

射频电路设计

Radio Frequency Circuit Design

(美) W. Alan Davis 著
Krishna K. Agarwal

李福乐 等译
王志华 审校

Wiley Series in Microwave and Optical Engineering
Kai Chang, Series Editor

RADIO FREQUENCY CIRCUIT DESIGN

W. ALAN DAVIS
KRISHNA K. AGARWAL



机械工业出版社
China Machine Press



电子与电气工程丛书

射频电路设计

Radio Frequency Circuit Design

(美) W. Alan Davis 著
Krishna K. Agarwal

李福乐 等译
王志华 审校



机械工业出版社
China Machine Press

本书讲述射频电路设计的基本原理和应用,涉及滤波器、阻抗变换器、小信号放大器、振荡器、噪声理论和A类/B类/C类大信号放大器,以及混频器和锁相环等。作者采用大量当前在放大器和电路设计中广泛使用的散射参数。书中还提供了大量的SPICE网表和设计实例,对工程实践有一定的参考价值。

本书适合作为通信、电子工程及相关专业本科生或研究生的教材或参考书。对于射频元件设计和微波电路设计方面的工程技术人员,也是一本有价值的参考书。

W. Alan Davis, Krishna Agarwal: Radio Frequency Circuit Design (ISBN: 0-471-35052-4)

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

Copyright © 2001 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved.

本书中文简体字版由约翰·威利父子公司授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书版权登记号:图字:01-2004-6186

图书在版编目(CIP)数据

射频电路设计 / (美)戴维斯(Davis, W.A.)等著;李福乐等译. - 北京:机械工业出版社, 2005.9

(电子与电气工程丛书)

书名原文: Radio Frequency Circuit Design

ISBN 7-111-17102-0

I. 射… II. ①戴… ②李… III. 射频电路-电路设计-高等学校-教材 IV. TN710.02

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第089423号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑:傅志红

北京京北制版厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005年9月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·16.75印张

印数:0 001-4 000册

定价:35.00元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010) 68326294

译者序

当前,以手机为代表的移动通信技术飞速发展,并带动了信息产业的整体发展。根据最新出版的“国际半导体技术发展路线图”(ITRS),2003年手机的年销售量已经超过四亿台,无线局域网设备的销量也达到数千万件。随着技术的进步,工业界不断推出性能更高、功耗更低的通信产品,而在通信领域工作的工程师们对射频电路设计方法学的需求也日益增长。本书的两位作者,一位来自高等院校,一位来自工业界。他们基于多年从事射频电路研究和教学的经验,发挥各自的特长,合作编纂了这本著作,并且被美国众多高校采纳为射频电路课程教材。

本书讲述了滤波器、阻抗变换器、小信号放大器、振荡器、噪声理论和A类/B类/C类大信号放大器,以及混频器和锁相环等。作者采用大量当前在放大器和电路设计中广泛使用的散射参数。书中还提供了大量的SPICE网表和设计实例,对工程实践有一定的参考价值。

本书适合作为本科高年级或研究生一年级射频电路设计课程的教材或参考资料,对于射频元件设计和微波电路设计方面的工程技术人员,也是一本有价值的参考书。

清华大学微电子学研究所王志华教授指导并审核了本书的译稿。清华大学微电子学研究所李福乐博士负责本书的翻译工作。参加本书翻译工作的人员还有:黎何、潘荣、陈文松、王旭、吴晓鹏、刘彤芳、王继祥、周屹、王洪波等。

译者
于清华园

译者简介

李福乐是清华大学微电子学研究所助理研究员,分别于1996年7月和1999年4月获得西安电子科技大学工学学士和硕士学位,于2003年4月获得清华大学工学博士学位,博士毕业后留校工作至今。期间曾参与“97-3”国家重点基础科学研究项目的研究,有多次成功研制芯片的经验。发表论文十余篇。目前主要研究领域为模拟和数模混合集成电路设计。

限于译者水平有限,加上时间比较仓促,中译本中难免有错误与不妥之处,恳请读者批评指正。

前 言

移动电话的广泛应用已经成为当前通信业务飞速发展的重要印证。在手机这个小小的塑料容器中，包含着无数工程师的智慧，涉及高效电源、数字电路设计、模拟电路设计、半导体器件设计、天线、线性系统、数字信号处理、封装和材料科学等领域。这些领域内的天才工程师们通力协作，使得世界各地的人们能够方便快捷地使用瞬时通信技术。所有这些活动的一个特别要点，也是本书关注的重点，是模拟电路设计领域中的射频电子学技术。一些通常在电子学课程或微波和天线课程中讨论的课题，不包含在本书的讨论范围之内。例如，由于分布式支线耦合器 (distributed branch line coupler) 在1 GHz频率下的尺寸令人望而却步，所以本书没有研究它。而传输线变换器 (transmission line transformer) 在这个频率范围内非常适用，所以在本书中对它进行了讨论。

本书的读者应该对电子工程技术有相当程度的了解。本书曾经作为位于阿灵顿的得克萨斯大学四年级和研究生的射频电路设计教材。在过去的20年中，至少有4位教师讲授过这门课程（其中有两位是本书的作者），且受到学生们的广泛欢迎。由于近年来通信领域的研究十分活跃，因此，大家对这些课程越来越感兴趣。作者希望能够更新书中的内容，同时避免简单重复地讲解微波方面的内容。

十分感谢Raytheon Systems公司的Michael Black先生对第12章“锁相环”所做的讨论。

W. Alan Davis
Krishna Agarwal

目 录

译者序		4.5 传输线方程	49
前言		4.6 史密斯圆图	50
第1章 通信信道	1	4.7 常用的传输线	51
1.1 基本的发射机-接收机结构	1	4.8 散射参数	59
1.2 信息和容量	3	4.9 不定导纳矩阵	62
1.3 相关状态	4	4.10 不定散射矩阵	64
习题	6	习题	65
参考文献	6	参考文献	65
第2章 电阻器、电容器和电感器	7	第5章 滤波器设计与近似	67
2.1 概述	7	5.1 概述	67
2.2 电阻器	7	5.2 理想和近似滤波器的类型	67
2.3 电容器	11	5.3 传递函数和基本滤波器概念	69
2.4 电感器	15	5.4 梯型网络滤波器	70
习题	23	5.5 椭圆滤波器	74
参考文献	23	5.6 非平衡阻抗之间的匹配	74
第3章 阻抗匹配	25	习题	82
3.1 概述	25	参考文献	82
3.2 品质因数 Q	25	第6章 传输线变换器	83
3.3 谐振与带宽	26	6.1 概述	83
3.4 无负载品质因数 Q	27	6.2 理想传输线变换器	83
3.5 L型电路阻抗匹配	28	6.3 传输线变换器综合	86
3.6 π 型变换电路	30	6.4 电学长传输线变换器	87
3.7 T型变换电路	32	6.5 平衡-非平衡变换器	91
3.8 分支电容变换器	33	6.6 分配器和组合器	92
3.9 并行双调谐变换器	35	习题	95
习题	38	参考文献	95
参考文献	39	第7章 A类放大器	97
第4章 多端口电路参数和传输线	41	7.1 概述	97
4.1 电压-电流双端口参数	41	7.2 增益的定义[2]	97
4.2 $ABCD$ 参数	43	7.3 双端口变换器的功率增益	97
4.3 对等阻抗	43	7.4 使用 S 参数表示的功率增益	98
4.4 传输线波动方程	47	7.5 对最大功率增益的同时匹配	101

7.6 稳定性	102	10.8 注频锁相振荡器	166
7.7 A类功率放大器	110	10.9 谐波发生器	168
7.8 功率放大器的功率组合	112	习题	171
习题	113	参考文献	172
参考文献	113	第11章 射频混频器	173
第8章 噪声	115	11.1 非线性器件特性	173
8.1 噪声源	115	11.2 混频器的品质因数	176
8.2 热噪声	115	11.3 单端混频器	177
8.3 散粒噪声	117	11.4 单平衡混频器	178
8.4 噪声电路分析	119	11.5 双平衡混频器	179
8.5 放大器噪声特征描述	120	11.6 双平衡晶体管混频器	183
8.6 噪声测量	121	11.7 伪频率响应	186
8.7 有噪声的双端口网络	122	11.8 单边带噪声系数和噪声温度	188
8.8 双端口噪声系数推导	122	习题	191
8.9 晶体管的福井噪声模型	125	参考文献	191
8.10 级联放大器的特性	128	第12章 锁相环	193
8.11 具有最佳增益和噪声的放大器设计	130	12.1 概述	193
习题	131	12.2 锁相环设计背景	193
参考文献	131	12.3 锁相环应用	193
第9章 射频功率放大器	133	12.4 锁相环基础	194
9.1 晶体管结构	133	12.5 环路设计原则	195
9.2 B类放大器	134	12.6 锁相环的组成	196
9.3 C类放大器	140	12.7 锁相环的线性分析	199
9.4 C类放大器的输入偏置电压	144	12.8 锁相环的锁相过程	201
9.5 D类功率放大器	144	12.9 锁相环的类型	203
9.6 F类功率放大器	145	12.10 锁相环中的负反馈	204
9.7 前馈放大器	149	12.11 锁相环设计方程	205
习题	151	12.12 锁相环振荡器	210
参考文献	152	12.13 鉴相器类型	210
第10章 振荡器和谐波发生器	153	12.14 设计实例	213
10.1 振荡器基本原理	153	习题	215
10.2 反馈理论	153	参考文献	215
10.3 有外部反馈的双端口振荡器	154	第13章 新兴技术	217
10.4 振荡器实例	158	13.1 概述	217
10.5 对反射系数的最低要求	160	13.2 带宽	218
10.6 共栅极(共基极)振荡器	161	13.3 频谱节约技术	219
10.7 振荡器的稳定性	164	13.4 移动性	219

13.5 无线互联网接入	219	附录E 带有负载的晶体管端口的终端 ...	232
13.6 关键技术	220	附录F 晶体管和放大器公式	235
参考文献	221	附录G 使用SPICE进行频域变换测量	240
附录A 螺线管设计实例	223	附录H 对双平衡混频器的单频交调失真 抑制	251
附录B 螺旋电感解析模型	224	索引	254
附录C 双调谐匹配电路实例	227		
附录D 双端口参数变换	228		

第1章 通信信道

1.1 基本的发射机-接收机结构

射频 (Radio Frequency, RF) 电路的设计既借鉴了低频音频电路的设计方法, 又借鉴了微波电路的设计方法, 但是和这些技术是有重要的差异的。因此, 射频电路的设计需要使用一些在其他频率范围内不使用的特殊技术。在当前的应用中, 射频的范围一般指300MHz到3GHz。当前的多数无线电通信活动都在这个范围内发生。在这个频率范围内, 工程师必须要考虑辐射、寄生耦合, 以及电路元件的频率响应——以集总 (lumped) 的观点进行的低频分析可能将这些元件看做与频率无关。同时, 使用常规的微波电路元件, 如1/4波变换器等, 需要的线太长, 因此是不现实的。单片集成电路可以使用集总元件实现高频电路设计, 然而, 需要仔细考虑这些“集总”元件的频率响应。

当前, 射频和数字设计已经开始越来越接近, 所以, 在典型的通信系统设计中, 需要将射频和数字设计原则结合在一起考虑。尽管直接将射频信号数字化仍然存在困难, 但是在很多通信系统中数字信号处理正在扮演着越来越重要的角色。一个典型的无线电模拟发射机和接收机如图1-1所示。在这个系统中, 信息源可以是音频或视频信号。待处理的信号, 例如声音信号, 被传感器转换为一个非常小的电压值, 然后被音频放大器放大。

1

图示的调制器作为混频器, 可以由一系列不同的调制方案来实现。两种最主要的方案是模拟调制和数字调制。任何一种方案中, 调制器都需要实现两个功能。第一个功能是以某种方式对消息进行编码, 以满足通信通道的需求, 如成本、抗噪性、信号衰减、可用的带宽、带宽效率 (在给定的带宽下单位赫兹的数据吞吐率)、功率效率 (用于衡量系统在较低功耗情况下对信息的保持能力) 等。

在调幅 (AM) 的情况下, 混频器是一个乘法器, 它将信息信号和本机振荡器的频率相乘。两个正弦波相乘, 产生了和频和差频, 这样, 信号频率就被叠加到本机振荡器频率上, 这就产生了能够实践应用于无线通信的两种效应。第一个是形成多个信道, 在调幅和调频 (FM) 模拟系统中, 它通过不同的频带来分离; 否则, 不同信号间将有很大的干扰。这种分离信号的方法称为频分多址 (Frequency Division Multiple Access, FDMA)。另一种方法称为时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA), 在这种方法中, 两个或多个信号可以共享相同的频带, 但在不同的时间段使用。人耳在接收时, 可以将这些不同的时间段结合起来, 感觉上就像信号是连续的一样。第三种方法是扩展频谱技术, 称为码分多址 (Code Division Multiple Access, CDMA)。在这种方法中, 多个用户连续使用一个较宽的频带。然而, 每个用户发送和接收数据时, 使用独特的方式进行编码, 以便能够和其他用户区分开来。如果在不同的用户之间存在干扰的话, 这个干扰表现为低水平的噪声。

调制器的第二种功能是将消息信息转换为频率高得多的射频信号, 这样, 才能使天线的机械尺寸和波长一致, 使天线能被控制在合理的尺寸上。人们花费了巨大的努力试图制作出

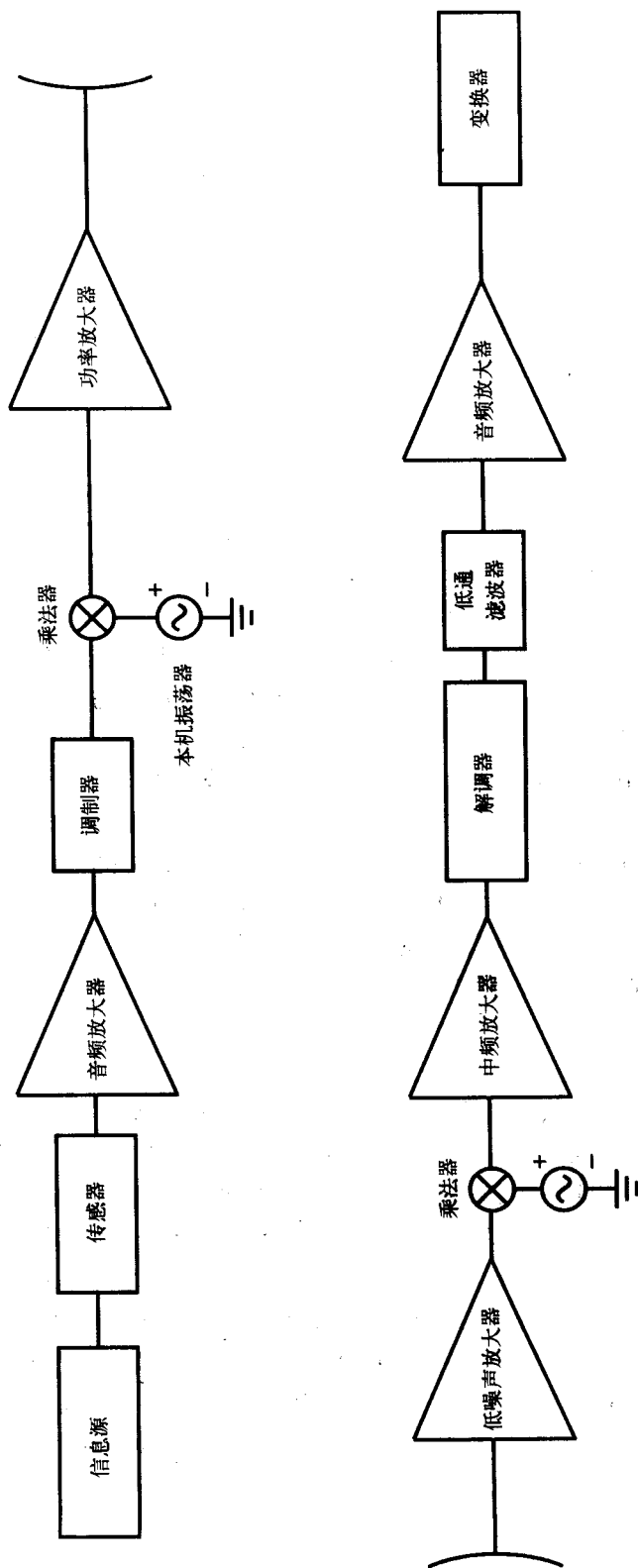


图1-1 通信发射机和接收机

更小的天线，但是仍然总是需要将各种设计折中。

在信号到达天线以前经过的最后一级是功率放大器。由于这个元件使用大功率，因此高效率是个重要的因素。在调频系统中，通常使用C类放大器，在实践中，它可以实现高达70%的效率。对调幅系统，由于调幅信号传输过程中对线性的要求，通常使用A类或AB类放大器。然而，A类放大器的效率通常只有30%~40%。

对于接收机而言，收到的信号有时候足够强，可以直接送到混频器中。然而，如本书第8章所述，在前端使用一个低噪声放大器，可以极大地提高放大器的整体噪声响应。接收机中的解调器必须要和发射机中的调制器相对应。后续的中频（IF）放大器中，滤波器必不可少，它用于实现对接收的信号的选择。为了抑制 $1/f$ 噪声（ f =频率）和闪烁噪声（flicker noise），应该选择足够高的IF频率。由于这个电路工作频率固定，因此，可以对它进行仔细的调谐，以达到最佳性能。

1.2 信息和容量

射频通信系统提供了一种从发射机向接收机传送信息的方法。那么，什么是信息的确切定义呢？韦伯斯特字典是这样解释的：“信息”（information），是“与特定的事实或情形相关的被传送或接收的知识”。一个比较狭义的技术性定义与我们对“信息”的关注焦点更为一致：“信息是指可能选择的消息数，可以表示为选择数的单调函数，通常是以2为底的对数”。因此，“信息”这个术语指的是可以被编码以用于数字处理的数据。

阐明信息含义的一些数据的例子是很有帮助的。如果通信信道中传送的数据是不变的，那么它没有传送任何信息。因此，在传送信息的时候，必须要有变化发生。如果信号由“1 0 1 0 1 0...”组成，那么尽管这个信号存在变化，但是也没有包含任何信息，因为下一个比特可以准确预测。因此，虽然变化是很重要的，但是它并不是信息的惟一标准。最后再举一个例子。如果调幅系统中的信号只包含完全随机的电压波动，那么还是没有传送任何信息。这只是一个噪声信号，接收机收到这个信号以后也无法了解更多有意义的内容。

通信系统由发射机、接收机和信道（channel）组成。信道只能传送有限的信息。可以做一个粗糙的比喻：信息信道可以比作水管，因为水管的直径有限，因此它只能传送一定量的水。这种限制，用技术术语表示，称为“容量（capacity）”。它指的是在一定的时间段 T 秒内传送的信息量。时间段可以被进一步分为更短的时间段，每段持续时间为 τ 。显然，在总的时间段 T 内包含的独特的小时间段 τ 越多，那么可以传送的信息量也就越大。能够在多大程度上将一个时间段的脉冲信号与相邻时间段的脉冲信号区分开来，决定了 τ 的最小值。时间段的最短极限与信道的带宽有关。

此外，信号电压的最大幅度受到可用的系统电源电压的限制。电压范围可以分为很多不同的电平，每个电平都代表一个与其他比特区别的信息比特。由于系统中总会存在噪声，因此电压的范围不能被无限地分割。显然，在给定的时间段 τ 内可传送的电平数越多，系统的信息容量也就越大。正如水在水管中的流动受到水压、管壁的摩擦力和水管直径的限制一样，一个传输系统的容量受到最大的电平值、系统的噪声（它会使得系统中不同的电平变得混淆不清）以及信道带宽（与系统中信号脉冲的上升时间有关）的限制。

假设在一个时间段 τ 中，有 n 个电平。 τ 越小， n 越大，则能够在信道中传送的信息量也就越多。在每个时间段中有 n 个可能的电平值。在下一个时间段也有 n 个可能的电平值。假设在

每个时间段中传送的电平和其他时间段的电平是相互独立的。那么，在总的时间 T 秒内能够传送的总的信息量等于在每个时间段内可能的电平数的乘积：

$$n \cdot n \cdot n \cdot n \dots n^{T/\tau} \quad (1-1)$$

可以很直观地得到这样的结论：传输的信息总量和总的时间跨度 T 成正比，并被定义为以上乘积的对数值。习惯上，一般取以2为底的对数。

$$H = \frac{T}{\tau} \log_2 n \quad (1-2)$$

系统的容量就是在这个系统中最大的传输速度（rate of transmission，以比特/秒为单位）：

$$C = \frac{H}{T} = \frac{1}{\tau} \log_2 n \quad (1-3)$$

系统容量与传送单位信息量所需的最小时间 τ 成反比。此外，随着可用的电平数的增加，信息容量也随之增加。

信息可以以不同的形式在信道中传送，所有的方式都能得到等量的信息。例如，假如一个信号在给定的时间 τ 内，可取8个不同的电平值0、1、…、7中的任何一个。但是这8个信号电平也可以仅使用两个不同的电平0和1来传送。对每个使用八电平的时间段，传送二电平信号时，就需要占用3个时间段。一个简明的转换关系如表1-1所示。

表1-1 八电平和二电平系统

$n = 8$	$n = 2$	$n = 8$	$n = 2$
0	000	4	100
1	001	5	101
2	010	6	110
3	011	7	111

5

显然，16电平信号可以通过一个包含4个二进制信号的序列来传送，32电平信号可以通过5个二进制信号序列来传送，依此类推。对 n 个不同的电平，需要有 $\log_2 n$ 个比特。信号的信息量被定义为需要传输的二进制选择（或比特）的数量。一个系统，如果设计为传输语音信号，那么它要具备传输语音中所包含的信息的能力。尽管语音并不是人们交流和通信的全部内容，但是在通信系统中，它仍然是工程师们工作的主要内容。必须要决定以什么样的保真度来传送语音信号，这相当于模拟系统的带宽需求问题，或一个给定的总电压范围内可用的电平数问题。即使使用复杂的编码技术，也仍然会存在这种限制。系统的容量必须要大于或等于需要传送的信息速度。除容量之外，还需要考虑系统成本、功率水平，以及可用的传输媒介等问题。

1.3 相关状态

在前一节的定义中隐含着一个假设，即：在每个时间段 τ 中的电平值与其他时间段中的电平值完全无关。然而，情况并不总是这样。一个简单的例子是英语语言的传送。我们都知道，在英语中，字母e的出现频率要远远高于字母z。并且可以几乎肯定，字母q的后面是字母u。因此，在用英语传输一个典型的信息的时候，发送的实际信息量要比字母表中每个字母出现机会均等情况下的信息量要小。可以利用概率的观点来说明这点。如果每个时间段都是彼此独立的，那么，我们感兴趣的一个信息在 T 秒内可能出现的信号组合方式的总数为 n^T/τ 。平均

而言, 每一个可能的 T 秒长的信息的发生概率为 $1/n^{T/\tau}$ 。

概率可以用式(1-4)的形式来表示:

$$P = \frac{\text{一个特定事件的发生次数}}{\text{总的事件数}} \quad (1-4)$$

如果 n 个不同的事件被指定为 n 个电平值, 并且每个事件发生的可能性是相同的, 那么, 以概率来衡量信息为: $P = 1/n$ 。对于任何一个事件, 被传输的信息记作 $H_1 = -\log_2 P$ 。对 m 个时间段, 假设每个时间段为 τ 秒长, 那么总的信息量为 m 倍。因此, 对 m 个时间段, 使用概率表示的信息如式(1-5)所示:

$$H = \frac{T}{\tau} \log_2 n = -m \log_2 P \text{ 比特} \quad (1-5)$$

考虑一个二进制系统中, 数值0发生的概率为 p , 而数值1发生的概率为 q 。我们已经知道 $p + q = 1$, 需要找出一个由0和1组成的消息的信息内容。总的信息是0和1所携带的信息之和: 6

$$H = -\frac{T}{\tau} (p \cdot \log_2 p + q \cdot \log_2 q) \text{ 比特} \quad (1-6)$$

如果 p 和 q 发生的概率都是0.5, 那么在 T 秒内的总信息量是 T/τ 。如果 p 和 q 的出现概率不等, 例如, $p = 0.25$, $q = 0.75$, 那么:

$$H = -\frac{T}{\tau} (0.25 \cdot \log_2 0.25 + 0.75 \cdot \log_2 0.75) \text{ 比特}$$

$$H = \frac{T}{\tau} (0.5 + 0.3113) = 0.8113 \frac{T}{\tau} \text{ 比特} \quad (1-7)$$

因此, 一个预期事件发生的概率越大, 它所包含的信息量就越少。当 p 接近于1且 q 接近于0时, 概率为 p 的几乎肯定要发生的事件的信息量为零。信息量最大的情况出现在 $p = q = 0.5$ 的情况下。

可以将上述情况推广到在给定的信号时间段 τ 内具有 n 个信号电平的情形。假设这 n 个信号电平中的任一个信号电平 s_i 的发生概率为 P_i , 并且有如下关系:

$$P_1 + P_2 + \cdots + P_n = \sum P_i = 1 \quad (1-8)$$

进一步假设找到一个信号电平出现的概率与其相邻的信号电平值无关, 那么在 T/τ 个时间段或 T 秒内的总的信息量为:

$$H = -\frac{T}{\tau} \sum_i^n P_i \log_2 P_i \text{ 比特} \quad (1-9)$$

传输这么多信息量所需要的系统容量为:

$$C = -\frac{1}{\tau} \sum_i^n P_i \log_2 P_i \text{ 比特/秒} \quad (1-10)$$

当每种信号电平出现的概率相同时, 即: $P_1 = P_2 = P_3 = \cdots P_n = 1/n$, 则对 n 电平的信号, 有:

$$H = -\frac{T}{\tau} \sum_i^n P_i \log_2 P_i = \frac{T}{\tau} \log_2 n \text{ 比特} \quad (1-11)$$

关于信息传输的更多细节可以参考其他文献，例如Schwartz著作[1]中的简要介绍。总体来讲，本书中所讨论的射频电路设计，关注的重点是在发射机和接收机中使用的基础的硬件设计。通信工程师们感兴趣的其他课题，如数字信号处理芯片的编程、调制方案、电磁传播等，在相关领域内的专门教材中有更为详尽的讨论。在本书中，这些内容只是在阐明系统实现方法时才有所涉及。

7

习题

1.1 通过一个最大容量为 25×10^3 比特/秒的信道传送脉冲序列，这个脉冲序列有16个信号电平。

(a) 脉冲宽度是多少？

(b) 如果脉冲宽度加倍，并通过相同信道送回，那么，需要的电平数是多少？

参考文献

8

- [1] M. Schwartz, *Information Transmission, Modulation, and Noise*, 3rd ed., New York: McGraw-Hill, 1980, Ch. 1.

第2章 电阻器、电容器和电感器

2.1 概述

与低频设计相比,在射频设计中必须要更加仔细地考虑无源电路元件问题。在高频电路设计中,简单的电阻器、电容器或电感器不能再视为单纯的电阻、电容或电感元件。通常,“集总”元件最好能够以这些单纯元件组合的形式来建模。此外,当元件的尺寸在电路媒介中大于0.1倍的波长时,其等效电路应包括传输线。

2.2 电阻器

集成电路中的电阻器可以分为以下3种类型:(1)半导体膜;(2)淀积的金属膜;(3)金属陶瓷(cermet,金属和介质材料的混合物)。在这些类型的电阻器中,只有前两种广泛应用于高频电路中。半导体膜可以通过向半绝缘的衬底上进行扩散、淀积多晶硅层或向指定的区域内进行杂质的离子注入等方法制备。多晶硅(polysilcon,或polycrystalline silicon)由很多晶向随机的微小的亚微米硅晶体组成。

2.2.1 电阻器类型

集成电路电阻器的阻值取决于电流流经通道的电导率。对半导体衬底上的扩散电阻,电导率是掺杂浓度和载流子迁移率的函数。电导率为:

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p) \quad (2-1)$$

它通常使用 $(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ 为单位来表示。在这个表达式中, q 是电子电荷($1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$), μ_n 和 μ_p 是电子和空穴的迁移率($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$), n 和 p 分别是可用于传导电流的自由电子和空穴的数目(cm^{-3})。在室温下,可以假设半导体中所有的杂质原子都已经离子化。这意味着对n型半导体来说,可用的电子数和施主杂质的浓度相同:

$$n_n \approx N_D \quad (2-2)$$

同样地,对p型半导体而言,空穴的数量和受主杂质的浓度相同:

$$p_p \approx N_A \quad (2-3)$$

在n型或p型半导体当中,电子浓度与空穴浓度之间的关系为:

$$np = n_i^2 \quad (2-4)$$

在上式中,硅的 $n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$,砷化镓的 $n_i = 9.0 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 。这称为质量作用法则(mass action law)。因此,对于n型半导体,其电导率为:

$$\sigma = q \left(\mu_n N_D + \mu_p \frac{n_i^2}{N_D} \right) \approx q \mu_n N_D \quad (2-5)$$

典型情况下, 在集成电路中更倾向于使用 n 沟FET和NPN型双极晶体管, 因为电子的迁移率要比空穴的迁移率大得多。在电路设计中, 需要的总工艺步骤数通常决定了电阻沟道类型的选择。

理想情况下, 电导率为 σ 的扩散电阻器可由如图2-1所示的矩形块表示, 矩形块的电阻为:

$$R = \frac{L}{\sigma WT} \quad (2-6)$$

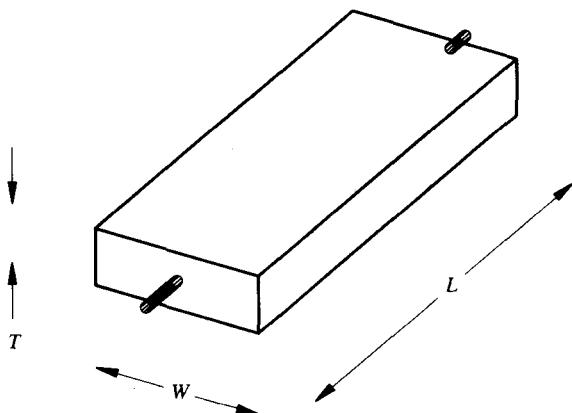


图2-1 长度为 L , 宽度为 W , 高度为 T 的扩散电阻器

一般情况下, 将电阻的工艺因素和版图因素分开会给工作带来便利。可以定义方块电阻 (sheet resistance, 其单位为 $\Omega/\square$) 为:

$$R_{\square} = \frac{1}{\sigma T} \quad (2-7)$$

这样, 总的电阻为:

$$R = R_{\square} \frac{L}{W} \quad (2-8)$$

10

可见, 一旦电导率和层的厚度确定后, 长宽比决定了电阻值。

表2-1 电阻器材料

电阻器类型	电阻值范围	温度系数	电压系数
硅扩散电阻	(10~100) $\Omega/\square$	1500 ppm/ $^{\circ}\text{C}$	200 ppm/V
砷化镓扩散电阻	(300~400) $\Omega/\square$	(3000~3200) ppm/ $^{\circ}\text{C}$	—
多晶硅电阻	(30~200) $\Omega/\square$	1500 ppm/ $^{\circ}\text{C}$	100 ppm/V
离子注入电阻	(0.5~2) $\text{k}\Omega/\square$	400 ppm/ $^{\circ}\text{C}$	800 ppm/V
AuGeNi (合金后) 电阻	2 $\Omega/\square$	—	—
铬薄膜电阻	13 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	3000 ppm/ $^{\circ}\text{C}$	—
钛薄膜电阻	(55~135) $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	—	—
钽薄膜电阻	(180~220) $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	—	—
氮化钽 (TaN) 薄膜电阻	280 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	—	—
镍 (Ni) 薄膜电阻	7 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	—	—
镍铬合金 (NiCr) 薄膜电阻	(60~600) $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	—	—

资料来源: 参考文献[1~3]。

金属膜是通过在衬底上蒸发适当的金属制备出来的, 其图案由光刻决定。金属膜通常比

半导体膜的特性好，因为它对温度和电压变化的敏感性更低。表2-1列出了一系列方法和材料的主要特性。温度和电压系数是衡量电阻在某个给定的参数情况下电阻值变化的百分比函数。温度系数的定义为 $(dR/dT)/R$ ，电压系数为 $(dR/dV)/R$ 。

2.2.2 由版图决定电阻值

电阻器的版图形状通常是一个简单的矩形条，如图2-1所示。然而，有时候为了对电路版图进行整体优化，尝试一下不同的形状可能会更好。一个决定两点间任意形状的电阻值的简便方法是曲线方块法（method of curvilinear square）。当然，也可以使用基于计算机的数值方法，例如有限元技术（finite-element technique）。然而，使用纸和铅笔，在20分钟内也可以获得精确度在10%~20%之间的答案。

曲线方块（curvilinear rectangle）可以被定义为“在相对的两边由流线（flux line）限制，而另两边受等势线（equipotential line）限制的任意区域”[4]。这些矩形可以被划分为或进一步细分为更小的方块。这样，根据式（2-8），总的电阻值可以通过数方块来确定。

与其评估曲线方块是否是严格的矩形，不如使用圆规或模板在两条流线之间画圆。每个曲线方块在它的四边都与它的内切圆相切。

曲线方块法如图2-2所示。使用该方法作图时，有以下步骤：

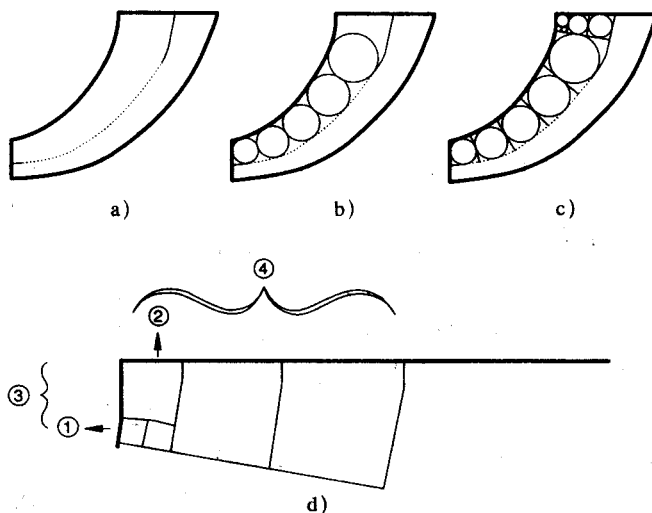


图2-2 a) 有流线形状的电感器；b) 加入切线圆；c) 画出最合适的曲线方块；
d) 对c) 进行小曲线方块的扩充

(1) 在两个电极之间画两条流线，就像是水在两个电极间的薄层内流动一样。两条流线之间的间距不如流线的形状重要。流线应该和电极成适当的角度。

(2) 在两条相邻的流线之间，画出一系列和流线相切并且彼此外切的圆。

(3) 在这些圆之间，画出与流线正交的等势线。

(4) 如果还有更多剩余的没有画上圆的方块，则在正交的方向上用切线圆来填满这些方块。继续进行这项工作，直至最后一个矩形已经足够接近正方形。

(5) 从最小的方块开始，计算所有串联的方块。取倒数，加上在正交方向上更大一行的