采用分段法, 将复杂形状的单个回路或多个回路分解为若干线段, 从而使每一线段具有简单的形状, 可以利用式(3-23)进行计算, 从而得出复杂形状回路的电感。如果各个回路均由直线组成, 那么使用分段法进行计算更有优势。

对于线型导线的自感, 其可以表述为

$$L = N - G + A - Q \quad (3-27)$$

其中, N 是一个由导线的形状和尺寸所决定的量, 其与导线截面的形状和尺寸以及电流在截面上的分布情况无关; G 、 A 、 Q 是由导线截面形状和尺寸以及电流在截面上的分布情况决定的量。计算 N 只需要沿导线轴线进行积分, 而计算 G 、 A 、 Q 则只需要按其截面的面积进行积分。因此在计算线型导线的自感时, 就只需要先找出 N , 再计算出 G 、 A 、 Q , 这三项对于截面形状相同的导线, 其值是相同的。图 3-12 表示了一段圆弧导线, l_1 和 l_2 是沿导线一段设计的导线轴线的曲线坐标, θ 和 D 表示的是长度元素 dl_1 和 dl_2 之间的夹角和距离, h 是一段段弧 σ 上的弦。由积分可得

$$V = \int_0^{l_1 - \sigma} \frac{\cos\theta}{D} dl_2 \quad (3-28)$$

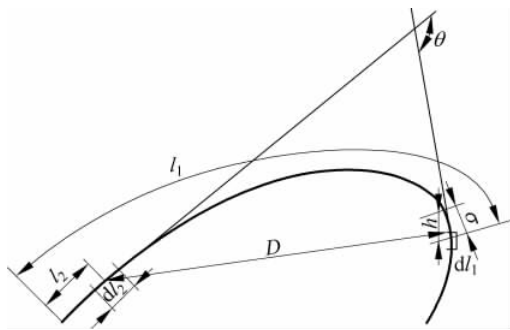


图 3-12 圆弧导线

将 $V + \ln 2h$ 取 $\sigma \rightarrow 0$ 的极限值表示为 W , 即

$$W = \lim_{\sigma \rightarrow 0} (V + \ln 2h) \quad (3-29)$$

那么, 计算 N 的公式为

$$N = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_0^l W dl_1 \quad (3-30)$$

其中, l 是圆弧导线的长度。

通常在计算自感 L 时, 忽略 A 、 Q 的影响, 那么当圆弧导线的截面为圆形时, G 表示为

$$G = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln r - \frac{1}{4} \right) \quad (3-31)$$

对于弯曲导线上的互感的计算, 可以将回路或者导线分为两个部分, 各以 1 和 2 命名, 那么这两部分之间的互感可以计算为

$$M_{12} = \frac{1}{2} (L_{12} - L_1 - L_2) \quad (3-32)$$

其中, L_{12} 是被研究回路的自感; L_1 和 L_2 是 1、2 各部分的自感。当整个回路的自感和其中两部分的自感均已知时, 就可以利用式(3-33)计算出回路中这两部分的互感。对于分成更多部分的导线, 类似方法也成立。

在单圈导线中, 圆形和矩形线圈是经常用到的。

在低频情况下, 可以计算圆形单圈导线的电感为

$$L = \mu_0 R \left[\ln \frac{8R}{r} - 1.75 + \frac{r^2}{8R^2} \left(\ln \frac{8R}{r} + \frac{1}{3} \right) \right] \quad (3-33)$$

其中, R 为圆环线圈半径; r 为圆环导线截面半径。当 $R \gg r$ 时, 忽略 A 、 Q 的影响, 圆环线圈的自感公式可以简化为

$$L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{r} - 1.75 \right) \quad (3-34)$$

在高频时, 电流在导线的表面分布, 那么圆形单圈导线的电感为

$$L = \mu_0 R \left[\left(1 - \frac{r^2}{4R^2} \ln \frac{8R}{r} + \frac{r^2}{2R^2} \right) \ln \frac{8R}{r} - 2 - \frac{r^2}{16R^2} \right] \quad (3-35)$$

当 $R \gg r$ 时, 忽略 A 、 Q 的影响, 圆环线圈的自感公式可以简化为

$$L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{r} - 2 \right) \quad (3-36)$$

对于矩形回路而言, 其电感值可以表示为

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left[a \ln \frac{2ab}{a+d} + b \ln \frac{2ab}{b+d} + 2(d-a-b) \right] \quad (3-37)$$

其中, a 、 b 为矩形的边长; d 为矩形的对角线长度。对于正方形回路, 即边长 $a=b$, 那么正方形线圈的电感为

$$L = \frac{2\mu_0 a}{\pi} \left[a \ln \frac{2a}{1+\sqrt{2}} + \sqrt{2} - 2 \right] \quad (3-38)$$

对于导线和回路电感的计算是多匝电感线圈计算的基础,在了解了这些计算方法和公式的基础上才能对复杂的线圈进行计算。只由一匝线圈组成的回路在实际的天线设计中是比较少用的,大部分线圈天线都是具有多匝线圈的复杂回路。

3.4 线圈电感计算

线圈本身可以视为一个具有圆柱形或者平面形或者其他螺旋状的复杂回路,其线匝或者为顺轴向缠绕的,或者为垂直于轴向缠绕的,无论如何缠绕,这些线圈是存在一定的螺旋形的,在计算电感时,如果要考虑线圈的螺旋性,那么计算电感是非常困难的,实际上,在计算电感时,通常忽略线圈的螺旋性,而将线圈视为平面线圈的集合,如图 3-13 所示。

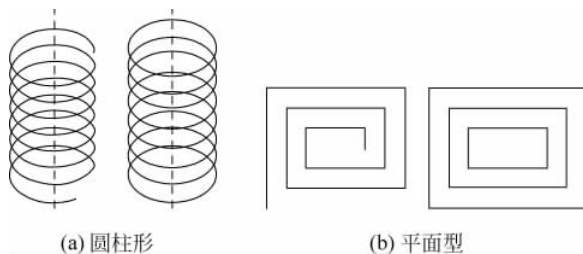


图 3-13 螺旋状线圈回路

本章所提到的线圈,其截面尺寸与线圈的长度相比都远小于线圈线长度,导线型线圈的截面均为圆形截面,平面盘式线圈的截面分为圆形和矩形两种,并且沿着线圈绕线的方向,线圈的截面积沿线圈绕线方向是均匀分布的,不随绕线长度发生变化。

为了方便区分和计算,如图 3-14 所示,用 d_1 、 d_2 和 d 表示线圈的外径、内径和平均直径,用 a 表示线圈的轴向长度,用 $r = \frac{d_1 - d_2}{2}$ 表示绕线的轴向厚度。当 a 等于绕线导体的截面直径时,线圈为平面盘式线圈,如图 3-13(b)所示;当 r 等于绕线导体的截面直径时,线圈为螺线管线圈,如图 3-13(a)所示,当 $a > d$,线圈为长线圈,当 $a < d$ 线圈为短线圈。在计算线圈的电感时,线圈的平均直径等于实际线圈的平均直径,线圈的轴向尺寸 a 与径向尺寸 r 等于绕组间距乘以绕组在对应方向上的线匝数。

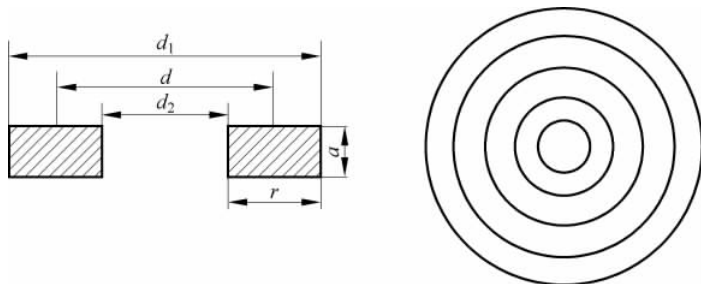


图 3-14 螺线圈表示方法

本节利用整体线匝法对多匝线圈的电感进行分析。在应用整体法时,将线圈的电感与相应的整体线匝电感进行比较,所谓相应,指的是整体线匝与被研究的线圈有相同的外形和尺寸,如图 3-15 所示。

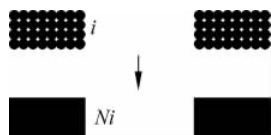


图 3-15 整体法线匝对比

假设具有电流为 i 的 N 匝线圈,那么其可以等效为电流为 Ni 的圆环。这种假设建立在线圈天线的占空比为 1 的基础上,即假设绕制线圈的导线具有无限薄的绝缘层,且导线紧密接触,可以把圆截面的导线假设为具有矩形截面的导线。

电感计算公式为

$$L = \frac{1}{i^2} \int \Phi di \quad (3-39)$$

等效前后线圈的磁通是相同的,而 N 匝线圈的电流为整体线圈的 $\frac{1}{N}$,因此通过以上计算公式可以得到 N 匝线圈的电感计算公式为

$$L_N = N^2 L \quad (3-40)$$

结合整体线匝法和以上对多匝线圈所做的假设和规定,下面来具体讨论各种不同线圈的电感计算方法问题。

1. 螺线管线圈电感

对于图 3-13(a)所示的圆柱形螺线管,假设螺线管线圈的绕线线径远小于绕线长度,那么螺线管线圈的电感值可以表示为

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} N^2 d \Phi \quad (3-41)$$

其中, N 为螺线管的匝数; d 为螺线管的直径; Φ 为随比值 $\alpha = a/d$ 变化的数值; a 为螺线管的轴向长度。表 3-1 和表 3-2 表示 Φ 的具体值。

表 3-1 螺线管公式 3-39 的 Φ 值(a)

$1/\alpha$	Φ	$1/\alpha$	Φ	$1/\alpha$	Φ	$1/\alpha$	Φ
0.01	0.098	0.08	0.763	0.15	1.39	0.22	1.982
0.02	0.196	0.09	0.855	0.16	1.477	0.23	2.063
0.03	0.292	0.1	0.946	0.17	1.563	0.24	2.144
0.04	0.388	0.11	1.037	0.18	1.648	0.25	2.225
0.05	0.483	0.12	1.126	0.19	1.732	0.26	2.304
0.06	0.577	0.13	1.215	0.2	1.816	0.27	2.384
0.07	0.671	0.14	1.303	0.21	1.899	0.28	2.462

续表

$1/\alpha$	Φ	$1/\alpha$	Φ	$1/\alpha$	Φ	$1/\alpha$	Φ
0.29	2.54	0.47	3.838	0.65	4.97	0.83	5.96
0.3	2.617	0.48	3.905	0.66	5.03	0.84	6.01
0.31	2.693	0.49	3.972	0.67	5.08	0.85	6.06
0.32	2.769	0.5	4.037	0.68	5.14	0.86	6.11
0.33	2.844	0.51	4.1	0.69	5.2	0.87	6.16
0.34	2.919	0.52	4.17	0.7	5.26	0.88	6.22
0.35	2.933	0.53	4.23	0.71	5.31	0.89	6.27
0.36	3.067	0.54	4.3	0.72	5.37	0.9	6.32
0.37	3.14	0.55	4.36	0.73	5.42	0.91	6.36
0.38	3.212	0.56	4.42	0.74	5.48	0.92	6.41
0.39	3.284	0.57	4.48	0.75	5.54	0.93	6.46
0.4	3.355	0.58	4.55	0.76	5.59	0.94	6.51
0.41	3.426	0.59	4.61	0.77	5.64	0.95	6.56
0.42	3.496	0.6	4.67	0.78	5.7	0.96	6.61
0.43	3.565	0.61	4.73	0.79	5.75	0.97	6.65
0.44	3.634	0.62	4.79	0.8	5.8	0.98	6.7
0.45	3.703	0.63	4.85	0.81	5.86	0.99	6.75
0.46	3.771	0.64	4.91	0.82	5.91	1	6.79

表 3-2 螺线管公式 3-39 的 Φ 值(b)

α	Φ	α	Φ	α	Φ	α	Φ
0.01	34.5	0.18	16.43	0.35	12.42	0.52	10.15
0.02	30.15	0.19	16.1	0.36	12.26	0.53	10.05
0.03	27.6	0.2	15.78	0.37	12.1	0.54	9.95
0.04	25.8	0.21	15.48	0.38	11.94	0.55	9.85
0.05	24.4	0.22	15.2	0.39	11.79	0.56	9.75
0.06	23.26	0.23	14.93	0.4	11.64	0.57	9.65
0.07	22.29	0.24	14.67	0.41	11.5	0.58	9.55
0.08	21.46	0.25	14.43	0.42	11.36	0.59	9.46
0.09	20.72	0.26	14.19	0.43	11.23	0.6	9.37
0.1	20.07	0.27	13.96	0.44	11.1	0.61	9.28
0.11	19.47	0.28	13.74	0.45	10.97	0.62	9.19
0.12	18.93	0.29	13.53	0.46	10.84	0.63	9.11
0.13	18.44	0.3	13.33	0.47	10.72	0.64	9.02
0.14	17.98	0.31	13.14	0.48	10.6	0.65	8.94
0.15	17.55	0.32	12.95	0.49	10.48	0.66	8.86
0.16	17.15	0.33	12.77	0.5	10.37	0.67	8.78
0.17	16.78	0.34	12.59	0.51	10.26	0.68	8.7

续表

α	Φ	α	Φ	α	Φ	α	Φ
0.69	8.63	0.77	8.06	0.85	7.57	0.93	7.14
0.7	8.55	0.78	8	0.86	7.51	0.94	7.08
0.71	8.48	0.79	7.94	0.87	7.46	0.95	7.03
0.72	8.41	0.8	7.87	0.88	7.4	0.96	6.98
0.73	8.34	0.81	7.81	0.89	7.35	0.97	6.94
0.74	8.27	0.82	7.75	0.9	7.29	0.98	6.89
0.75	8.2	0.83	7.69	0.91	7.24	0.99	6.84
0.76	8.13	0.84	7.63	0.92	7.19	1	6.79

Φ 也可以更为精准地表示为

$$\Phi = \frac{4\pi}{3} \left[\sqrt{a^2 + 1} \left(K + \frac{1 - a^2}{a^2} E \right) - \frac{1}{a^2} \right] \quad (3-42)$$

其中, K 和 E 是具有模数 k 的第一种和第二种全椭圆积分。 k 可以表示为

$$k = \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (3-43)$$

当 α 比较大时, 即对应的螺线管为长螺线管时, Φ 可以表示为

$$\Phi = \frac{\pi^2}{\alpha} \left[1 - \frac{4}{3\pi} \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{8} \frac{1}{\alpha^2} - \frac{1}{64} \frac{1}{\alpha^4} + \dots + (-1)^{n+1} \frac{(3 \times 5 \times \dots \times 8n - 3)^2}{2^{2n} n! (n+1)!} \frac{2n-1}{\alpha^{2n}} + \dots \right] \quad (3-44)$$

当 α 比较小时, 即对应的螺线管为短螺线管时, Φ 可以表示为

$$\Phi = 2\pi \left[\left(1 + \frac{\alpha^2}{8} - \frac{\alpha^4}{64} + \dots \right) \ln \frac{4}{\alpha} - \frac{1}{2} + \frac{\alpha^2}{32} + \frac{\alpha^4}{96} + \dots \right] \quad (3-45)$$

假设螺线管的线圈直径 $d = 20\text{cm}$, 长度 $a = 25\text{cm}$, 匝数 $N = 50$, 那么利用式(3-41)和表 3-1, 在假设的情况下, $\alpha = 1.25$, $1/\alpha = 0.8$, 从表 3-3 中可以得到 $\Phi = 5.8$, 那么可以得到

$$L = \frac{1}{4\pi} \times 4\pi \times 10^{-7} \times 50^2 \times 0.2 \times 5.8 = 2.9 \times 10^{-4} \text{H}$$

2. 平面型螺旋线圈电感

如图 3-16 所示, 平面型圆形螺旋天线, 天线绕线截面为圆形, 天线绕线截面半径远小于绕线长度。

平面型圆形螺旋天线电感值可以表示为

$$L = \frac{\mu_0}{8\pi} N^2 d \Phi \quad (3-46)$$

其中, N 为线圈匝数; d 为线圈的平均直径, 即 $d = (d_1 + d_2)/2$; Φ 为由比值 $\rho = \frac{r}{d}$ 决定的数值, 如表 3-3 所示。

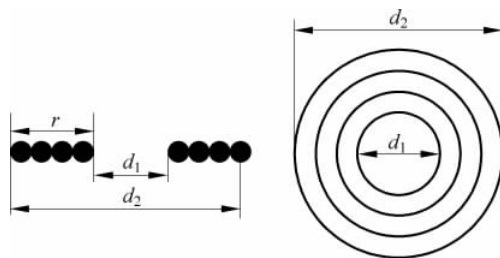


图 3-16 平面圆形螺旋天线

表 3-3 用于计算圆形平面线圈电感的 Φ 值

ρ	Φ	ρ	Φ	ρ	Φ	ρ	Φ
0.01	69.008	0.26	28.29	0.51	20.381	0.76	16.235
0.02	60.299	0.27	27.832	0.52	20.165	0.77	16.112
0.03	55.206	0.28	27.392	0.53	19.955	0.78	15.992
0.04	51.595	0.29	26.968	0.54	19.75	0.79	15.874
0.05	48.794	0.3	26.56	0.55	19.55	0.8	15.759
0.06	46.507	0.31	26.166	0.56	19.354	0.81	15.646
0.07	44.574	0.32	25.786	0.57	19.162	0.82	15.536
0.08	42.902	0.33	25.418	0.58	18.976	0.83	15.428
0.09	41.128	0.34	25.063	0.59	18.793	0.84	15.323
0.1	40.111	0.35	24.719	0.6	18.614	0.85	15.22
0.11	39.92	0.36	24.386	0.61	18.44	0.86	15.119
0.12	37.835	0.37	24.063	0.62	18.269	0.87	15.021
0.13	36.838	0.38	23.75	0.63	18.102	0.88	14.925
0.14	35.916	0.39	23.446	0.64	17.939	0.89	14.832
0.15	35.058	0.4	23.15	0.65	17.779	0.9	14.74
0.16	34.258	0.41	22.863	0.66	17.623	0.91	14.65
0.17	33.507	0.42	22.584	0.67	17.47	0.92	14.563
0.18	32.8	0.43	22.313	0.68	17.32	0.93	14.478
0.19	32.132	0.44	22.049	0.69	17.174	0.94	14.394
0.2	31.5	0.45	21.792	0.7	17.032	0.95	14.314
0.21	30.9	0.46	21.541	0.71	16.891	0.96	14.235
0.22	30.33	0.47	21.297	0.72	16.754	0.97	14.158
0.23	29.785	0.48	21.059	0.73	16.62	0.98	14.083
0.24	29.265	0.49	20.827	0.74	16.489	0.99	14.01
0.25	28.767	0.5	20.601	0.75	16.36	1	13.939

当 ρ 是比较小的数值时,电感计算公式可以表示为

$$\Phi = 4\pi \left[\left(1 + \frac{\rho^2}{24} + \frac{11}{2880}\rho^4 + \dots \right) \ln \frac{4}{\rho} - \frac{1}{2} + \frac{43}{288}\rho^2 + \frac{1}{150}\rho^4 + \dots \right] \quad (3-47)$$

当 ρ 是比较大的数值时($\rho > 0.5$),电感计算公式可以表示为

$$\Phi = \frac{(1+\rho)^3}{\rho^2} (1.7424 + 3.29\gamma^3 \ln \gamma - 2.27\gamma^3 + 0.3702\gamma^5 + 0.0826\gamma^7 + 0.0312\gamma^9) \quad (3-48)$$

其中, $\gamma = \frac{1-\rho}{1+\rho}$ 。

假设平面圆形线圈平均直径 $d=50\text{cm}$, 径向尺寸 $r=10\text{cm}$, 线圈匝数 $N=10$, 那么可以从表 3-3 中查得, $\Phi=31.5$, 可以计算到该圆形平面线圈的电感值为

$$L = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{8\pi} \times 10^2 \times 0.5 \times 31.5 = 7.875 \times 10^{-6} \text{H}$$

3. 矩形截面多匝圆形线圈电感

这里所说的矩形截面指导线所绕线圈的截面, 不是指绕制线圈的导线截面, 如图 3-17 所示, 线圈还是采用圆形截面的导线进行绕制。

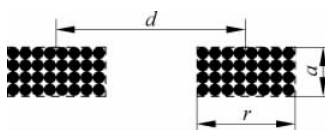


图 3-17 矩形截面圆形多匝线圈

假设矩形截面的多匝线圈是圆形的, 那么其电感可以计算为

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} N^2 d \Phi \quad (3-49)$$

其中, N 为线圈的匝数; d 为线圈平均直径, 计算方法与图 3-16 相同; Φ 为由线圈轴向高度 a 和轴向厚度 r 以及平均直径决定的参数, 如图 3-18 所示。图中横坐标为 r/d 的值, 纵坐标为 a/d 的值。

利用式(3-49)计算矩形截面多匝线圈的电感时, 需要查图 3-18, 在设计计算中比较不方便, 为了简化计算的难度, 可以使用其他的公式计算矩形截面多匝线圈电感

$$L = \frac{0.31 \left(\frac{d}{2} N \right)^2}{3d + 9a + 10r} \mu\text{H} \quad (3-50)$$

注意, 式(3-50)中的尺寸参数均以 cm 为单位。

在特殊的情况下, 如果 $r=a$, 即线圈的截面为正方形, 在这种情况下, 线圈的电感为

$$L = \frac{\mu_0}{8\pi} N^2 d \Phi \quad (3-51)$$

表 3-4 表示正方形条件下的 Φ 值, Φ 是与 $a=a/d$ 相关的值。

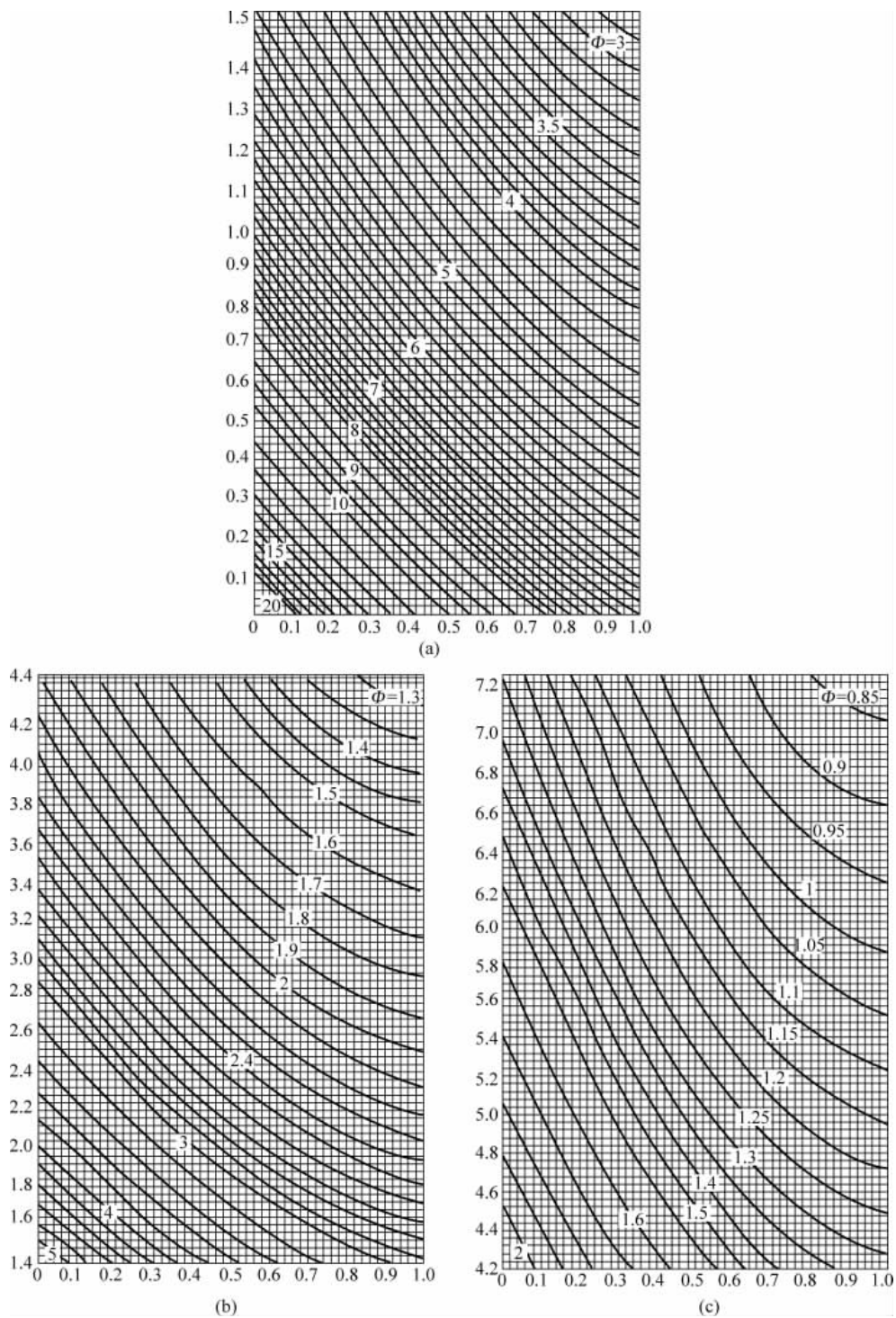


图 3-18 式(3-42)中的 ϕ 值

表 3-4 正方形条件下的 Φ 值

α	Φ	α	Φ	α	Φ	α	Φ
0.01	60.277	0.26	19.844	0.51	12.469	0.76	8.92
0.02	51.57	0.27	19.404	0.52	12.276	0.77	8.82
0.03	46.48	0.28	18.982	0.53	12.09	0.78	8.723
0.04	42.873	0.29	18.577	0.54	11.908	0.79	8.628
0.05	40.078	0.3	18.189	0.55	11.732	0.8	8.535
0.06	37.798	0.31	17.814	0.56	11.559	0.81	8.445
0.07	35.873	0.32	17.454	0.57	11.392	0.82	8.357
0.08	34.208	0.33	17.107	0.58	11.23	0.83	8.271
0.09	32.743	0.34	16.771	0.59	11.072	0.84	8.188
0.1	31.436	0.35	16.448	0.6	10.918	0.85	8.106
0.11	30.256	0.36	16.136	0.61	10.767	0.86	8.027
0.12	29.181	0.37	15.834	0.62	10.62	0.87	7.95
0.13	28.196	0.38	15.542	0.63	10.478	0.88	7.874
0.14	27.286	0.39	15.26	0.64	10.339	0.89	7.801
0.15	26.441	0.4	14.986	0.65	10.203	0.9	7.73
0.16	25.652	0.41	14.721	0.66	10.071	0.91	7.66
0.17	24.916	0.42	14.464	0.67	9.942	0.92	7.592
0.18	24.224	0.43	14.216	0.68	9.816	0.93	7.526
0.19	23.571	0.44	13.974	0.69	9.694	0.94	7.462
0.2	22.954	0.45	13.739	0.7	9.575	0.95	7.4
0.21	22.37	0.46	13.512	0.71	9.459	0.96	7.339
0.22	21.816	0.47	13.291	0.72	9.346	0.97	7.28
0.23	21.288	0.48	13.077	0.73	9.235	0.98	7.222
0.24	20.785	0.49	12.868	0.74	9.123	0.99	7.166
0.25	20.304	0.5	12.666	0.75	9.022	1	7.112

假设线圈的平均直径为 $d=3\text{cm}$, 正方形截面边长 $a=0.9\text{cm}$, 线圈匝数 $N=200$, 那么在这种情况下, 正方形截面的圆形线圈电感为

$$L = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{8\pi} \times 200^2 \times 0.03 \times 18.189 = 1.09 \times 10^{-3} \text{H}$$

4. 矩形截面多匝矩形线圈电感

矩形线圈绕行形成的截面与上文所述的截面相同, 为矩形截面, 而线圈所绕成的形状为矩形, 如图 3-19 所示。图中, 矩形线圈的短边和长边分别用 x 和 y 表示, a 表示线圈的轴向厚度, b 表示线圈绕线的宽度。

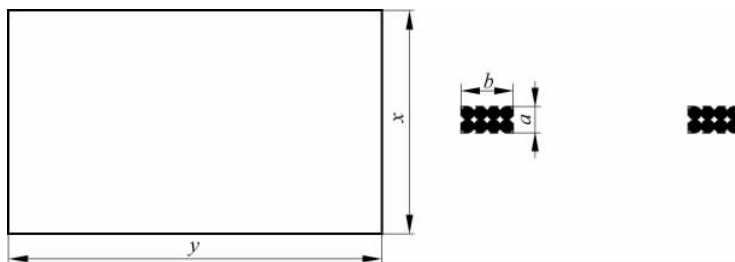


图 3-19 矩形截面多匝矩形线圈

对于这种矩形线圈,其电感可以表示为

$$L = \frac{0.00276[(x+y+2a) \times N]^2}{1.908(x+y+2a) + 9b + 10a} \quad (3-52)$$

在特殊的情况下,假如矩形的长边与短边相等,即线圈的形状为正方形,那么线圈的电感可以表示为

$$L = 0.0004xN^2 \left\{ 2.303 \log_{10} \left(\frac{x}{2(a+b)} \right) + 0.447 \frac{a+b}{x} + 0.726 \right\} \quad (3-53)$$

以上两个公式中尺寸的单位为 cm,电感的计算单位为 μH 。

假设矩形线圈的长边为 6cm,宽边为 4cm,线圈轴向厚度为 0.1cm,线圈绕线宽度为 0.5cm,线圈匝数为 50,那么这个矩形截面的矩形线圈电感量为

$$L = \frac{0.00276[(4+6+0.2) \times 50]^2}{1.908 \times (4+6+0.2) + 9 \times 0.5 + 10 \times 0.1} = 28.76 \mu\text{H}$$

5. 矩形平面盘状线圈电感

图 3-20 为一段短的厚度为 t 的平面导线,其导线宽度为 w ,导线长度为 l ,那么此种导线的电感值为

$$L = 0.002l \left\{ \ln \left(\frac{2l}{w+t} \right) + 0.50049 + \frac{w+t}{3l} \right\} \quad (3-54)$$

以此种矩形截面的平面导线绕制矩形线圈,其形状如图 3-21 所示。

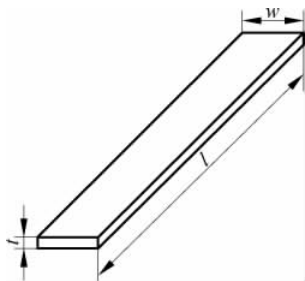


图 3-20 矩形截面平面短导线

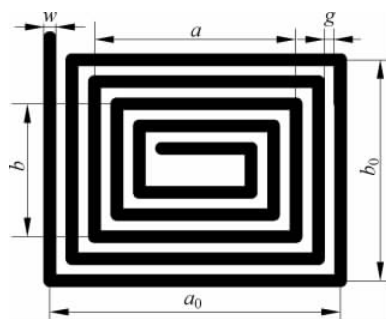


图 3-21 矩形截面的矩形平面线圈

此种矩形截面的矩形线圈电感为

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left\{ a \cdot \ln \left[\frac{2ab}{d \cdot (a + \sqrt{a^2 + b^2})} \right] + b \cdot \ln \left[\frac{2ab}{d \cdot (b + \sqrt{a^2 + b^2})} \right] - 2[a + b - \sqrt{a^2 + b^2}] + \frac{a + b}{4} \right\} N^p \quad (3-55)$$

其中, $a = a_0 - N \cdot (g + w)$, $b = b_0 - N \cdot (g + w)$, $d = \frac{2(t + w)}{\pi}$ 。

a_0 为矩形线圈的长边轮廓尺寸; b_0 为矩形线圈的短边轮廓尺寸; a 为矩形线圈的平均长度; b 为矩形线圈的平均宽度; w 为绕线导线的宽度; g 为绕线平面导线间的间隔; t 为矩形截面导线的高度; N 为矩形线圈的绕线匝数。

在理想的情况下, $p = 2$, 但是根据实际的线圈加工工艺不同, 对于矩形截面的平面线圈 p 的值一般在 1.75~1.85 之间。当然, 如果线圈是由其他工艺制作而成, 如导电油墨印刷工艺等, p 值也会发生变化。通常情况下, 随着绕线平面导线间的间隔 g 的减小, p 值可以取较大的值; 反之则取较小的值。

6. 圆形平面盘状线圈电感

以图 3-20 所示的矩形截面平面导线绕制圆形线圈, 如图 3-22 所示。

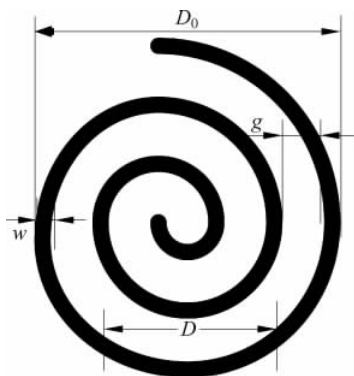


图 3-22 矩形截面的圆形平面线圈

此种矩形截面的圆形平面线圈电感为

$$L = 2l \left[\ln \frac{l}{d} - 1.07 \right] N^p \quad (3-56)$$

其中, $l = \pi D$ 为线圈的有效周长, $D = D_0 - N(g + w)$, $d = \frac{2(w + g)}{\pi}$ 。 D_0 为圆形线圈的轮廓直径; D 为圆形线圈的有效直径; w 为绕线导线的宽度; g 为绕线平面导线间的间隔。

与矩形平面线圈类似, p 值在理想的情况下也为 2, 但是根据不同的加工工艺, p 值会有所不同, 对于采用蚀刻工艺的平面天线而言, 其 p 值的选择范围与矩形线圈相同, 取值方法也类似。

3.5 带匹配电路的线圈天线

在工程设计中,由于受到标签厚度、尺寸、芯片电容值、加工工艺、标签使用时间和环境等影响,往往利用直接绕线的方式不能设计和制造出合乎要求的电子标签,这个时候就需要使用带有匹配电路的线圈天线,如图 3-23 所示。

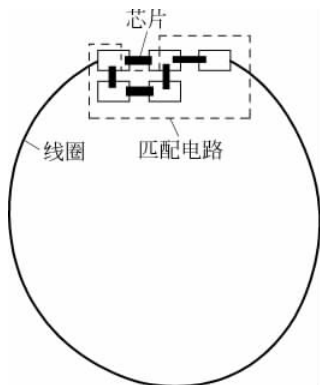


图 3-23 带匹配电路的线圈天线

在图 3-23 中线圈是由一匝或者几匝线圈绕制而成的,其电感量无法在相应频段上与电子标签芯片电容组成谐振回路,此时在芯片外围加上辅助的匹配电路,增加回路的电容值,这样就可以在电感量较小的情况下,在指定的频率点达到谐振。带有匹配电路的谐振回路等效电路如图 3-24 所示。

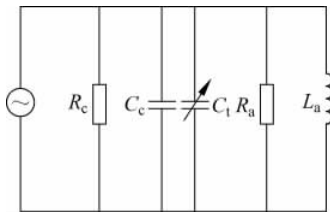


图 3-24 带匹配电路的线圈天线等效电路

图 3-24 中的 C_1 为匹配电路的电容值,其根据实际的需要不同可以取不同的值。加入匹配电路后,芯片等效的总电容值为

$$C_{\text{tot}} = C_c + C_1 \quad (3-57)$$

那么线圈天线的标签谐振频率可以表示为

$$f = \frac{1}{\sqrt{L_a C_{\text{tot}}}} \quad (3-58)$$

匹配电路中外加的电容值,通常是通过将电容并联到芯片和线圈两端的方式实现的,在

特殊的情况下,也可以使用电感串联到线圈上,但是这种方法在实际的工程中比较少。

由式(3-3)可知,绕线线圈中线圈匝数的减少并不会对回路的磁通量造成影响,因此单匝或者几匝导线绕制的带匹配电路的线圈并不会影响到电子标签的实际识读性能,但是可以带来低剖面、加工方便等好处。

单匝或者多匝线圈可以通过第 3.3 节的方法计算得到。

3.6 多端口线圈天线

应用于线圈天线的电子标签芯片其端口的电容往往根据芯片的不同而不同,并且电容值差别较大,同一个线圈天线很难适应不同厂家和不同种类电子标签芯片。因此为了使得线圈天线的适应性更强,出现了在一个线圈天线上设置多个端口的天线,图 3-25 表示了这种天线的结构。

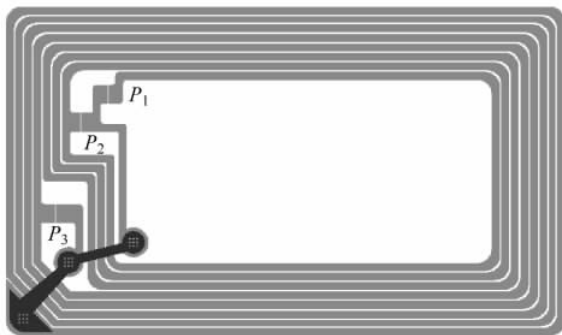


图 3-25 多端口线圈天线示例

单纯从构成结构上来说,多端口线圈天线与前文所述的矩形平面盘状线圈是完全相同的,都是由矩形截面的金属导线、基材、过桥组成,并且其各个端口对应的线圈电感计算方法也完全相同。不同的是在线圈天线上同时存在不同的端口 P_1 、 P_2 、 P_3 ,并且各个端口之间存在与线圈末端连接的过桥。

多端口线圈天线从等效电路的角度出发,可以等效为在同一个电感的不同位置输出端口的电路,如图 3-26 所示。

从图 3-26 可以看出,整个多端口线圈天线可以等效为一个电感量为 L 的大电感,电感上存在三个不同的端口输出位置,从位置 1 输出端口 P_1 ,其电感量可以表示为 L_1 ,其中 L_1 与等效电路的总电感量 L 相同,以此类推,从不同位置可以输出端口 P_2 和 P_3 ,其电感量分别为 L_2 和 L_3 ,其中各部分与总电感量 L 的关系可以表示为

$$\begin{cases} L_1 = L \\ L_2 = mL \\ L_3 = nL \end{cases} \quad (3-59)$$

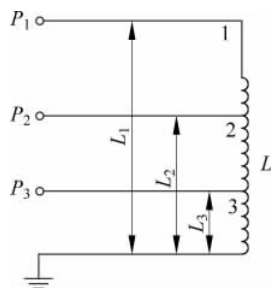


图 3-26 多端口线圈天线等效电路

其中, m, n 表示 P_2 和 P_3 端口在总电感上的输出系数, m, n 均小于 1, 并且存在 $m > n$ 的关系。

由于各个端口的电感量存在如式(3-59)所述的关系, 因此在各个不同的端口所放置的芯片端口电容量也是不同的, 根据谐振要求, 在各个不同端口放置芯片电容量存在以下关系, 即

$$C_1 < C_2 < C_3 \quad (3-60)$$

因此在实际的多端口线圈天线设计中, 需要根据实际的芯片电容量的大小来确定各个端口的电感量, 并且依据电感量计算出线圈天线上放置各个端口的位置。通常来说, 端口位置越靠近线圈的中心, 那么对应的电感量就越大, 可放置芯片的电容就越小。

3.7 线圈的工程设计

在实际的工程设计中, 线圈天线的设计往往是需要对电感计算进行反运算, 即在一定的约束条件下, 根据可知的电感值, 计算线圈的线径、绕线匝数等参数。因为在无源电子标签天线设计中, 标签的工作频率一般在 125kHz 和 13.56MHz 附近, 实际金属层的尺寸远远小于趋肤深度的情况, 因此在计算线圈参数的时候基本不考虑频率对于电感的影响。线圈天线根据设计方法的不同, 其设计步骤也会不同, 对于不带匹配电路的纯靠导线绕线形成的天线, 其基本设计步骤如下:

- (1) 确定电子标签所用芯片的种类, 查找相关芯片的电容值;
- (2) 确定标签的工作频率;
- (3) 根据电容值和工作频率计算线圈天线谐振所需的电感值;
- (4) 根据电感值在确定的约束条件下计算电感所需线圈参数;
- (5) 综合考虑天线 Q 值、价格、工艺复杂程度等问题, 选择合适的电感参数;
- (6) 对根据计算得到的线圈天线进行电感、电阻和 Q 值测量;
- (7) 根据计算值制作相应的线圈, 再根据实际的加工工艺, 将芯片与线圈天线电气连接, 测试线圈电子标签的实际识读性能;
- (8) 根据实际测试的电子标签性能, 调整线圈的电感值, 并且重复步骤(3)~步骤(7),

反复多次,即可得到最优的线圈天线。

对于带有匹配电路的线圈天线,其设计步骤如下:

- (1) 确定电子标签所用芯片的种类,查找相关芯片的电容值;
- (2) 确定标签的工作频率;
- (3) 确定标签天线设计的约束条件;
- (4) 根据约束条件设计简单的带有匹配电路的绕线回路;
- (5) 根据加工工艺和方法,将标签芯片与线圈天线电气连接;
- (6) 使用测试设备测试电子标签的谐振频率;
- (7) 调整回路的匹配电路参数;
- (8) 使用标签性能测试设备,如读写器等测试标签的实际识读性能;
- (9) 根据实际测试的电子标签性能,调整匹配电路的参数,并重复步骤(6)~步骤(8),反复多次,即可得到最优的带有匹配电路的标签天线。

3.7.1 线圈型天线工程设计方法

线圈型电子标签中芯片和天线的等效关系如图 3-7 所示,这是比较理想的情况,即芯片和线圈是直接连接的。在实际的工程应用中,由于芯片尺寸非常小,并且由于线圈天线本身材料和加工工艺的原因,芯片几乎是不可能直接与线圈天线直接连接在一起的,因此在实际的工程设计中,需要根据具体的工艺和场景,在等效电路中增加一定的电容和电阻等参数,如图 3-27 所示。

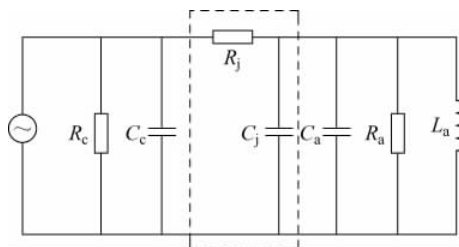


图 3-27 实际电子标签等效电路

与图 3-7 相比,图 3-27 在芯片与线圈天线之间增加了 R_j 与 C_j ,这是由于芯片与线圈天线在连接的过程中产生的插入电阻和电容。那么在实际的工程设计中,由于线圈存在过桥等连接工艺,因此在线圈天线中增加了由此带来的 C_a ,由于 C_a 值与芯片本身的端口电容值相当,因此在实际的计算中,必须考虑这部分电容。那么在实际的计算中,用于计算电感量的电容值为

$$C_t = C_c + C_j + C_a \quad (3-61)$$

如果忽略到比较小的 R_j 值,那么在实际的线圈中,电阻值可以表示为

$$R_t = \frac{R_c \cdot R_a}{R_c + R_a} \quad (3-62)$$

如图 3-28 所示,天线本身的电容 C_a 由天线端口的间隙电容 C_i 、线圈绕线导线之间的耦合电容 C_m 和线圈桥接的过桥电容 C_b 构成

$$C_a = C_i + C_m + C_b \quad (3-63)$$

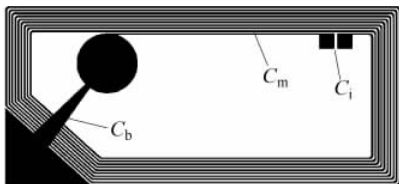


图 3-28 线圈电感的电容构成

在实际的计算中,天线端口间隙电容 C_i 一般是比较小的,在计算时,可以忽略。线圈绕线导线之间的电容根据绕线材质和方法不同也会有不同,通常情况下采用金属导线绕的平面线圈,其电容 C_i 为 $3\sim 7\text{pF}$ 之间,采用蚀刻工艺的平面线圈,其电容 C_i 值一般在 $1\sim 4\text{pF}$ 之间。过桥电容根据过桥方法和材质不同,其值在 $1\sim 5\text{pF}$ 之间变化。

芯片与天线之间的插入电容值也随着芯片与天线之间的连接方式不同而不同,其值可以在 $0\sim 3\text{pF}$ 之间取值,根据不同的工艺和生产条件,插入电容值也有可能不同。

根据这些电容值,利用式(3-1)就可以求得线圈天线所需要的电感值。

在求得相应的电感值之后,可以看到实际在工程设计中对于线圈有哪些约束,例如:

- (1) 线圈形状约束;
- (2) 线圈轮廓尺寸约束;
- (3) 线圈内径约束;
- (4) 绕线线径约束;
- (5) 识读距离约束;
- (6) 绕线导线种类约束;
- (7) 芯片与线圈连接方式约束;
- (8) 标签成本与材料成本约束;
- (9) 标签工作时间和工作条件约束;
- (10) 金属环境约束。

在实际的工程设计中,可能还有更多更详细的约束,这个需要针对不同的应用做不同的分析。

在充分考虑这些约束之后,根据本章 3.3 节所陈述的计算电感的方法,以及我们需要的线圈形式,再加上上述的约束条件,就可以通过电感值反向计算得到设计线圈所需要的特定参数。例如,在已知电感值的情况下,如果限定了线圈的外径和内径,就可以计算圆形线圈所需要的匝数,在已知方形平面盘式线圈的轮廓长宽尺寸、线宽尺寸和缝隙宽度尺寸之后,就可以计算天线的匝数,通过匝数也可以看出在限定的尺寸范围内是否有可能绕出需要的电感,并且可以交付生产。

在充分考虑这些约束条件的情况下,也需要考虑 Q 值对于电子标签性能的影响,前文已经分析,在 Q 值较高的情况下,消耗在线圈本身的能量会较少,这样有利于读写器和电子标签的信号被充分利用。因此在选择线圈的绕线导线时,尽量选择界面面积较大的材料和工艺,这样会减小导体本身的电阻,可以提升线圈的 Q 值。但是在实际的工程设计中, Q 值也要结合标签成本、加工难易程度等因素进行综合考虑,以免盲目追求高 Q 值导致标签的生产工艺过于复杂,并且导致生产成本过高。

在计算得到可行的线圈天线尺寸和匝数之后,就可以对线圈天线进行样品制作,在样品制作完成之后,可以利用 LCR 表对线圈的电感值进行测量。

在电感值达到设计要求之后,可以按照要求的工艺方法将芯片与天线进行电连接,之后可以根据要求测试标签的性能,可以利用频谱分析仪或者矢量网络分析仪测试标签的谐振情况,利用这些仪器进行测量时,需要有相应适合的测试探头,测试探头可以采用同轴线或者其他材料进行制作,在有条件的情况下,可以利用专门的标签测试设备来测试标签的灵敏度和谐振情况。

最直接的标签测试方法是使用指定的读写器测试,通常可以测试标签的识读距离、识读范围等参数,以确保标签在实际的项目中能够有效使用。根据实际测试的参数,可以调整标签线圈的尺寸、匝数等参数,以期得到最适合的标签性能。

3.7.2 带有匹配电路的标签线圈天线设计方法

通常情况下,首先需要确认设计电子标签线圈的限制条件,如安装电子标签的位置、尺寸、材料等,这些限制条件会直接决定能在多大的范围内设计电子标签线圈,能在哪些位置留下匹配电路的空间。在确认了相关的限制条件之后,就可以在制作电子标签线圈的材料上根据工艺要求设计相应的单匝或多匝线圈,同时加上匹配电路,通常此时设计的线圈都是按照可使用的最大轮廓尺寸进行设计的,并且需要避开相应的可能干涉位置。在这种情况下,由于线圈只有一匝或者几匝,可以忽略线圈天线本身带来的电容变化。

带有匹配电路的线圈首先应当将芯片与线圈电连接在一起,保证线圈和标签的两端能够形成完整的回路,即在不加入匹配电路的时候,芯片和线圈也形成了一个完整的电子标签结构。在工程上,采用带有匹配电路的线圈,通常芯片都是采用绑定工艺与线圈连接在一起,在这种情况下,由连接工艺造成的芯片电容变化也可以忽略不计。

在芯片与线圈天线电连接好之后,可以通过频谱仪或者矢量网络分析仪测试标签的谐振频率,通常情况下,在未加匹配回路的时候,标签的谐振频率比需要的值会偏高很多。此时可以通过并联电容的方式在匹配电路上增加相应的器件,将标签的谐振频率调整到需要的频点附近。在这种测试中,需要使用到特定的测试探头,通过使用同轴线探头或者其他线缆的探头都可以做到测试标签谐振频率的作用。

通过探头测试标签的谐振频率,如果标签的谐振频率相比工作频率偏高,则需要继续加大匹配电路中的电容值 C_1 ,相反,如果标签的谐振频率相比工作频率偏低,那么则需要减小匹配电路中的电容值 C_1 。反复多次就可以得到适合对应使用场合的最优线圈天线和标签。

3.7.3 线圈型标签天线设计注意事项

线圈型电子标签天线在实际的设计中除了要注意基础理论计算之外,还有其他的一些工程上的问题需要注意。

(1) 低频和高频标签对于使用环境的介质材料并不敏感,即材料本身的介电常数不会对标签的谐振频率和能量损耗产生重大影响,但是在特定的情况下,为了能够提供性能最优的电子标签,在对标签线圈天线进行设计的时候,最好还是将相应的使用环境模拟出来,将线圈天线和标签放置在对应的环境中进行测试,以确保标签的频率不会发生较严重的偏移。

(2) 值得注意的是,在大量的工程实践中,线圈的使用环境有可能是金属表面,虽然在比较低的频段金属导体的趋肤深度是比较大的,但是其对于线圈天线的性能影响还是非常大的。在实际的使用中,对于较薄的 Inlay 类电子标签,即标签天线采用的是平面盘式线圈天线设计的情况,往往需要在金属表面或者电子标签表面粘贴相应频段的磁性吸波材料,以起到隔离金属表面和电子标签的作用。由于线圈电子标签磁耦合的工作特性,采用磁性吸波材料可以有效减少金属标签对电子标签的作用。

(3) 低频段的电磁波,如 125kHz,由于其趋肤深度比较大,因此相应频段的标签在水、生物、人体等有机材质和物体上可以得到广泛使用。

(4) 标签天线与电子标签芯片之间的电连接方法通常包括焊接、绑定和倒封装等,在实际的工程实际中,需要根据标签实际的使用温湿度环境、使用年限、是否存在弯折等情况选择可行的电连接方式,同时,一旦选择了电连接方式,基本也就确定了芯片种类和相应的线圈形式。

(5) 采用圆截面金属导线绕制线圈的时候,需要重点考虑材料成本对于标签天线的影 响,线径较大或者较小的金属导线都有可能 导致标签天线的成本提升很多,在性能不能得到有效提升的情况下,明显地提高了标签天线的材料成本和制造成本。因此在充分考虑 Q 值情况下,要在性能和成本之间取折中。