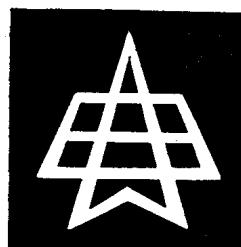


# 有线电信测量

石家庄邮电学校 编

15

人 民 邮 电 出 版 社



## 内 容 提 要

本书是按照邮电部教育局颁发的邮电中等专业学校《有线电信测量》教学大纲编写的。全书共十章。主要介绍有线电信测量的基本原理、基本方法和常用仪表。对于常用仪表的介绍，侧重于电路的工作原理和仪表的正确使用，也适当介绍了一些比较新的测试仪表。

本书可供各类有关的中等专业学校教学使用，也可供从事电子技术、电信技术等 方面工作的工人和工程技术人员参考。

邮电中等专业学校试用教材

### 有 线 电 信 测 量

石家庄邮电学校 编

责任编辑：高丕武

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：787×1092 1/16    1983年11月第一版  
印数：12 页数：96    1983年11月天津第一次印刷  
字数：296千字 插页：3    印数：1—13,000册  
统一书号：15045·总2808-有5332  
定价：1.40元

# 前 言

本书是邮电中等专业学校教学用书。为适应邮电教育事业发展的需要，1978年以来，我们组织了部分邮电学校分工编写了微波、载波、市内电话、线路、电报、电源、综合电信和邮政机械等八个专业所用的专业基础课和专业课教学用书，有些已经出版，有些将陆续出版，以满足各邮电中等专业学校教学的需要。

编写教材，是提高教学质量的关键。我们组织编写本教材时，力求以马列主义、毛泽东思想为指导，努力运用辩证唯物主义的观点阐明科学技术的规律，内容上注意了少而精，尽量反映科学技术的新成就。书内难免存在缺点和错误。希望有关教师和同学在使用过程中，把发现的问题提给我们以便修改提高。

邮电部教育局  
一九八〇年七月

## 编 者 的 话

本书是根据邮电部教育局1983年颁发的邮电中等专业学校《有线电信测量》教学大纲而编写的。

全书共十章，主要介绍有线电信测量的基本原理、基本方法和常用仪表。对于常用仪表的介绍，侧重于电路的工作原理和仪表的正确使用，也适当介绍了一些新的测量仪表。就全书的内容讲，属于有线电信各专业的基础知识，是各专业通用的测量原理和技术。在编写当中，我们力求把测量理论与实际应用结合起来，对一些难点尽量加以详细讲解，并选编了部分复习题，以利于学生提高分析问题和解决问题的能力。

本书由陈溥、杨毓华二同志编写。四川省邮电学校刘守仁同志、江苏省邮电学校周之干同志负责审校。在编写和审定当中，四川校程经华、安徽校吴湘如、湖南校杨继甫、浙江校沈道镛等同志曾提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促，缺乏经验，书中难免有缺点、错误之处，恳请广大读者批评指正。

石家庄邮电学校  
一九八三年三月一日

# 目 录

## 绪 言

|                     |            |
|---------------------|------------|
| 一、测量的意义             | 1          |
| 二、有线电信的测量及其特点       | 1          |
| 三、有线电信测量的分类         | 2          |
| 四、有线电信测量技术发展概况      | 3          |
| <b>第一章 电压的测量</b>    | <b>4</b>   |
| 第一节 概述              | 4          |
| 第二节 常用检波电路          | 5          |
| 第三节 电子电压表的结构原理      | 14         |
| 第四节 GB-9B型电子管毫伏表    | 17         |
| 第五节 杂音的测量           | 23         |
| <b>第二章 测量用信号源</b>   | <b>27</b>  |
| 第一节 正弦信号源           | 27         |
| 第二节 正弦信号的产生         | 29         |
| 第三节 振荡器实例           | 38         |
| <b>第三章 电平的测量</b>    | <b>47</b>  |
| 第一节 电平表原理及测量电平的方法   | 47         |
| 第二节 电平表实例           | 51         |
| 第三节 选频测量的工作原理       | 54         |
| 第四节 选频电平表实例         | 56         |
| <b>第四章 衰减与增益的测量</b> | <b>63</b>  |
| 第一节 工作衰减的测量         | 63         |
| 第二节 增益的测量           | 66         |
| 第三节 反射衰减与对地不平衡衰减的测量 | 68         |
| 第四节 串音衰减的测量         | 72         |
| <b>第五章 示波器</b>      | <b>78</b>  |
| 第一节 示波管             | 78         |
| 第二节 示波器的结构原理及分类     | 84         |
| 第三节 示波器实例           | 88         |
| 第四节 脉冲扫描原理          | 93         |
| 第五节 双踪显示原理          | 100        |
| 第六节 示波器的应用          | 104        |
| <b>第六章 非线性失真的测量</b> | <b>108</b> |
| 第一节 非线性失真的表示方法      | 108        |
| 第二节 非线性失真的测量方法      | 109        |
| 第三节 失真度测量仪实例介绍      | 112        |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第七章 频率的测量</b> .....      | 117 |
| 第一节 测量频率的方法 .....           | 117 |
| 第二节 频率时间计数器 .....           | 122 |
| <b>第八章 阻抗的测量</b> .....      | 132 |
| 第一节 阻抗测量的一般方法 .....         | 132 |
| 第二节 交流电桥 .....              | 134 |
| 第三节 差动电桥 .....              | 143 |
| 第四节 接地电阻的测量 .....           | 148 |
| <b>第九章 线路的测量</b> .....      | 154 |
| 第一节 线路的直流测量 .....           | 154 |
| 第二节 线路的交流测量 .....           | 161 |
| 第三节 线路的障碍测量 .....           | 162 |
| 第四节 线障脉冲测量 .....            | 166 |
| <b>第十章 测量误差分析</b> .....     | 174 |
| 第一节 测量误差的基本知识 .....         | 174 |
| 第二节 计量标准与仪器误差 .....         | 177 |
| 第三节 影响测量精确度的其它因素及改善措施 ..... | 179 |

# 绪 言

## 一、测量的意义

测量是人类对客观事物取得数量观念的一种认识过程。在这一过程中,人们借助于测量仪器,通过实验的方法,力求获得必要而可靠的各种数据。通过对这些数据的分析研究,有助于人们对客观事物的本质及其发展规律的认识。因此,测量工作是人类认识世界的一种重要手段。

测量与科学技术的发展之间的关系是极为密切的。在进行科学研究以及产品的试制、生产过程中,都离不开测量工作。测量技术不断完善,测量精度不断提高,可以帮助人们进一步认识和发现许多客观规律,并促进科研与生产的发展。反过来,新技术和新产品的出现,应用到测量技术和测量设备中去,又给测量技术的改进和完善创造了条件。

在电信当中,不论是机线设备的研制、生产、安装,还是日常维护,都要通过测量检查设备的质量上是否符合要求。特别是在日常维护中,要经常进行测试、调整和检修。一旦设备发生故障,必须及时确定故障性质和地点、迅速修复。这样才能保证通信的正常进行。

## 二、有线电信的测量及其特点

### 1. 有线电信的测量

有线电信包括电话通信、电报通信、传真通信、电视通信以及数据通信等,它们都是借助于电技术来完成信息的传输。为了高质量地传输信息,对所需传送的电信号和所采用的设备一定要符合要求,这就需要进行测量。其中最主要的测量就是对有线通信设备(包括机械和线路)的工作状态和电气特性的测量。

通信方式不同,要求进行的测量项目和使用的测量仪表也有所不同。本书主要讨论有线电信测量中带有共性的基本测量原理和方法,以及常用仪表的工作原理和正确使用。通常进行的一些测试项目包括:

- (1) 通信设备及元、部件电气参数的测量。如电阻、电容、电感,以及电路和网络的各种阻抗;
- (2) 通信设备工作状态的测量。如信号的电压、电流、电平和频率、相位、波形等;
- (3) 通信系统质量指标的测量。如增益、衰减、非线性失真和串、杂音等。

### 2. 有线电信测量的一些特点

有线电信测量技术,随着机线设备的不断改进而发展。目前,有线电信测量技术具有如下一些特点:

#### (1) 频率范围较宽

有线电信发展初期,主要是用架空明线传送音频电话和直流电报,传输的频率较低。随

着电缆线路的出现，通信容量加大。特别是采用了载波通信方式，传输的频率愈来愈高，线路的利用率也大为提高。如在一对明线线路上，除开通音频电话外，还可以加开单路、三路、十二路载波电话；在对称电缆上则可开六十路载波电话；在中同轴电缆上，开通的路数可达1800路，并能用来传输电视信号。所以，目前我国有线通信传输信号的频率范围约从几十赫以至几兆赫，并正向更高频率上发展。对于有线电信测量来说，所使用的仪表就需要满足频率范围比较宽的要求。

当然，同无线通信中的电信号相比，有线通信中的电信号，频率还是比较低的。

## (2) 信号电平低，动态范围大

有线电信的特点是信号电平低。例如普通话机的输出功率只有1毫瓦，明线载波机的输出电平也不过+2奈，功率约50多毫瓦。对于电路中的串杂音，其电平常要低达-(7~8)奈以下，功率仅有 $10^{-2}$ ~ $10^{-3}$ 微瓦左右。因而，测量仪表的灵敏度要高、量程要多、动态范围要大。

# 三、有线电信测量的分类

## 1. 按测量工作的性质分类

- (1) 研究性测量：对测量的准确度要求较高；
- (2) 生产性测量：力求测量过程简便和规格化；
- (3) 维护性测量：要求测量过程简单、迅速、准确、可靠，尽可能不中断通信；

## 2. 对维护人员来说进行的测量工作又可分为

- (1) 验收测量：对新装或大修的机线设备在投入使用前，检查它的电气特性是否符合标准；
- (2) 定期维护测量：对使用中的机线设备的各项电气性能定期进行测量检查，发现不正常现象及时处理，预防设备发生故障，保证通信畅通。这项工作与维护中非常重要；
- (3) 障碍测量：设备发生故障后，迅速确定故障性质和地点，以便及时修复。

## 3. 按测量方法分类

(1) 直接测量：通过测量可以直接得出被测量的结果。根据仪表的反应方法又可分为：

①直读法：这种方法可在测量仪器的“表头”上（或其他显示装置上）直接读出被测量的数值。直读法简单、方便，其测量准确度主要取决于仪表的精度；

②比较法：利用仪表对被测的量引起的响应与仪表对可调标准元件所引起的响应进行比较，当两者指示相同时，即可从标准元件的数值表示出被测量的数值。常用的标准元件有标准电阻、标准电容、标准衰减器等。

比较法测量的准确度仅取决于标准元件的精度而与指示器的精度无关。所以，这种方法的测量准确度较高。

电桥法的测量是比较法的一个特例，当桥路平衡时，指示器指针指在零的位置，故亦称



为零示法。

(2) 间接测量：间接测量是先测出几个与被测的量有关的辅助量，然后通过一定的计算，从而间接确定被测的量。例如测四端网络的特性阻抗时，先测出网络的开路和短路输入阻抗 $Z_{\infty}$ 和 $Z_0$ ，再通过公式 $Z_c = \sqrt{Z_0 \cdot Z_{\infty}}$ 求出特性阻抗，即属于间接测量。

间接测量需要测几个辅助量，还要通过计算，产生误差的机会多，其误差是累积的。所以测量准确度低。但有些量不易采用直接测量时，还需要采用间接测量的方法。

## 四、有线电信测量技术发展概况

随着科学技术的发展以及各种电子器件的相继问世，电子测量仪器在不断地更新和完善。目前，用集成电路装配的电子仪器具有体积小、重量轻、功耗小、功能多、成本低等特点。

在数字电路应用到仪表中之后，出现了数字式的测量仪器。被测数值可以用数码管或液晶直接显示出来，而不需要象模拟式仪表那样由表头上指针指示的刻度去读数。它的主要优点是测量精度高、速度快、容易实现自动测量。目前，数字式频率计、电压表、电平表、振荡器等均已投产，其他电子仪表也将逐渐向数字化发展。

通常，测量仪器应具有较多的功能，以便扩展其应用范围，提高使用的灵活性。例如有的信号发生器，不仅频率范围宽，可直接显示频率，而且可用作调制度测量仪等。再如有的示波器，利用插件可作为宽带示波器、取样示波器、电子计数器、数字万用表等。

由于大规模集成电路的发展，出现了具有信息存贮、数据处理和程序控制等基本功能的微处理机。将微处理机装在数字式测量仪器中，使测量技术的发展又产生了一个很大的飞跃。这种仪器可以实现自动选择量程、自动测量、自动减小误差、自动计算、自动记录、自动显示结果、自动寻找故障等，所以称为“智能”仪器。

此外，从有线通信技术的发展来看，为了保证多路通信的畅通无阻，必须对每一个通路的许多电气特性参数经常进行监测。这是用人工测试很难完成的，需要实现自动化测量。这就需要多种可以程序控制的仪器通过接口设备组合起来，成为一个测试系统。这种自动测试系统具有速度快、功能多、精度高、可显示多种测量结果。而且操作简便，并具有分析、判断和处理的能力。

# 第一章 电压的测量

## 第一节 概 述

电压是表征信号大小的基本物理量之一。电压测量是最简便最基本的一种测量。目前，就是对于一些非电量的测试（如压力、温度等），也往往是先将其转换成相应的电压，然后再进行测量。

在电信中，信号的频率范围宽，电压的动态范围很大，在测量信号电压时，为使被测电路的工作状态不受影响，电压表的输入阻抗应当很高，这种要求是普通的电工仪表所不能达到的，需要采用电子电压表。对于电子电压表来说，它不仅是常规测试中必不可少的仪器，也是不少测量仪器中的主要组成部分。例如，在信号发生器、Q表、阻抗电桥、失真度测量仪、调制度表、电平表等仪器中都是用电压表来作为指示装置或辅助监测装置。

### 一、电压测量的基本知识

测量电压的方法是极其简单的，只要将电压表跨接在被测电路中即可（测直流电压时要注意极性）。但测量工作的中心问题是如何提高测量准确度的问题。所以测量时必须注意信号频率的高低及其波形特点、力求减少测量的误差。

有线电信测量中，广泛使用的是电子电压表。目前电子电压表分为模拟式和数字式两大类。

模拟式（又称指针式）电子电压表是将被测的交流电压，经过检波，变换为直流电流，用磁电式表头指示其大小。数字式电压表是利用交一直流变换器（如检波器）和模—数变换器，将被测电压用数字形式进行显示的一种电压测量仪器。

### 二、对电压表的一些要求

#### 1. 输入阻抗高

电压表是跨接在电路中进行测量的，其输入阻抗的高低是产生测量误差的重要因素。输入阻抗愈高，对测量点负载阻抗的影响就愈小，测量的准确度就愈高。

#### 2. 灵敏度高

电压表输出信号的变化量与引起变化的输入端被测信号的变化量之比，称为电压表的灵敏度。灵敏度愈高，则电压表测量微弱信号的能力愈强。

#### 3. 工作频率范围宽

频率响应是表征交流电压表的工作频率范围的指标。工作频率范围愈宽，则电压表的使用范围愈广泛，性能愈好。

## 第二节 常用检波电路

检波电路是将输入的交流电压变换为直流的部件,它是电子电压表的重要组成部分。我们知道,交流信号电压的大小可以用其峰值、平均值和有效值三种参量来表示。检波电路根据其检波后的输出量与被测交流电压的三种参量中的哪一种直接相联系,可分为峰值、平均值和有效值等几种检波方式。这里所说的检波电路,就其结构形式及其工作原理讲同对50赫交流电的整流电路是基本相同的。只是由于电信测量中的信号一般比较弱,而且频率又往往比较高,特别是要对已调制的信号或非正弦的信号进行检测,所以电路中元、器件的参数与50赫交流电整流电路有着明显的区别,通常不称之为整流电路,而称为检波电路。

### 一、峰值检波电路

输出的直流电流(或检波器负载电阻两端的直流电压)与输入交流电压的峰值成正比的检波电路,称为峰值检波电路。

#### 1. 电路工作原理

峰值检波电路主要有串联式,并联式以及倍压检波式等几种型式。

##### (1) 串联式和并联式电路

串联式(检波管与表头串联)又称开路式,并联式(检波管与表头并联)又称闭合式,其电路分别如图1-1(a)和(b)所示。

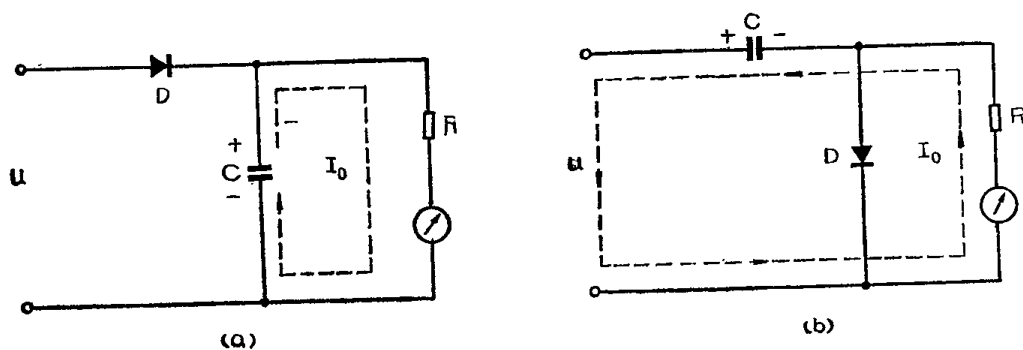


图 1-1 峰值检波电路

在串联式电路中,输入的被测电压为正半周时,二极管 $D$ 导通,电容 $C$ 被充电。由于二极管的正向电阻 $R_d$ (它是电容 $C$ 的充电电阻)很小,所以电容 $C$ 的电压 $U_c$ 很快被充至输入电压的峰值 $U_m$ 。当输入电压从峰值下降或处在负半周时,电容 $C$ 的电压将高于输入电压,二极管 $D$ 将处于反偏而截止,于是电容 $C$ 通过负载电阻 $R$ 和表头放电。由于 $R$ 很大,所以放电很慢, $U_c$ 下降不多(其放电速度取决于时间常数 $RC$ 的数值),只有当输入的正半周电压值超过 $U_c$ 时,二极管才再次导通,电容 $C$ 又被充电, $U_c$ 很快再次被充至 $U_m$ 。其波形如图1-2所示。

并联式电路的工作原理与串联式基本相同,电容 $C$ 是通过被测电路、电阻 $R$ 和表头进行放电。事实上电阻 $R$ 和表头串联构成一个直流电压表,加在它两端的有输入的交流电压和电容上的直流电压,而表中通过的只是其中的直流电流。

以上两种检波电路通过表头的直流电流为

$$I_0 = \frac{U_c}{R} \approx \frac{U_m}{R}$$

式中忽略了被测源及表头的内阻。因这种检波电路输出的直流电流是与输入的交流电压的峰值成正比的，故称为峰值检波。

从上述分析可知，要实现峰值检波，电路中 $RC$ 的数值必须适当选择。首先应满足 $RC \gg R_s C$ ，即放电时间

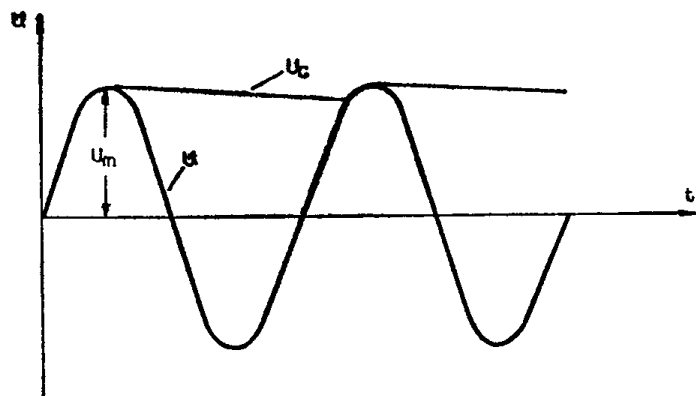


图 1-2 峰值检波波形图

常数远大于充电时间常数，才能使电容器上充放电时具有快充、慢放的特点。所以应当选择正向电阻小的二极管。其次，还要满足 $RC \gg T$ ， $T$ 为被测电压的周期，它反映着检波电路的最低工作频率，这样才能在被测信号的一个周期内，使电容 $C$ 上的电压基本上保持为峰值。在一般下限频率较低的电压表中， $C$ 约为 $0.1 \sim 1 \mu F$ ， $R$ 在 $100 k\Omega$ 以上。另外，为了保证电容器上电压的快充、慢放，还要求输入端被测源的内阻与检波电路的输入阻抗相比可以忽略。

### (2) 倍压检波电路

倍压检波电路又称峰—峰值检波电路，常用的有桥式电路和阶梯电路两种型式，如图 1—3 所示。它比前面介绍的峰值检波电路的效率提高一倍，其工作原理如下：

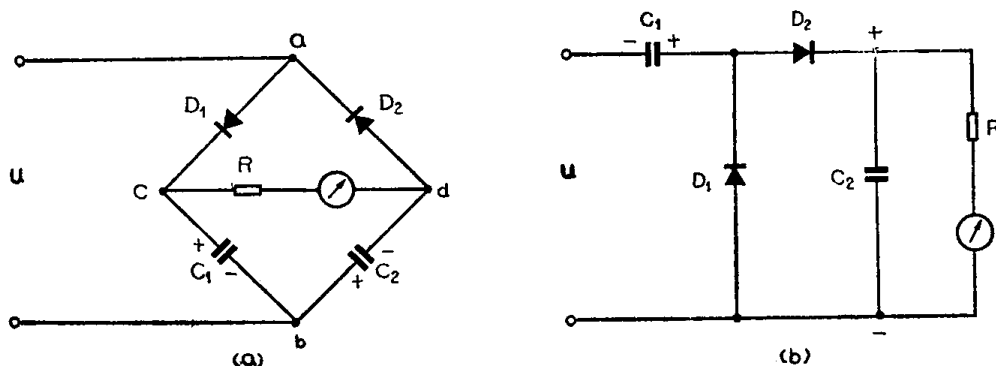


图 1-3 峰—峰值检波电路

在图 (a) 所示桥式电路中，当输入电压为正半周时，二极管 $D_1$ 导通，电容 $C_1$ 被充电，其电压充至输入电压正的峰值 $U_m$ 。当输入电压为负半周时， $D_2$ 导通，电容 $C_2$ 的电压被充至输入电压负的峰值 $U_m$ 。 $C_1$ 和 $C_2$ 上的电压串联起来通过电阻 $R$ 及表头缓慢放电， $C-d$ 间的串压即为峰—峰值电压。通过表头的直流电流为

$$I_0 = \frac{2U_m}{R}$$

式中忽略了表头的内阻。显然输出直流电流与输入电压的峰—峰值成比例，故称峰—峰值检波。其检波效率比峰值检波提高了一倍。

在图 (b) 的阶梯电路中，输入电压为负半周时， $D_1$ 导通， $C_1$ 被充电至负的峰值 $U_m$ ；而当正半周时， $D_2$ 导通，输入电压与 $C_1$ 上的电压串联起来向 $C_2$ 充电，其电压被充至峰—峰电

压值。同时， $C_2$ 通过电阻 $R$ 及表头缓慢放电，其直流电流的表示式与桥式电路相同。

为保证峰—峰值检波电路良好工作， $C_1$ 和 $C_2$ 的容量应足够大，使其电压在输入信号的一个周期内不发生明显的变化。

## 2. 峰值检波特点

### (1) 刻度特性

因峰值检波电路中输出的直流电流为 $I_0 = \frac{U_m}{R}$ （峰—峰值检波时 $I_0 = \frac{2U_m}{R}$ ）即流过表头的电流与输入电压的峰值为线性关系。因而在指针式表头上的刻度是均匀的，读数比较方便，刻度误差也比较小。

必须指出，被测的交流信号其大小虽然有峰值、平均值、有效值三种表示方法，但表头显示上一般都是采用有效值来表示的。对于正弦交流信号来说，其峰值、平均值、有效值的关系是：

$$\begin{aligned} \text{峰值:平均值:有效值} &= 1: \frac{2}{\pi} : \frac{1}{\sqrt{2}} \\ &= 1:0.637:0.707 \end{aligned}$$

所以，采用峰值检波电路的电压表，其表头不是直接按照被测的各种电压的峰值来刻度，而是按正弦交流电峰值与有效值间的比例关系，将峰值电压换算为有效值来刻度的。这种刻度仍是均匀的，表针指示的数值是正弦波的有效值。例如用峰值检波电压表，当输入信号电压峰值为1V时，其表头读数不是1V，而为0.707V。

### (2) 波形误差

我们知道，不同波形的非正弦电压，其峰值、平均值、有效值之间的比例关系是各不相同的，两种不同波形的电压虽然峰值相同但其有效值却不一样。常用波形因数和波峰因数来表示它们之间的关系。交流电压的有效值与平均值之比，称为波形因数，用符号 $K_x$ 表示。其峰值与有效值之比，称为波峰因数，用符号 $K_f$ 表示。即：

$$\begin{aligned} K_x &= \frac{U(\text{有效值})}{\bar{U}(\text{平均值})} \\ K_f &= \frac{U_m(\text{峰值})}{U(\text{有效值})} \end{aligned}$$

几种常见的交流电压的波形参数如表1-1所示。

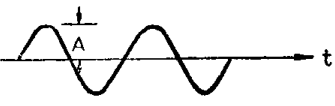
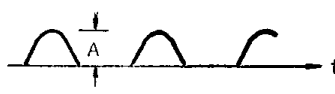
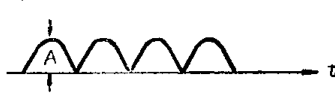
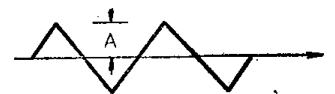
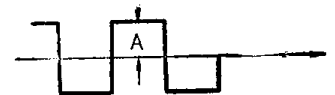
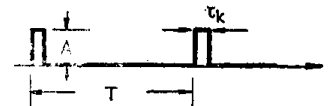
因此，用一般按正弦电压峰值与有效值的关系定度的峰值检波电压表，测量非正弦电压时，由于它的峰值与有效值间的关系与正弦波不同，就会产生测量误差，即所谓波形误差。被测电压的波形不同时，其波形误差的大小也不一样。这就是说，用峰值检波方式的电压表去测量非正弦电压时，其表头读数是直接没有意义的，只能说该读数乘以 $\sqrt{2}$ 后等于该信号电压的峰值，而其有效值到底是多少，还需通过波峰因数来换算。比如，测某非正弦电压时，电压表的读数为 $U_{\sim}$ ，则该电压的峰值 $U_m$ 应为：

$$U_m = U_{\sim} \cdot K_{f\sim}$$

式中 $K_{f\sim}$ 表示正弦电压的波峰因数，其值为 $K_{f\sim} = 1 / \frac{1}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}$

表 1-1

几种常见的交流电压的波形参数

| 名称    | 波形图   | 峰值<br>$U_m$ | 有效值<br>$U$                          | 平均值<br>$\bar{U}$                | 波形因数<br>$K_x = U/\bar{U}$            | 波峰因数<br>$K_f = U_m/U$    |
|-------|---|-------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 正弦波   |    | $A$         | $\frac{A}{\sqrt{2}} \approx 0.707A$ | $\frac{2}{\pi}A \approx 0.637A$ | $\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1.11$ | $\sqrt{2} \approx 1.414$ |
| 半波整流波 |    | $A$         | $\frac{A}{2}$                       | $\frac{A}{\pi} \approx 0.318A$  | $\frac{\pi}{2} \approx 1.57$         | 2                        |
| 全波整流波 |    | $A$         | $\frac{A}{\sqrt{2}} \approx 0.707A$ | $\frac{2}{\pi}A \approx 0.637A$ | $\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1.11$ | $\sqrt{2} \approx 1.414$ |
| 三角波   |   | $A$         | $\frac{A}{\sqrt{3}} \approx 0.577A$ | $\frac{A}{2} \approx 0.5A$      | $\frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1.15$    | $\sqrt{3} \approx 1.73$  |
| 方波    |  | $A$         | $A$                                 | $A$                             | 1                                    | 1                        |
| 脉冲波   |  | $A$         | $\sqrt{\frac{tk}{T}}A$              | $\frac{tk}{T}A$                 | $\sqrt{\frac{T}{tk}}$                | $\sqrt{\frac{T}{tk}}$    |

被测非正弦电压的实际有效值 $U$ 应为:

$$U = \frac{U_m}{K_f} = \frac{K_{f\sim}}{K_f} U_{\sim}$$

式中 $K_f$ 表示被测非正弦电压的波峰因数。

如将读数 $U_{\sim}$ 误认为被测电压的实际有效值 $U$ ,则产生的波形误差用相对误差形式表示时

$$\frac{\Delta U}{U_{\sim}} = \frac{U_{\sim} - U}{U_{\sim}} \times 100\% = \left(1 - \frac{U}{U_{\sim}}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{K_{f\sim}}{K_f}\right) \times 100\%$$

例如,测三角波电压时;

$$\frac{\Delta U}{U_{\sim}} = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) \times 100\% \approx +18\%$$

测方波电压时:

$$\frac{\Delta U}{U_{\sim}} = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{1}\right) \times 100\% \approx -41\%$$

又如用峰值检波的电压表测量失真的正弦信号时,引起的波形误差与信号所包含的频率

成分及其相互之间的幅度、相位都有关系。在图1-4中，(a)、(b)、(c)表示由基波和二次谐波所合成的波形，它们的有效值都相等，但由于相互相位关系不同，其峰值相差很远，因而测量时表头的读数就不一样了。图(d)、(e)、(f)是基波和三次谐波所合成的波形，它们同样是有有效值相同而峰值不同。

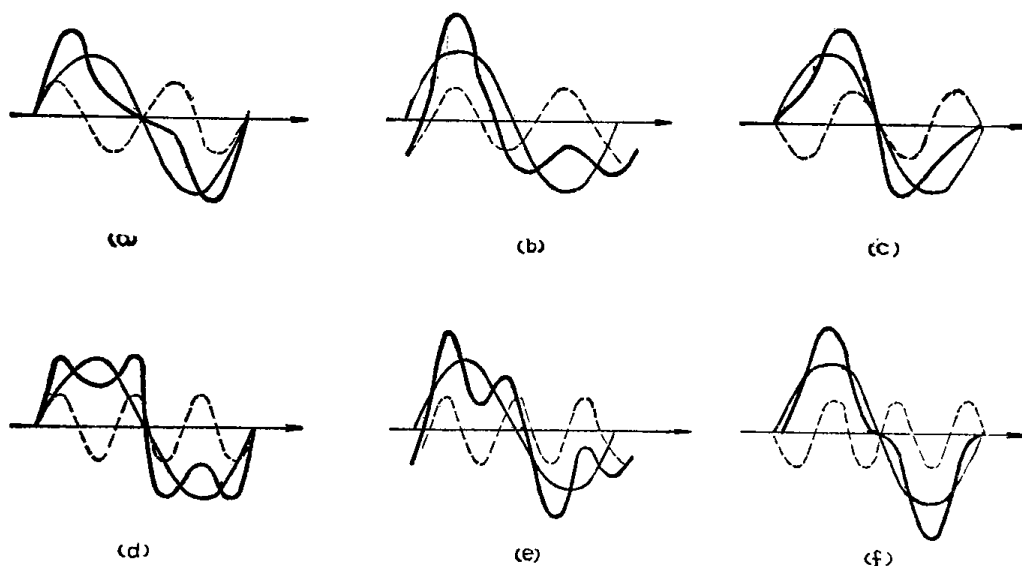


图 1-4 两波形按不同相位关系合成后的峰值

由此可见，用峰值检波的电压表测量非正弦信号时，测量结果出现的波形误差是一个比较复杂的问题，这种情况在实际使用中应当引起足够的重视。

## 二、平均值检波电路

输出的直流电流与输入的交流电压的平均值成正比的检波电路，称为平均值检波电路（简称均值检波电路）。

### 1. 电路工作原理

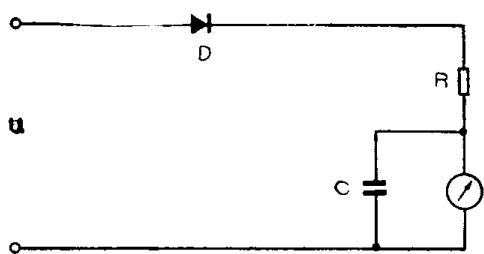
平均值检波电路分为半波检波和全波检波，图1-5所示的是半波检波电路及其波形图。

在图1-5(a)电路中，电阻 $R$ 主要起限流作用，输入的交流电压为正半周时，二极管 $D$ 导通，负半周时， $D$ 截止。这种电路由于输入电压比较大，所以二极管工作在线性区域。检波电路输出的直流电压即为输入的交流电压的平均值 $\bar{U}$ ，参见图(b)。其输出电流中的直流成分 $I_0$ 为：

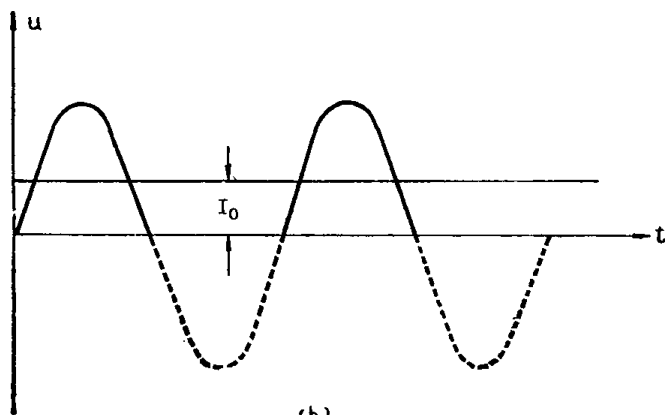
$$I_0 = \frac{\bar{U}}{R}$$

式中忽略了表头内阻。跨接在表头两端的电容 $C$ 起旁路交流的作用。由于这种电路输出的直流电流是由输入交流电压的平均值决定的，故称为平均值检波。

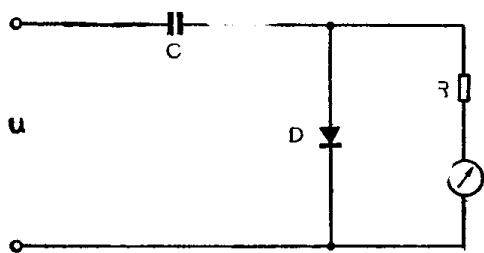
在输入信号中含有直流成分时，常采用图(c)所示半波检波电路。 $C$ 为隔直流电容，用以阻止输入信号中的直流成分。当输入交流电压为正半周时，二极管 $D$ 导通，负半周时 $D$ 截止，输出电流经过负载电阻 $R$ 和表头。应当注意，该电路在形式上虽然与前面介绍的并联式峰值检波电路(参见图1-1(b))完全相同，但其工作条件和工作状态差别很大。峰值检波的条



(a)



(b)



(c)

图 1-5 平均值半波检波电路及波形图

件要求充电时间常数较放电时间常数小得多，而均值检波电路中要求充放电时间常数近似相等，所以在输入信号的正半周，二极管  $D$  上基本上不致处于反偏置状态，这就是均值检波电路的工作条件及工作状态。

半波检波电路的输入阻抗在输入电压的正负两个半周内变化很大，而且检波效率很低。为了提高检波效率和稳定电路的输入阻抗，实际电路中常采用图1-6所示的桥式全波检波电路，该电路不论在输入电压的正负半周内，都有电流流过表头，而且大小相等、方向一致。所以其直流电流  $I_0$  比图1-5(a)单管半波检波电路要大一倍，而且检波电路的输入阻抗较半波电路稳定。

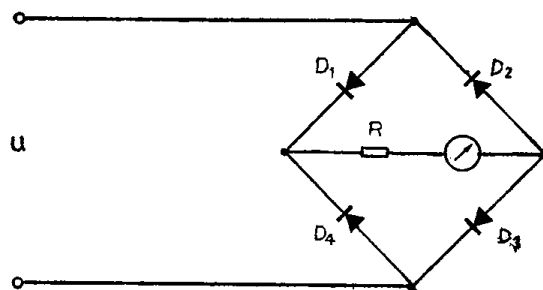


图 1-6 桥式全波平均值检波电路

## 2. 平均值检波特点

### (1) 刻度特性

均值检波电路中、输出的直流电流  $I_0$  与输入交流电压的平均值成线性关系，所以表头刻度也是均匀的。

为了便于读数，均值检波电压表的表头也是按照正弦信号平均值与有效值之间的比例关系将测出的平均值电压换算成有效值进行刻度的，所以表头读数也是有效值。

### (2) 波形误差

既然均值检波电压表的刻度是按照正弦信号的关系，将平均值换算为有效值定度的，那末用来测量非正弦电压时，由于各种波形的平均值与有效值间的比例关系不同，同样也要产生波形误差。实际测量时，必须将其读数通过波形因数换算为实际的有效值。比如测某非正弦电压时，如读数为  $U_{\sim}$ ，则被测电压的平均值  $\bar{U}$  应为：

$$\bar{U} = \frac{U_{\sim}}{K_{\sim}}$$



式中  $K_{x\sim}$  表示正弦电压的波形因数，其值为  $K_{x\sim} = \frac{U}{U_{\sim}} = \frac{1}{\sqrt{2}} / \frac{2}{\pi} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11$ 。

被测非正弦电压的实际有效值  $U$  为：

$$U = K_x \cdot \bar{U} = \frac{K_x}{K_{x\sim}} U_{\sim}$$

式中  $K_x$  为被测电压的波形因数。

如将读数  $U_{\sim}$  误认为被测电压的实际有效值  $U$  时，产生的相对波形误差为：

$$\frac{\Delta U}{U_{\sim}} = \frac{U_{\sim} - U}{U_{\sim}} \times 100\% = \left(1 - \frac{U}{U_{\sim}}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{K_x}{K_{x\sim}}\right) \times 100\%$$

例如测三角波电压时

$$\frac{\Delta U}{U_{\sim}} = \left(1 - \frac{2/\sqrt{3}}{\pi/2\sqrt{2}}\right) \times 100\% \approx -4\%$$

测方波电压时

$$\frac{\Delta U}{U_{\sim}} = \left(1 - \frac{1}{\pi/2\sqrt{2}}\right) \times 100\% \approx +10\%$$

可以看出，采用均值检波的电压表测非正弦电压引起的波形误差较峰值检波的电压表小。

此外，用均值检波的电压表测失真的正弦电压时，通过理论分析可知，当二次谐波的失真度不超过10%时，引起的最大波形误差不到1%；而三次谐波的失真度不超过10%时，其最大波形误差也不会大于5%。所以，在测量波形失真不太严重的正弦电压时，平均值检波的电压表一般还是可以用的。

### 三、有效值检波电路

输出的直流电流与输入的交流电压的有效值的平方成正比的检波电路，称为有效值检波电路，又称为均方根值检波电路。采用这种检波电路的电压表能直接测出被测电压的有效值。

#### 1. 电路工作原理

前面介绍的均值检波电路中是力求其输入电压与输出电流间具有线性关系，即检波二极管工作在线性区域。如设检波二极管的伏安特性曲线具有平方律特性，即  $i = K u^2$  时：

如输入电压为  $u = U_m \sin \omega t$

则输出电流  $i$  应为

$$\begin{aligned} i &= K u^2 = K (U_m \sin \omega t)^2 = K U_m^2 \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \\ &= \frac{K U_m^2}{2} - \frac{K U_m^2}{2} \cos 2\omega t \end{aligned}$$

其中第一项即为检波后的直流电流  $I_0$

$$I_0 = K \frac{U_m^2}{2} = K U^2$$

上述分析表明，只要检波管具有平方律特性，便可实现有效值的响应。而直流电流由输入电压有效值的平方决定，则变换关系就不是线性的。