

(京)新登字 097 号

无 线 电 测 量

郭仁 张士鹏 刘达玮 编著

中国广播电视出版社出版

(北京复外广播电影电视部灰楼 邮政编码 100866)

国防大学第一印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 16 开本 15.375 印张 365 (千) 字

1994 年 3 月第 1 版 1994 年 7 月第 2 次印刷

印数:9001-11500册 定价:12.00 元

ISBN 7-5043-2599-6/TN·178

目 录

第一章 无线电测量的基本知识	(1)
1-1 概述	(1)
1-2 无线电测量的方法和误差	(3)
1-3 计量的基本知识	(10)
第二章 电压的测量	(12)
2-1 概述	(12)
2-2 模拟式电压表	(17)
2-3 数字式电压表	(30)
第三章 集中参数阻抗的测量	(40)
3-1 概述	(40)
3-2 电桥法	(44)
3-3 谐振法	(52)
3-4 品质因数的测量和 Q 表的应用	(57)
第四章 频率、时间和相位差的测量	(62)
4-1 概述	(62)
4-2 无源法和比较法测频率	(63)
4-3 用计数法测频率	(70)
4-4 相位差的测量	(82)
第五章 信号源	(90)
5-1 概述	(90)
5-2 低频信号发生器	(91)
5-3 高频信号发生器	(97)
5-4 甚高频信号发生器	(102)
5-5 频率合成技术	(108)
5-6 脉冲信号发生器	(118)
5-7 彩色电视信号发生器	(126)
第六章 示波器	(133)
6-1 概述	(133)
6-2 示波管	(134)
6-3 示波器工作的基本原理	(138)
6-4 通用示波器的基本要求	(140)
6-5 通用示波器的 Y 通道	(144)
6-6 通用示波器的 X 通道	(156)

6-7 通用示波器的主机部分	(168)
6-8 通用示波器的应用	(170)
6-9 晶体管特性图示仪	(177)
第七章 非线性失真和调制系数的测量	(188)
7-1 非线性失真系数的测量	(188)
7-2 BS1 型失真度测量仪	(190)
7-3 调制系数的测量	(194)
7-4 调制系数测量仪	(198)
第八章 幅-频特性的测量	(206)
8-1 概述	(206)
8-2 扫频信号的产生	(209)
8-3 扫频测量中的频率标记	(214)
8-4 频率特性测试仪	(216)
8-5 扫频仪的应用	(223)
8-6 频谱分析仪	(228)
第九章 智能化仪器与自动化测量系统	(235)
9-1 智能化仪器	(235)
9-2 自动化测量系统	(238)

第一章 无线电测量的基本知识

1-1 概 述

一、无线电测量的意义

测量是人类对自然界客观事物取得数量概念的一种认识过程。在这种认识过程中,人们借助一定的工具或仪器、设备,依据一定的理论,通过一定的方法,取得以一定单位来表示的被测量数值。

测量的过程实质上是用一个已知的标准量与被测的同类量进行比较的过程。例如,用尺子测量一块布料,测量的结果是5米。这个测量的过程就是人们把尺子(已知的标准量)与布料(被测的同类量)进行比较,取得以米为单位的数值——5。可见,测量也可以直接定义为:测量就是将被测量与同类标准量进行比较,并取得它们之间数值关系的过程。

测量是人类揭示自然界物质运动规律,从数量上描述周围物质世界,从而改造客观世界的重要手段。测量是科学技术的基础,是科学进步的动力。科学从测量开始,每一种物质或现象,只有通过测量才能真正认识。测量的结果不仅可以表明客观事物的数量,还可以通过分析验证科学理论,发现新的问题,探索新的规律。测量还是掌握及合理使用社会财富的重要依据,是监督和指挥生产的可靠手段,也是人们生活中必不可少的重要环节。所以,测量与国民经济、科学技术和人民生活有着十分密切的关系,占有十分重要的地位。

电子学的诞生和发展,为测量技术提供了崭新的手段,开辟了广阔的途径,并随之出现了电子测量这一重要的新的分支。电子测量的含义有两种:广义的电子测量是指运用电子科学技术的手段对一切电的或非电的各种参数所进行的测量;狭义的电子测量是指对电子技术中各种电参量所进行的测量(例如对频率、电压、电流、阻抗、波形等),也称为无线电测量。今天,无线电测量已形成一门发展很迅速的独立学科。它实践性强、应用面广,是广播电视技术人员日常测量技术指标、维护设备和进行技术革新所必备的基本知识,也适应于其它科技领域的电参数测量。

二、无线电测量的内容

无线电测量的主要内容有:

- (一) 电能量的测量,如电流、电压、功率、电场强度等的测量。
- (二) 电路参数的测量,如电阻、电感、电容、阻抗、品质因素、损耗角正切等的测量。

(三) 电信号特性的测量,如频率、周期、时间、相位、调制系数、失真度等的测量。

(四) 电子设备性能的测量,如放大倍数、衰减量、灵敏度、选择性、通频带、信噪比等的测量。

(五) 特性曲线的测量,如幅-频特性、相-频特性、器件特性等的测量。

上述各种电参数中,频率、时间、电压、相位、阻抗是基本的电参量,对它们所进行的测量也是其它许多派生参数测量的基础。

无线电测量除了对电参数进行稳态测量外,还可以对自动化系统的过渡过程及频率特性等进行动态测量。

三、无线电测量的特点

与其它测量相比,无线电测量具有以下几个特点:

(一) 测量的频率范围宽

无线电测量的频率范围几乎可以覆盖整个电磁波频谱,从直流一直到几十 GHz 以上。在不同的频段内,不仅被测量的项目有所不同,而且所采用的测量方法和使用的仪器也不同。例如,在直流、低频和高频的频段内,被测量主要是电流和电压;而在超高频及其以上的波段,由于对电流和电压的测量渐趋困难,则被测量主要是功率。又如,集中参数阻抗的测量,在直流和低频频段内采用电桥法;而在高频频段内则多采用谐振法;在超高频及其以上的频段内采用驻波法。当然,采用的测量方法不同,所使用的仪器也就不同。

(二) 量程广

量程是指测量范围上限值和下限值之差。在无线电测量中,被测量的大小相差很大。例如,被测电压可能小到不足 $1\mu\text{V}$,也可能大到数万 V;被测电阻可能小到不足 1Ω ,也可能大到几百 $\text{M}\Omega$ 。这就需要测量仪器的量程要宽,而且不同量程范围的被测量要采用不同型式的仪器或不同型式、不同规格的配套附件。

(三) 测量精度高

无线电测量的精度往往比长度、热量、力学等测量技术的精度等级高得多。以频率测量为例,无线电测量的精度已达 $10^{-13}\sim 10^{-14}$,而目前长度、热量、力学等测量技术的精度还尚未突破 10^{-10} 。因此,目前物理量的测量中,无线电测量是最精确的。

(四) 测量速度快

由于无线电测量是通过电磁波的传播和电子运动来进行的,因而可以实现测量过程的高速度,这是其它测量所不能比拟的。只有测量的高速度,才能测出快速变化的物理量。这对于现代科学技术的发展,具有特别重要的意义。例如,原子核的裂变过程、导弹的发射速度、人造卫星的运行参数、高速电子计算机的工作状态等的测量,都需要高速度的无线电测量。

(五) 可进行遥控

无线电测量可以通过有线或无线系统把测量仪器或仪器的传感器深入到人体不便于或无法进入的区域内进行遥测,这对于远距离或人体难以接近的地方进行测量,具有特殊的意义。

(六) 易实现测量的自动化

大规模集成电路和微型计算机的应用,使无线电测量出现了崭新的局面。特别是测量仪器的数字化和微型计算机功能的发展,为计算技术与无线电测量技术的相结合,提供了有利的条件,从而实现了测量的自动化。由计算机控制下的自动化测量,可以实现自动调节、自动校准、自动诊断、自动复位、自动记录、自动进行数据处理等,甚至还可以实现人机对话等高层次功能,目前已成为无线电测量的发展方向之一。

四、无线电测量发展简况

无线电测量技术的发展与其它自然科学技术的发展是密切相关的,是相互促进的。从时间上来讲,无线电测量的发展比其它工程测量的起步时间要晚得多。如果从19世纪初期德国物理学家——欧姆发现欧姆定律算起,至今还不足200年的历史,但它发展的速度却远远超过了其它测量技术。目前,在所有的测量技术中,无线电测量的发展速度一直居领先地位。

在20世纪以前,无线电测量还仅仅限于一般的电气测量范畴。20世纪初期发明了电子管。电子管的出现,推动了电信号的放大与传输技术,使电参数的测量灵敏度大大提高。20世纪40年代,随着半导体器件和传感器的兴起及发展,为测量仪器的小型化和非电量变换成电量的测试提供了必要的条件,从而扩展了无线电测量的应用领域,使无线电测量真正成为测量技术中的一门相对独立的学科。

20世纪50年代,计算机技术开始问世,这就给测量的自动化提供了可能。70年代初期,计算机开始与测量仪器相结合,随着计算机技术的迅速发展,特别是微处理器应用于无线电测量后,使计算机技术与无线电测量技术融为一体,产生了智能化仪器和自动化测量系统,对整个科学技术的进步产生了巨大的影响。目前,无线电测量不仅在国民经济的各个领域中的应用广泛,而且已成为国家科学技术水平发展的重要标志之一。

1-2 无线电测量的方法和误差

一、测量的方法

一个物理量的测量,可以通过不同的方法来实现,而测量方法的种类又很多,本文把常用的测量方法分类介绍如下:

(一) 直接测量法

用预先按已知标准量定度好的测量仪器,对某一未知量直接进行测量,从而得到被测量值的测量方法称为直接测量法。例如,用电压表直接测量电压,用数字式频率计直接测量频率等。

(二) 间接测量法

对一个与被测量有确切函数关系的物理量进行直接测量,然后通过代表该函数关系的公式、曲线或表格,求出被测量值的方法称为间接测量法。例如,要测量已知电阻 R 上消耗的功率,先测量加在 R 两端的电压 U ,然后再根据公式 $P=U^2/R$,求出功率 P 之值。

(三) 组合测量法

在某些测量中，被测量与几个未知量有关，一次测量无法得出完整的结果，需改变测量条件进行多次测量，然后按被测量与未知量之间的函数关系组成联立方程，最后求解得出各未知量。这种测量方法称为组合测量法。组合测量法兼用了直接测量法和间接测量法。

例如，为了测量某电阻的温度系数，需要采用公式

$$R_t = R_{20} + \alpha (t - 20) + \beta (t - 20)^2$$

式中， α 、 β 为电阻的温度系数，

R_{20} 为电阻在 20℃ 时的数值，

R_t 在环境温度为 t ℃ 时电阻值，

t 为测试温度。

当 R_{20} 、 α 、 β 都是未知量时，可采用组合测量法。改变测试温度，分别在 t_1 、 t_2 、 t_3 三种温度下，测出对应的电阻值 R_{t1} 、 R_{t2} 、 R_{t3} ，然后代入上述公式，得出一组联立方程

$$\begin{cases} R_{t1} = R_{20} + \alpha (t_1 - 20) + \beta (t_1 - 20)^2 \\ R_{t2} = R_{20} + \alpha (t_2 - 20) + \beta (t_2 - 20)^2 \\ R_{t3} = R_{20} + \alpha (t_3 - 20) + \beta (t_3 - 20)^2 \end{cases}$$

解此联立方程后，便可求出 α 、 β 和 R_{20} 。

上述三种方法中，直接测量法测量过程简单方便，应用比较广泛。间接测量法比较费时间，应在缺乏直接测量仪器、不使用直接测量法或者直接测量误差较大时采用。组合测量比上述两种方法都复杂，更费时间，是一种比较精密的测量方法，适应于科学研究或一些特殊的、要求较高的场合。

二、测量误差及其修正值

测量的目的就是希望能获得被测量的真值。所谓真值，就是在一定时间和环境的条件下，被测量本身具有的真实数值，即客观存在的确定数值。实际上，无论利用任何量具或仪器，采用任何的测量方法进行测量，误差总是存在的。因此，量的真值是一个理想的概念。

在测量中，误差就是测量值与真值之间存在的差异。误差的表示方法主要有以下几种：

(一) 绝对误差

若被测量的真值为 A_0 ，测量仪器的示值为 x ，其绝对误差为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1-1)$$

由于 A_0 无法求得，故式 (1-1) 只有理论上的意义。通常采用高一等级的标准量具或仪器的示值作为实际值 A 来代替真值 A_0 。虽然，实际值 A 也有误差，但 A 总比 x 更接近 A_0 ，故可以认为 $A \approx A_0$ 。在实际工作中，其绝对误差应该表示为

$$\Delta x = x - A \quad (1-2)$$

绝对值与 Δx 相等、符号与 Δx 相反的值，称为修正值，一般用 C 来表示

$$C = -\Delta x = A - x \quad (1-3)$$

测量用的仪器在接受检定时，由高一等级的标准仪器给出对应的修正值。当受检后的仪器进行测量时，利用测量时的示值和已知的修正值，即可求出被测量的实际值。

$$A = x + C \quad (1-4)$$

例如, 某电压表量程为 1V, 通过检定得出的修正值为 -0.02V , 用这只电压表测量某一未知电压, 其示值为 0.78V 。于是, 被测电压的实际值为

$$A = 0.78 + (-0.02) = 0.76\text{V}$$

修正值有时给出的方式不一定是具体数值, 也可能是一条曲线或一张数表。

(二) 相对误差

为了说明精度的高低, 往往采用相对误差的形式来表示。

1. 实际相对误差

用绝对误差 Δx 与被测量的实际值 A 之比的百分数来表示的相对误差, 称为实际相对误差。

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-5)$$

如前例, 已知 $\Delta x = -C = 0.02\text{V}$, $A = 0.76\text{V}$, 则

$$\gamma_A = \frac{0.02}{0.76} \times 100\% \approx 2.63\%$$

2. 示值相对误差

用绝对误差 Δx 与仪器的示值 x 之比的百分数来表示的相对误差, 称为示值相对误差。

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-6)$$

如前例, 已知 $\Delta x = 0.02\text{V}$, $x = 0.78\text{V}$, 则

$$\gamma_x = \frac{0.02}{0.78} \times 100\% \approx 2.56\%$$

3. 满度相对误差

用绝对误差 Δx 与仪器的满度值 x_m 之比的百分数来表示的相对误差, 称为满度相对误差。

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1-7)$$

如前例, 已知 $\Delta x = 0.02\text{V}$, $x_m = 1\text{V}$, 则

$$\gamma_m = \frac{0.02}{1} \times 100\% = 2\%$$

指针式电工仪表的准确度等级就是按照满度相对误差之值来划分的。例如, 1.0 级的电表就表示 $\gamma_m \leq \pm 1\%$, 并且在表盘上标有 1.0 的字样。根据国家标准 GB776-65《电气测量指示仪表通用技术条件》规定, 常用的电工仪表的准确度等级分为: 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 共 7 个级。

由式 (1-7) 可知, 一只给定的电工仪表, γ_m 和 x_m 就是已知的, 从而测量的绝对误差 Δx 也可以直接求出。

$$\Delta x \leq x_m \cdot \gamma_m \quad (1-8)$$

如果用这只表进行测量时的示值为 x , 那末测量时的示值相对误差为:

$$\gamma_x \leq \frac{x_m \cdot \gamma_m}{x} \times 100\% \quad (1-9)$$

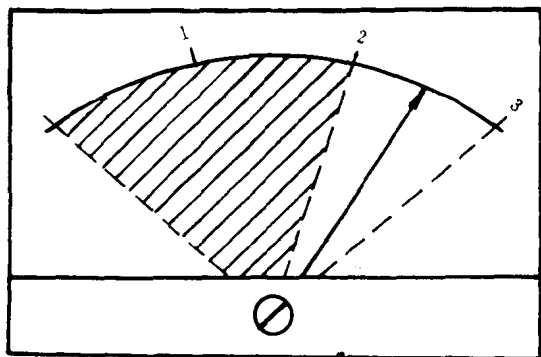


图 1-1 示值误差较小的指针偏转范围

测量中总是要满足 $x \leq x_m$ ，可见当仪表等级确定后， x 越接近 x_m ，测量的示值相对误差越小，测量越准确。因此，在测量中选择量程时，应使指针尽可能接近满度，一般最好指示在满度值的 $2/3$ 以上的区域，如图 1-1 所示。

(三) 允许误差

电工仪表是按准确度等级来表示测量误差的，而对于电子测量仪器来讲，由于其组成往往比较复杂，指针式指示器只是仪器中的一部分（有些仪器中还没有指针式指示器）。所以，影响测量仪器准确度的不仅包含有电工仪表的准确度这一因素，还包含有其它组成部分的准确度和测量方法等诸多方面的因素。因此，电子测量仪器的误差应该是根据技术条件的要求，在某一类仪器中，误差不应超过的最大范围或极限，这个误差的最大范围或极限值就称为允许误差，也称为极限误差或最大误差。通常技术说明书上所指的误差是指允许误差。

允许误差是指某一类测量仪器不应超出的误差最大范围，而不是指某一台确定仪器的最大误差值。例如，有几台合格的同一型号、同一规格、同一生产厂家的 Q 表，技术说明书给出的允许误差是 $\pm 10\%$ ，我们只能认为这几台 Q 表的误差都不会超过 $\pm 10\%$ ，至于其中某一台的误差值是多少，则不知道，只有通过实际检定后才能得知。

允许误差的表示方法，既可以是绝对误差形式，也可以是相对误差形式，或者二者结合起来表示。例如，WQ-5 型万用电桥技术说明书中标出的测量电感时的误差：测量 $1 \sim 122.1\text{H}$ 时，其误差为 $\pm 2\%$ ；测量 $1 \sim 1000\mu\text{H}$ 时，其误差为 $\pm (2\% + 1\mu\text{H})$ 。

三、测量误差的主要来源

测量误差是指测量时，所测量出来的数值与被测量的实际值之间的差异。造成测量误差的原因是多方面的，例如，测量仪器的误差、测量方法的不完善、外界环境的影响、计读测量结果时的视差、操作技术以及测量结果多种偶然因素和干扰等。但其主要来源有以下几个方面：

(一) 仪器误差

仪器误差是由于测量仪器（包括附件）本身电气机械性能的不完善而产生的误差。

1. 读数误差

(1) 校准误差：仪器在出厂或定期检定时，用标准仪器对某些校准点进行校准（定

标)时,所产生的误差。

(2) 刻度误差: 批量生产的同类型仪器, 采用统一刻度盘, 由于每一台仪器的特性并不完全相同, 故在非校准点就引起了不同程度的误差, 这就是刻度误差。

(3) 读数分辨率误差: 读数分辨率是指仪器能读出被测量值的最小变化量。分辨率的高低与仪器的误差是相适应的, 分辨率越低, 读数的分辨率误差越大。如一只 10V 的电压表, 其刻度如图 1-2 (a) 所示, 可读出 9.32V, 小数点后第二位数字是估计出来的, 小数点后第一位数字是准确的。如一只 10V 的电压表, 其刻度如图 1-2 (b) 所示, 由于其读数分辨率比图 1-2 (a) 电压表差, 故只能读出 9.3V, 小数点后的第一位数字是估计出来的。

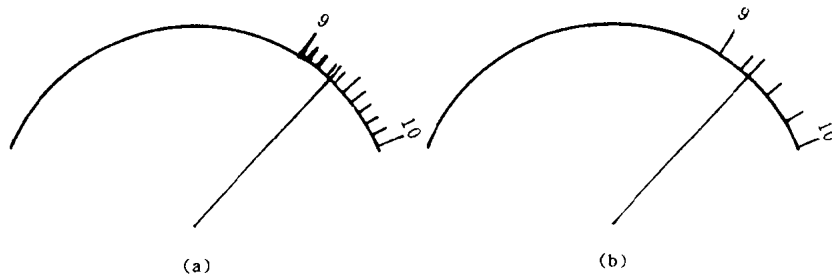


图 1-2 读数分辨率与误差

分辨率是由仪器的稳定性来决定的。为了提高测量的准确度, 可以适当地提高刻度的分辨率。但是, 过分地提高分辨率, 也会因读数的不稳定而失去意义。

(4) 读数调节机构误差: 由于调节机构的不完善, 在顺时针转动后再逆时针转动; 或者, 在逆时针转动后再顺时针转动时, 读数指示不在同一位置上所引起的误差, 简称回差。对于齿轮传动的调节机构, 由于顺时针和逆时针转动时, 齿轮的啮合不在同一处, 使得这项误差特别明显。

为了消除回差的影响, 除了仪器设计和工艺制造时在结构上尽量采取措施外, 使用时也应特别注意仪器说明书的规定。此外, 还可采用一次正向调节, 一次反向调节, 然后取平均值的办法来减小回差。

(5) 量化误差: 在数字化仪表中, 量值转化成数字时, 常常出现 ± 1 字的误差, 称为量化误差。也称为 ± 1 字误差。

2. 内部噪声误差

仪器内部电子元器件产生的各种噪声以及接触不良、继电器动作、电机转动、电源不稳等引起的噪声, 限制了测量灵敏度的进一步提高, 必然会引起一定的误差。统称为内部噪声误差。

3. 稳定性误差

由于仪器内部元器件的老化、机械磨损、弹性疲劳等原因, 所引起的误差。在测量中主要表现为零点漂移和读数不稳。

4. 动态误差

在快速测量时, 由于电路的过渡过程、电表的阻尼时间及有限的机械调节速度等, 形成了一个总的滞后效应, 从而引起的误差, 称为动态误差。

(二) 使用误差

电子仪器因使用不当而增加的额外误差称为使用误差。例如,安放位置和角度不合适、电缆特性阻抗不一致相连接、接触不良、高频时接线太长以及未按操作规程进行预热、调整、校准和测量等。

(三) 人身误差

由于人的感觉器官和运动器官的不完善所引起的误差,称为人身误差。特别是依靠人的眼睛和耳朵来判别或手工调谐的仪器,其误差往往会因人而异。

(四) 影响误差

影响误差又称环境误差。是指仪器在受到外部环境的影响时,所引起的测量误差。如温度、湿度、气压、电磁场、机械振动、声音、光照、电源波动、放射性等的影响。

根据我国 SJ944-75 部颁标准《电子测量仪器环境要求及其试验方法》规定,把电子测量仪器对环境的要求分为 3 组,每组规定一个“额定使用范围”,在此范围内工作,可保证仪器的误差满足要求。例如,就温度的额定使用范围而言,第 I、II、III 组仪器分别规定为 $+10\sim+35^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\sim+40^{\circ}\text{C}$ 、 $-40\sim+55^{\circ}\text{C}$ 。

(五) 方法误差

因测量方法不完善,所依据的测量理论不够严密以及对某些物理量的定义不够明确等原因所引起的误差,称为方法误差。例如,用谐振法测频率时,常用的公式为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

实际上,回路的电感 L 中总存在着损耗电阻 γ_L 。因此,准确的公式是:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{\gamma_L^2 C}{L}}$$

常用的公式中,忽略了 γ_L 的存在,引起了方法误差。

又如,根据 $R = \frac{U}{I}$ 求被测电阻值时,由于测量中忽略了电压表和电流表的内阻所引起的分流和分压作用,也产生了方法误差。

四、测量误差的性质及其分类

(一) 系统误差 (简称系差)

在一定的条件下,误差的数值(大小及符号)保持恒定,或按照一定的规律变化的误差,称为系统误差。它包括以下两种情况:

1. 恒定系差 (简称恒差)

所谓恒定系差,是指误差的数值在一定的条件下保持恒定的系统误差。

2. 变值系差 (简称变差)

所谓变值系差,是指误差的数值按照一定的规律变化的系统误差。根据其变化规律的不同,又可分为以下 3 种情况。

(1) 累进性系差:指在整个测量过程中,误差的数值逐渐增加或逐渐减少的系差。

(2) 周期性系差:指在整个测量过程中,误差的数值发生周期性变化的系差。

(3) 按复杂规律变化的系差:这种系差的变化规律比较复杂,一般用曲线、表格或

经验公式来表示。这种误差的规律在多次测量中具有重复性。

系统误差决定了测量的准确度。系统误差越小，测量结果越准确。实际上，系统误差说明了测量结果偏离被测量真值的程度，而且具有规律性。因此，在测量前细心做好测量的准备工作，检查所有可能产生系差的来源，并设法消除或决定出它的大小；在测量中采用适当的方法或引入修正值加以消除或抵销。例如，为了消除固定性的系统误差，可采用零示法、替代法、补偿法、交换法等测量方法。

（二）随机误差（简称随差）

在重复测量时，由于大量偶然因素的影响，测量误差的出现没有一定的规律，其单次测量的误差大小和符号都表现出随机性，但在足够多次的测量中，误差服从一定的统计规律，具有这种性质的误差称为随机误差。

随机误差反映了测量结果的离散性，离散性越小，测量结果越精密。因此，测量结果的精密度可由随机误差来表征。

因为随机误差是没有规律的，要逐一分析其原因，并对其进行修正是极困难的。但随着测量次数的增加，一直到足够多时，误差的和将趋于零。所以，可借助概率论的知识来研究随机误差的规律。

（三）粗大误差（简称粗差）

粗大误差是指在一定的条件下，测量值明显地偏离其实际值时所对应的误差。

粗大误差是由于读数错误、记录错误、操作不正确、测量过程中的失误、计算误差以及有不能允许的干扰等原因造成的。它明显地歪曲了测量的结果，就误差的数值而言，它远远地超过了同一条件下的系统误差和随机误差。因此，在数据处理过程中应判别出粗大误差，并将其数据剔除。

五、测量结果的表示及其有效数字

（一）测量结果的表示

测量结果常有两种方式来表示，即数字方式和图形方式。用数字方式表示的测量结果，有时是一个数据，有时是一组数据；用图形方式表示的测量结果，有时是显示在荧光屏上的图形，有时是将测量中所得的数据加工处理后绘制成的图形。

用数字方式表示的测量结果，它包括一定的数值（绝对值的大小及其符号）和相应的计数单位。例如，7.1V、465kHz等。测量结果必须注明单位，否则该结果毫无意义。

有时为了说明测量结果的可信度，在表示测量结果时，还要同时注明其测量误差值或范围。例如， $4.32 \pm 0.01\text{V}$ 、 $465 \pm 1\text{kHz}$ 等。用图形表示的测量结果，本文不作讨论。

（二）有效数字

用数字方式表示测量结果时，组成测量结果数值的每个必要的数字，称为有效数字。例如，某电压表的读数为5.43V，这三个数字都是测量结果中必不可少的数字，都是有效数字。也就是说，5.43V这个测量结果是由三位有效数组成的数值。其中前两位是准确读出来的，最后一位是估计出来的，故最后一位数字称为“欠准数字”。如果对测量结果的数值不加说明时，我们即可认为最后一位有效数字（欠准数字）能有 ± 1 个单位的变化。比例，数值5.43V的变化范围是5.42~5.44V，也可写作 $5.43 \pm 0.01\text{V}$ 。

有效数字的位数不仅表达了被测量的大小，同时还表达了测量的精度，它和测量的

误差相一致。有效数字位数越多，测量的精度越高，测量的误差越小。

测量结果中应特别注意“0”这个数字。例如，780mV也可以写成0.780V，它们都是由三位有效数字组成的数值，这两个数值不但大小符号相同，而且表示的精度也相同。0.780V这个数值小数点前的“0”它的作用是定位，并未提供有关测量结果的信息，故不算有效数字。而最后一位的“0”却与测量结果关系很大，是测量结果的欠准数字，表示的误差范围是 $\pm 0.001\text{V}$ ，即 $\pm 1\text{mV}$ 。如果去掉最后一位的“0”，表面看来与780mV在数值的大小和符号上相同，但它表示的精度却与780mV不同，其表示的误差范围即扩大为 $\pm 0.01\text{V}$ ，也就是 $\pm 10\text{mV}$ ，这与原来的 $\pm 1\text{mV}$ 的误差范围相差了一个数量级。

还应当特别注意：误差的单位应与测量数据的表示相一致。例如，某频率计的误差范围是 $\pm 1\text{kHz}$ ，若测量数据表示为 1500kHz ，这是符合有效数字含义的，还可写成 1.500MHz 或写成 $1500 \times 10^3\text{Hz}$ 。但决不允许写成 1500000Hz 或写成 1.5MHz 。

（三）有效数字的处理

在测量中常常碰到先测几个数据，然后把这几个数据进行运算，最后得出结果。如果先测的几个数据精度不一致，这就需要先对它们的有效数字进行必要的处理，也就是对多余的有效数字进行删略，然后再进行运算。

测量数据中那些属于多余的有效数字呢？这既取决于测量误差，又要考虑到一些其它因素。如果保留有效数字位数太多，则运算复杂容易出错；如果保留有效数字位数太少，则会影响测量结果的精度。因为运算后的结果精度受到其中精度最差的一项所限制，因此保留位数总的原则是：参与运算的各个测量数据所代表的精度不高于其中误差最大的一个测量数据所表示的精度。

超出保留位数的有效数字，可认为是多余的应删略，删略的原则是“4舍5入”。其具体要求如下：

1. 舍去时应从最后一位数字开始，逐个向前推进。
2. 大于5的数，舍去后向前位进1，小于5的数舍去后不进位。
3. 恰好等于5时，如5之后有大于“0”的数字，则舍5进1；如5之后无数字或为“0”时，则要看5之前是奇数还是偶数，奇数应舍5进1，偶数则舍5不进位。

例如： $123.458 \rightarrow 123.46$ $123.454 \rightarrow 123.45$

$123.455 \rightarrow 123.46$ $123.445 \rightarrow 123.4$

1-3 计量的基本知识

物理量的单位必须以严格的科学理论为依据来加以定义，而同一物理量的各种量具或仪器所表示的单位都必须与所定义的单位相互统一。计量就是保证单位统一、量值准确一致的测量。

计量和测量既有密切的联系，又有不同的分工。没有测量就谈不上计量；没有计量测量也就失去意义。计量的目的在于保证测量的单位统一和量值的准确一致。因此，测量的统一性和精确度要靠计量来保证。

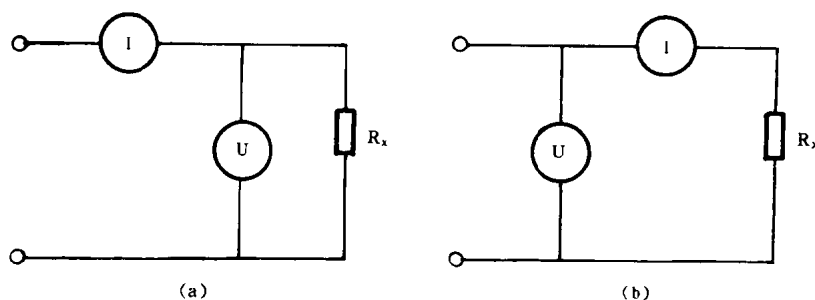
计量是具有权威性和法制性的。为了保证单位的统一和量值的准确一致，需要通过

各级基准、标准把单位量值逐级传递到工作用的量具和仪器上。因此，国家设立了计量部门，国务院和各省、市、自治区都设立了相应的计量局，各县、区、局及有关企事业单位都建立起计量机构，专门从事基准和各级标准的研制、建立、保存及量值传递工作。

计量是管理社会的有效制度之一，任何一个稳定的社会都非常重视计量工作。1985年9月我国颁布了《中华人民共和国计量法》，规定从1986年7月1日起施行。国家计量部门对计量工作是按照法定的传递程序和检定规程进行的。各种工作用的量具和仪器，特别是电子测量仪器，由于元器件的老化或性能的不稳定以及操作的失误等原因，造成在一段时间后精确度下降，导致测量误差增大，应定期检定，以保证测量数据的精确度。

复 习 思 考 题

1. 若测量10V左右的直流电压，仓库里有两种直流电压表，其中一种是量程为150V的1.5级电压表，另一种是量程为15V的2.5级电压表，问选用那一种比较合适？为什么？
2. 用量程为100mA 2.0级的电流表，去测量甲、乙两回路的电流值分别为10mA、80mA，试求：两个测量结果的示值相对误差，并讨论所得的结果。
3. 用习题图1-1 (a)、(b) 两个电路来测量电阻 R_x ，设电流表的内阻为 R_I ，电压表的内阻为 R_U ，求两种情况的测量误差（绝对误差和相对误差），并讨论所得的结果。



习题图 1-1

4. 下列各组数据中那些数据是相同的？为什么？
 - (1) 12V、12.0V、12.000V、 $12 \times 10^3 \text{mV}$ 、12000mV、0.012kV。
 - (2) 465kHz、0.46500MHz、465000Hz、 $465 \times 10^3 \text{Hz}$ 、0.465MHz、465.00kHz、0.465000MHz、465.000kHz。
5. 根据有效数字的舍入原则处理下列数据，保留小数点后两位

8.1340, 12.126, 4.5452, 24.4550, 24.4650, 18.975。

第二章 电压的测量

2-1 概 述

电压、电流和功率是表征电信号能量大小的 3 个基本参量。在集中参数电路中，电路系统中的各种控制信号、输入和输出信号、反馈信号等，主要表现为电压形式。许多电子仪器和设备的技术指标，例如灵敏度、频率特性、增益、衰减、调制度、失真度以及噪声系数等都是电压的派生量。各种电路的工作状态，如谐振、平衡、差拍、饱和、截止以及工作点的动态范围等也通常以电压的形式反映出来。许多仪表都以电压的形式作为指示或辅助监视。电压和电流由欧姆定律相互联系，它们是描写一个事物的两个相关联的方面。考虑到电流测量在操作的安全性、方便性、准确性以及过载能力等方面较电压测量差，故在无线电测量的技术中，除了直流电流外，几乎都采用电压的测量。可见电压测量技术是无线电测量技术中最基本、最常用和最重要的内容之一。

一、被测电压的主要特点

无线电测量中的被测电压，主要有以下几个特点：

(一) 频率范围很宽

目前被测电压的频率范围从直流到几 GHz。近几年来，随着超小型同轴元件的相继研制成功，电压的频率上限已推进到数十 GHz。

(二) 电压值范围很宽

通常被测电压的下限在零点几个 μV ，上限在 10000V 左右，少数情况可达几万、几十万 V。例如，大型发射机的直流高压，示波管和显像管的直流供电电压等。

(三) 电压波形种类多

除了直流和正弦波电压外，还会有许多非正弦波电压，如矩形波、三角波、脉冲波、调制波、噪声波电压等。

(四) 组成复杂

被测电压中往往含有直流及噪声干扰等不需要测量的成分，使被测电压不但成分复杂，而且不易分离，幅值也不稳定。

二、电压测量的基本要求

针对被测电压的特点，我们对电压的测量提出以下几个方面的基本要求：

(一) 首先应了解被测电压的种类，是直流电压还是交流电压，是正弦波电压还是非正弦波电压等，以便确定所用电压表的类型。

(二) 根据被测电压的频率范围, 兼顾被测电压值的范围, 选择合适的电压表。注意电压表的频率范围对被测电压的频率范围要有一定的余量, 电压表的量程下限应有一定的增益, 量程的上限尽量不使用外加分压器, 以减少附加的误差。

(三) 测量电压时, 应使被测电路的工作状态基本不受影响, 这就要求电压表从被测电路中吸收的功率尽量少。因此, 要求电压表的输入阻抗尽量高, 即输入电阻尽量大, 输入电容尽量小。输入电容主要受电路结构的限制, 一般可做到 $1\sim 10\text{pF}$ 。影响输入电阻的因素比较多, 如随着频率的升高输入电阻下降等, 而且输入电阻不一定为常数。在测直流时, 输入电阻可做到几十 $\text{M}\Omega$ 到几百 $\text{M}\Omega$, 直流数字电压表甚至可达几千 $\text{M}\Omega$ 。在测交流时, 输入电阻的典型值约为 $1\text{M}\Omega$ 。

(四) 采用各种技术措施, 消除不需要测量的成分。例如, 采用电容隔直、屏蔽、测量连线尽量短、接地良好等技术措施, 以提高测量的准确度和可靠性。

此外, 还应逐步考虑电压测量的数字化、自动化、多功能等问题。

三、交流电压的表征

一个交流电压可以用峰值、平均值、有效值以及波形因数、波峰因数来表征。

(一) 峰值 U_m

任意一个周期性交流电压 $U(t)$, 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_m 来表示。峰值是从参考零电平开始计算的。它有正峰值和负峰值之分。

(二) 平均值 $\bar{U}$

平均值 $\bar{U}$ 在数学上的定义为:

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt \quad (2-1)$$

即电压的平均值等于此电压绝对值的平均值。因为在交流电压的测量中, 总是要先把交流电压变换成直流电压后才进行测量, 故平均值一词通常指检波后的平均值。

(三) 有效值 U

两个阻值相同的电阻, 一个通以直流, 一个通以交流。如果在同一时间内, 它们所产生的热量相等, 则其中直流电压的数值即为另一个交流电压的有效值。在数学上, 有效值这一名词与均方根是同义词。于是,

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (2-2)$$

有效值这一名词, 比峰值或平均值应用广泛得多。只要不是单独指出, 日常的书写、称呼以及有关仪表的指示值均指有效值。

(四) 波形因数 K_F

交流电压的有效值与平均值之比, 称为波形因素。

$$K_F = U / \bar{U} \quad (2-3)$$

(五) 波峰因数 K_P

交流电压的峰值与有效值之比, 称为波峰因素。

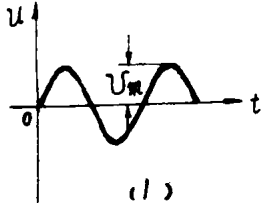
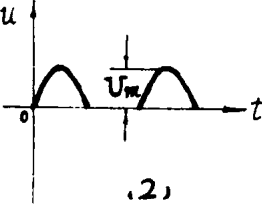
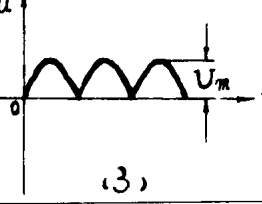
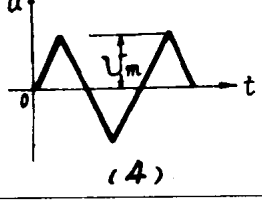
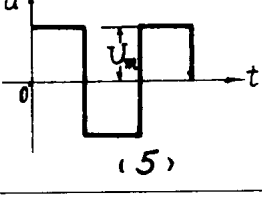
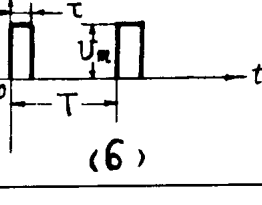
$$K_P = U_m / U \quad (2-4)$$

峰值、平均值、有效值是从不同侧面来描述一个交流电压的量值。波形因数和波峰因数又表示出以上 3 个量值的关系, 从而使 3 个量值之间互相转换。不同种类的波形其

波形因数和波峰因数都不同。表 2-1 展示出几种常用的交流电压的表征参数。从表中可以看出，表征交流电压的 3 个参数是可以互相转换的。

注：表中 U_m 表示以下各种交流电压的峰值

表 2-1 几种交流电压的表征参数

序号	名称	波形图	有效值 U	平均值 $\bar{U}$	波形因数 $K_F=U/\bar{U}$	波峰因数 $K_P=U_m/U$
1	正弦波		$U_m/\sqrt{2}$	$\frac{2}{\pi}U_m$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$	$\sqrt{2}$
2	半波整流正弦波		$\frac{U_m}{2}$	$\frac{1}{\pi}U_m$	$\frac{\pi}{2}$	2
3	全波整流正弦波		$\frac{U_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{2U_m}{\pi}$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$	$\sqrt{2}$
4	三角波		$\frac{U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{U_m}{2}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{3}$
5	方波		U_m	U_m	1	1
6	脉冲		$\sqrt{\frac{\tau}{T}}U_m$	$\frac{\tau}{T}U_m$	$\sqrt{\frac{T}{\tau}}$	$\sqrt{\frac{T}{\tau}}$