

第3章

RFID中的天线技术

在无线通信领域,天线是不可缺少的组成部分。广播、通信、雷达、导航、遥测和遥控等都是利用无线电波来传递信息的。RFID也是利用无线电波来传递信息,当信息通过电磁波在空间传播时,电磁波的产生和接收要通过天线来完成。此外,在用电磁波传送能量方面,非信号的能量辐射也需要通过天线来完成。

天线技术对RFID系统十分重要,是决定RFID系统性能的关键部件。RFID天线可以分为低频、高频、超高频及微波天线,每一频段天线又分为电子标签天线和读写器天线,不同频段天线的结构、工作原理、设计方法和应用方式有很大差异,导致RFID天线种类繁多、应用各异。在低频和高频频段,读写器与电子标签基本都采用线圈天线。微波RFID天线形式多样,可以采用对称振子天线、微带天线、阵列天线和宽带天线等,同时微波RFID的电子标签较小,天线要求低造价、小型化,因此微波RFID出现了许多天线制作的新技术。

为适应世界范围电子标签的快速应用和不断发展,需要提高RFID天线的设计效率,降低RFID天线的制造成本,因此RFID天线大量使用仿真软件进行设计,并采用了多种制作工艺。天线仿真软件功能强大,已经成为天线技术的一个重要手段,天线仿真和测试相结合,可以基本满足RFID天线设计的需要。RFID天线制作工艺主要有线圈绕制法、蚀刻法和印刷法,这些工艺既有传统的制作方法,也有近年来发展起来的新技术,天线制作的新工艺可使RFID天线制作成本大大降低,走出应用成本瓶颈,并促进RFID技术进一步发展。

3.1 天线概述

由发射机产生的高频振荡能量,经过传输线(在天线领域,传输线也称为馈线)传送到发射天线,然后由发射天线变为电磁波能量,向预定方向辐射。电磁波通过传播媒质到达接收天线后,接收天线将接收到的电磁波能量转变为导行电磁波,然后通过馈线送到接收机,完成无线电波传输的过程。天线在上述无线电波传输的过程中,是无线通信系统的第一个和最后一个器件,如图3-1所示。

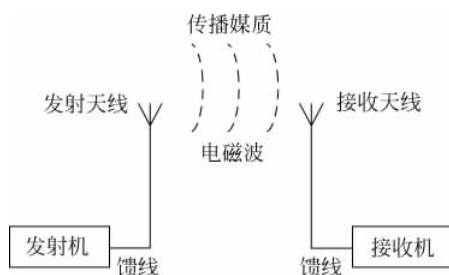


图 3-1 无线通信系统框图

3.1.1 天线的定义

凡是利用电磁波来传递信息和能量的,都依靠天线来进行工作,天线是用来发射或接收无线电波的装置和部件。

对于天线,人们关心的主要是它的辐射场。任何一个天线都有一定的方向性、输入阻抗、带宽、功率容量、效率等,由于应用领域众多,对天线的要求是多种多样的。因此,天线种类繁多,功能各异。

天线对不同方向的辐射或接收效果并不一样,带有方向性。以发射天线为例,天线辐射的能量在某些方向强、在某些方向弱、在某些方向为零。设计天线时天线的方向性是要考虑的主要因素之一。

天线可以视为传输线的终端器件。天线作为一个单端口元件,要求与相连接的馈线阻抗匹配。天线的馈线上要尽可能传输行波,使从馈线入射到天线上的能量不被天线反射,尽可能多地辐射出去。天线与馈线、接收机、发射机的匹配或最佳贯通,是天线工程最关心的问题之一。

3.1.2 天线的分类

天线的种类很多,可以按照不同的方式进行分类。

1. 按照波段分类

按天线适用的波段来分类,天线可以分为长波天线、中波天线、短波天线、超短波天线和微波天线等。

2. 按照结构分类

按天线的结构来分类,天线可以分为线状天线、面状天线、缝隙天线和微带天线等。

(1) 线状天线。

线状天线是指线半径远小于线本身的长度和波长,且载有高频电流的金属导线。线状天线随处可见,如在房顶上、船上、汽车上、飞机上等。线状天线有直线形、环形、螺旋形等多种形状。

(2) 面状天线。

面状天线由尺寸大于波长的金属面构成,主要用于微波波段,形状可以是喇叭或抛物面状等。

(3) 缝隙天线。

缝隙天线是金属面上的线状长槽,长槽的横向尺寸远小于波长及纵向尺寸,长槽上有横向高频电场。

(4) 微带天线。

微带天线由一个金属贴片和一个金属接地板构成。金属贴片可以有各种形状,其中长方形和圆形是最常见的。金属贴片与金属接地板距离很近,使微带天线侧面很薄,适用于平面和非平面结构,并且可以用印刷电路技术来制造。

3. 按照用途分类

按天线的用途来分类,天线可以分为广播天线、通信天线、雷达天线、导航天线和 RFID 天线等。

3.1.3 天线的研究方法

电磁场随时间变化是产生辐射的原因。频率低时,辐射较微弱;频率越高,辐射就越强。天线的结构应该使电场和磁场分布在同一空间,这样可以使两者能量直接转化,电磁能量可以向远处辐射。

1. 叠加原理

天线的辐射符合叠加原理。

(1) 线天线。

线天线首先求出元电流(或称为电基本振子)的辐射场,然后找出线天线上的电流分布,线天线的辐射是元电流辐射的线积分。

(2) 面天线。

面天线将辐射问题分为内问题和外问题,由已知激励源求天线封闭面上的场为内问题,由封闭面上的场求外部空间辐射场为外问题。在求天线的外问题时,辐射场也要用到叠加原理。

2. 研究天线的 3 个方法

研究天线辐射的常用方法有如下 3 种。

(1) 解析解。

天线的辐射性能是宏观电磁场问题,严格的分析方法是找出解析解,解析解是满足边界条件的麦克斯韦方程解。

(2) 数值解。

在实际天线的计算中,严格的求解会出现数学上的困难,有时甚至无法求出解析解,所以天线实际上都是采用数值近似解法。常用的天线数值解法有矩量法、有限元法和时域有限差分法等。

(3) 仿真软件。

目前天线的设计与计算广泛采用仿真软件,现在国际上比较流行的电磁三维仿真软件有 Ansoft 公司的 HFSS(High Frequency Structure Simulator)和 CST 公司的 MWS(Microwave Studio),这些软件可以求解任意三维射频、微波器件的电磁场分布,并可以直接得到辐射场和天线方向图,仿真结果与实测结果具备很好的一致性,是高效、可靠的天线设计方法。

3.1.4 RFID 天线的应用及设计现状

RFID 在不同的应用环境中使用不同的工作频段,需要采用不同的天线通信技术,来实

现数据的无线交换。按照现在 RFID 系统的工作频段,天线可以分为低频 LF、高频 HF、超高频 UHF 及微波天线,不同频段天线的工作原理不同,使得不同天线的设计方法也有本质的不同。在 RFID 系统中,天线分为电子标签天线和读写器天线,这两种天线按方向性可分为全向天线和定向天线等;按外形可分为线状天线和面状天线等;按结构和形式可分为环形天线、偶极天线、双偶极天线、阵列天线、八木天线、微带天线和螺旋天线等。在低频和高频频段,RFID 系统主要采用环形天线,用以完成能量和数据的电感耦合;在 433MHz、800/900MHz、2.45GHz 和 5.8GHz 的微波频段,RFID 系统可以采用的天线形式多样,用以完成不同任务。

1. RFID 天线的应用现状

影响 RFID 天线应用性能的参数主要有天线类型、尺寸结构、材料特性、成本价格、工作频率、频带宽度、极化方向、方向性、增益、波瓣宽度、阻抗问题和环境影响等,RFID 天线的应用需要对上述参数加以权衡。

1) RFID 天线应用的一般要求

(1) 电子标签天线。

一般来讲,RFID 电子标签天线需要满足如下条件。

- ① RFID 天线必须足够小,以至于能够附着到需要的物品上。
- ② RFID 天线必须与电子标签有机地结合成一体,或贴在表面,或嵌入到物体内部。
- ③ RFID 天线的读取距离依赖天线的方向性,一些应用需要标签具备特定的方向性,例如有全向或半球覆盖的方向性,以满足零售商品跟踪等的需要。
- ④ RFID 天线提供最大可能的信号给多种标签的芯片。
- ⑤ 无论物品在什么方向,RFID 天线的极化都能与读写器的询问信号相匹配。
- ⑥ RFID 天线具有应用的灵活性。电子标签可能被用在高速的传输带上,此时有多普勒频移,天线的频率和带宽要不影响 RFID 工作。电子标签在读写器读取区域的时间很少,要求有很高的读取速率,所以 RFID 系统必须保证标签识别的快速无误。
- ⑦ RFID 天线具有应用的可靠性。RFID 标签必须可靠,并保证因温度、湿度、压力和标签插入、印刷和层压处理中的存活率。
- ⑧ RFID 天线的频率和频带。频率和频带要满足技术标准,标签期望的工作频率带宽依赖于标签使用地的规定。
- ⑨ RFID 天线具有鲁棒性。
- ⑩ RFID 天线非常便宜。RFID 标签天线必须是低成本,这约束了天线结构和根据结构使用的材料。标签天线多采用铜、铝或银油墨。

(2) 读写器天线。

读写器天线既可以与读写器集成在一起,也可以采用分离式。对于远距离系统,天线和读写器采取分离式结构,并通过阻抗匹配的同轴电缆连接到一起。

读写器天线设计要求低剖面、小型化。读写器由于结构、安装和使用环境等变化多样,读写器产品朝着小型化甚至超小型化发展。

读写器天线设计要求多频段覆盖。

对于分离式读写器,还将涉及天线阵的设计问题。

目前国际上已经开始研究读写器应用的智能波束扫描天线阵。

2) RFID 天线的极化

不同的 RFID 系统采用的天线极化方式不同。有些应用可以采用线极化。例如,在流水线上,这时电子标签的位置基本上是固定不变的,电子标签的天线可以采用线极化方式。在大多数场合,由于电子标签的方位是不可知的,大部分 RFID 系统采用圆极化天线,以使 RFID 系统对电子标签的方位敏感性降低。

3) RFID 天线的方向性

RFID 系统的工作距离,主要与读写器给电子标签的供电有关。随着低功耗电子标签芯片技术的发展,电子标签的工作电压不断降低,所需功耗很小,这使得进一步增大系统工作距离的潜能转移到天线上,这就要求有方向性较强的天线。

如果天线波瓣宽度越窄,天线的方向性越好,天线的增益越大,天线作用的距离越远,抗干扰能力越强,但同时天线的覆盖范围也就越小。

4) RFID 天线的阻抗问题

为了以最大功率传输,芯片的输入阻抗必须和天线的输出阻抗匹配。几十年来,天线设计多采用 50Ω 或 75Ω 的阻抗匹配,但是可能还有其他情况。例如,一个缝隙天线可以设计几百欧姆的阻抗;一个折叠偶极子的阻抗可以是一个标准半波偶极子阻抗的几倍;印刷贴片天线的引出点能够提供 $40\sim 100\Omega$ 的阻抗范围。

5) RFID 的环境影响

电子标签天线的特性,受所标识物体的形状和电参数影响。例如,金属对电磁波有衰减作用,金属表面对电磁波有反射作用,弹性衬底会造成天线变形等,这些影响在天线设计与应用中必须加以解决。以在金属物体表面使用天线为例,目前有价值的解决方案有两个,一个是从天线的形式出发,采用微带贴片天线或倒 F 天线等;另一个是采用双层介质、介质覆盖或电磁带隙等。

2. RFID 天线的设计现状

在 RFID 系统中,天线分为电子标签天线和读写器天线,这两种天线的设计要求和面临的技术问题是不同的。

1) RFID 电子标签天线的设计

电子标签天线的设计目标是传输最大的能量进出标签芯片,需要仔细设计天线和自由空间的匹配,以及天线与标签芯片的匹配。当工作频率增加到微波波段,天线与电子标签芯片之间的匹配问题变得更加严峻。一直以来,电子标签天线的开发是基于 50Ω 或者 75Ω 输入阻抗。而在 RFID 应用中,芯片的输入阻抗可能是任意值,并且很难在工作状态下准确测试,缺少准确的参数,天线的设计难以达到最佳。

电子标签天线的设计还面临许多其他难题,如相应的小尺寸要求,低成本要求,所标识物体的形状及物理特性要求,电子标签到贴标签物体的距离要求,贴标签物体的介电常数要求,金属表面的反射要求,局部结构对辐射模式的影响要求等,这些都影响电子标签天线的特性,都是电子标签设计面临的问题。

2) RFID 读写器天线的设计

对于近距离 RFID 系统(如 13.56MHz 小于 10cm 的识别系统),天线一般和读写器集

成在一起；对于远距离 RFID 系统(如 UHF 频段大于 3m 的识别系统)，天线和读写器常采取分离式结构，并通过阻抗匹配的同轴电缆将读写器和天线连接到一起。读写器由于结构、安装和使用环境等变化多样，并且读写器产品朝着小型化甚至超小型化发展，使得读写器天线的设计面临新的挑战。

读写器天线设计要求低剖面、小型化以及多频段覆盖。对于分离式读写器，还将涉及天线阵的设计问题，小型化带来的低效率、低增益问题等，这些目前是国内外共同关注的研究课题。目前已经开始研究读写器应用的智能波束扫描天线阵，读写器可以按照一定的处理顺序，通过智能天线使系统能够感知天线覆盖区域的电子标签，增大系统覆盖范围，使读写器能够判定目标的方位、速度和方向信息，具有空间感应能力。

3) RFID 天线的设计步骤

RFID 电子标签天线的性能，很大程度依赖于芯片的复数阻抗，复数阻抗是随频率变换的，因此天线尺寸和工作频率限制了最大可达到的增益和带宽，为获得最佳的标签性能，需要在设计时做折中，以满足设计要求。在天线的设计步骤中，电子标签的读取范围必须严密监控，在标签构成发生变更或不同材料不同频率的天线进行性能优化时，通常采用可调天线设计，以满足设计允许的偏差。

设计 RFID 天线时，首先选定应用的种类，确定电子标签天线的需求参数；然后根据电子标签天线的参数，确定天线采用的材料，并确定了电子标签天线的结构和 ASIC 封装后的阻抗；最后采用优化的方式，使 ASIC 封装后的阻抗与天线匹配，综合仿真天线的其他参数，让天线满足技术指标，并用网络分析仪检测各项指标。RFID 电子标签天线的设计步骤如图 3-2 所示。

很多天线因为使用环境复杂，使得 RFID 天线的解析方法也很复杂，天线通常采用电磁模型和仿真工具来分析。天线典型的电磁模型分析方法为有限元法 FEM、矩量法 MOM 和时域有限差分法 FDTD 等。仿真工具对天线的设计非常重要，是一种快速有效的天线设计工具，目前在天线技术中使用越来越多。典型的天线设计方法，首先是天线模型化，然后将模型仿真，在仿真中监测天线射程、天线增益和天线阻抗等，并采用优化的方法进一步调整设计，最后对天线加工并测量，直到满足要求。

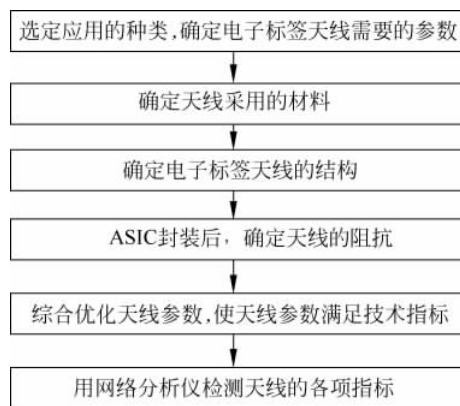


图 3-2 电子标签天线设计的步骤

3.2 低频和高频 RFID 天线技术

在低频和高频频段，读写器与电子标签基本都采用线圈天线，线圈之间存在互感，使一个线圈的能量可以耦合到另一个线圈，因此读写器天线与电子标签天线之间采用电感耦合的方式工作。读写器天线与电子标签天线是近场耦合，电子标签处于读写器的近区，当超出上述范围时，近场耦合便失去作用，开始过渡到远距离的电磁场。当电子标签逐渐远离读写器，处于读写器的远区时，电磁场将摆脱天线，并作为电磁波进入空间。本节所讨论的低频

和低频 RFID 天线,是基于近场耦合的概念进行设计。低频和高频 RFID 天线的磁场、最佳尺寸的分析见 4.1.3 节。

低频和高频 RFID 天线可以有不同的构成方式,并可以采用不同的材料。图 3-3 所示为几种实际 RFID 低频和高频天线的图片,由这些图片可以看出各种 RFID 天线的结构,同时这些图片还给出了与天线相连的芯片。

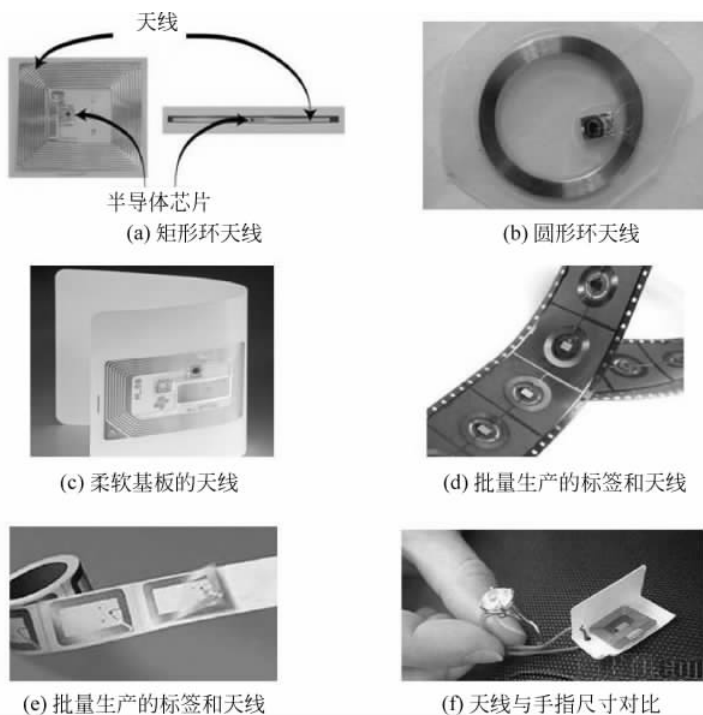


图 3-3 低频和高频 RFID 天线

由图 3-3 可以看出,低频和高频 RFID 天线有如下特点。

- (1) 天线都采用线圈的形式。
- (2) 线圈的形式多样,可以是圆形环,也可以是矩形环。
- (3) 天线的尺寸比芯片的尺寸大很多,电子标签的尺寸主要是由天线决定的。
- (4) 有些天线的基板是柔软的,适合粘贴在各种物体的表面。
- (5) 由天线和芯片构成的电子标签,可以比拇指还小。
- (6) 由天线和芯片构成的电子标签,可以在条带上批量生产。

3.3 微波 RFID 天线技术

微波 RFID 技术是目前 RFID 技术最为活跃和发展最为迅速的领域,微波 RFID 天线与低频、高频 RFID 天线相比有本质上的不同。微波 RFID 天线采用电磁辐射的方式工作,读写器天线与电子标签天线之间的距离较远,一般超过 1m,典型值为 1~10m;微波 RFID 的电子标签较小,使天线的小型化成为设计的重点;微波 RFID 天线形式多样,可以采用对称

振子天线、微带天线、阵列天线和宽带天线等；微波 RFID 天线要求低造价，因此出现了许多天线制作的新技术。

3.3.1 微波 RFID 天线的结构、图片和应用方式

微波 RFID 天线结构多样，是物联网天线的主要形式，可以应用在制造、物流、防伪和交通等多种领域，是现在 RFID 天线的主要形式。

1. 微波 RFID 天线的结构和图片

图 3-4 给出了实际 RFID 微波天线的图片，由这些图片可以看出各种微波 RFID 天线的结构以及与天线相连的芯片。

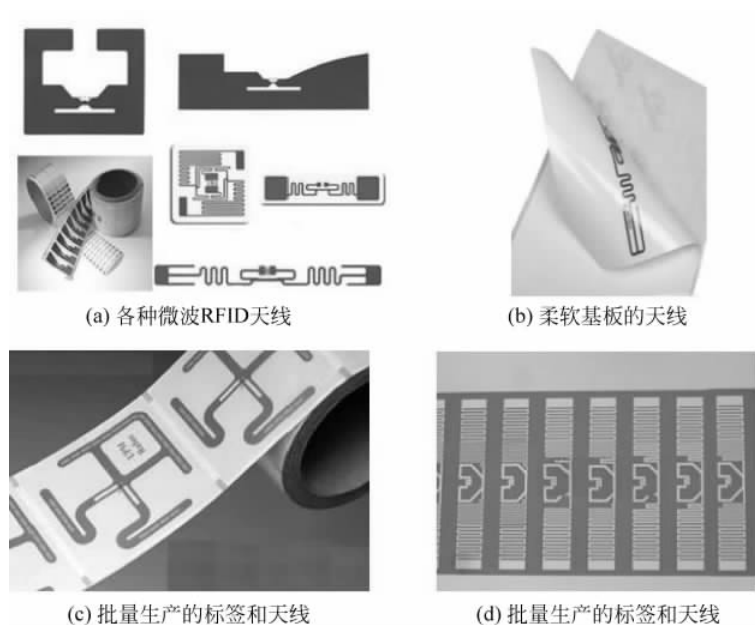


图 3-4 微波 RFID 天线

由图 3-4 可以看出，微波 RFID 天线有如下特点。

- (1) 微波 RFID 天线的结构多样。
- (2) 很多电子标签天线的基板是柔软的，适合粘贴在各种物体的表面。
- (3) 天线的尺寸比芯片的尺寸大很多，电子标签的尺寸主要是由天线决定的。
- (4) 由天线和芯片构成的电子标签，很多是在条带上批量生产。
- (5) 由天线和芯片构成的电子标签尺寸很小。
- (6) 有些天线提供可扩充装置，来提供短距离和长距离的 RFID 电子标签。

2. 微波 RFID 天线的应用方式

微波 RFID 天线的应用方式很多，下面以仓库流水线上纸箱跟踪为例，给出微波 RFID 天线在跟踪纸箱过程中的使用方法。

- (1) 纸箱放在流水线上,通过传动皮带送入仓库。
- (2) 纸箱上贴有标签,标签有两种形式,一种是电子标签,另一种是条码标签。为防止电子标签损毁,纸箱上还贴有条码标签,以作备用。
- (3) 在仓库门口,放置 3 个读写器天线,读写器天线用来识别纸箱上的电子标签,从而完成物品识别与跟踪的任务。

微波 RFID 天线在纸箱跟踪中的应用如图 3-5 所示。

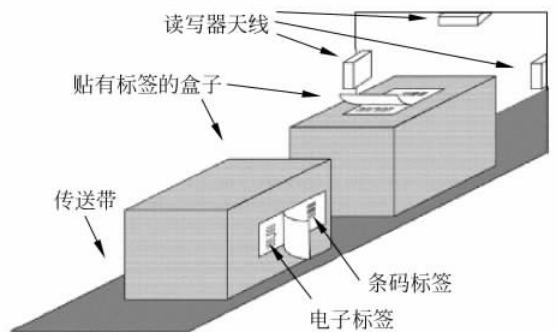


图 3-5 微波 RFID 天线在纸箱跟踪中的应用

3.3.2 微波 RFID 天线的设计

微波 RFID 天线的设计,需要考虑天线采用的材料、天线的尺寸、天线的作用距离,并需要考虑频带宽度、方向性和增益等电参数。微波 RFID 天线主要采用偶极子天线、微带天线、阵列天线和非频变天线等,下面对这些天线加以讨论。

1. 弯曲偶极子天线

偶极子天线即振子天线,是微波 RFID 常用的天线。为了缩短天线的尺寸,在微波 RFID 中偶极子天线常采用弯曲结构。弯曲偶极子天线纵向延伸方向至少折返一次,从而具有至少两个导体段,每个导体段分别具有一个延伸轴,这些导体段借助于一个连接段相互平行且有间隔地排列,并且第一导体段向空间延伸,折返的第二导体段与第一导体段垂直,第一和第二导体段扩展成一个导体平面。弯曲偶极子天线如图 3-6 所示。

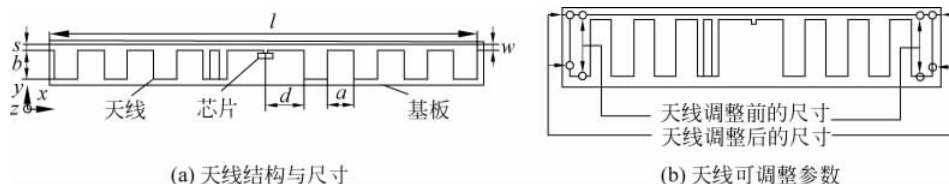


图 3-6 弯曲偶极子天线

因为尺寸和调谐的要求,偶极子天线采用弯曲结构是一个自然的选择。弯曲允许天线紧凑,并提供了与弯曲轴垂直平面上的全向性能。为更好控制天线电阻,增加了一个同等宽度的载荷棒作为弯曲轮廓;为供给芯片一个好的电容性阻抗,需进一步弯曲截面;弯曲轮

廓的长度和载荷棒可以变更,以获得适宜的阻抗匹配。

弯曲天线有几个关键的参数,如载荷棒宽度、距离、间距、弯曲步幅宽度和弯曲步幅高度等。通过调整上述参数,可以改变天线的增益和阻抗,并改变电子标签的谐振、最高射程和带宽。图 3-7 给出了一种最高射程与频率的曲线关系。

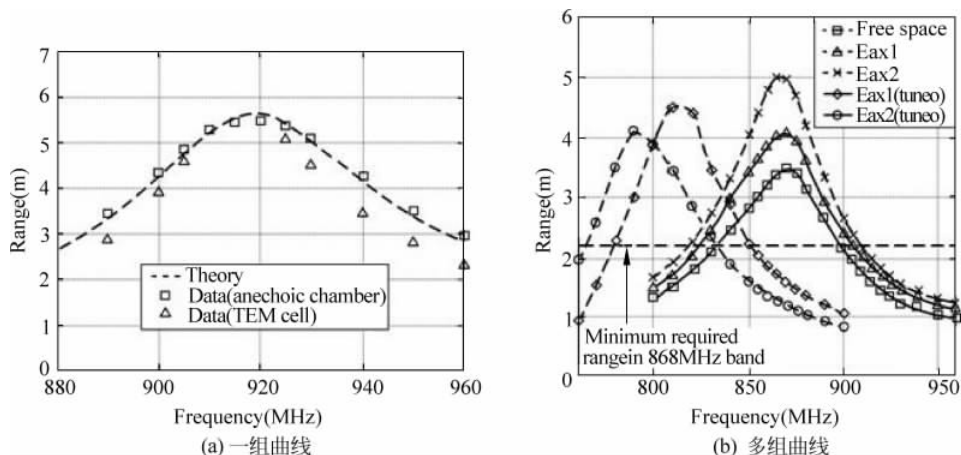


图 3-7 电子标签最高射程与频率的曲线关系

2. 微带天线

微波 RFID 常采用微带天线。微带天线是平面型天线,具有小型化、易集成、方向性好等优点,可以做成共形天线,易于形成圆极化,制作成本低,易于大量生产。

微带天线按结构特征分类,可以分为微带贴片天线和微带缝隙天线两大类;微带天线按形状分类,可以分为矩形、圆形和环形微带天线等;微带天线按工作原理分类,可以分成谐振型(驻波型)和非谐振型(行波型)微带天线。下面将微带天线分为 3 种基本类型进行讨论,这 3 种类型分别是微带驻波贴片天线、微带行波贴片天线和微带缝隙天线。

(1) 微带驻波贴片天线。

微带贴片天线是由介质基片、在基片一面上任意平面几何形状的导电贴片和基片另一面上的地板所构成。贴片形状可以是多种多样的,实际应用中由于某些特殊的性能要求和安装条件的限制,必须用到某种形状的微带贴片天线,为使微带天线适用于各种特殊用途,对各种几何形状的微带贴片天线进行分析就具有相当的重要性。各种微带贴片天线的贴片形状如图 3-8 所示。

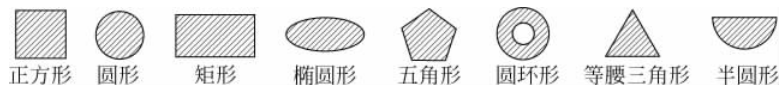


图 3-8 各种微带贴片天线的贴片形状

(2) 微带行波贴片天线。

微带行波天线是由基片、在基片一面上的梳形周期结构或普通的长 TEM 波传输线和基片另一面上的地板组成。TEM 波传输线的末端接匹配负载,当天线上维持行波时,可从