



普通高等教育“十五”国家级规划教材配套参考书

通信电路原理学习指导书

陈雅琴 李国林 编

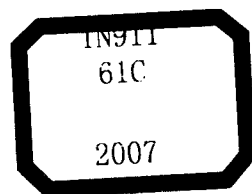


高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材配套参考书

通信电路原理学习指导书

陈雅琴 李国林 编



高等教育出版社
Higher Education Press

内容简介

本书为“通信电路原理”或“高频电子线路”相关课程的学习指导书。全书共分8章,包括绪论、滤波器、高频放大器、非线性电路、正弦波振荡器、调制与解调、锁相环路以及频率合成技术。每章的内容包括要点与教学要求、基本内容、例题分析、习题及部分参考答案四大部分。例题基本涵盖了本章的主要内容和难点,例题分析突出基本概念、解题思路和方法,希望能够帮助读者拓宽思路,加深理解课程内容。本书可与董在望教授主编的《通信电路原理》(第二版)教材配套使用,也可作为硕士研究生入学考试的复习参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

通信电路原理学习指导书/陈雅琴,李国林编. —北京:
高等教育出版社,2007.6

ISBN 978-7-04-021816-9

I. 通… II. ①陈…②李… III. 通信系统—电子电路—
高等学校—教学参考资料 IV. TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 049163 号

策划编辑 吴陈滨 责任编辑 许海平 封面设计 李卫青
责任绘图 朱 静 版式设计 史新薇 责任校对 王 超
责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 唐山市润丰印务有限公司

开 本 787×960 1/16
印 张 29
字 数 540 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2007年6月第1版
印 次 2007年6月第1次印刷
定 价 35.90元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 21816-00

前 言

“通信电路”或“高频电子线路”课程是当前各高等院校电子信息类专业的一门主干专业基础课程,讲述的是通信系统中射频信号传输所需要的主要功能电路的工作原理、分析方法及典型电路。由于该课程涉及的概念多、内容广、工程性强、分析方法类型多,使得学生在学习本课程时感到难度大,不易掌握。为此,我们从总结多年从事该课程教学实践的体会出发编写本学习指导书,希望能为读者掌握本课程的基本概念、基本原理、基本电路和基本分析方法提供指导与帮助。

关于通信电路方面的教材众多,内容编排上各有千秋,为了便于读者学习,我们在编写本学习指导书时,以董在望教授主编的《通信电路原理》(第二版)作为本书的参照教材。为阅读方便本书习题及部分参考答案中的习题和题图编号与参照教材一致。还增加了少量习题及参考答案。之所以选用这本教材,主要原因:一是我们在实际教学中一直采用这本教材,对教材内容比较熟悉;二是该教材作为普通高等教育“十五”国家级规划教材,并于2004年被评为北京市精品教材,有一定的代表性。

这里需要说明,虽然我们在章节安排上与参照教材相一致,但在内容选择上兼顾了其他同类教材,力图使本学习指导书有较好的适用性。并且根据当前通信电路的发展及教学的需要做了相应的扩展,以便与其他课程衔接和为读者学习这类课程提供一定的指导。

本学习指导书共分8章,各章均由要点与教学要求、基本内容、例题分析、习题及部分参考答案四部分组成。

(1) 要点与教学要求 简明扼要地说明本章中讲述的重点,并参照教育部高等院校电子信息与电气信息类基础课程教学指导委员会提出的对本课程的教学基本要求,明确指出本章内容中哪些需要重点掌握,哪些只需要一般了解,以帮助读者抓住重点,以点带面,提高学习效率。

(2) 基本内容 为使本学习指导书起到对学习的辅助作用,我们对本章的主要内容尤其是需要重点掌握的知识点从不同角度进行了分析和论述,以帮助读者建立概念,理解工作原理和特点。另外,在综合本章内容的基础上,力图总结出所包含的规律和主要结论,以帮助读者从整体上了解本章内容。在学习指导书中还适当补充了一些在教材内不宜展开而基础性又很强的内容,也适当补充了一些一般教材内容中涉及的一些常用参量的定义,以便于读者了解。

(3) 例题分析 各章的例题较为综合,力求通过每道例题的题意分析、求解与提示,帮助读者进一步理解和巩固基本概念,拓宽思考问题和解决问题的思路、方法和能力。

(4) 习题及部分参考答案 大部分习题给出了较为详尽的解题过程,少部分习题仅给出了最后答案和提示,还有个别习题仅有提示或者没有提示,对这部分习题请读者参考相关教材自行解答。

本书由陈雅琴、李国林编写。其中第1~5章由李国林执笔,第6~8章由陈雅琴执笔,雷有华教授给予了很大支持。

在本书的编写过程中,董在望教授对全书的内容提出了许多修改意见,对保证书稿质量起了重要的作用,作者表示衷心感谢。

本书出版还得益于高等教育出版社给予的关心和许多具体指导以及创造的良好编写条件,在此表示衷心感谢。

限于作者水平,书中难免有不妥或错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

2006年11月于清华大学

郑 重 声 明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》,其行为人将承担相应的民事责任和行政责任,构成犯罪的,将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序,保护读者的合法权益,避免读者误用盗版书造成不良后果,我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为,希望及时举报,本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话:(010) 58581897/58581896/58581879

传 真:(010) 82086060

E - mail: dd@hep.com.cn

通信地址:北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编:100011

购书请拨打电话:(010)58581118

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 本章要点与教学要求	1
1.2 基本内容	2
1.2.1 通信系统的基本概念	2
1.2.2 信号传输的基本问题	3
1.2.3 通信电路的基本形式	4
1.2.4 必要知识点	5
1.3 例题分析	9
1.4 习题及部分参考答案	10
第 2 章 滤波器	11
2.1 本章要点与教学要求	11
2.2 基本内容	12
2.2.1 LC 谐振回路	12
2.2.2 射频无源元件	14
2.2.3 实际 LC 并联谐振回路等效	16
2.2.4 负载对并联谐振回路的影响	17
2.2.5 部分接入法	18
2.2.6 匹配	21
2.2.7 阻抗变换网络(阻抗匹配网络)	22
2.2.8 $1/4$ 波长传输线阻抗变换器	28
2.2.9 传输线变压器	31
2.2.10 滤波器的基本概念	35
2.2.11 滤波器分类	36
2.2.12 LC 滤波器综合	38
2.2.13 集成滤波器设计	46
2.2.14 其他类型滤波器	47
2.3 例题分析	47
2.4 习题及部分参考答案	62
第 3 章 高频放大器	71
3.1 本章要点与教学要求	71
3.2 基本内容	72
3.2.1 晶体管高频小信号等效电路	72
3.2.2 各组态放大器特性	75

3.2.3	Miller(密勒)效应	76
3.2.4	MOSFET 三种组态放大器分析与启示	77
3.2.5	宽带化技术	79
3.2.6	调谐放大器	89
3.2.7	自动增益控制 AGC	90
3.2.8	器件噪声	90
3.2.9	噪声系数	94
3.2.10	经典二端口网络噪声系数分析	95
3.2.11	噪声温度	99
3.2.12	级联系统	100
3.2.13	接收机灵敏度	100
3.2.14	低噪声放大器	101
3.3	例题分析	102
3.4	习题及部分参考答案	112
第4章	非线性电路	119
4.1	本章要点与教学要求	119
4.2	基本内容	121
4.2.1	射频通信系统与超外差式接收机原理	121
4.2.2	线性电路、非线性电路和时变参量电路	124
4.2.3	非线性电路的表述方法与分析方法	128
4.2.4	非线性失真	130
4.2.5	折线分析法和 A 类、B 类、C 类放大器	137
4.2.6	功率放大器	139
4.2.7	模拟相乘器	143
4.2.8	混频器	145
4.2.9	变频干扰	149
4.3	例题分析	150
4.4	习题及部分参考答案	162
第5章	正弦波振荡器	178
5.1	本章要点与教学要求	178
5.2	基本内容	179
5.2.1	从 LC 谐振回路的自由谐振看正弦波振荡的维持	179
5.2.2	负阻振荡原理	182
5.2.3	反馈振荡器的工作原理	188
5.2.4	LC 振荡器的电路分析	192
5.2.5	频率稳定度及其改善	196
5.2.6	晶体振荡器	198
5.2.7	其他	201
5.3	例题分析	205

5.4 习题及部分参考答案	218
第6章 调制与解调	233
6.1 本章要点与教学要求	233
6.2 基本内容	234
6.2.1 调制与解调概述	234
6.2.2 幅度调制与解调	238
6.2.3 角度调制	264
6.3 例题分析	289
6.4 习题及部分参考答案	331
第7章 锁相环路	353
7.1 本章要点与教学要求	353
7.2 基本内容	355
7.2.1 PLL的基本组成与工作原理	355
7.2.2 PLL的锁定与线性分析	360
7.2.3 PLL的非线性分析	369
7.2.4 全数字锁相环(DPLL)	378
7.2.5 PLL的主要应用	379
7.2.6 自动频率控制(AFC)电路	380
7.3 例题分析	381
7.4 习题及部分参考答案	397
第8章 频率合成技术	406
8.1 本章要点与教学要求	406
8.2 基本内容	407
8.2.1 频率合成器的主要指标	407
8.2.2 实现频率合成器的方法	410
8.3 例题分析	426
8.4 习题及部分参考答案	439
参考文献	453

第1章 绪 论

射频通信由于具有配置灵活、建设速度快、通信可靠、维护方便、易于跨越复杂地形等几大优点,已经广泛应用于移动通信、局域网络、电子娱乐、医疗器材等领域,并将继续深入影响人们的日常生活。由于消费市场的推动,对射频通信终端设备提出了越来越高的要求,一方面要求设备尺寸小巧以满足便携式要求,另一方面又要求这些设备在采用电池供电的情况下,能够具有很长的使用寿命和高度可靠的性能,同时多媒体通信要求使得通信数据量急剧增加。因而,高频化、宽带化、集成化、数字化是当前射频通信系统的发展趋势。

通信电路原理课程是电子信息类专业的主干专业基础课程。课程的基本任务是通过常用电子器件、模拟电路及其构成的射频通信系统的分析和设计,了解通信电路的基本原理和基本概念,使学生系统地掌握射频通信系统各种功能单元电路的工作原理和分析设计方法,为通信电路及相关电子系统的工程实现打下必备的基础。

通信电路原理课程涉及的概念较多,具有原理性强的特点和工程性要求,对于学生的实践能力提出了一定的要求。教师授课和学生学习中应理论联系实际,注重培养解决实际问题的能力和工程实践能力。

1.1 本章要点与教学要求

本章要点

本章作为射频通信电路课程的绪言,应掌握有关射频通信系统的基本概念、射频通信系统中的基本问题及通信电路的基本形式和一些必要的知识点。

(1) 通信系统的基本概念:收/发信机、传输距离、信道特性、电波传播、基带信号、复用技术。

(2) 通信系统的基本问题:信号通过线性/非线性、时变/时不变系统产生的问题。

(3) 通信电路的基本形式:模拟信号、数字信号与抽样数据信号。

(4) 相关知识点:宽带与窄带、dB 数表示、集总参数与分布参数、传输线、集肤效应、50 Ω 系统。

教学要求

通过本绪论,学生应明确本课程的教学内容是什么,具体说明如下:

(1) 了解通信系统的基本组成;明确本课程的教学内容为发射设备和接收设备的电路分析与设计。

(2) 明确影响通信传输距离的诸因素中的发射机(发射功率)和接收机(灵敏度)、(信号传输过程中的)噪声与干扰问题是本课程的具体研究内容。

(3) 理解信号通过非线性系统后可产生新的频率分量及其在通信电路中的应用。

(4) 了解通信电路的三种电路形式(模拟电路、抽样数据电路、数字电路)之间的关系,明确本课程的主要内容为通信系统中的模拟信号处理单元电路的分析与设计。

1.2 基本内容

1.2.1 通信系统的基本概念

通信系统是为人类服务的,是人类自身感知系统的延伸或实现延伸的工具。正是由于现代通信系统的飞速发展,人们可以在世界各地实现可视化的远距离的面对面对话,从而实现了眼睛和耳朵的延伸。人们通过通信系统还可实现手的延伸,如遥测遥控;脑的延伸,如通信网及网络计算等。

射频通信是诸多通信系统中的重要分支。所谓射频(RF, Radio Frequency),是指可以通过天线发射出去的频率。除了自由空间,射频通信系统也有可能通过其他传输介质实现信息传输。射频通信系统以射频为载体,把信息传送出去或接收下来。射频通信的优势在于它具有无线连接所体现的配置灵活、覆盖地域广、可跨越复杂地形等多个方面的特点。

通信系统由五部分构成:信源、发射机、信道、接收机和信宿。本课程的重点在于讨论其中的发射机和接收机部分,即射频通信系统中的射频收/发信机的电路原理和电路设计,同时讨论噪声和干扰对电路系统的影响,信源及信宿位置处的信号处理及电路实现在其他相关课程中讨论。

描述一个通信系统的基本特征包括传输距离、通信容量、信号失真度和抗干扰能力。其中,传输距离表示信号从发送端到达接收端并被可靠接收的最大距离。除了通信体制外,单就射频收/发信机而言,影响传输距离大小的因素有发射机的发射功率、接收机的接收灵敏度、信道损耗及干扰噪声等。

通信系统中,接收机和发射机的设计和信道密切相关。所谓信道,也称传输

媒介,大体上分为有线和无线两种。信道的基本特征包括信道的衰减特性、工作频率范围、频率特性、时变/时不变特性和干扰特性。对于无线信道,其衰减特性、频率特性、干扰特性受各种因素影响都较大,而且其传输特性一般是时变的。

电信号在无线信道中的传播又称为电波传播,传播方式一般分为三种主要形式:直射传播(发射机和接收机之间是直线可视的,例如超短波通信及通常意义上的微波通信),绕射传播(电波沿地球弯曲表面传播,例如中长波通信)和折射、反射传播(利用电离层对电波的折射和反射进行的电波传播,例如远距离短波通信)。除了这三种传播方式外,还有利用大气层中不均匀介质对电磁波的散射特性实现的超视距散射通信,包括对流层散射、电离层散射和流星余迹散射通信。散射通信抗破坏能力强,多用于应急机动及军用环境,具有较强的保密性。

在城市环境中,无线传输信道的传输特性较差,主要原因是城市建筑物所引入的多径衰落现象十分严重,发射机发射的电磁信号到达接收机可通过多个路径,这些信号的先后到达和叠加将导致接收信号产生频率选择性衰落和时间选择性衰落(延时扩展),同时移动通信机的高速移动还会引入多普勒频移效应,这些都会严重影响通信质量。

虽然单一频率信号在很多情况下被用于系统的各种理论分析中,但通信系统中被传输的信号,一般情况下是占用一定频带的信号,这个频带的宽度称为信号的带宽,如声音信号的带宽是 20 Hz ~ 20 kHz。但如果只强调语音的可懂度,而不强调其音色质量,那么 300 ~ 3 400 Hz 频率范围的语音信号足以让对方听懂你在说什么,这也正是电话的带宽。通常,称这种直接表示原始信息的电信号为基带信号。在无线信道中远距离传输基带信号往往是行不通的,因此需要利用调制技术把基带信号的频谱搬移到射频频段上,然后通过发射机发射出去,这个射频一般称为载波。

基带信号所占带宽一般都较小,而射频频段可以提供较大的信道带宽。比如说,在 1 GHz 载波频率上,某个信道的信道总带宽是中心频率的万分之一(0.1 MHz),用于传输语音信号,假设语音信号所占带宽为 4 kHz(单边带),那么如果把不同的语音信号在频率轴上依次排开,则在这 0.1 MHz 的带宽内可传输 25 路语音信号,这种方式称为频分复用技术。其他的复用技术包括时分复用技术、码分复用技术、空分复用技术等,分别在时间轴上、码空间及实际空间上分离多路基带信号。复用技术使得信道可以传输多路基带信号而保持这些基带信号之间互不干扰。

1.2.2 信号传输的基本问题

通信的基本问题是信号的传输问题,而通信系统中的信号传输问题,就是信

号通过通信设备和信道的问题。可以将通信设备划分为几个小的功能模块,这些功能模块又可按线性系统和非线性系统进行分类。射频收/发信机中的线性模块包括低噪声放大器、线性功率放大器、滤波器和处于线性工作状态下的反馈控制电路等;非线性模块包括混频器、振荡器、调制解调器、非线性功率放大器等。

所谓线性系统,指的是满足叠加性和均匀性的系统;如果系统不满足叠加性和均匀性,则为非线性系统。关于对线性系统和非线性系统的更加详尽的讨论见第4章。

理想线性时不变系统的频域传递函数为

$$H(j\omega) = A_0 e^{-j\omega\tau_0} \quad (1.2.2.1)$$

式中, A_0 和 τ_0 均为实常数。

实输入信号 $x(t)$ 通过该线性系统后的实输出信号为 $A_0 x(t - \tau_0)$, 即输出信号和输入信号相比, 在幅度上只有比例的变化, 波形上有延时, 波形形状没有发生任何改变, 称这种信号的传输为理想传输或无失真传输。对于线性时不变系统, 如果其幅频特性不是常数, 就会产生幅度失真; 如果其相频特性不是频率的线性函数, 就会产生相位失真; 幅度失真和相位失真被统称为线性失真。实际的线性时不变系统, 如放大器和滤波器, 通常只能在通带内近似满足理想传输。

信号通过非线性系统后, 最主要的特点是产生了新的频率分量, 这些频率分量是输入信号频率的各次谐波分量和组合频率分量。正是由于信号通过非线性系统后可以产生新的频率分量, 通信系统中的倍频、混频、调制和解调等功能才得以实现。非线性系统不能用描述线性时不变系统的复频域传递函数 $H(s)$ 来描述。

在需要对信号进行线性处理的电路中, 系统的非理想线性特征将会产生新的频率分量, 也就是说产生了非线性失真。度量非线性失真的一个参数称为总谐波失真

$$\gamma = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \cdots + P_n}{P_1}} \quad (1.2.2.2)$$

式中, P_1 为输出信号中的基波分量的功率; P_n 是 $n(n=2, 3, \cdots)$ 次谐波分量的功率。其他的描述非线性失真的参数参见第4章的讨论。

1.2.3 通信电路的基本形式

通信电路的功能包括放大、混频、振荡、滤波、调制与解调、自动增益控制、自动频率控制和自动相位控制(锁相环)等, 这些功能除了放大功能外, 原则上均可以用数字方法实现。由于数字系统特有的优势, 如工作状态稳定、易于大规模集成、信号处理方便灵活等, 所以通信系统的数字化趋势越来越强。但考虑到人

类可直观感受到的是模拟物理量,因此在通信系统中,需要模拟与数字的接口电路 ADC(模数转换器)和 DAC(数模转换器),可见通信系统是一个数字电路和模拟电路的混合系统。

在进行模数转换前,往往需要一个取样保持电路,如果不再进行数字编码而直接对取样信号进行处理,那么该电路称为抽样数据电路。抽样数据电路最典型的应用例子是开关电容滤波器。抽样数据电路比模拟电路更易于得到稳定的时间常数,电路构成上比数字电路简单,因此其应用范围也在拓展之中。

本教材重点讨论各功能电路的模拟电路实现方法,关于其数字电路的实现和数字信号处理技术将在后续课程中讨论,抽样数据电路的实现方法一般在研究生阶段探讨。

1.2.4 必要知识点

射频通信电路设计涉及多方面的知识,包括模拟电路、通信原理、微波技术、随机信号处理、集成电路设计、无线标准、多路接入、CAD 工具应用等。为方便读者的学习,对涉及的必需内容将在相应章节予以补充说明。但对射频通信系统中经常提到的一些一般性概念,这里给予说明。

1. 宽带系统与窄带系统

射频通信系统的发展是一个如何实现更加有效利用频谱资源的过程,从频谱利用率很低的宽带火花隙通信到窄带的调幅波(频分复用)通信,再到频带稍宽的调频波(频分复用)通信以及之后的时分复用技术、空分复用技术和码分复用技术,都是对频谱利用率的一次次提高。目前,射频通信又发展到了超宽带(UWB, Ultra Wide Band)通信技术,其核心是在不存在相互干扰的前提下,允许多个未授权用户接入并共享那些已经分配给其他用户的频谱资源。

窄带和宽带是一个相对的概念,很难给出一个绝对的定义。下面的 UWB 定义是 FCC 给出的,不满足该定义的系统可被视为是窄带系统。

满足如下两个带宽条件中的一个,就被称为 UWB 系统:

(1) 相对带宽 $RBW \geq 0.2$

$$RBW = \frac{f_H - f_L}{0.5(f_H + f_L)} \quad (1.2.4.1)$$

式中, f_H f_L 为 10 dB 带宽的频率上边界和频率下边界。

(2) 绝对带宽 $BW \geq 500 \text{ MHz}$

$$BW = f_H - f_L \quad (1.2.4.2)$$

《通信电路原理》(第二版)董在望主编(以下简称教材)及绝大多数教材目前讨论的系统仍然局限于窄带系统,对 UWB 不做讨论,但考虑到通信系统的宽带化发展趋势,在第 3 章中讨论了一些放大器的宽带化措施。

对于窄带系统,信号带宽及系统带宽一般采用 3 dB 带宽描述,而对 UWB 系统,一般采用 10 dB 甚至 20 dB 带宽来描述。

2. dB 数表示

前面提到了 10 dB 带宽和 3 dB 带宽,之所以用 dB 数表述,是由于射频通信系统中功率的变化范围很大,用数值表述很不方便。dB 数是功率、电压、电流、增益等数值的对数化表示,它的数值变化范围小,方便记忆和表述。

dB 数一定是对比例数(无单位数值,如增益或相对值)取对数,对有单位的数值取对数没有意义。

对于功率增益,增益比例数和 dB 数之间的关系为

$$G_p(\text{dB}) = 10 \lg G_p = 10 \lg(P_o/P_i) \quad (1.2.4.3)$$

对于电压增益或电流增益,增益比例数和 dB 数之间的关系为

$$G_v(\text{dB}) = 20 \lg G_v = 20 \lg(V_o/V_i) \quad (1.2.4.4)$$

$$G_i(\text{dB}) = 20 \lg G_i = 20 \lg(I_o/I_i) \quad (1.2.4.5)$$

上面提到的 10 dB 带宽和 3 dB 带宽,指的是信号频谱内最高功率比频带上、下边界频率处的功率大 10 dB 和 3 dB,数值比例数分别为 10 和 2。这是对信号带宽的描述,如果是对系统带宽进行描述,所谓 3 dB 带宽则指信号通带之内最高增益比上、下边界频率处的增益高 3 dB,换言之,两个位置的功率增益比例数为 2,或者电压增益比例数为 $\sqrt{2}$ 。

在讨论谐波失真或噪声时,另一个 dB 数表示单位 dBc 也是常见的,这里的 c 表示载波(carrier),因而 -20 dBc 的二次谐波分量表示二次谐波分量比基波分量小 20 dB,或者说二次谐波分量是基波分量的 1/10(电压比)或 1/100(功率比)。

如希望将功率 0.1 mW 表示为 dB 数,则需要对基本单位求比例后再求对数,如果采用的基本单位为 1 mW,则对比例数(0.1 mW/1 mW)取对数乘 10 后得到 -10 dBm,也就是说, -10 dBm 代表 0.1 mW。显然, x dBm 代表 $10^{x/10}$ mW。于是, 0 dBm 代表 1 mW, 30 dBm 代表 1 000 mW 或 1 W, -95 dBm 代表 3×10^{-13} W。功率的单位也可用 dBW 表示,如 0 dBW 代表 1 W。

dB 数除了可以用于表示功率外,也可用来表示电压和电流,如 1 μ V 可以用 0 dB μ V 表示,或者用 -120 dBV 表示。

代表功率的 dBm 和代表电压的 dB μ V 不能混淆,除非所有被考察点的阻抗都是相等的,否则两者之间没有固定的差值关系。

3. 集总参数和分布参数

电路分析中普遍使用的基尔霍夫电压定律和电流定律是对麦克斯韦电磁方程的集总参数近似,它假设电磁波传播速度为无穷大。事实上,由于电磁波速度(光速 c)并非无穷大,任何频率 f 的电磁波都具有对应的波长 λ

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.2.4.6)$$

频率越高,波长越短。

当频率较低时,构成电路的元器件的实际物理尺寸与波长相比很小,器件可以被视为是一个无尺寸大小的点,这就是集总参数元器件,如常见的电阻、电容、电感及短接线。由集总参数器件构成的电路系统可以用时间微分方程描述。当频率较高时,构成电路的元器件的尺寸可以和波长相比拟,一般以元器件尺寸大于十分之一波长($\lambda/10$)为界限,此时元器件不能再被当成一个点来处理,对元器件特性的描述需要空间位置的信息,这就是分布参数元器件。分布参数电路系统需要用偏微分方程来描述,独立变量除了时间外,还有空间位置。

窄带射频通信系统,一般采用调制方案把基带信息调制到较高的射频载波上,而目前的宽带射频通信系统本身就在很高的射频上,因而电路分析需要充分考虑到电路的分布参数效应。微波频段的电路设计,需要用分布参数电路的设计方法,这部分内容将在“微波技术”和“微波有源电路”课程中进行讨论。为在本课程学习过程中建立起分布参数的概念,在第2章中补充了传输线内容。

本教材局限于集总参数系统,这是由于集成电路尺寸持续变小,对集成电路仍然可以用集总参数电路的分析方法,但功能电路之间的连接及芯片引脚等端口处电路的分布参数效应却是不可忽视的,在实际电路设计中必须给予充分重视。

4. 集肤效应

对于均匀横截面的导线而言,其单位长度的电阻为

$$R = \rho \frac{1}{S} \quad (1.2.4.7)$$

式中, ρ 为导线金属的电阻率,单位为 $\Omega \cdot \text{m}$, S 为导线的横截面积,单位为 m^2 ,这对直流电路而言是没有疑问的,因为电流是均匀流过导体横截面的。

对于射频通信系统而言,工作频率很高,电磁场进入导体后,场的分布是以指数规律衰减的,可以近似认为电流仅仅在导体表面厚度为 δ 的一个层中流动,这称为集肤效应(skin effect)或称趋肤效应。这个等效的均匀电流层厚度 δ 称为导体的集肤深度(skin depth)。由电磁场理论分析可知,集肤深度为

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}} \quad (1.2.4.8)$$

式中, f 为工作频率; $\sigma = \rho^{-1}$ 为导体的电导率; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 为导体(或真空)的磁导率。

可见对于理想导体(σ 无穷大)而言,电磁场将无法进入导体内部,电荷只能在导体表面流动形成面电流。实际导体的电导率 σ 并非无穷大,例如铜的电

导率为 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。因而高频电流可等效视为仅在导体表面集肤深度内流过,这必然造成导体的高频电阻随频率升高而增加,这是由电流流过的等效横截面积随频率升高而下降导致的。

5. 50 Ω 系统

大多数射频测试仪器和同轴电缆都具有标准阻抗 50 Ω ,以至于射频电路模块外特性中的输入、输出阻抗往往也要求 50 Ω 匹配。50 Ω 是如何确定的呢?

在射频测量系统和实际应用中,有一个十分重要的电磁传播媒介是同轴电缆,它是由两个导体和导体中间的介质构成的电磁传输系统(图 1.2.4.1),它是传输线的一种。如果同轴电缆是无损的且是半无限延伸的,那么加载在端口的电压和电流间的比值称为该传输线的特征阻抗 Z_0 。也就是说,从一个端口看无损的无限长传输线,该传输线可以等效为纯阻 Z_0 ,但这个等效纯阻本身并不消耗任何能量,传输线只是把电磁能量沿传输线方向传输出去。在这个电磁能量的传输过程中,传输线上任何一个横截面上电压、电流的比值关系为 Z_0 。如果把同轴电缆传输线在某位置截断并在该截断点处于内、外导体间接一纯阻负载 $R = Z_0$,那么传输过来的电磁能量将全部被该纯阻负载 R 所吸收。传输线的特征阻抗由传输线的物理结构和几何尺寸所决定。

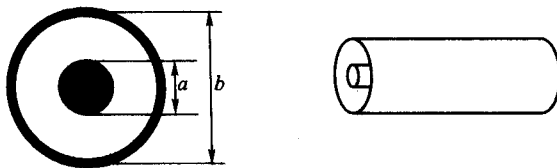


图 1.2.4.1 同轴电缆

分析表明,空气介质同轴电缆存在着一个最优特征阻抗为 30 Ω ,可使该同轴电缆具有最大的功率传输能力;同时存在着另一个最优的特征阻抗为 77 Ω ,可使该同轴电缆具有最小的传输衰减。综合考虑同轴电缆的功率传输能力和功率传输衰减,取 50 Ω 的特征阻抗可兼顾两者,因此绝大多数测量系统及早期的通信系统都采用 50 Ω 系统。也有以 75 Ω 阻抗为基础的系统,如有线电视,由于功率较低,因而功率传输能力不是首要考虑的问题,取 75 Ω 阻抗系统是考虑使同轴电缆的功率传输衰减最小化。

在集成电路设计中,互连线的功率传输和同轴电缆的功率传输是不一样的,电路内部互连线特征阻抗的选择范围较大,并不要求一定是 50 Ω 传输线。事实上,驱动一个 50 Ω 的纯阻将会有较大的功耗,因此集成电路内部互连线特征阻抗一般都较大,但为了和外部有一个良好的匹配特性,射频集成电路输入、输出端口一般仍然采用 50 Ω 阻抗匹配。