

工厂电气技术丛书

电气工程和 电力电子技术

严克宽 张仲超 主编



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

工厂电气技术丛书

电气工程和电力电子技术

严克宽 张仲超 主编

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

电气工程和电力电子技术/严克宽, 张仲超主编.
北京: 化学工业出版社, 2002.3
(工厂电气技术丛书)
ISBN 7-5025-3679-5

I. 电… II. ①严…②张… III. ①电气工程②电力电子学 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 004838 号

工厂电气技术丛书
电气工程和电力电子技术

严克宽 张仲超 主编

责任编辑: 刘 哲

责任校对: 陈 静

封面设计: 蒋艳君

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

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

*

新华书店北京发行所经销

北京市管庄永胜印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 17 字数 414 千字

2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3679-5/TM·19

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

当前电气技术和电力电子技术发展迅速，在非电专业中的应用也与日俱增，本书编写的目的是为工程技术人员在从事科研、规划和设计时提供参考借鉴。本书内容分为电工与电子技术基础、电气装备和现代电力电子技术三部分。

第一篇为电工与电子技术提供常用的基础理论知识，这部分内容工程技术人员比较熟悉，因此本书仅扼要介绍电气方面的基础理论及其要点。

第二篇为电气装备，包括电机、电器和输配电等，这些内容涉及的面极为广泛，所以，本部分取材力求做到“基本、常用、发展”。在归纳这部分内容共性的基础理论上，侧重讲述设备的选择方法，例如在变电和配电一章的最后，以实例来说明变电所设计的思路、方法和所选用的电气设备。

第三篇为现代电力电子技术。本部分介绍了现代电力电子技术常用的器件、电路的工作原理以及电力电子技术的典型应用，最后还综述了电力电子技术中的若干专题。

本书由浙江大学电气工程学院严克宽、张仲超任主编。参加编写的有贾爱民（第一篇第一、二、三章）、潘丽萍（第二篇第一、二、三章，其中特种电器由严炜执笔）、严克宽（第一篇第四章、第二篇第四章）、林平（第三篇第二章）、胡长生（第三篇第三章 1、2 两节）、张仲超（第三篇第一、四、五章和第三章 3、4 两节）。

本书在编写过程中得到同济大学冯志彪教授的关心与热情指导，冯教授亲自审阅了编写大纲并提出了许多宝贵的修改意见。魏之馨、周遥生、徐向群老师认真负责地审阅了书稿，对存在问题提出了修改建议。史惠羔高级工程师为本书设计了封面。在此，一并向他们表示诚挚的感谢。

由于编者的水平所限，书中可能还存在不少缺点和问题，恳请批评指正。

编 者

2001 年 6 月于杭州老和山下

内 容 提 要

本书将电气工程和现代电力电子技术的内容经过精选后,分为三篇。第一篇为电工与电子技术基础,主要内容包括电磁学的基本量和基本定律、电路和电子电路基础、交流电路的稳态分析、电路的瞬态分析。第二篇为电气装备,主要内容包括旋转电机和磁路的理论基础,电机,电器,变电和配电装备。第三篇为现代电力电子技术,主要内容包括电力电子技术基本问题及其发展概况,电力电子器件及驱动电路,基本电力电子电路,电力电子技术应用,电力电子技术领域中的若干技术专题。

本书可供工程技术人员进行规划、设计等实际工作中遇到电气方面的问题时参考借鉴,也可供大中专院校非电专业学生阅读。

目 录

第一篇 电工与电子技术基础

第一章 电磁学的基本量和基本定律	1	2.3 特勒根定理	14
1 常用电学和磁学的量及单位	1	2.3.1 特勒根定理一	14
1.1 电学的量和单位	1	2.3.2 特勒根定理二	15
1.2 磁学的量和单位	2	2.4 电路等效变换	15
2 常用电学和磁学的基本定律	2	2.4.1 星形网络和三角形网络的等 效变换	15
2.1 高斯定理	2	2.4.2 对称网络的等效变换	16
2.2 安培环路定律	3	2.4.3 两种电源模型的等效变换	16
2.3 电磁感应定律	3	3 集成电路	17
2.3.1 电磁感应定律	3	3.1 概述	17
2.3.2 自感电动势	3	3.2 模拟集成电路	18
2.3.3 直导线中的感应电动势	3	3.3 数字集成电路	19
2.4 麦克斯韦方程组	3	第三章 交流电路的稳态分析	22
第二章 电路与电子电路基础	5	1 正弦电路	22
1 电路的基本概念和基本定律	5	1.1 正弦稳态电路的相量法	22
1.1 电路与建模	5	1.1.1 正弦量的相量形式	22
1.1.1 电路	5	1.1.2 相量图	22
1.1.2 建模	5	1.1.3 相量分析法	22
1.1.3 电路的类型	5	1.2 正弦电路的功率	23
1.2 激励与响应	6	1.2.1 正弦电路的功率	23
1.2.1 激励	6	1.2.2 功率因数的提高	24
1.2.2 响应	7	1.2.3 最大功率传输定理	24
1.3 电路元件	7	1.3 三相电路	24
1.3.1 无源元件	7	1.3.1 三相电路的基本关系式	24
1.3.2 有源元件	7	1.3.2 对称分量法	26
1.4 电子元器件	7	2 正弦电路的谐振	26
1.4.1 二极管	7	2.1 串联谐振	26
1.4.2 晶体管	9	2.2 并联谐振	26
1.4.3 场效应管	9	3 非正弦电路	28
1.5 基尔霍夫定律	11	3.1 非正弦周期量的函数表达式	28
1.5.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	11	3.2 非正弦量的有效值和功率	28
1.5.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	11	3.3 非正弦电路的稳态分析	29
2 电路定理和等效变换	12	第四章 电路的瞬态分析	31
2.1 叠加定理	12	1 概述	31
2.2 戴维南定理和诺顿定理	13	1.1 动态电路的类型	31
2.2.1 戴维南定理	13	1.2 动态电路分析	31
2.2.2 诺顿定理	13		

2 动态电路的时域分析	32	3.3 卷积	37
2.1 一阶电路的三要素法	32	4 动态电路的变换域分析	38
2.1.1 换路定律	32	4.1 频域分析	38
2.1.2 时间常数	32	4.1.1 傅立叶变换	38
2.1.3 三要素法	32	4.1.2 傅立叶变换的基本性质	39
2.1.4 一阶电路的响应	32	4.1.3 动态电路的傅立叶变换分析法	39
2.2 RC 电路的响应	33	4.2 复频域分析	40
2.3 RL 电路的响应	33	4.2.1 拉普拉斯变换	40
2.4 二阶 RLC 电路的零输入响应	34	4.2.2 拉普拉斯反变换	40
3 一阶电路的阶跃响应和冲激响应	35	4.2.3 拉普拉斯变换的基本性质	41
3.1 阶跃响应	35	4.2.4 动态电路的拉普拉斯变换分析法	41
3.2 冲激响应	37		

第二篇 电 气 装 备

第一章 概论	44	1.2.2 起动	59
1 旋转电机基础	44	2 异步电机	59
1.1 基本工作原理和结构	44	2.1 概述	59
1.2 类型和用途	44	2.2 三相异步电动机	60
1.3 电机的定额和工作条件	44	2.2.1 工作原理	60
2 电器基础	46	2.2.2 工作特性	60
2.1 类型和用途	46	2.2.3 起动	61
2.2 电器的基本特点和定额	46	2.2.4 调速	62
2.2.1 电器的基本特点	46	2.2.5 制动	62
2.2.2 电器的定额	46	2.3 派生系列异步电动机	62
2.3 电器的磁路计算基础	47	2.3.1 防爆异步电动机	62
2.3.1 直流磁路的计算	47	2.3.2 电磁调速异步电动机	63
2.3.2 交流磁路的计算	47	2.4 异步电动机的选择要点	63
2.4 电磁铁的吸力估算	49	3 小功率电动机	64
3 电气设备材料	51	3.1 小功率同步电动机	64
3.1 导电材料	51	3.2 小功率异步电动机	64
3.2 磁性材料	52	3.3 小功率直流电动机	64
3.3 绝缘材料	52	4 微特电机	66
3.3.1 概述	52	4.1 概述	66
3.3.2 类型和用途	54	4.2 步进电动机	67
3.4 半导体材料	54	4.2.1 概述	67
第二章 电机	56	4.2.2 类型和用途	67
1 同步电机	56	4.3 伺服电动机	67
1.1 同步发电机	56	4.3.1 直流伺服电动机	68
1.1.1 结构和分类	56	4.3.2 交流伺服电动机	69
1.1.2 工作原理	56	4.4 测速发电机	69
1.1.3 运行特性	57	第三章 电器	71
1.2 同步电动机	58	1 低压电器	71
1.2.1 工作原理	58	1.1 配电电器	71
		1.1.1 断路器	71

1.1.2 熔断器	73	4.3 控制系统的设计基础	95
1.1.3 配电电器之间的选择性保护	76	4.3.1 PLC控制系统的类型	95
1.2 控制电器	76	4.3.2 PLC控制系统的设计基础	96
1.2.1 接触器	76	4.3.3 PLC基本应用举例	96
1.2.2 起动器	78	第四章 变电和配电装备	99
2 电子电器	81	1 变电所	99
2.1 概述	81	1.1 变电所的类型和组成	99
2.1.1 用途与分类	81	1.1.1 类型	99
2.1.2 组成电子电器的主要环节	82	1.1.2 组成	99
2.1.3 电子电器的干扰与抗干扰	82	1.2 变电所的主接线	100
2.2 漏电保护器	82	2 变压器	101
2.2.1 分类	83	2.1 概述	101
2.2.2 结构及工作原理	84	2.2 主变压器的选择原则	102
2.2.3 选用要点	84	3 高压开关	103
2.3 电子式时间继电器	86	3.1 概述	103
2.3.1 分类	86	3.2 断路器	104
2.3.2 工作原理	86	3.2.1 类型与用途	104
2.3.3 选择要点	86	3.2.2 选择和校验要点	104
2.4 电子式电动机综合保护器	87	3.3 隔离开关	105
3 特种电器	88	3.3.1 类型与用途	105
3.1 防爆电器	88	3.3.2 选择和校验要点	105
3.1.1 爆炸和火灾危险环境条件	88	3.4 熔断器	106
3.1.2 防爆电器的分类与标志	88	3.4.1 类型与用途	106
3.1.3 防爆电器结构特点	89	3.4.2 选择和校验要点	106
3.1.4 选用	89	3.5 负荷开关	106
3.2 化工防尘、防腐电器	89	3.5.1 类型与用途	106
3.2.1 化工低压电器使用环境条件	90	3.5.2 选择和校验要点	107
3.2.2 结构特点	90	4 变电所的保护及装置	107
3.3 消防电器	90	4.1 主要设备的断电保护及装置	107
3.3.1 系统保护对象分级	90	4.1.1 主变压器的保护	107
3.3.2 火灾自动报警系统	91	4.1.2 自动重合闸	108
4 可编程控制器	92	4.2 防雷保护及装置	108
4.1 概述	92	4.2.1 直击雷过电压及其保护装置	108
4.1.1 定义	92	4.2.2 感应雷过电压保护及其装置	109
4.1.2 特点	92	5 配电网络	109
4.1.3 分类	93	5.1 概述	109
4.1.4 主要应用类型	93	5.2 配电所	110
4.2 结构和工作原理	94	5.3 低压配电网络	111
4.2.1 基本结构	94	5.4 常用设备选择和校验要点	112
4.2.2 工作原理	95	6 实例	112

第三篇 现代电力电子技术

第一章 概述	123	1 电力电子技术简介	123
---------------------	-----	------------------	-----

2 电力电子技术的基本内容	124	8.1 功率集成电路简介	148
2.1 电力电子器件	124	8.2 功率集成电路举例	149
2.2 电力电子电路	124	9 控制集成电路	151
2.3 电力电子装置和系统	125	9.1 控制集成电路简介	151
3 现代电力电子技术发展概况	125	9.2 控制集成电路举例	152
第二章 电力电子器件及其驱动电路	127	9.2.1 1524/2524/3524 简介	152
1 电力电子器件简介	127	9.2.2 外形和内部结构	153
1.1 电力电子器件的分类	127	9.2.3 芯片工作机理	155
1.2 电力电子器件的应用	128	第三章 基本电力电子电路	156
2 整流二极管	128	1 整流电路(AC-DC)	156
2.1 工作原理和伏安特性	128	1.1 单相晶闸管可控整流电路	156
2.2 主要技术参数	129	1.1.1 电阻性负载	156
3 晶闸管及其派生器件	130	1.1.2 电感性负载与续流二极管	157
3.1 晶闸管的工作原理和伏安特性	130	1.2 单相桥式可控整流电路	159
3.1.1 工作原理	130	1.2.1 电阻性负载	159
3.1.2 伏安特性	131	1.2.2 电感性负载	161
3.2 晶闸管的主要技术参数	131	1.3 三相晶闸管可控整流电路	162
3.3 晶闸管的驱动电路	132	1.3.1 理想条件下三相桥式整流电路的 工作情况	162
3.4 晶闸管的派生器件	133	1.3.2 换流过程	164
3.4.1 门极可关断晶闸管(GTO)	134	1.4 有源逆变的概念	169
3.4.2 逆导晶闸管	135	2 逆变电路	172
3.4.3 双向晶闸管	136	2.1 概述	172
4 功率晶体管	137	2.1.1 工作原理	172
4.1 工作原理和伏安特性	137	2.1.2 结构和分类	173
4.1.1 工作原理	137	2.2 单相逆变电路	174
4.1.2 伏安特性	137	2.2.1 方波半桥逆变电路	174
4.1.3 开关特性	138	2.2.2 方波全桥逆变电路	175
4.2 主要技术参数	138	2.2.3 正弦波脉宽调制(SPWM)全桥 逆变电路	175
4.3 功率晶体管的驱动电路	139	2.2.4 推挽式逆变电路	177
5 功率场效应管	141	2.2.5 各种单相逆变电路的比较	177
5.1 工作原理和伏安特性	142	2.3 三相逆变电路	178
5.1.1 工作原理	142	2.3.1 电压型三相半桥逆变电路	178
5.1.2 伏安特性	142	2.3.2 电压型三相 SPWM 逆变电路	179
5.1.3 开关特性	143	2.3.3 电流型三相桥式逆变电路	181
5.2 主要技术参数	143	2.3.4 三相全桥逆变电路	182
5.3 功率场效应管的驱动电路	143	3 直流-直流变换电路(DC-DC)	182
6 绝缘栅双极晶体管	145	3.1 直流斩波电路	183
6.1 工作原理和伏安特性	145	3.2 降压(Buck)变换电路	183
6.1.1 工作原理	145	3.2.1 工作原理	184
6.1.2 伏安特性	145	3.2.2 电流连续工作模式分析	184
6.2 主要技术参数	146	3.2.3 输出电压的纹波	187
6.3 绝缘栅双极晶体管的驱动电路	146	3.3 升压(Boost)变换电路	187
7 几种全控型电力电子器件性能的比较	148		
8 功率集成电路	148		

3.3.1 工作原理	188	4.1 工作原理	223
3.3.2 电感电流连续模式的分析	188	4.2 电路结构	224
3.3.3 输出电压纹波	189	4.2.1 具有功率因数校正的整 流电路	224
3.4 降压-升压(Buck-Boost)变换电路	189	4.2.2 直流辅助电源及充电电路	225
3.4.1 Buck-Boost 电路	190	4.2.3 逆变桥式功放电路	227
3.4.2 Cuk 电路	191	4.3 应用举例	227
3.5 桥式变换电路	193	5 感应加热电源	228
4 交流-交流变换电路(AC-AC)	197	5.1 工作原理	228
4.1 交流调压电路	197	5.2 电路结构	229
4.1.1 单相交流调压电路	197	5.2.1 并联式	229
4.1.2 三相交流调压电路	199	5.2.2 串联式	231
4.2 交流-交流变频电路	200	5.2.3 串并联式	231
4.2.1 工作原理	200	5.2.4 逆变器电路类型的比较	231
4.2.2 正弦波交流-交流变频电路	201	5.3 应用举例	232
第四章 电力电子技术应用	203	6 其他	233
1 直流电动机调速	203	6.1 逆变电焊机	233
1.1 工作原理	203	6.1.1 工作原理和逆变方式	233
1.2 电路结构	203	6.1.2 外特性和调节方法	233
1.2.1 V-M 系统	203	6.1.3 控制电路	233
1.2.2 直流斩波器或脉宽调制 变换器	204	6.1.4 逆变电路	234
1.2.3 直流电机调速系统结构	206	6.2 充电电源	234
1.3 应用举例	209	6.2.1 概述	234
1.3.1 单片机控制的无环流可逆直流 调速系统	209	6.2.2 电路结构	235
1.3.2 微机控制的 GTR 斩波直流调 速系统	210	6.3 无触点开关	236
2 交流电动机变频调速	213	6.3.1 概述	236
2.1 工作原理	213	6.3.2 电路结构	237
2.2 电路结构	214	6.3.3 应用举例	238
2.2.1 概述	214	第五章 专题	239
2.2.2 间接变压变频器的主电路	215	1 电力电子器件应用技术	239
2.2.3 变压变频的实现	216	1.1 器件的串联和并联	239
2.3 应用举例	217	1.1.1 器件的串联运行	239
3 开关稳压电源	218	1.1.2 器件的并联运行	241
3.1 工作原理	218	1.2 器件的吸收电路和保护电路	242
3.2 电路结构	218	1.2.1 器件的吸收电路	242
3.2.1 单端反励式变换器电路	218	1.2.2 器件的保护电路	243
3.2.2 隔离单端正激式变换器电路	219	2 软开关技术	246
3.2.3 推挽式变换器电路	220	2.1 开关损耗和软开关技术	246
3.2.4 半桥式变换器电路	220	2.1.1 开关损耗	246
3.2.5 全桥式变换器电路	221	2.1.2 软开关技术	246
3.3 应用举例	222	2.2 零电压开关谐振变换电路	247
4 不停电电源(UPS)	223	2.3 零电流开关谐振变换电路	249
		3 电力电子装置的无功补偿和谐波抑制	250
		3.1 无功补偿	250

3.2 谐波抑制	254	3.3.1 概述	256
3.2.1 LC 调谐滤波器	254	3.3.2 功率因数校正的基本原理	257
3.2.2 有源电力滤波器(APF)	255	3.3.3 PFC 的控制方法	258
3.3 功率因数校正	256		

第一篇 电工与电子技术基础

第一章 电磁学的基本量和基本定律

1 常用电学和磁学的量及单位

1.1 电学的量和单位

电荷是实物的一种属性,是最基本的物理量,又称电荷量,电荷的单位是库仑(C),符号为 Q 或 q 。常用电学量和单位见表1.1-1。

表 1.1-1 常用电学的量和单位

名 称	符 号	定 义 内 容	计算公式	单 位	说 明
电场强度	E	在电场中某观察点的电场强度 E 等于置于该点的试验电荷 q_0 所受的力 F 与试验电荷的电量 q_0 之比	$E = \frac{F}{q_0}$	V/m	电场强度是矢量,其方向是正试验电荷在该点受力的方向
电位	V, φ	在电场中指定某点 Q 为零电位参考点,某点 P 的电位 V_P ,数值上等于单位正电荷处于该点的位能,即把单位正电荷从 P 点移至 Q 点的过程中电场力对它做的功	$V_P = \int_P^Q E \cdot dl$	V	电位是标量,其数值与所选的参考点有关,但与电荷移动的路径无关 电位又称为电势
电压	U	电场力对单位正电荷由场中的一点 a 移到另一点 b 所做的功	$U_{ab} = \int_a^b E \cdot dl$ $= V_a - V_b$	V	两点间的电压与参考点的选择无关,只与两点距离有关 V_a —— a 点电位 V_b —— b 点电位 电压又称电位差
电流	I 或 i	电荷的定向运行。在单位时间内通过截面的电荷量	$I = \frac{Q}{t}$ 或 $i = \frac{dq}{dt}$	A	在交流电技术中,用 i 表示电流的瞬时值 t ——时间
电功	W	电量为 Q 的电荷在电场力作用下从 a 点移动到 b 点电场力所作的功,称为电功	$W = uQ$ $= \int_a^b u i dt$ 在电压和电流均为恒定时 $W = UQ$ $= UIt$	J	U —— a 点与 b 点间的电压
电功率	P	单位时间内电场力所作的电功,称为电功率	$p = \frac{dW}{dt}$ $= ui$ 在直流电路中 $P = UI$	W	U ——交变电压瞬时值 i ——交变电流瞬时值

1.2 磁学的量和单位

常用磁学的量和单位见表 1.1-2。

表 1.1-2 常用磁学的量和单位

名 称	符 号	定 义 内 容	计 算 公 式	单 位	说 明
磁 感 应 强 度	B	以速度 v 运动的电荷 q 在磁场中受的最大磁力 F_m (通常称为洛伦兹力), 其比值 F_m/qv 定义为磁感应强度 也可以这样定义, 若磁场的磁通密度为 B , 则作用于电流元 Idl 的力为 $dF = IdlB$	$B = \frac{F_m}{qv}$ 或 $dF = IdlB$	T	磁感应强度又称磁通密度 $1 T = 1 \text{ Wb/m}^2$ $= 1 \text{ N/(A} \cdot \text{m)}$ $= 1 \text{ V} \cdot \text{s/m}^2$
磁通量	Φ	磁感应强度与垂直于磁场方向面积元的乘积的总和	在均匀磁场中, 当 A 与 B 垂直时 $\Phi = B \cdot A$	Wb	B ——磁感应强度 A ——垂直于磁场方向的面积 $1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot \text{s}$
磁链	Ψ	导线线圈或电流回路所链环的磁通量	$\Psi = N \cdot \Phi$		N ——导线线圈匝数 Φ ——穿过 N 匝线圈的平均磁通
磁导率	μ	磁导率 μ 是表征物质的导磁性能的一个物理量, 某一物质的磁导率 μ 与真空的磁导率 μ_0 之比, 称为该物质的相对磁导率 μ_r	$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$	H/m	真空磁导率 $\mu_0 = 4 \times 10^{-7} (\text{H/m})$ 。 μ_r 是没有量纲的纯数 非磁性材料 (如空气、木材、玻璃、铜、铝等) 的磁导率与真空磁导率近似, 其 $\mu_r \approx 1$ 铁磁性磁介质 $\mu_r \gg 1$, 顺磁性 μ_r 略大于 1, 抗磁性 μ_r 略小于 1
磁场强度	H	在磁介质中, 磁场强度 H 等于磁通密度 B 除以磁导率 μ	在磁介质中 $H = \frac{B}{\mu}$ 在真空中 $H = \frac{B}{\mu_0}$	A/m	描述磁场的一个物理量
磁通势	F_m	环绕一闭合回路 l 的磁通势为该回路磁场强度 H 与此回路长度元 dl 向量点积沿 l 的积分	$F_m = \oint_l H \cdot dl$ $= \oint_l H \cdot \cos\beta \cdot dl$	A	若 N 匝的励磁线圈载有电流 I , 则穿过线圈回路的磁通势为 $F_m = NI$
磁阻	R_m	表征物质对磁通具有阻碍作用的物理量	$R_m = \frac{l}{\mu A}$	H^{-1}	μ ——物质的磁导率 A ——磁路的截面积 l ——磁路的长度 磁阻的倒数称为磁导 磁阻通常是非线性参数

2 常用电学和磁学的基本定律

2.1 高斯定理

高斯定理是电场中电通量与电荷量的基本关系之一, 它表述为电场中任意闭合面 A 穿出的电场强度 E 的电通量 Ψ_E , 等于该面内所有电荷的代数和 (与该面外的电荷无关) $\sum q$ 除以真空介电常数 ϵ_0 , 即

$$\Psi_E = \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{\sum q}{\epsilon_0} \quad (1.1-1)$$

定理的另一种形式为任意闭合面 A 穿出的电位移 $\mathbf{D}$ 的电通量 Ψ_D 等于该面所有自由电荷代数和 $\sum q_t$, 即

$$\Psi_D = \oint_A \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = \sum q_t \quad (1.1-2)$$

式中 $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, 单位为 C/m^2 。

2.2 安培环路定律

安培环路定律揭示了磁场的基本特征。其定义内容是, 在磁场中沿任何闭合曲线的 $\mathbf{B}$ 线积分, 等于真空磁导率 μ_0 乘以穿过此封闭曲线的电流 I 的代数和, 即

$$\oint_l \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \sum I \quad (1.1-3)$$

当穿过曲面 A 的电流 I 的方向与线积分所循环的方向成右手螺旋关系时, 取 I 为正; 反之 I 取负值。

在磁介质中, 环路定律为

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I \quad (1.1-4)$$

式中 H 为磁场强度。

2.3 电磁感应定律

2.3.1 电磁感应定律

当与回路环链的磁通发生变化时, 回路内产生感应电动势, 其大小正比于环链磁通对时间的变化率, 数学表达式为

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1-5)$$

式中 e 为感应电动势, $d\Phi/dt$ 为环链磁通对时间的变化率, 等式中负号是楞次定律的数学形式, 即说明感应电动势的电流产生的磁通总是阻止原有磁通变化的。

2.3.2 自感电动势

当线圈内的电流变化时, 则由此电流所产生的磁通也将发生变化, 而使线圈中产生感应电动势, 这种感应电动势称为自感电动势。自感电动势 e_L 数学表达式为

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (1.1-6)$$

若取电流 i 的方向与端电压 U_L 方向相关联, 则

$$U_L = -e_L = L \frac{di}{dt} \quad (1.1-7)$$

式中 L 为线圈的自感系数。

2.3.3 直导线中的感应电动势

一段长度为 l 的直导线, 以速度 v 在磁通密度为 B 的均匀磁场中运动, 若导线、磁场和导线运动方向三者互相垂直, 其感应电动势为

$$e = Blv$$

2.4 麦克斯韦方程组

麦克斯韦方程组是电磁场运动规律的基本方程, 其积分形式

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_A \mathbf{J}_c \cdot d\mathbf{A} + \int_A \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A} + \int_A \rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A} \quad (1.1-8)$$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A} \quad (1.1-9)$$

$$\oint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (1.1-10)$$

$$\oint_A \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = q \quad (1.1-11)$$

式中 $\mathbf{H}$ 为磁场强度, $\mathbf{E}$ 为电场强度, $\mathbf{B}$ 为磁感应强度, $\mathbf{D}$ 为电通量密度或电位移, $\mathbf{J}_c$ 为传导电流密度, ρ 为电荷体密度, $\mathbf{v}$ 为电荷运动速度, q 为自由电荷。

式 (1.1-8) 中 $\partial \mathbf{D} / \partial t$ 为位移电流密度, 它与自由电流和传导电流之和称为全电流, 所以式 (1.1-8) 称为全电流定理。式 (1.1-9) 表明磁场随时间变化有电场, 故它实质为电磁感应定律。式 (1.1-10) 表示磁通连续性原理。式 (1.1-11) 表示高斯定理。

在有电磁介质时, 由介质性质所决定, 则又有如下关系式

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (1.1-12)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.1-13)$$

$$\mathbf{J}_B = \gamma \mathbf{E} \quad (1.1-14)$$

式中 ϵ 为电容率 (介电常数), μ 为磁导率, γ 为电导率。对于真空, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, 且有 $\epsilon_0 \cdot \mu_0 = 1/c^2$, c 为真空中光速。式 (1.1-14) 又称为欧姆定律的微分形式。在简单情况下, 当介质为均匀、线性, 且各向同性时, 参数 ϵ 、 μ 和 γ 均为常数。

麦克斯韦方程组联系了电荷、电流和电场及磁场, 是电工技术的理论基础。

第二章 电路与电子电路基础

1 电路的基本概念和基本定律

1.1 电路与建模

1.1.1 电路

按一定方式连接起来的若干个有源元件和无源元件的集合，称为电路，又称为网络。在研究一般性规律时，常使用“网络”一词，而在讨论有关具体问题时，则又多用“电路”一词，这两个术语相似，在现代工程科学中常是互相通用的。

电路的主要作用在于：用以传输、分配电能和传递、处理、存储或变换电信号。

1.1.2 建模

用理想电路元件或电子元器件及其相互连接建成的电路模型去模拟一个实际电路，称为建模。凡是用模型描述电路的因果关系或相互关系的过程都属于建模。在激励作用下，建成的电路模型与实际电路反映出来现象十分相近，因此电路模型实质上是实际电路的抽象和近似。理想元件都有精确的数学表达式，所以电路模型又称为数学模型。

一旦解决了建模，也可用 CAA（计算机辅助分析），常用的通用程序之一为 SPICE（Simulation Program With Integrated Circuit Emphasis）。SPICE 是一个可用于线性、非线性电路直流分析、时域分析以及线性电路正弦分析等电路分析计算的软件包。

1.1.3 电路的类型

实际电路形式繁多，功能各异，常见电路的类型如下。

（1）线性和非线性电路 凡由线性元件和电源组成的电路，称为线性电路。凡由非线性元件（至少含有一个非线性元件）组成的电路，称为非线性电路。线性电路的激励和响应满足齐次性和可加性，非线性电路则没有这种性质。

（2）电阻电路和动态电路 仅由电阻元件构成的电路称为电阻电路。含有电感或电容的电路称为动态电路。电阻电路的特点是激励和响应同时出现，同时消失，它是无记忆能力的，电路的数学模型是代数方程。动态电路是有记忆能力的，即任一时刻的响应不仅与同一时刻的激励有关，还与此时刻之前电路储能情况有关，电路的数学模型是微分方程。

（3）时变电路和非时变（定常）电路 若元件的参数是时间函数，这类元件称为时变元件。至少含有一个时变元件或电路参数随时间而变化的电路称为时变电路（例如电力电子电路），否则称为时不变（或定常）电路。对于时不变元件，若 $i(t) \rightarrow u(t)$ ，则 $i(t+t_0) \rightarrow u(t+t_0)$ 。对于时变电路，数学模型为变系数微分方程，定常电路则是常系数微分方程。

（4）集总参数电路和分布参数电路 由集总参数元件（元部件的几何尺寸 l 远比电路中电流波长 λ 为小，即 $l \ll \lambda$ ）构成的电路称为集总参数电路，否则称为分布参数电路（例如高频通信电路）。集总参数电路的数学模型为常微分方程，分布参数电路则是偏微分方程。

（5）模拟电路和数字电路 在电子电路中，作用于电路的信号在时间变量上是连续的，称为模拟电路。例如由集成运算放大器组成的模拟信号运算与处理电路便是模拟电路，其数学模型是代数方程或是微分方程。若作用于电路的信号在时间变量上是离散的，称为数字电

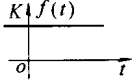
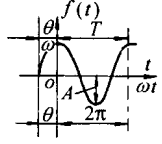
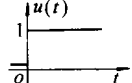
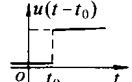
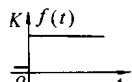
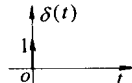
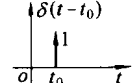
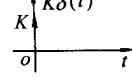
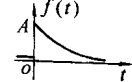
路。由集成触发器组成的计数电路就属于数字电路，这类电路的数学模型是差分方程。

1.2 激励与响应

1.2.1 激励

能独立地作用于电路的物理量称为激励。所谓独立是指它与电路结构、元件参数或电路中某支路电流电压无关。在电路中称为激励的物理量通常是独立电源。激励源几个典型函数、波形及其性质见表 1.2-1。

表 1.2-1 激励源几个典型函数、波形及其性质

函数名称	数学表达式	波形图	性 质
常 数	$f(t) = K$ K 为常数		1. 直流电源就是这种波形 2. 电源的电流方向和电压极性是恒定的
正弦函数	$f(t) = A \cdot \sin(\omega t + \theta)$		1. 交流电源常用这种波形 2. 图中 A ——最大值 θ ——初相角 ω ——角频率
阶跃函数	1. 单位阶跃函数 $u(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}$		阶跃函数又称开关函数
	2. 延迟单位阶跃函数 $u(t - t_0) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ 1 & t > t_0 \end{cases}$		
	3. 阶跃函数 $f(t) = Ku(t)$ K 为不等于 1 的常数		
冲激函数	1. 单位冲激函数 $\delta(t) = \begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ \text{奇异} & t = 0 \end{cases}$ 在 $t = 0$ 处的奇异性有 $\int_{0-}^{0+} \delta(t) dt = 1$		1. 在极短的时间内, 一个极大的电流对理想零态电容充电, 使电容两极板的电荷发生跳变, 这个电流称为冲激电流 2. 冲激函数性质有: (1) $\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t) dt = f(0)$ (2) $f(t) \delta(t) = f(0) \delta(t)$ (3) $\delta(t) = \delta(-t)$ (4) $t \delta(t) = 0 \delta(t) = 0$ (5) $\delta(t) = \frac{du(t)}{dt}$ (6) $\int_{-\infty}^t \delta(\xi) d\xi = u(t)$
	2. 延迟单位冲激函数 $\delta(t - t_0) = \begin{cases} 0 & t \neq t_0 \\ 1 & t = t_0 \end{cases}$ 在 $t = t_0$ 处奇异性有 $\int_{t_0-}^{t_0+} \delta(t - t_0) dt = 1$		
	3. 冲激函数 $f(t) = K\delta(t)$ K 为不等于 1 的常数		
负指数函数	1. 单边负指数函数 $f(t) = Au(t)e^{-\alpha t}$ ($\alpha > 0$)		$t \rightarrow \infty$ 时, $f(t) \rightarrow 0$
	2. 延迟单边指数函数 $f(t) = Au(t - t_0)e^{-\alpha(t - t_0)}$ ($\alpha > 0$)	