



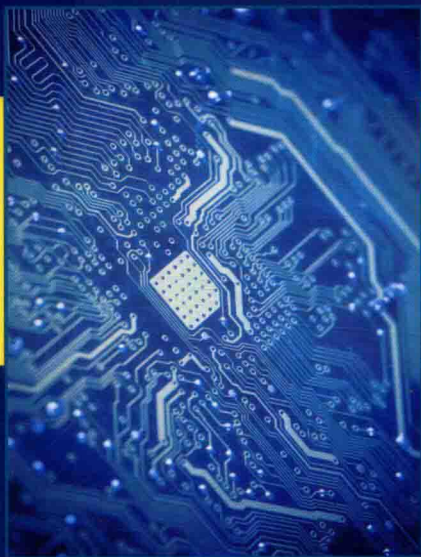
国际信息工程先进技术译丛

ISTE WILEY

UHF RFID 在识别与追踪中的应用

UHF RFID Technologies for Identification and Traceability

让-马克拉·厄尔特 (Jean-Marc Laheurte)
[法] 克里斯蒂安·里波尔 (Christian Ripoll)
多米尼克·帕瑞特 (Dominique Paret) 著
克里斯多夫·卢瑟特 (Christophe Loussert)
谢志军 叶宏武 汤棋 许梅 译



◎UHF RFID广泛应用于工业4.0、物联网、库存物流、汽车钥匙，身份识别、访问控制等领域，是物联网的基础核心技术。

◎讲解RFID标签设计、制作，以及后向散射技术与RCS功能的设计方法。



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际信息工程先进技术译丛

UHF RFID 在识别与 追踪中的应用

[法] 让-马克拉·厄尔特 (Jean-Marc Laheurte)
克里斯蒂安·里波尔 (Christian Ripoll) 著
多米尼克·帕瑞特 (Dominique Paret)
克里斯多夫·卢瑟特 (Christophe Loussert)

谢志军 叶宏武 汤 棋 许 梅 译

机械工业出版社

UHF RFID 是一种热门的电子标签技术,通过无线电波可以使物品、场所或人员实现视距外的远距离自动识别。其广泛应用于工业 4.0、智能制造、物联网、库存、物流追踪、处方药追踪与认证、高安全性汽车钥匙、身份识别,以及安全设施的访问控制等领域,是物联网的基础核心技术。

本书为读者提供了综合的技术和应用指南,介绍了 UHF RFID 的技术、性能、市场、应用情况,重点讲解 RFID 标签设计、制作,以及后向散射技术与 RCS 功能的设计方法。

Copyright © ISTE Ltd 2014

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled UHF RFID Technologies for Identification and Traceability, ISBN: 978-1-84821-592-4, by Jean-Marc Laheurte, Christian Ripoll, Dominique Paret, Christophe Loussert, Published by ISTE Ltd and John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2015-0853 号。

图书在版编目(CIP)数据

UHF RFID 在识别与追踪中的应用/(法)让·马克拉·厄尔特等著;谢志军等译. —北京:机械工业出版社,2017.6

(国际信息工程先进技术译丛)

书名原文:UHF RFID technologies for identification and traceability
ISBN 978-7-111-56956-5

I. ①U… II. ①让… ②谢… III. ①超高频-无线射频识别-应用-研究 IV. ①TP391.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 096524 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:林 桢 责任编辑:林 桢

责任校对:潘 蕊 封面设计:马精明

责任印制:孙 炜

北京中兴印刷有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·8.5 印张·163 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-56956-5

定价:49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

无源超高频射频识别 (Passive UHF RFID) 是一个应用在 860 ~ 960 MHz 频段的商业化电子标签技术, 它能自动识别 10m 范围内的目标对象, 并获取相关数据, 识别工作无须人工干预。其具有条形码所不具备的防水、防磁、耐高温、使用寿命长、读取距离远、数据加密、数据存储容量大和存储信息可更改等优点, 其应用将给零售、物流等产业带来革命性变化, 已引起了世界各国的高度重视。

目前, 国内外都在开展智能制造技术新兴领域的研究与讨论。从某种意义上说, 智能制造和物联网都是制造业和信息技术交融与跨界的产物, 是借用技术和模式互相促进的新型领域。工业 4.0 的快速推进对制造业和信息产业也提出了很多新课题。例如在现代化工厂中, 如何加强机器人系统自主学习、自主工作? 这将影响到面向云制造等工业 4.0 主要应用的进一步推进和应用。作为物联网基础技术之一的无源 UHF RFID 具有成本低、信息量大、易与标识物结合的特点, 已成为工业 4.0 的热点技术。利用无源 UHF RFID 中的大容量、易存取的电子信息, 可以实现信息在全产业链、全生命周期的物品信息管理。无源 UHF RFID 的这一特点, 可以使得物品信息在设计、制造、检验、仓储、销售各个节点“随物而动”、无缝衔接, 为实现无人工厂、机器人“离线”自主操作等创造了技术条件。无源 UHF RFID 能够极大地提高全流程生产管理的信息化、自动化水平, 将成为提高我国工业生产管理水平的重要手段。

本书为读者提供了一个综合的技术指导, 其目标不是穷尽所有的技术及应用, 而只是主要描述无源 UHF RFID 技术的几个具体方面; 如在标签天线设计和芯片工艺方面, 提供一个客观的参考资料, 这些资料都是从最新的学术论文、工业数据和作者的经验中提炼而来的, 其次是本书包含了最终用户、市场和产品的观点。全书分为 4 章, 第 1 章介绍了 UHF RFID 集成电路技术和性能方面的新动态。第 2 章突出了 RFID 标签的设计和制作。第 3 章介绍 RCS 和 Δ RCS 功能的设计方法, 重点介绍通过调雷达散射截面 (RCS) 和可用于近场远场通信的 Δ RCS 功能的设计方法。第 4 章是对 UHF 的挑战进行了概述, 包括其应用、市场、贸易和基本技术, 尤其是在供应链管理和零售库存上, 未来在产品的整个生命周期都将会使用 UHF RFID 标签, 包括智能嵌入式 RFID 解决方案、无缝和无处不在的基础设施, 以及用来管理小型智能设备。

本书可作为通信专业、计算机专业等高年级本科生和研究生教材, 也可供相关专业的教师、科学研究工作者和工程技术人员参考。本书的翻译工作和出版得到了浙江省自然科学基金 (Y16F020002)、宁波市自然科学基金 (2015A610119) 和宁波市国际

合作项目（2016D10008）的支持，在此谨致谢意。本书的翻译工作由宁波大学谢志军老师主持，叶宏武、汤棋和许梅分别参与了本书的翻译工作，特此向支持和关心本书翻译工作的所有单位和个人表示衷心的感谢。特别感谢浙江纺织服装学院叶宏武教授、宁波大学信息学院汤棋和宁波大学建工学院的许梅为本书所做的翻译、排版和校译工作。还要感谢我的家人，教育译者多年的师长、学长和同仁的帮助和支持。由于本书的研究属于信息科学研究的热点和前沿科学问题，许多专业术语的中文译文还没有统一的标准，加之译者水平有限，虽几经修改，书稿翻译过程中错误和缺点也在所难免，敬请读者、专家、同行朋友指正。

谢志军

2017年7月

原 书 前 言

无源超高频射频识别 (Passive UHF RFID) 是一个应用在 860 ~ 960MHz 频段的商业化电子标签技术, 它不依靠可见的直接路径, 而是利用雷达无线电波交流使人或者目标在超过 10m 范围内被自动识别 (见图 0.1)。超高频 (UHF) 为链式管理应用提供了主流的技术支持, 如箱子和货物的追踪及可返回集装箱的识别。它还广泛应用于实时库存、工业自动化、货物跟踪、资产管理、叉车监控、身份识别、车辆出入管理、文档的安全性管理和身份验证等方面。UHF 标准有很多, 如今最为典型的是 ISO 18000-6 和 EPC global2。

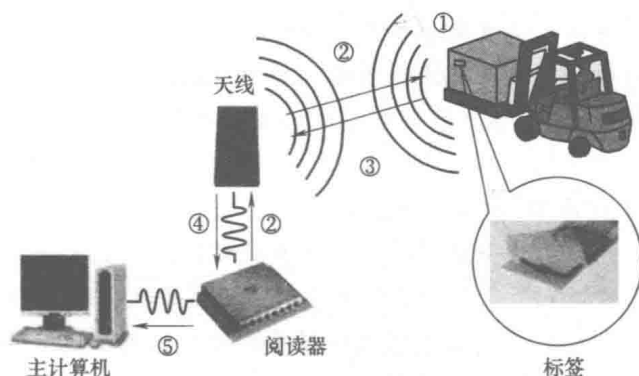


图 0.1 UHF RFID 通信的功能原理图

- ①附着在物体上的嵌体：天线上基底膜和包含物体数据的芯片相结合 ②安装在门上和柜台上的阅读器发出射频信号 ③标签发送数据来响应射频（后向散射调制）④阅读器发送调制数据到阅读器 ⑤阅读器将数据解码，并将其发送给主计算机

如今, 许多条形码的处理过程包括将条形码的代码对象和定向的条形码正确地呈现给阅读器。因此, 传输系统的运行速度必须低于其最高速度, 条形码阅读器才可以识别对象。不同于条形码, RFID 标签并不需要限制在阅读器的视线内, 它可以嵌入到跟踪对象中, 并且 RFID 具有同时识别多个物体的能力。这是 RFID 优于条形码的地方, 因此它不仅最大限度地减少了人工劳动, 而且加快了读取的速度。

高频 (HF) 技术与 UHF 技术除了频率以外最主要区别在于它们的读写距离。HF 在频率为 13.56MHz 时最大读写距离大约为 1m, 而 UHF 大约为 10m。当需要较大读写距离时, 就不能再使用 13.56MHz 频率, 因为相对于辐射电阻几乎为零的波

长, HF 天线因为它们的长度太短而辐射距离过短。因此, HF 天线需要被视为近磁场传感器。很多依靠无线电波通信的 UHF 系统可以传播很远的距离。然而, UHF 系统也可以在短距离工作, 可以找到商业化的近场 UHF 优化系统用作短距离阅读器的例子, 并且在 10m 范围内能被读到的标签同样可以在 10cm 范围内被读到。例如, UHF 技术可以同时满足在装配站的应用中所需要的短距离读取标签及长距离存储、运输和接收处理过程。通过阅读器不同的布置和配置, UHF 系统对不同过程和读写距离进行了优化。

在早期部署应用时, 相比较 HF 的解决方案, 当 UHF 系统用于液体和金属环境时其性能下降。天线设计水平的提高、阅读器的优化和实践已经克服了这些限制。例如, 一些 UHF 标签专门为与金属临近的情况设计, 利用金属的导电性增强 RF 的性能。而 HF 技术需要应用于金属和液体环境的这一想法如今更多的是概念而未应用于实际。在供应链的应用中, UHF 被频繁应用在区分含有液体和金属的物件上。

本书的目标不是为了穷尽所有的技术及应用, 而是重点在无源 UHF RFID 技术。首先, 本书为标签天线设计和芯片工艺提供了一些客观的参考文档, 这些文档都是从最新的学术论文、工业数据和作者的经验中提炼而来的。其次是本书包含了来自最终用户、市场和产品的观点。然而, 本书没有讨论一些重要的 UHF RFID 话题, 如阅读器架构、ISO 18000-6 空中接口协议标准和在全球范围内的规定。

本书是按以下内容组织的:

第 1 章介绍了 UHF RFID 集成电路技术和性能方面的新动态。包括直流电压生成电路及调节器, 解调器部分恢复数据, 车载振荡器控制数字部分以及数字部分存储的组织, 重点在于应用于 ISO 18000 第六部分的第二代 EPC 协议。这部分添加了对集成电路功能、制造问题、匹配需求和测量测试的完整描述。这一基准可以帮助芯片设计者确定这一技术的主要约束。

第 2 章介绍了 RFID 标签的设计和制作。首先, 使用低廉小型化材料设计天线只是众多设计者要解决的问题中的一个。当跟踪在不同的公司和世界各地之间货物流量的时候, 尽管具有被扰乱的环境特征(如相关物品、其他标签、周围的对象等), 标签必须具有良好的读取性能。实现条件是如果标签设计遵循一些规则, 其中之一就是 RFID 芯片的宽带阻抗匹配; 另一个规则是限制标签对环境的敏感性, 包括电介质、电导率和含标签物品形状特征的分析, 以便利用它或抵消它。

因为大多数 UHF RFID 标签为偶极子结构, 第 2 章首先介绍了偶极子天线的基本电路参数(输入阻抗、辐射阻抗、效率、品质因数和阻抗)。在描述标签介质和金属环境性能影响后, 提出了基于 fat 偶极子加载的小型化策略。RFID 芯片和天线之间阻抗匹配的基本问题用单、双调谐匹配策略进行了明确的解释。这也证明了双调谐匹配电路的带宽特性在电介质中是至关重要的。此外, 对电感耦合馈电标签天线, 以及相关的基于循环的商业化模块, 也做了全面详细的介绍。给出了在有接收

者还是无接收者时应用的例子，并且针对薄的和厚的结构也进行了检验。

第3章的重点在近场和远场的通信中的雷达散射截面（RCS）和 Δ RCS的设计方法。

第4章对UHF的挑战进行了概述，包括其应用、市场、贸易和基本技术，尤其是在供应链管理和零售库存上。投资回报率（ROI）被证明是在购买RFID决定中关键的因素。RFID技术若要刺激相关投资必须要减少成本，增大销量。未来RFID的主要讨论话题也很明确：在产品的整个生命周期使用标签，智能嵌入式RFID解决方案，无缝和无处不在的基础设施和用来管理小型智能设备的大型网络中的未来软件。

目 录

译者序

原书前言

第 1 章 超高频标签集成电路的设计与实现	1
1.1 简介	1
1.2 集成电路架构	2
1.3 RF 到 DC 的转换：系统建模	3
1.3.1 理想直流输出电压的选取	3
1.3.2 实际直流输出电压的选取	5
1.3.3 寄生效应和电容量在输出电压上的影响	6
1.3.4 匹配的考虑	11
1.3.5 得到的结果	14
1.4 RF 到 DC 的转换：建议的电路及其性能	16
1.4.1 阈值电压消除电路	16
1.4.2 使用自动桥式消除电路的交叉耦合差分驱动	17
1.4.3 受控制的调谐电压的交叉耦合差分驱动	18
1.4.4 结果	19
1.5 电压限制器和调节器	20
1.6 解调器	21
1.7 振荡器	23
1.8 调制器	24
1.9 数字模块	25
1.10 技术、性能和发展趋势	26
1.10.1 技术选择	26
1.10.2 优化设计	27
1.10.3 电路性能	28
参考文献	29
第 2 章 超高频电子标签的设计	34
2.1 电子标签天线设计	34
2.1.1 偶极子天线的基本电路参数	34

2.1.2	Fat 天线和顶端加载	39
2.1.3	弯折偶极子	41
2.1.4	介电材料和金属材料的影响——损耗和解调	46
2.1.5	近场、远场 UHF RFID 标签的行为	49
2.2	天线的阻抗和微芯片阻抗之间的匹配	50
2.2.1	匹配条件	50
2.2.2	L-matching 基础知识	51
2.2.3	等效电路图	52
2.2.4	双调谐匹配	53
2.2.5	合成双调谐标签和 naive 标签	55
2.2.6	最优双调谐匹配的备选方案	57
2.2.7	有关一个双调谐匹配标签及变量环境中的用法的例子	58
2.3	采用电感耦合反馈的 RFID 标签天线	61
2.3.1	分析模型	61
2.3.2	天线设计与结果	62
2.4	针对包含液体的接收器的组合 RFID 标签天线	64
2.4.1	模块描述	64
2.4.2	电感耦合和天线匹配	65
2.4.3	天线设计	65
2.4.4	原始标签的测量	66
2.4.5	结合空塑料容器和满塑料容器的测量	66
2.4.6	组合天线	67
2.4.7	匹配条件的讨论	67
2.5	金属上的标签	68
2.5.1	低剖面贴片天线的辐射效率	69
2.5.2	超薄金属标签	71
2.5.3	厚金属标签	76
2.5.4	在金属表面改善偶极子设计	79
	参考文献	82

第3章 后向散射技术及其应用

86

3.1	通过基站和标签之间通信的后向散射原理	86
3.1.1	前向链路：从基站到标签的通信	87
3.1.2	回程链路：从标签到基站的通信	87
3.2	标签的品质因数， $\Delta\sigma_{es}$ 或 ΔRCS	90
3.2.1	雷达散射截面变化的定义， σ_{es} 或 ΔRCS	90

3.2.2	函数参数为 $\Delta\Gamma$ 时, $\Delta\sigma_{e.s}$ 的估计	90
3.2.3	变量 $\Delta\sigma_{e.s}=f(\Delta\Gamma, \Gamma_1)$	92
3.3	$\Delta\sigma_{e.s}=f(a)$ 的变化	98
3.4	理论分析后, 讨论 RFID 在 UHF 和 SHF 上的实际运用	98
3.5	测量 ΔRCS	106
3.6	“雷达”等式	110
3.7	主要公式的总结	111
第4章	RFID 市场	113
4.1	引言	113
4.2	市场转折点: 用户	113
4.3	RFID 能用来干什么	113
4.4	闭环和开环应用	115
4.4.1	闭环应用	115
4.4.2	开环应用	115
4.5	RFID 的投资收益率	115
4.5.1	介绍	115
4.5.2	降低成本	116
4.5.3	销售量增加	117
4.6	多种 RFID 技术	117
4.7	实例	118
4.8	下一代 RFID: 嵌入式产品和完善的基础设施	121
4.8.1	介绍	121
4.8.2	RFID: “即贴即送”	121
4.8.3	下一代 RFID: 从“摇篮”到“坟墓”	121
4.8.4	嵌入式 RFID	122
4.8.5	基础设施的普遍化和无缝化	125
4.8.6	用于商务决策的软件	126

第 1 章 超高频标签集成电路的设计与实现

为了满足由于无电池标签的远程偏压所带来的限制，超高频射频识别（UHF RFID）标签芯片的设计面临着全新的挑战。在本章第 1.1 节和第 1.2 节中将对集成电路标签作一个简单的介绍和描述。在第 1.3 节中将介绍理想和实际两种情况下通过电压倍增器将 RF 转换为 DC 的基本原理。在该节的最后将会讨论在中压电容器和输出电容器尺寸中必须考虑的有源器件（二极管和金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET），两者之间的比较将会突出各自的优缺点）和无源寄生的影响。同时，天线的简化模型和整流器的输入可以使我们了解到匹配的重要性，并且计算出电路的功率转换效率（PCE）。第 1.4 节和第 1.5 节提出了一些最新的电路设计，用来减小有源器件的阈值电压和提高 PCE。第 1.6 节、第 1.7 节和第 1.8 节简单介绍了阅读器和标签之间的信息交换原理，以及如何完善振荡器的设计来减小整体的消耗。第 1.9 节和第 1.10 节列出了最新技术、工艺及在数字应用中的使用趋势，并且列出不同组之间的比较结果。

1.1 简介

全球天源超高频射频识别（UHF RFID）标准 ISO 18000-6 的批准大大激发了研究人员的兴趣，同时该标准还促进了微瓦特级别 UHF 功率整流器的研究工作的展开。事实上，微功率整流器并不仅仅适用于 RFID，其在远程传感器的能量收集模块中也有着广泛应用 [TEH 09]。

因为有大量的限制条件，设计一个应用于 UHF RFID 标签的集成电路并不是一项轻松的工作。

一个 RFID 标签的主要特征包括成本、标签和阅读器之间的通信距离以及与系统特性相关的处理时间。为了最小化成本，标签应该与其 IC 和相关天线一起制造，并且在随后的设计规则中也了解到多个部件和单独的部件都不应该独立设计。尽管只具有十分简单的无源结构，一个 RFID 标签也应该具有增值服务来完成 RFID 标签的特有功能，包括数据写入，制造历史或者分布进程数据的存储，防撞击读取以加速库存搜索或者安全功能去鉴别用户 [NAK 07]。

首先，如上所述，为了使零售的价格不要过高，我们所设计的 RFID 应答器的成本应该控制在几毛钱。因为整个产品的成本绝大多数集中在 IC 上，这也就意味着选择较低成本的 VLSI 设计技术对一些问题的设计并不是最好的选择，例如整流器的设计。除此之外，一个标签 IC 设计师必须能够解决较低的电源电压、极低的

功耗、高输入功率动态范围以及高效的天线匹配所带来的挑战。因为读取距离由一个被动后向散射的 UHF RFID 系统中的前向链路来设定，这也就意味着对于一个射频集成电路来说最小化接通功率是最重要的约束。

一些制造商小心翼翼地保护着他们关于设计和制造工艺的秘密。他们销售的产品具有和实验室研究相同的性能。一些在文献中尚无法使用的观点，比如控制从远场到近场的接收功率的分流电阻的最佳选择，已经在实际产品中得到使用。本章旨在使读者理解标签集成电路的设计准则，特别是电压倍增器的设计准则。另外，本章还将介绍不同技术和电路拓扑的结构功率转换效率的性能表现。

1.2 集成电路架构

图 1.1 中显示了一个包括 IC 和匹配天线的完整无源应答器结构的标准框图。通常将其分为由直流电源供应组成的前端，解调器与调制器以及包括控制逻辑、电子擦除、具有电荷泵的电可擦编程只读存储器（EEPROM 的数字部分）。应答器必须从接收到的电磁场中吸收运行所需的功率。这部分功率主要被数字部分使用（经常能达到 70%），还有一部分功率用来完成前端接收由阅读器发出的数据和在标签与阅读器间通过后向散射进行的数据传输。调节器电路稳定了电压倍增器的输出电压，但同时在标签太过靠近基站的情况下也会保持电压倍增器的输入电压低于击穿电压。参考电压有时也被称为带隙基准源和必要输出电压（或电流）来保护电路（例如被用于调节器）。

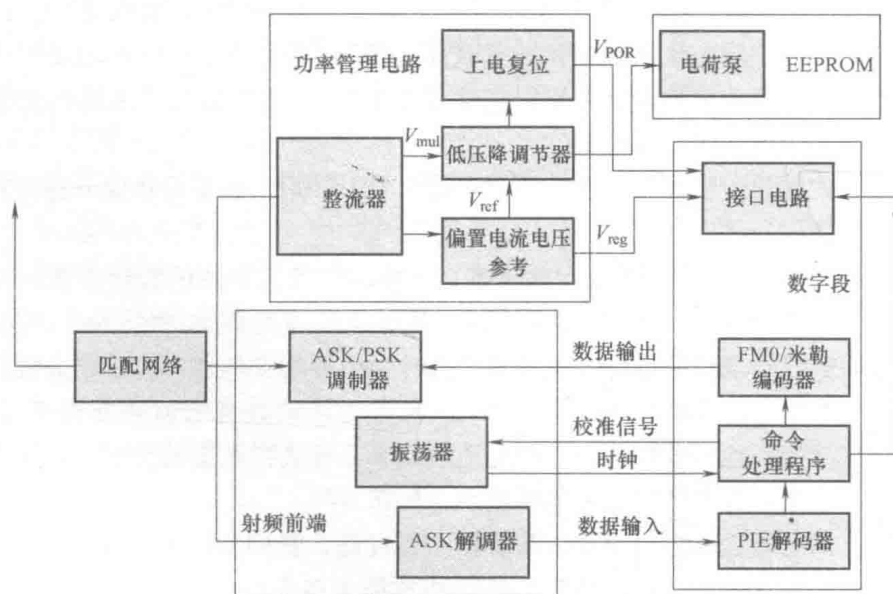


图 1.1 无源应答器结构

1.3 RF 到 DC 的转换：系统建模

实现应答器的高功效有两个目标。这里的功效定义为在应答器天线端的 RF 功率和用于供应应答器的直流模块输出端的直流功率的比值。第一个目标是天线和 IC 之间的功率匹配，第二个目标是考虑输出负载限制的 RF 到 DC 的转换。这里的负载限制包括最小化应答器的直流电压和最小化 IC 中负载的电流消耗（因此即使只定义了输出功率，其各自参数也需要分别满足 [BAR 09]）。所以，设计者面临的最大的挑战是在维持一个最小的直流电压和电流以供应应答器的条件下，使得整流器更加高效。

1.3.1 理想直流输出电压的选取

对于通信距离在几米内的 UHF RFID 应用来说，当考虑最小灵敏度时，入射信号的能级只有几百毫伏。因此，只能采用多级整流器。图 1.2 中显示了由 Karthaus 和 Fischer [KAR 03] 做了略微改动以满足交流到直流的转换的拓扑结构，该拓扑结构由 Dickson 在 1976 年首次提出使用。

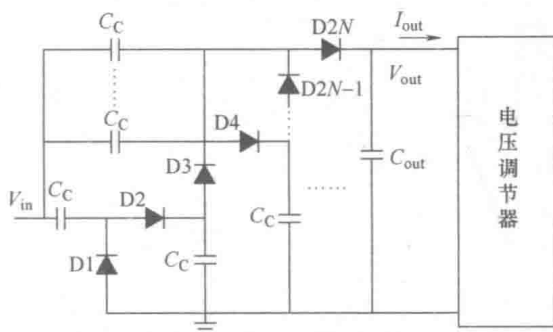


图 1.2 N 级半波电压倍增器和电压调节器

接收到的交流电压通过电压倍增器被转换为直流电压，随后通过电压调节器来平衡和保持 [DEV 05]。

基本单元通过钳位电路 C-D1 设置（见图 1.3a），该钳位电路通过收集在 C_c 的输出终端上的等效电荷使得输入信号的负值部分超过 0。等效电荷通过流经二极管 D1 上的地面与 IN 之间的充电电流循环得到。接下来，整流器电路检测钳位电路输出信号的峰值。之前通过 D2 和充电电流存储的电荷被传输到输出电容 C_{out} 。在理想条件下，可以写出钳位电路下的输出电压的表达式 [CUR 07]：

$$V_{out}(t) = \hat{V}_{in} + V_{in}(t) \quad (1.1)$$

式中， $\hat{V}_{in}$ 表示 $V_{in}(t)$ 的峰值，即电压倍增器的输入电压。因此，在这个理想模型

中, 钳位电路输出端可以输出的最大电压为 $2\hat{V}_{in}$ 。在整流电路的输出端, 该数值由平行电容 C_{out} 维持。

在实际情况下, 输出电压需要减去二极管上的电压降, 即

$$V_{out} = 2(\hat{V}_{in} - V_d) \quad (1.2)$$

式中, V_d 表示二极管上的电压降。

除此之外, 输出电压还会由于电容的电流泄漏、寄生并联电阻器和二极管的电流反转等电路元器件的缺陷而进一步降低。

图 1.3a 显示了通过级联两个电路得到半波双倍压器。

为了充分利用输入信号的极性, 必须使用图 1.3b 显示的全波双倍压器, 这也使得下面的电压调节器可以得到差分输入。

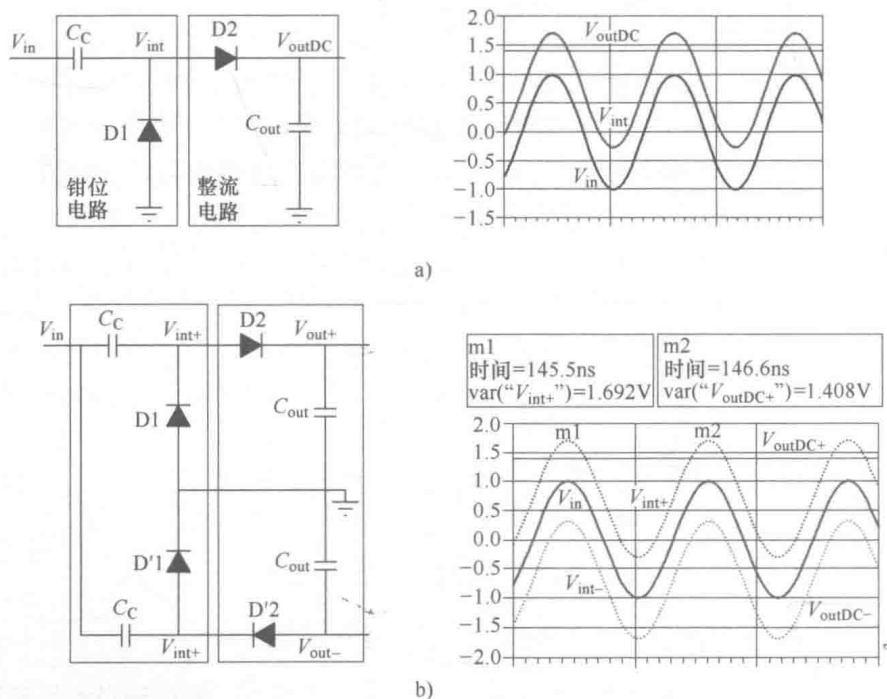


图 1.3 N 级电压倍增器的基本单元: a) 半波双倍压器 b) 全波双倍压器

当标签在远端时, 为了达到必要的输入电压 (其值依赖于 CMOS 技术, 但在实际中近似为 1.2V), 必须使用由 N 个基本单元串联成的 N 级电压倍增器。

那么, 在 N 级半波电压倍增器的输入和输出之间产生的电压为

$$V_{out} = 2N(\hat{V}_{in} - V_d) \quad (1.3)$$

在 DC 分析中, 电容表示开路, 所以在串联电路中有 $2N$ 个相同的二极管, 因此每个二极管上关于时间的压降可以写为

$$V_d(t) = \pm V_{in} \cos(\omega_0 t) - \frac{V_{out}}{2N} \quad (1.4)$$

1.3.2 实际直流输出电压的选取

事实上, 式 (1.3) 只是对电压的粗略近似求解, 因为该式中阈值电压被看作是常量。实际上, 肖特基二极管阈值电压是由直流电流 I_d 和饱和电流 I_s 通过电流与电压之间的指数定律决定的 (对于连接二极管的 MOS 来说, 是通过平方律决定的)。因此, 可以得到一个与二极管电流, 即实际中的负载电流呈对数关系的二极管前向电压降, 即

$$V_d \approx \eta V_{\text{thermal}} \ln \left(\frac{I_d}{I_s} \right) \quad (1.5)$$

式中, η 是二极管的非理想因子。因此考虑从属关系和通过饱和电流的工艺选择, 式 (1.5) 可以写成以下形式,

$$V_{\text{out}} = 2N(\hat{V}_{\text{in}} - V_d(I_d, I_s)) \quad (1.6)$$

在 UHF RFID 应用程序中, 输入电压的振幅相当微弱, 并且二极管在一个电压降严格依赖于电流的区域工作, 如图 1.4 所示。

如图所示, 当 I_s 是 200nA 时, 通过二极管的电流在 2~4 μ A 变化。因此, 电压降在 60~75mV 之间变化。

正如图 1.5 中对于一个 1.2pF 的耦合电容、一个 12pF 的输出电容和一个 120nA 的二极管饱和电流所进行的仿真 [BAR 09] 所示, 由于非线性关系二极管电流具有脉冲波形。

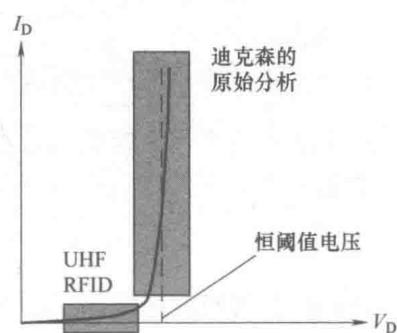


图 1.4 在迪克森的原始分析和 UHF RFID 应用程序中二极管的工作区域

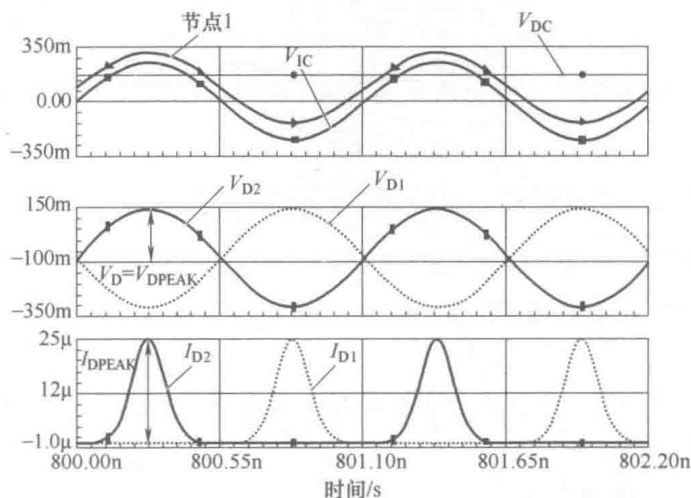


图 1.5 在稳定状态条件下, 在肖特基二极管双倍压器中的电压与电流

正如所看到的, 阈值电压不能被忽略, 因为它代表了近似 100mV 的下降 (依赖于 DC), 这个下降的数值与输入电压的振幅在一个数量级上。找到阈值电压的准确值很重要, 因为一个很小的误差在经过几个级数后就会被放大, 这样就会严重改变直流输出。

整流器的输出可以被视作电流源, 它的值由 IC 的电流损耗决定。也就是说, 由于电荷守恒, 在一次传导循环过程中瞬时电流的平均值与来自输出的负载电流相等, 在这个例子中 I_{out} 等于 $3.44\mu\text{A}$ [BAR 09]。因此, 如果输出 (或者负载) 电流增加, 峰值电流也会增加, 从而导致在式 (1.7) 中的平均电流增加, 即

$$\frac{1}{T} \int_0^T I_d(t) dt = I_{\text{out}} \quad (1.7)$$

类似的, 如果输入电压增加, 二极管电流的峰值也会增加, 并且这样会导致脉冲形状的改变。

因此, 从直流输出产生的观点来看, 输入电压和输出电流决定了二极管的电压降。事实上, 由于整流器的工作方式, 阈值电压仅仅只由电流 $\hat{I}_d$ 的峰值决定。因此, 直流输出电压最终形式如下, 即

$$V_{\text{out}} = 2N \{ \hat{V}_{\text{in}} - V_d [\hat{I}_d(\hat{V}_{\text{in}}, I_{\text{out}}), I_s] \} \quad (1.8)$$

在由余弦函数的指数形式的修正贝塞尔函数描述的电流和电压关系的基础上, 一些作者 (像 De Vita 和 Iannaccone [DEV 05]) 建立了一般 N 级整流器的输入输出关系:

$$\left(1 + \frac{I_{\text{out}}}{I_s} \right) \exp \left(\frac{V_{\text{out}}}{2\eta N V_{\text{thermal}}} \right) = B_0 \left(\frac{\hat{V}_{\text{in}}}{\eta V_{\text{thermal}}} \right) \quad (1.9)$$

在这里, 可以清楚地知道设计者选择 V_{out} 作为目标输出参数, 而 I_{out} 为因变量 [TEH 09]。

1.3.3 寄生效应和电容量在输出电压上的影响

到目前为止, 只考虑了阈值电压作为主参数决定直流输出电压的情况。但是, 在实际中其他参数对它也会有一定影响, 如二极管模型、耦合和控制电容器的参数。

为了解决上述问题, 首先, 需要知道什么是非理想性以及对于整流器的每个元素寄生效应出现在哪。

1. 有源元件的寄生效应

2003 年, Karthaus 和 Fischer 首先声明 [KAR 03], 对于作为转换器的电荷转移器件, 设计者可以在肖特基二极管和金属氧化物半导体场效应晶体管