

中等专业学校教材

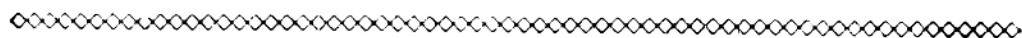


电信仪表

西安电力学校 吉美芳 编



中等专业学校教材



电 信 仪 表

西安电力学校 吉美芳 编

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书是中等专业学校电力载波通信专业的电信仪表教材。

全书共分十章,主要介绍了电力载波通信中常用电信仪表的结构、工作原理和使用方法。全书包括电子测量、电桥和电子电压表、低频信号发生器、电平振荡器、选频电平表、数字频率计、示波器、频率特性测试仪及晶体管特性测试仪等内容。

本书可供中等专业学校电力载波通信专业师生使用,也可供从事电力载波通信方面的运行、维护和有关的工程技术人员参考。

中等专业学校教材

电 信 仪 表

西安电力学校 吉美芳 编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行,各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 11.875印张 266千字

1993年5月第一版 1993年5月北京第一次印刷

印数0001—2550册

ISBN 7-120-01737-3/TM·459

定价2.50元

前 言

本教材是根据电信仪表教学大纲的要求而编写的，为中等专业学校电力载波通信专业的第三轮教材。

全书共十章，主要介绍了载波通信测量中几种常用仪表的工作原理和使用方法。考虑到这门课是在低频电子电路、高频电子电路和脉冲与数字电路等技术基础课程之后开设，所以书中对上述诸方面的内容不再详述，而只对其中部分特殊电路进行讲解，并且着重叙述其物理意义，避免繁琐的数学推导，力求使内容通俗易懂。每章后选编了部分复习题，以利学生提高分析和解决问题的能力。

在仪器的选型上考虑到目前我国电力的生产状况及发展，尽量选用晶体管电路所组成的、有代表性的国产典型仪表，也适当选用了功能较全的仪表，使学生具有较强的适应能力。

本书承南京电力专科学校秦国屏副教授主审，同时也得到了沈阳电力专科学校张典漠高级讲师、北京电力专科学校李延春高级讲师的大力帮助，提出了不少的宝贵意见，在此一并表示感谢。

由于编者水平所限，书中错误和疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

1991年12月23日

目 录

前 言

第一章 电子测量	1
第一节 电子测量的内容和方法	1
第二节 测量误差	2
第三节 误差的表示	4
第四节 有效数字	5
复习题	6
第二章 电桥	8
第一节 直流电桥	8
第二节 交流电桥	10
第三节 WQJ-05型万用電桥	14
复习题	19
第三章 电子电压表	20
第一节 电子电压表的一般原理	20
第二节 DA-16型晶体管毫伏表	30
第三节 杂音测试器	33
复习题	36
第四章 低频信号发生器	37
第一节 低频信号发生器的一般原理	37
第二节 XD-1型低频信号发生器	39
复习题	48
第五章 电平振荡器	49
第一节 电平振荡器的主要技术性能	49
第二节 电平振荡器的一般原理	50
第三节 QF668II型电平振荡器	58
第四节 UX16A型电平振荡器	67
复习题	72
第六章 选频电平表	73
第一节 选频电平表的一般原理	73
第二节 QP272II型选频电平表	79
第三节 UD20A型选频电平表	89
复习题	95
第七章 数字频率计	96
第一节 数字频率计的一般原理	96

第二节	E312型数字频率计	105
第三节	E312A型通用计数器	115
复习题		120
第八章	示波器	121
第一节	示波器的一般工作原理	121
第二节	SR8型双踪示波器	130
第三节	HH4311型通用示波器.....	149
复习题		157
第九章	频率特性测试仪.....	158
第一节	频率特性曲线的测试	158
第二节	频率特性测试仪的一般原理	159
第三节	BT-3型频率特性测试仪	165
复习题		170
第十章	晶体管特性图示仪.....	171
第一节	图示仪的基本原理	171
第二节	QT-2型晶体管特性图示仪	174
复习题		182
参考资料		183

第一章 电 子 测 量

测量是人类认识物质世界和改造物质世界的重要手段之一，无论从事生产，还是进行科学实验，都离不开测量。所谓测量，就是通过物理实验的方法把被测量与同类标准的单位量进行比较的过程。

电子测量是泛指以电子技术为手段对某种量的测量。在电子测量过程中所使用的设备就是电子测量仪器，随着电子技术的发展，任何一种物理量都可以用电子测量仪器进行测量。自然界中有很多物理量和物理现象，是人体无法直接感觉到的，只有通过专门的电子测量仪器，人们才能感觉到它们。因此，电子测量仪器在生产或科学实验中，都占有很重要的位置。

第一节 电子测量的内容和方法

一、测量内容

电子测量的内容很广泛，通常包括下面几个方面：

- (1) 电能量的测量。如电流、电压、电功率等的测量。
- (2) 电路参数的测量。如电阻、电感、电容及品质因数等的测量。
- (3) 电信号特性及干扰等的测量。如信号的波形、频率、相位及噪声干扰等的测量。

其它一些量的测量一般可以从以上几个基本量的测量中导出，如电压传输系数是输出电压与输入电压之比等等。

二、测量方法

根据获得测量结果的方式不同，可将测量分为直接测量和间接测量等。

(1) 直接测量。这种测量的结果可直接从实验数据中获得，如用电流表测量电流、用电压表测量电压等。直接测量被广泛用于工程技术的测量中。

(2) 间接测量。这种测量是通过直接测量获得的几个量（这几个量与被测量有一定的数量关系）而间接得到被测的量。如电阻系数 ρ 的测量，我们知道 ρ 与导体的电阻 R 、长度 L 及截面积 S 之间具有下述关系

$$R = \rho L / S$$

而 R 、 L 、 S 均可直接测得，然后按下式求出电阻系数 ρ

$$\rho = RS / L$$

间接测量常用在被测量不能直接测量或测量过程很复杂或用间接测量比用直接测量结果更准确等场合下。

第二节 测量误差

任何测量都力求准确,但在实际测量中,由于受测量方法和仪表精确度的限制等各方面因素的影响,使测量值与被测量的实际值之间总是存在一个差额,这就是测量误差。因此,在研究测量时,我们的目的不是要求测量结果与实际值完全一致,而是要弄清产生误差的原因,并设法使误差控制在我们所要求的范围内。

根据测量误差的性质和特点,可将其分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类。

一、系统误差

系统误差就是在相同条件下,多次测量同一量时,误差的绝对值和符号保持恒定,或在条件改变时,按某种确定的规律而变化的误差。

(一) 系统误差的分类

系统误差按其特点可分为:

(1) 恒定系统误差。这种误差是指误差大小及符号在一定条件下,保持恒定不变的误差。如一只标称值为 100Ω 的电阻,经检定其实际值为 107.2Ω ,则误差恒定为 $107.2 - 100 = 7.2(\Omega)$ 。

(2) 可变系统误差。这种误差在测量过程中、或按线性规律、或按周期规律、或按复杂规律变化,并且是有规律可循的。如标准电池在供电过程中,因放电而使其电动势逐渐下降,因而误差以线性规律逐渐增加。

(二) 系统误差的来源

产生系统误差的原因很多,通常有以下几个方面。

(1) 仪器误差。由于仪器本身及附件的电气和机械性能的不完善而引入的误差。如表面刻度的读数误差、仪器内部或外部噪声干扰造成的误差、元器件老化、机械磨损等造成的误差。由于仪器误差的存在,所以仪器在使用时,表现为接触不良、工作点不稳定、零点漂移等。还有在进行快速测量时,因仪器的滞后作用而造成的误差等,也属此类。

(2) 使用误差。使用误差是由于电子测量仪器使用不当而增加的额外误差。如使用时应垂直安置的仪器被水平放置;直接把不同阻抗的电缆和插座连接在一起;把平衡(或不平衡)输出与不平衡(或平衡)输入连接在一起,造成阻抗不匹配;还有接地不良或高频使用时接线太长,以及未按操作规程进行预热、调零、校准和测量时,都会使测量结果带来误差。

(3) 人身误差。人身误差是指因人的感觉器官和操作者经验不足而产生的误差。特别是依靠人眼、人耳来判断测量结果的仪器尤为突出。如用差频法测量频率时需靠人耳来判别零差频即判别两频率是否相等时,由于人耳一般听不到 16Hz 以下的频率而会产生误差。也可能由于操作人员缺乏经验,如读数时的位置不正确等,也会使结果不准,从而带来人身误差。

(4) 环境误差。这种误差是指因温度、湿度、气压、电磁场、声音、光照等环境因素的影响所产生的误差。

(5) 方法误差。由于测量方法不完善,所依据的理论不严密,以及对某些物理量的定义不明确所带来的误差称为方法误差。如用谐振法测量频率时,由于实际电路中总是存在损耗电阻 r , 所以频率的准确计算公式应为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{r^2 C}{L}} \quad (1-1)$$

但实际上常常把损耗电阻 r 忽略不计, 而用公式

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1-2)$$

来确定谐振频率, 由此产生方法误差。

(三) 系统误差的消除

系统误差的消除, 没有固定的方法, 一般根据测量中的实际情况进行具体分析, 然后加以消除。下面介绍消除系统误差的几种常用方法。

(1) 引入校正值。在测量之前, 对测量中所使用的仪表和度量器用更高准确度的仪表和度量器进行校准, 引入校正值, 供测量时修正使用, 以减少和消除产生的误差。

(2) 消除产生误差的根源。各种仪表尽量在规定的条件下工作, 如环境温度、湿度、电源电压的波形及频率等都应符合该仪表所规定的要求, 这样就可以消除各种外界环境所引起的误差。

(3) 采用特殊的测量方法。这里介绍两种方法, 一种是正负误差补偿法。当系统误差为恒定误差时, 可以进行这样两次测量, 即一次测量包含正误差, 而另一次测量包含负误差, 取这两次测量数据的平均值作为测量结果, 就可以消除误差。如用电流表测量电流, 考虑到外磁场的影响, 可让电流表在正常位置测量一次, 然后将电流表的位置转 180° , 再测量一次, 取这两次测量数据的平均值作为测量结果, 即可消除外磁场带来的系统性误差。另一种是替代法。在保持读数不变的条件下, 用等值的已知量去代替被测量, 这样的测量结果就和测量仪表的误差及外界条件的影响无关, 从而消除了误差。如用电桥测电阻时, 接上被测电阻, 使电桥达到平衡, 然后用标准电阻代替被测电阻, 并调整标准电阻使电桥达到原来的平衡状态, 则被测电阻就等于这个标准电阻的电阻值。

二、随机误差

随机误差也称偶然误差, 它是指在相同条件下, 多次重复测量同一量时, 误差大小和符号均发生变化, 其值时大时小, 符号时正时负, 没有确定的变化规律, 无法控制, 也不能事先预知其大小和符号的误差。

随机误差主要是由那些对测量影响较小, 又互不相关的多种因素共同造成的, 如热骚动、噪声干扰等。尽管从宏观上看, 测量条件没变, 周围环境相同, 测量人员细心测量, 但所得的测量结果还是不相同。随机误差就个体而言, 没有确定的规律, 是难以估计的。然而, 如果在同一条件下对同一个量进行多次重复测量时, 可发现就其总体来说, 这些测量结果服从统计规律, 因而可用概率论和统计学的方法来研究随机误差的规律, 确定随机误差对测量结果的影响。

三、粗大误差

明显的偏离了测量结果的异常误差,称为粗大误差。这种误差是由于实验人员的粗心、不正确的操作和实验条件的突变等原因引起的。如测量用的仪表有毛病,读错、记错测量数据等,这种误差应该剔除。

第三节 误差的表示

为了定量研究测量误差,按测量误差的表示法,可分成绝对误差和相对误差两种。

一、绝对误差

仪表的指示值 x (又称示值)与被测量的实际值 x_0 之间的差值,叫做绝对误差,以 Δx 表示,则

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-3)$$

通常实际值 x_0 很难取得,因此在一般测量工作中,常用准确度高一级以上的标准仪表测量此值,并把所测得的值用来作为被测量的实际值。例如,用一只标准电压表检定甲、乙两种电压表时,读得标准表的指示值为100V,甲、乙两表的读数分别为101V、99.5V,则它们在测量100V时的绝对误差为

$$\Delta x_1 = 101 - 100 = 1 \text{ (V)}$$

$$\Delta x_2 = 99.5 - 100 = -0.5 \text{ (V)}$$

可见,绝对误差有正负之分,正的误差表示指示值比实际值大,而负的误差则说明指示值比实际值偏小,并可知甲表指示值偏离实际值较乙表大,即乙表指示值较甲表准确,因此,在测量同一个量时,可用绝对误差的大小来说明仪表的准确程度,即绝对误差小的仪表,准确度高。

二、相对误差

在测量不同大小的被测量时,不能简单地用绝对误差来判断其准确程度。如甲表在测100V电压时,绝对误差 $\Delta x_1 = +1\text{V}$,乙表在测10V电压时,绝对误差 $\Delta x_2 = +0.5\text{V}$,从绝对误差看,甲表大于乙表,但从对测量结果的相对影响看,却正好相反,因甲表的测量误差只占被测量的1%,乙表却占被测量的5%,即乙表误差对测量结果的相对影响大,所以,工程上通常用相对误差来比较测量结果的准确程度。

相对误差又可分为以下几种:

(1) 实际相对误差。这种误差定义为绝对误差 Δx 与实际值 x_0 的比值,常用百分数表示,其表达式为

$$\gamma' = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

上式多用于理论分析或精密测量中。

(2) 示值相对误差。由于被测量的实际值与仪表的指示值通常相距不大,有时又难

于求得实际值，故常用仪表的指示值 x 近似地代替实际值 x_0 进行计算，所以，该误差被定义为绝对误差 Δx 与仪表指示值 x 之比，表达式为

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

上式多用于检定工作和工程测量中。

(3) 引用误差。前述的相对误差，可以较好地反映某次测量的准确程度，但在连续刻度的仪表中，用相对误差来表示在整个量程内仪表的准确程度往往感到不便，其原因是，指示仪表是用来测量其量程内的任一被测量的，这样，在假若仪表绝对误差已定的情况下，由式(1-5)可知，分母的取值将不同，示值相对误差也将改变。为了克服这一缺点，可采用仪表量程的上限值，即满刻度值 x_m 作为分母。由于量程上限值是常数，就可较好地反映仪表的基本误差，则绝对误差 Δx 与仪表上限值 x_m 比值的百分数即为引用误差，表达式为

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

上式中的绝对误差 Δx 在实际仪表标尺的各点上并非定值，因而引用误差在量程范围内是有所不同的。通常在正常工作条件下，用仪表量程内出现的最大绝对误差 Δx_m 所决定的最大引用误差来表示仪表的准确度。若以 K 表示仪表准确度等级，则 K 的百分数就是最大引用误差，其表达式为

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

但要注意，测量结果的准确度（即相对误差），并不等于仪表的准确度，不可把两者混淆。实际测量中要注意仪表的准确度，同时要注意选用仪表的上限量程，让其尽量接近被测量的值，测量结果的准确度才能较高。这也说明仪表的准确度虽高，但如不选择适当的量程，那么测量的准确度也不一定就高。

第四节 有效数字

由于测量结果中的有效数字与其误差密切相关，故有必要作一些规定和说明。

一、有效数字位数的取舍

测量结果通常用数值与测量单位两部分表示，其中的数值由于测量过程误差的存在而为近似值，对它如何取舍才能恰当地表示测量结果，这就涉及到有效数字的问题，下面扼要说明几点。

(1) 有效数字是指从最左面一位非零数字算起到含有误差的那位数止，其间所有数字均为有效数字，有效数字的位数称为有效位数。有效位数越多误差越小。但是位数并非取的越多越好。如用电压表测某一电压，测了两次，其数值分别为13.34V和13.35V，若小数点后的第2位数字4和5是估计的，则计算两次读数的平均值只能写为13.34V，而

不要写为13.345V。在这里过多的位数是没有意义的，只能带来记录和计算的麻烦。但位数过少，又会增加测量误差。

(2) 如果测量结果未标明测量误差时，则一般认为最后一位有效数字可能有 ± 1 的误差。

(3) 在数字中1.1和1.10是相等的，没有什么区别，但作为测量数据，二者是有区别的，前者表示误差出现在小数点后第1位，而后者表示误差出现在小数点后第2位，因此，后者比前者要精确。

(4) 对于“0”这个数字，当它在非零数字之间时是有效数字，如20.44V中的0为有效数字。但当0在最左面时则为非有效数字，例如0.003k Ω 中的3个0均为非有效数字。当0在最右面时为有效数字，如1.00A，其误差为 ± 0.01 A，但不能随意在右边加0，如改为1.000A，则此时的误差变为 ± 0.001 A。

二、数据的舍入规则

当遇到有多余的有效数字需要删去时，应按4舍5入的原则进行，即遇到大于5的数字应向前入1；对小于5的数字则舍去，当恰好为5时，且5字之后有数字，则舍5入1；若5字之后无数字或为0时，5字之前为奇数时，则舍5入1，为偶数时则舍5不入。例如将下列数字保留3位应这样进行：

$$67.74 \rightarrow 67.7$$

$$13.67 \rightarrow 13.7$$

$$43.85 \rightarrow 43.8 \text{ (因5之后无数字且5前面是偶数8)}$$

$$16.35 \rightarrow 16.4 \text{ (因5之后无数字且5前面是奇数3)}$$

由上述可见，数据经舍入后末位是估算值，末位以前的数字为准确数字。

三、有效数字的运算规则

(一) 加减运算

(1) 小数位数相同时，其和差的有效数字的小数位数与原来的相同。如

$$18.54 + 43.45 = 61.99$$

(2) 小数位数不同时，应对小数位数多的先进行舍入处理，使它比小数位数最少的数只多一位小数，加减运算后，应保留的小数位数与原来近似值中最小的小数位数相同。

(二) 乘除运算

两个近似值相乘或相除时，应按如下方法计算：

(1) 先对小数位数多的近似值作舍入处理，使它比小数位数少的近似值只多一位小数。

(2) 计算结果应保留的小数位数与原近似值中小数位数少的位数相同。例如

$$34.5842 \times 12.6 \approx 34.58 \times 12.6 = 435.708 \approx 435.7$$

复 习 题

1-1 什么是测量误差？测量误差有哪几种？它们产生的原因是什么？又如何减少或

消除？

1-2 简述误差的表示方法，它们各在什么场合下应用？

1-3 如需测量15V的电压值，现有两只电压表，其中一只量程为150V、1.5级；另一只为20V、2.5级。试问选用哪一只电压表测量可使测量误差较小？

1-4 当用一只上限量程为250V的电压表测量实际值为200V的电压时，已知相对误差为-4%，求测量结果的绝对误差和仪表的指示值。

1-5 求近似值0.1234、4.567和78.9之和。

第二章 电 桥

任何电器设备都是由一些基本元件如电阻、电容等组成。各元件的参数决定了设备的工作状态，因此，在设备制造和维修过程中，精确地测量各元件的参数值，具有十分重要的意义。测量元件参数的方法有多种，例如可以直接测量或间接测量。本章将着重介绍电桥的原理结构及使用方法。

电桥的种类很多，一般可分为直流电桥和交流电桥两大类。

第一节 直 流 电 桥

直流电桥主要用来测量直流电阻，按结构的不同可分为直流单臂电桥，即惠斯登电桥，它适用于测量 $1 \times 10^4 \Omega$ 以下的中值电阻。还有直流双臂电桥，即凯尔文氏电桥，适用于测量 1Ω 以下的低值电阻。下面仅介绍直流单臂电桥。

一、直流单臂电桥的工作原理

惠斯登电桥是桥式电路中较简单的1种，如图2-1所示。图中 ac 、 cb 、 ad 、 db 共4条支路称为电桥的4个桥臂，其中1个桥臂接被测电阻 R_x ，其余桥臂接标准电阻或可调标准电阻。在电桥的 cd 对角线上接入指零仪表，通常称为检流计；另一对角线 ab 上接入直流电源。

当电桥工作时，调节电桥的1个桥臂或几个桥臂的电阻，使检流计的指示为零，即电桥被调到平衡状态。当电桥处于平衡状态时， cd 两点的电位是相等的，所以有

$$I_1 R_x = I_1 R_1 \quad (2-1)$$

$$I_1 R_1 = I_1 R_1 \quad (2-2)$$

将式(2-1)与式(2-2)相除有

$$\frac{I_1 R_x}{I_1 R_1} = \frac{I_1 R_1}{I_1 R_1} \quad (2-3)$$

由图2-1可见，当 $I_G = 0$ 时， $I_1 = I_1$ ， $I_1 = I_1$ ，所以式(2-3)可简化为

$$\frac{R_x}{R_1} = \frac{R_1}{R_1}$$

或 $R_x R_1 = R_1 R_1 \quad (2-4)$

则有 $R_x = \frac{R_1}{R_1} R_1 \quad (2-5)$

可见，只要电桥平衡时的3个桥臂电阻已知，则被测电阻便可求得。

图2-1中的 R_2 、 R_3 称为电桥的比例臂，比例臂倍率 R_2/R_3 有刻度标出。 R_4 称为比较臂，用欧姆刻度。若比例臂倍率和比较臂的读数为已知，则被测电阻 $R_x = \text{比例臂倍率} \times \text{比较臂的读数}$ 。

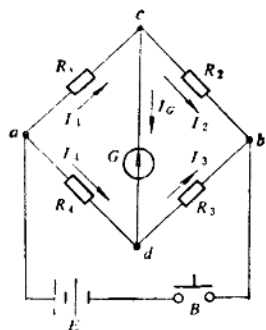


图 2-1 直流单臂电桥原理图

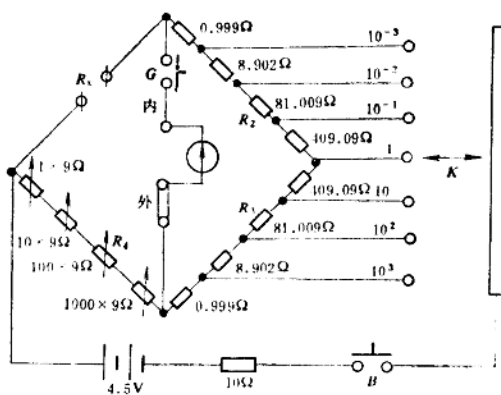


图 2-2 QJ23型直流单臂电桥电路图

二、QJ23型直流单臂电桥

QJ23型直流单臂电桥电路如图2-2所示，其中比例倍率 R_2/R_3 有7档，分别为 10^{-3} 、 10^{-2} 、 10^{-1} 、 10^0 、 10^1 、 10^2 、 10^3 。每个比例臂由4只电阻串联，其阻值各为500Ω。

比较臂 R_4 由4节可调整电阻串联而成，每节又是由9只阻值相同的电阻组成，即 R_4 中每一节的电阻分别由9只1Ω、10Ω、100Ω、1000Ω组成的，它的总阻值为9999Ω。比例倍率和比较臂的数值可由面板上的各旋钮调节，面板布置如图2-3。

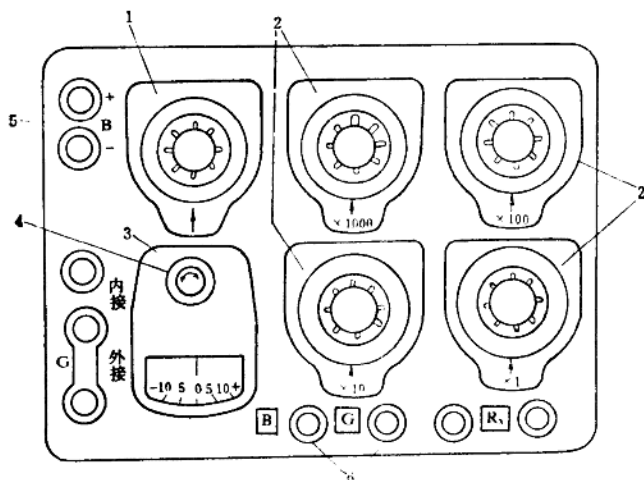


图 2-3 QJ23型直流单臂电桥面板图

1—倍率旋钮；2—比较臂；3—检流计；4—调零器；5—外接电源；6—按钮

使用步骤：

- (1) 使用前先打开检流计锁扣或短路片G，调节调零器使指针置于零位。
- (2) R_x 接好后，先估计阻值范围（或用万用表粗测阻值），选择合适的比例倍率，

以保证比较臂的4档电阻都能充分利用。如被测电阻 R_x 为数欧姆时,则应将倍率选择置 10^{-3} 档,这样4节比较臂均能用上,可减少测量误差。

(3)测量时应先按电源按钮B,再按检流计按钮G。在测量过程中按钮G不能一直按着,应在比较臂改变一次阻值后,才能按一下按钮G,观看检流计指针的偏向,若检流计指针向“十”偏转,说明比较臂的阻值偏小,应增加比较臂的阻值,反之应减少阻值。当检流计指针接近零时,才可按住G,进行细调,直至指针指为零。

(4)测量完毕,应先松开按钮G,后松开电源按钮B,特别是在测量具有电感的元件(如线绕电阻)时,一定要遵守上述操作程序,否则,会有很大的自感电势作用于检流计,造成检流计的损坏。测量结束时,要将检流计的两端短路,即短路片在内接位置,以保护检流计。

第二节 交流电桥

交流电桥主要是用来测量交流参数的,其测量的基本原理就是将交流参数与标准交流参数进行比较,从而得到被测的交流参数。

一、交流电桥的测量原理

交流电桥在电路形式和桥臂位置的安排上都与图2-1所示直流电桥类同,只是各桥臂一般是由复数阻抗元件构成的,且两对角线分别接交流电源和交流检流计。

当电桥平衡时,与式(2-4)相似,有

$$\dot{Z}_1 \dot{Z}_3 = \dot{Z}_2 \dot{Z}_4 \quad (2-6)$$

若 $\dot{Z}_1$ 为被测阻抗 $\dot{Z}_x$,则有

$$\dot{Z}_x = \frac{\dot{Z}_3}{\dot{Z}_2} \dot{Z}_4 \quad (2-7)$$

当其它桥臂的参数已知时,就可确定被测阻抗 $\dot{Z}_x$ 的数值。下面我们对交流电桥的平衡条件作进一步的分析。在正弦交流情况下,阻抗可写成复数形式

$$\dot{Z} = R + jX = Ze^{j\varphi}$$

现将交流平衡条件改写成复数指数形式,可有

$$Z_1 e^{j\varphi_1} \cdot Z_3 e^{j\varphi_3} = Z_2 e^{j\varphi_2} \cdot Z_4 e^{j\varphi_4}$$

整理后,得

$$Z_1 Z_3 e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)} = Z_2 Z_4 e^{j(\varphi_2 + \varphi_4)}$$

根据复数相等的条件,等式两边的幅值和幅角必须分别相等,故有

$$\begin{cases} Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 & (2-8) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4 & (2-9) \end{cases}$$

这就是交流电桥平衡条件的另一种表示形式。可见,交流电桥的平衡必须同时满足两个条

件：一是两对相对桥臂阻抗的幅值乘积相等；二是两对相对桥臂阻抗的幅角之和相等。由此可知以下情况。

(1) 交流电桥的4个桥臂阻抗必须按一定方式配置，否则，电桥不一定能够调节到平衡。在很多交流电桥中，为了使电桥结构简单和调节方便，通常将交流电桥中的两个桥臂设置成纯电阻。

根据平衡条件可知，如果相邻两臂接入纯电阻，则另外相邻两臂也必须接入性质相同的阻抗。例如，若被测对象 $\dot{Z}_x$ 在 $\dot{Z}_1$ 桥臂位置即相当于图2-1中 R_x 的位置，而相邻桥臂 $\dot{Z}_2$ 和 $\dot{Z}_3$ 相当于图2-1中 Z_2 和 Z_3 的位置，现设 R_1 和 R_2 为纯电阻，则有 $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ 。根据式(2-9)可得 $\varphi_x = \varphi_3$ 。如被测 $\dot{Z}_x$ 是电容，则桥臂 $\dot{Z}_3$ 也必须是电容；如 $\dot{Z}_x$ 是电感，则 $\dot{Z}_3$ 也必须是电感。而当相对的两桥臂接入纯电阻时，则另外的相对两桥臂必须为异性阻抗，此时相角正好相反。

(2) 交流电桥的平衡必须反复调节，使电桥既满足式(2-8)，又满足式(2-9)，才能达到完全平衡。所以交流电桥的调节要比直流电桥的调节难度大一些。

从原理上说，交流电桥中标准阻抗可以是标准电容，也可以是标准电感，但是由于工艺上的原因，标准电容能够达到的准确度常常高于标准电感，并且标准电容还有不受外来磁场的影响和受温度变化的影响也比较小等优点，因此，在交流电桥中大都采用标准电容作为标准阻抗。

二、常用交流电桥

常用的交流电桥有电容电桥、电感电桥及万用电桥，本节主要介绍电容电桥及电感电桥，万用电桥在下节讨论。

(一) 电容电桥

电容电桥主要用来测量电容器的电容量及其损耗因数，其结构有串联电阻式和并联电阻式两种形式。

1. 串联电阻式电容电桥

串联电阻式电容电桥的接线如图2-4所示。被测电容 C_x 接在电桥的 cb 臂上，它的损耗以等效串联电阻 R_x 表示。桥臂 ac 、 ad 用的是标准电阻 R_1 、 R_2 ，而标准电容 C_n 及可变标准电阻 R_n 则接在桥臂 db 上，当电桥平衡时，根据式(2-6)有

$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x}\right)R_2 = \left(R_n + \frac{1}{j\omega C_n}\right)R_1$$

经整理得

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_n \quad (2-10)$$

$$C_x = \frac{R_2}{R_1} C_n \quad (2-11)$$

通常标准电容都做成固定的，因而，我们需要对 R_n 、 R_1 及 R_2 的参数进行反复调节，最终才能实现电桥平衡，也就可以求得 C_x 和 R_x 。同时，也可以求得被测电容的损耗因数 D