

ELECTRICITY

# 电工技术

杨风 刘朝阳 编著



兵器工业出版社

# 电 工 技 术

杨 风 刘朝阳 编著

兵器工业出版社

## 内 容 简 介

全书共分三篇,十三章。分电路、工程电路和应用技术篇。主要介绍了正弦交流电路、三相电路、频率响应、时域分析等内容。本书是以教育部颁发的高等学校“电工技术”教学基本要求为基础,适当加宽一些选学内容而编写的,以适应不同专业的需要。

### 图书在版编目(CIP)数据

电工技术/杨风,刘朝阳编著. —北京:兵器工业出版社,2005.8

ISBN 7-80172-519-0

I. 电… II. ①杨… ②刘… III. 电工技术 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 089778 号

出版发行:兵器工业出版社  
发行电话:010-68962596, 68962591  
邮 编:100089  
社 址:北京市海淀区车道沟10号  
经 销:各地新华书店  
印 刷:北京市登峰印刷厂  
版 次:2006年2月第1版第2次印刷  
印 数:2751—6250

责任编辑:张小洁  
封面设计:李 晖  
责任校对:赵春云  
责任印制:魏丽华  
开 本:787×1092 1/16  
印 张:19  
字 数:485千字  
定 价:26.00元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

# 前 言

本书以教育部颁发的高等学校“电工技术”教学基本要求为基础,编写中为适应不同专业的教学需要,适当加宽选学内容。以同时给学生提供一些自由阅读的内容也符合因材施教的原则,书稿中标以“\*”的章、节、段供学生阅读。编写本书的指导思想是不拘泥于一版的版式,尽量力求创新。全书结构分作电路基础理论、工程电路和应用技术共三篇。把正弦交流电路、三相电路、频率响应、时域分析等内容与基础理论脱开的目的是力求把这些内容讲成电工技术课程,尽量少带单纯电路理论色彩,以确立电工技术课程的思想体系。本书第二个特点是注重思想方法的引导,加强逻辑思维,培养学生的能力素养。第一章命题为“从物理学向电路理论过渡”,其目的就是要突出解决思想方法问题,告诉学生学习电路理论与学习物理学的不同侧重点和思维方法。又如在诸多地方,如电源等效变换、戴维南定理、相量法等是如何提出来的,就此不惜笔墨,目的是要加强逻辑思维的训练。本书第三个特点是在控制电器、电工仪表等章节用照片代替过去的手工绘图以突出真实形象感,使教材显得新颖。本书第四个特点是加强了应用性,电气控制内容纳入软启动器、可编程控制器等新技术。

本书由中北大学刘朝阳教授、杨风副教授编著。刘朝阳教授编写第一章至第六章,杨风副教授编写第七章至第十三章,任爱芝老师编写第一章至第三章习题,郎文杰老师编写第四章、第五章、第六章、第十二章习题,吴其洲老师编写第七章至第十一章习题,并做了许多工作。

由于编者水平、时间有限,不免有许多错误和不当之处,敬请批评指正。

编 者

2004. 4. 26 于中北大学

# 目 录

## 第一篇 电路基础理论

第一章 从物理学向电路理论过渡	1
§ 1.1 电路分析导论	1
§ 1.2 电路、系统及其模型	2
1.2.1 电路与系统的概念	2
1.2.2 电路模型	3
§ 1.3 电路分析中的若干规则	4
1.3.1 关于参数与变量	5
1.3.2 电流、电压的参考方向	5
1.3.3 功率计算的规范化方法	7
§ 1.4 电路中电位的计算	9
§ 1.5 电阻	11
§ 1.6 电感	12
1.6.1 电感中物理现象的回顾	12
1.6.2 电感上电压与电流的关系	13
1.6.3 电感中的储能	15
§ 1.7 电容器	15
1.7.1 电容器上的端口特性	15
1.7.2 电容、电感特性的对偶性	17
§ 1.8 电源	18
1.8.1 电源的工作状态	18
1.8.2 电压源	19
1.8.3 电流源	20
1.8.4 电源的工作点	21
§ 1.9 基尔霍夫定律	22
1.9.1 基本名词	22
1.9.2 基尔霍夫电流定律	22
1.9.3 基尔霍夫电流定律推广到多端网路	23
1.9.4 基尔霍夫电压定律	23
1.9.5 基尔霍夫电压定律推广到开口电路	24
1.9.6 导出电压与路径无关的概念	25

1.9.7 导出一段含源电路的欧姆定律	25
§ 1.10 基尔霍夫定律的重要意义	26
1.10.1 基本思想的形成	26
1.10.2 结点方程的独立性	26
1.10.3 回路方程的独立性	27
习题	27
<b>第二章 电路的基础分析法</b>	<b>32</b>
§ 2.1 电阻的联接	32
2.1.1 电阻的串联及分压公式	32
2.1.2 电阻的并联及分流公式	33
§ 2.2 星形网路与三角形网路的等效变换	33
2.2.1 问题的提出	33
2.2.2 等效变换的条件及公式	34
§ 2.3 实际电源模型的等效变换	37
§ 2.4 结点电位法与弥尔曼定理	39
2.4.1 方法的导出	40
2.4.2 弥尔曼定理	40
§ 2.5 回路法	41
§ 2.6 叠加定理	43
2.6.1 叠加定理的表述	43
2.6.2 叠加定理的证明	45
2.6.3 齐性定理	45
§ 2.7 戴维南定理	46
2.7.1 逻辑思考	46
2.7.2 戴维南定理	47
2.7.3 戴维南定理的证明	48
2.7.4 戴维南定理的推论——诺顿定理	48
2.7.5 应用戴维南定理应注意的问题	49
§ 2.8 含受控源电路的分析	50
§ 2.9 非线性电路的分析计算	54
2.9.1 非线性元件特性表示法及电路分析的特点	54
2.9.2 非线性电阻电路的图解静态分析	54
2.9.3 非线性电路的动态图解分析	55
2.9.4 动态分量的小信号模型	56
习题	57

## 第二篇 工程电路

<b>第三章 正弦交流电路的稳态分析</b>	<b>64</b>
§ 3.1 正弦交流电的基本概念	64

3.1.1	什么是正弦交流电	64
3.1.2	正弦量的三要素	65
§ 3.2	正弦量的相量表示法	67
3.2.1	问题的由来	67
3.2.2	相量的定义	68
3.2.3	基尔霍夫定律的相量形式	69
3.2.4	正弦量的相量图	70
3.2.5	正弦量一阶导数的相量	70
§ 3.3	不同性质元件上的正弦稳态响应	71
3.3.1	电阻元件在正弦激励下的特性	71
3.3.2	理想电感元件上正弦响应的特殊性	72
3.3.3	理想电容元件上正弦响应的特殊性	74
§ 3.4	复合参数支路上的正弦稳态响应	77
3.4.1	RLC 串联电路中各电压的相量关系	77
3.4.2	端口上电压与电流的关系	78
3.4.3	复阻抗运算	80
§ 3.5	无源单口网路上的功率	81
3.5.1	瞬时功率	82
3.5.2	视在功率、有功功率、无功功率之关系	82
3.5.3	功率因数的提高	84
§ 3.6	复杂交流电路的计算	85
§ 3.7	相量图在电路分析中的应用	87
	习题	89
<b>第四章</b>	<b>三相正弦交流电路</b>	<b>93</b>
§ 4.1	三相正弦交流电的基本概念	93
4.1.1	三相电源	93
4.1.2	三相绕组的联接和供电方式	94
4.1.3	三相四线制供电时相电压与线电压的关系	95
§ 4.2	三相负载作星形联接运行	95
4.2.1	各电流的计算	95
4.2.2	对称负载运行时的特殊情况	96
4.2.3	三相星形不对称负载的运行	96
§ 4.3	三相负载作三角形联接运行	98
4.3.1	各电流的计算	98
4.3.2	对称负载运行时的特殊情况	98
§ 4.4	三相功率	100
4.4.1	有功功率	100
4.4.2	三相功率的测量	101
	习题	103

<b>第五章 电路的频域分析</b> .....	107
§ 5.1 正弦网络函数 .....	107
§ 5.2 RC 滤波器 .....	107
5.2.1 RC 低通滤波器 .....	107
5.2.2 RC 高通滤波器 .....	108
5.2.3 RC 带通滤波器 .....	109
§ 5.3 电路中的谐振现象 .....	111
5.3.1 串联谐振 .....	111
5.3.2 并联谐振 .....	114
§ 5.4 非正弦电路的分析计算方法 .....	116
5.4.1 非正弦量的谐波分析 .....	116
5.4.2 频谱线图 .....	118
5.4.3 线性电路在非正弦激励下的计算 .....	118
5.4.4 非正弦电流、电压的有效值 .....	120
习题 .....	121
<b>第六章 电路的时域分析</b> .....	126
§ 6.1 时域分析的基础知识 .....	126
6.1.1 电路中的过渡过程及换路定律 .....	126
6.1.2 电路的动态方程及初始条件 .....	126
§ 6.2 一阶电路的零输入响应 .....	128
6.2.1 一阶 RC 电路的零输入响应 .....	128
6.2.2 一阶 RL 电路的零输入响应 .....	130
§ 6.3 一阶电路的全响应和零状态响应 .....	132
6.3.1 一阶 RC 电路的全响应 .....	132
6.3.2 一阶 RC 电路的零状态响应 .....	133
6.3.3 关于时间常数 .....	133
§ 6.4 一阶电路在直流激励下的三要素法 .....	135
§ 6.5 一阶 RC 电路对矩形脉冲电压激励的响应 .....	138
6.5.1 寄生参数对矩形脉冲激励下响应的影响 .....	138
6.5.2 RC 微分电路 .....	138
6.5.3 RC 积分电路 .....	139
§ 6.6 一阶电路的正弦响应 .....	140
§ 6.7 二阶电路中过渡过程的特殊性 .....	141
习题 .....	144
<b>第七章 互感电路</b> .....	149
§ 7.1 互感的基本概念 .....	149
7.1.1 互感现象的磁量关系 .....	149
7.1.2 互感的电磁关系和互感系数的定义 .....	150
7.1.3 两电流同时存在时的电磁关系 .....	150
7.1.4 耦合系数 .....	150



7.1.5 同名端 .....	151
§ 7.2 互感电路的计算特点 .....	152
7.2.1 互感的串联 .....	152
7.2.2 互感的并联 .....	153
7.2.3 单纯磁耦合电路 .....	153
习题 .....	154

### 第三篇 应用技术

第八章 磁路和变压器 .....	157
§ 8.1 磁路的基本概念 .....	157
8.1.1 磁路及其基本物理量 .....	157
8.1.2 磁性材料的磁性能 .....	158
8.1.3 磁路的基本定律 .....	159
§ 8.2 直流磁路简介 .....	161
§ 8.3 交流铁心线圈电路 .....	162
8.3.1 交流铁心线圈中的电磁关系 .....	163
8.3.2 交流铁心线圈中电压与电流的关系 .....	163
8.3.3 交流铁心线圈中的功率损耗 .....	164
8.3.4 交流铁心线圈的等效电路 .....	164
§ 8.4 变压器的构造和工作原理 .....	165
8.4.1 变压器的工作原理 .....	165
8.4.2 变压器的基本结构 .....	166
§ 8.5 变压器的运行分析 .....	166
8.5.1 变压器的空载运行 .....	166
8.5.2 变压器的有载运行 .....	167
8.5.3 变压器的阻抗变换作用 .....	168
8.5.4 变压器的效率 .....	169
8.5.5 变压器的额定值 .....	169
§ 8.6 其他型式的变压器 .....	169
8.6.1 自耦变压器 .....	169
8.6.2 仪用互感器 .....	170
8.6.3 三相变压器 .....	170
习题 .....	171
第九章 电力驱动 .....	173
§ 9.1 机电能量转换原理 .....	173
9.1.1 电动机和发电机的工作原理 .....	173
9.1.2 电磁转矩和感应电动势 .....	174
9.1.3 能量平衡关系 .....	174
§ 9.2 三相异步电动机的构造和工作原理 .....	175

9.2.1	三相异步电动机工作原理的逻辑思维 .....	175
9.2.2	三相异步电动机旋转磁场的产生 .....	176
9.2.3	转子的构造及转速、转差率 .....	178
9.2.4	三相异步电动机的结构分类 .....	178
§ 9.3	三相异步电动机的转矩特性和机械特性 .....	179
9.3.1	三相异步电动机的电路分析 .....	179
9.3.2	三相异步电动机的转矩特性 .....	180
9.3.3	三相异步电动机的机械特性 .....	181
§ 9.4	三相异步电动机的使用技术 .....	183
9.4.1	三相异步电动机的启动 .....	183
9.4.2	三相异步电动机的调速 .....	185
9.4.3	反转 .....	187
9.4.4	制动 .....	187
§ 9.5	三相异步电动机的铭牌数据 .....	188
§ 9.6	单相异步电动机 .....	189
9.6.1	单相异步电动机的工作原理 .....	189
9.6.2	单相异步电动机启动转矩的产生 .....	190
§ 9.7	直流电动机 .....	191
9.7.1	直流电动机的分类 .....	192
9.7.2	并励电动机的机械特性 .....	192
9.7.3	并励电动机的启动 .....	193
9.7.4	并励电动机的调速 .....	193
§ 9.8	控制电机 .....	195
9.8.1	交流伺服电动机 .....	195
9.8.2	直流伺服电动机 .....	196
9.8.3	步进电动机 .....	197
	习题 .....	199
<b>第十章</b>	<b>继电器接触控制电路</b> .....	<b>201</b>
§ 10.1	概述 .....	201
§ 10.2	常用低压开关电器 .....	202
10.2.1	低压配电电器 .....	202
10.2.2	低压控制电器 .....	204
§ 10.3	继电器接触控制的应用范例 .....	208
10.3.1	小型异步电动机的直接启动控制电路 .....	208
10.3.2	可以在不同地点启、停的控制电路 .....	209
10.3.3	小型三相异步电动机的正反转控制电路 .....	209
10.3.4	三相异步电动机的星形—三角形启动控制电路 .....	210
10.3.5	具有行程控制的电路 .....	211
§ 10.4	继电器接触控制电路的要点归纳 .....	213
10.4.1	对信号的处理 .....	213

10.4.2	信号的基本逻辑关系	214
10.4.3	对继电接触控制电路的基本要求	215
10.4.4	继电接触控制电路设计初步	216
§ 10.5	集成电动机启动器介绍	218
10.5.1	一般的电动机启动器	218
10.5.2	电动机软启动器	218
10.5.3	软启动器的工作原理	218
10.5.4	软启动器的接入方式	219
10.5.5	软启动器的运行方式	220
10.5.6	软启动器的选用	221
10.5.7	固体继电器	221
	习题	222
<b>第十一章</b>	<b>可编程控制器及其应用</b>	<b>226</b>
§ 11.1	可编程控制器的结构和工作原理	226
11.1.1	PLC 的一般结构	226
11.1.2	PLC 的基本工作原理	228
11.1.3	PLC 的分类及应用场合	229
§ 11.2	可编程控制器的技术性能指标	230
11.2.1	PLC 的基本技术指标	230
11.2.2	FP1 性能介绍	231
11.2.3	FP1—C40 的内部寄存器及 I/O 配置	232
§ 11.3	可编程控制器 FP1 的基本指令	234
§ 11.4	PLC 编程的基本原则和技巧	240
11.4.1	编程的基本原则	240
11.4.2	编程技巧	241
§ 11.5	PLC 控制系统的设计	242
11.5.1	PLC 的应用设计步骤	242
11.5.2	PLC 控制系统设计举例	243
	习题	246
<b>第十二章</b>	<b>电工测量与非电量电测</b>	<b>249</b>
§ 12.1	常用电工仪表	249
12.1.1	电工测量仪表、仪器的分类	249
12.1.2	磁电系测量仪表	250
12.1.3	电磁系测量仪表	252
12.1.4	电动系测量仪表	254
12.1.5	万用表	255
12.1.6	兆欧表	257
§ 12.2	电工仪表的误差及准确度	259
12.2.1	误差的表示方法	259
12.2.2	电工仪表准确度的表示方法	260

§ 12.3 电桥法比较测量·····	262
12.3.1 用直流电桥测量电阻·····	262
12.3.2 用交流电桥测量电感、电容·····	263
§ 12.4 工程测量及其误差·····	264
12.4.1 测量方式·····	264
12.4.2 测量误差·····	265
12.4.3 系统误差的估计和处理·····	267
§ 12.5 非电量电测·····	269
12.5.1 传感器的基本概念·····	269
12.5.2 温度的检测·····	269
12.5.3 材料应变的测量·····	272
12.5.4 电桥测量电路·····	273
12.5.5 转速的检测·····	273
习题·····	276
<b>第十三章 安全用电·····</b>	<b>277</b>
§ 13.1 触电及安全保障措施·····	277
13.1.1 电击·····	277
13.1.2 电伤·····	277
13.1.3 触电的形式·····	278
13.1.4 电气安全的基本要求·····	278
13.1.5 家庭安全用电·····	279
13.1.6 电气事故的紧急处置·····	280
§ 13.2 电气接地和接零·····	280
13.2.1 工作接地·····	280
13.2.2 保护接地·····	281
13.2.3 接地保护的原理·····	282
13.2.4 不重复接地的危险·····	283
13.2.5 对接地系统的一般要求·····	283
<b>部分习题答案·····</b>	<b>284</b>
<b>参考文献·····</b>	<b>292</b>

# 第一篇 电路基础理论

## 第一章 从物理学向电路理论过渡

电工技术是研究电、磁现象在工程上应用的课程。本书第一篇是基础理论；第二、三篇是工程应用。本书第一章的主导思想是把物理学课程中学过的电、磁理论从工程应用的观点提出问题，完成从物理学向电路理论过渡。学习一门新的课程一定要尽快建立起本课程的思想体系。电路理论在 20 世纪初已经离开物理学的研究而形成一门独力的课程体系。它研究问题的侧重点与物理学不同，它是为工程应用服务的理论课程。读者在开始学习本课程的时候就必须注重树立工程应用的观点。本书从完成教材的重任出发，不仅要传授基本知识，而且要力求引导学生掌握学习的基本思想方法。

### § 1.1 电路分析导论

电工技术是对非电专业学生进行电气工程教育的一门非常重要的技术基础课。大家知道，电的应用极其广泛，它已经渗透到各个技术领域。它带给人类以现代文明，它与国民经济和人民生活有着极为密切的关系。现代经济和科学技术的三大支柱是能源、材料和电子信息工程。这三大支柱无不与电有着极为密切的关系。电是一种最好的中间形式的能量，因为它便于转换，便于输送，便于控制。大到 1820 万 kW 的长江三峡水电站，小到毫微瓦的微电子技术，应用起来是那么遂人所愿，这是其他形式的能量无法比拟的。科学家们曾经预言，在太空设置若干平方公里的光电池，把太阳能转换成电能用微波传送到地球上，这是多么宏伟的设想。我们肩负着祖国的现代化建设任务，所谓现代化就是要在工业、农业、科学研究和国防技术中采用最先进的技术、最先进的设备和最科学的方法。今天，电子技术的高速发展和广泛应用，对科学技术的发展起到了很大的推动作用，给我们开辟了许多新的技术领域，而且还将开辟更新的技术领域。我们的任务任重道远。

本课程包括学习电工、电子技术必备的电路理论和电工应用技术。电路理论的研究对象是把各种工程应用电路抽象化了，以能量转换为核心去研究它的基本规律和分析计算方法。第一

章的核心内容,其一是电路元件的个性,即以电路中能量转换的特征分类,抽象出电阻、电感、电容等不同性质元件,这些元件上的电流电压关系和能量转换关系是什么?以及电压源、电流源、受控源上的电流电压关系是什么?这些可概括为电路中的局部规律。其二是由多个元件组成电路整体之后,各元件电流之间以及电压之间的约束关系。这些可概括为电路中的整体规律。

电路理论具有抽象性。我们并不讨论具体的应用电路,而是抽象化的讨论电路中具有共性的内在规律。抽象化的方法是为电路建立电路模型。首先是以元件上能量转换的特征建立电路的基本模型,即前述的不同性质的电路元件。再由这些基本模型组合成复模型而后再进行分析计算。

第二章是电路的基础分析法,第三章到第六章将分专题展开讨论。这里引入两个名词,把电源的作用称为激励,而把电源作用下在电路中产生的结果称为响应。所以,作用与结果的关系就是激励与响应的关系。因此,已知激励和电路参数求取电路中的响应是电路分析的主线。

无论学习哪门课程,都有它自己的特殊性。电路理论不同于物理学,初学者不要用旧思想和旧的方法看待新的问题,要尽早地建立起本课程的思想体系。首先,物理学多从场的角度研究问题,电路理论是从路的角度研究问题。电路理论研究问题的侧重点不在元件的内部机理而在于外部关系。即一个二端元件其端口上的电流电压的关系是什么,以及用诸多元件组成整体电路之后,如何求取响应的方法问题。这是电路理论的主要内容。尤其是由不同性质的元件组成一个整体电路之后,面对的分析方法变得复杂,所以涉及的数学面比较宽。其次,要理论联系实际,树立工程应用的观点。可以说电路理论是物理、数学、工程三者的结合点。这是电路理论的显著特点。

本课程通过理论与实践教学,要掌握电路的基础分析方法和解决实际问题的理论基础,并掌握必要的电工应用技术。为后续课程的学习、进修和从事实际工作打好基础。

## § 1.2 电路、系统及其模型

### 1.2.1 电路与系统的概念

电能的传送有两种方式,一是通过电磁场的辐射;二是通过电荷在电路中的流动,电荷是能量的载体。电流的大小反映了传送能量规模大小的一个侧面。本课程只涉及电路的基本理论。电路由若干个电路元件或设备组成,它是传输能量、转换能量或者是能够采集电信号、传递和处理电信号的有机整体。图 1.2-1(a)所示为日光灯接线图。它能把电能转换为光能。

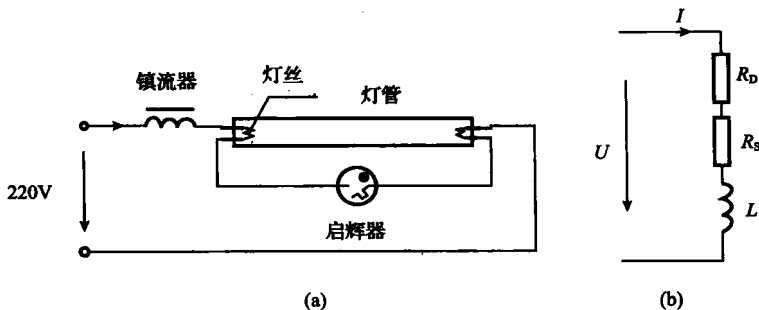


图 1.2-1 日光灯接线图及等效电路

传输信号与传输能量在意义上有些不同。电信号是指用微小电流电压的变化规律所表征的其他信息量。当然电信号也伴随着有微小的能量,但它是以获取信息为主要目的。图 1.2-2 是用系统框图表示的一个较复杂的电路,它能把无线电广播电台发送的电磁信号转换成声音重放出来。

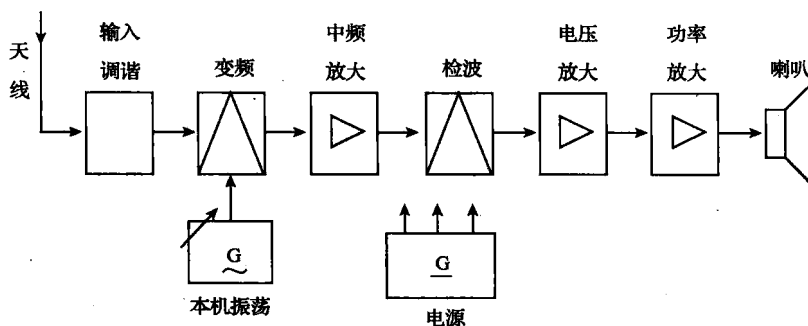


图 1.2-2 半导体收音机的系统框图

用现代电路理论来分析电路时,常将具有一定功能的电路视为一个系统。从一般意义上讲,系统是由若干互相关联的单元或设备所组成,并用来达到某种目的的有机整体。系统有简单的也有复杂的,例如由发电、输电、配电、用电等多种设备组成的电网可视为一个大系统。图 1.2-3 是利用电桥平衡原理实现测量温度的线路图。图中  $R_1, R_2$  为电桥的比例臂,  $R_s$  为标准电阻,  $R_0$  为热敏电阻。当在某一温度下(比如在  $0^\circ\text{C}$ )把电桥调平衡后,如果温度发生了变化,则  $R_0$  的阻值发生变化,电桥失去平衡,在对角线上输出电压信号。这个电压的极性和数值大小与温度有一定的函数关系,可反映出温度的升降数值。该电路可视为一个小的系统,即温度检测系统,也可称为信号变换系统,因它能把温度的改变变换成相应的电信号。

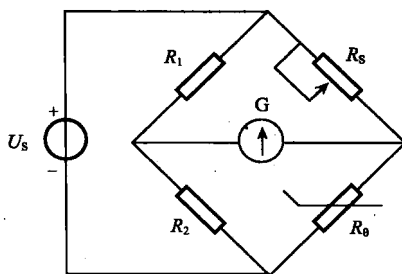


图 1.2-3 用电桥电路作为温度检测系统

对一个系统而言,电源(或信号源)的作用称为激励,激励引起的结果(如某个元件上的电流、电压)称之为响应。激励和响应的关系就是作用和结果的关系,往往对应着输入与输出的关系。一个系统可用图 1.2-4 所示的框图来描述,其中的  $e(t)$  为激励,  $r(t)$  为响应。分析一个系统,就是确定它的响应与激励的关系。

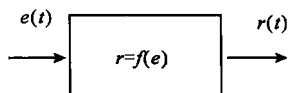


图 1.2-4 系统的框图表示

### 1.2.2 电路模型

已知电路参数和激励求取电路中的响应是电路分析的主线。但是影响响应的因素是复杂的,因为电路元件上的参数不是单一的。我们分析问题的基本思想方法是忽略掉一些次要因素,抓住影响响应的主要因素为电路塑造一个理想化的模型,此称为电路模型。基本电路模型就是将电路元件视为只存在一种能量转换机制的模型。照此逻辑,凡是能把电能转换为热能的元件就抽象成一个电阻元件,用  $R$  来表示;凡是把电能转换为磁场能的元件就抽象成一个电感元件,用  $L$  表示;凡是把电能转换为电场能的元件就抽象成一个电容元件,用  $C$  表示;

凡是能把其他形式的能量转换成电能的元件都抽象成电源。图 1.2-5 所示为它们的电路模型图形符号。

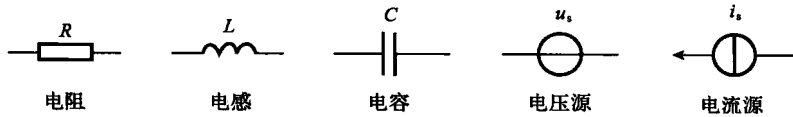


图 1.2-5 电路基本模型的图形符号



图 1.2-6 电子电路中的电阻元件

而实际电路及元件并不是这么简单。比如一个电感线圈,其中一定有电阻,所以可以把它看成是  $R$ 、 $L$  串联的模型,这就是一个复合电路模型。正如化学中的水,  $H_2O$  是复合模型,  $H$  和  $O$  是基本模型。所以由许多元件构成的电路,其中的能量转换机制是由对应的电路基本模型组合而成的复合模型来描述的。比如图 1.2-1(a) 的日光灯电路,它可以通过图(b)的电路模型来描述。又如一个电子电路中的电阻元件,它是在一个陶瓷的管型或柱型材料的基体上涂敷一层电阻率高的导电材料做成的,两端有连接线。有时为了增大电阻,就把此导电层刻成螺旋线,如图 1.2-6 所示。这个电阻接在电路中,影响响应的各种参数或多或少要表现出来,其中电阻  $R$  是主要因素。另外凡是有电流就有磁场,所以电感  $L$  必然存在。当电流流过电阻,其两端必有电位差,所以其两端间必然存在电场分布,所以电容  $C$  也就在其中了。当对电路进行分析时,关键问题是这个电阻工作环境,是直流电还是交流电,是高频还是低频。当工作在直流或是低频情况下,那

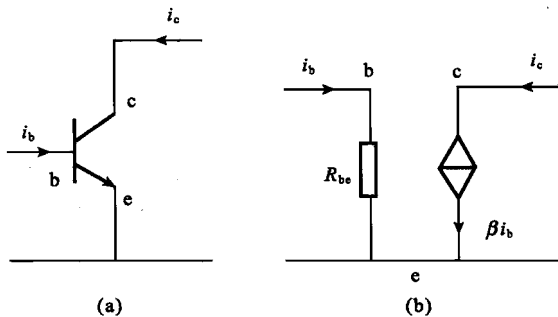


图 1.2-7 晶体管及其电路模型

么电感和电容的影响可以忽略不计。所以电路模型的一重属性就是近似性。电路模型另一重属性就是虚构性。比如一个晶体三极管,电路符号图如图 1.2-7(a) 所示。其集电极电流  $i_c$  是基极电流的  $\beta$  倍,所以就在这种特性虚构成图(b)的电路模型。 $R_{be}$  是基极与发射极之间的动态电阻。此电路模型是一个电流控制电流源,用来表示一个晶体三极管的电流放大作用。然而虚构的原则是必须能够客观地反映出所描述对象的物理特性。由此可见,电路模型就是实际电路的科学抽象。采用电路模型来分析电路,不仅使计算过程大为简化,而且能更清晰地反映该电路的物理本质。在这里我们提高到理性上用一句话总结上面的论述,那就是自然科学的研究方法就是模型化的方法。后面我们将按照这个法则为更多的实际电路建立模型。

### § 1.3 电路分析中的若干规则

人们的一切活动范畴必须有相应的行为规范。学术活动的行为规范之基础是达成共识的语言、图形、符号,甚至是法定标准。



### 1.3.1 关于参数与变量

人们对物理过程的认识,由定性感知上升到定量的研究,则电路中所发生的一切现象是通过数学式子描述的。这些数学式子统称为数学模型。所以描述电路性态的数学模型是由电路参数和变量组成的代数方程或微分方程。如在电阻上有  $u= Ri$ ;在电感上有  $u= L di/dt$ 。电路参数是影响响应的电路结构因素的描述,如前述的  $R, L, C$  等。这些参数在线性定常电路中是常数,规定用大写斜体字母书写。而电路中的激励和响应包括了电流、电压、功率等。这些与能量直接关联的物理量称为电路分析中的变量。这些变量的符号应采用国标《量和单位》规定的符号,如表 1.3-1 所示。除此之外在特定的范畴还有不同的符号。

表 1.3-1

名称 类别	电流	电压	电位	电动势	功率
直流量	$I$	$U$	$V$	$E$	$P$
时变量及广义变量	$i$	$u$	$v$	$e$	$p$

关于量与单位的说明:

① 关于量与单位应按国家技术监督局 1993 年发布的 15 项国家标准(GB3100~3102—93)执行,不得采用非法定单位。

② 单位的符号应该采用国际符号,不得用中文符号。电磁学量的基本定义单位符号如表 1.3-2 所示。

表 1.3-2

名称	电流	电压	功率	电能	电荷	电阻	电导
单位	A	V	W	J	C	$\Omega$	S
名称	电感	电容	周期	频率	磁通(磁链)	磁感应强度	磁场强度
单位	H	F	s	Hz	Wb	T	$A \cdot m^{-1}$

③ 关于扩展单位说明:

$10^3$  数量级如 kV、kA、kW,  $10^6$  数量级如  $m\Omega$ 、mH,

$10^{-3}$  数量级如 mA、mV、mWb,  $10^{-6}$  数量级如  $\mu F$ 、 $\mu V$ ,

$10^{-9}$  数量级如 nF,  $10^{-12}$  数量级如 pF。

④ 关于多字母组成的单位:第一个字母用大写正体书写,后面的字母用小写如  $rad \cdot s^{-1}$  (弧度/秒)。

⑤ 量与单位的合写:如  $t/s$ (时间以秒为单位),不能写为  $t(s)$ 。

### 1.3.2 电流、电压的参考方向

电流、电压、电动势等物理量具有方向性,在物理学中已作过明确的规定。即电路中正电荷流动的方向规定为电流的方向。电路中两点之间电压的方向是从高电位指向低电位的方向。电动势的方向是在电压源内由低电位指向高电位的方向。图 1.3-1(a)所示电路中分别标出了电流、电压、电动势的方向。为了明确区别概念起见,我们把物理学中定义的电流、电压的方向称为电流、电压的实际方向。而今提出参考方向的概念是因为在过去涉及到的电路简单,