

电工电子技术 应用与实践

- ◎ 丛书策划 郭连考
- ◎ 主 编 寇志伟
- ◎ 副 主 编 徐明娜 马德智
- ◎ 主 审 李巴津

普通高等教育“十三五”规划教材
普通高等学校工程教育实践与创新系列教材

电工电子技术应用与实践

丛书策划 郭连考
主 编 寇志伟
副 主 编 徐明娜 马德智
主 审 李巴津
参 编 春 兰 巴特尔 赵卫国 李文军

 **北京理工大学出版社**

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是针对当前工程教育的发展趋势与高等学校学分制改革的需要,并根据教育部高教司组织编制的高等学校理工科本科指导性专业规范中的专业教学实践体系、大学生创新训练的相关要求及多所工科院校的电工技术、电子工艺、测控技术与电气控制技术实践课程的教学要求编写的。本书旨在适应科学技术的发展及创新型人才培养的要求,并为了增强当代工科大学生的工程素养、实践能力及创新精神而编写的。

本书以电工、电子与测控技术等学科的理论为基础,以工程应用为导向,编写了集基础技能训练、工程应用训练、综合设计与创新研究于一体的理论与实践项目,其主要包含电工基础、室内供配电与照明、电子基本技能、电子元器件、常用模拟电路、印制电路技术、电子产品的组装与调试工艺、传感器、电动机控制基础、PLC 应用基础、变频器及其应用等内容。

本书可以作为高等学校的电气类、机电类与测控类专业学生的电工电子、工业过程测量与控制、电气控制设计与实训等课程的教材,也可以作为电类科技创新实践、课程设计、毕业实践等环节的指导用书,或供相关行业的工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术应用与实践 / 寇志伟主编. —北京:北京理工大学出版社, 2017. 3 (2017. 4 重印)

ISBN 978-7-5682-3807-6

I. ①电… II. ①寇… III. ①电工技术②电子技术 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 047720 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 26

字 数 / 607 千字

版 次 / 2017 年 3 月第 1 版 2017 年 4 月第 2 次印刷

定 价 / 53.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 党选丽

责任校对 / 孟祥敬

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言

科学技术的迅速发展,对工程技术人员提出了越来越高的综合技能方面的要求,这就使得培养具有扎实的理论基础、科学的创新精神、基本的工程素养的复合型人才成为理工院校人才培养的关键目标。工程实践课程在理工专业学生培养方案中的作用日趋突出,在工程实践课程体系中,电工电子类工程实践课程是最基本、最有效、最能激发学生兴趣的工程教育课程,其日趋凸显的作用,使之成为人才培养方案中不可或缺的重要实践环节。

电工电子技术应用与实践课程是理工科高等院校培养各类型工程技术人才的工程教育核心课程,它将科学研究、实验教学、工程训练融为一体,是理论联系实际的有效途径。通过电工电子技术应用与实践课程的学习,学生可以弥补从基础理论到工程实践之间的薄弱环节,能够拓展科技知识、激发学习兴趣,培养劳动安全意识、质量意识和工程规范意识,并能培养初步的工程设计能力和求实创新精神,提高学生的工程素养与实践创新能力,为日后学习和从事工程技术工作奠定坚实的基础。

本书是根据高等工程教育改革的深化、国家对创新型人才的需求、学校人才培养方案的改革,并结合多年的教学实践与当前电工电子技术发展的趋势,针对提高学生的实践能力和创新能力而编写的,凝结了编者十多年的教学心得与工程实践经验,是内蒙古工业大学工程实践教学的经典教学资料。

本书由寇志伟担任主编并负责全书统稿,由徐明娜、马德智担任副主编。其中第1、10章由徐明娜编写,第2章的2.1部分由李文军编写,第2章的2.2~2.3部分、第9章由马德智编写,第3章由赵卫国、寇志伟编写,第4章由春兰编写,第5章由巴特尔编写,第6、7、8、11章由寇志伟编写。

李巴津教授认真审阅了全书,提出了许多建设性的意见。郭连考高级实验师策划了本套工程教育实践与创新系列教材,对本书的编写工作也给予了大力支持与帮助。在此向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不足与不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

CONTENTS

第 1 章 电工基础	001
1.1 电能	001
1.1.1 电能的产生	001
1.1.2 电能的特点	002
1.1.3 电能的应用	002
1.2 电源	002
1.2.1 直流电源	003
1.2.2 交流电源	004
1.3 供配电基础	006
1.3.1 三相电路	006
1.3.2 电力系统	009
1.3.3 配电系统	012
1.4 安全用电	015
1.4.1 安全用电的意义	015
1.4.2 电气事故	016
1.4.3 触电事故	017
1.4.4 触电急救	021
1.4.5 电气安全技术	024
1.5 常用电工材料	029
1.5.1 导电材料	029
1.5.2 绝缘材料	036
1.6 实训项目	038
1.6.1 工作台的认识和检查实训	038
1.6.2 导线的连接与绝缘恢复实训	039
课后习题	040
第 2 章 室内供配电与照明	041
2.1 室内供配电	041
2.1.1 室内供配电方式	041

2.1.2 室内供配电常用低压电器	043
2.1.3 室内供配电线路及其安装	052
2.1.4 室内配线方法	054
2.1.5 室内配电箱	058
2.2 室内照明	060
2.2.1 照明技术基本概念	060
2.2.2 照明技术基础	063
2.2.3 常见电光源	066
2.2.4 照明系统主要电器	077
2.2.5 照明系统设计	082
2.3 实训项目	087
2.3.1 基础配电线路实训	087
2.3.2 家庭照明线路实训	088
2.3.3 日光灯安装实训	088
课后习题	089
第3章 电子基本技能	091
3.1 锡焊技术	091
3.1.1 焊接技术概述	091
3.1.2 锡焊工具	093
3.1.3 焊接材料	096
3.1.4 锡焊机理	100
3.1.5 手工焊接技术	101
3.1.6 焊点的质量分析	105
3.2 元器件的引线加工	108
3.3 实训项目	109
3.3.1 导线焊接实训	109
3.3.2 电路板焊接实训	110
课后习题	111
第4章 电子元器件	112
4.1 电子元器件概述	112
4.2 电阻器	113
4.2.1 固定电阻器	114
4.2.2 敏感电阻器	117
4.2.3 电位器	119
4.3 电容器	122
4.3.1 电容器的种类及符号	122
4.3.2 电容器的型号命名方法	122

4.3.3 电容器的主要参数	123
4.3.4 电容器的标注方法	124
4.3.5 电容器的测量	125
4.4 电感器和变压器	126
4.4.1 电感器	126
4.4.2 变压器	129
4.5 二极管	131
4.5.1 二极管的分类和型号命名	131
4.5.2 常用二极管	132
4.5.3 二极管的主要参数	134
4.5.4 二极管的检测	134
4.6 三极管	134
4.6.1 三极管的分类和型号命名	135
4.6.2 三极管的主要参数	136
4.6.3 三极管的识别与检测	137
4.7 集成电路	137
4.7.1 集成电路的分类和型号命名	137
4.7.2 集成电路的主要参数	139
4.8 实训项目	139
4.8.1 电阻器的识读与检测实训	139
4.8.2 电容器的识读与检测实训	140
4.8.3 电感器和变压器的识读与检测实训	140
课后习题	141
第5章 常用模拟电路	142
5.1 基本放大电路	142
5.2 直流稳压电路	144
5.2.1 直流稳压电源的组成与作用	144
5.2.2 直流稳压电路的分类	145
5.2.3 集成稳压电路	147
5.3 实训项目	148
5.3.1 简易自动充电器制作实训	148
5.3.2 分立元件稳压电源制作实训	149
课后习题	150
第6章 印制电路技术	151
6.1 印制电路概述	151
6.1.1 印制电路板的组成及作用	151
6.1.2 印制电路板的分类	152

6.2 Altium Designer 基础	154
6.2.1 Altium Designer 概述	154
6.2.2 Altium Designer 09 的设计环境	155
6.3 原理图设计	158
6.3.1 原理图设计步骤	158
6.3.2 原理图编辑器	159
6.3.3 原理图设置	162
6.3.4 原理图元件库的加载	164
6.3.5 元件的放置与编辑	165
6.3.6 原理图的绘制	172
6.3.7 原理图的检查与报表	174
6.4 PCB 设计基础	176
6.4.1 PCB 设计流程	177
6.4.2 PCB 编辑界面	178
6.4.3 PCB 编辑系统设置	179
6.4.4 电路板层面的设置	181
6.4.5 电路板边框的设置	183
6.5 PCB 的设计	184
6.5.1 PCB 的配线工具	184
6.5.2 导入网络表信息	188
6.5.3 PCB 的布局	189
6.5.4 PCB 的配线	190
6.6 PCB 设计实例	191
6.6.1 电路原理图的绘制	191
6.6.2 PCB 的设计	193
6.7 实训项目	196
课后习题	197

第 7 章 电子产品的组装与调试工艺	198
7.1 电子产品组装概述	198
7.1.1 组装工艺概述	198
7.1.2 装配级别与要求	198
7.1.3 装配工艺流程	199
7.1.4 印制电路板的组装	201
7.2 调试工艺概述	204
7.3 实训项目	206
7.3.1 DS-22 收音机读图实训	206
7.3.2 DS-22 收音机元器件检测实训	209
7.3.3 DS-22 收音机组装实训	212

7.3.4 DS-22 收音机调试实训	214
课后习题	215
第 8 章 传感器	216
8.1 传感器概述	216
8.1.1 检测技术概述	216
8.1.2 传感器的基本概念	218
8.2 电阻式传感器	219
8.2.1 应变式传感器	219
8.2.2 压阻式传感器	220
8.3 电感式传感器	221
8.4 电容式传感器	222
8.5 压电式传感器	222
8.6 热电式传感器	224
8.6.1 热电偶	225
8.6.2 热电阻	225
8.6.3 热敏电阻	226
8.6.4 集成温度传感器	226
8.7 光电传感器	227
8.7.1 光电效应	227
8.7.2 光电器件	227
8.7.3 固态图像传感器	230
8.7.4 光电编码器	231
8.8 磁敏传感器	231
8.8.1 霍尔传感器	231
8.8.2 磁敏电阻传感器	232
8.9 化学传感器	233
8.9.1 气体传感器	233
8.9.2 湿度传感器	233
8.10 其他传感器	234
8.10.1 红外传感器	234
8.10.2 微波传感器	235
8.10.3 超声波传感器	235
8.10.4 智能传感器	236
8.10.5 微传感器	236
8.11 实训项目	237
8.11.1 集成温度传感器测试实训	237
8.11.2 声光控制灯电路测试实训	238
课后习题	239

第 9 章 电动机控制基础	240
9.1 电动机继电器控制简介	240
9.1.1 继电器控制的定义	240
9.1.2 工程实例——加热炉自动上料控制	240
9.2 三相交流异步电动机概述	242
9.2.1 电动机的分类	242
9.2.2 三相交流异步电动机的构造	242
9.2.3 三相交流异步电动机的工作原理	243
9.2.4 三相交流异步电动机的机械特性	244
9.2.5 识读三相异步电动机的铭牌	245
9.2.6 三相异步电动机的接线	249
9.3 常用低压电器	250
9.3.1 刀开关	251
9.3.2 按钮开关	253
9.3.3 转换开关	254
9.3.4 热继电器	255
9.3.5 自动空气开关	257
9.3.6 熔断器	259
9.3.7 交流接触器	261
9.3.8 中间继电器	264
9.3.9 时间继电器	264
9.3.10 速度继电器	268
9.3.11 行程开关	269
9.3.12 接近开关	271
9.4 电气原理图的识读与绘制	273
9.4.1 电气图的主要类型	273
9.4.2 电气制图的图形符号及文字符号标准	275
9.4.3 继电器控制系统电气原理图的基本结构	278
9.4.4 电气原理图的绘制方法	279
9.4.5 电气原理图的识读	280
9.5 继电器控制系统的设计方法	282
9.5.1 电气控制设计的一般原则	282
9.5.2 电气控制设计任务书的拟订	282
9.5.3 电力拖动方案的确定	283
9.5.4 常用电器的选型及图样绘制	284
9.6 实训项目	284
9.6.1 点动线路	284
9.6.2 点动、自锁混合线路	285
9.6.3 顺序控制线路	286

9.6.4 带有电气互锁的正、反转线路	288
9.6.5 典型往复运动线路	290
9.6.6 短接制动线路	291
9.6.7 反接制动线路	293
9.6.8 Y- Δ 降压启动自动控制线路	294
课后习题	296
第 10 章 PLC 应用基础	297
10.1 可编程控制器概述	297
10.1.1 可编程控制器的产生与发展	297
10.1.2 可编程控制器的分类	298
10.1.3 可编程控制器的特点及应用领域	300
10.2 可编程控制器的组成及原理	301
10.2.1 可编程控制器的硬件组成	301
10.2.2 可编程控制器的工作原理及方式	302
10.2.3 可编程控制器的编程语言	303
10.3 西门子 S7-200 PLC	306
10.3.1 西门子 S7-200 系列 CPU 224 型 PLC	306
10.3.2 西门子 S7-200 PLC 常用模块	307
10.4 S7-200 PLC 指令系统	312
10.4.1 S7-200 PLC 数据类型	312
10.4.2 S7-200 PLC 编程元件	313
10.4.3 寻址方式	316
10.5 S7-200 PLC 基本编程指令	317
10.5.1 位逻辑指令	317
10.5.2 定时器指令	321
10.5.3 计数器指令	322
10.6 PLC 控制系统的设计及应用	324
10.6.1 PLC 控制系统的设计基本原则与步骤	324
10.6.2 PLC 控制系统的设计方法	325
10.6.3 PLC 控制系统的设计实例	327
10.7 S7-200 系列 PLC 编程软件概述	332
10.7.1 STEP7-Micro/WIN 编程软件的安装	333
10.7.2 STEP7-Micro/WIN 窗口组件	334
10.7.3 STEP7-Micro/WIN 编程软件的应用	338
10.7.4 S7-200 PLC 的通信设置	339
10.8 实训项目	341
10.8.1 PLC 认识实训	341
10.8.2 PLC 编程软件使用实训	342

10.8.3	电动机点动控制线路编程实训	345
10.8.4	电动机连续控制线路编程实训	346
10.8.5	电动机正、反转控制线路编程实训	347
10.8.6	抢答器的 PLC 控制编程实训	348
10.8.7	交通灯的 PLC 控制编程实训	348
	课后习题	349
第 11 章	变频器及其应用	351
11.1	电动机调速基础	351
11.1.1	三相异步电动机的机械特性	351
11.1.2	三相异步电动机的启动	352
11.1.3	三相异步电动机的制动	354
11.1.4	三相异步电动机的调速	355
11.2	变频器基础	357
11.2.1	变频器概述	357
11.2.2	变频器的分类	360
11.2.3	变频器的控制方式	361
11.2.4	变频器的结构	362
11.2.5	变频器常用的电力电子器件	364
11.2.6	PWM 原理	368
11.2.7	变频器主电路	371
11.2.8	变频器的保护功能	372
11.3	富士 5000G11S/P11S 变频器	373
11.3.1	富士 5000G11S/P11S 变频器简介	373
11.3.2	富士 5000G11S/P11S 变频器接口电路	376
11.3.3	富士 5000G11S/P11S 变频器操作与运行	378
11.3.4	富士 5000G11S/P11S 变频器功能参数	386
11.4	实训项目	396
11.4.1	变频器基本操作实训	396
11.4.2	变频器频率设定方式实训	398
11.4.3	变频器运行方式实训	398
11.4.4	变频器段速运行实训	399
11.4.5	变频器程序运行实训	400
	课后习题	401
	参考文献	403

第1章

电工基础

【内容提要】

人类文明的进程，几乎就是研究和利用电的过程。电能在现代生活中必不可少，从工业用电到家庭中的照明、取暖以及各种电气设备的使用，可以说它与人们的生活紧密相连。电能推动了社会的进步与发展，在国民经济和人民生活发挥着重要的作用。了解电能如何产生、分类，如何预防触电事故发生等相关内容，就可以利用电能更好地为人类服务。电路是电工技术和电子技术的基础，并为后续的电子电路、电机控制等内容学习提供理论依据。各种电工技术都要通过一定的设备来实现，而设备需要用具体的材料制作出来，因此电工材料在设备制作、电力传输、电气绝缘等方面发挥着重大作用。

1.1 电能

1.1.1 电能的生产

电能是大自然能量循环中的一种转换形式。

能源是自然界赋予人类生存和社会发展的重要物质资源，自然界固有的原始能源称为一次能源，分为可再生能源和不可再生能源两类。一次能源包括煤炭、石油、天然气以及太阳能、风能、水能、地热能、海洋能、生物能等。其中太阳能、风能、水能、地热能、海洋能、生物能等在自然界中能不断得到补充，或者可以在较短的周期内再产生出来，属于可再生能源；煤炭、石油、天然气、核能等能源的形成要经过亿万年，在短期内无法恢复再生，属于不可再生能源。

电能是一种二次能源，主要是由不可再生的一次能源转化或加工而来的。其主要的转化途径是化石能源的燃烧，即将化学能转化为热能；加热水使其汽化成蒸汽并推动汽轮机运行，从而将热能转化为机械能；最后由汽轮机带动发电机利用电磁感应原理将机械能转化为电能。

电能因具有清洁安全、输送快速高效、分配便捷、控制精确等一系列优点，成为迄今为止人类文明史上最优质的能源，它不仅易于实现与其他能量（如机械能、热能、光能等）的相互转换，而且容易控制与变换，便于大规模生产、远距离输送和分配，同时还是信息的载体，在人类现代生产、生活和科研活动中发挥着不可替代的作用。

1.1.2 电能的特点

与其他能源相比，电能具有以下特点：

- 1) 电能的产生和利用比较方便。电能可以采用大规模的工业生产方法集中获得，且把其他能源转换为电能的技术相对成熟。
- 2) 电能可以远距离传输，且损耗较低，在输送方面具有实时、方便、高效等特点。
- 3) 电能能够很方便地转化为其他能量，能够用于各种信号的发生、传递和信息处理，实现自动控制。
- 4) 电能本身的产生、传输和利用的过程已能实现精确可靠的自动化信息控制。电力系统各环节的自动化程度也相对较高。

1.1.3 电能的应用

电能的应用非常广泛，在工业、农业、交通运输、国防建设、科学研究及日常生活中的各个方面都有所应用。电能的生产和使用规模已成为社会经济发展的重要标志。电能的主要应用方面包括：

- 1) 电能转换成机械能，作为机械设备运转的动力源。
- 2) 电能转换为光和热，如电气照明。
- 3) 化工、轻工业行业中的电化学产业如电焊、电镀等在生产过程中要消耗大量的电能。
- 4) 家用电器的普及，办公设备的电气化、信息化等，使各种电子产品深入生活，信息化产业的高速发展也使用电量急剧增加。

1.2 电源

电源是电路的源泉，它为电路提供电能。现在应用的电源有各种干电池电源、太阳能电源、风力发电电源、火力发电电源、水力发电电源、核能发电电源等，如图 1-1 所示。图 1-1 (c) 所示为风力发电机外形，风叶在风力的推动下转动，通过传动机构带动发电机转动发出电能；图 1-1 (d) 所示为太阳能电池板，在阳光的照射下，电池板的“+”“-”电极输出电流。

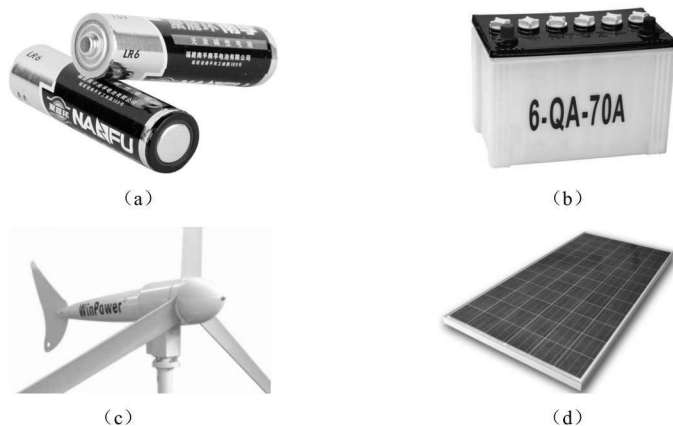


图 1-1 各种电源

(a) 干电池；(b) 蓄电池；(c) 风力发电；(d) 太阳能电池板

1.2.1 直流电源

直流电源是电压和电流的大小和方向不随时间变化的电源，是维持电路中形成稳恒电流的装置。常见的直流电源有：干电池、蓄电池、直流发电机等。

为了更直观的描述直流电源的特性，可以用一种由理想电路元件组成的电路模型来表示实际情况。常用的理想电路元件有电压源和电流源两种。

1. 电压源

(1) 定义

电压源是一种理想的电路元件，其两端的电压总能保持定值或一定的时间函数，且电压值与流过它的电流无关。

(2) 电路符号

电压源的图形符号如图 1-2 所示。

(3) 理想电压源的电压、电流关系

电源两端的电压由电源本身决定，与外电路无关；且与流经它的电流方向、大小无关。通过电压源的电流由电源及外电路共同决定，其伏安特性曲线如图 1-3 所示。

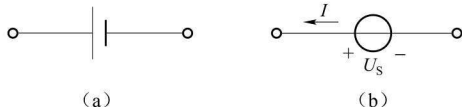


图 1-2 电压源的图形符号

(a) 直流电源；(b) 理想电压源

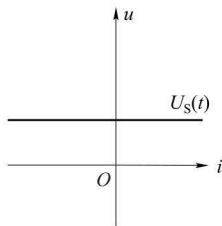


图 1-3 电压源的伏安特性曲线

2. 电流源

(1) 定义

电流源是另一种理想的电路元件，不管外部电路如何，其输出的电流总能保持定值或一定的时间函数，其值与它两端的电压无关。

(2) 电路符号

电流源的图形符号如图 1-4 所示。

(3) 理想电流源的电压、电流关系

电流源的输出电流由电源本身决定，与外电路无关；且与它两端电压无关。电流源两端的电压由其本身的输出电流及外部电路共同决定，其伏安特性曲线如图 1-5 所示。

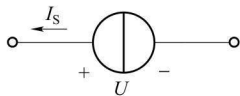


图 1-4 电流源的图形符号

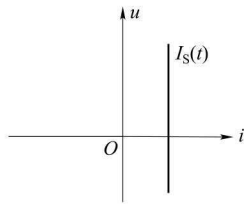


图 1-5 电流源的伏安特性曲线

1.2.2 交流电源

日常生产生活中的用电多为交流电，这种交流电一般指的是正弦交流电。

正弦信号是一种基本信号，任何复杂的周期信号都可以分解为按正弦规律变化的分量。因此，对正弦交流电的分析研究具有重要的理论价值和实际意义。

正弦交流电量是电流、电压随时间按正弦规律做周期性变化的电量。它是由交流发电机或正弦信号发生器产生的。

以电流为例，其瞬时值表达式为：

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \psi) \quad (1-1)$$

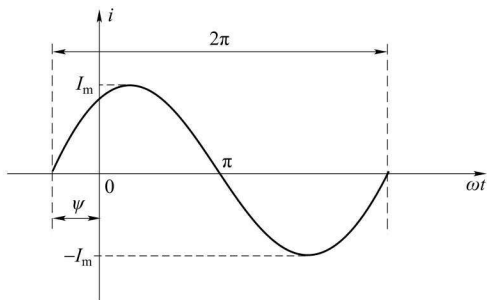


图 1-6 正弦电流波形

式中， I_m 为正弦量的振幅，是正弦量在整个振荡过程中达到的最大值； $(\omega t + \psi)$ 为随时间变化的角度，称为正弦量的相位或相角； ω 为正弦量的角频率，表示正弦量的相位随时间变化的角速度； ψ 为正弦量在 $t=0$ 时刻的相位，称为正弦量的初相位。

幅值 I_m 、角频率 ω 和初相位 ψ 称为正弦量的三要素。对于任意正弦交流电量，当其幅值 I_m 、角频率 ω 和初相位 ψ 确定后，该正弦量就能完全确定。

其波形如图 1-6 所示。

1. 幅值

幅值（也叫振幅、最大值）是反映正弦量变化过程中所能达到的最大幅度。

正弦量在任一瞬间的值称为瞬时值，用小写字母来表示，如 i 、 u 、 e 分别表示电流、电压及电动势的瞬时值。瞬时值中最大的值称为幅值或最大值，用 I_m 、 U_m 、 E_m 表示。

2. 周期与频率

(1) 周期

正弦量变化一次所需的时间称为周期 T ，单位为 s（秒）。

(2) 频率

每秒内变化的次数称为频率 f ，单位为 Hz（赫兹）。频率是周期的倒数，即

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

在我国和大多数国家，电网频率都采用交流 50 Hz 作为供电频率，有些国家如美国、日本等供电频率为 60 Hz。在其他不同领域使用的频率也不同，如表 1-1 所示。

表 1-1 不同领域使用的频率

领 域	使用频率
高频炉	200~300 kHz
中频炉	500~8 000 Hz
高速电动机电源	1 500~2 000 kHz
收音机中波段	530~1 600 kHz

续表

领 域	使用频率
收音机短波段	2.3~23 MHz
移动通信	900 MHz、1 800 MHz
无线通信	300 GHz

(3) 角频率

角频率 ω 为相位变化的速度，反映正弦量变化的快慢，单位为 rad/s（弧度/秒）。它与周期和频率的关系为：

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \tag{1-3}$$

3. 初相位

(1) 相位

相位是反映正弦量变化的进程。

(2) 初相位

初相位 ψ 是表示正弦量在 $t=0$ 时的相角。

(3) 相位差

相位差是用来描述电路中两个同频正弦量之间相位关系的量。设

$$u(t) = U_m \cos(\omega t + \psi_u), \quad i(t) = I_m \cos(\omega t + \psi_i) \tag{1-4}$$

则相位差为：

$$\varphi = (\omega t + \psi_u) - (\omega t + \psi_i) = \psi_u - \psi_i \tag{1-5}$$

式中，同频正弦量之间的相位差等于初相之差，如果 $\varphi > 0$ ，称 u 超前 i ，或 i 滞后 u ，表明 u 比 i 先达到最大值，如图 1-7 (a) 所示；如果 $\varphi < 0$ ，称 i 超前 u ，或 u 滞后 i ，表明 i 比 u 先达到最大值，如图 1-7 (b) 所示；如果 $\varphi = 0$ ，称 i 与 u 同相，如图 1-7 (c) 所示。

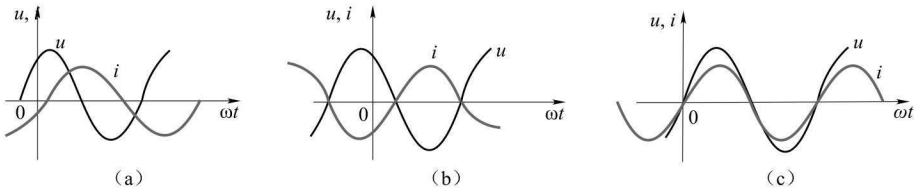


图 1-7 不同相位差的电压、电流波形
(a) $\varphi > 0$; (b) $\varphi < 0$; (c) $\varphi = 0$

4. 有效值

正弦电流、电压和电动势的大小，往往不是用它们的幅值而是用有效值来计算的。

有效值：与交流热效应相等的直流被定义为交流电的有效值。有效值是从电流的热效应来规定的。周期性电流、电压的瞬时值随时间而变化，为了衡量其平均效应，工程上常采用有效值来表示。周期电流、电压有效值的物理意义如图 1-8 所示，通过比较直流电流 I 和交流电流 i 在相同时间 T 内流经同一电阻 R 产生的热效应，即令

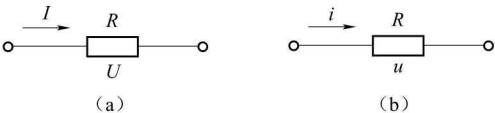


图 1-8 电流、电压的物理意义
(a) 直流; (b) 交流