

# 电力电子 技术基础

● 张石安 张 炜 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

内容简介

本书为高等院校工科专业教材，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。本书共分10章，主要介绍电路分析、模拟电子技术、数字电子技术、微机接口技术等。本书可作为高等院校工科专业教材，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

# 电力电子技术基础

张石安 张炜 编著

姓名: \_\_\_\_\_ 性别: \_\_\_\_\_ 年龄: \_\_\_\_\_ 职业: \_\_\_\_\_

电话: \_\_\_\_\_ 内容请全页复印并本套资料附复方式回封回封不, 如有热未

传真: \_\_\_\_\_ 发送对象: \_\_\_\_\_

邮编: \_\_\_\_\_

1. 您希望购买本书的用途是: \_\_\_\_\_

收藏  价格  内容  其他 \_\_\_\_\_ 目录 (CIP) 目录 (CIP) 目录 (CIP)

2. 您对本书的哪些方面感兴趣? \_\_\_\_\_

从文字角度  从图表角度  从设计角度  从应用角度  从其他角度

从排版、封面设计角度  从印刷质量角度  从纸张质量角度  从装订质量角度

3. 您最喜欢书中的哪篇(或章、节)? 请说明理由。 \_\_\_\_\_

4. 您最不喜欢书中的哪篇(或章、节)? 请说明理由。 \_\_\_\_\_

5. 您希望本书在何处出版? \_\_\_\_\_

北京海淀区学院路133信箱 邮编: 100036 北京燕山出版社 北京燕山出版社 北京燕山出版社

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

编辑电话: (010) 8254453 E-mail: lhy@phei.com.cn

## 内 容 简 介

电力电子技术设备日益增多,接触这些设备的人员遍及各个行业,迫切需要普及电力电子技术知识。本书首先结合实际需要和电力电子技术的特点讲述了电工基础知识,使读者掌握电工基本原理,为学习后续章节打下基础;然后讲解了三相交流电路和二极管桥式整流电路、可控整流电源、逆变器、开关电路、谐波抑制和无功补偿等实用技术,侧重引导读者在实践中正确应用技术解决问题。

本书适合电力电子技术行业具有初中以上文化程度的工人和管理者阅读,也适合作为电力电子技术初学者的入门教程。

张石安 张炜 编著

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术基础 / 张石安, 张炜编著. —北京: 电子工业出版社, 2008.7

ISBN 978-7-121-06416-6

I. 电… II. ①张… ②张… III. 电力电子学 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 053689 号

责任编辑: 刘海艳 特约编辑: 刘汉斌

印 刷: 北京牛山世兴印刷厂  
装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 印张: 15.25 字数: 390.4 千字

印 次: 2008 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 26.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

## 前 言

采用电力电子技术的设备遍及工业和生活的各个角落。小到几瓦、几十瓦的日光灯，大到几兆瓦的轧机系统和上万兆瓦的高压直流输电系统无不涉及电力电子技术。随着我国与国外交往的日益频繁，大量电力电子设备单独或随其他设备配套被引进我国，这就要求有大量的的高素质使用和维修人员：一方面传统的电工、电器及电气设备使用和维修人员急需补充提高；另一方面还要培养新的工人和初级技术人员，以适应使用和维修电力电子技术设备的需要。各大院校纷纷建立电力电子专业或附属于其他专业的电力电子技术课程就反映了这方面的需要。靠大专院校培养，一是短期内数量有限，二是培养成本太高。目前，专门为培养从事电力电子设备使用和维修的工人和初级技术人员而写的读物还较少。为此，作者专门为高中毕业以上文化程度的读者写一本自学电力电子技术的读物。希望本书能对正在从事和将要从事电力电子技术的人员有所帮助。

下面概括介绍什么是电力电子技术及本书的主要内容。

电，已经是现代经济和生活中不可须臾离开的，渗透到每一个角落的最重要的能源。电能经过产生、输送以统一的形式达到用户。用户的用电设备五花八门，种类繁多，因此需要电能的方式、形态各异。这就需要各种变换设备，将输送来的电能变换成适应不同用户需要的形式。电力电子技术是实现这些变换的主要技术。

现代电子学在电能变换中已经成为不可替代的主角。电力变换中电子学有两大分支：信息（控制）电子技术和电力电子技术。两者相辅相成，紧密联系，是进行电能变换的两条腿，缺一不可。电力电子技术主要担负变换任务（主电路）而信息电子技术则担负着对变换设备的控制（控制电路）任务。本书主要介绍电力电子技术的基础知识以及为了学习这些知识所必需的电工基础知识。对所需要的控制技术也提出了基本要求，具体实现留给专门著作解决。

电能的基本形态有两种：直流电和交流电，还有就是两者兼有的脉动直流。利用电力电子技术可实现它们的互相转换。本书将详细讨论直流和交流电能的基本规律；交流变换为直流的电路——整流器；直流变换为交流的电路——逆变器；直流和交流电的接通和切断——开关电路以及变换中对公用电网的影响——谐波抑制和无功功率补偿。应用电力电子技术构成的各种设备广泛用于生活和工业的各个领域并且应用领域还在不断扩展。

电力电子技术是电气工程中的电力、电子和控制技术之间的边缘学科。涉及的技术非常广泛。如何取舍，如何编排是一个难题。本书力图适应自学的需要，做到深入浅出，突出重点。因此没有刻意追求知识的系统性。沿着电力电子技术这条主线，结合实践中常用的技术，本着需要什么写什么，怎样容易理解就怎样写的原则编排。这样整篇显得有些凌乱。例如将种类繁多的电力电子器件和必要的信息电子知识分散到相关章节加以讨论。本书的每一章最后给出小结，不但总结了本章内容，还可起到索引的作用，便于查找需要的内容。前3章属于电工基础知识，插入了一些利于掌握电工基础的属于电力电子技术的内容；后5章是电力电子技术的主要内容。其中第8章谐波抑制和无功补偿是近年来应予特别关注的内容，因为随着电力电子设备日益普及，对电网的影响越来越大，势必日益加快发展，新的设备不断涌现。但涉及的数学和控制理论较多，只能力求建立起清晰的概念，没有深入探讨。

全书以建立清晰的物理概念为主要目的。因此，用一定篇幅讨论电路的测量和示波器观察，而对电路的设计计算没有过多涉及。书中的一些设计计算，目的也主要是帮助理解基本概念。因为概念清晰，在实际工作和阅读有关的书籍文献时容易理解并且也容易发现自身欠缺的内容，便于有的放矢地补充，深入学习。

本书是按照自学需要编写的。高中毕业的读者自学不会有太大的困难；具有初中毕业水平的读者，略加提高，补充一些高中物理和数学知识也能自学。因此可以作为中专和高职学生的教材；本书力求涵盖现有的主要电力电子技术，因而一些内容也可作为大专院校非工业电气自动化专业相关教材的补充。

虽然作者尽力追求深入浅出，突出重点，但限于作者的理论水平和实践经验，出现重点不突出，深入不深，浅出不浅，取舍不当，疏漏错误的弊病应在意料之中，恳请读者不吝赐教，批评指正。

编者

本书力求涵盖现有的主要电力电子技术，因而一些内容也可作为大专院校非工业电气自动化专业相关教材的补充。

虽然作者尽力追求深入浅出，突出重点，但限于作者的理论水平和实践经验，出现重点不突出，深入不深，浅出不浅，取舍不当，疏漏错误的弊病应在意料之中，恳请读者不吝赐教，批评指正。

编者

本书力求涵盖现有的主要电力电子技术，因而一些内容也可作为大专院校非工业电气自动化专业相关教材的补充。

虽然作者尽力追求深入浅出，突出重点，但限于作者的理论水平和实践经验，出现重点不突出，深入不深，浅出不浅，取舍不当，疏漏错误的弊病应在意料之中，恳请读者不吝赐教，批评指正。

编者

# 目 录

15	.....	表 1.0.1	1.0.1
22	.....	量 1.0.4	1.0.4
26	.....	表 1.0.2	1.0.2
26	.....	1.1	1.1
75	第 1 章 直流电路		1
75	1.1 电压、电流、电阻的关系		1
92	1.2 无源电路欧姆定律		1
92	1.3 单位的扩大和缩小		2
92	1.4 材料的电阻率和温度系数		3
112	1.4.1 电阻率		3
122	1.4.2 温度系数		4
132	1.5 超导体和绝缘体		4
132	1.5.1 超导体		4
132	1.5.2 绝缘体		5
132	1.6 负载和电阻连接方式		5
142	1.6.1 负载		5
142	1.6.2 串联连接		6
172	1.6.3 并联连接		7
172	1.6.4 混合连接		7
182	1.6.5 电阻分压器		8
182	1.6.6 桥式连接		9
192	1.7 电源电动势、内阻、开路电压、恒压源和恒流源		10
192	1.7.1 内阻		10
192	1.7.2 电动势		10
192	1.7.3 开路电压		11
192	1.7.4 恒压源和恒流源		11
192	1.8 有源电路欧姆定律		11
192	1.8.1 有源电路欧姆定律		11
192	1.8.2 电源电动势的测量		11
192	1.8.3 铅酸蓄电池		12
192	1.8.4 标准电池		16
192	1.8.5 温差电偶		16
192	1.9 电功率、电能		16
192	1.9.1 电功率		16
192	1.9.2 焦耳-楞次定律		17
192	1.9.3 千瓦时		17
192	1.10 电压、电流、电阻的测量		17
192	1.10.1 微安表头的评价		18
192	1.10.2 电流表、分流器和自制电流表		18

1.10.3	电压表	21
1.10.4	电阻的测量	22
1.10.5	万用表及使用注意事项	26
1.11	伏安特性曲线和非线性电路	26
1.11.1	伏安特性曲线	26
1.11.2	二极管和非线性电路	27
1.12	复杂电路的计算	29
1.12.1	基尔霍夫定律	29
1.12.2	复杂电路的计算方法	29
1.12.3	汽车供电电路	31
1.12.4	线性电路叠加原理	32
1.13	物质的电结构	33
1.13.1	物质的电结构	33
1.13.2	库仑定律	33
1.13.3	电场和电场强度	33
1.13.4	电位	34
1.13.5	示波器原理和使用	34
1.13.6	导体	37
1.13.7	电容器	37
1.14	电阻-电容电路的充放电	38
1.14.1	充电过程	38
1.14.2	放电过程	39
1.14.3	微分延时电路	39
	小结	39
	习题 1	41
<b>第 2 章 磁与电</b>		<b>43</b>
2.1	电、磁的联系及其基本规律	43
2.1.1	磁现象及其性质	43
2.1.2	磁与电的联系	44
2.1.3	磁场强弱的度量	44
2.1.4	铁心线圈的磁场	46
2.2	电、磁、动三者的关系	47
2.2.1	电、磁产生的运动(电动机原理)	47
2.2.2	洛伦兹力	48
2.2.3	磁、运动产生的电动势(发电机原理)	49
2.2.4	发电机和电动机的转换	49
2.2.5	电磁感应定律	50
2.3	自感电动势	50
2.3.1	电感	50

87	2.3.2	电感的串并联	51
77	2.3.3	电感线圈对电流的延时	51
77	2.4	两线圈间的互感	51
77	2.4.1	互感	51
77	2.4.2	同名端	52
87	2.4.3	汽车点火原理	52
87	2.5	电磁振荡	53
87	2.6	串联谐振和并联谐振	55
87	2.7	振荡过程的能量转换	56
97	2.8	涡流效应	57
97	2.9	趋肤效应	58
18	2.10	测量电表简介	58
58	2.10.1	磁电式电表	58
58	2.10.2	电磁式电表	59
58	2.10.3	电动式电表	59
58		小结	60
58		习题 2	62
	<b>第 3 章</b>	<b>交流电路</b>	<b>63</b>
48	3.1	交流电的产生	63
28	3.2	表示正弦交流电压的三个基本物理量	63
08	3.3	交流电的峰值、有效值、平均值	64
08	3.4	交流电路的阻抗	65
08	3.5	正弦量的复数表示法	65
88	3.5.1	复数及其表示法	65
88	3.5.2	用复数表示正弦量	67
88	3.5.3	交流电路定律的复数表示形式	68
98	3.6	并联谐振	70
98	3.7	交流电桥	71
00	3.8	相量分析	71
00	3.9	变压器	73
10	3.10	自耦变压器	74
10	3.11	调压器	74
00	3.12	电抗器	74
40	3.13	磁路定律	74
20	3.13.1	磁路欧姆定律	74
70	3.13.2	磁路基尔霍夫第一定律	75
80	3.13.3	磁路基尔霍夫第二定律	75
80	3.13.4	电磁铁吸力计算	75
00			



12	3.14 仪用互感器	76
12	3.14.1 电压互感器	77
12	3.14.2 电流互感器	77
12	3.14.3 钳形电流表	77
52	3.14.4 霍尔元件	77
52	3.15 交流电功率	78
82	3.15.1 瞬时功率	78
82	3.15.2 有功功率和无功功率	78
82	3.15.3 视在功率和功率因数	78
72	3.15.4 无功功率的补偿	79
82	小结	79
82	习题 3	81
	<b>第 4 章 三相交流电路和二极管整流电路</b>	<b>82</b>
92	4.1 三相交流发电机	82
92	4.2 三相负载的接法和三相电功率	83
00	4.2.1 三相负载的接法	83
50	4.2.2 三相对称负载	83
80	4.2.3 三相不对称负载	83
80	4.2.4 三相电功率	84
80	4.2.5 三相电功率的测量	85
40	4.3 三相变压器	86
20	4.3.1 三相变压器的标注	86
20	4.3.2 三相变压器的联结方式与判别方法	86
20	4.3.3 三相调压器	88
70	4.4 三相异步电动机	88
80	4.4.1 原理模型	88
07	4.4.2 旋转磁场	89
17	4.4.3 多极电动机	89
17	4.4.4 电动机转子	90
87	4.4.5 线绕式异步电动机和同步电动机简介	90
47	4.5 单相电器	91
47	4.5.1 单相电动机	91
47	4.5.2 单相设备与开关的连接	93
47	4.5.3 单相整流电路	94
47	4.5.4 操作电路常用的低压电器	95
27	4.5.5 三相电动机的可逆操作电路	97
27	4.6 三相整流电路	98
27	4.6.1 谐波和整流变压器的联结	98
	4.6.2 整流过程	99

041	4.6.3	换流过程	100
041	4.6.4	电抗器滤波	100
141	4.6.5	常用计算公式	100
141		小结	101
141		习题 4	103
	<b>第 5 章</b>	<b>可控整流电路</b>	<b>104</b>
541	5.1	晶闸管	104
841	5.1.1	晶闸管的断态伏安特性	104
841	5.1.2	晶闸管的导通及其参数	105
441	5.1.3	晶闸管的关断及其参数	105
041	5.1.4	门极特性参数	106
041	5.2	半导体器件的散热	106
041	5.2.1	半导体器件的封装形式	107
741	5.2.2	结温与散热	108
841	5.3	使用晶闸管时注意事项	111
841	5.4	简易断态伏安特性扫描电路	111
041	5.5	单相可控桥式整流	112
121	5.5.1	单相全控桥式整流	112
521	5.5.2	单相半控桥式整流	114
421	5.6	触发控制问题	114
021	5.6.1	对触发电路的基本要求	114
021	5.6.2	单结晶体管触发电路	115
021	5.7	常用的单片机外围电路	116
721	5.7.1	晶体三极管	116
721	5.7.2	门电路	119
821	5.7.3	运算放大器	121
821	5.7.4	555 定时器	124
001	5.7.5	小型单相变压器的设计计算	127
001	5.7.6	电路的级联	128
001	5.8	三相可控整流电路	129
101	5.8.1	三相半波可控整流电路	129
501	5.8.2	三相全控桥式整流电路	131
501	5.9	三相可控整流桥的同步触发电路	134
501	5.9.1	锯齿波同步触发单元	134
801	5.9.2	正弦波同步触发单元	136
801	5.9.3	触发电路的定相	136
801	5.9.4	小型三相变压器的计算	137
401	5.10	带平衡电抗器的双反星型可控整流电路	138
201	5.11	十二相可控整流电源	139

001	5.12	电解和电镀电源	140
001	5.12.1	液体导电原理	140
001	5.12.2	高质量电镀电源	141
101	5.12.3	电解铝和电解食盐	141
001	5.12.4	电解第一定律	141
401	5.13	充、放电设备	142
401	5.13.1	晶闸管充、放电电路	142
401	5.13.2	快速充电电路	143
201	5.13.3	时序控制电路	143
201	5.14	同步电动机励磁用整流器	144
001	5.15	直流电动机调速系统	146
001	5.15.1	直流电动机的机械特性方程	146
701	5.15.2	直流调速系统的性能指标	146
801	5.16	大电流软连接排和电阻焊机	147
111	5.17	整流设备型式试验和出厂试验	148
111	5.17.1	型式试验	148
211	5.17.2	出厂试验	149
211	5.17.3	电力半导体器件结温的测试	151
411		小结	152
411		习题 5	154
		<b>第 6 章 逆变器</b>	<b>156</b>
211	6.1	单相逆变电路	156
011	6.1.1	单相有源逆变电路	156
011	6.1.2	单相无源逆变电路	157
011	6.2	三相有源逆变电路	157
121	6.2.1	直流输电原理	158
421	6.2.2	直流电动机可逆拖动系统	158
721	6.3	无源逆变器	160
821	6.3.1	变频器	160
021	6.3.2	串联二极管式电流型并联逆变器	160
021	6.3.3	辅助晶闸管换相式电压型逆变电路	161
121	6.4	快速开关器件	162
421	6.4.1	快速晶闸管	162
421	6.4.2	可关断晶闸管	162
021	6.4.3	快恢复二极管	163
021	6.4.4	场效应功率晶体管	163
721	6.4.5	绝缘栅双极晶体管	163
821	6.5	由 MOSFET 构成的谐振逆变器	164
021	6.6	开关电源	165

001	6.7	脉宽调制交流调速变频器	165
001	6.8	晶闸管的保护	167
101	6.8.1	晶闸管的过电流及其保护	167
201	6.8.2	电子开关保护	168
301	6.8.3	过电压保护	168
401	6.8.4	缓冲电路和抑制电流上升率电路	169
401	6.8.5	整机统一保护	170
401	6.9	不间断电源系统	170
401	6.10	交流串级调速系统	171
501	6.11	交流-交流变频器介绍	171
501	6.12	无换向器电动机调速系统	173
501	6.13	中频感应加热变频器	174
501	6.14	逆变电路多重化	175
601	6.14.1	输出电压可调的逆变器	175
601	6.14.2	单相二重化逆变原理	176
601	6.14.3	三相三重化逆变原理	177
601	6.15	电动机调速与节能	178
701	小结		179
701	习题 6		181
	<b>第 7 章</b>	<b>开关电路</b>	<b>182</b>
801	7.1	晶闸管直流斩波器	182
901	7.1.1	晶闸管直流开关	182
901	7.1.2	降压直流斩波器	182
005	7.1.3	升压直流斩波器	183
005	7.1.4	可逆直流斩波器	183
005	7.1.5	桥式可逆直流斩波器	183
105	7.1.6	晶闸管直流斩波器	183
105	7.1.7	逆导晶闸管斩波器	184
105	7.2	IGBT 高频直流斩波器	185
205	7.3	交流开关	185
205	7.3.1	交流电子开关的两种基本电路	185
205	7.3.2	单相交流调压电路	186
305	7.3.3	三相交流调压电路	186
405	7.4	双向晶闸管和双向触发二极管	186
505	7.4.1	双向晶闸管	186
605	7.4.2	双向触发二极管	187
705	7.5	软启动器	188
705	7.6	交流开关触发和过流保护电路	188
805	7.7	交流调功器	189

201	7.8	高压直流输电简介	190
701	7.8.1	晶闸管的串联高压阀	190
701	7.8.2	高压直流输电系统	191
801		小结	192
801		习题 7	193
	<b>第 8 章</b>	<b>谐波抑制和无功补偿介绍</b>	<b>194</b>
071	8.1	谐波	194
071	8.1.1	谐波的产生	194
171	8.1.2	谐波的分解	194
171	8.1.3	谐波含量	195
071	8.2	电力电子设备的无功功率和功率因数	195
471	8.2.1	无功功率和功率因数	195
721	8.2.2	无功功率的产生	195
721	8.3	各种电力电子装置的谐波和功率因数	196
071	8.3.1	单相桥式可控整流	196
771	8.3.2	三相桥式可控整流	196
871	8.3.3	单相晶闸管反并联交流调压电路	196
071	8.4	无功功率的影响和谐波的危害	197
181	8.5	并联电容器无功补偿和补偿电容器计算公式	197
081	8.5.1	补偿方式	198
081	8.5.2	补偿电容的计算公式	198
081	8.5.3	谐波对补偿电容器的影响	199
081	8.6	LC 滤波器	199
081	8.7	动态无功补偿和谐波抑制	200
081	8.7.1	无功补偿方式	200
081	8.7.2	TCR 无功补偿	200
081	8.7.3	TSC 无功补偿	201
481	8.7.4	有源电力滤波器	201
281	8.7.5	静止无功发生器 (SVG)	201
281	8.7.6	无功补偿的控制	202
281	8.8	高功率因数变流器	202
081	8.8.1	二重联结整流器	202
081	8.8.2	自换相整流电路	203
081	8.8.3	功率因数校正电路和电子镇流器	204
081	8.8.4	PWM 整流电路简介	205
781	8.8.5	中点钳位 PWM 整流电路简介	206
881	8.8.6	双 PWM 变频电路	207
881		小结	207
081		习题 8	209

附录 A	负载类型 .....	210
附录 B	标准工作制 (负载等级) .....	210
附录 C	一般工业用不可控整流器技术数据 .....	211
附录 D	一般工业用可控整流器技术数据 .....	211
附录 E	水冷系列不可控整流器的型号规格 .....	212
附录 F	水冷系列可控整流器的型号规格 .....	213
附录 G	晶闸管中频电源型号、规格 .....	213
附录 H	晶闸管交流调压器的型号、规格 .....	214
附录 I	晶闸管交流调功器的型号、规格 .....	215
附录 J	普通整流管的额定值和特性参数 .....	216
附录 K	普通晶闸管的额定值和特性参数 .....	217
附录 L	小型晶闸管技术参数 .....	218
附录 M	单相桥式整流模块技术参数 .....	218
附录 N	硅二极管降压堆 (硅链) 技术参数 .....	219
附录 O	旋转型整流管技术参数 .....	219
附录 P	常用 N 型硅稳压二极管的型号和技术数据 .....	220
附录 Q	常用 P 型硅稳压二极管的型号和技术数据 .....	221
附录 R	单晶体管的型号和技术参数 .....	222
附录 S	小功率开关三极管的型号和技术数据 .....	223
附录 T	IR 公司 N 沟道 HEXFET 单管型号和技术数据 .....	224
附录 U	IR 公司 N 沟道 HEXFET 模块的型号和技术数据 .....	224
附录 V	IR 公司单独型 IGBT 单管型号和技术数据 .....	225
附录 W	IR 公司反并二极管型 IGBT 单管型号和技术数据 .....	225
附录 X	IR 公司 IGBT 模块的型号和技术数据 .....	225
附录 Y	电力半导体器件用散热器 .....	226
参考文献	.....	228

第1章 直流电路

# 第1章 直流电路

(1-1)

我们经常使用的电能分为直流电和交流电，直流电的电压是恒定不变的，交流电的电压则是按照正弦规律周期性地变化极性和大小。本章主要讨论直流电的规律，这些规律中有相当多的内容也适用于交流电。

(2-1)

## 1.1 电压、电流、电阻的关系

电是一种看不见，摸不着的东西。为了理解电的一些基本规律，我们以能够看得见摸得着的，容易理解的水流来类比电现象。这种类比不但直观，它们的内在规律也十分相似。

生活中常见的喷泉是以水压作为工作动力的，其形成原理如图 1-1 所示。高处水箱里的水沿底部开口的管子流出，如果管子开口处高度低于水箱的水平面时就会形成喷泉。为什么水柱能够喷得很高呢？因为管子的开口 B 和水箱的水平面存在一个高度差  $H$ ，在重力作用下水箱水面处的水压比开口 B 处的水压高，水从 B 处被压出。 $H$  就称为水位差，又称水压。显然，在喷水过程中管子中有一定量的水喷出，而且水压越大流量越大，水柱喷得越高。我们可以看到喷泉的高度  $H_1$  要比水箱的水平面低，这又是为什么呢？因为水在流动过程中要受到水管壁的摩擦阻力，拐弯处对水也有阻力。这就是说水在出喷口前压力已经损失了不少，水的压力已经降低，并且喷出后在空气阻力和重力的共同作用下进一步降低了喷柱高度。水在流动过程中的压力损失称为流动阻力，简称流阻。

图 1-1 中，可以看到三种现象及它们之间的关系：水位差、单位时间的水流量和流阻；水位差越大，水流量越多，水柱喷得越高，而流阻变化不大。显然，如果在水流管道的任何一处将水阻断（如关死阀门），管道中的水就不再流动。

电学中有三个物理量与之对应：电位差即电压对应水位差，电流对应水流量，电阻对应流阻。电路中的导线对应水流的管道，水流总是由高处流向低处，同样，电流的方向是由高电位流到低电位。电压、电流和电阻是电学中最基本的物理量，三者之间的关系是：

流过电阻的电流值等于加在电阻两端的电压值除以电阻值，电流的方向由高电位(+)流向低电位(-)。用字母  $I$  表示电流值，单位是 A（安培）；字母  $U$  表示电压值，单位是 V（伏特）；字母  $R$  表示电阻值，单位是  $\Omega$ （欧姆）。

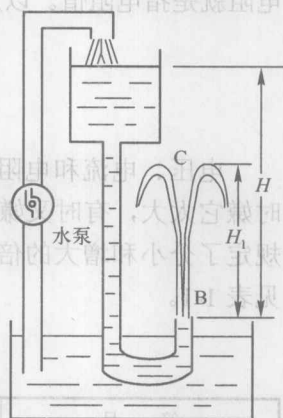


图 1-1 喷泉

## 1.2 无源电路欧姆定律

欧姆定律是电工学最基本的定律，也是应用最广泛的定律，并且是许多电学定律的基

础。这里首先介绍无源电路欧姆定律，在 1.8 节中还要讨论有源电路欧姆定律。

流过电阻的电流方向由高电位流向低电位，大小等于电阻两端的电压值除以电阻值。

用公式表示为

$$I = \frac{U}{R} \tag{1-1}$$

式中， $I$  是流过电阻的电流值，单位为 A； $U$  是电阻两端的电压值，单位为 V； $R$  是电阻值，单位为  $\Omega$ 。

这个关系适用于不含电源的电路，称为无源电路欧姆定律。利用欧姆定律可以衡量物体的电阻。变换一下欧姆定律的形式，可以得到

$$R = \frac{U}{I} \tag{1-2}$$

有时又把这个公式作为电阻的定义。

当电阻两端加上 1V 电压，若流过电阻的电流为 1A，定义该电阻的电阻值为 1 $\Omega$ 。

由式 (1-2) 可见：相同电流下，电阻与电压成正比；相同电压下，电阻与电流成反比。

需要特别强调的是：电压是指两点间的电压，单独一点是无所谓电压的；电流是指流过导线上的电流，脱离电路就无所谓电流，若断开电路，则电路中也不会有电流。

例如，100W（瓦）的白炽灯泡，两端加上 220V 的电压，流过的电流约为 0.45A，则电阻约为 484 $\Omega$ ；600W 的电饭锅接 220V 的电压时，流过加热器的电流约为 2.72A，电阻约为 80.7 $\Omega$ 。由此可见，施加相同的电压，电阻越小，流过的电流越大。

以下为了简化，在不致引起误解的情况下，电流就是指电流值，电压就是指电压值，电阻就是指电阻值。以后各章节中定义的其他物理量也做同样处理。

### 1.3 单位的扩大和缩小

电压、电流和电阻的基本单位是 V（伏特）、A（安培）和  $\Omega$ （欧姆）。实际工作中有时嫌它太大，有时又嫌它太小，因此要将它们分小或增大。国际标准以 V、A、 $\Omega$  为基础，规定了分小和增大的倍数，并规定了表示符号。总的原则是按 1000 的倍数分小或增大，见表 1-1。

表 1-1 国际单位表示符号

符 号	中文名称	倍 数	备 注
n	纳（毫微）	$10^{-9}$	十亿分之一
$\mu$	微	$10^{-6}$	百万分之一
m	毫	$10^{-3}$	千分之一
k	千	$10^3$	1000 倍
M	兆	$10^6$	一百万倍
G	吉	$10^9$	十亿倍

例如，千分之三安培就写成 3mA，读作“三毫安”；百万分之五安培就写成 5 $\mu$ A，读作



“五微安”。 $2\text{k}\Omega$ 表示两千欧姆，读作“两千欧”或“两开”； $3\text{m}\Omega$ 表示三毫欧姆，读作“三毫欧”； $10\text{kV}$ 为 $10000\text{V}$ ，读作“十千伏”或“一万伏”。

这些分数和倍数关系对其他国际单位也适用。例如， $1\text{mm}$ 是 $1\text{m}$ 的千分之一，读作“一毫米”； $1\mu\text{m}$ 是 $1\text{m}$ 的百万分之一，读作“一微米”； $1\text{nm}$ 是 $1\text{m}$ 的十亿分之一，读作“一纳米”。 $1\text{mg}$ 为 $1\text{g}$ 的千分之一，读作“一毫克”； $1\text{kg}$ 为 $1\text{g}$ 的1000倍，读作“一千克”。

## 1.4 材料的电阻率和温度系数

任何物体都有电阻，不同材料的电阻值不同。我们用电阻率来衡量不同材料的电阻。

### 1.4.1 电阻率

定义截面积为 $1\text{m}^2$ ，长度为 $1\text{m}$ 的某种材料的电阻为该材料的电阻率，用希腊字母 $\rho$ （读作rou）来表示。用公式表示为

$$\rho = \frac{RS}{L}$$

某种材料的电阻与材料的长度成正比，与材料的截面积成反比，比例系数就是电阻率 $\rho$ ，由此可知

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-3)$$

式中， $R$ 是材料的电阻值，单位为 $\Omega$ ； $S$ 是材料的截面积，单位为 $\text{m}^2$ ； $L$ 是材料的长度，单位为 $\text{m}$ ； $\rho$ 是材料的电阻率，单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

实际应用中，半导体掺杂电阻率的常用单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$ ，导线则常用 $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ 作为电阻率的单位。它们与 $\Omega \cdot \text{m}$ 的关系如下：

$$1\Omega \cdot \text{cm} = 0.01\Omega \cdot \text{m} \quad 1 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} = 10^{-6}\Omega \cdot \text{m}$$

表 1-2 中列出了几种常用金属材料的电阻率。

表 1-2 常用金属材料的电阻率和温度系数

材 料	$\rho(\Omega \cdot \text{m})$	$\alpha(1/^\circ\text{C})$	材 料	$\rho(\Omega \cdot \text{m})$	$\alpha(1/^\circ\text{C})$
银	$1.59 \times 10^{-8}$	0.0038	汞	$95.8 \times 10^{-8}$	0.00089
铜	$1.69 \times 10^{-8}$	0.00426	康铜	$(40 \sim 51) \times 10^{-8}$	0.000045
铝	$2.65 \times 10^{-8}$	0.00439	镍铬合金	$110 \times 10^{-8}$	0.0004
钨	$5.48 \times 10^{-8}$	0.00551	铁铬铝合金	$140 \times 10^{-8}$	0.00012
铁	$8.7 \times 10^{-8}$	0.005	锰铜合金	$48 \times 10^{-8}$	0.00002
铂	$10.5 \times 10^{-8}$	0.0039			

例如，用 $16\text{mm}^2$ 的铜线，由 $220\text{V}$ 电源取得电压，输送到 $500\text{m}$ 外，供给 $40\text{A}$ 的用电设备。该用电设备规定的电压范围是 $(220 \pm 10\%) \text{V}$ （即 $198 \sim 242\text{V}$ ）。