

号的参数及测量方法

9.1.1 信号电压的测量

电压测量是电子电路测量的一个重要内容。在集中参数电路里，电压、电流和功率是表征电信号能量的三个基本参量。从测量的观点来看，测量的主要参量是电压。因为在标准电阻的两端若测出电压值，那么就可以通过欧姆定律计算求得电流和功率。很多电子仪器和电子设备，它们的许多工作特性均可视为电压的派生量，都用电压表作指示装置构成辅助监控设备。因此，电压测量是其他许多电参量和非电量测量的基础。

用电压表进行电压测量时，要根据被测信号的特点（如频率的高低、幅度的大小及波形等）和被测电路的状态（如内阻的数值等）正确选择电压表。模拟式电子电压表是将被测电压通过检波与放大，产生与被测电压幅度成正比的直流电流，最后由磁电式电表指示出被测电压的大小。磁电式电表本身就可以做成电压表，但这种电表只能测直流。增加检波环节可以把被测的交流电压转换为直流电压，然后用磁电式电表测量。这样，虽然可以解决用直流电表测量交流电的问题，但灵敏度不高，当被测电压的数量级较小时，往往不能使指针偏转，指示不出被测电压的数值。磁电式电压表的内阻也不够大，当被测元件或系统具有较大阻抗时，电压表内阻在一定程度上会将被测元件或系统分流，从而破坏电路工作状态，使仪表所指示的电压不是真实值。磁电式电压表工作频率也不高，如果被测电压的频率较高时，仪表的读数将比真实值小。因此，一般模拟式电子电压表除了加入检波环节外，还附加阻抗转换、电压放大等环节，从而实现更宽范围的电压测量。

信号电压的测量要求具有如下特点：

- (1) 灵敏度高。由于模拟式电子电压表中采用放大电路，把被测的电压进行放大，所以使微弱的被测电压也能用磁电式电表进行测量，这就提高了灵敏度，可以测量几个微伏数量级的电压。
- (2) 输入阻抗大。模拟式电子电压表的输入阻抗可以达到兆欧数量级，当它与被测元件或系统并联进行测量时，对电路工作状态的影响很小，于是增加了测量结果的真实性。
- (3) 频率范围宽。它可以测量频率从超低频到几百兆赫的交流信号，而普通的磁电式交流电压表仅能测量工频电压。
- (4) 可以测量多种波形的信号。可以测量方波、三角波等非正弦信号的有效值、平均值或峰值。而普通的磁电式电压表只能测量波形失真小于5%的正弦信号的有效值，当波形失真大于5%时，将引入很大的误差；对于各种非正弦波，则根本不能测量。

由于模拟式电子电压表具有这些独特的优点，并且结构简单、造价低廉、使用方便、维护简单，因此，广泛地被应用于科研、生产和计量测试之中。

9.1.2 模拟式电子电压表

为了满足不同测量对象的要求，模拟式电子电压表分为多种类型。下面介绍几种比较典型的模拟式电子电压表的基本原理。

1. 放大—检波式电压表

放大—检波式电压表是先将被测交流电压经交流放大器放大后，再加入到检波器上进行检测，

最后用直流电流表指示读数。其原理方框图如图9-1所示。

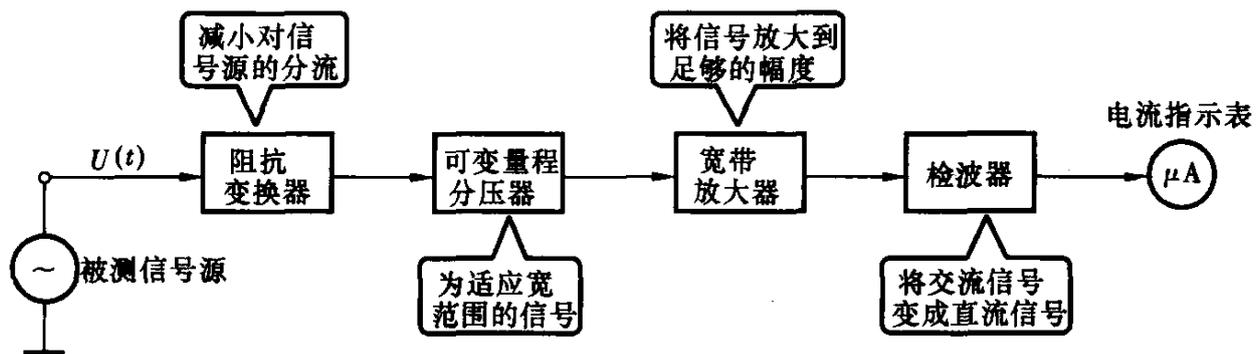


图9-1 放大—检测式电压表原理方框图

这种电压表的交流放大器采用了多级宽频带放大器，从而提高了电压表的灵敏度，可以测量几微伏到数千伏的交流电压。所以它又称为“晶体管（或电子管）毫伏表”。其频率范围主要受到放大器频带宽度的限制，一般只能达到几百千赫，通常作为低频电压测量。由交流放大器来提高灵敏度不存在像直流放大器那样的漂移问题。在放大—检波式电压表中的检波器，多数采用平均值检波器。由于进入检波器的电压已经放大，故可避免检波器工作在小信号时检波二极管产生的非线性。

2. 检波—放大式电压表

这种电压表是先将被测交流电压检波器检波转换成直流电压，然后加到直流放大器进行直流放大，再利用直流微安表指示读数。其原理方框图如图9-2所示。

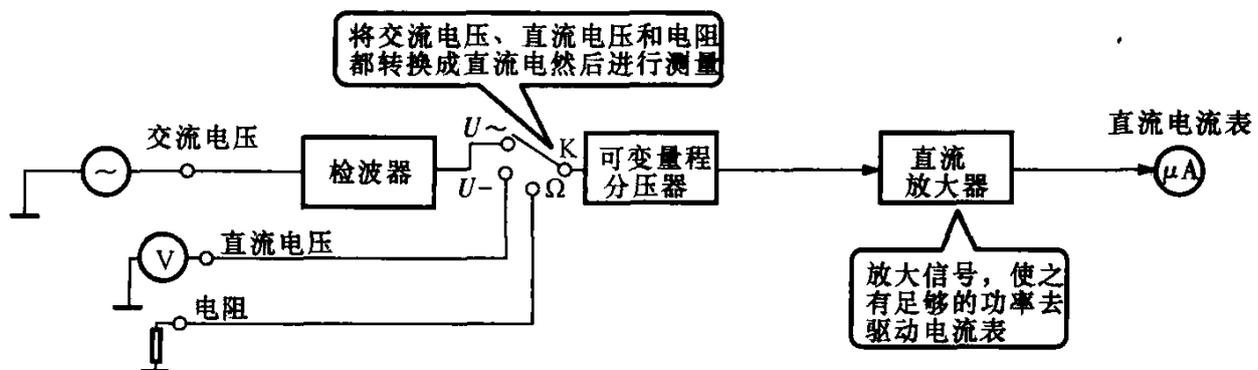


图9-2 检波—放大式电子电压表原理方框图

这种结构的电压表，不仅可以测量交流电压，而且还能测量直流电压和电阻，故又称之为“电子多用表”。在检波—放大式电压表中，一般采用并联式或倍压式峰值检波器。由于先检波后放大，故频率范围、输入阻抗等性能都主要取决于检波器。为了提高测量频率的上限，则选用结电容小的超高频检波二极管和体积小的电容器，并把检波器作成探头的形式，使其直接接触被测电路，这样就大大减小了各种分布参数对高频电压测量的影响。结构优良的探头，输入电容可小于 $1\sim 2\text{pF}$ ，可测的电压频率范围可达几百MHz。因此，超高频电压表多采用这种先检波后放大的测量方案。由于检波器在放大器之前，受检波器件非线性的影响，测量微弱电压时，外界干扰就特别明显。因此，这种电压表的灵敏度将受到限制，一般不做成毫伏计，其测量范围在0.1V到数千伏之间。

由于采用直流放大器会引起零点漂移，影响电表的读数。所以，对电源电压的稳定度要求比较高，故要采用稳压措施。

综上所述，两种类型的模拟式电子电压表各有特点，要根据需要选择使用。

3.交流一直流变换

模拟式电子电压表通常都是用检波器将交流电变为直流电来进行测量的，检波器是各种类型的交流电压表的核心。交流电压的大小，可以用峰值、平均值或有效值来表征。电压表常用的检波器有三种：峰值检波器、平均值检波器和有效值检波器。

(1) 交流电压的表征。

1) 峰值 U_p 。任意一个周期性的交流电压 $u(t)$ ，在一个周期内所出现的最大瞬时值，称为该交流电压的峰值，以 U_p 表示。峰值有正峰值(U_{p+})和负峰值(U_{p-})之分，其几何意义如图9-3所示。

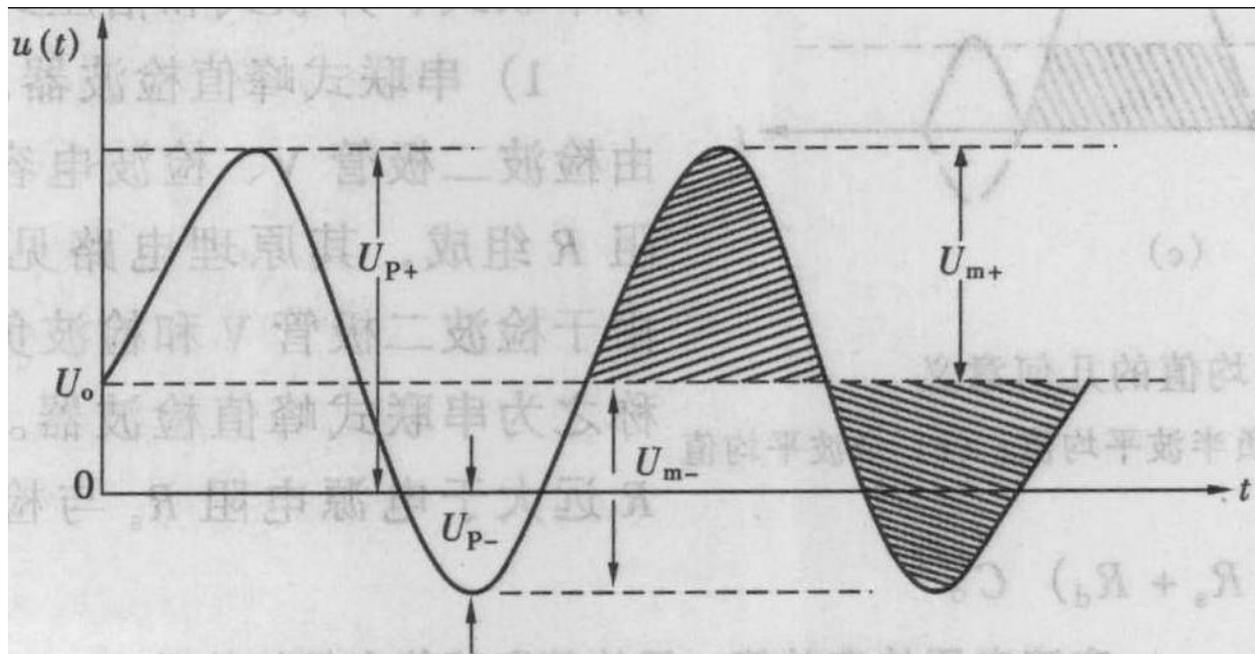


图9-3 交流电压的峰值

峰值与振幅值的概念不同，峰值是从参考零电平开始计算的，而振幅值是以交流电压中的直流分量为参考电平计算的。当电压中包含直流分量时，振幅值与峰值是不相等的，当电压中的直流分量为零时，则峰值等于振幅值。

2) 平均值 \bar{U} 。由于在实际电压测量中，总是将交流电通过检波器变换成直流电压再进行测量。因此，在电压测量中，平均值一词通常是指交流电压检波以后的平均值。根据检波器的种类又分为半波平均值和全波平均值。交流电压经半波检波以后，剩下半波脉冲的平均值称为半波平均值，以

$$\bar{U}_{1/2}$$

表示。半波平均值又分为正半波平均值（

$$\bar{U}_{+1/2}$$

和负半波平均值

(

$$\bar{U}$$

-1/2)。交流电压经全波检波后的平均值称为全波平均值，以

$$\bar{U}$$

表示。平均值的几何意义如图9-4所示。

对于不含直流成分的纯交流电压来说，

$$\bar{U}$$

=2

$$\bar{U}$$

+1/2=2

$$\bar{U}$$

-1/2。在电压测量中，如不加说明，平均值就是指的全波平均值。

3) 有效值。有效值的物理意义是：交流电压一个周期内，在一纯电阻负载中所产生的热量与另一个直流电压在同样情况下产生的热量相等时，这个直流电压的值就是该交流电压的有效值，记为U。

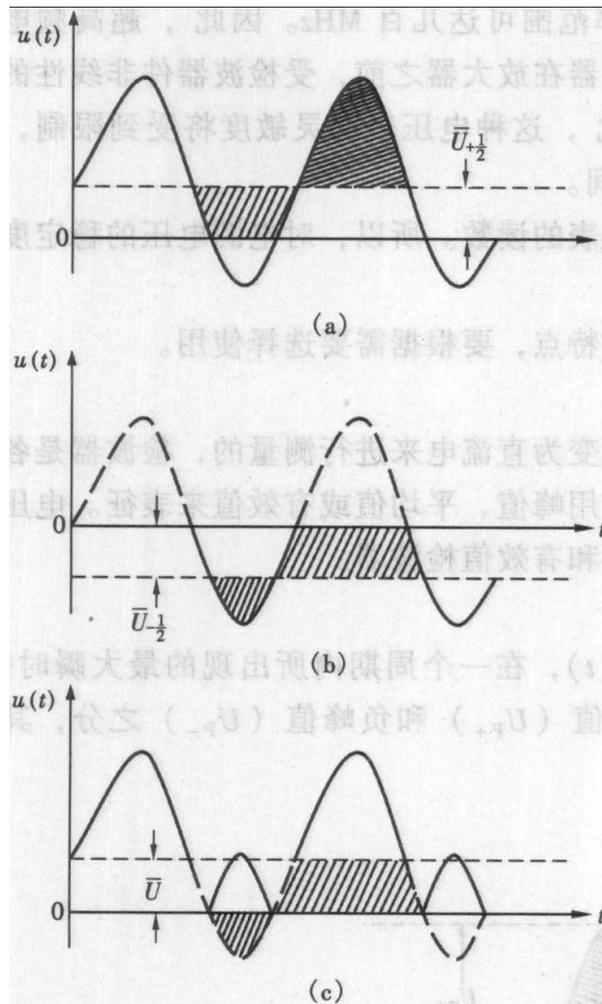


图9-4 平均值的几何意义

(a)正半波平均值; (b)负半波平均值; (c)全波平均值

有效值比峰值、平均值的应用更为普遍。例如通常说某一交流电压多少伏，几乎毫无例外都是指有效值。种类电压表的示值，除特殊情况外，一般都是按正弦波有效值定度的。

正弦波交流电压的平均值、有效值与峰值之间的关系如图9-5所示。其换算关系见表9-1。

若被测电压是非正弦波信号时，交流电压的有效值、平均值和峰值之间的关系见表9-1。不同波形的峰值、有效值和平均值实例如图 9-6所示。

(2) 峰值检波器。峰值检波器输出的直流电压正比于输入交流电压的峰值。其主要形式有串联式、并联式和倍压式等几种。

1) 串联式峰值检波器。串联式峰值检波器由检波二极管V、检波电容器C和检波负载电阻R组成，其原理电路见图9-7 (a) 所示。由于检波二极管V和检波负载电阻R串联，故称之为串联式峰值检波器。这里要求负载电阻 R远大于电源电阻 R_s 与检波二极管正向电阻 R_d 之和， 则 $RC \gg (R_s + R_d) C$ 。

表9-1 交流电压的有效值、平均值和峰值之间的关系

| | | | | |
|------|-----|------|----------|----------------|
| 换算方法 | 平均值 | 有效值U | 峰值 U_P | 峰-峰值 U_{P-P} |
|------|-----|------|----------|----------------|

| | | | | |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| | \bar{U} | | | |
| 按平均值换算 | | 1.11 | 1.57U | 3.14 |
| | \bar{U} | \bar{U} | | \bar{U} |
| 按有效值换算 | 0.900U | U | 1.414U | 2.83U |
| 按峰值换算 | 0.637U _P | 0.707U _P | U _P | 2.00U _P |
| 按峰-峰值换算 | 0.318U _{P-P} | 0.354U _{P-P} | 0.500U _{P-P} | U _{P-P} |

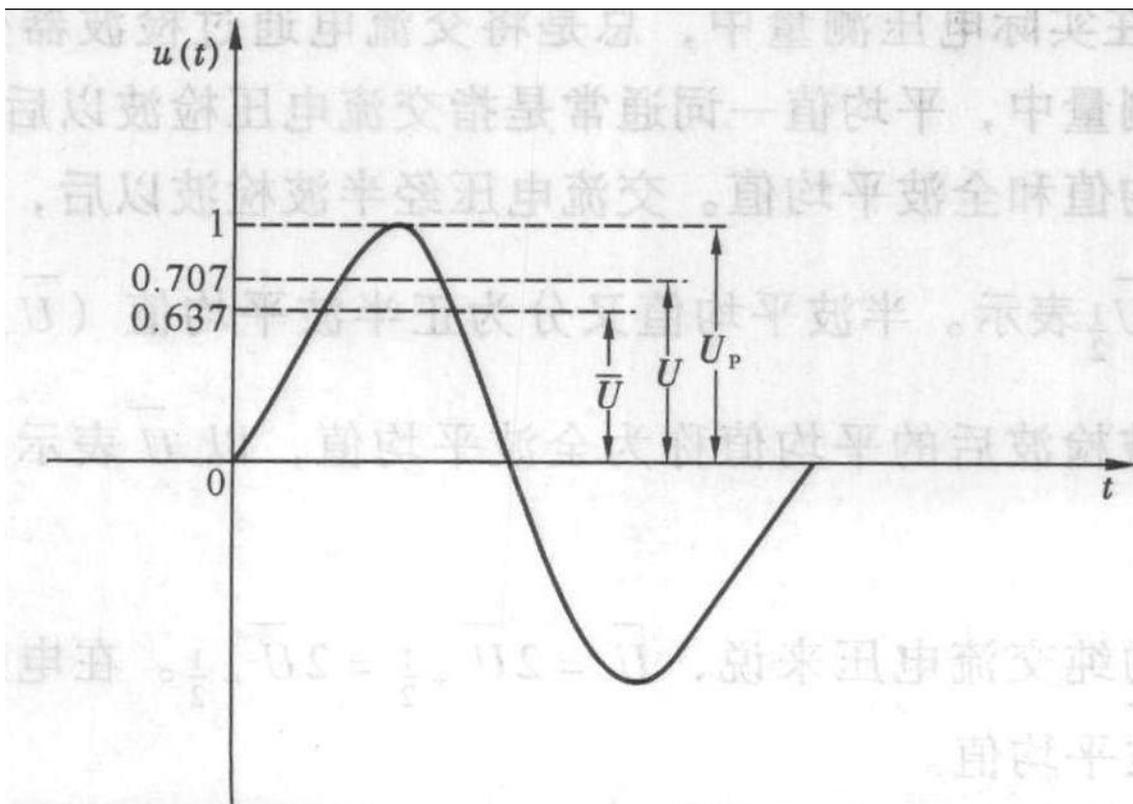


图9-5 正弦波交流电压的平均值、有效值与峰值的关系

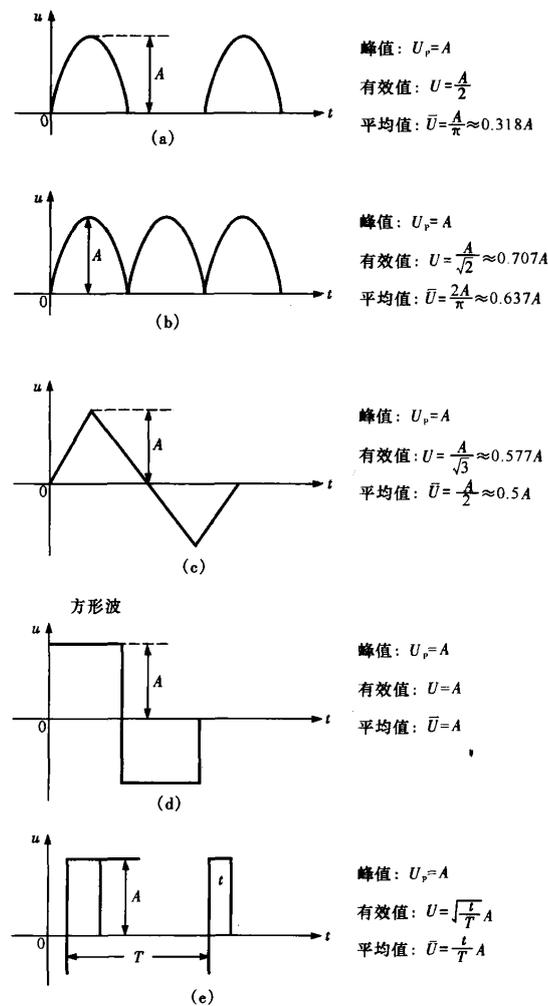


图9-6 不同波形的峰值、有效值和平均值实例

(a) 正弦波半波整流后的波形; (b) 正弦波全波整流后的波形;

(c) 三角波; (d) 方形波; (e) 脉冲波

当峰值检波器的输入电压 $u_x(t)$ 为正半周时, 二极管 V 因加正向电压而导通, 电容 C 被充电。因为充电时间常数小, 充电电流 i_C 较大, 故电容器被迅速充电, 其端电压很快随着被测电压上升到峰值。然后, 被测电压从峰值下降时, 电容器电压下降很慢。当被测电压小于电容器电压时, 二极管则很快被电容器电压反向偏置所截止。这时, 电容器开始通过电阻 R 进行放电。因放电时间常数大, 放电电流 i_r 很小, 所以电容器端电压下降非常缓慢。这个过程一直维持到被测电压下一个周期正半周上升到超过电容器的端电压时, 二极管将再次导通, 电容器恢复充电, 使其端电压又一次达到被测电压的峰值。

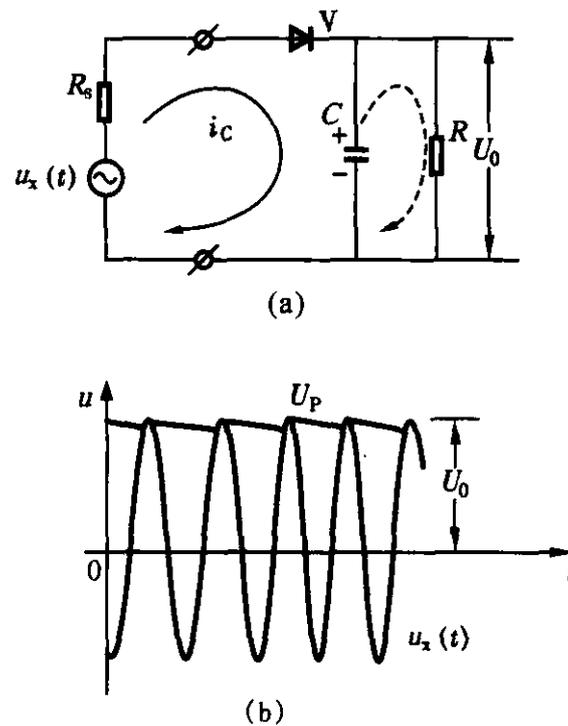


图9-7 串联峰值检波器

(a) 电路图; (b) 波形图

由此可见，由于检波电容器C能快速充电，而又极缓慢地放电，故使电容器两端的平均电压 U_0 与被测电压的峰值 U_p 近似相等，其工作波形如图9-7(b)所示。如果用一个高内阻的直流电压表来检波负载电阻R上的电压，就可以直接用来测量交流电压的峰值。但在一般情况下，其刻度仍以正弦电压的有效值定度。

用峰值交流电压表测量非正弦交流电压时，电压表仍然可以反映出被测电压的峰值。但由于电压表刻度是以正弦波有效值定度的，它比正弦波峰值小

$$\sqrt{2}$$

倍，因此，必须把指示值乘以

$$\sqrt{2}$$

倍才能表示被测电压的峰值，而要知道被测电压的有效值时，必须根据其波形的性质，按表9-1所示的关系换算出有效值。

【例9-1】 用峰值电压表测量三角波电压，读数为10V，试求被测电压的峰值和有效值为多少。

解 被测三角波电压的峰值为

$$U_p = 10 \times$$

$$\sqrt{2}$$

$$\approx 14.14(\text{V})$$

(9-1)

被测三角波电压的有效值为

$$U = U_p /$$

$$\sqrt{3}$$

$$= 14.14 \times 0.577 \approx 8.16(\text{V})$$

(9-2)

当被测电压中含有直流分量时，因为串联式峰值检波器没有隔直电容器，所以测出的电压不仅仅是交流分量的振幅值，也包含有直流分量在内。当被测电压为不对称波形时，若用信号正半周向检波电容器充电，电压表反映的是正半周的峰值电压；如果将被测电压反极性与电压表连接，则测出的是负半周的峰值电压。显然，测得的正、负两半周的峰值电压值是不会相等的。因此，仪器常采用并联式峰值检波器。

2) 并联式峰值检波器。并联式峰值检波器电路如图9-8(a)所示。当输入电压 $u_x(t)$ 为正半周时，二极管 V 导通，电容器 C 被充电。充电时间常数小，充电电流 i_C 较大，电容器的端电压很快随着被测电压上升到峰值。当被测电压从峰值下降小于电容器端电压或是负半周时，二极管反偏截止，电容器 C 通过信号源内阻 R_s 和检波负载电阻 R 放电，放电时间常数很大， i_r 很小，放电十分缓慢。如此循环往复，使电容器两端电压 u_c 的平均值近似等于被测电压的峰值 U_p 。电阻 R 上的电压 u_R 就等于电容器电压 u_c 与被测交流电压 $u_x(t)$ 之和，即 u_R 是钳位在零电平之下的正弦波，其工作波形如图9-8(b)所示。经过 R_f 、 C_f 滤波后，取 u_R 中的直流分量 U_0 (即 u_c 的平均值)从 C_f 两端输出，它等于被测交流电压的峰值 U_p ，符号为负。

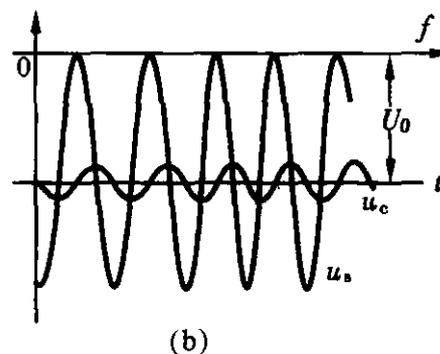
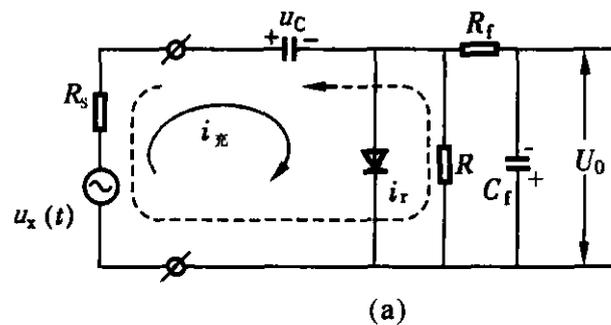


图9-8 并联式峰值检波器

(a) 电路图; (b) 波形图

在并联式峰值检波器中，当被测电压为对称的正弦波时，检波器输出的直流电压正比于正弦波的峰值电压，电压表的刻度也按有效值定度。

并联式峰值检波器的检波电容 C 还具有隔断被测电压中直流分量的作用，不但可以保护检波二极管不被击穿，而且使测量的结果始终为交流分量的振幅值。因此，实用上多采用并联式峰值检波器。

在峰值检波器电路中，应满足电容器的充电时间常数远小于被测信号的最小周期和放电时间常数远大于被测信号的最大周期的条件，这样，检波器输出的直流电压才能近似等于被测交流电压的峰值。

由上述可见，峰值检波器中电容器因充放电时间不等而维持其上电压为输入电压的峰值，检波二极管只有在一个周期的很小部分（输入电压峰值附近）导通，故峰值检波器的输入阻抗很大，可以直接接到被测电路测量，而不致改变被测电路的工作状态。同时，为了避免引线电感和分布电容对测量的影响，常把检波器做成一个精巧的探头，就近接到被测量点，以尽量缩短测量引线。由于检波电阻 R 很大，不能直接串接电流表来测量，因此，峰值检波器后面必须接输入阻抗大而输出阻抗小的阻抗变换电路（如射极跟随器）及放大器等，组成检波—放大式电子电压表。因为放大器是放大检波后的直流电压，所以必须是直接耦合放大器，并要求其增益高而零漂小，输入阻抗要大，输出阻抗要小。

(3) 平均值检波器。平均值检波器输出的直流电压（或流过指示电流表的电流）正比于输入交流电压的平均值。平均值检波器有半波式和全波式两种，图9-9 (a)、图9-9 (c) 所示的为半波平均值检波器，图9-9 (b)、图9-9 (d) 所示的为全波平均值检波器。

平均值检波电路中，与微安表并联的电容器 C 是用来滤除检波后电流中的交流成分，以避免表针因流过交流电流而抖动，并消除其在微安表动圈电阻上产生的热损耗。流过微安表的电流正比于被测电压的半波平均值或全波平均值，由于电流表动圈转动的惯性，其指针将指示其平均值。

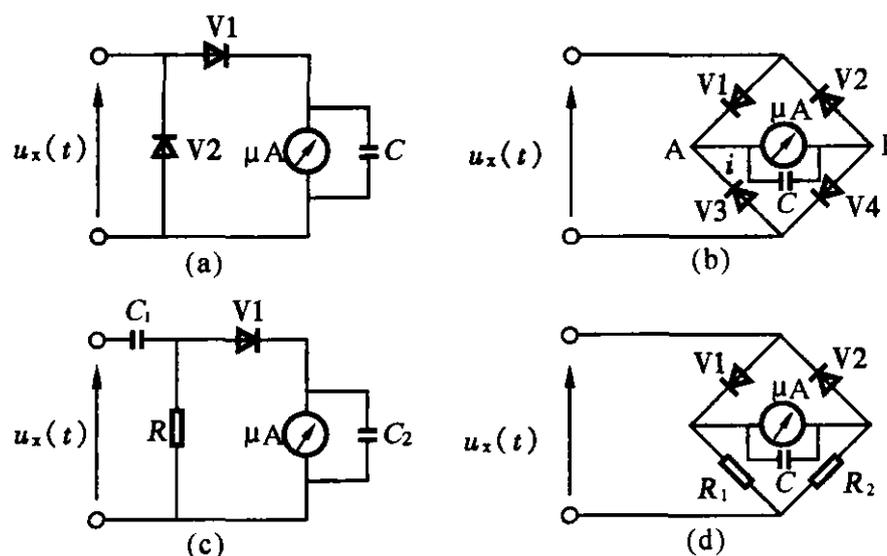


图9-9 平均值检波器

(a)半波平均值检波器(一); (b) 全波平均值检波器 (一);

(c) 半波平均值检波器 (二); (d) 全波平均值检波器 (二)

下面以图9-9 (b) 为例，分析平均值检波器的工作原理。这是一个全波平均值检波电路。设被测电压为 $u_x(t)$ ，四个检波二极管V1~V4具有相同的正向电阻 R_d 和反向电阻 R_r ，微安表的内阻为 r_m 。 u_x 上正下负时，V1、V2导通，通过表头的电流如箭头所示； u_x 下正上负时，V3、V2导通，通过表头的电流仍为同一方向。经电容C滤到头交流分量后，由于二极管正向导通而流过微安表的正向平均电流为

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{|u_x(t)|}{2R_d + r_m} dt = \frac{\bar{U}}{2R_d + r_m} \quad (9-3)$$

式中， U 为 $u_x(t)$ 的全波平均值。由于二极管反向漏电而流过微安表的反向平均电流为

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{|u_x(t)|}{2R_r + r_m} dt = \frac{\bar{U}}{2R_r + r_m} \quad (9-4)$$

综合式 (9-3) 和式 (9-4)，可以得出流过微安表的实际平均电流为

$$\bar{I} = \bar{I}_1 - \bar{I}_2 = \bar{U} \left(\frac{1}{2R_d + r_m} - \frac{1}{2R_r + r_m} \right) \quad (9-5)$$

一般 $R_d = 100 \sim 500 \Omega$ ， $r_m = 1 \sim 3 \text{k}\Omega$ ，而 $R_r > 100 \text{k}\Omega$ ，故有

$$\bar{I} \approx \frac{\bar{U}}{2R_d + r_m} \quad (9-6)$$

由式 (9-6) 可见，流过微安表的电流值正比于检波器输入电压的平均值，故检波器电流表的读数正比于被测电压的平均值。在式 (9-6) 的推导过程中，并未涉及被测电压的波形，所以在平均值检波器中，不论被测电压是什么波形，流过微安表的电流都与被测电压的平均值成正比。

由于正弦波是最基本的和应用最普遍的波形，同时考虑到有效值的实际意义，所以平均值电压表亦按有效值定度。如果是全波平均值检波器，则根据正弦波有效值与平均值的换算关系，电压表的刻度就是按被测交流电压的平均值乘以系数1.11后定度的。当用这种电压表去测量非正弦电压时，因为非正弦电压时，非正弦波的有效值与平均值的比值同正弦波不一样，其读数并不等于被测电压的有效值。这时，可先将电压表的读数除以1.11求出被测电压的平均值，然后再根据表9-1所示的该波形换算关系，求出被测的非正弦电压的有效值，也可以求出其峰值。

【例9-2】 用平均值检波器组成的电压表测量三角波电压，读数为10V，求被测电压的峰值、有效值各为多少。

解 先求出被测电压的平均值

$$\bar{U}$$

$$=10/1.11 \approx 9(\text{V})$$

(9-7)

再根据三角波电压峰值与平均值的换算关系求出其峰值

$$U_p = 2U = 2 \times 9 \approx 18(\text{V})$$

(9-8)

最后根据三角波电压有效值与峰值的换算关系求出其有效值

$$U = 0.577U_p = 0.577 \times 18 \approx 10.4(\text{V})$$

(9-9)

如果交流电压表采用半波平均值检波器，那么，检波器微安表指示值正比于被测电压的半波平均值。一般这种电压表也是按正弦波的有效值定度的，即电压表按测得的半波平均值乘以2.22后定度。同样，这种交流电压表只有在测量正弦波电压时，其指示值才是有效值；当测量非正弦波电压时，其指示值没有直接物理意义，只有把它除以2.22后才是被测电压的半波平均值，然后可以由被测电压的有效值与半波平均值之间的关系求得其有效值。

平均值检波器与峰值检波器在电路形式上虽相同，但二者却有很大差别：峰值检波器中电容器的充电时间常数比放电时间常数短得多；而平均值检波器中的电容器充、放电时间常数近似相等。

平均值检波器中，由于在被测电压整个周期内都导电，故其输入阻抗很低。一般在检波器前面接有放大器，组成放大一检波式电子电压表，以提高电压表的输入阻抗和灵敏度。对放大器的要求是：放大倍数足够大，以提高灵敏度；增益稳定以减小测量误差；输入阻抗高以避免对被测电路的影响；输出阻抗低以便连接检波器；通频带宽以使可测电压频率范围宽。

放大一检波式电压表中的检波器，由于加到其输入端的电压是经过交流放大器放大以后的被测电压，一般均较大，在1V以上，故可认为检波器工作于线性区，一般对检波二极管的非线性影响可不考虑。但是，当电压表指示值在靠近零的区域时，加到检波二极管上的信号仍较小，二极管的正向电阻大，检波灵敏度降低，造成微安表刻度起始部分的非线性。实际生产的平均值检波器电压表都采取线性化措施。目前，多数平均值检波器电压表都采用负反馈技术来实现线性化。DA-16型晶体管毫伏表检波电路就是把检波器输出直接反馈到前级放大器输出级VT5的发射极，如图9-10所示。由输出管VT6输出的正弦交流电压使V1和V2轮流导通，故A点和B点对地的电压 U_A 和 U_B 分别成半波波形，反馈电压 U_C 正比于 $(U_A + U_B)$ ，即合成一个完整的正弦波，从而构成串联电压负反馈。这个电路的线性化作用说明为：若测量小电压，放大器VT6输出的电压幅度很小，即二极管工作在小信号检波状态，这时通过二极管的平均电流很小，由于检波管V1、V2的非线性，其阻值较大，从而负反馈电压 U_C 减小，结果放大器增益提高，使输出电压幅度有所增加，检波电流也有所增加，如负反馈设计恰当，它可补偿由于二极管非线性而使检波所得平均电流的减小，从而完成了刻度特性的线性化。

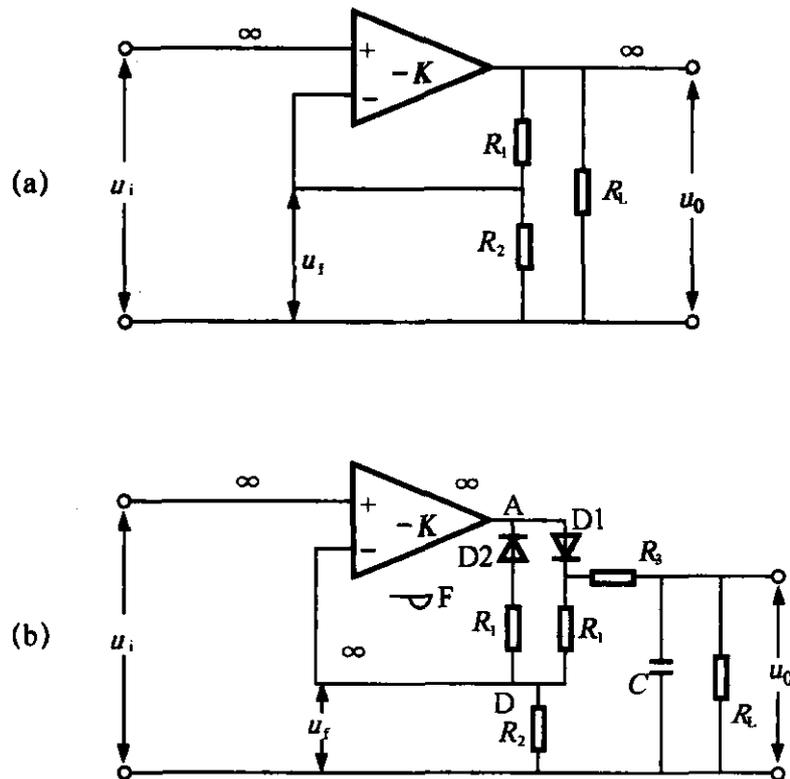


图9-11 同相放大器与平均值检波电路

(a)用运算放大器做的同相放大器;

(b)负反馈线性平均值检波电路

该检波电路从输入端到B点的增益 (对于正半周) 决定于包括二极管在内的放大器开环增益 K_0 和电阻 R_1 、 R_2 , 而 K_0 是运算放大器开环增益 K 和二极管检波器传输系数 K_d 的乘积, 一般 $K_d > 1/2$, 只要 K 足够大, 则 $|K_0| = k k_d \gg 1$ 。对于正半周, B点电压为

$$u_B \approx \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) u_i \quad (u_i > 0)$$

(9-11)

由式 (9-11) 可见, u_B 正比于 u_i 的半波检波电压, 与 k_d 无关, 即检波器的线性很好。如果在它的后面接一低通滤波器 (图9-11 (b)中的 R_3 、 C) 滤除交流分量, 在负载电阻 R_L 上得到的直流电压便正比于输入电压的半波平均值。在实际电路中, 可调整 R_2 与 R_1 的比值, 使电压表测量正弦电压时的指示值等于它的有效值。

(4) 误差分析。

1) 磁电式电流表的误差。磁电式电流表是模拟式电子电压表不可缺少的指示装置, 常用的表头精确度一般从0.5%~1.5%不等, 即满度允许误差为 $\pm 0.5\% \sim \pm 1.5\%$ 。

2) 检波器各元件性能不稳定产生的误差。检波元件老化时将引起附加误差。一般检波二极管的反向电阻很大, 而电流表的内阻变化很小, 因此, 对量测误差影响最大的因素是二极管正

向电阻的不稳定性。由于温度等的变化，晶体管放大器的输出电阻和二极管的正向电阻均可能发生变化，从而引起测量误差。为减小其影响，除选择稳定性好的元、器件外，在电路设计上也可采用一些措施，例如加负反馈等。

3) 理论误差。用峰值检波器做成的电子电压表测正弦交流电压时，检波电容上的直流电压可以近似等于被测电压的峰值。因为检波二极管有一定的内阻，在二极管导通时期，它使电容器不可能完全充到被测电压的峰值；同时，负载电阻也不可能是无穷大，在二极管截止期间，已充电的电容器上的电压要缓慢下降，所以，电容器上的平均电压必然要比被测电压的峰值小，使读数总是偏低。这是峰值检波器所存在测量原理上的误差，故称之为理论误差或基本误差。经分析与计算表明，当检波器负载电阻 R 的数值大于 $5M\Omega$ 时，由此所致的理论误差不超过 0.5% ，这时对测量结果的影响一般可以不考虑。

4) 频率误差。首先分析峰值检波器的频率误差。实现峰值检波的一个条件是检波电容器的放电时间常数 RC 要比被测电压的周期大很多。当检波器的放电时间常数 RC 一定时，则放电的速度就一定。如果被测信号的频率愈低，即周期愈长，检波电容的放电时间亦愈长，电容器上的平均电压 U_C 就愈低，不能保持在峰值电压附近，这个现象反映在电压表上，就是随着频率的降低，电压表的指示值低于被测电压的实际值，所以称为低频误差。

低频误差为一负误差，且随频率的降低而增大。由图9-12所示，同一个放电时间常数的峰值检波器，在不同频率下，电容器上的平均电压 U_C 是不同的。频率越低， U_C 越明显地低于被测电压的峰值。

为了扩展检波器工作频率的下限，减少低频误差，可增大负载电阻 R 和检波电容 C 。但是 R 与 C 的增大都是有限度的。负载电阻的最大数值要受到电路与机壳之间绝缘电阻的限制；过大的电容器，其体积、分布参数、损耗也随之增大，对高频工作不利。在实际的检波器中，往往随工作频段不同，选用的检波电容也不同，即在低频段工作时用大容量电容器，高频段工作时选用小容量电容器。

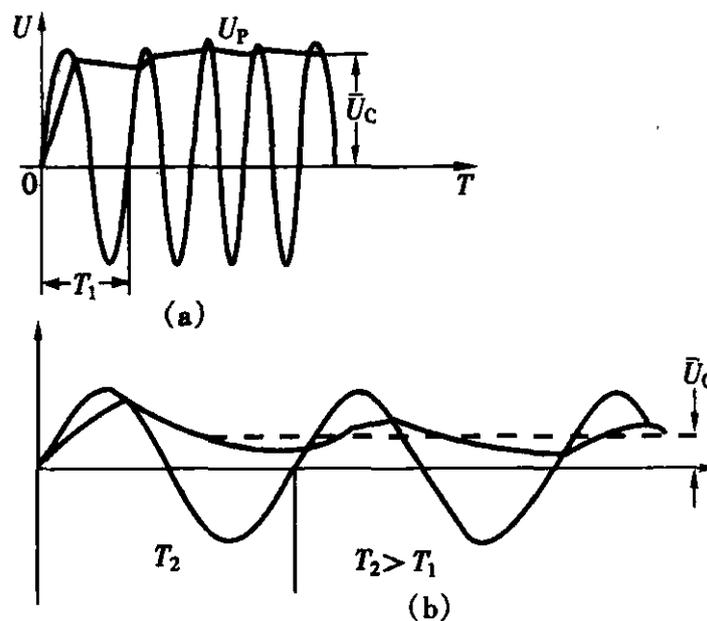


图9-12 信号频率对峰值检波器的影响

(a)频率高时; (b)频率低时

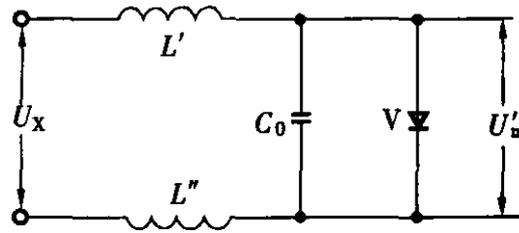


图9-13 检波器高频等效电路

从峰值检波条件看，对频率高端是没有限制的。产生高频误差的主要原因是，检波器实际结构中存在的各种分布参数的影响，以及检波管的高频参数的作用。检波器中，从两输入端到检波管、电阻、电容之间都有一定的引线（包括各元、器件本身的几何长度及其引线），故总存在着引线电感，以及各种复杂的分布电容，它们的等效电路如图9-13所示。图中， L' 、 L'' 为等效引线电感， C_0 为等效分布电容， U_x 为加到检波器的被测电压，其振幅值为 U_m ， U'_m 为检波管实测的电压振幅值。此电路的固有谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_0(L'+L'')}} \quad (9-12)$$

当测量信号频率 f 达到谐振频率的1/10，即 $f=f_0/10$ 时，分布参数引入的误差为1%；当 $f=f_0/2$ 时，分布参数引入的误差为25%。要减小分布参数引入的谐振误差，应当尽量减小分布参数。因此，在高频及超高频的检波—放大式电子电压表中，其检波器都做成探头的形式。在实际使用时，应尽量使探针靠近被测对象，接地线也应尽量短。

平均值检波器在工作频率很低时（在10Hz以下），微安表的指针来不及稳定在检波电流的平均值，而有明显的抖动，使指示不确定。当工作频率很高时，检波电路的分布电容和二极管PN结电容等的分路作用使灵敏度下降，造成测量误差。

作为采用平均值检波器的放大—检波式电压表来说，影响电压表频率范围的主要因素是交流放大器，交流放大器增益与带宽的矛盾决定了频率误差的大小。

频率误差为系统误差，有条件时，可针对一台具体的仪器，通过计量得出校准曲线，以减小频率误差和在一定程度上扩展频率范围。

仪器说明书中，给出的频率附加误差或频率影响误差是上述各种频率误差的综合结果，并且是针对该类仪器给出的允许误差限。

5) 波形误差。除特殊情况外，用任何类型检波器作成的交流电压表，其读数都是按纯正弦电压的有效值定度的。然而，实际工作中纯正弦是少见的。经常遇到的被测电压有两种类型：一类是失真的正弦波，除基波成分外，还有各次谐波；另一类是各种非正弦波，如方波、三角波、脉冲波及噪声等。当电压表测量失真的正弦波时，尤其是测量各种非正弦波时，由于波形而引起的误差往往是很严重的。从正确使用电压表的角度来看，了解波形误差是十分必要的。

a. 峰值检波器的波形误差。峰值检波器测量交流电压的指示值，只有在被测电压为正弦波时才表示它的有效值。当被测电压为非正弦波时，其指示值没有直接的物理意义，只表明指示值的

$$\sqrt{2}$$

倍为被测电压的峰值。

如果被测电压为失真的正弦波，则除有基波成分外，还有二次谐波、三次谐波等各次谐波成分。失真的正弦波峰值，不仅决定于谐波振幅，也与谐波和基波的相位关系有关。如图 9-14 所示，在相同谐波幅度下，虽然电压有效值相同 (因 $U =$

$$\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots}$$

)，但由于各次谐波相位差不同，合成波形的峰值差异很大。因此，当被测电压为失真的正弦波时，峰值与有效值之比不再是

$$\sqrt{2}$$

倍的关系。此时，如把电压表的指示值看作为有效值就会产生很大的波形误差。因而峰值检波器对波形失真非常敏感。

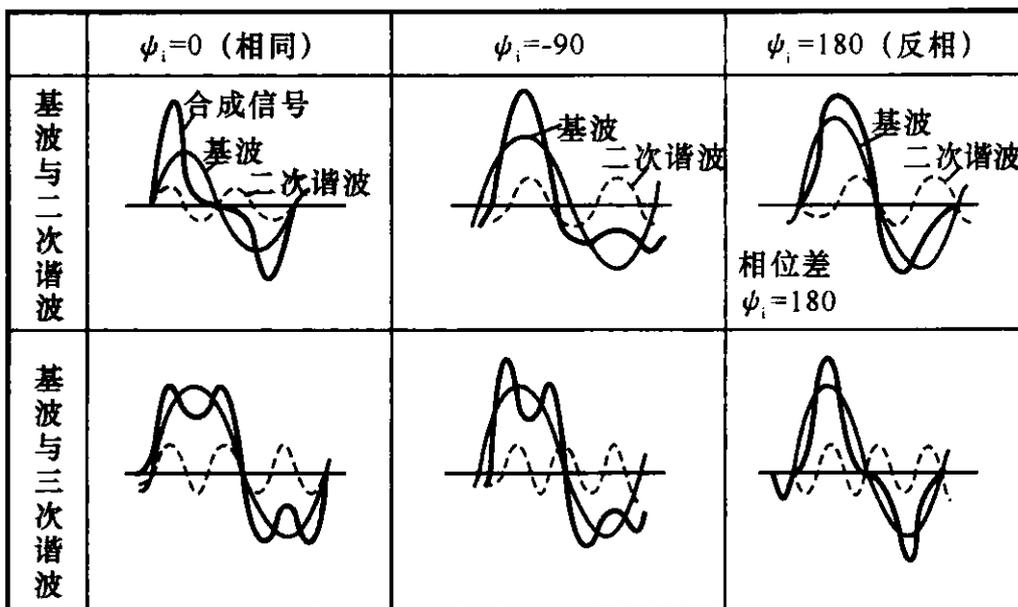


图9-14 不同相位时的失真波形

如果被测电压不是正弦波，而是三角波、方波、脉冲波等规则波形时，若用测量正弦交流电压的电子电压表测量，其读数要经过换算才能得出其有效值，以消除波形误差。

b. 平均值检波器的波形误差。全波平均值检波器测量交流电压的指示值，只有在被测电压为正弦波时才表示它的有效值，当被测电压为非正弦波时，其指示值没有直接的物理意义，它只表明指示值除以1.11为被测电压的平均值。

如果被测电压为失真的正弦波，如图9-14所示，由于谐波和基波的相位关系不同，各合成波形的形状也不同，所以，它们的平均值也各不相同，其有效值也不会等于它们的平均值乘以1.11。因此，用平均值检波器电压表测量失真的正弦波，把其指示值当作有效值时就会产生程度不同的误差，称为波形误差。波形误差的大小与谐波的振幅和谐波相对于基波的相位有关。理论分析表明：波形误差随谐波相位呈现周期性变化，谐波与基波同相或反相时误差最大，相位差 $\pm 90^\circ$ 时较小；二次谐波以及其他偶次谐波产生的误差很小，通常可以忽略；三次谐波所引起的波形误差比二次谐波大得多，这个结论可推广到一般，即奇次谐波比偶次谐波影

响大。

如果被测电压是方波、三角波等规则波形，可按电压表的指示值算出有效值，以消除波形误差。

由上分析可知，当被测电压为失真的正弦波时，各种检波类型的电压表均会引起程度不同的波形误差。因此，在对各类电压表进行定度、校准及检定时，为了消除波形误差，一方面需要选择失真度足够小的信号发生器，另一方面应加滤波器，以消除信号中可能出现的谐波分量。

9.1.3 电压表的主要技术指标

模拟式电子电压表的种类和型号很多，它们的主要技术指标也不相同。对于常用的模拟式电子电压表来说，它们共同的主要技术指标有以下几个。

1. 灵敏度

电压表的灵敏度，可以用不同的方法表示，最常用到的是灵敏度电压，即电压表所能测量满刻度偏转的最低电压值。这个数值越小，说明此电压表的灵敏度越高。磁电式电压表的灵敏度电压为零点几伏，而模拟式电子电压表的灵敏度电压为零点几毫伏，有的甚至可以达到零点几微伏。可见，电子电压表的灵敏度比普通磁电式电压表的灵敏度要高千百万倍。

2. 量程范围

模拟式电子电压表所能测量的最低电压与最高压之间的范围，称为该表的电压量程范围。一般来讲，灵敏度电压越小的模拟式电子电压表，其电压量程范围也就越宽。

对于繁用表，除了有交流电压和直流电压的量程范围之外，还有电阻的量程范围，即该表所能测量的最低电阻值与最高电阻值之间的范围。

3. 频率范围

一台模拟式电子电压表，只能适用于测量某一频率范围内的交变信号电压，这个频率范围就是该表的频率范围。普通的交流电压表只能测量几十赫到几千赫的交流电压，而模拟式电子电压表则可用于测量从超低频到正好高频的整个频率范围的信号电压，其频率范围一般从几赫到几百兆赫。根据频率范围可以把模拟式电子电压表分为超低频、低频、高频和超高频几种类型。

4. 输入阻抗

电压表的输入阻抗是指它的两个输入端之间的等效阻抗，一般是由输入电阻和输入电容的并联电路所组成。测量电压时，需要将电压表与被测电路并联，因此，电压表要从被测电路取用一定功率，这必然影响被测电路的原有工作状态，造成测量误差。输入阻抗愈低（即输入电阻愈小或输入电容愈大）影响愈严重。在模拟式电子电压表中，表头指针偏转的驱动电流不是由被测电路直接提供，而是由表中放大电路来提供，因此，这类电压表的输入阻抗比普通电压表要高得多，一般在几十千欧到几兆欧之间。随着被测电压频率的升高，输入电容的容抗将显著降低，甚至远低于输入电阻。例如，3pF的输入电容在1MHz时的容抗为50kΩ，当频率升高到100MHz时，其容抗仅为500Ω，因而高频测量时，输入电容就成为限制提高测量频率和测量精度的主要因素。要提高电压表的使用频率，就应尽量减小输入电容，一般可以作到1~10pF。

5. 测量精度

测量精度可以衡量仪表的准确程度。一台仪表的测量误差越小，说明测量的结果越近实际的数值，也就是仪表的精度越高。通常，模拟式电子电压表的误差有基本误差和频率附加误差两项。模拟式电子电压表因为其电流表头的精度最高的是0.1级，即误差在 $\pm 0.1\%$ 范围内，所以模拟式电子电压表的基本误差一般为百分之几，最小的可以达到1%，最大的为10%。电压表在测量交流电压时，还要附加上由于频率特性带来的误差，称为频率附加误差。一般在频率范围中段的频率附加误差比较小，模拟式电子电压表约为1%或2%，而在频率范围的低频和高端，这种附加误差要比中段大些，为百分之几到10%，因各种电路类型不同而各不相同。因此，必须根据被测电压的频率合理地选用模拟式电子电压表，以保证得到较高的测量精度。

此外，还存在温度附加误差、波形附加误差等，在各种产品的说明书中都会标明。

上述各项技术指标，由于技术、经济和使用方便等原因，在某一种类的电子电压表中，只能侧重某一个或几个方面。例如有的灵敏度较高(毫伏级)，但频率范围只在低频，有的工作频率较高，例如达几百兆赫，但灵敏度较低(1V以上)。测量中要根据不同的测量对象合理地选用不同类型的模拟式电子电压表。 13388 字

知识来源：韩广兴 编著.电子产品调修常用仪表应用手册.北京：中国电力出版社.2004.第165-166-167-168-169-170-171-172-173-174-175-176-177-178页.