

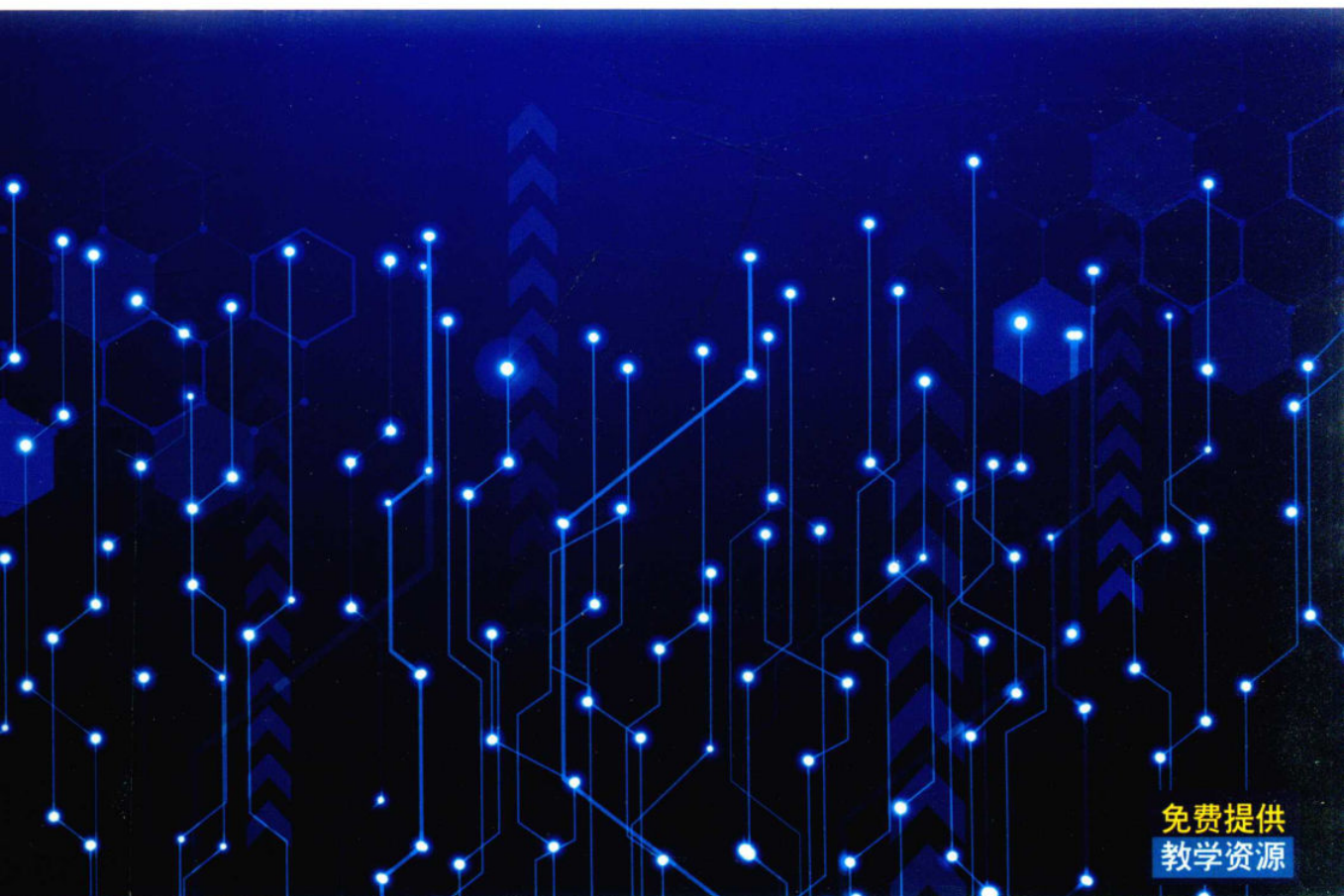


普通高等教育“十三五”规划教材
信息与电子技术类系列教材

模拟电路基础

——从系统级到电路级

陈抗生 周金芳 编著



免费提供
教学资源

 科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材
信息与电子技术类系列教材

模拟电路基础

——从系统级到电路级

陈抗生 周金芳 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从系统级到电路级并以系统级为主全面介绍了现代模拟电路的分析与设计,以适应市场对系统级模拟电路研发人才的需求。

本书以智能手机电路为对象,以微弱信号放大和处理、数据转换电路中的模拟电路、射频收发电路和开关电源电路等内容为阐述重点,体现了现代模拟电路的发展趋势。

本书将电路数值分析与模拟贯穿电路分析与设计的全过程,重在训练学生洞察电路的能力,以及在电路软件支持下对现代模拟电路分析、设计、仿真与优化的能力。

全书共6章。第1章介绍电路模型与电路分析方法;第2~5章从系统层面,第6章从CMOS模拟集成电路层面,阐述了对现代模拟电路的分析与设计。

本书可作为电子信息类专业本科生、研究生模拟电路课程教材,也可供从事现代模拟电路研发的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电路基础:从系统级到电路级 / 陈抗生, 周金芳编著. —北京: 科学出版社, 2020.1

(普通高等教育“十三五”规划教材·信息与电子技术类系列教材)

ISBN 978-7-03-063489-4

I. ①模… II. ①陈… ②周… III. ①模拟电路—高等学校—教材
IV. ①TN710.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第264582号

责任编辑: 赵丽欣 王会明 / 责任校对: 王万红
责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 东方人华平面设计部

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020年1月第一版 开本: 787×1092 1/16

2020年1月第一次印刷 印张: 28 1/2

字数: 654 000

定价: 69.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新科〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62134021

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

现代模拟电路已从简单的电路发展为复杂的系统。该系统具有层次化架构的特点，可明显分为电路级（circuit level）与系统级（system level）两个基本层次。两个层次的边界及其联系已十分清晰。电路级电路是系统级电路实现的基础，而系统级电路的分析又是指导电路级电路设计的主要依据。模拟电路设计的专业分工也渐趋成熟，系统级电路、电路级电路的设计可相对独立地进行。

现代模拟电路的研究开发，首先关注的是从系统层面对电路功能的分析描述，而并非电路具体实现的细节。毫无疑问，深入每一局部电路的详细分析仍然十分重要，不过这种分析是在对电路架构的整体分析之后，而不是在对电路架构的整体分析之前。模拟电路的研究开发，也经历了从“自底向上”（从电路级到系统级）的模式向“自顶向下”（top-down）（从系统级到电路级）的模式转变。与此相应，模拟电路的教学除了传统的从电路级到系统级的教学体系外，近年又出现了另一种从系统级到电路级的教学体系。

促进模拟电路教学从自底向上体系到自顶向下体系转变的又一因素，源于年轻人对现代电子产品即时作用-即时得到反馈的习惯。基于这一习惯，对于从底层基本电路开始的自底向上的模拟电路教学体系，年轻人显得缺乏耐心，并容易对所学电路知识的地位和作用产生迷惑（特别在电路学习的初期），他们急切期望从系统层面感受到学习的效果。而在系统层面即时作用-即时得到反馈比较容易实现，因此自顶向下的模拟电路教学体系更受年轻人欢迎。

在模拟电路课程教学中，我们越来越感觉到系统观念的重要性。现代电路知识的传授和系统观念的传授至关重要，而且是第一位的。因此从2014年起，我们开始探索基于自顶向下的教学体系，对模拟电路课程教学进行改革。为此急需编写一本遵循自顶向下教学体系的模拟电路教材，该教材既覆盖了传统的模拟电路论题，也集成了现代模拟电路的基本技术，它首先从系统角度论述模拟电路的方方面面，并在此基础上初步把握各种模拟电路的设计技术。本书就是这一努力的结果。

电路的发展表明，凡能用数字电路方案解决的尽量用数字电路解决。因此，有生命力的模拟电路主要体现在以下两方面：数字电路不能替代的模拟电路；即使能替代但数字电路暂无竞争优势的模拟电路。通过对智能手机中应用的模拟电路的剖析，从应用系统角度看，构成系统级模拟电路的基本模块主要有以下4类：弱信号放大处理电路、模/数转换器（ADC）与数/模转换器（DAC）中的模拟电路、射频收发电路和开关电源电路。基于这些基本模块就可构成各种针对特定应用的现代模拟电路。本书对模拟电路的阐述，无论从系统级还是从电路级都将围绕这4类电路展开。

现代模拟电路研发的每一步都离不开电路软件的支持，基于电路软件的电路仿真实验研究将贯穿模拟电路教学的全过程。

电路级模拟电路与系统级模拟电路分别从电路级与系统级两个不同的层次观察分析模

拟电路。从表面看，两者的分析方法差别较大，似乎很难用统一的方法进行分析处理。不过只要深入观察，两者都可看作不同层次的基本模块在不同平台上的互连组合。当今电路级电路的主流是基于 CMOS 技术的，它是在硅晶片平台上，众多 MOS 晶体管的互连组合。而对于系统级电路，基本模块是芯片（或芯片组），它是在 PCB 平台上基于芯片与其他无源元件（或辅助电路）的互连。因而两者都可采用模块化的分析方法进行分析。这就是本书将这些电路集成在单一课程中的重要依据。

本书包含 6 章。第 1 章介绍电路模型与电路分析方法，简要阐明学习系统级模拟电路需要的基础知识。包括电路特性的时域、频域表示；线性电路的输入-输出关系、系统函数；实体电路转变为可分析的电路模型，以及电路层次化架构与模块化分析的基本思想；按修正节点分析法（modified nodal analysis, MNA）在复频域建立电路方程并求解。第 2~5 章讨论系统级模拟电路。第 2 章介绍基于运放的弱信号放大处理电路，讨论将传感器输出的微弱电信号放大并处理为模/数转换器可处理的信号。第 3 章介绍数据转换电路，主要关注数/模转换，以及模/数转换中的模拟电路问题。第 4 章介绍射频收发器，讨论任何用电设备无线上网必须解决的模拟电路问题，重点是载波频率变换。第 5 章介绍开关电源电路，重点讨论 DC/DC（直流/直流）变换器，以及电源的闭环控制和安全保护机制。第 6 章介绍 CMOS 模拟集成电路，从 MOS 晶体管电流控制机理及其电路模型开始，讨论 CMOS 模拟集成基本单元电路，最后对运算放大器电路、开关电容电路、射频低噪声放大器与混频电路作简要介绍。

各章所讨论电路可分为两个层次：基本层次和提高层次。书中以“*”标出的章节为提高层次内容，其版面占全书 18%，学生可根据专题研究的需要选读其中一部分。

根据教学计划的不同要求，可以用不同的方法使用本书。浙江大学信息与电子工程学院使用本书替代原“电路原理”与“模拟电子技术基础”两门课程的教材，安排 5 个学分，其中 4 个学分为理论知识学习，每周安排 4 学时；1 个学分为电路仿真实验研究，每周安排 2 学时，故周学时为 4+2，16 周共计 96 学时。如果略去提高层次的内容，本书也适用于安排 4 个学分，周学时为 3+2，16 周共计 80 学时的模拟电路教学。对于非电信类专业，如果略去第 1~5 章的提高层次内容，并进一步略去第 6 章，本书还适用于安排 3 个学分，周学时为 2.5+1，16 周共计 56 学时的系统级模拟电路教学。

本书电子参考资料包括：①PPT 形式讲稿、题解与附录；②电路分析、设计、仿真的代码，可以登录科学出版社官方网站（<http://www.abook.cn>）下载或与作者联系索取，作者的电子邮箱为 zhoujf@zju.edu.cn。

本书的编写得到浙江大学信息与电子工程学院章献民教授、杨冬晓教授、杨建义教授、史治国教授、陈红胜教授、沈会良教授、李志能教授、金晓锋教授、金韬教授、池灏教授、郑史烈教授、何乐年教授、朱大中教授、吴锡东副教授、王勇副教授、金向东高级工程师、谢银芳高级工程师、吴叶飞老师、徐蓉老师等的关心、支持，西北工业大学段哲民教授、东南大学李智群教授也对本书提出了宝贵意见。研究生王先锋、朱蒋财、温家宝、戴少鹏对本书建设做了大量工作，再次表示由衷的感谢。本书还得到了王锴波女士的帮助，在此致谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

作者

常用符号说明

一、电压和电流符号规则，以漏极电流为例

i_D	小写字母，大写下标，表示漏极电流含有直流的总瞬时值
I_D	大写字母，大写下标，表示漏极直流电流
i_d	小写字母，小写下标，表示漏极电流交流分量

二、常用基本符号

1. 电压

V, v	电压通用符号
v_s, v_i, v_{in}	信号源电压，输入信号电压
v_o, v_{out}	输出信号电压
V_{DD}, V_{CC}	正电源电压
V_{SS}, V_{EE}	负电源电压
V_{GG}, V_{BB}	栅极、基极偏置电压
V_{Th}	戴维宁电压
v_d	差模电压
v_{cm}	共模电压
v_p, v_n	集成运放同相、反相输入电压

2. 电流

I, i	电流通用符号
i_s, i_i, i_{in}	信号源电流，输入信号电流
i_o, i_{out}	输出信号电流
I_{DD}, I_{CC}	正电源静态电流
I_{EE}, I_{SS}	负电源静态电流
I_L, i_L	负载电流
i_f, i_f	反馈电流

3. 功率

P, p	功率通用符号
P_i, P_{in}	输入信号功率
P_o, P_{out}	输出信号功率
P	平均功率，实功率
Q	无功功率，虚功率

- S 视在功率
 \bar{S} 复功率
 4. 电阻、电容、电压及阻抗
 R, r 电阻通用符号
 G, g 电导通用符号
 R_s, R_i, R_{in} 信号源内阻、输入电阻
 R_o, R_{out} 输出电阻
 R_L 负载电阻
 R_{Th} 戴维宁电阻
 5. 增益
 G, A, μ 通用增益符号
 G_v, G_i 电压、电流增益
 G_r, G_g 互阻、互导增益
 G_f 反馈放大电路的增益
 β 反馈系数
 6. 频率
 f, ω 频率、角频率通用符号
 f_H, f_L 放大电路的上限、下限截止频率
 BW 通频带
 $BW|_{3dB}$ 3dB 带宽
 f_p, f_z 极点, 零点频率
 f_s 采样频率
 f_o 振荡频率, 中心频率

三、器件参数符号

- D, D_z 二极管, 稳压二极管
 M MOS 场效应管
 T BJT 晶体管
 V_{BR} 二极管反向击穿电压
 V_T 热电压
 V_{TN}, V_{TP} N 沟道、P 沟道场效应管阈值电压
 V_A 厄尔利电压
 λ 沟道长度调制系数
 I_s 二极管反向饱和电流
 I_{Es} 晶体管发射结反向饱和电流
 r_{be} BJT 输入电阻
 $r_{bb'}$ BJT 基区体电阻

$r_{b'e}$	BJT 发射结反映到输入端电阻
r_{ce}	BJT 的输出电阻
r_{ds}	场效应管的输出电阻
c_{bc}, c_{be}	BJT 混合 π 等效电路中集电结、发射结等效电容
c_{gs}, c_{gd}, c_{ds}	场效应管栅源、栅漏、漏源间的等效电容
C_T, C_D	势垒电容与扩散电容
C_j	结电容
C_{ox}	单位面积的栅极电容量
α	BJT 共基极电流放大系数
β	BJT 共发射极电流放大系数
n, p	电子浓度, 空穴浓度
W, L	沟道宽度、长度
N_a, N_d	受主、施主杂质浓度
μ_n, μ_p	电子、空穴的迁移率
D_n, D_p	电子、空穴的扩散系数
K_n	场效应管导电因子
g_m	跨导

四、其他符号

D/A, DAC	数/模转换器
A/D, ADC	模/数转换器
T	温度、周期
t	时间
j	电流密度
Φ, ϕ	相位角
Q	静态工作点
Q, q	电荷量
τ	时间常数
S	面积
θ	相角, 导通角
k	玻尔兹曼常数
K	热力学温度的单位 (开尔文)

目 录

前言

常用符号说明

第 1 章 电路模型与电路分析方法	1
1.1 电气元件的互连构成电路	1
1.1.1 电路——实际的电气系统及其模型	1
1.1.2 电气元件的互连与芯片封装	2
1.1.3 模拟电路研究内容	7
1.2 电路特性的时域、频域表示	9
1.2.1 电压与电流、能量与功率	9
1.2.2 电信号在时域与频域中的表示	11
1.2.3 卷积积分——零状态下线性时不变电路的输入-输出关系	16
1.3 实际电路转变为可分析的电路模型的基本思想	16
1.3.1 构建电路模型的基本思想	17
1.3.2 理想基本电路元件——构建电路模型“大厦”的“砖瓦”	19
1.3.3 理想互感与受控电源	24
1.3.4 构建简单实体电路的电路模型举例	28
1.4 基于电路模型分析、预测电路的特性	32
1.4.1 基尔霍夫电路定律与线性电路的叠加原理	32
1.4.2 节点分析法与拉普拉斯变换	37
1.4.3 系统函数 $H(s)$ 的几个基本性质与电路的系统框图表示	47
1.4.4 RC 电路的充电与放电	49
1.5 电路模块化分析思路与自顶向下的设计方法	52
1.5.1 电路层次化架构与模块化分析的思路	53
1.5.2 自顶向下设计方法	57
1.6 电气元件的电路模型与 RLC 电路的频率响应	59
1.6.1 实际电阻、电容、电感与电源的电路模型	60
1.6.2 互连线的电路模型	62
*1.6.3 RLC 电路的频率响应	66
1.6.4 理想运算放大器的电路模型	73
习题	77

第 2 章 基于运放的弱信号放大处理电路	81
2.1 理想模拟运算电路.....	81
2.1.1 反相放大器.....	82
2.1.2 同相放大器.....	83
2.1.3 加法放大器.....	84
2.1.4 减法运算电路与差分放大器.....	86
2.1.5 微分与积分电路.....	91
2.1.6 基于 CDTA 的乘法、除法运算电路.....	93
2.1.7 测量放大器.....	95
2.2 描述运放非理想特性的参数与非理想因素对运放电路特性的影响.....	98
2.2.1 描述运放非理想特性的参数.....	98
*2.2.2 非理想因素对运放电路特性的影响.....	100
2.3 有源 RC 滤波器.....	105
2.3.1 滤波器特征参数.....	106
2.3.2 基于电压型运放的一阶有源 RC 滤波器.....	107
2.3.3 基于电压型运放的二阶有源 RC 滤波器.....	110
*2.3.4 基于电流模技术的运放的多功能有源 RC 滤波器.....	117
2.4 测量放大器与心电信号处理电路模拟部分的设计.....	120
2.4.1 测量放大器的设计.....	121
2.4.2 心电信号处理电路的设计.....	124
习题.....	135
第 3 章 数据转换电路	140
3.1 数/模转换器.....	140
3.1.1 奈奎斯特速率 DAC 框图表示与特性参数.....	141
3.1.2 奈奎斯特速率 DAC 结构类型与工作原理.....	146
3.2 比较器及其特性表示.....	151
3.3 ADC 基本架构与 ADC 特性参数.....	155
3.3.1 ADC 基本架构与 ADC 结构类型.....	155
3.3.2 ADC 的主要性能参数.....	158
3.4 逐次逼近寄存器型 ADC 与全平行 ADC.....	161
3.4.1 逐次逼近寄存器型 ADC.....	161
3.4.2 全平行 ADC.....	163
3.5 流水线 ADC.....	169
3.5.1 流水线 ADC 结构及其输入-输出关系.....	170

3.5.2	采样/保持电路 (S/H 电路)	173
3.5.3	流水线子转换级	179
3.5.4	流水线 ADC 总体架构设计	188
3.5.5	流水线 ADC 行为级建模与仿真	190
*3.6	Σ - Δ 结构 ADC	200
3.6.1	一阶 Σ - Δ 调制器	201
3.6.2	高阶噪声整形 Σ - Δ 调制器	207
3.6.3	Σ - Δ 结构调制系统级设计举例	210
	习题	219
第 4 章	射频收发器	223
4.1	射频收发器的构成模块	223
4.2	混频器	226
4.2.1	混频器的一般原理与镜频抑制	227
4.2.2	复信号与复混频	231
*4.2.3	复数滤波器	235
4.3	射频收发器的体系结构	237
4.3.1	单通道体系结构	237
4.3.2	双通道体系结构	239
4.4	系统噪声与噪声表示	242
4.5	电路的非线性	247
4.6	射频收发器的性能参数及其预算	254
4.6.1	无线移动通信标准简介	254
4.6.2	射频收发器的主要性能参数	259
*4.6.3	射频收发器性能参数预算举例	264
4.7	宽带零中频接收机射频前端建模与仿真	268
4.7.1	接收机射频前端指标解读与总体实现框图	268
4.7.2	接收机射频前端元器件选型与参数预设	270
4.7.3	接收机射频前端特性的 ADS 仿真与射频芯片组	278
4.8	基于射频芯片构建射频收发器电路	284
	习题	293
第 5 章	开关电源电路	297
5.1	EMI 滤波器与整流滤波电路	297
5.1.1	电磁干扰滤波器	298
5.1.2	大功率二极管与功率场效应晶体管	300

5.1.3	整流与滤波电路	302
5.1.4	功率因数校正的基本概念	306
5.2	DC/DC 变换器	308
5.2.1	非隔离型 DC/DC 变换器的基本结构与工作原理	308
5.2.2	隔离型 DC/DC 变换器	317
5.3	反馈控制与开关电源电路	322
5.3.1	PWM 控制技术	322
5.3.2	单级 APFC 电路	326
5.3.3	反激式开关电源电路的设计考虑	328
	习题	339
第 6 章	CMOS 模拟集成电路	341
6.1	PN 结与 MOSFET	342
6.1.1	PN 结与 PN 结二极管	342
6.1.2	MOS 晶体管电流控制机理及其特性曲线的定性说明	349
6.2	MOS 晶体管的电路模型	357
6.2.1	长沟道近似下简单 DC MOS 模型	357
6.2.2	MOS 晶体管的交流小信号电路模型	359
6.2.3	基于 Hspice 软件的 NMOS 晶体管的直流仿真	363
6.2.4	MOS 晶体管特征频率 f_T	364
6.3	恒流源电路	366
6.3.1	基本恒流源电路	366
6.3.2	恒流源输出电阻及其改进	371
6.4	CMOS 集成共源极放大电路	374
6.4.1	CMOS 集成共源极放大电路简化分析	375
6.4.2	CMOS 集成共源极放大电路 Hspice 仿真	382
6.5	CMOS 集成共栅极放大电路	388
6.6	CMOS 集成共漏极放大电路	392
6.7	CMOS 集成共源-共栅极放大电路	395
6.8	CMOS 集成差分放大器	398
6.8.1	差分放大器的结构与性能参数	399
6.8.2	单端输出差分放大器直流大信号特性	401
6.8.3	单端输出差分放大器小信号特性分析	404
6.9	负反馈放大电路的结构、特性及其稳定性	405
6.9.1	负反馈放大器的增益及结构类型	405

6.9.2 负反馈对放大器电路性能的影响	408
6.10 电压型二级运算放大器	413
6.10.1 二级运算放大器的增益与频率特性分析	413
*6.10.2 反馈补偿网络	416
*6.10.3 单端输出二级运算放大器设计	418
*6.11 基于开关电容技术的 Σ - Δ 调制器	424
6.11.1 开关电容模拟电阻与开关电容积分器的基本概念	424
6.11.2 单环二阶 Σ - Δ 调制器	427
*6.12 射频低噪声放大器与混频器简介	430
6.12.1 源端电感负反馈结构的窄带低噪声放大器	431
6.12.2 吉尔伯特混频器基本原理	432
习题	435
参考文献	441

第 1 章 电路模型与电路分析方法

“电路”通常是指实际的电气系统及其模型。实际电气系统的特性可以测量。电路模型是实际电气系统的抽象，依据电路模型可以分析、预测实际电气系统的特性。构建实际电气系统的电路模型是电路分析的重要环节。

本章重在阐明实体电路转变为可分析的电路模型的基本思想、常用电气元件的简化电路模型，以及电路自顶向下与自底向上的设计方法。

本章 1.1 节说明实体电路与其模型的联系和区别，电气元件互连与芯片封装的基本概念。1.2 节介绍电压、电流在时域与频域中的表示。1.3 节阐明实际电路转变为可分析的电路模型的基本思想，5 个理想基本电路元件的定义、符号及其模型，以及受控电源的基本概念。1.4 节基于电路模型分析预测电路的特性，说明电路分析所依据的基本电路定律、定理与原理，并在此基础上构建电路方程及其求解。1.5 节介绍电路模块化分析思路与自顶向下的设计方法。1.6 节对系统级电路中常用的无源元件以及运算放大器的电路模型作了简要介绍。

本章重点阐述：

- 实体电路与其模型的联系与区别；
- 电路特性时域、频域表示，零状态下线性时不变电路的输入-输出关系（卷积积分）；
- 理想基本电路元件，实体电路转变为可分析的电路模型的基本思想；
- 基于电路模型建立电路方程，求解电路方程，预测电路特性；
- 电路层次化架构与模块化分析的基本思路，自顶向下的设计方法，电路系统级描述与电路级描述的联系与区别；
- 常用无源元件与运算放大器的电路模型，基本 RLC 电路的频率特性。

1.1 电气元件的互连构成电路

本节要点：

- “电路”术语的双重含义：电路既可定义为电气元件互连构成的实体，又可解释为反映电路特性的近似数学模型（简称电路模型）；
- 电气元件的互连与芯片封装；
- 模拟电路研究内容。

1.1.1 电路——实际的电气系统及其模型

通信系统、计算机系统、控制系统、信号处理系统，以及电力系统等都是实际电气系统的重要分支，电路研究的正是这些分支系统的共同部分。

上述电气系统的 5 个分支都跟电现象有关。电既有能量，也可作为信息的载体。电载

有信息时，称为电信号。电力系统关注电携带的能量。电力系统中电压、电流的幅值都比较大，中国市电电压的标准为 220V（有效值），故通常将电力系统称为强电系统。而对于通信、自动控制、计算机、信号处理等系统，人们更关注电承载的信息。虽然电信号也伴随有能量，但其电压、电流值与市电 220V 相比则微弱得多。如生物电信号一般在 mV，甚至 μV 量级，比市电小 4~7 个数量级。因此习惯上将通信、自动控制、计算机、信号处理等系统称为弱电系统。所谓电子系统，一般指的就是弱电系统。本书所讨论电路主要针对处理弱电信号的电子系统。

电气系统的 5 个分支联系密切，并相互作用。例如，通信系统用数字计算机控制信息的流动。计算机中包含控制系统，计算机联网需要通信保障。控制系统也包含计算机与通信。信号处理系统中也包含通信、计算机和控制系统。通信系统、计算机系统、控制系统、信号处理系统都需电力系统供电，电力系统需要规模巨大的通信系统，以及计算机系统、控制系统来安全可靠地调整系统的运行。

上述电气系统各分支的共同部分就是电路，其内涵丰富。从不同的侧面，可对电路作出不同的解读。

电气系统各分支尽管功能各不相同，但从物理结构实现角度看，都可分解为众多电气元件（或电路功能模块）的互连组合。因此习惯上电路被定义为众多电气元件（或电路功能模块）互连而构成的系统实体。电路的特性可通过对实体电路的测量得到。这是对电路内涵的一种解读。

尽管电气系统各分支具体结构存在较大差异，甚至很大差异，但分析思路有一个共同点，首先将其转变为数学模型。该数学模型反映的是实际电气系统输出响应与输入激励的函数关系，常用系统端口电流 I 与电压 V 的函数关系 $I=f(V)$ 表示。因此，电路又被解释为：电路是实际电气系统特性的近似数学模型，简称电路模型。之所以将此“数学模型”称为“电路模型”，是因为反映实际电气系统特性的输入-输出关系，可以用特定的“电路图”表示。电路图的概念将在本章后面说明。

电路模型的价值在于：基于电路模型可以预测电路的特性。

如上所述，“电路”这个术语具有双重含义，既指实体电路又指电路模型。往后会进一步说明。

1.1.2 电气元件的互连与芯片封装

电气元件互连构成电路，那么“互连”是怎么一回事？这是电路初学者首先关注的问题。下面重点介绍基于 PCB 平台的电气元件的互连，其核心元件是集成电路（通常称为芯片）。PCB 是 printed circuit board（印制电路板）首字母的缩写。

手机是无线移动通信系统移动终端的另一称谓，它是移动通信的一部分，但它内部集成了一个功能强大的微型计算机，实现收发信号的处理与控制，并有专门的电源管理系统。所以手机集成了电气系统各个分支的功能。下面以智能手机电路为例说明电气元件是怎样互连成一个系统的。

图 1.1.1 (a) 是从正面看到的华为 2016 年 4 月发布的 p9 手机，图 1.1.1 (b) 所示的则是其两大组件，右边的为屏幕组件，左边的为后壳。屏幕组件是液晶显示屏和触摸屏的层

叠组合。后壳上部为电路主板，下部则为电路副板，中间的为电池板。前、后置摄像头安置在主板上方，拾音器、扬声器则安置在副板位置。

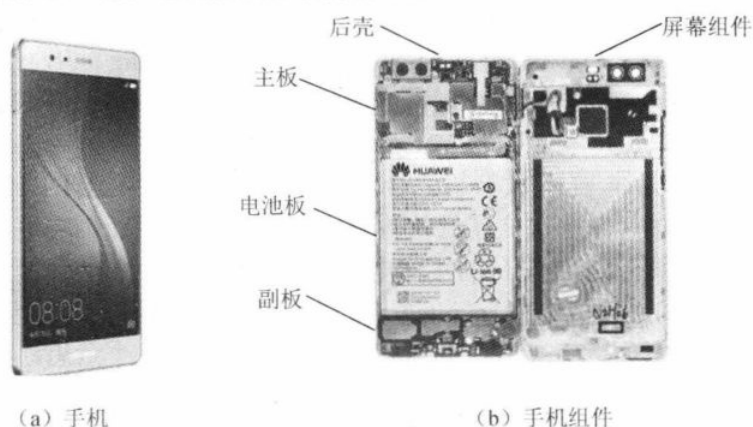


图 1.1.1 智能手机及其主要组件

电路主板是手机的组织核心，其基础是一块多层 PCB，在它上面集成安装了组成手机的主要电气元件，核心是一组芯片，并伴有电阻、电容、电感、开关等其他分立电气元件，它们通过 PCB 上的金属导线有针对性地互连。PCB 上还有多个连接器，主板以外的其他电气元件通过这些连接器连接到主板。图 1.1.2 (a)、(b) 分别为图 1.1.1 所示智能手机主板电路的正面 (top) 与背面 (bottom)。

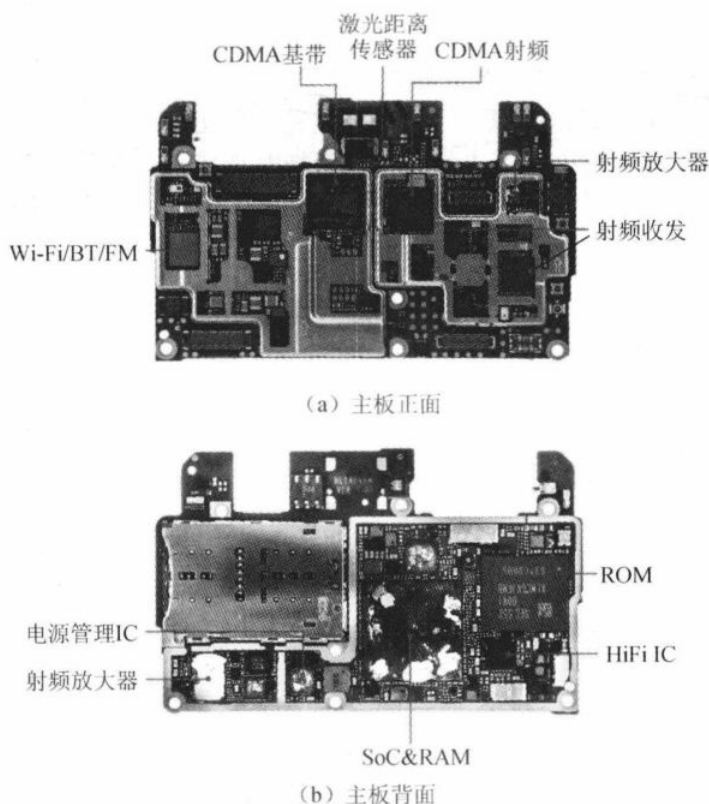


图 1.1.2 打开后盖板看到的主板电路

手机信号的处理、存储、显示、射频收发、控制，以及电源管理等各种功能主要由安装在主板上的十多款芯片（chip）完成。手机电路结构框图将在 1.5 节介绍。

安装在 p9 手机主板上的芯片，有芯片级系统（system on chip, SoC），内含中央处理器（central processing unit, CPU）、图形处理器（graphics processing unit, GPU）；读写存储器（random access memory, RAM）；只读存储器（read only memory, ROM）；射频收发器（RF transceiver）；射频功率放大器（RF power amplifier）；电源管理（power management）；高保真音频解码（HiFi）；无线/蓝牙/收音机三合一无线控制器（Wi-Fi/BT/FM）等。

对于主板而言，芯片几乎决定了这块电路主板的功能，进而影响整个手机系统性能的发 挥。主板电路就是基于 PCB 平台的实体电路的一个例子。

“芯片”（chip）和“集成电路”（integrated circuit, IC）这两个词经常混着用，例如在大家平常讨论的话题中，集成电路设计和芯片设计说的是一个意思，芯片行业、集成电路行业往往也是一个意思。实际上，这两个词有联系，也有区别。顾名思义，集成电路就是把一定数量的常用电气元件，如电阻、电容、晶体管等，以及这些元件之间的连线，通过半导体工艺集成在一起的具有特定功能的电路。“集成电路”更着重电路的设计和布局布线，“芯片”更强调电路的集成、生产和封装。本书中这两个术语混用，请读者留意。

目前商用集成电路绝大部分是基于 CMOS（complementary metal oxide semiconductor, 互补金属氧化物半导体）技术的，这类集成电路称为 CMOS 集成电路，它是制作在硅晶片上的电路。

CMOS 集成电路已从小规模集成电路（small scale integrated circuit, SSI）、中规模集成电路（medium scale integrated circuit, MSI）、大规模集成电路（large scale integrated circuit, LSI），发展到超大规模集成电路（very large scale integrated circuit, VLSI）。超大规模集成电路内部可以包含多至成百万甚至上千万个晶体管。例如，第四代 Intel 酷睿 i7 四核微处理器，集成度达 14 亿个晶体管，所以一小块集成电路实际上也可视为一个电子系统。

下面简要介绍 PCB 平台上诸多电气元件是怎样互连成一个系统的。

PCB 上电气元件的端子，少的只有两个，如电阻、电容、电感等只有两个端子，而集成电路则有几十、几百甚至上千个端子。诸多端子可以分为 3 类：第一类与电源连接，称为电源端子；第二类与地连接，称为接地端子；第三类为信号端子，电信号通过信号端子间互连导线进行传递。

因此，如图 1.1.2 所示手机主板电路上各元件之间的互连实际上要解决：

电源端子怎样连到电源；

接地端子怎样与地连接；

信号端子间怎样根据信号传递要求有针对性地互连。

前已提及，安装在 PCB 上的电气元件，特别是集成电路有几十、几百甚至上千个端子，这些元件端子之间的互连局限在一个平面上而不交叉是很难实现的。如果借用公路“立交桥”概念，各元件端子之间互连不是局限在一个平面上，而是分布在多个平面上，这个问题就可以解决了。

正是基于“立交桥”概念，PCB 取金属-介质的叠层结构。实际 PCB 是由几层树脂材料黏合起来的，内部采用铜箔走线。PCB 按金属层数可分为双层板、三层板，可多达 20 层，甚至更多。计算机主板一般为 4 层，最上和最下的两层是信号层，中间两层是接地层和电源层，将接地层和电源层放在中间，这样便可以最短的走线连接电源或接地。而一些要求