

21

世纪
信息与通信技术教程

现代通信电路

(第二版)

■ [美] Jack R. Smith 著

■ 庞坚清 庞立昀 译

Mc
Graw
Hill

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

21 世纪信息与通信技术教程

现代通信电路

(第二版)

[美] Jack R. Smith 著

庞坚清 庞立昀 译

人民邮电出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

现代通信电路: 第2版/ (美) 史密斯 (Smith, J. R.) 著; 庞坚清, 庞立昀译.
—北京: 人民邮电出版社, 2006. 1

21 世纪信息与通信技术教程

ISBN 7-115-13789-7

I. 现... II. ①史... ②庞... ③庞... III. 通信理论: 电路理论—高等学校—教材
IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 116957 号

内 容 提 要

本书是一本专门用于通信院校教学的专业基础教材, 在国外被众多院校通信专业广泛采用。本书的重点内容是与通信技术和设备密切相关的通信电路, 主要包括: 小信号放大器、网络噪声和互调失真、选频网络和变压器、高频放大器与自动增益控制、混合变压器与传输线变压器、振荡器、锁相环、频率合成器、功率放大器、调制器与解调器等内容。

本书的特点是重在介绍通信电路的实用分析和设计方法, 以便于学生掌握有关的概念和工程应用中的实用技术。

本书可作为通信院校或相关院校通信专业高年级学生的通信专业基础教材, 也可供电信行业的工程技术人员参考阅读。

21 世纪信息与通信技术教程

现代通信电路 (第二版)

-
- ◆ 著 [美] Jack R. Smith
译 庞坚清 庞立昀
责任编辑 王晓明
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 24.25
字数: 585 千字 2006 年 1 月第 1 版
印数: 1-3 500 册 2006 年 1 月北京第 1 次印刷
- 著作权合同登记号 图字: 01-2005-5342 号
ISBN 7-115-13789-7/TN·2546
-

定价: 39.00 元

读者服务热线: (010) 67129258 印装质量热线: (010) 67129223

版 权 声 明

Jack R. Smith

Modern Communication Circuits (2nd)

ISBN: 0-07-115586-4

Copyright © 1998 by the McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Posts & Telecom Press.

本书中文简体字翻译版由人民邮电出版社和美国麦格劳-希尔教育（亚洲）出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司激光防伪标签，无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号：01-2005-5342

前 言

自从本书第一版出版以来,通信电路已经有了很大的进展。但是通信电路的基础并没有发生大的变化。放大器、振荡器、调谐回路、变压器、混频器和功率放大器仍然是通信电路的基本构造模块。有一种趋势是使用宽带电路,但窄带电路也还是需要的,特别是在振荡器中。现在还不可能在集成电路中实现电感的集成,然而在许多通信电路中电感仍然是必要的部件。许多新的集成电路已经显著地拓宽了频率范围,本书介绍的材料适用于这些频率。虽然本书第一版中介绍的方法没有什么变化,但第二版增加了计算机仿真(特别是 SPICE)方面实用性很强的内容。每一章都有计算机仿真的题目。

本书提供了覆盖频率范围高至几百兆赫的现代通信电路的基本的分析和设计技术。本书内容反映了现代通信系统的设计实践,包括集成电路的应用,通过使用宽带电路减少调谐的工作量,以及在高频电路中更多地使用场效应晶体管。这里提供的很多内容是第一次在此类书中出现,其中一部分内容是作者的研究结果,还有很多内容来自各种通信电子学的文献,有些则选自早期真空管电子学的出版物。本书的重点是介绍实用的近似方法,而不是基于复杂电路模型的理论推导。这种近似方法提供了对设计过程的更多了解,而不是冗长的推导。计算机仿真常用于确定近似的精确性。

几乎所有实际通信电路都有的一个特征是,它们都太复杂,难以进行完全的分析,而必须采用近似方法。设计过程也需要合适地使用近似方法。本书的目的就是要提供一些方便而高效的通信电路分析和设计的近似方法。电路模型常常是不完全的,更精确和复杂的模型通常用计算机辅助分析最为合适,大多数电气工程专业的学生和电气工程师都有这类工具。在例子中我们常常使用计算机辅助分析。

大多数(假如不是所有的)通信电路都有集成电路,但还是有很多理由说明设计人员仍必须熟悉分立电路技术。首先,有许多通信系统还不可能以集成电路方式来实现,因为限制了电路的灵活性,而且在芯片上也不可能制作电感—电容调谐回路。其次,分立通信电路的性能是优良的。通信电路设计人员需要在大小、价格、输出功率、功耗、噪声和失真之间进行权衡。第三,即使是使用集成电路,也需要对通信电路有基本的了解。此外,单片功率放大器产生了许多额外的问题,结果是一个完整的放大器要比分立元件功率放大器占据更多的空间。本书还增加了有关集成电路对通信系统设计影响的内容。有两章是讲锁相环的。这种器件在现代系统中的重要性很大程度上是由于可以用集成电路来实现。锁相环的应用在第8章中讨论,而锁相环的分析则在第9章详细介绍。

要在一本书中全面覆盖像通信电子学这样广阔的题目是不可能的。这里提供的许多方法适用于全部频率范围的通信系统,但在频率 100MHz 以上时,本书没有讲到的分布参数电路分析技术往往更为精确。数字电路正在成为通信系统中的越来越重要的角色。本书介绍了很多数字电路的应用,但没有讨论常规逻辑电路,因为许多书籍涉及这个题目。

第1章是通信电路导论,并讨论接收机设计的趋势。第2章复习双极型与场效应晶体管

的线性小信号分析。还有运算放大器,因为现在已经能够得到可用于高频通信电路的增益带宽足够大的器件。第3章定义用于描述通信系统的噪声和失真规范。在现代通信系统中仍然非常重要的简单并联和串联调谐回路在第4章中讨论。第5章给出了晶体管放大器高频性能的分析方法,以及自动增益控制系统的模型。在第6章中重点讨论现代通信系统中变压器的广泛应用,传输线变压器以及实现非调谐、宽带、级间包括输出阻抗匹配的一个合适的集总阻抗匹配方法。第7章深入地讨论了高性能晶体管振荡器电路,包括晶体和压控振荡器的分析与设计。第8章是关于锁相环的应用,第9章则是对锁相环的分析。锁相环是通信系统中最通用、使用最广泛的电路之一。作为廉价的集成电路,它的实用性意味着将不断地在实际上所有的通信系统中找到它的应用。集成电路也导致了频率合成器的设计,它已经改变了大多数使用频率调谐的新通信系统的设计。频率合成器也使得一些现代通信技术得以成为现实,如跳频。第10章详细地讨论了频率合成器。在第11章中讨论频率偏移、调制和解调的方法,包括处理数字信号的频移和相移—键控以及其他方法。第12章讨论功率放大器的设计和分析,并给出了一些对设计C类放大器有用的曲线。

只要能够用现有文献的文章作补充,本书的材料足够供两个学期的课程使用。第1章、第3~8章以及第10章已经在美国佛罗里达大学用作一个学期的课程。每章都含有习题,强调一些特殊点;有几章的习题扩展了所讲述的内容。有些习题中涉及的部件和集成电路的特性表包含在附录中。

本书第一版的写作源自我和我的朋友 Ulrich Rohde 博士(Compact Software 的总裁)的多次讨论。Rob Bruckner(现在 Intel 公司)协助了这一版的编写。有关人员提出的建议,对第一版中错误的修正,以及由我的学生所做的电路设计,也大大改进了本书的质量。

Jack Smith

作者简介

Jack R. Smith 博士是美国佛罗里达大学电气工程荣誉退休教授，也是 Neurotronics 公司的创始人和总裁，他还是 Microtronics 公司的创始人，并担任总裁直到该公司卖给 Oxford 仪器公司。Smith 博士曾经是法国国家科学研究中心、瑞士日内瓦医学院以及东京市立神经研究中心的客座科学家。目前，他还在继续从事通信行业的咨询工作，最近还参与了 Motorola 陆上移动产品部的工作。

目 录

第 1 章 无线电通信系统导论	1
1.1 引言	1
1.2 网络理论	1
1.3 调制	3
1.4 接收机	3
1.4.1 现代通信接收机	6
1.4.2 直接变换接收机	6
1.4.3 集成电路 FM 接收机	7
1.5 发射机	8
1.6 习题	8
第 2 章 小信号放大器	10
2.1 引言	10
2.2 双极型晶体管放大器	10
2.2.1 等效电路	10
2.2.2 共射极放大器	11
2.2.3 共基极放大器	12
2.2.4 射极跟随器	14
2.3 场效应晶体管放大器	16
2.3.1 等效电路	16
2.3.2 共源放大器	17
2.3.3 源极跟随器	19
2.3.4 共栅放大器	20
2.3.5 输入阻抗	21
2.3.6 电压增益	21
2.3.7 输出阻抗	22
2.4 多级放大器	22
2.5 双栅 FET	23
2.6 推挽式放大器	24
2.7 差动式放大器	25
2.7.1 共模抑制比	26
2.7.2 FET 差动式放大器	27
2.7.3 BJT 差动式放大器	29
2.8 运算放大器	30

2.8.1	运算放大器特性	30
2.8.2	理想反相放大器	30
2.8.3	非理想反相放大器:有限环路增益的影响	31
2.8.4	增益带宽积	32
2.8.5	有限输入阻抗的影响	33
2.8.6	有限输入和输出阻抗的影响	33
2.8.7	同相放大器	34
2.9	习题	35
2.10	参考文献	38
第3章	网络噪声和互调失真	39
3.1	引言	39
3.2	噪声	39
3.2.1	热噪声	40
3.2.2	有源器件噪声	42
3.2.3	晶体管放大器中的噪声	43
3.3	噪声指数,噪声因数和灵敏度	45
3.3.1	平均噪声因数	46
3.3.2	噪声指数	47
3.3.3	级联网络的噪声因数	47
3.3.4	噪声温度	48
3.3.5	灵敏度	48
3.4	低噪声网络的设计	51
3.4.1	网络噪声的表示法	51
3.4.2	网络噪声因数	51
3.4.3	低噪声设计	52
3.4.4	低噪声放大器	53
3.4.5	BJT偏置电流的优化	55
3.5	互调失真	55
3.5.1	增益压缩	56
3.5.2	二次谐波失真	56
3.5.3	互调失真率	56
3.5.4	动态范围	58
3.5.5	信号噪声失真比(SINAD)	59
3.6	习题	59
3.7	参考文献	60
第4章	选频网络和变压器	61
4.1	引言	61
4.2	串联谐振电路	61
4.2.1	信号源内阻的影响	66

4.2.2 电压应用	67
4.3 并联谐振电路	67
4.4 含有变压器的并联谐振电路	69
4.4.1 具有调谐次级回路的变压器	72
4.4.2 双调谐电路	73
4.4.3 自耦变压器	75
4.4.4 电容式变压器	76
4.5 利用电抗网络的阻抗匹配和谐波滤波	78
4.6 滤波器延时和信号失真	81
4.7 习题	83
4.8 参考文献	86
第5章 高频放大器和自动增益控制	87
5.1 引言	87
5.2 双极型和场效应晶体管放大器的高频性能	87
5.2.1 BJT 高频模型	87
5.2.2 电流增益带宽积	88
5.2.3 FET 高频模型	89
5.2.4 密勒定理 (Miller Theorem)	89
5.2.5 FET 放大器的高频响应	90
5.2.6 BJT 放大器的高频响应	93
5.2.7 共基极放大器	95
5.2.8 射极跟随器	97
5.2.9 差动式放大器	100
5.2.10 高速运算放大器	102
5.2.11 同类放大器级联	106
5.3 宽带技术	107
5.3.1 输入补偿	107
5.3.2 反馈	109
5.3.3 电流—电压反馈	110
5.3.4 电压—电流反馈	112
5.3.5 无损耗反馈放大器	114
5.3.6 中和	116
5.3.7 共射共基放大器	117
5.4 自动增益控制	118
5.4.1 自动增益控制理论	119
5.4.2 另一种 AGC 模型	121
5.4.3 AGC 系统的部件	123
5.5 习题	124
5.6 参考文献	126

第6章 混合变压器和传输线变压器	127
6.1 引言	127
6.2 三绕组变压器	127
6.2.1 不对称三绕组变压器	130
6.2.2 混合变压器中的功率传输	133
6.2.3 混合变压器中的相位分配	134
6.2.4 非理想三绕组变压器	135
6.3 传输线变压器	136
6.3.1 升压变压器	139
6.3.2 混合变压器	141
6.3.3 功率输出级	141
6.4 习题	142
6.5 参考文献	144
第7章 振荡器	145
7.1 引言	145
7.2 振荡条件	145
7.2.1 奈奎斯特稳定性判据	145
7.2.2 电路分析	149
7.2.3 振荡器电路的另一种解释	152
7.2.4 皮尔兹(Pierce)振荡器	154
7.3 振幅稳定性	155
7.4 相位稳定性	156
7.5 晶体振荡器的特性	157
7.5.1 并联模式晶体振荡器	160
7.5.2 串联模式晶体振荡器	163
7.6 压控振荡器与压控晶体振荡器	167
7.7 场效应晶体管振荡器	170
7.8 使用延迟线控制振荡器	171
7.9 张弛振荡器	172
7.10 集成电路振荡器	173
7.11 习题	181
7.12 参考文献	184
第8章 锁相环	185
8.1 引言	185
8.2 锁相环的线性模型	186
8.3 鉴相器(PD)	189
8.3.1 数字鉴相器	189
8.3.2 异或鉴相器	189
8.3.3 触发式鉴相器	190

8.3.4	双 D 触发器	191
8.3.5	鉴频鉴相器	192
8.3.6	混频器	193
8.3.7	采样检测器	194
8.3.8	鉴相器比较	197
8.4	电压控制振荡器	198
8.5	环路滤波器	198
8.6	线性和非线性 PLL 的 SPICE 仿真	199
8.6.1	正弦鉴相器模型	200
8.6.2	电压控制振荡器仿真	200
8.6.3	线性和非线性 PLL 的仿真	201
8.7	锁相环的应用	206
8.7.1	跟踪滤波器	206
8.7.2	角度调制	206
8.7.3	频率解调	207
8.7.4	幅度解调	207
8.7.5	移相器	208
8.7.6	信号合成器与载波恢复	208
8.8	数字锁相环	210
8.9	集成电路锁相环	211
8.10	习题	213
8.11	参考文献	214
第 9 章	锁相环分析	216
9.1	引言	216
9.2	稳态误差分析	216
9.3	稳定性分析	217
9.3.1	I 型系统	219
9.3.2	极—零点滤波器	221
9.3.3	环路带宽的控制	222
9.3.4	II 型系统	223
9.3.5	II 型三阶系统	228
9.3.6	包含时间延迟的网络	232
9.3.7	含有采样—保持鉴相器的环	233
9.4	PLL 瞬态特性	234
9.4.1	线性化 PLL 的瞬态分析	235
9.4.2	I 型系统: 相位阶跃响应	235
9.4.3	I 型系统: 频率阶跃响应	236
9.4.4	II 型环路	238
9.4.5	斜坡输入	239

9.4.6	I型和II型环路的比较	240
9.4.7	大信号特性	241
9.4.8	数字鉴相器	241
9.4.9	一阶系统	241
9.4.10	包含低通滤波器的I型环路	244
9.4.11	正弦相位检测	248
9.4.12	数值的例子	249
9.5	习题	249
9.6	参考文献	251
第10章	频率合成器	252
10.1	引言	252
10.2	直接频率合成	252
10.3	用锁相的频率合成	255
10.3.1	参考频率对环路性能的影响	255
10.3.2	可变模数分频器	257
10.3.3	PLL 频率合成器 IC	258
10.3.4	降频变换	264
10.3.5	降低切换时间和(或)扩展环路带宽的方法	264
10.3.6	多环路频率合成器	265
10.3.7	N分数环路	266
10.4	直接数字合成	269
10.5	合成器设计举例	272
10.6	相位噪声	274
10.6.1	振荡器相位噪声模型	274
10.6.2	锁相环的相位噪声	277
10.6.3	分频和倍频对相位噪声的影响	278
10.7	习题	279
10.8	参考文献	281
第11章	功率放大器	283
11.1	引言	283
11.2	A类放大器	283
11.2.1	变压器耦合A类放大器	286
11.2.2	A类推挽放大器	287
11.2.3	方波输入	288
11.2.4	宽带A类功率放大器	289
11.3	B类放大器	290
11.3.1	用互补晶体管的推挽放大器	292
11.3.2	直接耦合B类推挽放大器中的功率关系	293
11.4	C类放大器	293

11.4.1 C类功率放大器设计	295
11.4.2 频率倍增	298
11.5 D类放大器	299
11.6 S类功率放大器	301
11.7 E类调谐功率放大器	302
11.8 习题	302
11.9 参考文献	304
第12章 调制器和解调器	305
12.1 引言	305
12.2 混频器	306
12.2.1 开关型混频器	306
12.2.2 变频损耗	310
12.2.3 失真	311
12.2.4 二极管环混频器的互调失真	311
12.2.5 平方律混频器	313
12.2.6 BJT混频器	313
12.2.7 FET混频器	314
12.3 幅度和相位调制及解调	317
12.3.1 幅度调制	317
12.3.2 幅度调制器: 标准 AM	318
12.3.3 解调器	320
12.3.4 平均包络检波器	320
12.3.5 同步检波	321
12.3.6 角度调制	322
12.3.7 角度调制器	322
12.3.8 FM解调器	323
12.3.9 FM检波器	323
12.3.10 脉冲鉴频器	325
12.4 数字调制	326
12.4.1 模拟数据的数字调制与解调	328
12.4.2 幅度调制	328
12.4.3 频率调制	329
12.4.4 相位调制	329
12.5 集成电路技术	329
12.6 习题	331
12.7 参考文献	332
附录1 Motorola NPN 晶体管 P2N2222A	334
附录2 U310 硅结型场效应管 (JFET)	339
附录3 Motorola MRF177 RF 功率 FET	341

附录 4	Comlinear CLC 430 电流反馈运算放大器	347
附录 5	Burr Brown 3554 1.7GHz 运算放大器.....	355
附录 6	Texas Instrument's SN54LS297 数字锁相环滤波器	362
附录 7	Motorola MC14046B 锁相环	368

第 1 章 无线电通信系统导论

1.1 引言

通信系统是通过电能把信息从一个地方传送到另一个地方的。传送信息的频率从电话通信所使用的低频到光的频率。本书论述了通信系统中所用的电子电路的分析和设计,其频率范围最高可至几百兆赫。实际的频率限制取决于电路是用分立元件型电路还是集成电路。本书的内容还直接用于许多其他系统,包括电视和频谱分析器,在这些系统中低噪声高频率接收器的设计是极为重要的。对于频率非常高的电路而言,采用不同的电路模型,特别是分布参数电路,将更为精确。本书也讨论了低频电路,但重点是在无线电频率电路。

本章讨论通信接收机和发射机基本电路的分析和设计。集成电路简化了系统设计,但是通信系统的设计者仍然需要熟悉许多电路技术以及在此频率范围内使用的简化近似方法。设计者经常面临这样的选择,是使用集成电路(IC)还是分立元件型的相同电路。这取决于许多因素,包括价格、大小、功耗、噪声以及失真。第 3 章介绍了一些用于评价一个电路的噪声和失真性能的定量标准。在通信系统中应用集成电路需要电子电路理论知识,以便将 IC 与系统其他部分正确连接。我们将学习各种各样子系统的电子电路,包括振荡器、放大器、变压器、调制器和解调器,这些子系统组成了一个通信系统。本书不考虑多种调制方法的数学分析,因为在许多通信理论的优秀著作中对此已有准确的描述。

1.2 网络理论

本节简要回顾了网络理论的概念,这些概念将被应用于以后的几章中。电子电路中最常见的变量是在电路的各个不同点所测的电压和电流。虽然可以在时域中讨论激励和响应,但是在时域中确定响应涉及到微积分方程的求解并且很少提供对设计过程的了解。对于线性时变系统,通常使用拉普拉斯变换可以更方便地得到系统响应。时间变量 $v(t)$ 的拉普拉斯变换是:

$$V(s) = \int_0^{\infty} v(t)e^{-st} dt \quad (1.1)$$

在这里, s 的量纲是频率,被称为复频 (Complex Frequency) 变量。一个线性系统的传递函数 $H(s)$ 定义为:

$$H(s) = \frac{R(s)}{V(s)} \quad (1.2)$$

在这里, $R(s)$ 是对应于激励 $V(s)$ 响应的拉普拉斯变换。将电感视为复阻抗 sL , 将电容为复阻抗 $(sC)^{-1}$, 这样就可以容易地得到线性电路的传递函数。下面的例子将说明这种方法。

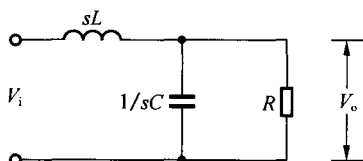


图 1.1 一个低通滤波器

例 1.1 确定图 1.1 所示电路的传递函数 $V_o(s)/V_i(s)$ 。

解: 在这个电路中, 电感被模拟成复阻抗 sL , 电容则模拟成复阻抗 $(sC)^{-1}$ 。通过电路分析的分压定律, 可以求得传递函数 $H(s)$ 为:

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R/(RsC + 1)}{R/(RsC + 1) + sL} = \frac{R}{s^2RLC + sL + R} \quad (1.3)$$

为了简单起见, 激励和响应通常分别写为 V_o 和 V_i , 这样就不会发生混淆。

用线性传递函数 $H(s)$ 来描述系统响应的另一个好处在于, 通过令 $s = j\omega$ 可以得到网络的频率响应。因此, 如果线性系统是稳定、时不变的, 且激励是正弦波, 那么稳态响应(在瞬态响应衰减小到可忽略之后)也将是一个同频率的正弦波。如果

$$v_i(t) = V \sin \omega t$$

那么稳态响应是:

$$r(t) = R \sin(\omega t + \phi)$$

这里

$$|H(j\omega)| = \frac{V}{R} \quad \text{且} \quad \arg H(j\omega) = \phi$$

例 1.2 确定图 1.1 所示网络的频率响应, 设 $L = 0.5\text{H}$, $C = 2\text{F}$, $R = 1\Omega$ 。

解: 通过在传递函数中按照 $s = j\omega$ 进行替换, 可以求得频率响应。在此题中, 式 (1.3) 变为:

$$H(j\omega) = [(j\omega)^2 + 0.5j\omega + 1]^{-1}$$

响应的幅值是一个频率相关函数:

$$|H(j\omega)| = \left\{ \left[(1 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{-1}$$

并且相移同样也是频率相关的函数:

$$\arg H(j\omega) = -\tan^{-1} \frac{0.5\omega}{1 - \omega^2}$$

一个没有理想延时元件的线性传递函数有如下的形式:

$$H(s) = \frac{A(s)}{B(s)} \quad (1.4)$$

在这里 $A(s)$ 和 $B(s)$ 是 s 的多项式。 $A(s)$ 的零点被称为传递函数的零点, 而 $B(s)$ 的零点被称为传递函数的极点。极点就是当传递函数的幅值无穷大时 s 的值。为了使传递函数是稳定的, 所有的极点必须位于 s 平面的左半部分(极点的实部必须为负)。在第 9 章将详细讨论稳定性问题。

例 1.3 计算例 1.2 所示的传递函数的零点和极点:

$$H(s) = (s^2 + 0.5s + 1)^{-1}$$

解: 此传递函数没有有限零点。因为分母多项式比分子多项式高两个阶次, 所以传递函