

路原集

■ 董在望 肖华庭 编

高等教育出版社

本书参照1987年国家教委批准颁布的《电子线路(I)、(II)课程教学基本要求》编写而成。主要讨论通信电路的基本工作原理和分析方法,包括阻抗变换与选频电路、通信系统内部噪声、非线性电路及其分析方法、参变电路与时变线性电路、模拟相乘器、功率变换电路、正弦波振荡器、调制与解调、锁相环路和频率合成技术等内容。各章附有习题,书末列举了两种实用模拟集成系统的应用。

本书包括了高等学校电子、通信类专业“高频电子线路”或“非线性电子线路”课程的主要内容,补充了已经广泛应用的新内容,可作为相应课程的教材或参考书,也可供从事电子设备及其电路设计的科技人员参考。

通信电路原理

董在望 肖华庭 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

*

开本850×1168 1/32 印张24.25 字数600 000

1989年11月第1版 1989年11月第1次印刷

印数 0001—2 260

ISBN7-04-002306-7/TN·123

定价 5.95 元

前 言

本书是一本介绍现代通信系统中常用电子电路的工作原理和分析方法的教材。

随着新的元、器件的出现,集成电路设计和工艺技术的发展以及数字计算机的广泛应用,通信电路近年来发生了许多重要的变化,例如:

由于通信系统的工作频段已扩展到光波波段,因此通信电路除了有传统的集总参数电路、分布参数电路以外,又开始发展以光电子器件为基础的光通信电路。

由于集成电路具有体积小、功耗低、可靠性高、性能好以及易于使系统整机实现少调整和不调整等优点,通信电路正迅速向集成化方向发展。不仅集总参数电路正在迅速集成化,分布参数电路也在集成化,如处理微波信号的微波集成电路(MIC)和单片微波集成电路(MMIC)等。另外,光集成电路也在研制中。随着集成电路设计与工艺技术的进步,现在已有可能将一个电子系统或其子系统集成在一个芯片上,称为系统集成。它改变了用通用元、器件组装电子系统的传统方法,而直接将系统制作在芯片上,从而大大促进了系统、电路与工艺的结合。

由于数字集成电路的集成规模远大于模拟集成电路,且具有易于与数字计算机联用以及良好的电性能等优点,因此,随着数字信号处理技术的发展,通信系统愈来愈广泛地应用数字电路和数字信号处理技术。一些原由模拟电路实现的功能,也有改用数字电路实现的趋势,如锁相环电路、调频、调相解调器等。

电子电路课程的教学内容应该与通信电路近年来的发展相适

应。在编写本书时,编者力图反映这些变化。另一方面,考虑到本书是属于专业基础课程的教材,所涉及的内容应该是通信电路的基本内容,尽管目前通信系统已广泛应用集成电路,但在基本电路技术方面仍是以分立电路为基础,而且为了合理地设计集成电路,适应不断出现的各种新电路形式,仍需重视基本分立电路技术。因此在编写本书时,注意了以下几个方面:

1. 侧重于通信电路的基本工作原理与概念。如频率选择、噪声、非线性电路的一般特性、振荡、调制与解调、参量电路以及反馈控制电路等。

2. 引入了一些在现代通信系统中已较为广泛应用的电路技术及其分析方法。例如锁相技术、频率合成技术、用数字信号处理技术实现模拟电路功能等。后者由于篇幅所限,仅介绍一种数字式调频解调器,以便读者形成具体的概念。

3. 本书以介绍通信系统中使用的模拟集成电路为主。对目前仍然使用的分立元件电路,也做必要的介绍。由于目前用于通信系统中的模拟集成电路种类很多,而且多数有很强的专用性,本书只能选择一些典型电路加以说明,并注意对组成它们的基本单元做较详细的讨论。为了帮助读者对实际集成电路有所了解,在本书附录中还介绍了单片收音机和数字锁相频率合成器的电路构成及工作特点。

在对电路的讨论中,侧重于工作原理的说明,较少涉及设计问题。而对实际电路的特性,则或者给出测试数据,或者给出计算机辅助分析的结果。

4. 本书讨论的电路主要在 100 MHz 频率范围内使用,但有些电路在某些方面做适当改进后,也可应用于更高的频率。

全书共分十一章。

第一章介绍通信系统的基本概念和信号传输的基本问题。并对通信电路的分类做了概括的叙述。本章有两个附录:开关电容

电路工作原理和A/D与D/A变换的基本知识。这是考虑到开关电容电路已开始在通信系统中应用和A/D与D/A变换的应用日趋广泛的现状,为读者提供有关的基本概念。

第二章介绍通信电路中的无源和有源阻抗变换和选频电路。其中有些内容已在其它课程中有所阐述,本章内容可以看作是复习与补充。但这些内容是十分重要的。

第三章讨论了噪声的来源。从随机噪声的功率谱结构得出白噪声的基本特性以及噪声功率运算、噪声系数和噪声温度的定义、计算方法及在通信系统中的应用等。关于随机噪声的概率分布特性则留待后续课程讨论。

第四章至第六章介绍了非线性电路的基本概念及一般分析方法;参变电路的工作原理及其特例——时变参量线性电路;模拟相乘器的工作原理,主要特性及典型电路。这几章所讨论的各种基本电路,一方面作为独立的频率变换电路而被广泛应用,另一方面又是构成其它功能电路的基础,为后面各章做准备。

第七章介绍功率变换电路的工作原理,包括线性功率放大原理、线性功放和谐振功放的电路构成、提高功放效率的基本设想、高频宽频带功率放大、功率合成和功率分配的原理与主要电路。

第八章深入讨论了各种正弦振荡器,包括晶体振荡的工作原理及其电路构成。电路分析着重于电路元件对振荡特性的影响。

第九章介绍调制与解调原理及电路。主要讨论了模拟信号的调幅和调频以及数字信号的调相。

第十章讨论了锁相环路的线性与非线性特性及其分析方法,并简单介绍了数字锁相环路的基本知识。

第十一章介绍了频率合成原理及常见的频率合成制式,包括几种锁相频率合成器的构成与工作特点。

各章后附有习题,帮助读者理解各章的主要内容并培养读者综合应用已学过的知识去独立分析问题。

本书可作为无线电技术与信息系统专业及其它相近专业大学本科教材或教学参考书。

在制定本书大纲时,我校常迥教授和吴佑寿教授对全书结构、内容选取提过许多有益的建议。而本书的编写更得到嵇大铨教授的悉心指导,他认真审阅了全部书稿,提出了许多宝贵意见,并对其中一些章节做了重要的增删。在大纲确定和编写过程中,还得到我系尹达衡副教授、姚彦副教授及线路与系统教研组其他同志的热情帮助,在此表示衷心的感谢。

上海交通大学宋文涛教授主审了全书,并提出了许多宝贵的意见,在此深表谢意。

限于编者的水平,书中难免有不妥与错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

1988年10月于清华大学无线电电子学系

常用符号表

一、基本符号

I, i	电流
V, v	电压
P, p	功率
R, r	电阻
G, g	电导
X, x	电抗
B, b	电纳
$Z(j\omega) = R + jX$	阻抗
$Y(j\omega) = G + jB$	导纳
L	电感
C	电容
M	互感
T	热力学温度, 脉冲重复周期
t	时间
τ	脉冲宽度, 充放电时间常数
F, f	频率
Ω, ω	角频率
$s = \sigma + j\omega$	复频率
BW	带宽, 频谱宽度

二、电压、电流

$V(I)$ 电压(电流)

下标大写表示直流电压, 如 V_D

下标小写表示正弦电压有效值, 如 V_a

$v(i)$ 电压(电流)瞬时值

下标大写表示包含直流电压的瞬时值, 如 v_D

下标小写表示交流电压的瞬时值, 如 v_a

v_c 载波电压瞬时值, 集电极交变电压瞬时值

v_D 调制信号电压瞬时值

v_s 交流信号源电压瞬时值

v_i 输入交变电压瞬时值

v_o 输出交变电压瞬时值

V_{CC} 集电极直流电源电压

V_{DD} 漏极直流电源电压

$V_c(I_0)$ 工作点直流电压(电流)

V_f 反馈电压有效值

V_c 控制电压

$V(s)$ 电压的拉普拉斯变换

$\dot{V}$ 正弦电压的复数值

V_m 正弦电压振幅值

A_v 电压增益

$\dot{A}$ 增益的复数值

三、功率

P_i 输入信号功率

P_o 输出信号功率

P_c 载波功率

P_C 集电极耗散功率

P_s 直流电源供给功率

P_{im} 额定输入功率

P_{om} 额定输出功率

G_P 功率增益

G_{Pm} 额定功率增益

四、阻抗、导纳、频率

R_i 输入电阻

R_o 输出电阻

R_s 信号源内阻

R_L 负载电阻

R_s 网络串联等效电阻

R_p 网络并联等效电阻, 并联谐振回路端电阻

r 回路损耗电阻

Z_0 传输线特性阻抗

$Z(j\omega) = Z(\omega)e^{j\varphi_z(\omega)}$ 阻抗的复数值

$Y(j\omega) = Y(\omega)e^{j\varphi_y(\omega)}$ 导纳的复数值

ω_0 回路谐振角频率, 已调波中心角频率

f_0 回路谐振频率, 已调波中心频率

f_r 基准频率, 参考频率

五、电路参数

$H(s)$ 电路或网络的复频域传递函数

$H(j\omega)$ 电路或网络的频域传递函数

Q_0 回路空载品质因数

Q_L 回路有载品质因数

F 反馈系数

T 反馈放大器的环路增益

N 绕组匝数, 声表面波换能器的周期数

ρ 回路特性阻抗

k 耦合系数

n 接入系数, 匝数比(变比)

η 效率, 耦合因子

γ 变容管的变容指数

ξ	阻尼系数
ξ	一般失谐量, 集电极电压利用系数
α	回路选择性特性
m_A	幅度调制指数, 调幅度
m_F	频率调制指数

六、噪声

$\overline{v_n^2}(\overline{i_n^2})$	噪声电压(电流)均方值
$d\overline{v_n^2}$	df 频带内噪声电压均方值
$\sqrt{\overline{v_n^2}}(\sqrt{\overline{i_n^2}})$	噪声电压(电流)均方根值
W_v, W_i	噪声(电压, 电流)功率谱密度
BW_n	等效噪声带宽
P_n	噪声功率
P_s	信号功率
$P_s/P_n, S/N$	信号与噪声功率比, 信噪比
F_n	噪声系数
F_{nav}	平均噪声系数
$F_n(f)$	点噪声系数
NF	噪声指数
T_0	常温温度
T_e	等效噪声温度

七、器件参数

$V_o(I_o)$	工作点直流电压(电流)
D	二极管
T	晶体管
I_s	PN 结反向饱和电流
C_j	PN 结结电容
g	跨导
V_{th}	导通电压, 开启电压

V_{or}	夹断电压
α	共基极短路电流传输系数
β	共发射极短路电流放大系数
f_{α}	共基极交流电流传输系数的截止频率
f_{β}	共发射极交流电流放大系数的截止频率
f_T	特征频率
f_{max}	晶体管最高振荡频率
r_e	发射结电阻
$r_{b'b}$	基极体电阻
I_{CM}	集电极最大允许电流
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
V_{CEO}	基极开路时 C-E 结反向击穿电压
V_{BEO}	集电极开路时 B-E 结反向击穿电压
V_{CES}	集电极饱和压降

八、其它

$p(s)$	网络极点
ω_n	n 阶组合角频率
M	频率混合矢量
F_v	1% 矢量误差频率

目 录

第一章 绪 论

§ 1-1 通信系统的基本概念	1
1-1-1 通信系统的组成	1
1-1-2 通信系统的基本特性	3
1-1-3 通信系统的信道	4
1-1-4 通信系统中的信号	10
1-1-5 通信系统中的发送与接收设备	14
§ 1-2 信号传输的基本问题	17
1-2-1 信号通过线性系统	17
1-2-2 信号通过非线性系统	21
§ 1-3 通信电路的基本形式	24
§ 1-4 关于本书的内容	31
1-4-1 关于信号变换的理论与技术	32
1-4-2 关于电路	33
1-4-3 关于电路分析方法	34
附录	35
§ 1-A-1 开关电容电路的工作原理	35
1-A-1-1 基本开关电容单元	35
1-A-1-2 开关电容积分器	38
§ 1-A-2 A/D 与 D/A 变换电路的工作原理	47
参考文献	52

第二章 阻抗变换电路与选频电路

§ 2-1 阻抗变换电路	53
--------------	----

2-1-1 变压器变换电路	54
2-1-2 分压式阻抗变换电路	62
2-1-3 小结	66
§ 2-2 LC 串、并联谐振回路	69
2-2-1 串联谐振回路	73
2-2-2 并联谐振回路	81
2-2-3 复杂选频电路	87
§ 2-3 兼有阻抗变换与选频作用的电抗网络	95
2-3-1 阻抗电路的串、并联变换	95
2-3-2 匹配-选频功能的实现	96
2-3-3 T 型匹配网络	98
§ 2-4 有源选频电路	100
2-4-1 晶体管高频放大器的选频特性	101
2-4-2 集中选择性放大器	111
2-4-3 自动增益控制(AGC)电路	118
2-4-4 开关电容选频电路	125
习题	131
参考文献	137

第三章 通信系统的内部噪声

§ 3-1 引言	138
§ 3-2 电阻的热噪声	140
3-2-1 电阻器的噪声等效电路	141
3-2-2 电阻器的噪声资用功率(额定功率)	146
3-2-3 电阻网络噪声功率的计算	146
3-2-4 广义奈奎斯特定理	150
§ 3-3 电子器件的噪声	152
3-3-1 二极管的噪声	152
3-3-2 晶体管的噪声	153

3-3-3 场效应管的噪声	156
§ 3-4 噪声系数	158
3-4-1 网络噪声系数的定义	159
3-4-2 点噪声系数与平均噪声系数	161
3-4-3 额定功率、额定功率增益与噪声系数的计算	162
3-4-4 无源四端网络的噪声系数	163
3-4-5 级联网络的噪声系数	164
3-4-6 接收机灵敏度与最小可检测信号	166
§ 3-5 噪声温度	167
3-5-1 网络的噪声温度与噪声系数	167
3-5-2 级联网络的等效噪声温度	166
3-5-3 天线噪声温度	170
§ 3-6 晶体管放大器的噪声系数	172
§ 3-7 系统低噪声设计的考虑	177
习题	178
参考文献	182

第四章 非线性电路及其分析方法

§ 4-1 非线性电路的基本概念与非线性元件	183
4-1-1 非线性电路的基本概念	183
4-1-2 非线性元件	185
§ 4-2 非线性电路的分析方法	194
4-2-1 非线性电路与线性电路分析方法的异同点	194
4-2-2 非线性电阻电路的近似解析分析	197
4-2-3 非线性动态电路分析	214
§ 4-3 非线性电抗电路的一般能量关系	219
§ 4-4 非线性电路的应用	223
4-4-1 谐振功率放大器	224
4-4-2 倍频器	234

习题	241
参考文献	246

第五章 参变电路与时变参量线性电路

§ 5-1 基本概念	247
5-1-1 参变电路与常用参变电路类型	247
5-1-2 时变参量线性电路	249
§ 5-2 时变参量线性电路的传输特性	250
5-2-1 时变参量线性电路传输特性的一般形式	250
5-2-2 常用基本时变参量线性电路及其传输函数	254
§ 5-3 变频电路	259
5-3-1 变频电路的主要技术指标	260
5-3-2 常用变频电路举例	262
5-3-3 变频干扰	270
§ 5-4 参量放大器与参量倍频器	278
5-4-1 参量放大器	278
5-4-2 参量倍频器	281
习题	282
参考文献	284

第六章 模拟相乘器

§ 6-1 概述	285
6-1-1 基本概念	285
6-1-2 相乘器的基本特性	286
6-1-3 相乘器的实现方法	291
§ 6-2 四象限模拟相乘器	292
6-2-1 双极型四象限模拟相乘器	292
6-2-2 MOS型四象限模拟相乘器	304
6-2-3 二极管环形相乘器	310

§ 6-3 模拟相乘器的工作模式	314
6-3-1 两个输入信号均为低电平, 且不同步	315
6-3-2 两个输入信号一为高电平, 一为低电平, 且不同步	316
6-3-3 两个输入信号为同步的低电平信号	317
6-3-4 两个输入信号为同步的高电平信号	318
6-3-5 两个输入信号为同步信号, 其一为高电平、 另一为低电平	321
习题	323
参考文献	325

第七章 功率变换电路

§ 7-1 线性功率放大器	327
7-1-1 A类功率放大器的基本电路特性	327
7-1-2 B类与AB类功率放大器	331
7-1-3 高效率线性功率放大器	336
§ 7-2 C类功放电路和高效率功放的实现	340
7-2-1 C类功率放大器电路的实现	341
7-2-2 高效率功率放大器的实现	346
§ 7-3 宽频带功率放大器	350
7-3-1 传输线变压器的工作原理	350
7-3-2 1:4和4:1传输线变压器	355
7-3-3 传输线变压器的插入损耗	357
7-3-4 高变换比的传输线变压器	361
7-3-5 传输线变压器参数的确定	363
§ 7-4 功率合成与功率分配	365
7-4-1 功率合成原理	368
7-4-2 功率分配原理	372
7-4-3 功率合成电路应用实例	381
习题	383

参考文献	385
------------	-----

第八章 正弦波振荡器

§ 8-1 引言	386
§ 8-2 LC 振荡器的基本工作原理	387
8-2-1 LC 回路的自由振荡现象	388
8-2-2 振荡特性与振荡条件	391
8-2-3 自给偏置对振荡状态的影响	401
§ 8-3 LC 振荡器的电路分析	403
8-3-1 LC 振荡器的基本构成	403
8-3-2 三点式振荡器	406
§ 8-4 振荡器的频率稳定度	414
8-4-1 频率稳定度的计量	414
8-4-2 导致振荡频率不稳定的原因	416
8-4-3 主要稳频措施	418
§ 8-5 晶体振荡器	422
8-5-1 石英谐振器的基本特性	423
8-5-2 晶体振荡电路	429
§ 8-6 负阻振荡器	437
8-6-1 负阻器件的基本特性	437
8-6-2 负阻振荡电路	439
§ 8-7 RC 振荡器与开关电容振荡器	443
8-7-1 RC 正弦波振荡器	443
8-7-2 开关电容振荡器	449
§ 8-8 特殊振荡现象	452
8-8-1 间歇振荡现象	452
8-8-2 频率占据现象	456
8-8-3 寄生振荡现象	460
8-8-4 压控振荡与压控振荡器	462