

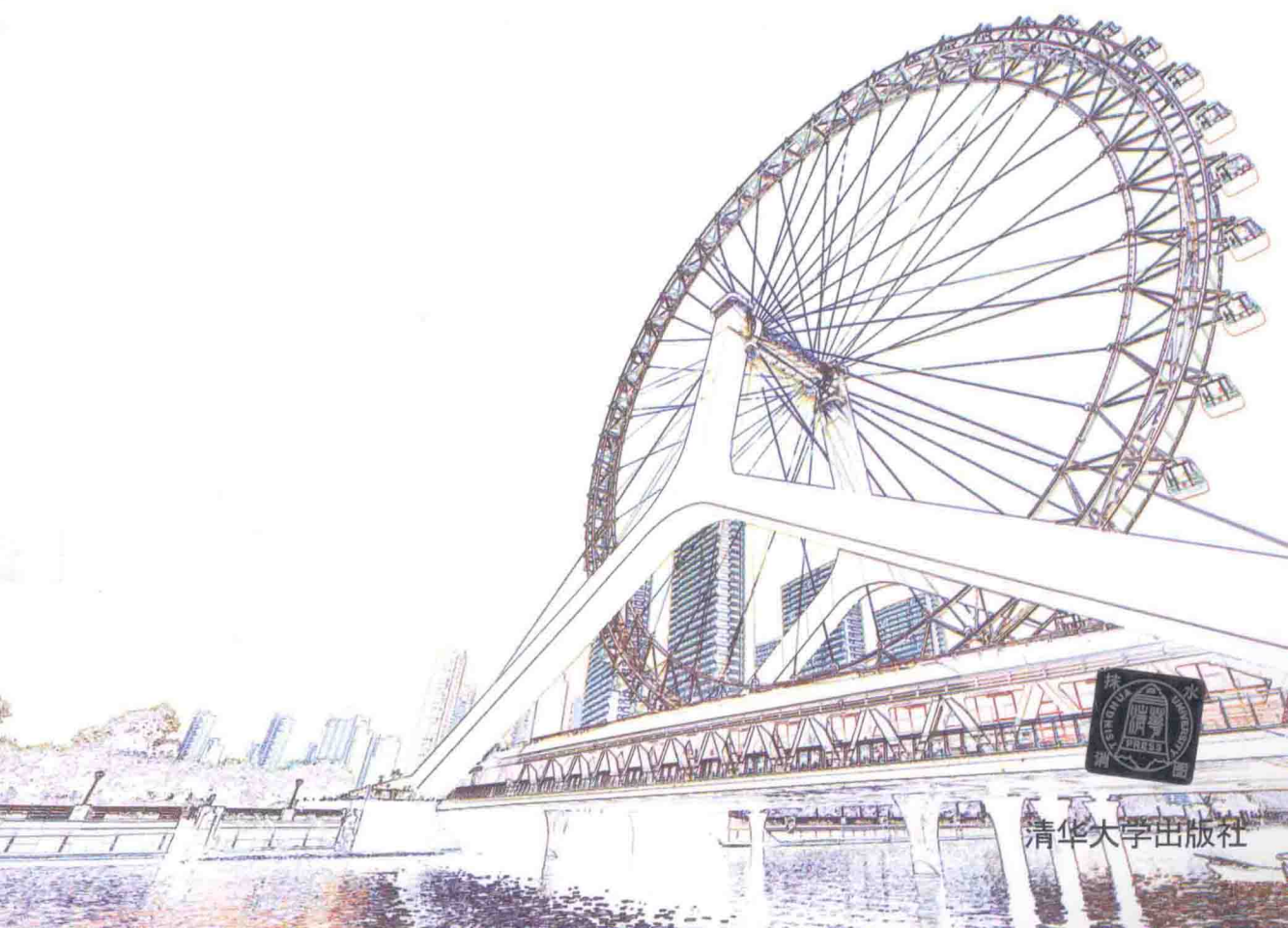
全国普通高校
电子信息与
电气学科
基础规划教材

模拟电子技术新编

何 超 主编

林雁飞 周云鹏 编著

周永海 主审



全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材

模拟电子技术新编

何 超 主编

林雁飞 周云鹏 编著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书共分12章。电子信息科技的飞跃发展,对电子技术教材提出了新的要求。本书就是顺应这一大趋势而推出的新编教材。与常见的模拟电子技术教材体系不同,本书考虑到电阻、电容和电感元件在模拟电子电路中的重要作用,首先引导读者深入认识电阻、电容和电感元件,从实践和应用的角度提前对其进行深入讨论,有助于打破模拟电子技术的神秘感。

本书尝试提出对三极管BJT和FET的3个工作区域的统一命名,这样便于在理论上比较严密地讨论(论证)三极管工作点的合理设置问题。本书采用对两种不同导电机制的三极管统一讨论、强烈对比的方式,导出BJT和FET基本放大电路的常用分析方法及其频率特性。本书突出讨论“集成电路”及其运用,循序渐进地从多级放大电路转到讨论电流源、差分放大电路和模拟集成电路,以及集成运算放大器和集成信号处理电路,此外还讨论了反馈原理、振荡电路和直流稳压电源电路。

本书可作为普通高等院校本科层次电子信息类专业基础课程教材,也可供相关专业工程技术人员及电子技术爱好者参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术新编/何超主编. —北京:清华大学出版社,2014

全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材

ISBN 978-7-302-34597-8

I. ①模… II. ①何… III. ①模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第302733号



责任编辑:文 怡

封面设计:傅瑞学

责任校对:梁 毅

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:28.75

字 数:717千字

版 次:2014年6月第1版

印 次:2014年6月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:49.50元

模拟电子技术是高等院校理工类专业重要的专业基础课程,成熟教材甚多,它们对我国高等教育和中等技术教育的教学工作发挥了很好的作用。如今,模拟电子技术和数字电子技术的理论和技术已经广泛应用于各行各业,尤其对推动高科技的发展与应用起着巨大的作用。

但高校师生普遍反映模拟电子技术难教难学,“模拟电路教材,清一色的一样的语调,一样的结构,一样的推导演算”,“往往看这本书搞不懂的问题,在其他书上也难觅答案”,这样的现象和呼声确实存在。究其原因,“传统”模拟电子技术的基本理论,尤其是半导体电子技术,从20世纪40年代产生到现在,不过六七十年。涉及物质的微观结构,技术手段有限,因而导致它的基本理论大多建立在经验方法和经验数据的基础上,其理论基础有待进一步清晰和严谨,有些问题的讨论中逻辑关系不甚明白,非线性问题转化为线性问题的界限和方法的讨论也似欠明确。由于发展迅速,它在理论与实践方面,都存在着不少有待探讨和完善的地方。

为了适应电子技术飞跃发展和新世纪高等教育培养高素质人才的需要,强烈呼吁对模拟电子技术教学进行改革,强烈呼唤新教材的出现。本书正是出于此目的,积极参与这一改革的尝试。

本书编写原则是:遵循认知规律,讲清基本概念、基本原理和基本方法,重点培养学习者发现问题、分析问题和解决问题的能力、实践能力和创新能力。

本书编写思路围绕两条逻辑线索逐步展开,一条是电路实体(基本物理概念→基本元器件→基本分立电路→基本集成电路→电路模块的结构体系);另一条是电路功能(模拟信号的放大→运算→处理(含转换)→基本模拟信号的产生)。先基础后应用,从简单到复杂。

作者为本书设想的编写思路如下:

1. 从简单处入手,运用发散思维模式,深入挖掘知识的可扩展内容,以减轻学习难度。

(1) 考虑到电阻、电容和电感元件在电子技术中的重要性,本书第1章引导读者深入认识电阻、电容和电感元件,讨论理想无源元件的物理模型及其相互转化,从实践、应用和物理学本源的角度提前深入讨论其在模拟电子技术中的某些作用,有助于打破模拟电子技术的神秘感,使读者感觉到,看似简单的电阻、电容和电感元件,竟有如此大的“神通”,能组成选频和分频电路、移相电路、谐振电路、抗高频干扰电路等等。而依照常见的模拟电子技术教材体系,这些内容是穿插、揉合于“复杂”的模拟电子技术知识之中。

这样做的好处还有:符合人的认知规律,由浅入深,由已知到未知,起到了复习旧知识、导入新知识的作用。减轻了学习难度,并为后续内容的讲述打下良好基础。

(2) 抓住主要的关键性的问题,一鼓作气,贯通相关知识点。

例如:半导体二极管是个简单元件,其导电原理的核心内容是PN结,因而其主要功能就是“单向导电”。抓住这个关键性的特点,讨论半导体二极管及其应用:整流、检波、限幅、开关作用、发光指示作用、变容和稳压等。同时照顾到知识的连贯性和可接受性,将常见模

拟电子技术的体系结构中放在最后的“半波整流电路、全波整流电路和桥式整流电路”内容提前讲解。

这为第4章讲解半导体三极管打下了较好的基础。

2. 引导读者从总体上,从宏观上,把握模拟电子技术的体系结构。

第3章讨论放大电路基本概念。从总体上,或者说从宏观上,说明模拟电子技术的体系结构,引导读者从系统的角度看放大电路,讲解放大电路的主要性能指标。正因为从系统的角度讨论问题,就为初步建立反馈的基本概念,掌握负反馈放大电路的一般方框图和基本关系式打开了思路,也避免了在第8章深入讨论反馈知识前,讲解其他章节时,会因涉及反馈基本概念遇到逻辑困难。

3. 与常见的模拟电子技术教材体系不同,本书第4章统一讨论两种不同导电机制的三极管。

先分别讨论双极型半导体三极管BJT和场效应管FET的导电机理、输入与输出特性曲线及其外特性、各自的性能指标。尝试提出对三极管BJT和FET的3个工作区域的另一种统一命名,以便在理论上比较严密地讨论了三极管工作点的合理设置问题。

本章强调了BJT和FET二者的对比及其在功能、电路构成的类似性。

常见的模拟电子技术教材体系产生的效果是:读者熟悉BJT,而对FET感到生疏和排斥。本书较好地解决了这个问题。

本书第5章同样采用统一讨论、强烈对比的思路,讨论BJT和FET基本电路的常用分析方法及其频率特性。

4. 本书赞同模拟电子技术应突出“集成电路”的观点,但同时坚持循序渐进的认识规律。第6章是一个转折,从多级放大电路转到讨论模拟集成电路。基本思路是集成化:单级→多级(耦合方式、性能分析)→问题(级间传递信号稳定性)→电流源→差动放大电路,为第7章讲解集成运算放大器打下基础。

5. 本书坚持用自然辩证法的观点阐述内容,注重讲清事物发展变化的共性与个性,不同状态之间转化的界限或条件。

如三极管的“放大”与“开关”两个状态,集成运算放大器的线性运用和非线性运用两种状态及其特点。

作者认同如下做法并付诸实践:

1. 突出电子技术基础课程的实践性。

不仅在理论上说明各类器件的基本工作原理,而且着重说明器件的外特性及主要参数和使用方法。尽量从物理图像上说明问题,避免繁杂的数学推导,选取典型的、有特色的电路来讲述和分析。

2. 文字力求精练、准确,精选图表以助于说明问题。

3. 在每章前有提要,说明本章知识的逻辑线索,勾画本章内容概貌。

在每章后有小结(含知识的逻辑线索图),总结本章的重点知识,说明分析和解决问题时的思路和技能,以及易错和易忽视的地方。

4. 本书收集与整理了习题与思考题和Multism仿真练习题,放在每章之后。

便于读者加深对基本概念的理解和深化学习,培养分析、计算和综合应用的能力。

本书是由何超(第1~5、第7~9章)、周云鹏(第6、11、12章)和林雁飞(第10章)、侯庆

华(Multism 仿真练习题)等共同编写的,林雁飞对全书的编写提纲提出了宝贵的意见,周云鹏、侯庆华负责组织全书各章节的 Multism 仿真练习题及解答的编写以及第 9、10 章习题的编写与修改。林雁飞和周云鹏还协助校阅了多个章节的文稿。

本书承蒙周永海先生主审全部书稿,并对书稿的结构与编写提出了许多建设性的意见。蔡正春、卢玲玲、苏振淋、郑名敏同学帮助校阅了部分初稿,在此一并表示感谢!

由于电子技术尤其是微电子技术发展迅速、日新月异,模拟电子技术理论与实践的发展与完善,随之相关教材的改革举步维艰、任重道远。限于编者学术水平及视野,加之编写时间仓促,书中还可能存在不少错误和不妥之处,诚恳地希望有识之士和广大读者提出宝贵意见。

本书配套有实验与习题指导作为另书出版。

编 者

2013 年夏

符号约定

为讨论问题方便,本书约定:本书符号采用电子技术国家标准。常量和直流量用斜体大写字母表示,例如, U 和 I 表示直流电压和电流。变量用小写斜体字母表示,例如, u 和 i 表示变化的电压和电流。

元器件用正体大写字母表示,例如 VD 表示二极管,VT 表示三极管。物理量的单位用正体字母表示,例如,毫安用 mA 表示,伏用 V 表示,毫伏用 mV 表示,等等。具体行文中不再一一说明。

目 录

第 1 章 深入认识电阻、电容和电感元件	1
1.1 阻抗元件相关知识的回顾	1
1.2 电阻、电容和电感的作用	3
1.2.1 电阻的主要作用	3
1.2.2 电容的主要作用	4
1.2.3 电感的主要作用	12
1.2.4 理想元件模型及其相互转化	15
本章小结	15
习题与思考题一	16
Multism 仿真练习题	20
第 2 章 半导体二极管及其应用	21
2.1 半导体二极管	21
2.1.1 半导体二极管的工作原理	21
2.1.2 二极管的基本应用	27
2.2 小功率整流电路	34
2.2.1 常见的小功率整流电路	34
2.2.2 整流电路的主要参数的估算	36
2.3 倍压整流电路	37
2.3.1 二倍压整流电路	38
2.3.2 三倍压和多倍压整流电路	38
2.4 滤波稳压电路	39
2.4.1 电容滤波稳压电路	40
2.4.2 电感滤波稳压电路	42
2.4.3 电感和电容组合滤波稳压电路和低压直流电源	42
本章小结	44
习题与思考题二	45
Multism 仿真练习题	50
第 3 章 放大电路基本概念	52
3.1 电子系统与信号	52
3.1.1 概述	52
3.1.2 常用的电路信号表现形式和频谱分析	53

3.2 放大电路的基本概念	54
3.2.1 放大的概念	54
3.2.2 放大电路的主要性能指标	54
3.3 从系统的角度看放大电路	59
3.3.1 反馈的基本概念	59
3.3.2 负反馈放大电路的一般方框图和基本关系式	60
本章小结	61
习题与思考题三	61
第4章 半导体三极管及其外特性	65
4.1 BJT(双极型半导体三极管)及其外特性	66
4.1.1 BJT 的结构、符号和工作原理	66
4.1.2 BJT 的外特性	67
4.1.3 BJT 的 3 个工作区域	70
4.1.4 温度对三极管特性的影响	71
4.1.5 BJT 工作在放大区时的交流线性数学模型	72
4.2 FET(场效应管)的导电机理和外特性	75
4.2.1 场效应管的单极性导电机理和特性曲线	75
4.2.2 场效应管的外特性	80
4.3 BJT 和 FET 的主要参数	85
4.3.1 BJT 的主要参数	85
4.3.2 结型场效应管的主要参数	86
4.3.3 绝缘栅型场效应管的主要参数	87
4.3.4 各种晶体管的特性比较及使用注意事项	87
本章小结	88
习题与思考题四	89
Multism 仿真练习题	91
第5章 半导体三极管电路的基本分析方法	92
5.1 三极管电路	92
5.1.1 三极管开关电路	94
5.1.2 三极管放大电路	96
5.2 三极管放大电路的基本分析方法	100
5.2.1 图解分析方法	100
5.2.2 数学模型分析方法	108
5.2.3 静态工作点设置与三极管偏置电阻的选择	117
5.3 温度的影响和分压偏置放大电路	123
5.3.1 温度对 BJT 静态工作点的影响	123
5.3.2 分压偏置共射放大电路	124

5.3.3 分压偏置共集电极放大电路	132
5.3.4 分压偏置共基极放大电路	134
5.4 分压偏置 FET 共源放大电路分压比的确定和电路分析	135
5.4.1 共源极放大电路分压比的确定和电路分析	135
5.4.2 共漏极放大电路分压比的确定和电路分析	141
5.4.3 共栅极放大电路分压比的确定和电路分析	145
5.5 放大电路的频率特性	146
5.5.1 单管共射极放大电路的频率特性	147
5.5.2 单级共基极电路的频率特性	150
5.5.3 单级共集电极放大电路的频率特性	152
5.5.4 FET 放大电路的频率响应	153
5.5.5 放大电路频率响应的改善和增益带宽积	155
5.6 频率特性与阶跃响应	156
5.7 BJT 和 FET 各自的三种接法的性能比较	158
5.7.1 BJT 的三种接法的性能比较	158
5.7.2 FET 的三种接法的性能比较	158
本章小结	159
习题与思考题五	160
Multism 仿真练习题	171
第 6 章 从多级放大电路到差动放大电路	173
6.1 多级放大电路	173
6.1.1 多级放大电路的耦合方式	173
6.1.2 多级放大电路的性能分析	176
6.2 电流源电路	186
6.2.1 电流源	187
6.2.2 电流源作为有源负载	191
6.3 差动放大电路	192
6.3.1 差动放大电路的由来	192
6.3.2 差动放大电路的构成及其工作原理	194
6.3.3 具有恒流源的高共模抑制比差动放大电路	206
6.3.4 FET 差动放大电路的构成及其工作原理	209
6.4 差动放大电路的传输特性	211
6.5 多级放大电路的上限频率和下限频率的估算	213
本章小结	215
习题与思考题六	216
Multism 仿真练习题	226

第 7 章 集成运算放大器	228
7.1 理想集成运算放大器及其线性应用	228
7.1.1 集成运算放大器简介	228
7.1.2 集成运放线性应用的基本运算电路	232
7.1.3 运放在信号运算方面的应用	236
7.2 主要性能参数及其分类	243
7.2.1 极限参数	243
7.2.2 输入失调参数	244
7.2.3 差模特性参数	244
7.2.4 共模特性参数	246
7.2.5 其他参数	246
7.2.6 集成电路的分类	248
7.3 集成电路的制作工艺和主要特点	250
7.3.1 集成电路的制作工艺及特点	250
7.3.2 从单管放大到对称差分放大	251
7.4 典型集成运放简介	252
7.4.1 双极型运放 LM741	252
7.4.2 单极型运放 C14573	255
7.5 集成运算放大电路的使用	258
7.5.1 集成运放的选用	258
7.5.2 集成运放的使用注意事项	260
7.5.3 输出电压与输出电流的扩展	263
7.6 集成运放的频率响应和频率补偿	264
7.6.1 频率响应	264
7.6.2 频率补偿	264
本章小结	268
习题与思考题七	269
Multism 仿真练习题	277
第 8 章 负反馈放大电路	279
8.1 负反馈放大电路的基本组态与判别	279
8.1.1 负反馈分析的方法	279
8.1.2 负反馈放大电路的 4 种基本组态分析	281
8.2 负反馈对放大器性能的影响	287
8.2.1 提高放大倍数的稳定性	287
8.2.2 减小非线性失真和抑制干扰、噪声	288
8.2.3 负反馈对输入电阻的影响	289
8.2.4 负反馈对输出电阻的影响	291

8.3 深度负反馈条件下放大电路的分析	293
8.3.1 利用增益的近似表达式简化分析	293
8.3.2 负反馈放大电路的去反馈等效分析法	296
8.4 负反馈放大器的稳定	301
8.4.1 负反馈放大电路产生自激振荡的原因及条件	301
8.4.2 负反馈放大电路的稳定裕度	302
8.4.3 负反馈放大电路常用的校正措施	303
本章小结	304
习题与思考题八	305
Multism 仿真练习题	312
第9章 功率放大电路	315
9.1 概述	316
9.1.1 功率放大电路的主要特点	316
9.1.2 功率放大电路分类	316
9.1.3 功率放大电路的工作状态与效率的关系	318
9.1.4 功率放大电路的主要技术指标	318
9.2 甲类、乙类和甲乙类功率放大电路	319
9.2.1 甲类功放电路举例	319
9.2.2 乙类和甲乙类双电源互补对称功率放大电路	321
9.2.3 单电源供电的互补对称 OTL 电路	326
9.3 集成功率放大器	328
9.3.1 概述	328
9.3.2 LM386 集成功率放大器及其应用	329
9.3.3 桥式功率放大器 BTL 电路	330
9.4 功率放大器应用中的几个问题	332
本章小结	333
习题与思考题九	334
Multism 仿真练习题	340
第10章 信号产生电路	343
10.1 正弦波振荡电路概述	343
10.1.1 振荡条件	343
10.1.2 起振和稳幅	345
10.1.3 正弦波振荡电路的基本组成部分	345
10.1.4 判断能否产生正弦波振荡的一般方法和步骤	346
10.1.5 正弦波振荡电路的分类	346
10.2 振荡电路常用选频网络	346
10.2.1 采用串并联型 RC 带通滤波器	346

10.2.2	采用并联电容型 LC 负分压系数带通滤波器	349
10.2.3	采用并联电感型 LC 负分压系数带通滤波器	350
10.2.4	采用并串联型 RC 带阻滤波器	350
10.2.5	采用双 T 网络 RC 带阻滤波器	351
10.3	分立元件振荡电路	353
10.3.1	电容三点式振荡电路	354
10.3.2	电感三点式振荡电路	357
10.4	集成振荡电路	359
10.4.1	文氏电桥集成振荡电路	360
10.4.2	双 T 网络集成振荡电路	362
10.5	石英晶体正弦波振荡电路	363
10.5.1	石英晶体的基本知识	363
10.5.2	石英晶体正弦波振荡电路的构成	365
10.5.3	石英晶体正弦波振荡电路在计算机中的应用	366
	本章小结	367
	习题与思考题十	367
	Multism 仿真练习题	373
第 11 章	模拟集成信号处理电路	375
11.1	电压比较器	375
11.1.1	过零比较器	376
11.1.2	单限比较器	377
11.1.3	滞回比较器	377
11.1.4	无反馈双限比较器	380
11.1.5	集成电压比较器	381
11.2	非正弦波信号发生器	382
11.2.1	矩形波和波形变换电路	382
11.2.2	集成函数发生器	386
11.3	有源滤波器	387
11.3.1	滤波电路的基础知识	387
11.3.2	有源低通滤波器	389
11.3.3	高通滤波器	391
11.3.4	带通滤波器	392
11.3.5	带阻滤波器	394
11.4	MOS 模拟电子开关及其应用	395
11.4.1	MOS 模拟电子开关的工作原理	395
11.4.2	开关电容电路	396
11.4.3	开关电容滤波器的基本原理和集成开关电容滤波器	397
11.4.4	MOS 模拟开关的其他应用	398

11.5	U/I 变换和 I/U 变换	399
11.5.1	U/I 变换电路	399
11.5.2	I/U 变换电路	401
11.6	V/F 和 F/V 转换器	402
11.6.1	V/F 转换器	402
11.6.2	集成 V/F 转换器	403
11.6.3	集成 F/V 转换器	405
11.7	其他信号变换电路	406
11.7.1	电压-时间变换电路	406
11.7.2	精密死区电路	408
	本章小结	408
	习题与思考题十一	410
	Multism 仿真练习题	415
第 12 章	直流稳压电路和集成稳压器	419
12.1	串联型线性稳压电源	419
12.1.1	电路组成和稳压原理	419
12.1.2	输出电压的调节范围	420
12.1.3	串联型直流稳压电路参数的估算	421
12.2	集成三端稳压器及其应用	422
12.3	高效开关型稳压器	424
12.3.1	开关型稳压电路的发展与分类	425
12.3.2	开关型稳压电路的组成和工作原理	425
12.3.3	集成开关型稳压电源	426
12.4	可控整流电路	429
12.4.1	晶闸管的基本特性	429
12.4.2	单相桥式可控整流电路	432
12.5	采用集成运算放大器精密整流与峰值检波电路	434
12.5.1	精密整流电路	434
12.5.2	峰值检波电路	436
	本章小结	436
	习题与思考题十二	437
	Multism 仿真练习题	442
	参考文献	444

第1章 深入认识电阻、电容和电感元件

本章提要

复习电阻、电容和电感等基本无源二端阻抗元件的基本知识,深入讨论这些元件(特别是电容和电感)的作用。它们在直流电路和交流电路(尤其是在频率较高的场合)的表现很不相同,它们在模拟电子技术中起着重要的作用。

读者通过物理学、电工学或电路分析等课程的学习,已熟悉阻抗元件:电阻、电容和电感,它们都是基本无源二端元件。这些元件(特别是电容和电感)用途广泛,它们在直流电路和交流电路(尤其是在频率较高的场合)的表现很不相同,它们在模拟电子技术中起着重要的作用,这就是再次对其进行深入讨论的原因。

1.1 阻抗元件相关知识的回顾

我们无意复述大家熟知的阻抗元件性能及其串并联的知识,只想提醒读者注意以下几点:

(1) 几个电阻串联,总电阻值等于参与串联的几个电阻的阻值之和;几个电阻并联,总电阻值比参与并联的最小电阻的阻值还小。读者应熟记电阻串并联计算公式。

(2) 电容的基本功能就是储存电荷。随着储存电荷量的增减,其两极板间的电压也随之升降。电容储存电场能量,能量值可以用下式表示

$$W = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$$

几个电容串联,总电容值比参与串联的最小电容的容值还小;几个电容并联,总电容值等于参加并联的几个电容的容值之和;读者应熟记电容串并联计算公式,并与电阻串并联计算公式对比。

(3) 电感的基本功能就是通过电流*i*时,在其周围空间激发和储存磁能。随着流过电感的电流大小的增减,其周围的磁场也随之强弱变化。

稳恒电流的周围产生稳定的磁场,磁场空间的各点处的磁场的方向和强弱不变。电流变化,其周围的磁场也随之变化。交流电的周围产生交变的磁场。

电感的定义有两个。

定义一:在线圈中通过电流*i*,在其周围空间激发磁场。当其周围不存在铁磁材料时,磁场的磁链 ψ 与电流*i*成正比

$$\psi = Li$$

式中,比例系数 L 是一个常量,称为线圈的自感系数,简称自感或电感(这种电感称为线性电感), $\psi = N\varphi$, φ 是穿过线圈的磁通量, N 是线圈的匝数;显然有, $L = N\varphi/I$ 。

在线圈周围存在铁磁材料时,二者关系非常复杂,简要地说,磁链大大增加了, L 也不再是常量,磁场中各点的磁通密度 B 都比无铁磁材料大为增加,这种电感称为非线性电感。

定义二: 电流的变化会引起磁场的变化,从而在线圈中感生电动势 ϵ

$$\epsilon = -\frac{d\psi}{dt}$$

式中,负号表示感生电动势阻碍磁通的变化,即阻碍线圈中电流的变化。

对于线性电感,有

$$\epsilon = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

式中, $L = \epsilon/(di/dt)$ 。电感 L 的单位是亨利,用字母 H 表示,还有毫亨(mH)和微亨(μH), $1H = 1000mH$, $1mH = 1000\mu H$ 。

电感储存磁场能量,能量值可以用下式表示

$$W = \frac{1}{2} Li^2$$

设有自感系数分别为 L_1 、 L_2 的两电感,它们的互感为 M ,则有二者顺接串联时,总自感为

$$L = L_1 + L_2 + 2M$$

二者反接串联时,总自感为

$$L = L_1 + L_2 - 2M$$

二者同向并联时,总自感为

$$L = (L_1 L_2 - M^2) / (L_1 + L_2 - 2M)$$

互感 M 必须满足

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} \quad (0 < k < 1)$$

$k=1$,称为“全耦合”; k 接近于 1,称为“紧耦合”; k 较小时,称为“松耦合”。

(4) 归纳三种基本元件伏安关系的相量形式,即

$$\dot{U} = R \dot{I}$$

$$\dot{U} = \frac{1}{j\omega C} \dot{I}$$

$$\dot{U} = j\omega L \dot{I}$$

我们可以得到统一的基本元件的伏安关系——欧姆定律的相量形式

$$\dot{U} = Z \dot{I}$$

(5) 基尔霍夫定律的相量形式

$$\sum_{k=1}^n \dot{I}_k = 0, \quad \sum_{j=1}^m \dot{U}_j = 0$$

(6) 正弦量的求导运算可以转换为其相量乘以 $j\omega$ 的代数运算;正弦量的积分运算可以转换为其相量除以 $j\omega$ 的代数运算。

例如,对于 RLC 串联电路,有

$$u = u_R + u_L + u_C = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt$$

此式对应的相量表示式为

$$\dot{U} = R\dot{I} + j\omega L\dot{I} + \frac{\dot{I}}{j\omega C} = \left[R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \right] \dot{I}$$

1.2 电阻、电容和电感的作用

1.2.1 电阻的主要作用

电阻在交直流电路中的表现是一样的,其电流与电压的关系遵从欧姆定律,二者极性相同,相位相同。电阻的作用主要有以下几个方面。

1. 限流和分流

根据欧姆定律,对于一定的电压,通过电阻可选择一定大小的电流。

如图 1-1 所示放大器设置了两个输入插口,为了保证无论输入是小信号还是大信号,同一个放大器输入端具有相同的输入电压和输入电流,采用电阻 R_1 对大信号限流。

如图 1-2 所示,每一节点右边的等效电阻总是 $2R$,从 A 点输入的电流 I 固定为 U_A/R ,电流 I 每经过一个节点,等分为两路输出,流过每一个 $2R$ 支路的电流依次为 $I/2$ 、 $I/4$ 、 $I/8$ 。

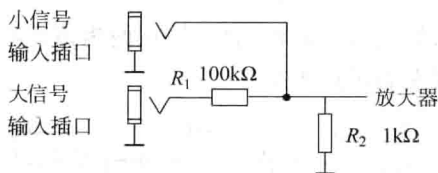


图 1-1 电阻的限流作用示例

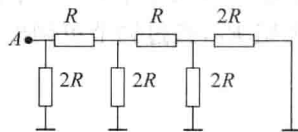


图 1-2 电阻的分流作用示例

再如,只能测量微安级的电流计,要扩大量程,成为能测量大电流的电流表,就是用不同的电阻并联分流实现的。

2. 降压和分压

如在二极管电路、试电笔电路以及测试仪表中,通常采用串联电阻降低电压,保护元件、仪表和人身安全。

小量程的电压表,要扩大量程,成为能测量高电压的多量程的电压表,就是用不同的电阻串联分压实现的。电位器的原理也是串联分压。

3. 将电流转换成电压

根据欧姆定律,通过电阻可将电流转换成电阻两端的电压降落。如三极管(其工作原理后面会讲到)的三个极要求不同的电位,就是通过接不同的电阻 R_B 和 R_C 于同一电源 U_{CC} 上实现的,如图 1-3 所示三极管的直流通路。

又如图 1-5 所示的电阻 R 将前级放大器输出的交流电流转换成交流电压信号,送到后