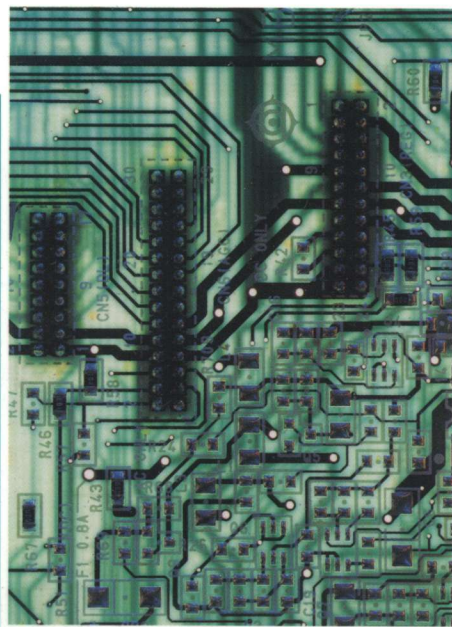


DIANLI DIANZI
SHIYONG JISHU

电力电子 实用技术

黄诗萱 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

DIANLI DIANZI
SHIYONG JISHU

电力电子 实用技术

主编 黄诗萱

参编 黄贞岚 张忠民 黄晓梅



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书重点介绍生活和生产中实用电路的基本理论和工作原理,并结合具体电路、应用实例来进行分析和计算。全书共分为8章,内容包括电路试验、家用电路、整流逆变、控制电路、自动控制、电机技术、设计电器、供电设计等,并介绍了一些高新技术、网络技术的物理特征和工作原理。

本书可供电气技师、电气工程师、电子工程师等使用,也可作为大专院校、职业学院、技师学院等的教科书,还可作为有关专业技术人员自学电力、电子和自动控制等技术的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子实用技术/黄诗萱主编. —北京: 中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-9404-6

I. 电… II. 黄… III. 电力电子学 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 158828 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 http: //www. cepp. com. cn)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 2 月第一版 2010 年 2 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 15 印张 259 千字

印数 0001—3000 册 定价 32.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

我跟主编黄诗萱很有缘分，学的是同一个专业，在一个车间工作，还在一个办公室共过事，退休后又在一起发“余热”，我们俩前后同事四十多年。他对电奇特的物理现象，有浓厚地学习兴趣！学的专业是电，工作后，又去学习无线电。后来，单位送他去自动化研究所进修，去浙江大学学习自动化和计算机应用。

他在热电厂、生产车间工作时，很喜欢动手，也很善于实践，经常跟电工师傅一起安装、调试、修理电气设备和电子电路。在家经常组装、修理家用电器。他遇到技术难题，一定要通过试验，或通过查找资料，去理解它，去论证它。没有试验条件，就想方设法创造条件来做试验，如买电子元件、集成电路、单片机等来做试验。

他对交流电的奥妙变化，特别是波形变化、数量变化、情有独钟！波形在工程上怎样变化？有何变化规律？书中有很多分析、研究波形有规律变化的实例；电量、磁量在工程上的因果变化，有何数学关系？如何利用这些数学关系，来为我们服务？在书中，设计不同的电器、设计不同的工程，就用不同的计算公式，就选用不同的计算参数。多数是我们实践过的，并经过设计回访，证明是可行和可靠的。

变幻难测的网络技术，在我们的生活中、生产中，具有神奇的、强大的应用功能，他想求甚解。网络的电信号如何变换？如何收发？网络有哪些物理特性？有什么技术特征？他收集国内外的有关资料，来进行探讨，来进行论述。

我们俩还在技术改造部、设计院共过事，从事电力工程、自动控制工程的设计，有时还到现场去调试自控电路。也为兄弟单位调试、修理自控电路的设备。书中介绍的调试电路，绝大多数是我们在本单位和兄弟单位现场调试过的。我们俩历年来，还为兄弟单位设计过电器产品，参加某团队，设计自动控制的工程，设计自动控制的生产线。

他曾说过：“我干过的，比较难的关键技术，一定要留给后人参考，不能带去见马克思……”。他先后在专业刊物上，发表很多文章，多数是比较难、比较关键的实用技术，这些文章都收录在本书中。他退休后，还在学习新技

术、新理论，如新的变频调速技术、新的变频调速理论、跟变频有关的电机理论、电动机的数学模型、新的网络技术、新的网络理论等，书中有他学习上述内容的心得和见解，有时还参加工程实践。他对电气、电子和自动化事业不断、执著追求的精神，确实令人钦佩！

该书是他一生学习和工作的总结：有设计工程、设计产品的“计算书”，有安装电路设备的经验之谈，有调试自控电路的现场记录、关键的操作、调试的要点等，有“为用而学，学了就用”的读书方法。理论紧密结合实践，实用性强，可操作性强，初学者看后也能动手操作，刚参加工作的新手，有些基础理论的，看后也能设计工程、设计电器产品、设计电路、安装调试电路等，是一本比较难得的好书。该书很适合电力、电子、自动化和网络技术工作者参考，也可作为电气爱好者、无线电爱好者、电子爱好者自学强电、弱电、自动控制的工具书。

高级工程师：成德海
2009年12月5日于南昌



前言

电力电子实用技术

电气实用技术要学好和精通，需要基础理论；熟悉和应用电气技术，也需要基础理论；设计、安装、调试和修理电路和电器，更需要基础理论。电的应用越来越广，越来越难，越来越深，在使用中的变化，越来越奇妙！也越来越有趣！现在是“电”的世界，我们的生活中、生产中都要用电。本书介绍的是，在生活和生产中，能引起学习兴趣的、常用的和典型的电路和电器。

第1章“电路试验”，有些电气工作者常说：“交流电比直流电难学习、难理解、难分析、难计算”。本章通过做试验的方法，来学习交流电。交流电的变化很奥妙、很奇特，但很有规律、也很有用。在试验中，实测波形、相位和数据，来帮助我们理解交流电的物理概念、物理特征，来帮助我们熟悉交流电的基础理论。

第2章“家用电路”和第3章“整流逆变”，都用“电”的基础理论，来分析它们的变化规律和工作原理，还介绍些“调试电路”的关键技术和操作技巧。

第4章“控制电路”，是介绍控制电路的发展历史，控制电路发展到现在，约经历了六个阶段：常规元件控制的电路、电子元件控制的电路、PLC控制的电路、“变频器”控制的调速电路、PLC控制变频器的电路和“网络技术”控制的电路。这六种电路，研究、制造的时期不同，有的时间跨度还很大，但还在不同的单位、不同的地点使用，或在同一个单位使用几种电路。

第5章“自动控制”，该章有下列难点：PLC的梯形图难看懂，为了自动控制，而编写电脑程序也比较难；最难的是“网络技术”。我们知道，“强电”跟“弱电”的理论是有联系的，变化规律是相同的。但“网络技术”和“现场总线”的奥秘和强大的功能，令人感到神奇！在网络中，有的技术特性比较抽象，如ISO / OSI网络模型，原来分为七层。现在七层之外，又增加了第八层——“用户层”，这八层的“电信号”，都在同一条电路中发送或接收。如何识别、区分这八种信号？如何取出这八种不同的“电信号”？又如何“收”和“发”？看完本章后，能够帮助我们理解这神秘、有趣的物理现象。

第6章“电机技术”，有设计电机的计算；第7章“设计电器”，有设计变

压器的计算、设计电抗器的计算。多数是设计产品的“计算书”，但计算它们的公式，用了些“经验公式”。读者也许会问：“这些经验公式有什么理论根据？这些经验公式是怎样推导出来的？”直流电路的计算公式，多数是线性关系，即比例关系，好推导、好理解、好计算，但在交流电路中就不同了，在第1章的“交流发电机的试验”中，我们已经知道，交流电流、交流电压都是“旋转矢量”，它们不但有大小，有方向，还在不停地旋转。交流电流产生的交流磁通，也是旋转矢量（即“旋转磁通”）。对交流电的电磁物理量，进行计算时，因两个对应变化的物理量，有些不是线性关系，而是不规则的曲线关系。

故交流电的磁路计算、电磁计算，要用些“经验公式”来计算。“经验公式”是国内外的设计专家，经过多年多次的使用，设计的工程、产品，又正常运行、正常使用多年，才一致公认为可靠的、可行的计算公式。我们也设计过一些产品，也安全使用了几十多年。

第8章“供电设计”，要准确计算“用电负荷”是有难度的，书中介绍了几种可行的计算方法和计算公式，还介绍了短路电流、继电保护、防雷和接地装置的计算，也用了一些“经验公式”。为了读者学习设计“供电工程”的设计思路、计算公式和设计技巧，做到学用一致，书中的计算例题，多数是我们设计具体工程的“计算书”，我们设计的工程，经过设计回访，都正常运行了几十多年。

由于水平有限，又因这次编写的内容，涉及的方面比较多，使用的资料也比较多，缺点错误难免，恳请同行专家和读者批评指正。

编 者

2009年11月20日



目 录

电力电子实用技术

序

前言

1	电路试验	1
1.1	交流发电机的试验	1
1.2	阻容电路的试验	6
1.3	阻抗电路的试验	10
1.4	电阻、电容和电感的串联试验	14
1.5	单相整流的试验	15
1.6	三相整流的试验	16
1.7	逆变电路的试验	19
1.8	测量地电阻率的试验	24
1.9	伏安法测量接地电阻的试验	25
1.10	调校电能表的试验	26
2	家用电路	29
2.1	交流调压器	29
2.2	门铃电路	30
2.3	遥控器	32
2.4	声控开关	35
2.5	触摸开关	36
2.6	充电器	37
2.7	日光灯镇流器	39
2.8	集成电路的收音机	40
2.9	家用逆变器	44
3	整流逆变	47
3.1	单相半波整流的调压电路	47
3.2	单相全波整流的调压电路	49

3.3	三相全波整流的调压电路	51
3.4	三相整流波形的分析	56
3.5	单相逆变器	60
3.6	单相 PWM 逆变器	63
3.7	PWM 逆变器的应用	66
3.8	逆变器件的发展	71
4	控制电路	76
4.1	二次线的基本知识	76
4.2	常规元件的控制电路	81
4.3	二次线安装的设计和施工	85
4.4	电子元件控制的电路	89
4.5	PLC 控制的电路	93
4.6	PLC 控制的变频器	97
4.7	现场总线控制的电路	99
5	自动控制	104
5.1	双闭环的自动控制	104
5.2	多闭环的自动控制	109
5.3	升降电梯的梯形图	114
5.4	控制电梯的编程	116
5.5	顺控功能 (SFC) 的编程	119
5.6	电除尘器的调试要点	122
5.7	局域网的技术特征 (一)	128
5.8	局域网的技术特征 (二)	132
5.9	以太网的技术特征	135
5.10	新闻纸定量和水分的自动控制	138
6	电机技术	143
6.1	设计同步电机的计算	143
6.2	设计同步电机的实例	145
6.3	设计异步电机的计算	146
6.4	根据异步电机的铁心计算绕组	150
6.5	电容式电动机的绕组计算	153

6.6	电容式电动机绕组的计算实例	155
6.7	分数槽电机绕组的布线规律	156
6.8	电枢绕组布线的计算	159
6.9	直流电机绕组的计算	163
6.10	步进电动机的工作原理	165
6.11	论异步电机的三个物理量	166
7	设计电器	173
7.1	设计电力变压器的计算	173
7.2	设计电力变压器的举例	176
7.3	整流变压器的计算	177
7.4	设计整流变压器的举例	179
7.5	小型变压器的计算	179
7.6	设计小型变压器的举例	180
7.7	设计电抗器的计算	181
7.8	设计电抗器的举例	184
7.9	设计镇流器的计算	185
8	供电设计	188
8.1	计算用电负荷	188
8.2	选择导线和电缆	199
8.3	计算短路电流	201
8.4	计算短路的假想时间	206
8.5	电力设备的选型	207
8.6	继电保护的灵敏系数	209
8.7	低压系统的继电保护计算	211
8.8	高压系统的继电保护计算	213
8.9	防雷的计算	216
8.10	设计接地装置的计算	221
	参考文献	227



1 电 路 试 验

1.1 交流发电机的试验

1.1.1 有趣的试验

交流电在我们生活中、生产中用得最多。很多电气爱好者、电子爱好者和无线电爱好者，对交流电奇特和奥妙的变化，都很有学习兴趣！在收音机、电视机、电脑、手机等电器中，都要用交流电，工业和其他行业的生产中也要用交流电。我们要学习电气设备、电子设备的工作原理，我们要设计、调试、修理电路，都要用交流电的物理概念和基础理论。但初学交流电的人，有的会感到交流电变幻莫测、奥秘神奇，很难入门。因为电子、电力线、磁力线和电磁波等，我们都看不见、摸不着。有些电气工作者也说：“直流电，好理解、好分析、好计算；但交流电，难理解、难分析、难计算。”我们学了几十年“交流电”的体会是：用试验的方法，实测数据、波形和相位，来具体分析、定量分析交流电的物理特性、变化规律和物理量之间的数学关系，就能学习好交流电。

做电路试验，①可以学会做电气试验、调试电路的操作和技巧；②自己动手做试验，还会增加学习交流电的兴趣；③寓教于乐，通过电路试验，能看到交流电的波形变化、相位关系和实测数据，能加深对交流电的物理概念和基础理论的理解。国内外从事电力、电子工作的工程师，除了计算、设计、制图外，基础理论学得好，工作能力强的，都会自己动手做电路试验，调试电路。

本章介绍电路试验的目的就是通过试验来学习交流电，并学习电力、电子的实用技术。

图 1-1 所示为交流发电机的试验电路，G 是一台单相交流两极的发电机，原动机是柴油机。负载是只 1000W 的电炉，电流表 PA 接在电流互感器 TA 上，电压表 PV、频率表 Hz、示波器的接线如图 1-1 所示。调节柴油机的油门，使发电机的转速稳定在 $n = 3000\text{r/min}$ ，频率表指到 $f = 50\text{Hz}$ ，

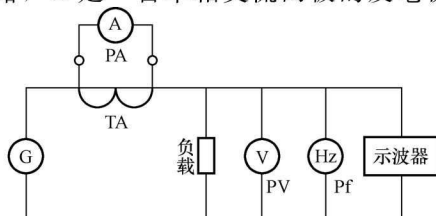


图 1-1 交流发电机的试验

电压表指到 $U=220\text{V}$ 。用示波器测量的波形,如图 1-2(c)。根据实测的数据,可验证以下公式

$$f = np/60 = 3000 \times 1/60 = 50(\text{Hz}) \quad (1-1)$$

式中 f ——交流电的频率, Hz;

n ——发电机的转速, r/min, $n=3000$;

p ——发电机的磁极对数, $p=1$ 。

式 (1-1) 中三个物理量 (f 、 n 、 p) 的关系式,跟实测的数据是一致的。读者如有兴趣、有条件,可用示波器测量“电压瞬时值”的功能,测量出不同角度对应的电压值(瞬时值 u),来证明波形是“正弦波”。

不同角度对应的电压瞬时值为

$$u = U_m \sin \alpha \quad (1-2)$$

式中 U_m ——电压的幅值;

α ——电气角度。

电压表测量的“有效值”为 $U=220\text{V}$,电压的幅值为 $U_m=\sqrt{2}U=\sqrt{2}\times 220=311(\text{V})$ 。

1.1.2 实用的联想——旋转矢量

直流电的大小和方向是固定的;而交流电的大小在不停地变化,方向也在不停地变化。这是它们的根本区别,也是交流电比直流电复杂、难学的原因。为了便于分析和计算,用旋转矢量(或旋转向量)来表示交流电的物理特性。图 1-2 (a) 是交流发电机的示意图,从物理和三角函数中,电枢上的导线在磁

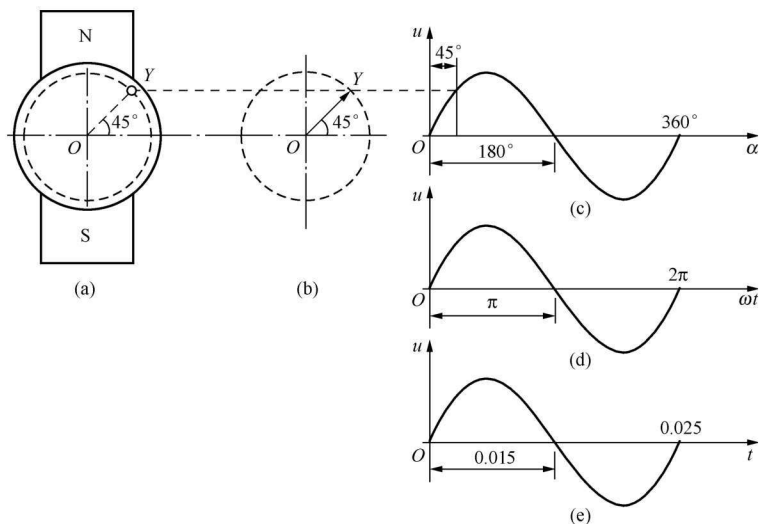


图 1-2 交流电的波形和向(矢)量图

(a) 发电机; (b) 旋转向量; (c) 电气角度波形; (d) 弧度波形; (e) 时间波形

极下，逆时针旋转一周，感应的电压就是正弦波。在图 1-2 (b) 中的半径 OY 逆时针旋转一周，在纵坐标上的投影值，对应不同角度的投影值，两者的函数关系，也是正弦波，在 45° 的位置，三者的数值都是 219.8V 。用“旋转矢量” OY 来代表发电机的电压，旋转矢量 OY 的长度等于电压的幅值 311V ，逆时针旋转的速度等于发电机的转速，如这里 $n=3000\text{r/min}$ 。知道了单相交流发电机的“旋转矢量”后，就可作出三相交流发电机的“旋转矢量”。如发电机为绕组 D 接线、 $220\text{V}/380\text{V}$ 的三相发电机。

在图 1-3 (a) 中，相电压 $U_a=U_b=U_c=220\text{V}$ ，相位各差 120° ，是逆时针旋转。在图 1-3 (b) 中，线电压 $U_{ab}=U_{bc}=U_{ca}=380\text{V}$ ，也是逆时针旋转。

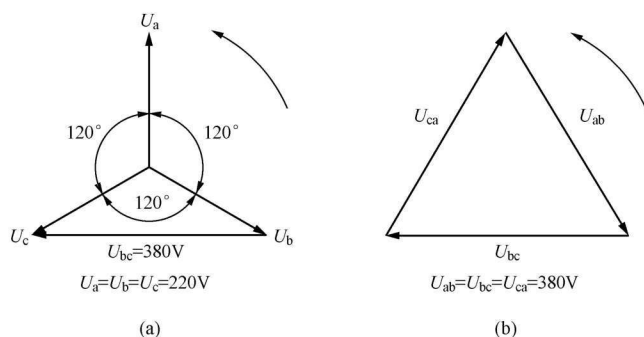


图 1-3 三相发电机的矢量图

(a) 相电压；(b) 线电压

1.1.3 三种单位的妙用

交流电正弦波的横坐标，常用以下三种单位，各有各的妙用。

(1) 电气角度。用 α 表示，如图 1-2 (c) 中所示。“电气角度”跟“几何角度”有本质的区别。

(2) 弧度。用 ωt 表示，如图 1-2 (d) 中所示，弧度对照角度为 π 弧度 = 180° 。但在交流电中有“电角速度”或“角频率”的物理量，即

$$\omega = 2\pi f \quad (1-3)$$

相关公式有

$$\text{感抗:} \quad X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (1-4)$$

$$\text{容抗:} \quad X_C = 1/\omega C = 1/2\pi f C \quad (1-5)$$

式中 L ——电感，H；

C ——电容，F；

f ——电源的频率，Hz。

注意：在上述公式计算 X_L 和 X_C 时，取 $\pi=3.141\ 59$ ；而不是 π 弧度。

(3) 时间。用 t 表示，如图 1-2 (e)。试验用两极发电机，每秒旋转 50 周 ($3000/60=50$)，频率 $f=50\text{Hz}$ 。一个周期（发电机转一周）的时间 T 为 $1/50=0.02\text{s}$ 。

周期 T 的计算公式为

$$T = 1/f \quad (1-6)$$

“横坐标”的时间单位为 s ，在电子工程、自动控制和电脑中，如用 ms 、 μs 来做计算横坐标的单位，又称“波形宽度”。从式 (1-6) 可知：“周期”跟“频率”成反比，“波形宽度”也跟“频率”成反比。这两个物理量成“反比”的关系，在“逆变器”、微电子和其他电子工程中会经常使用。

三种单位，在不同的电路、不同的工程中，各有不同的妙用。如在电力工程中，常用弧度来对应正弦波的变化。在电子工程中，如触发脉冲的宽度，有的用时间 (s)，有的用电气角度，在计算移相角度时，就要用电气角度。数字电路的脉冲宽度，用 s (或 ms 、 μs) 来计算。在设计、修理电机绕组布线的计算时，要用电气角度。周期的时间 (s) 跟电气角度，两者可以对应换算，弧度跟电气角度，也可对应换算。

1.1.4 交流电的三大要素

前面实验用“示波器”显示单相交流发电机的波形是“正弦波”（也就是我们用的市电），正弦波有最大值 311V ，又叫“幅值”。用“频率表”测量它的“频率” $f=50\text{Hz}$ 。交流电的三大要素为波形、频率和幅值。不是正弦波的交流电，叫非正弦波，如方波、三角波、锯齿波等。它们都按不同的频率和幅值有规律变化。

波形的变换，是比较难、比较关键的技术。很多电力电路、电子电路的工作过程，就是波形变换的过程。如整流电路就是把交流电的正弦波变成脉动直流；逆变电路就是把直流电压变成正弦波的交流电压。在收音机、电视机和电脑中，它们内部电路的工作过程，很多是波形变换的过程。在电视技术中，图像用调幅波进行传输，声音用调频波进行传输，通过内部电路进行波形变换，最后还原出图像、彩色和声音。

方波（又称矩形波）在数字电路和电脑电路中，用方波电位的“高”和“低”，来对应代表“1”和“0”两个“数字”的逻辑关系，用“二进制”的数学运算，通过“门电路”、“逻辑电路”和“脉冲数字电路”等，进行波形变换，从而变换出文字、符号、图形、图像和声音等。

在网络技术中，在发送端“时钟波形”跟“数据波形”异或成“波形 D”，

发送出去。在接收端“波形 D”译码（或称解调）还原出“时钟波形”和“数据波形”两个波形，并跟发送端的一模一样。

要熟悉和精通电力、电子的实用技术，就要分析、研究波形变化、波形变换的规律和工作原理。

1.1.5 交流电四种计量的数值

在电气测量、电气试验、调试电路和工程计算中，交流电常用四种计量的数值：有效值、幅值、瞬时值和平均值。用交流电压表测量的是电压有效值，如 $U=220\text{V}$ ；用示波器测量波形的最大值是电压幅值，如 $U_m=311\text{V}$ 。电压有效值和电压幅值的关系是：

$$U_m = \sqrt{2}U \quad (1-7)$$

瞬时值。波形图是交流电的变化规律，时间横坐标对应每个时间的电压值就是电压的瞬时值。正弦波交流电的电压瞬时值 u 为

$$u = U_m \sin \alpha \quad (1-8)$$

式中 α ——电气角度（在计算时，电气角度跟几何角度是等值的）。

不同波形的计算公式是不同的。

平均值。交流电整流后，就变成直流电（或称脉动直流电），要用直流电压表来测量它的电压值（注意：如用交流电压表测量直流脉动电压，就会把交流电压表烧坏）。如 $U=220\text{V}$ 的交流电压在单相全波整流后，平均值（直流电压值） $U_{cp}=198\text{V}$ 。常用整流后的平均值为

$$(1) \text{ 单相全波整流: } U_{cp} = (198/220) U = 0.9U. \quad (1-9)$$

$$(2) \text{ 单相半波整流: } U_{cp} = 0.45U. \quad (1-10)$$

$$(3) \text{ 三相半波整流: } U_{cp} = 1.17U. \quad (1-11)$$

$$(4) \text{ 三相桥式全波整流: } U_{cp} = 2.34U. \quad (1-12)$$

式中 U ——交流电压的有效值，V。

交流电流也有这四种值：

$$(1) \text{ 电流有效值: } I.$$

$$(2) \text{ 电流幅值: } I_m = \sqrt{2}I. \quad (1-13)$$

$$(3) \text{ 电流瞬时值: } i = I_m \sin \alpha. \quad (1-14)$$

$$(4) \text{ 电流平均值: } I_{cp} = U_d / R. \quad (1-15)$$

式中 U_d ——整流后的平均电压，V；

R ——负载的电阻， Ω 。

1.1.6 电气角度

在交流电中，要特别注意几何角度跟电气角度的区别。两极发电机的几何角度跟电气角度是相同的，都是 360° 。四极发电机，就不同了。四极发电机发 50Hz 的交流电，转速为 $n=60f/p=60\times 50/2=1500$ (r/min)，而两极发电机的转速为 $n=3000$ r/min。四极发电机圆周的电气角度是 720° ，而不是 360° 了，因为 $2\times 360^\circ=720^\circ$ 。电气角度的计算公式为

$$\alpha = 360p \quad (1-16)$$

式中 p ——发电机或电动机的磁极对数。

发电机的电气角度，按式(1-16)计算；电动机的电气角度，也按式 (1-16) 计算。有一位电工，在修理四极电动机时，不知道电气角度跟几何角度的区别，把电动机的几何角度 360° ，当成 360° 的电气角度，来计算下线圈的槽数。修理好的电动机，一送电，就引起短路的大事故，把线圈烧坏了。可见式 (1-16) 的重要性。

1.2 阻容电路的试验

在图 1-4 中，用交流电压表测量进线两端的电压是 220V，再分别测量电阻和电容的电压，如表 1-1 中， $34+207=241$ (V)； $64+200=264$ (V)； $85+192=277$ (V)，奇怪的是，两者相加都要大于和 (220V)。我们已知道交流电压表，测量的是有效值，为什么两者相加都大于和呢？这就是交流电路中用直流电路的物理概念、基础理论，无法理解和无法解释的奇怪现象。若不做试验，交流电的物理特性是不好理解的。通过试验，测量数据、波形和相位，就能帮助理解交流电的物理概念和基础理论。

表 1-1 实 测 的 数 据

灯的接法	U_c (V)	U_r (V)
两灯串联	34	207
一只灯泡	64	200
两灯并联	85	192

1.2.1 巧合的圆图

图 1-4 是电容、电阻串联的试验，电阻 R 是白炽灯 (15W/220V)，电容器 C 是 CJ40-2-4 μ F/630V。试验测量的数据，见表 1-1，试验用的电源是交流电压 ($U=220$ V)，表 1-1 中的 U_r+U_c ，相加的和都要大于 220V，说明在交

流电路中串联的电压，不能代数相加，只能几何相加，它们几何相加后，就出现有趣的巧合。它们的“几何和”都等于 220V。以 $U=220\text{V}$ （按比例计算长度）做公共斜边（ $AB=220\text{V}$ ），如 $U_c=AC=34\text{V}$ ， $U_r=BC=207\text{V}$ ， $U_c=AD=64\text{V}$ ， $U_r=BD=200\text{V}$ ， $U_c=AE=85\text{V}$ ， $U_r=BE=192\text{V}$ ，按比例作图，三个都是“直角三角形”，就会发现奇妙的现象，三个“直角三角形”的顶点 C、D、E 都在同一个圆上，见图 1-5。该圆以 AB 的中点 O 为圆心，以 OA 为半径。交流电的圆图是很奇特的，在工程技术上也是很有用的，如“阻容移相”，就是根据该圆图的原理，来设计“移相触发电路”的。

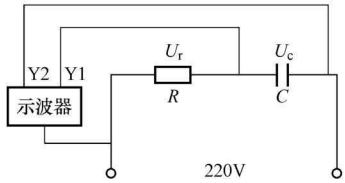


图 1-4 阻容试验的电路

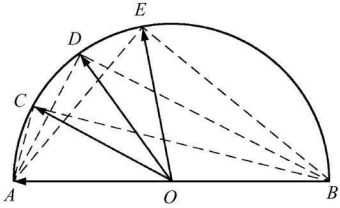


图 1-5 阻容移相的原理

1.2.2 阻容移相的应用

在阻容移相的触发电路中，图 1-5 中的 OC、OD、OE 就是“触发脉冲电压”，改变电阻值，就能改变它们跟主回路 AB 电压的夹角，改变晶闸管的导通角度，从而改变晶闸管输出电压的大小。触发脉冲控制单向晶闸管，就能改变直流电压的大小；触发脉冲控制双向晶闸管，就能改变交流电压的大小。

图 1-6 是用双踪示波器（SR8）实测的波形图，电阻电压 U_r 超前电容电压 U_c 为 90° 。图 1-7 是阻容电路的矢量图，也是电阻电压 U_r 超前电容电压 U_c 为 90° ，因为在交流电路中，电压都是逆时针旋转的矢量。

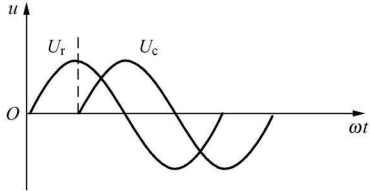


图 1-6 阻容电路的波形

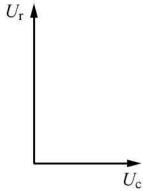


图 1-7 阻容电路的矢量图

1.2.3 微分电路和积分电路

图 1-8 是微分电路，图 1-9 是积分电路。它们都由电阻和电容两个元件组