



iCourse · 教材

模拟电路基础

主编 何松柏 吴涛

高等教育出版社



iCourse · 教材

模拟电路基础

主编 何松柏 吴涛



高等教育出版社·北京

内容简介

本书是结合编者多年的教学经验,与 MOOC 相互融合的教材。全书共分为 10 章,包括基本模拟概念、半导体二极管及其应用、BJT 与 MOSFET、单管小信号放大电路、多管小信号放大电路、功率放大电路、集成运算放大电路、基本信号运算电路、有源滤波器及振荡器等内容。每章均设有主要知识点汇总和课程设计,使初学者能够学以致用。本书纸质内容与数字化资源一体化设计,数字课程涵盖习题、知识点视频、仿真、实验及分析等资源,与纸质内容紧密配合。

本书可作为高等学校电子信息类、电气类和自动化类专业本科生“模拟电子技术”课程的教材,也可以作为其他专业学生和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电路基础/何松柏,吴涛主编.--北京:高等教育出版社,2018.5

ISBN 978-7-04-049509-6

I. ①模… II. ①何… ②吴… 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(2018)第 042934 号

策划编辑 黄涵玥
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 张江漫
责任校对 张 薇

封面设计 张 楠
责任印制 刘思涵

版式设计 马敬茹

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 100120
印 刷 山东百润本色印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 16.5
字 数 370 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 2018 年 5 月第 1 版
印 次 2018 年 5 月第 1 次印刷
定 价 34.60 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 49509-00

模拟电路 基础

何松柏 吴涛

- 1 计算机访问<http://abook.hep.com.cn/1252811>, 或手机扫描二维码、下载并安装 Abook 应用。
- 2 注册并登录, 进入“我的课程”。
- 3 输入封底数字课程账号(20 位密码, 刮开涂层可见), 或通过 Abook 应用扫描封底数字课程账号二维码, 完成课程绑定。
- 4 单击“进入课程”按钮, 开始本数字课程的学习。



① 查看说明 / APP 下载



模拟电路基础

Analog Circuit Foundation

模拟电路基础

模拟电路基础是电子技术基础的一个重要组成部分。本数字课程通过对半导体器件及其构成的基本电子线路分析和设计学习, 使学生掌握半导体器件等效电路模型及仿真分析方法, 电子线路基本概念和电路特点, 会使用电路仿真软件分析和设计电路。结合课程内容展开实验验证和电路设计, 获得电子线路基本知识、基本理论和基本技能, 为—— 展开

课程绑定后一年为数字课程使用有效期。受硬件限制, 部分内容无法在手机端显示, 请按提示通过计算机访问学习。

如有使用问题, 请发邮件至abook@hep.com.cn。



扫描二维码
下载 Abook 应用



仿真文档



附件文档



实验文档



知识点视频

<http://abook.hep.com.cn/1252811>

序

模拟电路基础是电子技术基础的一个重要组成部分。本课程以半导体器件—基本电子线路分析—电子线路系统应用为主线。通过课程学习,学生能够掌握半导体器件及其电路模型、电子线路基本分析及仿真方法、典型基本电子线路分析及应用,提高电子电路综合应用设计能力,为后续课程学习奠定基础。

模拟电路基础课程十分重要,市面上相关书籍也是林林总总,学过模电(模拟电路的简称)的同学都把这门课程称为“魔电”(“魔鬼电路”的简称)。这门课程难学的原因主要有以下两点:

(1) 概念深奥。这门课程有一条很清晰的线索:半导体材料因为具有不同的性质,才能构成不同元件,而这些半导体元件通过不同的组合方式又构成了各种模拟电路,环环相扣。但是,很多初学者会误解为,如果理解不了半导体材料的原子结构,那么将无法掌握模拟电路的分析和设计方法。

(2) 缺少实践环节。大多数模拟电路教材都是以“电路模型图”为分析对象,将实际的电路抽象后进行课程讲授,并且课后通过习题的方式巩固对电路模型图的认知。众所周知,实际的电路和画出来的电路模型图是不一样的,任课老师清楚两者的区别和联系,但初学者不一定清楚。虽然有条件的高校会开设相关的实验课程来加强学生对实际电路的认识,但对于众多自学者或想通过教材来学习的学生,会因为缺少对实际电路的认识,缺少对实际电路的搭建、测试、分析等,导致学习了模拟电路知识却不知道用在哪或者怎么用。

针对以上问题,结合编者二十余年在模拟电路方面的科研工作和十余年模拟电路相关课程的教学经历,电子科技大学模拟电路课程组在不断摸索和尝试下发现,结合 MOOC(大规模在线开放课程)是一种行之有效的教学模式。借助互联网技术,教师想要给初学者展现的内容几乎都可以通过网络平台展示,包括知识点视频、仿真技术、实验实测等。

本教材为 MOOC 提供静态化的文字参考,MOOC 又形成动态化的教材。只看教材,学生能够了解内容;只看 MOOC,学生能够理解知识;参与课堂教学或讨论,学生能够融会贯通,提升能力。

本书内容包括三大版块,分为 10 章,分别为前 3 章介绍半导体器件基础、4~6 章介绍放大电路基础,后 4 章介绍模拟集成运放及其基本应用。除第 1 章以外,每一章都提供课程设计要求,初学者通过完成课程设计,除了验证所学知识以外,还能够做到学以致用。

本书在形式上通过 60 多个视频讲解知识要点,以知识点为核心,以电路分析、电路仿真和实验验证为手段进行展开。全方位、多角度的教学形式的目的是:(1) 初学者能轻松入门;(2) 学生再次学习能深化理解。

本书为每章精心编写了大量习题,通过数字课程的形式提供给学生练习,用于巩固知识点的学习。

编者

2017.12

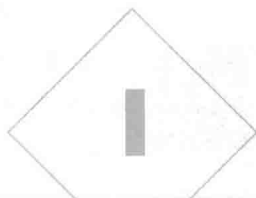
目 录

第1章 基本模拟概念	1	2.1.1 本征半导体	33
1.1 模拟信号	1	2.1.2 载流子	34
1.1.1 模拟信号	1	2.1.3 杂质半导体	35
1.1.2 正弦信号	2	2.1.4 漂移运动和扩散运动	37
1.1.3 相量分析法	2	2.1.5 PN结	38
1.1.4 周期信号	3	2.2 二极管的结构与主要参数	41
1.2 模拟电路	4	2.2.1 二极管的外形与封装	41
1.2.1 集总参数电路与分布参数电路	4	2.2.2 二极管与线性电阻的区别	42
1.2.2 线性电路与非线性电路	5	2.2.3 二极管的主要参数	43
1.2.3 电路与电路模型	5	2.3 二极管的特性	44
1.2.4 模拟电路分析方法	6	2.3.1 二极管的伏安特性曲线	44
1.3 源与负载	10	2.3.2 二极管的伏安特性方程	46
1.3.1 直流源	10	2.3.3 二极管的材料特性	46
1.3.2 信号源	11	2.3.4 二极管的温度特性	47
1.3.3 交直流信号	12	2.4 二极管等效模型	48
1.3.4 受控源	13	2.4.1 理想模型	48
1.3.5 负载	13	2.4.2 恒压模型	49
1.4 放大器	14	2.4.3 动态电阻	53
1.4.1 放大的基本概念	14	2.4.4 高频模型	56
1.4.2 主要性能指标	15	2.5 二极管开关电路	59
1.4.3 等效模型	19	2.5.1 开关二极管	59
1.4.4 电压传递函数与波特图	19	2.5.2 开关电路	59
1.5 反馈	22	2.6 二极管整流电路	61
1.5.1 反馈的基本概念	22	2.6.1 整流二极管	61
1.5.2 正反馈与负反馈	23	2.6.2 半波整流电路	61
1.5.3 负反馈的分类	24	2.6.3 全波整流	62
1.5.4 交流负反馈对放大电路性能的 影响	25	2.7 二极管限幅电路	64
本章主要知识点汇总	31	2.7.1 下限幅电路	64
习题	32	2.7.2 上限幅电路	65
仿真与实验	32	2.7.3 双向限幅电路	66
第2章 半导体二极管及其应用	33	2.8 特殊用途二极管	68
2.1 半导体的原子结构	33	2.8.1 稳压二极管	68
		2.8.2 发光二极管	69

2.8.3 光电二极管	70	3.10 E-MOSFET 的主要参数	105
本章主要知识点汇总	71	3.10.1 电气参数	105
习题	71	3.10.2 极限参数	106
课程设计	71	3.11 E-MOSFET 的等效模型	107
第 3 章 BJT 与 MOSFET	73	3.11.1 截止区	107
3.1 半导体晶体管的简介	73	3.11.2 可变电阻区	107
3.1.1 晶体管的作用	73	3.11.3 恒流区	107
3.1.2 晶体管的分类	74	本章主要知识点汇总	108
3.2 BJT 的结构	74	习题	108
3.2.1 BJT 的基本结构	75	课程设计	108
3.2.2 BJT 电流控制原理	76	第 4 章 单管小信号放大电路	109
3.3 BJT 的特性	78	4.1 放大电路的基本组成	109
3.3.1 输入特性曲线	78	4.1.1 组成原则	109
3.3.2 输出特性曲线	80	4.1.2 设置静态工作点的必要性	109
3.3.3 截止和饱和	81	4.1.3 信号的引入和引出	110
3.4 BJT 的偏置电路	82	4.2 共射放大电路	111
3.4.1 Q 点设置的重要性	83	4.2.1 共射放大电路形式	111
3.4.2 基极偏置电路	85	4.2.2 中频段动态参数	111
3.4.3 集电极反馈偏置电路	86	4.2.3 频率响应	114
3.4.4 发射极反馈偏置电路	88	4.2.4 线性放大与失真	120
3.4.5 分压偏置电路	90	4.3 共集放大电路	125
3.5 BJT 的主要参数	93	4.3.1 共集放大电路形式	125
3.5.1 电气参数	93	4.3.2 中频段动态参数	125
3.5.2 极限参数	94	4.3.3 频率响应	128
3.6 BJT 的等效模型	95	4.4 共基放大电路	129
3.6.1 截止区	95	4.4.1 共基放大电路形式	129
3.6.2 饱和区	95	4.4.2 中频段动态参数	129
3.6.3 放大区	95	4.4.3 频率响应	131
3.7 E-MOSFET 的结构	98	4.5 共源放大电路	133
3.7.1 E-MOSFET 的基本结构	98	4.5.1 共源放大电路形式	133
3.7.2 E-MOSFET 电流控制原理	99	4.5.2 中频段动态参数	134
3.8 E-MOSFET 的特性	100	4.5.3 频率响应	135
3.8.1 输出特性曲线	101	4.6 共漏放大电路	138
3.8.2 转移特性曲线	101	4.6.1 共漏放大电路形式	138
3.8.3 BJT 与 E-MOSFET 的比较	102	4.6.2 中频段动态参数	138
3.9 E-MOSFET 的偏置电路	102	4.6.3 频率响应	140
3.9.1 分压偏置电路	103	4.7 共栅放大电路	142
3.9.2 电流源偏置电路	104	4.7.1 共栅放大电路形式	142

4.7.2 中频段动态参数	142	6.1.2 A类功率放大器主要性能指标	170
4.7.3 频率响应	143	6.2 B类功率放大器	171
4.8 单管放大电路比较	145	6.2.1 B类功率放大器的静态工作点	171
本章主要知识点汇总	145	6.2.2 B类功率放大器的效率	172
习题	146	6.2.3 交越失真	173
课程设计	146	6.3 AB类功率放大器	173
第5章 多管小信号放大电路	147	6.3.1 AB类功率放大器的工作原理	174
5.1 级联放大电路	147	6.3.2 AB类功率放大器的改进	174
5.1.1 级联放大电路的特点	147	6.4 D类功率放大器	175
5.1.2 级联放大电路的中频段动态 参数	148	6.4.1 D类功率放大器的工作原理	176
5.1.3 级联放大电路的频率响应	150	6.4.2 D类功率放大器的设计考虑	177
5.2 Cascode 放大电路	152	本章主要知识点汇总	178
5.2.1 Cascode 放大电路的特点	152	习题	178
5.2.2 Cascode 放大电路的中频段动态 参数	153	课程设计	178
5.2.3 Cascode 放大电路的频率响应	153	第7章 集成运算放大电路	179
5.3 复合管放大电路	155	7.1 集成运算放大器概述	179
5.3.1 复合管	155	7.1.1 集成运算放大器的组成	179
5.3.2 复合管放大电路	156	7.1.2 集成运算放大器内部电路	180
5.4 有源负载放大电路	157	7.1.3 集成运算放大器外在特性	181
5.4.1 有源负载	157	7.2 集成运算放大器的主要参数与 电路模型	182
5.4.2 有源负载放大电路	158	7.2.1 集成运算放大器主要参数	182
5.5 差分放大电路	159	7.2.2 集成运算放大器电路模型	183
5.5.1 零点漂移	160	7.2.3 理想运算放大器	184
5.5.2 共模、差模信号	160	7.3 集成运算放大器负反馈应用	184
5.5.3 差分放大电路	161	7.3.1 负反馈及其判断	184
5.5.4 差分放大电路对共模信号的 抑制	163	7.3.2 集成运放负反馈放大电路	186
5.5.5 差分放大电路对差模信号的 放大	164	7.3.3 频率响应	189
5.5.6 有源负载差分放大电路	166	本章主要知识点汇总	190
本章主要知识点汇总	168	习题	190
习题	168	课程设计	190
课程设计	168	第8章 基本信号运算电路	191
第6章 功率放大电路	169	8.1 加减运算电路	191
6.1 A类功率放大器	169	8.1.1 求和运算电路	191
6.1.1 A类功率放大器静态工作点	169	8.1.2 加减运算电路	195
		8.2 积分器和微分器	197
		8.2.1 积分器	197
		8.2.2 微分器	199

8.3 电压比较器	199	习题	233
8.3.1 单限电压比较器	199	课程设计	233
8.3.2 滞回比较器	203	第10章 振荡器	234
8.4 转换器	204	10.1 振荡器概述	234
8.4.1 电流-电压转换器	204	10.1.1 振荡器的输出波形	234
8.4.2 电压-电流转换器	204	10.1.2 振荡器的主要指标	235
本章主要知识点汇总	205	10.2 正弦波发生器	235
习题	205	10.2.1 正弦波振荡的条件和电路的组成	235
课程设计	205	10.2.2 RC 正弦波振荡电路	237
第9章 有源滤波器	206	10.2.3 自激振荡消除	239
9.1 基本滤波器响应	206	10.3 非正弦波发生器	242
9.1.1 滤波器的幅频特性	206	10.3.1 矩形波发生器	242
9.1.2 滤波器的主要参数指标	207	10.3.2 三角波发生器	244
9.2 有源低通滤波器	209	10.3.3 锯齿波发生器	246
9.2.1 一阶有源低通滤波器	209	10.4 函数发生器	247
9.2.2 二阶有源低通滤波器	212	10.4.1 函数发生器集成块	247
9.2.3 高阶有源低通滤波器	220	10.4.2 任意波形发生器	249
9.3 其他有源滤波器	221	本章主要知识点汇总	249
9.3.1 有源高通滤波器	221	习题	250
9.3.2 有源带通滤波器	225	课程设计	250
9.3.3 有源带阻滤波器	229	参考文献	251
本章主要知识点汇总	232		



第1章 基本模拟概念

模拟电路基础这门课程研究的对象是模拟信号的电路。通过学习,我们要知道什么是模拟电路(what)、模拟电路为什么能工作(why)、怎么分析或设计模拟电路(how)。本章首先介绍一些关于“模拟电路”的基本概念。



知识点视频
1.1 模拟信号

1.1 模拟信号

模拟电路中的“模拟”二字指的是“模拟信号”。首先需要认识什么是模拟信号。本节介绍 MOOC 知识点 1:模拟信号。

1.1.1 模拟信号

模拟信号是指信息参数在给定范围内表现为连续的信号,温度、压力、流量、声音等都是模拟信号。将这些信息转换成具有相似波形的电压或电流,即为电路中的模拟信号。例如将声音信号转换成的模拟信号如图 1-1-1(a)所示。

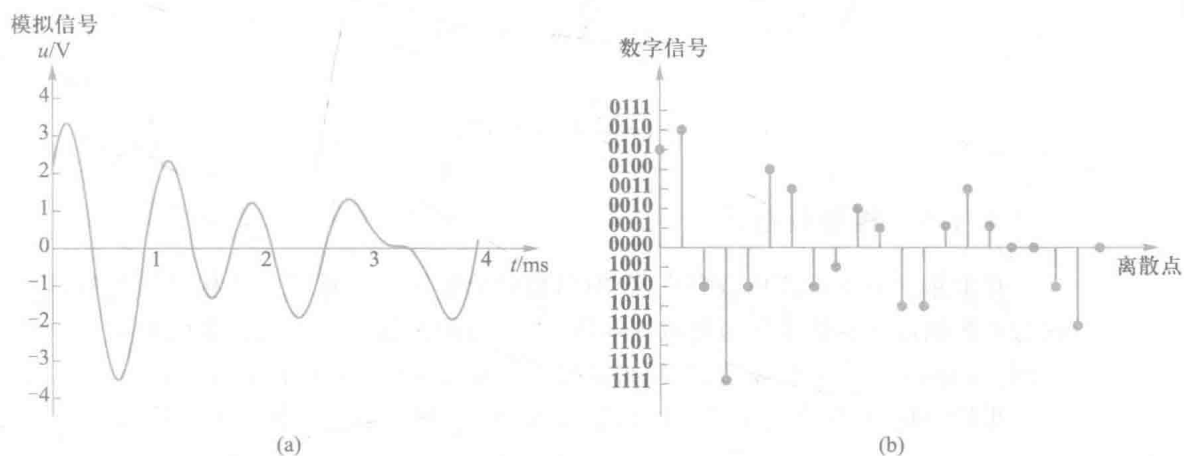


图 1-1-1 某段声音转换出的电信号

(a) 模拟信号; (b) 数字信号

信号的特点是不断变化的,而模拟信号的特点是这种变化在时间和数值上具有连



附件 1-1-1
模拟和数字
举例

续性。与模拟信号对应的是数字信号,即在时间和数值上具有离散性的信号,如图 1-1-1(b)所示,而处理数字信号的电路称为数字电路,相关知识可见数字电路课程,非本课程讨论的对象。

1.1.2 正弦信号

最基本的模拟信号是正弦信号,即用正弦函数 $\sin$ 或余弦函数 $\cos$ 描述的信号。正、余弦函数之间可以简单转换,所以二者并没有本质区别。本课程用正弦函数 $\sin$ 作为正弦信号的表达式,例如正弦电压信号的数学表达式为

$$u(t) = U_m \sin(2\pi ft + \theta) \quad (1-1-1)$$

式中 U_m 称为振幅或峰值,它描述了信号的大小或强弱; f 为频率,描述了信号变化的快慢; θ 为初始相位,描述了信号在起始时刻的相位情况。电压随时间变化的波形如图 1-1-2 所示。类似地,我们也可以写出正弦电流的信号形式 $i(t) = I_m \sin(2\pi ft + \theta)$ 。

除此以外,另一种描述信号变化快慢的物理量为周期 T 或角频率 ω ,它们与频率 f 之间的关系为

$$T = \frac{1}{f}$$

$$\omega = 2\pi f$$

(1-1-2)

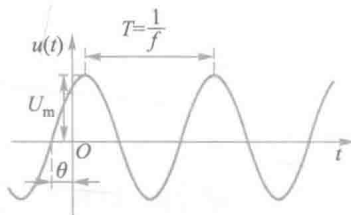


图 1-1-2 正弦电压波形

另一种描述信号大小的变量为有效值,定义为

$$U = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T u^2(t) dt} \quad (1-1-3)$$

有效值在定义时用到了平均、平方和开根号的运算,所以又称为均方根值。正弦量(正弦电压或电流)的有效值 U 、 I 与振幅 U_m 、 I_m 之间的关系为

$$U = \frac{\sqrt{2}}{2} U_m \approx 0.707 U_m \quad (1-1-4)$$

$$I = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m \approx 0.707 I_m$$

1.1.3 相量分析法

在电路中分析正弦稳态响应,会用到相量分析法。相量是人为构建的复数,取正弦量的振幅或者有效值作为复数的幅值,正弦量的初始相位作为复数的相角,就可以得到振幅相量或有效值相量,振幅相量与正弦量之间的关系如图 1-1-3 所示。

相量分析时,所有的正弦量用相量表示,电阻、电容和电感统一为阻抗的形式,有

$$Z_R = R$$

$$Z_L = j\omega L = j2\pi fL$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j2\pi fC}$$

(1-1-5)

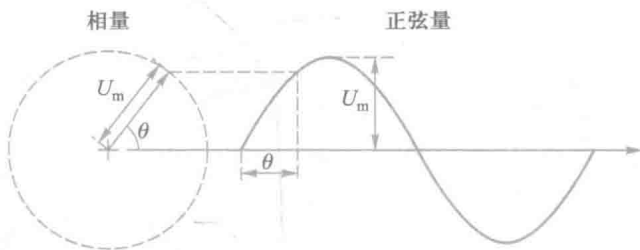


图 1-1-3 振幅相量与正弦量

采用相量分析的好处是,复数形式的相量比和时间有关的三角函数形式的正弦量,在运算上要简化很多。

一般在两种情况下会使用相量法:第一种仅针对某一个特定频率进行分析,频率或者角频率作为已知的参数,得到电路在当前频率点情况下的结果;另一种是将频率或者角频率作为变量,在一段频率范围内进行分析,得到电路与频率有关的响应情况。

1.1.4 周期信号

我们之所以说正弦信号形式是最基本的模拟信号形式,是因为任何周期函数都可以用直流加正弦或余弦函数构成的无穷级数来表示。傅里叶级数的公式为

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (1-1-6)$$

其中,系数可以按下式计算:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \\ a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(2\pi nft) dt \\ b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(2\pi nft) dt \end{cases} \quad (1-1-7)$$

该公式属于信号分析课程的相关内容,写出该公式是为了表明周期信号 $f(t)$ 可以由很多项叠加组成,每一项都是周期 T 的函数,故 n 取不同值时的周期信号具有谐波关系。 $n=0$ 时,对应为直流分量, $n=1$ 时的频率称为基波频率,类似的还有二次谐波、三次谐波等。

例如一个频率为 1 kHz、振幅为 A 的正弦波根据傅里叶级数展开后,得到“单一”的谱线,如图 1-1-4(a) 所示;而另一个频率为 1 kHz、幅度为 $0 \sim A$ 、占空比为 50% 的方波,傅里叶级数展开后却得到“无穷”根谱线,如图 1-1-4(b) 所示。



实验 1-1-2
方波信号的
傅里叶分析

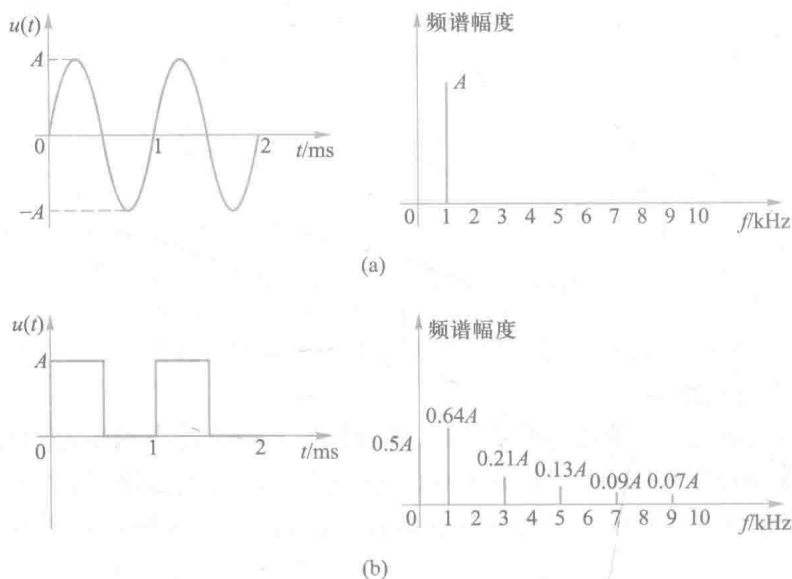


图 1-1-4 周期信号的傅里叶级数展开
(a) 正弦信号的傅里叶展开; (b) 方波信号的傅里叶展开



知识点视频
1.2 模拟电路

1.2 模拟电路

处理模拟信号的电路即“模拟电路”。或者说模拟电路是产生、传递和储存模拟信号的电路。

本节介绍 MOOC 知识点 2: 模拟电路。

1.2.1 集总参数电路与分布参数电路

电路根据工作波长 λ 与器件物理尺寸 d 的关系, 可分为集总参数电路和分布参数电路, 其中集总参数电路是指 $\lambda \gg d$ 的情况, 该类电路可以认为能量集中在元件内部流动, 物理量主要用电压、电流以及功率来描述。不满足集总参数电路条件的都是分布参数电路, 元件的形状、大小对能量的流动都有影响, 物理量主要用电场、磁场或电磁场描述。

实际的电路都是分布参数的电路, 不过集总参数电路可以认为是一种“简化”的电路, 其分布参数影响很小可被忽略。简化后的好处是, 对电压、电流的分析比电场和磁场的分析要容易很多。

本课程的研究对象是频率较低的模拟信号, 信号的频率 f 与工作波长 λ 成反比关系, 即

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (1-2-1)$$

其中 v 为信号传播的速度, 近似可取光速 $3 \times 10^8\text{ m/s}$, 对于频率低于 300 MHz 的低频电

路而言,物理尺寸远小于1 m的电路都可以认为满足集总参数假设。

在集总参数电路里面,最重要的分析依据是基尔霍夫电流定律(KCL, Kirchhoff's current law)和基尔霍夫电压定律(KVL, Kirchhoff's voltage law),又称为拓扑约束,以及元件的电压电流关系(VCR, voltage current relationship),又称为元件约束。

KCL表明:所有涉及某节点的电流的代数和等于零,假设流出该节点的电流为正,流入该节点的电流为负值,则有

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0 \quad (1-2-2)$$

其中, i_k 是与该节点相连接的第 k 个支路的电流,可以是实数(针对时域分析),也可以是复数(针对相量分析)。

KVL表明:沿着闭合回路的所有电压的代数和为零,假设沿回路路径电压降为正,电压升为负,用方程的形式表示为

$$\sum_{k=1}^n u_k = 0 \quad (1-2-3)$$

其中, u_k 是回路上第 k 个支路的电压,可以是实数或复数。

由上文可知,用电路中的拓扑约束得到的电路方程,无论是时域分析中的实数方程还是相量分析中的复数方程,一定都是一次的线性方程组,这为解方程提供了便利。

1.2.2 线性电路与非线性电路

电路中的所有元件都是线性元件的电路为线性电路。在之前的课程中,已经学过的线性元件有独立电压源、独立电流源、线性电阻、电容、电感、理想变压器等。它们的特性曲线是一条直线。它们的电路方程可以是线性方程,如电阻电路;也可以是复数形式的线性方程,如电容、电感为阻抗形式表示的正弦稳态电路。

如果电路中含有非线性元件(特性曲线并非是一条直线),那么这类电路称为非线性电路。本课程随后所学的元件(二极管、晶体管和集成运放)就是非线性的元件。直接分析非线性电路要比分析线性电路麻烦很多,必须在分析时尽量简化。

其中最重要的简化分析思路是将非线性元件进行线性化处理。例如对于大家熟悉的电阻电路,实际的电阻都是非线性的,但是当电压、电流变化较小时,可以用线性电阻代替实际电阻,分析得到的结果满足大部分应用场合,这就是非线性元件进行线性化处理的典型例子。而在后续内容中介绍的非线性元件具体应该如何进行线性化处理,是本课程的难点和重点,希望读者在后续学习中特别注意。

1.2.3 电路与电路模型

所谓的电路模型是在分析电路时,从实际的元件或电路中抽取出来的数学模型。例如,分析灯泡上的电流时,灯泡具有大小、品牌、价格、颜色、使用寿命等一系列的参数,然而这些都和要分析的电流没有关系,电路分析时用到的电路模型仅仅是抽取的灯泡两端电压和电流的关系,例如 $U=10I$,这时候的灯泡模型即一个 $10\ \Omega$ 的电阻。

在实际工程应用中,一个元件可能会由多个电路模型来描述。尤其应当注意的



实验 1-2-1
线性元件与
非线性元件
举例



附件 1-2-1
实际电路与
电路模型

是,并非越复杂的模型越好。虽然越复杂的模型越有可能得到更精确的结果,但是会花费大量的分析和计算时间。随着课程的深入,读者会越来越明白这一点。也就是说,能够用较为简单的模型,进行快速的分析,得到一个近似的结果,是分析模拟电路“性价比”最高的方式。

1.2.4 模拟电路分析方法

如果线性电路所列写出来的电路方程是线性方程或在相量法分析时是复数形式的线性方程,那么解出方程得到电压、电流的结果,即完成对电路的分析。而解线性方程的过程往往是比较容易的,例如可以采用矩阵运算或者简单的消元。

但若分析的对象是非线性的电路,需要回顾一下能够用于分析非线性电路的一般分析方法。

1. 解析法

解析法即根据电路约束和器件约束规则列方程求解。非线性电路列出的是非线性电路方程,因此需要求解非线性方程组。

【例 1-2-1】 电路如图 1-2-1 所示,已知非线性电阻的 VCR 为 $i = -u^2 + 4u$, 求出电压 u 和电流 i 。

解: 首先根据两类约束条件,列出电路的方程为

$$\begin{cases} u = -i + 5 \\ i = -u^2 + 4u \end{cases}$$

这是非线性方程组,可以将第一个方程代入第二个方程,通过消元解方程得到两个解,分别为

$$\begin{cases} u = 3.62 \text{ V} \\ i = 1.38 \text{ A} \end{cases} \text{ 或 } \begin{cases} u = 1.38 \text{ V} \\ i = 3.62 \text{ A} \end{cases}$$

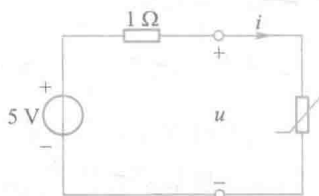


图 1-2-1 例 1-2-1 题图



附件 1-2-2
解方程组

注意这是分析方法的举例,具有例中 VCR 的非线性电阻可能并不存在,就算真的存在,实际电路只会有一个稳定的电压和电流,如果分析得到多组解,表明实际电路存在不稳定工作状态,在一定条件下会在多组解的结果中切换。

但是这并不妨碍我们理解该分析方法,或者说只要元件的 VCR 的数学表达式能够找到,无论是什么形式,都可以列为电路方程并求解。所以解析法的难点也很明显:(1) 如果非线性元件的 VCR 的解析表达式不存在怎么办?(2) 如果 VCR 的表达式太复杂,解方程太困难怎么办?

2. 图解法

如果元件的 VCR 能够用仪器仪表测量得到图形,或者能够根据 VCR 表达式绘制出来,则上述问题可以用图解法来解决。

图解法的基本思路是,将电路拆分为两个部分:非线性元件和除非线性元件以外的线性含源单口网络,如图 1-2-2 所示。

分别在 $i-u$ 平面上画出两个单口网络的伏安特性曲线(注意电压、电流的参考方向)。两条曲线的交点即电路中两个网络端口处的电压和电流。

例 1-2-1 中的结果如果用图解法分析静态工作点,其示意图如图 1-2-3 所示。

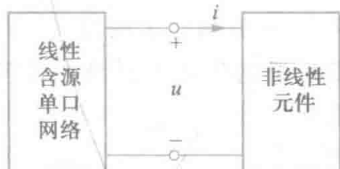


图 1-2-2 电路的拆分

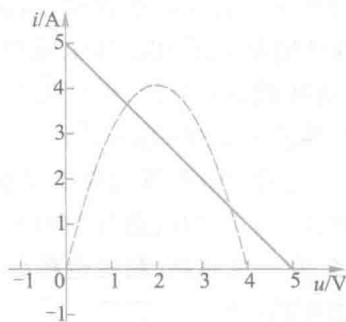


图 1-2-3 图解法分析静态工作点示意图

附件 1-2-3
绘制曲线

图 1-2-3 中线性含源单口网络的伏安特性曲线是一条直线(如图中实线部分),称为负载线,它与非线性元件的伏安特性曲线(如图中虚线部分)有两个交点,所以和解析法一样,图解法也可得到两个解,结果直接从图中读出。

3. 近似等效模型法

图解法的优点是直观,通过画图找交点就能够完成电路的分析。缺点是画图读数时误差较大,这个问题结合计算机作图能够很好地改善。但是若电路较为复杂,例如含有两个甚至更多的非线性元件,我们该怎么办呢?

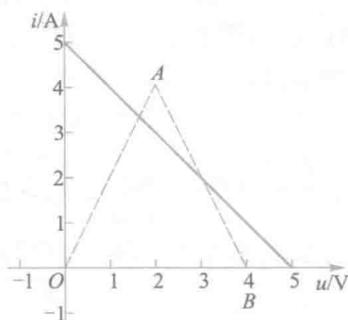
这就要用到本课程中“最重要”的分析方法——近似等效模型法。

若两个元件端口电压和电流的关系相同,则它们视称为等效,例如两个 $5\ \Omega$ 电阻串联等效为一个 $10\ \Omega$ 电阻。等效应该针对“任何条件”都成立,所以,我们加上“近似”二字,是为了把条件降低,把模型变得更简单。因此,我们需要这么来看待近似等效模型——在某些条件下,用简单的电路模型来近似当前电路。当然,为了简化分析,这个简单的电路模型一定是线性模型。

这里需要特别注意,近似等效模型与实际元件内部可能没有任何的关系。读者千万不要尝试去探索近似等效模型的物理意义,它可以被认为是没有物理意义,仅仅是为了简化分析电路而已。并且一个非线性元件也不可能在任何条件下都用一个线性模型来近似,近似是有条件的,如对于例 1-2-1 中的电路,可以将非线性元件的 VCR 用两条线段来近似,如图 1-2-4 中虚线所示。

图 1-2-4 中 OA 、 AB 都是直线中的一段,其伏安特性方程在某段范围内是线性函数。也就是说对于非线性的元件,可以采用两个线性模型,在一定范围内线性近似,将非线性电路转换成“分段”线性电路,使分析变得容易。其过程是将非线性的伏安特性线性化,再判断应该用哪一段线性化后的伏安特性来求解,例如在分析 $u < 2$ 的解时,采用 OA 段的伏安特性方程,而在分析 $u > 2$ 的解时,采用 AB 段的伏安特性方程,

$$\begin{cases} u = 0.5i & , u < 2 \\ u = -0.5i + 4 & , u > 2 \end{cases}$$

图 1-2-4 近似等效模型
分析示意图

解方程的过程会成为解线性方程,当 $u < 2$ 时,非线性电阻可用 0.5Ω 电阻来近似,而 $u > 2$ 时,非线性电阻可用 -0.5Ω 电阻与 4 V 独立电压源串联来近似。

显然,这样做容易分析,但结果会有一定的偏差,但只要用的模型近似程度高,可以认为只要偏差不超过 $\pm 10\%$,都是工程允许的范围,结果是有效的。

再次强调,采用近似等效模型是没有物理意义的,只有数学上的意义,即用分段的直线来近似曲线。而如何进行“分段线性化”则需要根据实际工程进行合理选择:因为分段越多,吻合度越高,精度也越高,但分析越复杂。

4. 动态电阻

在近似等效模型中分析微变量时,会用到另外一个很重要的概念——动态等效电阻。

例如已经得到非线性元件的伏安特性曲线如图 1-2-5(a) 所示。要分析以下两个问题:

- (1) 当电路中电压 $U = 3 \text{ V}$ 时,电流 I 为多少?
- (2) 当电路中电压相对于 $U = 3 \text{ V}$ 增加了 0.1 V 时,电流的增量为多少?

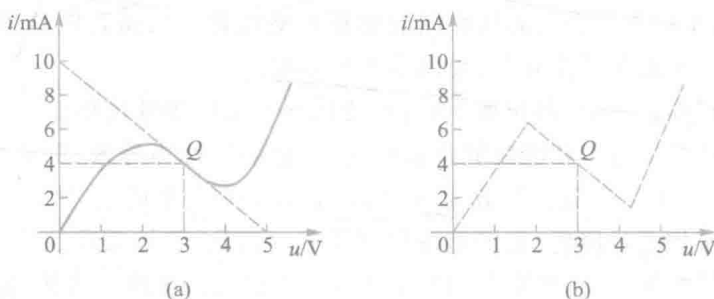


图 1-2-5 动态电阻分析微变量举例

(a) 非线性元件的伏安特性曲线;(b) 折线近似

用图解法可以直接读出当电压 $U = 3 \text{ V}$ 时,电流 $I = 4 \text{ mA}$,在这一点上无须考虑变化量的问题,因此称这一点为静态工作点—— Q 点。当电压增加了 0.1 V 时,可以看出电流减小了一些却很难从图中读出。

如果用近似等效模型分析变化量的问题,可以将该非线性的伏安特性曲线分为三条线段,如图 1-2-5(b) 所示,其中 Q 点附近的伏安特性曲线可以近似为以下的线性表达式,即

$$u = ri + 5$$

其中 r 为 Q 点斜率的倒数,在此例中有 $r = \frac{1}{-0.01/5} = -500 \Omega$ 。 r 体现了电压增量 Δu 和电流增量 Δi 的比值关系,称为动态电阻,满足

$$r = \frac{\Delta u}{\Delta i} \quad (1-2-4)$$

在本例中,当 $\Delta u = 0.1 \text{ V}$ 时,直接利用动态电阻可以得到 $\Delta i = -0.2 \text{ mA}$ 。对于动态电阻需要有以下认识: