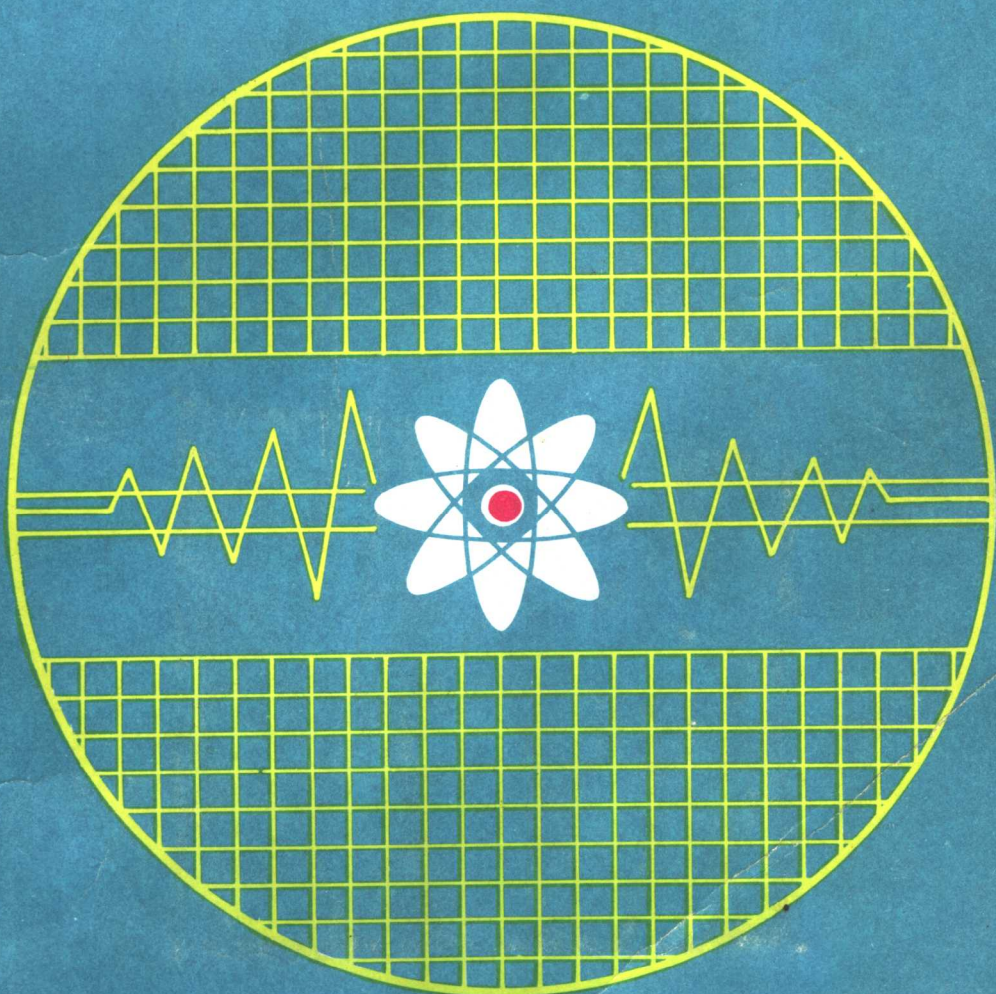


全国技工学校仪器、仪表类通用教材

常用电工电子仪器仪表 使用与维护



中国劳动出版社

全国技工学校仪表类通用教材

常用电工电子 仪器仪表使用与维护

劳动部培训司组织编写

(京)新登字114号

内 容 提 要

本书根据劳动部培训司制订的技工学校仪器、仪表专业《常用电工电子仪器仪表使用与维护教学大纲》编写。供技工学校招收初中毕业生使用的统编教材。

本书内容包括：电工电子仪器仪表概述及测量基础知识、电流表与电压表、万用表、绝缘测试仪、电桥、Q表、信号发生器、示波器与图示仪、电子计数器、数字电压表、数字万用表等。同时结合有关知识安排了一些实验项目和练习题。

本书也可作为青工培训和职工自学使用。

本书姜邈、段志源、徐洁、段静编写，姜邈主编；施景斌审稿。

常用电工电子仪器仪表使用与维护

劳动部培训司组织编写

责任编辑：黄未来

中国劳动出版社出版

(北京市和平里中街12号)

北京大兴包头营印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

787×1092毫米 16开本 18.25印张 451千字

1992年4月北京第1版 1992年4月北京第1次印刷

印数：7200册

ISBN 7-5045-0939-6/TH·052(课) 定价：3.00元

前 言

为适应仪器仪表工业的发展,满足技工学校仪器仪表专业教学的需要,我们组织编写了技工学校仪器仪表类教材。这套教材从技工学校培养目标出发,以中级技术等级标准为依据,注重理论联系实际和对学生能力的培养,有针对性和实用性,可供学制三年的技工学校仪器仪表专业使用,也可作为职业高中和企业中级技术工人培训的教材。

此套教材首批出版的有:《机械仪表材料零件与机构》、《非电量变换与电测应用》、《常用电工电子仪器仪表使用与维护》、《电动单元组合仪表》、《仪器仪表装配工艺基础》(机械分册、电工分册、电子分册)等七种。生产实习教材将陆续组织出版。技工学校仪器仪表专业教学计划中规定开设的其它有关课程,可使用技工学校机械类和电子类的有关教材。

本套教材的编写得到了机械电子工业部仪器仪表司、北京市仪器仪表工业总公司、北京市电子工业办工室、上海市仪表电讯工业局、四川仪表总厂等单位的大力支持,在此表示衷心感谢。

由于编写经验不足,书中肯定存在一些缺点和不足,恳切希望读者提出宝贵意见,以便适时修订。

劳动部培训司

一九九一年八月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 电工仪表及电子仪器概述	1
§ 1-2 测量仪器新技术	2
§ 1-3 电子测量与电磁测量的特点	2
§ 1-4 测量与计量	4
§ 1-5 测量误差	6
§ 1-6 测量数据处理	17
复习题.....	20
第二章 电流表与电压表	21
§ 2-1 概述	21
§ 2-2 常用电流表、电压表组成	30
§ 2-3 常用电流表、电压表的应用与维护	34
§ 2-4 电子电压表	41
§ 2-5 直流电位差计	46
复习题.....	53
第三章 万用表	54
§ 3-1 万用表结构与原理	54
§ 3-2 MF-30 型万用表	60
§ 3-3 万用表的应用	65
§ 3-4 万用表的使用与维护	70
复习题.....	73
第四章 绝缘测试仪	74
§ 4-1 兆欧表	74
§ 4-2 高阻计	77
复习题.....	83
第五章 电桥	84
§ 5-1 直流电桥	84
§ 5-2 交流电桥	87
§ 5-3 电桥的使用与维护	93
复习题.....	96
第六章 Q表	98
§ 6-1 Q表的工作原理	98
§ 6-2 QBG-3 型高频 Q 表.....	102
§ 6-3 Q表的使用与维护	105

复习题.....	106
第七章 信号发生器	107
§ 7-1 低频信号发生器	107
§ 7-2 高频信号发生器	121
§ 7-3 脉冲信号发生器	126
§ 7-4 信号发生器的应用及电子仪器的维护	140
复习题.....	143
第八章 示波器与图示仪	144
§ 8-1 概述	144
§ 8-2 示波器的基本结构	147
§ 8-3 SR8 型双踪示波器	159
§ 8-4 示波器的使用	170
§ 8-5 晶体管特性图示仪	177
§ 8-6 图示仪的使用	189
复习题.....	196
第九章 电子计数器	197
§ 9-1 概述	197
§ 9-2 通用电子计数器的基本组成	198
§ 9-3 通用电子计数器的基本工作原理	199
§ 9-4 E312A型通用计数器	205
§ 9-5 电子计数器的使用与维护	212
复习题.....	214
第十章 数字电压表	215
§ 10-1 概述.....	215
§ 10-2 数字-模拟转换 (D-A)	218
§ 10-3 模拟-数字转换 (A-D)	223
§ 10-4 DS14-I 型数字电压表	239
§ 10-5 数字电压表的使用与维护	245
复习题.....	247
第十一章 数字万用表	248
§ 11-1 概述.....	248
§ 11-2 交流电压-直流电压变换器	248
§ 11-3 电流-电压变换器	253
§ 11-4 电阻-电压变换器	254
§ 11-5 DT-830型数字万用表	255
§ 11-6 数字万用表的使用与维护	267
复习题.....	269
实验一 电流表、电压表的应用.....	269
实验二 毫伏表的使用.....	271

实验三	电位差计的使用	272
实验四	万用表的使用	273
实验五	电阻的测量	274
实验六	Q表的使用	276
实验七	信号发生器与示波器应用 (一)	277
实验八	信号发生器与示波器应用 (二)	279
实验九	信号发生器与示波器应用 (三)	280
实验十	图示仪的应用	280
实验十一	电子计数器的使用	281
实验十二	电压-频率 ($V-f$) 式 A-D 转换器	282
实验十三	数字万用表的使用	284

第一章 绪 论

§ 1-1 电工仪表及电子仪器概述

在电工及电子技术中,电流和电压是两个最基本的状态参数。利用电磁力使指针偏转进行电流和电压测量的仪表是最典型的电工仪表。电阻器、电容器和电感器是三种基本的电路元件,元件参数测量用的电桥、Q表、高阻表等也是电工仪表。还有既能测电流电压又能测电阻电容(甚至测晶体管)的万用表则是电工仪表中比较复杂的一种,它的应用更为普遍。此外还有钳形电流表、电流互感器等,总之,凡是直接或比较直接地利用电磁力进行电量测量的仪表均称为电工仪表。

电子仪器是利用电子器件和电路技术组成的装置,用于测量各种电磁参量或产生供测量用的电信号。可以说,凡是利用电子线路进行电参数测量的仪器都是电子测量仪器。电子测量仪器配上适当的换能器能测量几乎一切非电物理量:如配上压电换能器可以测量压力和重量;配上光电管可以测量发光强度;配上热敏电阻可以测温度等。电子测量仪器是测量仪器中性能最佳、用途最广和发展最快的一类。狭义的电子测量仪器通常指电子领域中测量电信号、电子线路、电子元件和材料的电性能的仪器,即使在这一领域中,电子测量仪器的种类也十分庞杂,种类不下数千种,通常分为专用电子仪器和通用电子仪器两大类,专用电子仪器指各个专业领域中测量特殊参量所用的电子仪器,如雷达、导航、电视等电子类专业领域(还有气象、天文、地质、医学等非电子类专业领域所用的广义的电子仪器)。通用电子仪器仅指基本电参数和电子元件参数测量的仪器,通用电子仪器分为十几大类,数百个品种,本书仅介绍通用电子仪器中最常用的几种,有低频和高频信号发生器、脉冲信号发生器、通用示波器、电子计数器和数字电压表等。

“仪器”和“仪表”这两个词没有严格的区分,就一般概念而言,仪器是科学技术上用于实验、计量、观测、检验、绘图等比较精密的器具或装置,而仪表是仪器之一类,其特点是结构比较简单,体积较小,其形状或作用类似于计时的钟表,其精度通常比较低,可以说仪表是仪器中比较初级的一类。但是,这一概念并不严格,如常用之数字电压表由于与指针式电压表作用相同,仍称之为“表”,实际上它是电子仪器,而且是电子仪器中比较高级的形式。由此可见一种新的测量器具的出现,称为仪器还是仪表,并没有严格的规定,而是随历史情况或制造者的观念而异的,有时将“仪器”和“仪表”名词混用,或者干脆统称为“仪器仪表”。

电工仪表和电子仪器尽管难于在“表”和“器”上划分,但在测量工作的领域上是有分工的。电工仪表进行的是电磁测量,电磁测量的频率范围是直流及工业频率(50Hz)。其所测参数的量值可能很大,可测高电压、大电流,即工作于大功率的状态。电工仪表主要工作于弱电领域。电子仪器所进行的是电子测量,其工作频率范围极宽,而且复盖了电磁测量频率,但电子测量工作于低压小电流的情况下,电子仪器主要工作于弱电领域。

电子测量与电磁测量领域有交叉的情况,电子测量起源于电磁测量,而且以电磁测量为基础。不仅因为电子测量的单位都由电学和磁学导出,而且为了提高测量精度,许多高频电

子测量都把高频电磁量转换成直流量,再用电磁测量的手段实现。例如常用的晶体管电压表,就是将高频交流量放大整流为直流量,再用表头指示。另一方面,随着数字式电子仪器的发展,很多传统的电磁测量项目,如直流电压、工频电压、电流、功率和频率等,已成为电子测量的日常项目。

§ 1-2 测量仪器新技术

电工测量仪表历史悠久、技术成熟,因此在相当长的时期内,原理上没有什么突破,仅在制造技术和所用材料上有长足的进步,所以现代电工仪表在结构、造型和精度上均有明显的改进。

电子仪器是一个比较新的领域,随着电子器件的更新,电子仪器经历了由电子管——晶体管——集成电路的发展过程,而且在原理上出现了两次突破。一是数字化,待测信号经过模数转换变为数字信号,再经电路处理最后在数码管上直接显示测量数据,进一步还可将数字信号存储起来,需要时再重现。数字化的优点是精度高,灵敏度高,例如指针式电压表最多只能指示三位有效数字,灵敏度只能到 0.1V ,而数字式电压表最多可显示八位半数字,灵敏度可达到 1nV 。此外数字式仪器还有输入阻抗高、操作简便、读数直观、测量速度快、抗干扰能力强等优点。电子仪器发展中的第二次突破是智能化。所谓智能化就是仪器本身能自动完成某些操作,如自动校正、自动转换量程、自动更换测量项目等。此外还有自动诊断故障、自动排除故障等,当然,这是更高级的智能仪器。仪器智能化以后性能大大提高,但智能仪器仍然是单机,测量项目有限,对超大规模集成电路(VLS)或印刷电路板这类测量项目很多或测量过程复杂的部件,单独一台智能仪器仍然无能为力,需要将很多台仪器组合起来,由计算机统一指挥,这就出现了自动测试系统(ATS)。与此同时,80年代又出现了所谓个人仪器。由于在发达国家个人计算机相当普遍,当把仪器测量部分做成插板,插在个人计算机中由计算机控制时,则构成个人仪器。如果采用多种仪器插件则构成一种新的自动测试系统——个人仪器系统,费用下降到原系统的 $1/3$ 至 $1/10$,体积也大大减小,因此个人仪器一出现很快受到科技界的广泛重视。

电子仪器新技术从器件上考虑是集成化,从结构上考虑是积木化。所谓集成化就是用集成电路(IC)和专用集成电路(ASIC)代替传统的元器件,ASIC是应用户的要求特制的IC,ASIC的优点是针对性强,集成度高,保密性强。

仪器的积木化就是把各种部件做成插件或模块,然后组合在一起构成仪器。也可把仪器做成标准块,再在标准机架中组合成系统。这样做有利于减小体积,有利于维修。

§ 1-3 电子测量与电磁测量的特点

一、电子测量

由于电子测量技术的迅猛发展,使电子测量仪器具有其他测量仪器无法比拟的优点,粗略分析有以下几点:

1. 灵敏度高,量程宽

由于仪器中可以采用高倍放大器,因此可以测量极微弱的信号,灵敏度就是指测量微弱

信号的能力，能测量的信号越小，灵敏度就越高。另一方面仪器也可以采用衰减器衰减信号，这样就可测量幅度很大的信号，因此电子测量仪器量程很宽。例如新型的数字电压表灵敏度达 1nV ，最大可测电压 1kV ，量程达12个数量级。电子计数器量程更宽，可达17个数量级。

2. 频率范围宽

电子测量仪器可以测量从直流到几百千兆赫芝（GHz）的信号。当然对一台仪器来说频率范围有限，不过电子仪器正努力向宽带化发展，例如，最新实时示波器频带宽度可从直流到 1GHz ，采用取样技术则最高可测频率达 70GHz ，

3. 输入阻抗高

电子仪器使用时，通常与待测电路并接，仪器输入阻抗越高对待测电路的影响则越小。一般电子仪器的输入阻抗达几 $\text{M}\Omega$ ，甚至高达几十 $\text{M}\Omega$ ，因此对待测电路基本无影响，这样有利于测量精确度的提高。

4. 测量精确度高

除了输入阻抗问题，电子测量仪器本身的精确度也很高，一般比其他测量仪器高很多。特别是对频率和时间的测量，由于采用了原子频标（以铯原子 Cs^{133} 外层电子跃迁所对应的辐射波周期为准），可使测量误差减小到 $10^{-13}\sim 10^{-14}$ ，这是目前人类在测量精确度方面达到的最高水平。正是因为人类能如此精确地测量时间，才使人造卫星能准确地进入预定轨道，并精确地测量其位置。凡是需要精确测量的地方，几乎无例外地采用电子测量或电子技术与其他技术配合的方法进行。

5. 测量速度高

电子测量是通过电信号的传输和电磁波的传播来进行的，这两种运动速度很高，空间电磁波的速度为光速，电路中电信号传输速度接近光速。电子测量速度极高是它在现代科技领域得到广泛应用的重要原因。例如洲际导弹的发射过程中，需要快速测出其运动参数，经计算机处理后发出控制信号，去调整导弹的运动状态，使它达到预定的目标，在这一过程中测量速度高是十分关键的一步。

6. 易于实现自动化、智能化

测量仪器的自动化其高级形式就是智能化，所谓智能即具有分析、判断、运算、推理的能力，这就要在仪器中引入计算机核心部件——中央处理单元（CPU），从而构成智能仪器，可以实现多种自动操作。由于仪器数字化以后外理的是数字信号，因而比较容易和计算机结合起来。根据测量仪器与计算机结合的不同形式，可形成智能仪器、自动测试系统、个人仪器和个人仪器系统。

7. 易于实现遥控

电子测量仪器可以在电磁波的控制下工作，电磁波发送设备在很远距离之外，发射功率越大则距离可以越远。仪器测量结果也可以变成电磁波发送给远距离之外的接收机。采用这种遥测方式可以把测量设备送到人类无法达到或不便进入的地区，例如太空、深海底、高温区域、有毒区域等等。

二、电磁测量

电工仪表进行的是电磁测量，和电子测量的各项优点比较，电磁测量的最大优点是能够进行大电流、高电压和大功率测量，其电流可高达几千安培，电压高达几万伏乃至几十万

伏，功率高达几十万千瓦。而其他各项特性多数比电子测量差。首先看灵敏度，由于电工仪表中要产生足够大的电磁力使指针偏转，则电流不能太小，所以灵敏度不高，电流灵敏度最高在 μA 级，电压灵敏度最高在 mV 级。电磁测量的主要对象是直流信号及工频（50Hz）交流信号，电工仪表虽然也可工作到几千Hz，但仍是频带较窄。输入阻抗，对电流表来说，由于工作时串接在电路中，所以要求电阻尽量小，一般电流表内阻几百欧姆，并不太小。而电压表工作时与电路并联，要求电阻尽量大，一般电压表内阻约为 $1000\Omega/\text{V}$ ，也并不太大。再看精确度，电工仪表的精确度一般在1%左右，比较精密的可达0.05%，精密电桥的精确度可达0.05%，电位差计的精确度可达0.005%以上，这样的精度已超过一般的模拟式电子仪器，但仍比数字式电子仪器的精度低。测量速度，由于测量的是电信号，传输速度很高，但电磁测量结果是通过指针机械偏转显示的，这样速度就相当低了。最后，再看智能化和遥控，传统的电磁测量方法是无法做到的，尽管很多电磁参量可用数字仪器和智能仪器测量，但那已是电子测量了。

电工仪表有一个电子仪器没有的优点，那就是温度稳定性高。这是因为电子仪器中使用的晶体管和集成电路温度稳定性较差，而电工仪表主要是机械结构。

此外，电工仪表还有结构简单、造价低廉的优点。

§ 1-4 测量与计量

一、测量

无论是电工仪表还是电子仪器，他们的任务都是进行物理量的测量。所谓测量就是用已知量和未知量去比较，从而确定未知量是已知量的多少倍。它是人类定量地认识客观世界的基本手段。例如用尺去量布、用秤去称物体的重量、用秒表去测量时间等等。这里，尺、秤和秒表称为量具，高级一些的量具则称为仪表和仪器。

不仅日常生活离不开测量，工农业生产和科学技术更离不开测量。精确度是靠测量来保证的，生产晶体管、集成电路需要测量它们的参数，否则就无法应用，由此可见，越是高级技术则测量越是重要。

由于客观世界的物理量很多，因此测量技术和测量仪器也十分庞杂。测量技术指测量原理和测量方法，测量仪器指测量所用的工具，这两者关系是十分密切的。测量技术无论多么庞杂，总可以分为两类：

1. 直接测量技术

测量时，测量仪器直接给出被测数据。例如用电压表测量电压时，指针直接指出刻度数值，用数字频率表测量频率时，数码管直接显示频率数值。此种方法应用最广，其测量的不确定度主要决定于仪器的精度。

2. 间接测量技术

测量时不是直接测量被测量，而是测量与被测量有确定函数关系的其它量，然后通过公式关系计算出被测量。例如用电压表和电流表测量电阻，利用欧姆定律 $R = \frac{U}{I}$ 测出电阻器上电压及电阻器中电流，然后计算出电阻值。此种方法测量的不确定度不仅决定于两种或两种以上的测量仪表，而且决定于线路联接方式以及公式的准确程度，是否是近似公式或经验

公式，还是严格的定律。因此间接测量不及直接测量可靠，只有在无法采用直接测量时才采用间接测量。

二、计量

计量是测量的一种特殊形式，它是指测量仪器与国家计量部门的基准或标准设备进行比对（仪器测量值与基准或标准测量值比较）从而确定测量仪器精确度的过程。因此计量是一种高精度的测量，计量学是一门内容广泛的科学，它研究保证测量值的统一和精确所必须采用的方法、技术、设备和政策，国家计量部门不仅解决技术问题，而且依靠行政手段对各种物理量的测量方法和标准作出规定，成为技术部门必须遵守的法规。

基准和标准在严密性上有所差别。基准是指用当代最先进的科学技术建立起来的特殊设备，它具有最高的精确度和稳定性，用于规定、保持和复现某种物理计量单位。例如米尺基准是用热膨胀系数最小的铂制成的米尺，并且保存在恒温设备中，又如时间基准采用周期十分准确的铯原子钟。

基准分为三级。一级基准是国家按照物理量的定义复制而成的最高水平的基准，因此称为国家基准。为了避免降低精确度，国家基准不能轻易使用，为此又制作了各种二级基准。二级基准分为作证基准、参考基准和中介基准三种。作证基准和国家基准原理和结构相同，并且制作好几个，其中性能最佳者选作国家基准，其他的则作为作证基准。国家基准只向作证基准传递量值，不作他用。传递量值就是比对，但方向不同，上级设备向下级设备提供标准值称为传递量值。作证基准用来检验国家基准的完善性。作证基准定期与国家基准比对，从而修正系统偏差，并且作为国家基准的代表向其他基准传递量值。参考基准和国家基准的原理和结构不同，是从不同角度对同一物理量进行的测量，用于证明国家基准的先进性。参考基准与作证基准比对，并向三级基准传递量值。以上各种基准设备复杂，体积庞大，环境条件要求高，不宜随意搬动，难以进行直接比对。为此需要体积重量较小精确度足够高的中介基准，它用于国际基准与国家基准之间传递量值，或用于作证基准与三级基准之间传递量值。三级基准是各种工作基准，用来直接向下级设备仪器传递量值。

各种基准设备结构精细、制造工艺复杂、使用环境要求严格、操作步骤繁复。而且价格昂贵，不宜经常使用。为此又制作了一些便于使用的标准。标准设备根据精确度不同也分为三级。各种日常工作仪器通过定期与标准和基准进行比对，从而确定精确度和修正偏差。数字式仪器精确度较高常常用作标准。

精确度是衡量仪器设备的基本参数。精确度包括精密度和准确度两种含意，精密度指测量数据密集的程度，准确度指测量数据接近真值的程度。为了进一步明确这两个概念举一个形象的例子。以枪支打靶为例，十发子弹密集地打中靶子但偏离靶心，称为精密度高准确度低。十发子弹均中靶但分散在靶心四周，称为精密度低准确度高。十发子弹密集地打中靶心，则精密度准确度都高。参数测量情况也如此，多次测量数据很接近称为精密度高，如果这些数据又都接近真值，则准确度也高，称为高精度测量。精确度有时简称为精度。

测量工作中除了采用“测量”这一词汇，还经常用“测试”这一词汇。测量与测试没有严格的区分，常常是通用的。但仔细推敲，并非在任何场合均可通用，如地形测量、天文测量、气象测量等，这些领域称为测试就不恰当。这是因为测试常常包含测量和调试两种含意，因此只在机械、电子、仪器等领域两词可以通用。如放大器测量也称放大器测试，这里无论采用那一词汇均包含放大器调试内容。所谓调试就是修改被测对象以达到希望的性能或精度。

§ 1-5 测 量 误 差

任何物理量必然存在一个真实的数值，这个数值称为真值。例如一个实际的电阻器，在一定的测试条件下，电阻量必然存在一个确定的数值。电阻测量的目的就是要获得此值，一切测量的目的都是要尽可能准确可靠地获得真值。但是，由于人们对客观规律认识的局限性，由于测量工具的不准确、测量手段的不完善，以及测量过程中可能出现的疏忽和失误，会使测量值和真值不完全相同，这个差别就称为误差。随着人们认识的提高、测量工具和测量手段的改善，测量值可以向真值无限逼近，但总不能绝对相等，因此误差总是存在的，测量技术的进步目的就是尽量减小误差。

一、测量误差的表示方法

1. 绝对误差

设被测量的真值为 A_0 ，测量值为 x （仪器的指示值或量具的标称值），则绝对误差 Δx 为 x 与 A_0 之差

$$\Delta x = x - A_0$$

A_0 有些情况下可以从理论上推得，但多数情况下是不知道的，因此上式缺乏实际意义。由于高级仪器（例如计量基准或标准）的测量值 A 可以非常逼近 A_0 ，因此常常用 A 代替 A_0 ，这样绝对误差成为

$$\Delta x = x - A$$

A 有时就是上一级仪器的测量值，因此本式是很实用的。 Δx 可正可负，它是一个有单位的量。为了与真值区别 A 称为实际值。

要对测量值 x 进行修正，就是要使得出的数据中 $\Delta x = 0$ ，则应在测量值 x 上加一个修正项 C ，使 $x + C = A$ ，所以修正项

$$C = A - x = -\Delta x$$

修正项由本级仪器与上级仪器比对而得。它和绝对误差极性相反。它也是一个可正可负的有单位的量。如果本仪器测出一系列 x ，上级仪器测出一系列 A ，则计算可得一系列 C ，从而可画出一条修正曲线。以后本仪器的某一个测量值可根据修正曲线修正掉绝对误差。例如一只量程10A的电流计，将它与一只标准电流计串联，测量时发现对应数据如表1-1所示。

表 1-1

单位：A

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0.025	1.024	2.023	3.022	4.021	5.020	6.019	7.018	8.017	9.016	10.015
C	0.025	0.024	0.023	0.022	0.021	0.020	0.019	0.018	0.017	0.016	0.015

由表可见，电流计指示偏小，并且低端误差更大。将 C 与 x 的关系作一条曲线称为修正曲线，可用于此电流计的修正。曲线如图1-1所示。

这样，用电流计测出一个 x 值时，根据曲线可获得修正后的实际值。例如， $x = 4.5A$ ，查曲线得 $C = 0.0205A$ ，则实际值

$$A = x + C = 4.5 + 0.0205 = 4.5205 \text{ (A)}$$

2. 相对误差

用绝对误差常常不能说明仪器的精确度。例如绝对误差为0.1A，如果测量值为100A，那么误差对测量结果的影响极小，如果测量值是1A，那么误差对测量结果的影响就很大了。为此应该用绝对误差与测量值比较，这就是相对误差。根据与不同测量值的比较，相对误差有几种形式。

(1) 实际相对误差 γ_A 定义

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\%$$

它表示绝对误差与实际值（上级仪器测量值）比较所占的百分比。

(2) 示值相对误差 γ_x 定义

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

它表示本仪器的绝对误差与本仪器的示值（测量值）比较所占的百分数。由于本仪器的示值 x 和上级仪器测量值 A 均有误差，所以用 γ_x 和 γ_A 计算都是不严格的，但 A 值误差比 x 值误差小，因此采用 γ_A 计算更好，而 γ_x 只适用于绝对误差较小的情况，即 γ_x 较小时适用。

这里顺便说明一下，仪器示值与读数不一定相同。读数是表盘上的刻度值，示值指测量结果所代表的数值，两者可能相同也可能不同。这是因为仪表常有好几档，而刻度可能只有一个。例如一只按10A刻度的电流表，可能还有1A，2A，5A各档，当用2A档测量，读数为5时，它的示值为1A。

(3) 满度相对误差 γ_m 用实际相对误差 γ_A 或示值相对误差 γ_x 可以较好地反映某次测量的准确程度。但是在连续刻度的仪表中，用以上两种方式表示整个量程中仪表的准确度并不合适。这是因为仪表在整个量程中有差不多大的绝对误差 Δx ，而各处有不同的 x 值（或 A 值），如果每点进行计算，则得出很多相对误差，这样做不仅麻烦，而且不便于比较不同仪表的准确度。为此，规定 x 取值最大，也就是 x 取量程的满度 x_m ，这样就得到满度相对误差

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\%$$

在量程选定后 x_m 为常数，因此 γ_m 实际上表示的仍是绝对误差。 γ_m 也称为引用误差，它专用于仪表准确度定级。我国电工仪表根据引用误差的大小分为七级，用 S 表示，所以有

$$S = \pm 0.1, \pm 0.2, \pm 0.5, \pm 1.0, \pm 1.5, \pm 2.5, \pm 5.0$$

$S\%$ 就是 γ_m ，则有 $\Delta x = x_m \cdot \gamma_m = x_m \cdot S\%$ ，在仪表取定及量程也取定后， $S\%$ 及 x_m 都是常数，此常数称为额定绝对误差。电工仪表刻度板上注明 S 值表示准确度等级。显然， S 值越小准确度越高。例如，0.1级表优于0.2级表，因为0.1级表的 $\gamma_m = \pm 0.1\%$ ，而0.2级表的 $\gamma_m =$

$\pm 0.2\%$ 。由于在整个量程中 $x \leq x_m$ ，所以 $\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m}$ 是相对误差的最小值，在 x 处， $\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} =$

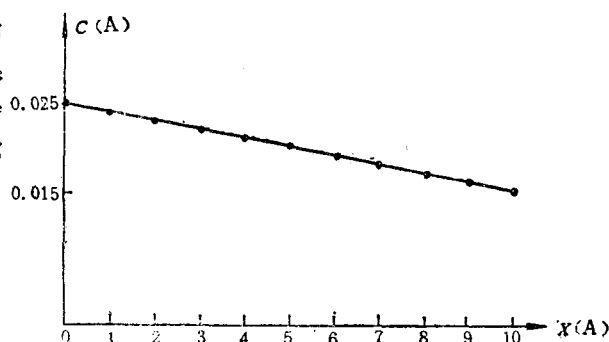


图 1-1 修正曲线

$\frac{x_m}{x} \gamma_m$, 因此测量时应注意 x 在量程中的位置, 以免误差太大。例如一只 ± 2.0 级的 10V 量程电压表, 满度相对误差为 $\pm 2.0\%$, 在测量值 $x=5V$ 时示值相对误差为 $\pm 4.0\%$, $x=1V$ 时相对误差达到 $\pm 20\%$, 可见测小于 1V 的量, 误差已大到不能容许的程度, 此时必须更换仪表或更换量程, 使测量值至少超过量程刻度的中线。如果仪表有多种量程, 制造时所有量程均应达到同一级别, 则某些量程必然优于此级。例如一只 ± 1.5 级的电压表, 其满度相对误差为 $\pm 1.5\%$, 则各量程满度相对误差小于或等于 $\pm 1.5\%$, 因此实际测量的绝对误差小于或等于额定绝对误差

$$\Delta x \leq x_m \cdot S\%$$

在仪表选定后 $S\%$ 为常数, 所以 Δx 正比于 x_m , 仪表有不同量程则有不同的 x_m , 显然选较小的 x_m 时绝对误差小。量程的大小应根据测量值选择, 在满足 $x \leq x_m$ (不打表) 的前提下尽量选择较小的 x_m , 通常 x 工作在 $\frac{2}{3}x_m$ 至 x_m 的范围内。在 x 数值无法确定时可先选大的量程然后渐次减小。

(4) 分贝误差 γ_{dB} 分贝误差不是一种新的误差, 而是相对误差的一种表示方法。相对误差除了采用百分数表示外, 还可采用分贝数表示, 它主要用在电子学和声学中。对于电流、电压类电参数, 其分贝误差为

$$\gamma_{dB} = 20 \lg(1 + \gamma_x) \text{ dB}$$

对于电功率, 其分贝误差为

$$\gamma_{dB} = 10 \lg(1 + \gamma_x) \text{ dB}$$

式中 γ_x 为示值相对误差, 当然也可用 γ_A 或 γ_m 。由于相对误差有正负, 因此 γ_{dB} 也有正负。正差表示测量值大于真值, 负差表示测量值小于真值。

例 1 某电压放大器增益为 100, 某次测量增益值为 95, 问测量的绝对误差、相对误差和分贝误差多大?

解 已知 $A=100$ $x=95$

则 $\Delta x = x - A = 95 - 100 = -5$

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} = -5\%$$

$$\gamma_{dB} = 20 \lg(1 + \gamma_A)$$

$$= 20 \lg\left(1 - \frac{5}{100}\right)$$

$$= 20 \lg \frac{95}{100} = -0.446 \text{ dB}$$

例 2 检定一个 1.5 级 200mA 的电流表, 在 150mA 处测得绝对误差为 2.8mA, 在 100mA 处测得绝对误差为 3.2mA, 在 50mA 处测得绝对误差为 3.0mA, 问此表是否合格?

解 已知 $S=1.5$ $x_m=200\text{mA}$

则额定绝对误差为 $x_m \cdot S\% = 200 \cdot \frac{1.5}{100} = 3.0\text{mA}$

各测量点的 Δx 分别为 2.8mA, 3.2mA, 3.0mA, 其中最大的 $\Delta x = 3.2\text{mA}$, 不满

足 $\Delta x \leq x_m \cdot S\%$ 的关系, 所以此表不合格。

例 3 用一只 30V 量程的电压表测 20V 电压, 在 20V 处要求 $\gamma_x < \pm 1.5\%$, 问选用 S 多大的电表?

解 已知 $x_m = 30V$ $x = 20V$ $\gamma_x < \pm 1.5\%$

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \quad \gamma_x = \frac{\Delta x}{x}$$

$$\therefore S\% = \gamma_m = \frac{x}{x_m} \cdot \gamma_x = \frac{20}{30} \cdot \frac{\pm 1.5}{100} = \frac{\pm 3}{300} = \pm 1\%$$

答: 选用 $S = \pm 1$ 的电表。

例 4 有两只电压表, 一只只是量程 50V 的 ± 1.5 级表, 另一只是量程 15V 的 ± 2.5 级表, 问测量 10V 电压时用那一只表合适?

解 1 已知 $x_m = 50V$ 和 $15V$ $S\% = \pm 1.5\%$ 和 $\pm 2.5\%$

分别求两表的额定绝对误差 $x_m \cdot S\%$

表 1 $50 \times (\pm 1.5\%) = \pm 0.75V$ 测 10V 时真值在 $10 \pm 0.75V$ 范围内, 误差较大。

表 2 $15 \times (\pm 2.5\%) = \pm 0.375V$ 测 10V 时真值在 $10 \pm 0.375V$ 范围内, 误差较小, 所以此表合适。

解 2 求两表在 10V 处的示值相对误差

$$\gamma_x = \frac{x_m}{x} \cdot S\%$$

$$\text{表 1 } \gamma_x = \frac{50}{10} \times (\pm 1.5\%) = \pm 7.5\%$$

$$\text{表 2 } \gamma_x = \frac{15}{10} \times (\pm 2.5\%) = \pm 3.75\% \text{ 适用}$$

两种分析都说明第二只表适用, 由此可见选用电表时, 不仅要看级别, 还要看量程。

3. 测量仪器精确度的表示方法

仪器仪表的精确度用容许误差表示, 可以用绝对误差, 也可以用相对误差, 甚至同时使用绝对误差和相对误差。前已说明电工仪表的精确度用引用误差表示。下面举例说明电子仪器的误差用法。

SR20G 型双踪示波器

幅度校准信号 $20mV_{pp} \sim 10V_{pp}$ 按 1-2-5 顺序分为 7 档 $\pm 3\%$

时间校准信号 $50ns$ 正弦波 $100\mu s$ 正尖脉冲 $\pm 2\%$

Y 轴灵敏度 $5mV_{pp}/cm \sim 2V_{pp}/cm$ 共 9 档 $\pm 5\%$

X 轴灵敏度 $50ns/cm \sim 0.5s/cm$ 共 22 档 $\pm 5\%$

电源电压 $220V \pm 10\%$

气压 $1.0 \times 10^5 \pm 4.0 \times 10^3 N/m^2$

以上六个参数五个采用相对误差, 只有一项采用绝对误差。可见相对误差用得更多, 其他电子仪器情况也如此。一个参数同时采用两种误差的情况很少, 但也存在, 如某种脉冲发生器

输出脉冲宽度 $0.1 \sim 10\mu s$ 共 19 档 $\pm 10\% \pm 0.025\mu s$

这种同时采用两种误差的方法,不同档时误差的影响不同。绝对误差项 $\pm 0.025\mu\text{s}$ 对各档都是一样大的,但随着脉冲宽度的加大,其影响逐档减小。相对误差项比值不变,但绝对值随脉冲宽度的加大而加大,影响也相应加大。如 $0.1\mu\text{s}$ 档,绝对误差 $\pm 0.025\mu\text{s}$,相对误差项计算可得误差 $0.1 \times (\pm 10\%) = \pm 0.01\mu\text{s}$,它小于绝对误差,所以绝对误差项影响大。又如 $10\mu\text{s}$ 档,相对误差计算可得误差 $10 \times (\pm 10\%) = \pm 1\mu\text{s}$,它远大于绝对误差,所以相对误差项影响大。

二、测量误差的分类与特性

测量过程中出现的误差有其不同的原因、性质及特点,因此也就有不同的消除或减弱方法。据此,我们将误差分为三类:系统误差、随机误差和粗大误差。

1. 系统误差

系统误差指在相同条件下重复进行同一测量时,所产生的误差数值恒定,或者在条件改变时,误差遵循一定的规律而变化,前者称为恒值系统误差,后者称为变值系统误差。

恒值系统误差 在整个测量过程中,测出值不变,它与真值有固定偏差,或者各测出值的算术平均值与真值之间有固定偏差。例如一只 10mH 的标准电感,经计量部门多次反复检定,其实际值为 9.993mH ,则恒值系差

$$\Delta L = 10 - 9.993 = 0.007\text{mH}$$

如果多次测量值各异,而平均值为 9.993mH ,则结果相同。所以恒值系差等于足够多次测量中各绝对误差的平均值。

变值系统误差 根据其变化规律通常分为累进性的、周期性的和复杂规律变化的三种。

累进性变差是在整个测量过程中误差数值逐渐上升或逐渐下降。例如标准电池由于工作时放电,其电动势逐渐减小,则测量误差也是单调变化的。

周期性误差指整个测量过程中误差数值循环变化,例如对某一物理量进行昼夜连续测量,气温基本上是周期性的,测量误差也是周期性变化。

复杂规律变化的误差,尽管变化复杂,却是有规律的,因此可以用近似公式或曲线表示。例如标准电池电动势随环境温度的变化关系很复杂,大量测量反复分析得到经验公式为

$$\Delta E = E_{20} - E_t = [a(t - 20) + b(t - 20)^2 - c(t - 20)^3 + d(t - 20)^4] \times 10^6 \text{ (V)}$$

式中 a, b, c, d 为常数, E_{20} 和 E_t 分别为 20°C 及 $t^\circ\text{C}$ 时的电动势。

系统误差由于存在确定的规律,因此可以设法消除,不过变值系差规律的发现比较困难,需要做大量工作才有可能。

系统误差的大小表明测量值偏离真值的程度,系统误差越小即偏离程度越弱,则测量的准确度越高。

2. 随机误差

在努力消除系统误差使其减弱到忽略不计的情况下,重复测量同一个物理量时,仍然出现没有确定规律的误差,误差数值时大时小,符号时正时负,这种误差称为随机误差。每一次出现的误差都是偶然的,没有复现性,因此随机误差也称为偶然误差。