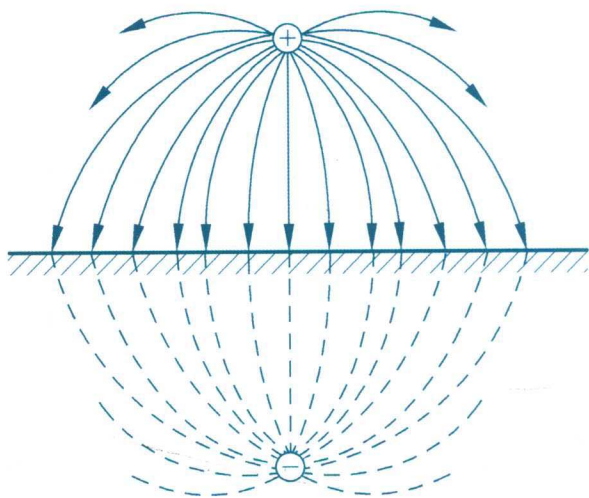


全面系统论述无源RFID电子标签天线的理论、设计、工程、测试的理论与实践!

高校科研专家与原厂技术专家联袂打造, 揭秘物联网RFID关键技术!

清华

开发者书库



Antenna Theory and Engineering for
Passive RFID Tag

无源RFID电子标签天线 理论与工程

邓小莺 汪勇 何业军◎编著

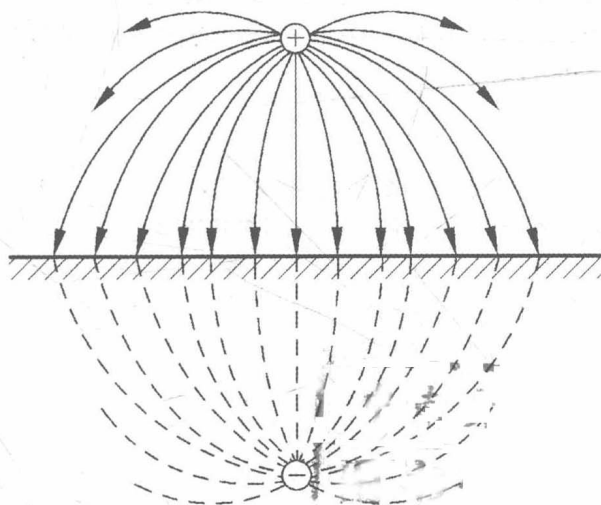
Deng Xiaoying Wang Yong He Yejun

清华大学出版社



清华

开发者书库



Antenna Theory and Engineering for
Passive RFID Tag

无源RFID电子标签天线 理论与工程

邓小莺 汪勇 何业军◎编著
g Xiaoying Wang Yong He Yejun

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书从天线理论和工程实践的角度,系统地介绍了无源 RFID 电子标签构成及在 RFID 系统中所起到的作用,重点介绍了无源 RFID 电子标签天线的理论基础及设计方法,并且对各种不同类型的电子标签进行分类和讨论。本书同时也对无源电子标签在实际 RFID 系统的使用中可能出现的问题进行了探讨,介绍了无源电子标签在实际的研发和测试中可能会出现的误区和错误,力争使读者通过对本书的学习,能够对无源 RFID 电子标签及天线有一个全面系统的了解。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

无源 RFID 电子标签天线理论与工程/邓小莺,汪勇,何业军编著.--北京:清华大学出版社,2016
(清华开发者书库)

ISBN 978-7-302-43661-4

I. ① 邓… II. ① 邓… ② 汪… ③ 何… III. ① 无线电信号—射频—信号识别 IV. ① TN911.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 085019 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:李建庄

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:186mm×240mm 印 张:10.5

字 数:261千字

版 次:2016年6月第1版

印 次:2016年6月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:39.00元

产品编号:068984-01

序

FOREWORD

接到本书作者的电话,获知他们最近在撰写的此书稿情况非常高兴。审阅全书初稿,总体感觉除了一些格式编辑方面的小问题外,书稿的总体思路、各章节安排、实质性内容的组织都很系统、缜密。在随后不到一个月的时间里即收到了经过修改与补充的完整书稿,由此,对作者的工作热情与工作效率深感敬佩。

本书聚焦于无源电子标签的天线设计与工程应用,侧重在 HF(13.56MHz)工作频段 RFID 电子标签的线圈式天线设计及 UHF(840~960MHz)工作频段 RFID 电子标签的振子式天线设计,兼顾了电子标签与相关 RFID 系统的测试。最重要的是,本书系统地总结了作者多年从事无源电子标签天线设计与电子标签产品开发的实践经验。可以说,全书内容对标签天线设计工程具备极高的指导价值。

本书的第 1 章与第 2 章属于基础理论部分。作者以简洁生动的语言与图例向读者介绍了 RFID 系统的入门概念,以及与标签天线设计相关的基础理论。对于不了解 RFID 技术与应用的读者来说,通过第 1 章可清晰地了解无源 RFID 系统的基本概念。对于有天线知识基础的读者来说,第 2 章较好地归纳和回顾了电子标签天线设计所要用的最小范围的天线理论基础,这是从事天线设计工作的基础。第 3 章主要介绍 HF(13.56MHz)频段的线圈式电子标签天线设计,相关内容也适用于 LF(频率低于 135kHz)频段电子标签天线设计时参考。其中,带匹配电路的线圈天线设计、多端口线圈天线设计概括了线圈天线设计的基本内容和扩展内容。在线圈天线的工程设计步骤与流程方面,较好地总结了线圈天线的工程设计,具有很强的工程设计指导意义。第 4 章和第 5 章侧重于 UHF(840~960MHz)频段的振子天线设计,并以 INLAY 天线与金属表面应用标签天线设计为对象,概括了电子标签天线设计中涉及的与标签芯片的阻抗匹配问题、天线的方向图问题、振子的变形设计与小型化的折弯设计、环境与材料对标签天线性能影响的问题等。第 6 章总结了电子标签与系统的测试方法,测试中出现的断点与奇点分析具有很强的现实与理论指导意义,该章对应用中电子标签的防拆设计问题也做了比较全面的归纳与总结。

综合来看,作者在本书中较为全面地归纳并总结了无源电子标签天线设计的理论与工程经验。本书以理论为基础,以实践为重点,是一本具有较高参考价值的电子标签天线设计参考书。从事电子标签设计的工程师可从书中吸取很多有实用价值的经验;从事读写器设

计与测试的工程师,以及从事标签芯片设计的工程师也可以从中更好地了解与理解电子标签天线对电子标签性能的影响与作用,更有利于在电子标签与读写器构成的RFID系统实际测试中发现问题与解决问题。

武岳山

深圳市远望谷信息技术股份有限公司技术总监

前言

PREFACE

作为一种近距离的无线通信技术,无源 RFID 系统在国内使用和发展已有几十年的历史了,但是关于无源 RFID 系统中电子标签及其天线知识的著作比较少,并且很多著作的内容都是建立在仿真的基础上,并未对电子标签做系统深入的介绍。

电子标签作为无源 RFID 系统中的重要构成部件,其设计和使用方法在 RFID 系统构建中是非常关键的。良好的电子标签设计与使用有可能使 RFID 系统中存在的误读和漏读问题迎刃而解,不好的电子标签设计与使用有可能使 RFID 系统陷入误读和漏读的死循环中。本书将尽可能在作者知识范围之内介绍不同类型的电子标签,以及这些电子标签的构成原理、应用范围和应用方法。

每一个从事 RFID 系统研发和工程实施的人员对于 RFID 系统都可能会有不同的理解。本书作者长期从事芯片、读写器天线和无源电子标签的设计,因此本书将从电磁场理论和天线设计工程实践的角度出发,阐述无源 RFID 系统中的电子标签天线的设计原理及设计方法。本书尽可能将电磁场理论、天线理论与电子标签工程实践进行结合,讲述各种不同类型的电子标签天线的设计原理和工程设计及实现方法。

希望读者通过对本书的学习,可以了解无源 RFID 电子标签的设计理论、设计方法、制作工艺等,能够对无源 RFID 电子标签建立良好的认知。希望通过对本本书的学习,读者能在后续的电子标签设计中更好地发挥聪明才智,设计出更好、更巧妙的电子标签。

由于本书作者理论知识和工程实践经验有限,而电子产品发展日新月异,所以本书不可能罗列所有现有的可行技术,并且书中很多观点和概念是基于作者自己对 RFID 技术的理解提出来的,不免存在一些谬误和不足,欢迎各位读者指正。

本书得到国家自然科学基金项目(No. 61404087, No. 61372077)、深圳市基础研究基金项目(No. JCYJ20140418193546102)和深圳市天线与电波重点实验室资金(No. ZDSYS201507031550105)资助,特此感谢!本书在出版过程中,得到清华大学出版社盛东亮编辑竭尽全力地支持,在此致谢!

作者

2016年5月

目录

CONTENTS

第 1 章 无源 RFID 系统	1
1.1 RFID 系统概述	1
1.2 电子标签	3
第 2 章 电磁波与天线理论介绍	6
2.1 电磁场与电磁波基本理论	6
2.1.1 法拉第电磁感应定律与楞次定律	6
2.1.2 电感耦合	7
2.1.3 镜像原理	7
2.1.4 对偶原理	8
2.1.5 介电常数	9
2.1.6 品质因数	10
2.1.7 阻抗与匹配	10
2.2 天线基础概念	12
2.2.1 方向图	12
2.2.2 增益	14
2.2.3 波瓣宽度	16
2.2.4 带宽	17
2.2.5 天线极化	18
2.2.6 巴俾涅原理	20
2.3 通用天线简介	21
2.3.1 偶极子天线	22
2.3.2 微带天线	23
2.3.3 倒 L 天线	25
第 3 章 线圈天线设计	28
3.1 线圈类电子标签	28

3.2	线圈天线与电感	32
3.3	单圈直导线电感	36
3.4	线圈电感计算	40
3.5	带匹配电路的线圈天线	50
3.6	多端口线圈天线	51
3.7	线圈的工程设计	52
3.7.1	线圈型天线工程设计方法	53
3.7.2	带有匹配电路的标签线圈天线设计方法	55
3.7.3	线圈型标签天线设计注意事项	56
第4章	Inlay型超高频电子标签天线设计	57
4.1	超高频电子标签介绍	57
4.2	Inlay型电子标签天线基本构成元素	62
4.2.1	小环天线	63
4.2.2	弯折偶极子天线	67
4.3	超高频Inlay型天线耦合模型	74
4.4	双端口Inlay型天线	80
4.5	其他常见的Inlay型电子标签天线	83
4.5.1	分形天线设计	83
4.5.2	非对称的偶极子天线	86
4.5.3	单环单极子天线	87
4.5.4	多环偶极子天线	88
4.5.5	大环天线	89
4.5.6	耦合型天线	90
4.5.7	异形的偶极子天线	93
4.6	多Inlay型天线的影响	94
4.7	环境与材料对Inlay型电子标签的影响	102
4.8	Inlay型标签天线工程设计	104
第5章	金属表面型超高频电子标签天线	111
5.1	金属表面电子标签分类及构造	111
5.2	抗金属电子标签天线设计	115
5.2.1	垫高型抗金属电子标签天线设计	115
5.2.2	缝隙抗金属电子标签天线设计	119
5.2.3	层合型电子金属电子标签天线设计	122
5.3	金属电子标签天线设计	124

5.3.1	倒 L 型金属电子标签天线设计	124
5.3.2	匹配电路型抗金属电子标签天线设计	128
5.4	其他金属电子标签天线设计	130
5.4.1	短路倒 L 型金属电子标签天线设计	130
5.4.2	导磁基材型金属电子标签天线设计	132
5.4.3	铅垂型抗金属电子标签天线	132
5.4.4	圆极化金属电子标签	134
5.5	金属表面的电子标签天线工程设计	135
5.5.1	垫高型抗金属电子标签天线工程设计	135
5.5.2	倒 L 型金属电子标签天线工程设计	138
第 6 章	电子标签在工程应用中的问题	140
6.1	电子标签识读距离的测量	140
6.2	电子标签在应用中的断点和奇点	146
6.3	标签电连接工艺	149
6.4	防拆结构的电子标签天线设计	153
参考文献	157



1.1 RFID 系统概述

RFID 是射频识别 (Radio Frequency Identification) 的英文缩写。RFID 系统是基于 RFID 技术,通过搭建硬件平台和软件平台所构成的系统。RFID 技术是一种非接触的近距离自动识别技术,其基本原理是利用射频信号或电磁场耦合的能量传输特性,实现对物体的自动识别。RFID 技术具有抗干扰能力强、存储信息量大、非接触、使用寿命长、可多标签识别、响应速度快等特点。RFID 系统已经被广泛地应用在公共交通、人员身份识别、车辆管理、自动收费、门禁管理等领域。

RFID 技术发端于雷达技术,经过几十年的发展,已经成为物联网感知层的重要组成部分。伴随着工业自动化的不断发展和机器人时代的到来,RFID 技术会越来越广泛地应用到更多的系统和行业当中。

根据工作频段的不同,无源 RFID 系统通常分为低频(LF)、高频(HF)和超高频(UHF)系统。

狭义上,RFID 系统包括读写器、天线和电子标签。读写器是 RFID 信号和能量的唯一来源,读写器根据需要开启不同的射频通道,发送信号给电子标签,接收并分析电子标签返回的信息。电子标签是系统中被识别物体的电子代码载体,同时具有接收和返回信号的功能,可以从读写器反射的信号中获取能量,启动电子标签芯片,并根据协议和规则返回应答信号给读写器。天线是无线通信技术中能量传输的桥梁,无论何种无线通信技术,或多或少都会使用到天线。在 RFID 系统中,天线也是起到传递射频信号的作用。

我们可以将读写器、标签、天线三部分看作是构成 RFID 系统的基本三要素。

广义上,RFID 系统除了上述的基本三要素之外,还包括系统应用方案、应用软件、系统背景环境、系统使用者及其他辅助技术。由于 RFID 技术的特点,几乎每一个 RFID 系统都是不一样的,因此在设计 RFID 系统时,必须考虑 RFID 系统所处的背景环境。例如,在环境中是使用纸箱比较多,还是使用木箱比较多;箱体中装的是塑料件还是金属件;使用标签的物体是否为有机体。从电磁波的角度来看,每一种不同材质的物体对于电磁波的反射

和透射比例是不同的。同样,每一种不同材质的物体对于电磁波造成的频率偏移也是不同的,这就涉及后文提到的材料介电常数的问题。广义的 RFID 系统构成如图 1-1 所示。

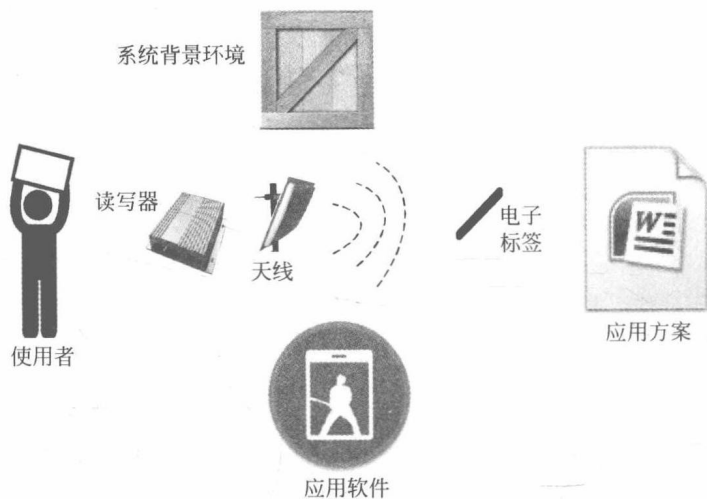


图 1-1 广义的 RFID 系统构成

在 RFID 系统中,人员的参与也是非常重要的。在设计系统时必须考虑使用系统人员的年龄、受教育程度、性别、工作习惯等。而且,还必须考虑人员参与的程度,很多 RFID 系统可能只是解决大系统中的某一个小程序,而有些 RFID 系统本身就是大系统,因此在系统中人员的参与程度会直接影响 RFID 系统设计和实现的难易程度。

考虑这些环境和人的因素后,就可以根据需求设计 RFID 系统的应用方案了,RFID 系统方案的设计必须考虑 RFID 技术本身的优点和缺点,在系统中有效地加入其他技术进行辅助(例如传感器技术、机械自动化技术),必要的时候在系统方案中可以加入一定的操作规范、安全范围限制等。RFID 系统方案设计完成之后,还需要有相应的应用软件来实现方案,并且可以通过这些应用软件将 RFID 系统接入更大的系统中。

当然,根据 RFID 系统本身的复杂程度,在系统中有可能还需要接入诸如图像处理技术、条码识别技术等不同的技术,并需要根据系统的不同而进行增删。

本书在讨论 RFID 系统时,主要是从电磁场的角度出发,讨论系统的能量传输形式和信号获取方式。不同频段的无源 RFID 系统在标签能量获取和应答信号获取方面的方式是不同的。对于低频和高频无源 RFID 系统而言,电子标签和读写器要获得能量就得通过读写器天线和电子标签天线之间的能量耦合实现,图 1-2 显示了低频和高频系统的三个基本要素,图 1-3 显示了读写器天线和标签天线之间的耦合关系,其中 L_r 和 R_r 分别表示读写器天线的电感和电阻, L_t 表示电子标签天线的电感, R_c 和 C_c 分别表示电子标签芯片的端口电阻和电容。这种 RFID 系统通过电磁耦合的形式发射和获取电磁信号。在这两个系统中,所有的天线(包括读写器和电子标签)都必须形成闭合的回路。



图 1-2 低频和高频 RFID 系统的三个基本要素

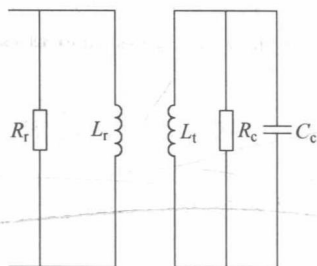


图 1-3 读写器天线与标签天线之间的耦合关系

对于超高频(UHF)无源 RFID 系统来说,读写器和电子标签主要通过天线在电场中获取能量。超高频 RFID 系统中的读写器天线和电子标签天线在工作原理上与普通的无线通信技术是完全相同的,天线以辐射的方式发送和接收电磁信号,远场中的天线会获取电场的能量,并在天线两端形成电压,如图 1-4 所示。由于采用辐射的工作方式,因此超高频天线可以在较远的距离通过电场获取能量,通过能量传输公式可以很方便地理解这个概念,这也是为什么超高频电子标签的识读距离会明显远于低频和高频 RFID 标签的原因。由于通过使用远场天线的方式获取电压和电流,超高频无源 RFID 系统中的天线不一定需要做成闭合回路的形式。

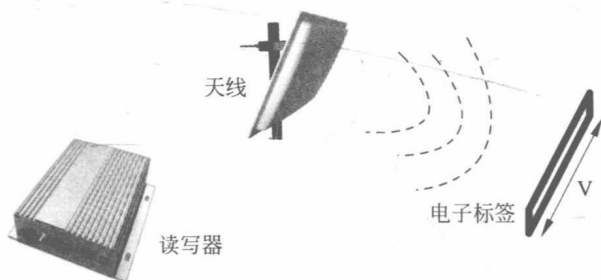


图 1-4 超高频 RFID 系统工作方式

超高频 RFID 系统是通过反射调制的方式进行通信的,即 RFID 阅读器将发射信号调制到载波上,发送给电子标签,随后维持一段时间的连续无调制载波,电子标签从阅读器的发射信号和连续载波中获取能量,解调发射信号,并将返回信息调制到来自阅读器的连续载波上,反射给读写器。

1.2 电子标签

电子标签是 RFID 系统的重要组成部分,可以说没有电子标签就不会有 RFID 系统,甚至很多书籍和网站直接将 RFID 技术解释为电子标签。电子标签在 RFID 系统中是结构最

简单的组成部分,但是却往往是使用量最大的部分。

电子标签是 RFID 系统中的神经末梢,能够有效地感知和记录物体发生的变化。如图 1-5 所示,如果将 RFID 系统比作一只无形的章鱼,那么天线就犹如是章鱼的腕,电子标签就是这些腕所需要抓取的猎物,通过在每一个物体上附着的电子标签,就可以感知物体发生的变化。电子标签将感知的信息传送到章鱼的神经中枢——读写器,这样就可以搭建物-物相联的物联网。

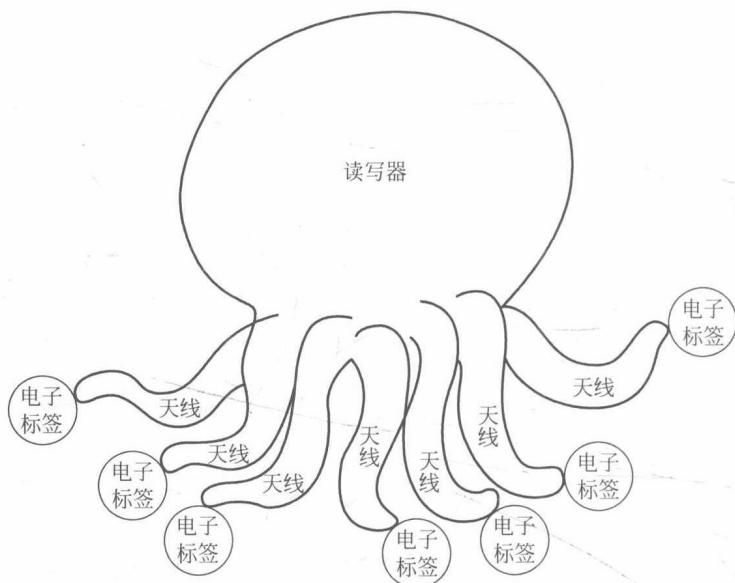


图 1-5 RFID 系统腕图

电子标签是典型的 SOC 系统(System On Chip),即电子标签是一种简单地围绕集成电路芯片构造的系统。通常,电子标签的构成包括标签芯片、天线、基材、外壳、不干胶等,这些构造和组成几乎都是围绕着芯片以及与芯片连接在一起的天线进行设计和制造的。

根据电子标签芯片与天线连接方式的不同,又可以演化出不同的生产工艺,如倒封装、焊接、绑定等,根据备胶方式的不同,电子标签可以分为干 Inlay 和湿 Inlay。不同的连接形式会表现出不同的物理特性,如在高低温环境下的使用可靠性、标签的耐弯折程度等。

根据频段和应用方式的不同,各种电子标签可能会有不同的设计和封装方法,其外观也会变化多样,但是其本质上都是围绕芯片的简单电子应用系统。图 1-6 列举了一些典型的电子标签。

电子标签通过其天线在读写器天线的近场和远场范围内获取电磁信号,并转换成所需要的电信号,获取能量并向读写器返回应答信号。耦合和辐射的形式都可以成为电子标签获取能量的方式,只是根据频段和应用方法的不同,获取能量的形式也会有所不同。

电子标签芯片是大规模集成电路,本书的重点是探讨如何在标签芯片的端口设计并连接好匹配的电子标签天线。由于电子标签芯片的端口阻抗往往不是标准的 50Ω ,这就使得

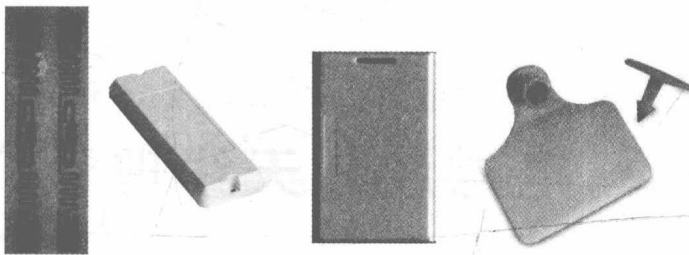


图 1-6 各种电子标签实物图

我们有的时候很难使用通常的通信天线技术对电子标签芯片进行匹配,对电子标签的匹配方法与通常的通信天线也许会有不同。好的匹配将会有效提高电子标签的接收灵敏度并且能提高电子标签返回给读写器的功率,不好的匹配往往使得 RFID 系统变得迟钝且难以使用,体现不出电子标签远距离识读、多标签读取等技术优势。

由于每一款电子标签芯片的阻抗都是不一样的,因此很难保证一款天线设计可以适应所有的电子标签芯片,这也使得电子标签天线的设计具有了一定的不可重复性。因此,这使电子标签天线设计成为一个单独种类的天线设计方法成为可能。



电磁波与天线理论介绍

天线设计属于一种实践可能会领先于理论的技术。在作者看来,天线设计本身也是一种带有艺术创作性质的科学研究。但是任何形式的天线设计最终都需要用到电磁场和电磁波理论进行指导和解释,违背自然规律和经典理论的设计往往是不好的设计。

本章将重点介绍在电子标签天线设计中需要用到的经典电磁场和电磁波理论,所有这些理论在经典的天线教材中都可以找到,本书将结合工程实践对这些天线理论做一些实践性的阐述,以便读者能对这些理论有更全面和确切的了解,也希望通过本章的学习,能够对天线设计的重点参数有一个明确的了解。

对于本书没有提到的经典理论,读者也需要在实际的工作和实践中结合具体的案例来理解,以便将理论与实践相结合,设计出更好的天线。

同时,本章将简要介绍各种常见的天线,让读者对于通用的通信天线能建立一个初步的概念,加深对各种不同天线的理解。

2.1 电磁场与电磁波基本理论

2.1.1 法拉第电磁感应定律与楞次定律

电磁感应现象是电磁学中最重要现象之一,它显示了电与磁之间的相互联系和转化。电磁感应现象是指因磁通量变化产生感应电动势的现象,如图 2-1 所示。如果有闭合的回路,就会产生感应电流。

法拉第电磁感应定律规定了感应电动势的大小。对于一个闭合回路的 N 匝线圈而言,其感应电动势为

$$E = -N \times \Delta\varphi / \Delta t \quad (2-1)$$

其中, E 为感应电动势(V); N 为感应线圈匝数; $\Delta\varphi / \Delta t$ 为磁通量的变化率,负号表示了楞次定律的阻碍作用。

楞次定律用来判断由电磁感应而产生的电动势的方向,是能量守恒定律在电磁感应现象中的具体体现。楞次定律可以表述为感应电

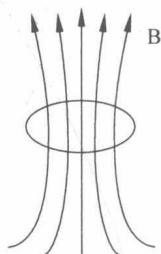


图 2-1 电磁场中的闭合线圈

流的磁场总是要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。这也是式(2-1)中负号的由来。

通过对法拉第电磁感应定律和楞次定律的了解,已经知道了闭合线圈是可以在变化的电磁场中获得感应电动势的,并且可以产生感应电流,通过楞次定律可以判断感应电流的方向。这是低频和高频电子 RFID 系统发射和接收信号的主要手段。同样,基于这样的原理,也确定了高频和低频 RFID 系统的近距离识读特性。

2.1.2 电感耦合

由于电磁感应使一根导线中的电流变化引起电动势通过另一根导线的一端,这种现象称为电感耦合(或磁耦合)。根据法拉第电磁感应定律可以判断产生的感应电动势的大小,通过楞次定律可以判断感应电流的方向。电感耦合的本质是通过耦合作用,将电路中的能量传递到其他电路中。通常,耦合都是通过相互接近的两个或多个线圈来实现的。

图 2-2 表示了两个线圈之间的耦合作用, L_1 和 L_2 分别表示两个相互靠近的线圈,通过图中的实心点表示两个电感绕线的方向,本图中表示两个电感的绕线方向相同; M 表示两个线圈之间的互感。式(2-2)和式(2-3)给出了电压 U_1 和电压 U_2 的计算方法。

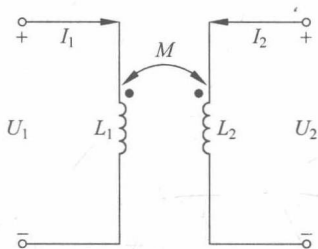


图 2-2 电感耦合图

$$U_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad (2-2)$$

$$U_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \quad (2-3)$$

线圈 L_1 所激发的磁场通过线圈 L_2 的磁通匝链数为

$$\varphi_{12} = M \cdot I_2 \quad (2-4)$$

从式(2-4)可以看出,两个相互靠近的线圈在任一个线圈电流发生变化的时候,另一个线圈中的电动势会发生变化,而电动势变化的程度与互感系数 M 关系密切。互感系数 M 与两个线圈的结构以及摆放关系密切相关,当两个线圈平行放置且距离较近时,互感系数较大,当两个线圈垂直放置时,互感系数最小。

电感耦合程度直接决定了在低频和高频 RFID 系统中电子标签能够被识读的距离,在读写器发射功率相同并且读写器天线尺寸固定的情况下,电子标签的尺寸越大,通过线圈的磁通也就越大,这就意味着电子标签能够获取的电动势更大,识读的距离就会越远。

在电子标签的使用中,如果将电子标签与读写器天线平行放置,那么就可以获得较好的耦合,电子标签的识读距离就会更远;而如果电子标签放置的方向与读写器天线位置垂直,那么电子标签识别的距离就会非常近。

2.1.3 镜像原理

镜像法的实质是通过假想一个或几个等效电荷代替边界的影响,将原来具有边界的非

均匀空间变成无限大的均匀自由空间,通过求出的镜像电荷的作用间接求出真实电荷的作用。

镜像法的依据是唯一性定理,即如果给定了电荷在空间的分布情况,并且给定了边界上的电势或者电势的法向导数,那么区域内的电场被唯一确定。因此,等效电荷的引入必须维持原来的边界条件不变,从而保证原来区域中的静电场不变,这也是确定等效电荷位置和大小依据。图 2-3 表示了无限大导体上点电荷的镜像。等效负电荷的出现,将保证零电位面与导体表面相吻合,在不考虑导体表面存在的情况下,可以保证导体表面以上空间的边界条件不变。

以此类推,线电流或面电流在边界上的情况也可以使用镜像法进行分析。图 2-4 表示了无限大导体上线电流的镜像情况。

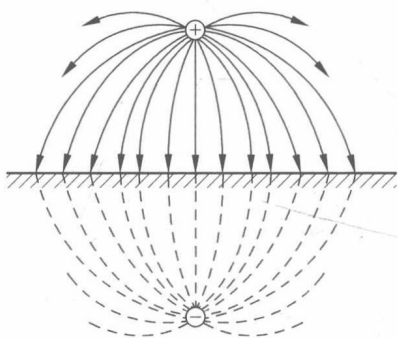


图 2-3 镜像法

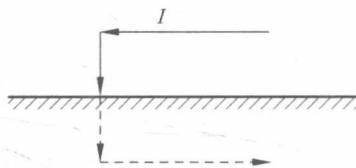


图 2-4 线电流镜像情况

从图 2-3 和图 2-4 可以看出,当无限大金属表面上存在电荷或者电流时,平行于金属表面的电荷分量或者电流分量会等效在金属背面镜像出反向的电荷或者电流,而垂直于金属表面的电荷分量或者电流分量会等效在金属背面镜像出同向的电荷或者电流。如果电荷和电流分量距离金属表面距离不远,从远场来看,平行于金属表面的电荷和电流分量产生的场会在远处与镜像分量的场相互抵消,而垂直于金属表面的电荷和电流分量产生的场会在远处与镜像分量的场相互叠加。

由于电子标签天线设计中极少用到导磁面的情况,因此导磁面上的镜像原理在此不作介绍。

镜像原理对于电子标签和天线设计都是非常重要的,在 RFID 系统的工程实施中也会显得非常重要。在电子标签设计中,这是很多超高频抗金属电子标签设计的理论基础,即通过将电子标签的辐射部分垫高来达到可辐射或增强辐射的效果。在工程实施中,它可以有效指导工作人员不将不合适的标签安装在金属表面,避免出现工程实施的错误。

2.1.4 对偶原理

电荷和电流是产生电磁场的唯一来源,目前在自然界中还没有发现任何磁荷和磁流的存在,但是对于很多的问题,如果能够引入磁荷和磁流的概念,那么对于解决问题是有益的。