

电子测量与仪器

张乃国 选编

清华大学自动化系

01 02 03 04 05 06 07

08 09 10 11 12

13 14 15 16 17 18 19

前 言

科学技术的发展与测量技术及测量仪器是息息相关的。测量是认识世界的重要手段。可以说，离开测量，科学研究工作是无法进行的，各种科学实验结果的正确与否只能通过精密地测量才能确定。

测量技术在当今已成为一门科学，各个领域已广泛应用电子学来解决各种测量问题，它对科学事业做出了重大贡献。

电子测量仪器发展很快，类型繁多。现在的仪器多为晶体管或集成电路组成，最近已出现了由微处理器等组成的数字化自动化仪器。测量技术的发展促进了科学的发展，而科学的发展也促进了测量仪器的发展。

测量技术在我们国家的“四化”建设中将起着越来越重要的作用。电子仪器是我们从事电子技术和自动化技术工作人员必不可少的测试工具，正确地使用和维护电子仪器，充分发挥它的功能是我们一项“基本功”。并且对培养学生独立进行科学实验的能力、提高实验质量也是必要的。而要达到这一点，必须掌握电子仪器的电路原理及测量方法。并且也为进一步从事科学研究或实验技术工作打下基础。

本教材以电子线路测试中常用的十余种典型电子仪器为例，并以测量技术为基本思想，讨论各种仪器的电路原理及其功能（其中以电子示波器为主）。本课是《电子技术基础》的后续课，在教学过程中，除讲课外，还安排有习题、实验和阅图练习等环节。

书中存储示波器一节由中国科学院计算技术研究所张光明同志协助编写。其它参考资料见附录Ⅶ，在此对原作者表示谢意。

本书是由前几年电子仪器专题课讲义、仪器说明书及有关资料选编而成，以满足教学急需使用。由于时间甚为仓促，缺点一定很多，希望读者提出修改意见。

编 者

一九八〇年二月

目 录

前 言

第一章	测量方法与测量误差	1
§1	电子测量的意义与特点.....	1
§2	测量方法.....	4
§3	测量误差.....	5
一、	误差的定义.....	5
二、	容许误差及等级.....	7
三、	测量误差的分类.....	8
四、	测量误差的估计.....	10
五、	系统误差的消除.....	14
六、	偶然误差的估算.....	17
第二章	晶体管繁用表	19
§1	晶体管交流放大大型繁用表 (MF—20 型)	19
一、	技术性能.....	19
二、	电路工作原理.....	20
三、	使用方法.....	25
§2	晶体管运算放大大型繁用表 (JFX 型)	28
一、	技术性能.....	28
二、	电路工作原理.....	32
三、	使用方法.....	37
第三章	信号发生器	43
§1	正弦波信号发生器 (XD—2 型)	43
一、	技术性能.....	43
二、	电路工作原理.....	44
三、	使用方法.....	52
四、	检修方法.....	53
§2	脉冲信号发生器 (XC—28 型)	61
§3	函数发生器 (XFD—6 型)	64
第四章	电子示波器	65
§1	电子示波器的主要指标及发展概况.....	65
一、	电子示波器的分类及主要技术指标.....	65

二、发展过程	68
三、目前水平	68
四、发展趋势	72
§2 示波管及其显示波形的原理	75
一、普通示波管的原理	75
二、电子束偏移规律	82
三、高灵敏度示波管	85
[附] 示波管型号命名的意义	87
四、示波管显示波形的原理	88
§3 普通示波器 (SB—10 型)	97
一、技术性能	97
二、电路结构	97
三、垂直偏转系统	98
四、水平偏转系统	105
五、电源及光点调节系统	112
六、附属电路	113
七、使用方法	113
八、校验与调整	115
九、常见故障的检查与修理	121
十、阅图练习: 195A 型示波器	129
十一、实验提纲: 普通示波器的校验	135
§4 脉冲示波器 (SBM—10 型)	137
一、技术性能	137
二、电路结构	139
三、垂直偏转系统	140
四、水平偏转系统	166
五、直流变换器	209
六、高频高压及示波管显示电路	215
七、低压电源	218
八、校准信号发生器	222
九、整机电路结构图	225
十、使用方法	225
十一、维修方法	231
十二、校准方法	238
§5 多踪显示的意义及方法	241
一、实现多波形显示的意义	241
二、实现多波形显示的方法	243

§6	双踪示波器 (SR—8 型)	248
	一、示波器概况	248
	二、技术性能	248
	三、电路原理	251
	四、主要旋钮作用	267
	五、使用方法	269
	六、阅图练习: SR—20 型双踪示波器	273
	[附] 常用国产示波器的主要技术性能表	277
第五章	存储式示波器	279
§1	记忆式示波器	279
§2	存储取样示波器 (CSQ—7901 型)	287
第六章	数字式仪器	307
§1	概述	307
	一、数字电压表的特点	307
	二、数字电压表的发展	308
	三、数字电压表的类型	310
§2	数字四用表 (DSX—1 型)	312
	一、双积分型数字电压表的工作原理	312
	二、技术性能	316
	三、直流电压的测量	318
	四、直流电流、电阻及交流电压的测量	323
	五、单元电路	326
	六、使用方法	330
	[附] 中规模 MOS 计数集成电路简介	331
§3	数字频率计 (PB—2 型)	335
	一、技术性能	335
	二、工作原理	337
	三、测量误差来源分析	343
	四、使用方法	345
附录 I	电子管及其电路	351
II	实验室常用电子仪器简介	379
III	电子仪器一般检修方法及安全知识	406
IV	参考资料	413

另附: 电子测量仪器电路图册

第一章 测量方法与测量误差

第一节 电子测量的意义与特点

测量是一种认识过程，就是用实验的方法，将被测量同选用的单位量进行比较，从而确定大小。

测量不管在科学技术和生产的任何部分的日常工作中，都十分重要。

科学研究工作常对事物进行实验性的探讨，这实际上就是一系列的测量。没有适当的测量方法和仪器，科学工作是无法进行的。从科学发展史可以了解，测量技术的完善，测量精度的增加，会促使人们发现新的自然规律，反过来，科学本身进步又给测量技术的进步发展创造了条件。

测量在生产中也起着巨大的作用，现代化大生产领域中基本原则——没有普遍发达的测量技术是不行的。所有关于生产产品质量，生产经济和废品防止等问题的解决，最后都取决于测量水平的高低。在生产电子设备中，测量则更为重要。电子设备生产基本上可分为机械装配和调试二个阶段。没有精确的测量仪器和有效的测试方法，则在设备的调试过程中，就不可能得到已给的电气参数和进行设备定度。对于自动化的生产，在工艺过程的控制方面，各种联动机和其它设备的安全利用方面，测量技术有更重大意义，所以测量方法和仪器的日益完善是生产水平的极为重要的指标。

目前电子学的发展对于科学、技术、工业、农业和国民经济各部分的发展的速度和规模起着相当大的作用，从而关系到我国人民的物质生活水平的提高；而在新的科学部门中，如原子能的研究，宇宙空间的探测等方面，更加占有特别重要的地位。

测量仪器和测量技术在研究和利用电子学方面已有特别重要的作用。因为只有依靠测量仪器才能对所研究的对象进行正确的估计和深刻的分析。凡是从事电子设备设计、制造、试制或运行的工程技术人员，都必须熟悉电子技术中日常用到的各种测量方法，和掌握其原理，才能胜任自己的工作。电子测量课程便是为培养学生这方面能力。

虽然电子技术是电工技术的基础上发展起来的一门技术，但由于它的特殊，测量内容要比电工测量丰富和复杂得多。这主要表现在以下几个方面：

一、在电子测量中待测量种类比电工中多，在电工中主要测量的故量是电压、电流、电阻、电功率和电容电感以及频率相位等一些故量。而在电子测量中，除了要测以上提及的量外，还要测电工中更本不测或不常测的量，例如线圈和回路的品质因素、非正弦波的失真系数。此外还有对各种电子设备的技术特性的系统测量。

二、电子测量需要在极其广泛的频率中进行——随着电子技术的发展，电子测量的范围已经从直流扩展到数万兆赫以上。在不同频率范围内，不仅经常测量之量的种类会有不同，而且所采用的方法仪器也会不同。如电流电压在直流和音频、高频范围内都很重要，但通常采用不同的安培计和伏特计来进行。又如阻抗的测量，在直流和低频时采用电桥较好。在高频时则采用谐振法。

(三) 电子技术中待测量故值极广，而常遇到的是大功率高阻抗电路。例电压可能小到不到1微伏，而大到数千伏。功率小到微瓦而大到兆瓦，电阻自兆欧到毫欧，电容自微法到千微法，频率自若干分之一赫到数万兆赫，测量大小如此悬殊的故，必须采用各种不相同的方法和仪器才行。

四、电子设备中的电压和电流具有各种不同的波形——这些波形除了正弦波外有失真的正弦波、方形波、锯齿波及各种特殊的脉冲波，和各种已调波。由于波形不同测量时需去测其峰值、平均值、有效值，有时还需去用示波器直接观察其波形，或用其它一些特殊仪器测其某些特征。

五、电子测量仪器的种类和构造复杂——由于被测量种数多，数值广，频带宽和波形奇特可知，电子测量仪器一定比电工仪器多得多。绝大多数的电子仪器都必须采用电子电路。这样他们的构造原理使用的方法当然会比简单的电表复杂得多。而且有一些较复杂的仪器是为了某种测量方法的需要而将各种测量部件组合在一起成一套体，因此对它的介绍便与测量方法分不开。有一些复杂仪器可借助附件改装成各种不同用途和量程的仪器。有一些是为测量某种电子设备的全部性能的所谓成套仪器。由于这情况，使得测量仪器的研究、在电子学中占有重要的位置。

六、在高频测量时会遇到低频测量所没有的困难。在一个测量电路中，由于元件引线 and 地彼此之间的分布电容，和互感的存在产生了不需要的耦合，而这些杂散的耦合引起的有害影响，随着频率的增高会越来越来大，以致于使测量无法进行。测量元件中电阻、线圈电容残余参数的影响，以及集肤效应和介质的损耗等也随着频率的增大而增大，因此在高频测量中，还必须注意和了解考虑电路元件本身的频率特性，才能获得正确的结论。

学习本课程时，主要要求弄清每种基本电量的测量方法和原理，各种常用仪器的典型构造、性能和应用范围。由于所涉及的测量任务、测量方法和测量仪器的繁多，在学习时应注意熟悉何种方法和何种仪器适用于何种场合。以及在何种频率下测量任务大小的何种电量。应采用何种方法和仪器。本课程的教学

方法是课堂上着重讲授各种仪器测量方法和典型仪器的原理。对一些重要仪器的构造，使用方法和性能的了解，则通过实验的方法完成。

第二节 测量方法

测量某一物理量就是将它与被采用作为测量单位的同类量相比较，也即是说，确定被测量包含给定单位的若干倍，或仅是该单位的若干倍若干部分。测量结果是一个有量数，包括数字大小和单位名称。

为某种测量做好的具体的实物样品，我们称之为单位度量。

为将被测之量与测量单位进行比较时，所用的装置，称之为测量仪器。

为实现测量（即为获得所需要的测量结果）所采取的各种不同方案，称之为测量方法。测量方法可从不同的观点上加以分类：

按获取被测量方法不同，有直接法、和间接法。凡直接以被测量为对象进行测量以获得其数值的的方法称为直接法，不直接测量被测之量、而测量与被测量有一定函数关系的其它量，然后测得诸量的数值来计算被测量的数值的方法称为间接法，直接法不但简单而常用，同时也是间接法的基础。间接法是在当被测量不能或不便于直接测量时，或间接法可取得比直接法更为正确的结果时才用之。

按直接法进行测量又可以有下列两类方式：一类是将被测之量直接与该种量的度量进行比较以确定其数值大小。另一类是利用事先已被测之量的单位定度的测量仪器来直接显示被测之量的数值。前一类方法称为比较法，后一类称为直接法。

直接读数测量法，只要用直接读数式仪器进行，一般不需要度量参加，故测量手续最为简单和快速。虽然此法精度不能很高，

但在工程技术中采用极为普遍。例如：在电工和电子测量中，用得最多的各种指示电表，便属于直读式仪仗。

比较测量法利用比较仪仗进行，并且一般还要有度量的参与。比较法一般能比直读法获得较高的精度。但测量时较为费时和费事。

按照比较方式不同，比较法又可分为零示法、测差法和替代法。

零示法——在此法中，是使被测之量对于测量仪仗的作用被另一类的已知量（度量）抵消到零。例如：用平衡的电桥测量电阻便属于零示法。零示法有很多固有的优点，因而适宜于正确测量。

测差法——就是用仪仗测出被测之量，和一个与之近乎相等的已知度量之间的差值，从而确定被测值的办法。在此法中即使测量差值时的准确度不高，最后所得测量结果的准确度仍然可以很高。

替代法——在此法中，是在一定的测量条件下，选择一个适当的大小的已知量（度量）使之能在测量仪仗中代替被测之量而不引起测量仪仗示数的改变。这样便可以肯定被测之量的数值是与该已知量相等。一般来说，利用替代法可以消除固定的误差因素对于测量结果的影响，从而提高测量准确度。

上述几种方法在电子测量中都被采用，其中以零示法最为重要，替代法次之。

第三节 测量误差

一、定义：

度量和测量仪仗的误差的决定是以标准的度量和测量仪仗为根据的。

在度量上标明的数值，称为度量标称值，根据准确度与精确测量仪口所确定出的度量的数值称为度量的实际值（注意实际值并不是真实值）。度量的标称值 A_H 与其实际值 A 的差 ΔA 称为度量的绝对误差，即：

$$\Delta A = A_H - A \quad (1-1)$$

绝对误差的负值，即实际值与标称值的 δA 称为度量的补值（或称校正值）即：

$$\delta A = A - A_H = -\Delta A \quad (1-2)$$

由是得：

$$A = A_H + \delta A \quad (1-3)$$

即度量的标称值与其补值的代数和便等于其实际值。

度量的绝对误差对于度量的实际值的百分数 γ ，称为度量的相对误差，即：

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A} \times 100\% = \frac{A_H - A}{A} \times 100\% \quad (1-4)$$

由于 A_H 和 A 的数值很相近，在求相对误差时一般可将上式分母中的 A 用 A_H 代替，而结果差别不大。

测量仪口的绝对误差 ΔA 是以仪口在测量某量时所给出的示数 A_1 与被测之量的实际值 A 的差别说明之即：

$$\Delta A = A_1 - A \quad (1-5)$$

所谓被测之量的实际值是指用标准度量或标准测量仪口所确定的该量的值。

和度量相仿
$$\delta A = A - A_1 = -\Delta A \quad (1-6)$$

称为仪口的补值，而下式

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A} \times 100\% \approx \frac{\Delta A}{A_1} \times 100\% \quad (1-7)$$

称为仪口的相对误差。

对于某些测量仪口（例如所有的指针式仪表）他们的误差程度以其绝对误差 ΔA 对于其量程的满刻度 A_n 的百分比说明之更有意义，这样表示的相对误差称仪口的额定相对误差（或称满度相对误差）即：

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{A_n} \times 100\% = \frac{A_1 - A}{A_n} \times 100\% \quad (1-8)$$

测定仪口或度量的误差的手续称为校别和修正

例1：

欲用一只量程满刻度为 $I_n = 50$ 安的电表测电流，读数为 $I_1 = 20$ A；但同时用标准安培计测出该电流的实际值为 $I = 20.5$ A。于是便知该安培计在其 20 安刻度上的绝对误差为：

$$\Delta I = I_1 - I = 20 - 20.5 = -0.5 \text{ A}$$

补值为：

$$\delta I = I - I_1 = 20.5 - 20 = +0.5 \text{ A}$$

相对误差为：

$$\gamma = \frac{\Delta I}{I} \times 100\% = \frac{-0.5}{20.5} \times 100\% \approx -2.5\%$$

或认为：

$$\gamma = \frac{\Delta I}{I_1} \times 100\% = \frac{-0.5}{20} \times 100\% = -2.5\%$$

用安培计满刻度值的百分数表示的满刻度相对误差为：

$$\gamma_n = \frac{\Delta I}{I_n} \times 100\% = \frac{-0.5}{50} \times 100\% = -1\%$$

二、允许误差及等级

制造度量或测量仪口的国家，按国家计量机关所制定的检定规程的规定所确定的某项度量或测量仪口在正常使用条件下所不应超过的最大误差称为该项度量或仪口的允许误差。度量和

測量儀口的準確度（即其示數的可靠程度）通常就以它們的容許誤差的數字來說明。允許誤差愈小者準確度愈高。由於容許誤差只是規定誤差的數值限度而不限定其符號，故通常在容許誤差數字之前標以“±號”

度量的容許誤差有的用絕對誤差的形式規定，也有的用相對誤差來規定。例如某種標準電阻的線圈的容許（相對）誤差為±0.01%，某種標準可變電容口的容許（絕對）誤差為±1微法等。

測量儀口的允許誤差，按儀口的種類有的用絕對誤差表示，有的用相對誤差表示（例一般測量相位的儀口的容許誤差通常說成若干度，而某種用電橋測量電容時允許誤差規定為±2%）還有用相對誤差和絕對誤差結合表示。（在儀口的最小量程中常常如此表示，例如上述電橋在測量5毫亨以下的電容時允許誤差規定為±3%，±5微亨）至於絕大多數的指針式儀表（象各式安培計、伏特計等）它們的允許誤差都用滿度相對誤差的形式表示。

某一種儀口的允許誤差應該用什麼形式來表示是根據該項儀口的性質決定的。例如一般指針式儀口誤差具有這樣的性質，即在刻度的各部分均可能出現同等大小的最大絕對誤差，而為了說明這樣大小的絕對誤差對於儀表的量程是否嚴重，便應把它表示為量程或刻度值的百分數，換言之，即應以滿度相對誤差的形式表示之。

例2，設某伏特計量程滿刻度100伏，準確度（允許誤差）規定為±1%，這便說明在其刻度的各部分上可能出現的最大絕對誤差均為其滿刻度值的1%，即 $100 \times 1\% = 1$ 伏。

三 測量誤差的分類

不論我們用什麼方法和什麼儀口來測量一物理量，也不管

测量是如何仔细地进行，我们所得结果都只能说是被测量的近似结果，而不能说是真正值。这不但是因为我们在测量过程中会受到主观和客观因素的影响，以致不能获得理想结果，而且因为我们用以进行测量的实际度量衡和测量仪器与他们相应的原始基准中也存在一些差异。本来，测量与被测量之间得到的数值与该量真正值之间的差称为测量误差，然而，由于实用的变量与测量仪器不是直接根据各级标准度量衡和测量仪器来校准和改正，所以，在一般测量中测量误差通常不以被测之量的真正值为参考，而只能借指标准度量衡和测量仪器来确定的该量的实际值为参考较有实际意义。测量误差也有绝对误差和相对误差两种表示方法，而以相对表示法为最常用。测量误差的大小便是测量准确度（即测量结果接近于实际值的程度）的标志。

测量误差的来源和性质是多种多样的。从便于估计和确定误差大小的观点来看，测量误差可以分为三类，即：系统误差、偶然误差和疏忽误差。

所谓系统误差，就是指在重复进行同一一次测量时，其大小保持不变或按一定规律而变的误差。这类误差通常来自测量设备的不完美和使用不当、环境条件的影响、观测者的个人癖好及所用测量方法不严格等原因。这类误差的存在可在不同情况下用不同仪器甚至用不同方法重复测量同一量，而由测量的差别发现之。由于它们的规律性，这类误差通常可借细致地研究它们的发生原因和性质而设法防止或消除之，或者设法确定其大小，然后在测量结果中引入适当的补值以改正之。

偶然误差是指那些由于一切偶然原因而杂乱出现的，不带任何规律性的误差。这种误差的大小仅就个别次测量的结果是无法估计或消除的。然而当在同样条件下以同样注意力重复进行很多次测量时，这种误差将服从下述两条公理，即（1）等值而异号

的误差出现的机会同样多；(2) 愈大的误差出现的机会愈小，而过大的误差几乎不出现。因此，若取各次测得的数据的算术平均值，作为最后的结论，则它们所包含的偶然误差将大为抵消。

所谓疏忽误差是指在测量过程中由于观测者的偶然疏忽而发生的过大误差（例误读仪表的示数或误作记录等）这种误差一般很容易看出；对于显然包含有疏忽误差的观测结果，应予舍去不计。

四 测量误差的估计

在大多数工程测量中，我们通常满足于这样的准确度，就是只求结果的测量误差不超过事先给定的限度，例如 $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 1\%$ 等。而不要求确实误差的大小。在这种测量中通常只要选用准确度（即允许误差）能与所要求的测量准确度相适应的度量衡和测量仪器来进行测量，而且测量通常只进行一次。所以在这种情况下，问题通常只在于如何根据所拟采用的测量仪器的允许误差估计出测量结果中所包含的最大误差，以观其是否超过所要求的限度。对于其中实有的系统误差通常不需要作具体的分析与改正；而偶然误差，由于只进行一次测量，也无法加以计算。下面讨论在几种简单情形下对于一次测量误差的估计方法。

1). 当测量是用直读式仪器按直接法进行时，最大测量误差按下述方式估计。

(1). 如所用仪器的允许误差是用绝对值误差和相对误差的形式表示，则测量误差的最大可能数值便等于仪器的允许误差的数值大小。

(2). 如所用的允许误差是满刻度相对误差的形式表示，则测量结果的最大误差须根据仪器的允许误差和仪器的示数来求取。

设所用仪表的刻度盘上或其出厂说明书上标明的准确度（即

允许满刻度相对误差) 为 γ_m

则按定义:

$$\gamma_m = \frac{\Delta A_{\text{最大}}}{A_n} \times 100\% \quad (1-9)$$

其中 $\Delta A_{\text{最大}}$ —— 仪表的最大绝对误差。

A_n —— 仪表量程的满刻度。

由上式可得: 在仪表盘的任意点上, 所可能有的最大绝对误差, 亦即用这仪表测量任何量时所得的结果中可能有的最大绝对误差为

$$\Delta A_{\text{最大}} = \frac{\gamma_m A_n}{100\%}$$

将最大可能绝对误差与被测之量的测得值 A 之比用百分数表示之, 便得最大可能的相对测量误差: (1-10)

$$\gamma_{\text{最大}} = \frac{\Delta A_{\text{最大}}}{A} \times 100\% = \frac{\gamma_m A_n}{100\%} \times \frac{100\%}{A} = \gamma_m \frac{A_n}{A}$$

由式(1-10)可以看出, 最大相对测量误差不仅决定于仪表的准确度, (γ_m), 而且仪表的示数对其满刻度值之比有关。当仪表的示数较满刻度为甚小时, 测量误差将远较仪表的允许误差为大。因此, 使用指针式仪表时, 应使指针接近被测值的量程, 使指针出现于上半部(盘上)最好接近满刻度。

例3. 设某伏特计满刻度为100V, 准确度为 $\pm 1\%$ 。试求用这伏特计测量10伏电压时和测量80伏电压时最大可能的测量误差:

测量10V时, 最大可能相对误差为:

$$\gamma_{10} = \gamma_m \frac{U_n}{U} = \pm 1\% \times \frac{100}{10} = \pm 10\%$$

测量80V时:

$$\gamma_{80} = \pm 1\% \times \frac{100}{80} = \pm 1.25\%$$