

WQ

电子测量仪器

—原理与应用—

[美] Robert A. Witte 著

何小平 译

清华大学出版社

7448
W5

382648

电子测量仪器

原理与应用

[美] Robert A. Witte 著

何小平 译



清华大学出版社

(京)新登字 158 号

简介

DVOG / 26 33

对于有兴趣了解电子测量方法的读者来说,本书可提供帮助,书中包括基本测量原理及其在实际中的应用。

第一章讨论了基本测量原理;第二章至第六章介绍主要仪表(如电表、信号源、示波器、频率计数器等);第七章探讨了一些电路概念及其在电子测量中的运用;第八章介绍频域仪,重点在频谱分析仪;第九章涉及逻辑探头及逻辑分析仪。为了尽量少涉及仪器的内部工作情况,作者大量采用了电路模型和概念方框图。

仪表外观虽会随时间推移而变化,测量的基本原理是不会变的。本书谨向读者提供了解仪器、仪表必要的背景知识。

电子测量仪器——原理与应用

Electronic Test Instruments

——Theory and Applications——

Original English language edition published by Prentice Hall Inc.

Copyright © 1993 by PTR Prentice Hall Inc.

All Rights Reserved.

本书英文版由 Prentice Hall 出版社于 1993 年出版,版权为 PTR Prentice Hall Inc. 所有。本书的中文版权由 Prentice Hall Inc. 授予清华大学出版社出版发行。未经出版者书面允许不得以任何形式复制或抄袭本书内容。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量仪器:原理与应用(美)维提(Witte, R. A.)著;何小平译. —北京:清华大学出版社,1995

书名原文:Electronic Test Instruments: Theory and Applications

ISBN 7-302-01752-2

I. 电… I. ①维… ②何… III. ① 电子测量设备-理论 ② 电子测量设备-应用 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 00675 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

印刷者:清华大学印刷厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开本:787×1092 1/16 印张:15 字数:356 千字

版次:1995 年 2 月第 1 版 1995 年 2 月第 2 次印刷

书号:ISBN 7-302-01752-2/TN·66

印数:4001—8000

定价:20.00 元

前 言

本书阅读的对象是已经了解电子知识并想掌握更多电子测量方法的学生、技术员和工程师。为了有效地使用测量仪器,有必要先了解基本测量原理及其在实际操作中的应用。基本测量原理包括电压波形与频率有何关系,仪表如何影响它所测量的电压等。按理说,在使用仪表时没有必要了解它的内部工作原理,虽然可以朝这方面努力,但并不可能完全了解。(犹如在驾驶车辆时没有必要了解其发动机如何工作一样,然而司机起码应知道加速器和制动踏板的作用)。

本书的大部分素材取自《电子测量仪器:使用者资料手册》。但本书更新了内容,加进了一些新的章节。本书涉及一些数学公式,更多的数学分析见附录D。本书专列一章论述逻辑分析,这对数字设计与测试很重要。

为了尽量少涉及仪器的内部工作原理,广泛地使用了电路模型及概念方框图。电路模型中用“黑色方框”表示电路。换句话说,复杂的电路或仪器的工作情况是通过概念方框图表述清楚的。这种电路模型方法减少了必需记忆及了解的大量细节知识,概念方框图足以显示仪器的内部工作情况,有助于读者了解仪器在做什么,而不必操心其工作的细节。但有些仪器,如同人们熟悉的示波器,就必须多了解一些仪器的内部工作情况,因为这些因素影响它的使用。

传统的模拟技术逐渐产生出数字技术。然而不管使用模拟电表还是数字电表,电压的测量是相同的。由于测量方法相同,本书尽量采用统一的方法论述这种技术,同时也突出了其不同处。外观上两类仪器基本上完成相同的测量,只是读数的显示有比较大的差别,本书都作了适当的解释。

本书无意(也不可能)去替代一本好的仪器操作手册。假设一本书只是要读者“按这个开关、转那个旋钮”,那是不会令人满意的,因为开关和旋钮的限定会随时间的推移而变化的。为此,本书仅给读者提供有关电子仪器背景知识的补充或参考材料。由于不同的设计和改进,都可使仪表、示波器或函数发生器各具特色,本书要论述的是其共同的基本测量原理。

第一章涉及基本测量原理;第二章至第六章包括用户使用的主要仪器(如电表、信号源、示波器、频率计数器等);第七章探讨有关电路概念及其在电子测量中的运用;第八章介绍频域仪,重点介绍频谱分析仪;最后,第九章涉及逻辑探头及逻辑分析仪。

作者写此书的初衷在于总结他在大学教授本科电子工程课程中的经验。即使是具有良好电子理论知识的学生,也会遇到如何将书本概念运用到实践中去的问题,如负载影响、接地及带宽等概念是最令他们头疼的。为此,这些概念在书中均一一作了阐述。虽说本书不算是本教科书,但无疑它可作为工程技术实验课的阅读补充材料。

目 录

第一章 测量原理

1.1	电量	1
1.2	电阻	3
1.3	极性	3
1.4	直流电	3
1.5	功率	4
1.6	交流电	4
1.7	均方根值	5
1.8	平均值	6
1.9	峰值因子	7
1.10	相位	7
1.11	交流电功率	8
1.12	非正弦波	9
1.13	谐波	10
1.14	方波	11
1.15	脉冲串	13
1.16	合成的直流电和交流电	15
1.17	调制信号	17
1.18	分贝	20
1.19	绝对分贝值	21
1.20	测量误差	26
1.21	负载影响	26
1.22	分压器	27
1.23	最大电压输出	28
1.24	最大功率传送	28
1.25	阻抗	29
1.26	仪表输入阻抗	30
1.27	带宽	31
1.28	上升时间	32
1.29	带宽对方波的影响	32
1.30	数字信号	34
1.31	逻辑家族	35

• ■ •

第二章 电压表、电流表和欧姆表

2.1	模拟表和数字表	37
2.2	直流电压表	38
2.3	交流电压表	40
2.4	射频探头	43
2.5	电流表	43
2.6	电流表用作电压表	45
2.7	电压表用作电流表	45
2.8	电流取样电阻	46
2.9	交流电流表	47
2.10	欧姆表	47
2.11	电压表-电流表方法	48
2.12	串联式欧姆表	48
2.13	电流源方法	49
2.14	4线欧姆测量法	50
2.15	多用表	50
2.16	表的测量范围	52
2.17	连续性指示器	53
2.18	二极管测试	53
2.19	技术性能	53

第三章 信号源

3.1	电路模型	56
3.2	浮置与接地输出	57
3.3	信号源中的缺陷	58
3.4	正弦波信号源	61
3.5	函数发生器	62
3.6	脉冲发生器	64
3.7	信号发生器	66
3.8	扫描发生器	68
3.9	任意波形发生器	69
3.10	合成信号源	70

第四章 示波器

4.1	示波器概念	74
4.2	时基	75
4.3	触发	76

4.4	扫描控制	81
4.5	垂直放大	83
4.6	交流和直流耦合	84
4.7	X-Y 显示方式	85
4.8	高阻抗输入	87
4.9	50Ω 输入阻抗	88
4.10	示波器技术规格	88
4.11	模拟示波器方框图	89
4.12	示波器的操作使用	89
4.13	数字示波器	91
4.14	模拟示波器与数字示波器对照	101
4.15	示波器探头	101
4.16	探头补偿	105
4.17	有源探头	106
4.18	差分测量	106
4.19	高压探头	107
4.20	电流探测线	107

第五章 示波器测量

5.1	正弦波测量	110
5.2	示波器与电压表对照	111
5.3	电压增益的测量	112
5.4	相位测量——时基法	114
5.5	相位测量——Lissajous 法	115
5.6	频率测量——Lissajous 法	117
5.7	脉冲测量	119
5.8	脉冲延迟	120
5.9	数字信号	121
5.10	频率响应测量	126
5.11	方波检测法	129
5.12	线性测量	130
5.13	曲线描绘测量技术	133
5.14	幅度调制测量	136

第六章 频率计数器

6.1	频率计数器	138
6.2	分频器	140
6.3	周期测量	141

6.4	综合计数器	141
6.5	通用计数器	142
6.6	射频脉冲波的测量	142
6.7	计时电路的精度	144
6.8	输入阻抗	144
6.9	频率计数器的技术规格	144
6.10	时间段分析仪	145

第七章 电子测量电路

7.1	电阻测量——间接法	148
7.2	电桥测量法	150
7.3	电阻-电感和阻容电路	152
7.4	谐振电路	157
7.5	二极管测量电路	159
7.6	电路端子	160
7.7	衰减器	161
7.8	功率分裂器和组合器	166
7.9	测量滤波器	167
7.10	电源	170

第八章 频域仪

8.1	频谱分析仪	175
8.2	带通滤波器频谱分析仪	176
8.3	快速傅立叶变换频谱分析仪	177
8.4	波频计	180
8.5	分辨带宽	182
8.6	窄带与宽带测量对照	184
8.7	扫频分析仪	185
8.8	频谱分析仪测量	190
8.9	频谱分析仪的输入	192
8.10	增益/相位表	193
8.11	网络分析仪	194
8.12	失真分析仪	196

第九章 逻辑探头和分析仪

9.1	逻辑探头	200
9.2	逻辑分析仪	203
9.3	定时分析仪	203

9.4	定时分辨力	203
9.5	假脉冲检测	206
9.6	数字测试实例——4 位计数器	206
9.7	状态分析仪	207
9.8	微处理机测量	208
9.9	数据格式	210
9.10	存储限定	210
9.11	触发和顺序级	212
9.12	微处理机程序流	212
9.13	逻辑分析仪探头	213
9.14	组合示波器和逻辑分析仪	214
附录 A	电气参数、单位和标准缩写表	215
附录 B	百分数误差和分贝的关系	215
附录 C	美国仪器厂商一览表	217
附录 D	公式的数学推导	218
附录 E	ASCII 转换表	224

第一章 测量原理

为了理解电子仪器的操作和用途,重温一下与电气测量有关的某些原理是必要的。尽管读者了解基本电子原理(如电压、电流、欧姆定律等),但本书讲这些原理侧重于原理怎样与电子测量相结合。为此,先讲讲原理,以便为讨论电子仪器的用途和操作奠定基础。书中大多数理论概念适用于多种测量和仪器、仪表。

1.1 电量

在将要讨论电子测量之前,我们必须十分清楚要测的参数。附录 A 备有一个电气参数表,它们的测量单位及其标准缩写已收入。这些标准电气单位可用前缀(毫、千等)来描述,表中还小结了它们的用途。下面从测量电压和电流开始(稍侧重于电压),随后将包括其他参数如电容和电感。

电流(测量单位为 A)是电荷(测量单位为 C)的流动。电荷是由通过一已知点的电子数来确定。1 个电子有 $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 的负电荷,或者说,1C 负电荷含 6.242×10^{18} 电子。电流单位(A)是用 1 秒钟在一已知点通过的电荷的库数来确定(即 1A 等于 1C/s)。已知时间内通过的电荷越多,电流越大。虽然电流是由电子流动形成,但标准电气工程惯例还是视电流为正电荷流动^①。用这一定义,电流的流动方向被认为与电子流的方向相反(电子是负性电荷)。

电压(测量单位为 V)常常是指电动势(EMF)或电位,是使电荷移动和电流流动的电力或电压。电压是一相对概念,即在一已知点的电压必然与其他某点相关,这一点可能是系统的公共点或接地点。

常用来模拟电流的方法是用水管。水管中有电流流过(图 1-1),水分子被看成电荷,水流量被看成电流,水压(由某类水泵提供)对应电压。在这一情况下,我们感兴趣的水压实际上是管子两端压力之差,假使水管两端压力相同,水流(电流)为零;另一方面,假使水管一端的压力较高,水(电流)从较高压力的一端流向压力较低的一端。

注意一点,当水流通过水管,水压就跨越水管。同样,电流流过电气元件,电压存在于元件的两端(图 1-2)。测量电压还是测量电流会影响到测量仪器的连接法。为了测量电压,测量仪器应并接在电压上(图 1-3a);当需要测量两点的电压时,必须指定哪两个点(其中一点可能是系统的接地点)。只在一点测量电压是不对的,我们常常提到某一点的电压,这时另一点是暗指系统的公共点或接地点。电流和水流相似,它流过器件或电路。当测量电流时,仪器应插在我们测量的电路中(图 1-3b)。(对此也有例外,如第四章中讨论的电流探头。)要在测电流的那一点将电路断开,将仪表插入。为了保持对电压和电流的测

^① 电流有时也用电子流来定义(即电流与书中所示的流向相反。)

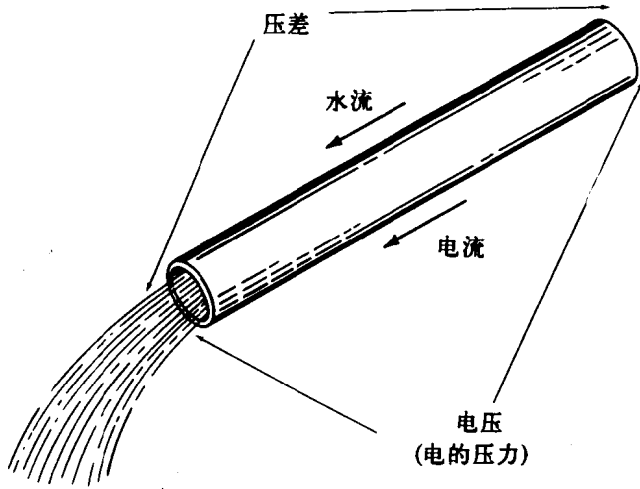


图 1-1 水管中的水流和压力差,与电流和电压的工作相似。

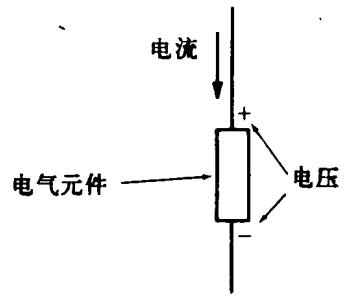
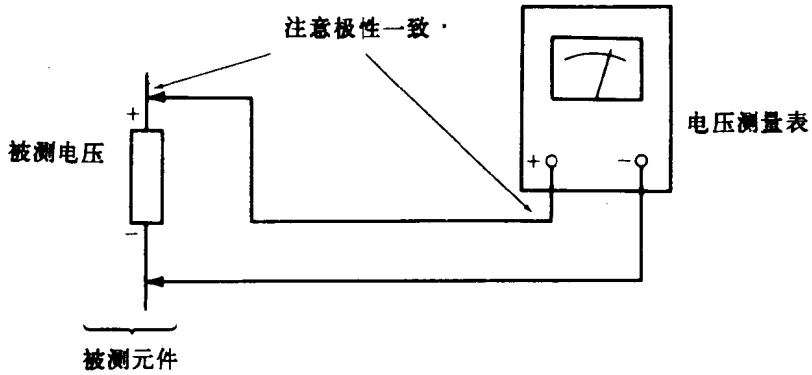
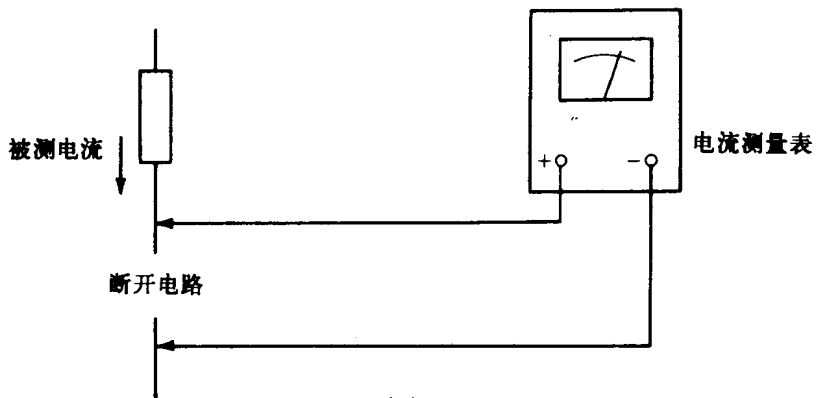


图 1-2 当电气元件两端存在电压时,元件中流过电流。



(a)



(b)

图 1-3 (a) 在两点间测量电压,注意测量仪表的极性应与测量电压的极性一致;(b) 测量电流是将仪表插在电路中,这样,电流就会流过仪表。

量精度,测量仪表不应对被测电路产生影响是很重要的。

1.2 电阻

电阻是遵循欧姆定律

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{或} \quad V = I \cdot R \quad \text{或} \quad R = \frac{V}{I}$$

的电子元件。欧姆定律说明通过电阻的电流与跨在电阻两端的电压成正比。回顾一下相似的水管,当压力(电压)增加时,水流(电流)量也增加;假使电压减少,电流也减少。还有相似的是,阻力与水管的粗细有关,水管越粗,对水流的阻力越小,大水管(电阻小)在一定压力(电压)下允许大水量(电流)流过。电阻这一名称就是由于器件阻挡电流的工作状态而得名的。电阻越大,阻力越大,电流就越小(假设电压为恒定)。

1.3 极性

需注意的是,要计算或要测量的电压和电流具有相关的方向,标准工程符号惯例(电流方向的确定与电压的极性有关)如图 1-4 中所示。图中电压电源连接到电阻(R),电阻中便有电流流通。电流 I 的方向是对正电压源画的,正电流离开电压源的正端在电阻的正端进入电阻。(记住,电流是取正电荷流动,实际上电子的流动与电流相反。)图 1-3 中展示测量仪表的连接与图 1-4 中的方向是一致的。

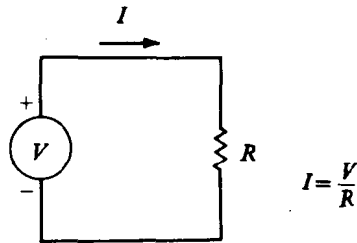


图 1-4 运用欧姆定律由电压(V)和电阻(R)计算电流(I)。

当测量直流电时,若是仪表极性接错(接反),仪表或可测出适当值,但测得的符号将相反(即 $-5V$ 将取代 $+5V$)。一般来说,数字式仪表中不成问题,读数前会出现一个负号;在模拟式仪表中,读数会越出刻度盘,假若使用的是机电表,读数会使表针的方向逆转,常造成仪表的损坏。在进行测量之前,最好是读一下操作手册,以便了解仪表的使用方法。

例 1-1

假若有 $3mA$ 电流流过 $5k\Omega$ 电阻,试计算电阻两端的电压。

运用欧姆定律,

$$V = I \cdot R = 0.003 \times 5000 = 15(V)$$

1.4 直流电

直流电(DC)是电流的最简单形式。相对时间而言,直流电流和电压为常数,图 1-5 为

直流电压^①相对时间的图形。这个图似乎未提供什么信息,因为全部时间内电压为一相同值,但是当介绍交流电时,可用来与交流电对照。

蓄电池和直流电源产生直流电压,蓄电池可提供多种电压和电流额定值。直流电源将交流电压转换成直流电压并将在第七章进行讨论。

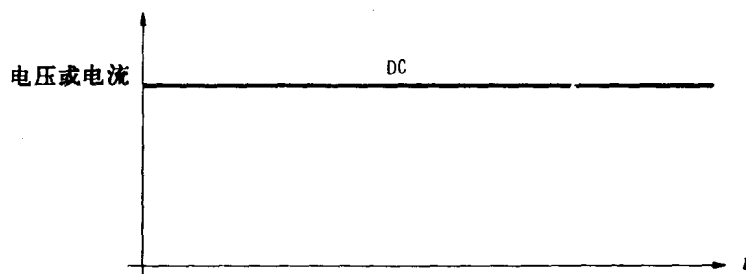


图 1-5 直流电压和直流电流对应时间为常数。

1.5 功率

功率是单位时间内所作的功。对直流电压和电流来说,功率是电压乘以电流,单位为 W:

$$P = V \cdot I$$

运用欧姆定律和简单数学,可得到表 1-1 中的关系。注意功率是依据电流和电压二者。假使没有电流的流通通道,即使电压高,也没有功率;或者若是器件两端电压为零,则即使有大电流流过该器件,也没有功率产生。

表 1-1 关于直流电压、直流电流、电阻和功率的方程式

$V = I \cdot R$	欧姆定律
$I = V/R$	欧姆定律
$R = V/I$	欧姆定律
$P = V \cdot I$	功率方程
$P = V^2/R$	电阻中的功率
$P = I^2 \cdot R$	电阻中的功率

1.6 交流电

交流电(AC),顾名思义,它和直流电不同,不随时间保持常数,它以某种频率改变方向(交替改变)。交流电的最简单形式是正弦波,如图 1-6 所示。其电流或电压从零开始,半个周期内为正,然后经过零点,在第二半周内变负。这种周期不断重复。正弦波可作为时间函数用数学式来描述。

^① 尽管 DC 一词是用来说明直流电流,通常却用它描述电压和电流二者。

$$v(t) = V_{0-P} \sin(2\pi ft) \text{ ①}$$

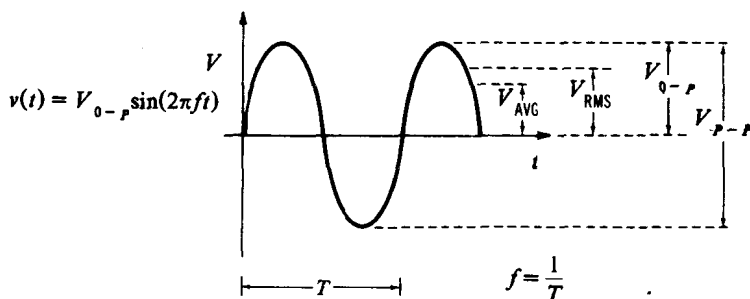


图 1-6 交流电的最简单形式是正弦波,其波形的电压可用有效值、零-峰值或峰-峰值来描述。

周期的长度以秒(s)计,被称为周期,用符号 T 表示。频率 f 是周期的倒数,单位为 Hz。频率等于每秒的周数。

$$f = \frac{1}{T}$$

频率指示一秒钟内完成多少个正弦波。例如在美国,交流电压的频率为 60Hz,意味着一秒钟内电压历经 60 周。60Hz 正弦波的周期 $T = 1/f = 1/60 = 0.0167\text{s}$

有时正弦波方程用下列形式表达:

$$v(t) = V_{0-P} \sin(\omega t)$$

式中 ω 为角速度,单位为 rad/s。

比较正弦波电压的两个方程可得

$$\omega = 2\pi f$$

以及

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

因为正弦波相对于时间不为常数,不能立即明显地描述其电压,有时它的电压为正,有时为负,每周内其电压两次为零。这个问题在直流电中不存在,因为它相对于时间为一恒定值。图 1-6 中描述了 AC 电压的 4 种不同方法。零-峰值(V_{0-P})是正弦波达到的最大值,峰-峰值(V_{P-P})是从最大正电压量至最负的电压。对于正弦波, V_{P-P} 总是 V_{0-P} 的两倍。

1.7 均方根值

描述 AC 电压的另一种方法是均方根(RMS)值(V_{RMS})。RMS 是英文均方根的缩写。为了计算波形的 RMS 值,首先应对波形的每一点进行平方;然后,找出平方后波形的平均值;最后,取平均值的平方根,就可获得 RMS 值。波形 RMS 值的数学表达式如下:

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt}$$

① $\pi = 3.14159$ (近似)

由于均方根的运算较为复杂,零至峰值或从峰至零值求平方根有些困难。故在附录 D 中为正弦波求平方根值给出了关系式,可运用该关系式直接求取,该关系式如下,详细分析见附录 D。

$$V_{\text{RMS}} = \frac{1}{\sqrt{2}}V_{0-P} = 0.707V_{0-P}$$

这一关系式只对正弦波有效,其他波形都不能使用。

1.8 平均值

有时电压用平均值(AVG)表示。严格地说,正弦波的平均值为零,因为正弦波有正负各半个周期,且两半是对称的,当取平均值时,正好正负抵消。

另一种平均值的解释是假设波形已经过全波整流。这种平均值就是数学概念上波形的绝对值(即把一周的负半周处理成正半周)。

$$V_{\text{AVG}} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |V(t)| dt$$

某些仪表就是测量 AC 波形平均值的,除非另外指明, V_{AVG} 意味着全波整流的平均值。平均的步骤见图 1-7。图 1-7a 是待全波整流的正弦波;图 1-7b 是全波整流后的正弦波

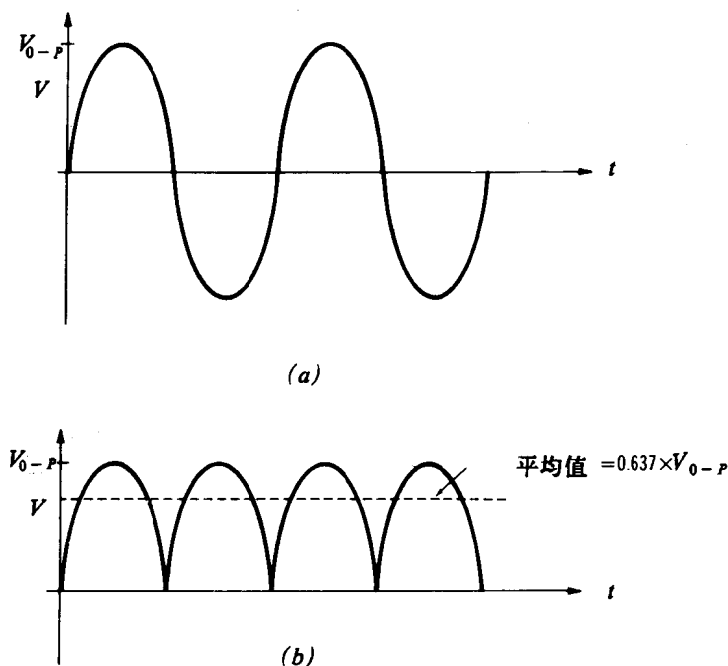


图 1-7 与求正弦波全波整流平均值有关的图形:

(a) 原先的正弦波;(b) 全波整流后的正弦波,负半周向上折成正向,然后对这一波形进行平均。

波。当原先的波形变负时,经过全波整流,负电压变为正电压,且幅度和正半周电压相同。用图形表示时,则可把负半周向上折成正半周,变成一种隆起的波形,于是可确定平均值,

如图 1-7b 中所示。 V_{AVG} 和 V_{0-P} 之间的关系取决于波形。对于正弦波,其关系式如下:

$$V_{AVG} = \frac{2}{\pi} V_{0-P} = 0.637V_{0-P} (\text{正弦波})$$

详细分析见附录 D。

1.9 巅值因子

波形的零至峰值与 RMS 值之比称为巅值因子。巅值因子是衡量波峰相对于 RMS 值有多高的量度。在某些测量仪器中,巅值因子是重要的。具有很高巅值因子的波形要求测量仪表能承受很高的峰值电压,而同时又能测量小得多的 RMS 值。

$$\text{巅值因子} = \frac{V_{0-P}}{V_{RMS}}$$

例 1-2

什么是正弦波的巅值因子?

对于正弦波, $V_{RMS} = 0.707V_{0-P}$,其巅值因子为 $1/0.707 = 1.414$ 。正弦波的巅值因子相对较低,它的零-峰值比 RMS 值大得不太多。

峰值与平均值之比称作平均巅值因子,除比值的分母用波形的平均值取代外,和巅值因子相似,它是衡量波形的峰值与平均值相比,峰值有多高的量度。

尽管以上讨论的是 AC 电压,这些概念也适用于 AC 电流。这就是说,AC 电流也能用峰-峰、零-峰、RMS 和 AVG 来描述。

1.10 相位

电压说明正弦波的幅度或高度,频率(或周期)说明正弦波完成一周的频繁程度。但频率相同的两个正弦波可能在同一时刻不在零点相交。因此,运用正弦波的相位来确定它们在时间轴上的位置。相位的单位为度($^{\circ}$),正弦波一周的相位分成 360° 。

包括相位项的正弦波的表达式可改写为:

$$v(t) = V_{0-P} \sin(2\pi ft + \theta)$$

方程中隐含着相位是绝对值,即是说,相位角以时间瞬间 $t=0$ 为参考。实际上,通常没有这种通用的时间,相位是一种相对概念。换句话说,我们通常是谈两个正弦波之间的相位,而不是单一、独立正弦波的相位(除非提供有其他时间参考)。

例如,图 1-8a 中两个正弦波分开 $1/4$ 周期(它们达到它们的最大值相距 $1/4$ 周期)。因为一周等于 360° ,所以两个正弦波的相位差为 90° 。详细一点说,就是第二个正弦波比第一个正弦波滞后 90° ;或者说,第二个正弦波相对第一个正弦波有 -90° 的相位(第一个正弦波相对第二个正弦波有 $+90^{\circ}$ 的相位)。或者说,第一个正弦波超前于第二个正弦波 90° ,或第二个正弦波滞后第一个正弦波 90° 都是正确的。所有这些叙说都是说明同样的相位关系。

图 1-8b 展示两个正弦波相距半周(180°),这是一种特殊情况,这里一个正弦波是另

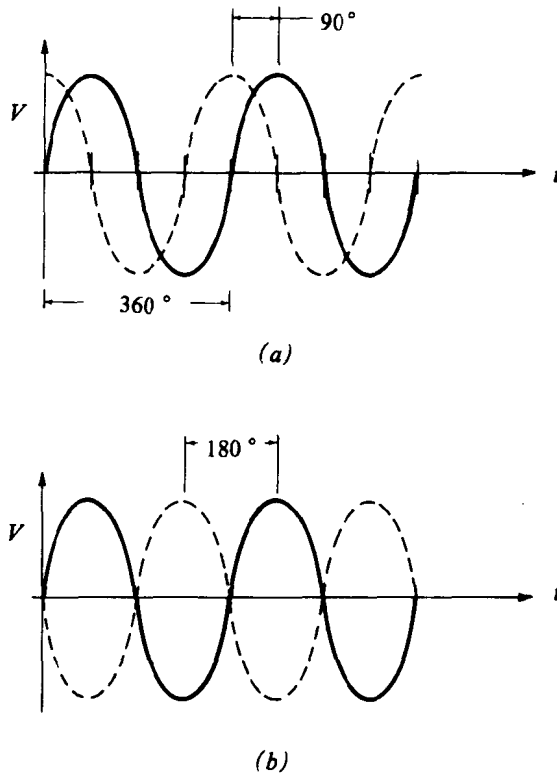


图 1-8 正弦波的相位确定它在时间轴上的相对位置：
(a) 两正弦波之间的相位差 90° ；(b) 两正弦波相位差 180° 。

一个的负向波。两个正弦波之间的相位关系简单地确定一个正弦波相对另一正弦波移开有多远。当一个正弦波移动 360° 时，它移动了完整的一周，就与原先的波形没有区别了。因此，通常规定相位在 360° 范围内，一般为 -180° 至 $+180^\circ$ 。

1.11 交流电功率

电阻上有 AC 电压时，电阻消耗的平均功率为

$$P = V_{\text{RMS}} I_{\text{RMS}} = \frac{V_{\text{RMS}}^2}{R} = I_{\text{RMS}}^2 \cdot R$$

只要是使用电压和电流的 RMS 值，这一关系适用于任何波形，这些等式如同在 DC 情况一样有相同的形式，这就是使用 RMS 值的理由之一。RMS 值通常称为有效值，因为已知 RMS 值的 AC 电压与相同数值的 DC 电压产生相同效果（功率方面的效果）[10V AC (RMS) 电压和 10VDC 电压两者对 5Ω 电阻提供相同的功率]。此外，两个具有相同 RMS 值的 AC 波，对同一电阻将产生同样的功率，至于零-峰值电压和峰-峰值电压，上面的说明就不适用。因此，对功率来说，RMS 值是最有用的。

例 1-3