

中等专业学校试用教材

通 信 测 量 仪 表

方明昌 编

中 国 铁 道 出 版 社

1981年·北京

内 容 提 要

本书主要介绍通信测量中几种常用仪表的工作原理和使用方法等。全书共分六章，包括：万能电桥、电子示波器、线路故障脉冲遥测仪、数字式频率计、电平振荡器和选频电平表。

本书为中等专业学校的试用教材，也可供从事通信工作的技术人员和工人参考。

中等专业学校试用教材

通信测量仪表

方明昌 编

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 1/32 印张：9.5 字数：235 千

1981年8月第1版 1981年8月第1次印刷

印数：0001—11,000 定价：0.80元

目 录

第一章 万能电桥	1
第一节 交流电桥	1
第二节 WQJ-05型万能电桥	6
第三节 Q表的原理及应用	16
习 题	18
第二章 电子示波器	19
第一节 阴极射线示波管	19
第二节 扫描	22
第三节 SB-10型示波器的工作原理	25
第四节 SB-10型示波器的使用方法	40
习 题	47
第三章 线路故障脉冲遥测仪	48
第一节 线路故障脉冲测试的原理	48
第二节 MST-1B型线路故障脉冲遥测仪的方框图	50
第三节 MST-1B型线路故障脉冲遥测仪的电路分析	52
第四节 MST-1B型线路故障脉冲遥测仪的性能与使用方法	71
习 题	75
第四章 数字式频率计	76
第一节 频率测量的常用方法	76
第二节 数字式频率计的测频原理	78
第三节 PB-2型十进频率仪的方框图	79
第四节 PB-2型十进频率仪的电路分析	80
第五节 PB-2型十进频率仪的主要技术指标	99
第六节 PB-2型十进频率仪的使用方法	100
习 题	104
第五章 电平振荡器	105
第一节 电平振荡器的原理	105
第二节 QF668Ⅱ型电平振荡器的方框图	107
第三节 QF668Ⅱ型电平振荡器的电路分析	108
第四节 QF668Ⅱ型电平振荡器的主要技术指标	119
第五节 QF668Ⅱ型电平振荡器的使用方法	121
第六节 频率合成技术	123
习 题	130
第六章 选频电平表	131
第一节 电平表的原理	131
第二节 QP272Ⅱ型选频电平表的方框图	132
第三节 QP272Ⅱ型选频电平表的电路分析	133
第四节 QP272Ⅱ型选频电平表的主要技术指标	142
第五节 QP272Ⅱ型选频电平表的使用方法	144
习 题	148

第一章 万能电桥

任何电的设备都由一些基本元件（如电阻、电容、电感等）所组成，各元件的参数决定着设备的工作情况。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。万能电桥不但能精确地测量电阻、电容和电感的模值，还能测量电容的损耗因数 $\text{tg}\delta$ 和电感的品质因数 Q 。

其中电阻虽然可以用直流电桥测量，但电容和电感属于电抗性元件，必须采用交流电桥测量。

第一节 交流电桥

一、交流电桥的基本原理

交流电桥的种类很多，其基本原理相同，如图 1—1—1 所示。

当电桥平衡时，

$$\dot{Z}_a \dot{Z}_s = \dot{Z}_x \dot{Z}_b$$

或

$$\dot{Z}_x = \frac{\dot{Z}_a}{\dot{Z}_b} \dot{Z}_s \quad (1-1-1)$$

式中

$$\begin{aligned} \dot{Z}_a &= Z_a e^{j\varphi_a} \\ \dot{Z}_b &= Z_b e^{j\varphi_b} \\ \dot{Z}_x &= Z_x e^{j\varphi_x} \\ \dot{Z}_s &= Z_s e^{j\varphi_s} \end{aligned}$$

故 (1—1—1) 式又可写成

$$\begin{cases} Z_a Z_s = Z_b Z_x \\ \varphi_a - \varphi_b = \varphi_x - \varphi_s \end{cases}$$

由此可知：交流电桥要获得平衡，必须满足两个条件，即

1. 相对桥臂的阻抗模数的乘积必须相等。
2. 相邻桥臂的阻抗幅角的差值必须相等。

一般交流电桥的平衡臂阻抗 Z_a 和 Z_b 是用固定的电阻（或电抗）所组成。根据 Z_a 和 Z_b 配置的位置不同，可分为平衡臂相除的交流电桥和平衡臂相乘的交流电桥两种，如图 1—1—2 和图 1—1—3 所示。

平衡臂相除的交流电桥的平衡条件是

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{\dot{Z}_x}{\dot{Z}_s}$$

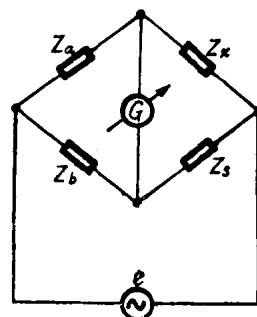


图 1—1—1 交流电桥原理图
 Z_a 、 Z_b ——平衡阻抗臂；
 Z_x ——被测阻抗臂；
 Z_s ——标准阻抗臂；
 e ——测量电源；
 G ——平衡指示器。

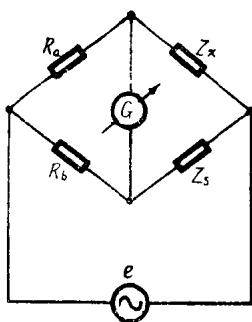


图 1-1-2 平衡臂相除交流电桥原理图

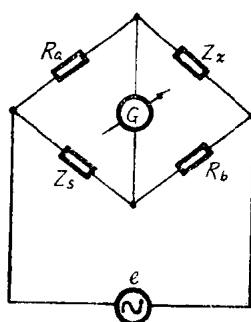


图 1-1-3 平衡臂相乘交流电桥原理图

或

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{Z_x}{Z_s} e^{j(\varphi_x - \varphi_s)} \quad (1-1-2)$$

由 (1-1-2) 式可见，这种电桥除模数平衡外，只有当 $\varphi_x - \varphi_s = 0$ 时，电桥才能平衡。因此， $\dot{Z}_x$ 和 $\dot{Z}_s$ 只有同是电感性阻抗或同是电容性阻抗时才适合。

平衡臂相乘的交流电桥的平衡条件是

$$R_a R_b = \dot{Z}_x \dot{Z}_s$$

或

$$R_a R_b = Z_x Z_s e^{j(\varphi_x + \varphi_s)} \quad (1-1-3)$$

同理，当 $\varphi_x + \varphi_s = 0$ 时电桥才能平衡， $\dot{Z}_x$ 和 $\dot{Z}_s$ 必须有一个是电感性阻抗，而另一个是电容性阻抗才适合。

二、测量电容的电桥

测量电容的电桥一般属于平衡臂相除的交流电桥，如图 1-1-4 所示。图中

$$\dot{Z}_x = R_x - j \frac{1}{\omega C_x}$$

$$\dot{Z}_s = R_s - j \frac{1}{\omega C_s}$$

调整标准电抗 R_s 和 C_s 使电桥平衡，则得

$$R_x - j \frac{1}{\omega C_x} = \frac{R_a}{R_b} \left(R_s - j \frac{1}{\omega C_s} \right)$$

式中 R_x 、 C_x ——被测阻抗中的电阻与电容成分。

解上式，使等号两边的实数部分与虚数部分各自相等，可求得被测阻抗中的电阻成分 R_x 、电容成分 C_x 以及损耗因数 $\text{tg} \delta$ ，即

$$R_x = \frac{R_a}{R_b} R_s \quad (1-1-4)$$

$$C_x = \frac{R_b}{R_a} C_s = \frac{C_s}{R_a/R_b} \quad (1-1-5)$$

$$\text{tg} \delta = \omega C_x R_x = \omega C_s R_s \quad (1-1-6)$$

【例】已知： $R_a = 100 \Omega$ ， $R_b = 1000 \Omega$ ， $\omega = 1000$ ， $C_s = 0.16 \mu\text{F}$ ， $R_s = 2700 \Omega$ 。

求： R_x 、 C_x 及 $\text{tg} \delta$ 。

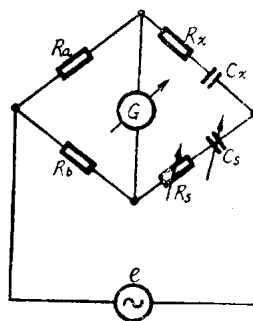


图 1-1-4 测量电容的电桥原理图

解:

$$R_x = \frac{R_a}{R_b} R_s = \frac{100}{1000} \times 2700 = 270 \text{ 欧}$$

$$C_x = \frac{R_b}{R_a} C_s = \frac{1000}{100} \times 0.16 = 1.6 \text{ 微法}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_s R_s = 1000 \times 0.16 \times 10^{-6} \times 2700 = 0.432$$

若两平衡臂的电阻相等, 即 $R_a = R_b$ 时, 则 $R_x = R_s$, $C_x = C_s$ 。

在这种情况下, 电桥所能测量的电容量的范围会受到限制, 不能超过标准电容 C_s 的可变范围。如 C_s 的可变范围是 $0 \sim 1$ 微法, 则不能测量大于 1 微法的电容。

如果将图 1-1-4 中的 C_s 固定不变, 将 R_s 改成可变电阻, 形成比例臂可变的交流电桥。这时, R_x 、 C_x 和 $\operatorname{tg} \delta$ 值仍可根据 (1-1-4)、(1-1-5) 及 (1-1-6) 各式求得。由 (1-1-6) 式可看出, 若 C_s 和测量电源的频率可为定值, 则 ωC_s 为常数, 即

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_s R_s = K R_s$$

由此可见, 被测电容器的损耗因数 $\operatorname{tg} \delta$ 与 R_s 成正比。如果将 R_s 的刻度盘直接刻成损耗因数值, 那么就可以直接由 R_s 的刻度读出被测电容的损耗因数值。

三、测量电感的电桥

测量电感一般采用平衡臂相乘的交流电桥。因为标准电感器的电感量随频率的改变而变化, 而且成本高, 体积大, 不适于高频测量, 所以在测量未知电感性阻抗时, 常常使用标准电容器来作为标准阻抗臂。这样在高频测量时, 可以得到比用电感器做标准阻抗更好的结果。

测量电感时, 可能有下列两种情况:

(一) 被测电感具有较高的品质因数

这时, 采用串联的电阻和电容作为标准阻抗, 容易使电桥平衡, 而且测量精确度较高。这种电桥又称为“海氏电桥”, 其原理图如图 1-1-5 所示。

图中

$$\dot{Z}_x = R_x + j\omega L_x$$

$$\dot{Z}_s = R_s - j\frac{1}{\omega C_s}$$

当电桥平衡时, 则

$$\begin{aligned} R_a R_b &= (R_x + j\omega L_x) \left(R_s - j\frac{1}{\omega C_s} \right) \\ &= R_x R_s + j R_s \omega L_x - j \frac{R_x}{\omega C_s} + \frac{L_x}{C_s} \end{aligned}$$

使上式两边的实数部分和虚数部分各自相等, 则可解得被测阻抗的电阻成分 R_x 、电感成分 L_x 及品质因数 Q , 即

$$R_x = R_a R_b \frac{\omega^2 C_s^2 R_s}{1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2} \quad (1-1-7)$$

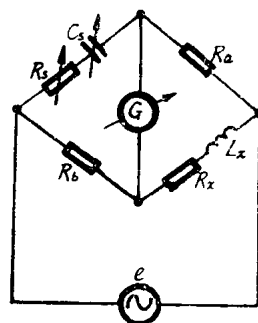


图 1-1-5 海氏电桥原理图

$$L_x = R_a R_b \frac{C_s}{1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2} \quad (1-1-8)$$

$$Q_{\text{高}} = \frac{\omega L_x}{R_x} = \frac{1}{\omega C_s R_s} \quad (1-1-9)$$

由(1-1-9)式可见, 由于 C_s 一般数值较小(以微法为单位), 因此可以测量品质因数 Q 值较高的线圈的电感量。 Q 值的测量范围在“10~1000”内。

(二) 被测电感具有较低的品质因数

这时, 采用并联的电阻和电容作为标准阻抗, 容易使电桥平衡。这种电桥又称为“麦克斯威尔电桥”, 其原理图如图1-1-6所示。

图中

$$\begin{aligned} \dot{Z}_x &= R_x + j\omega L_x \\ \dot{Z}_s &= \frac{1}{\frac{1}{R_s} + j\omega C_s} \end{aligned}$$

当电桥平衡时, 则

$$R_a R_b = (R_x + j\omega L_x) / \left(\frac{1}{R_s} + j\omega C_s \right)$$

即
$$R_x + j\omega L_x = \frac{R_a R_b}{R_s} + j\omega C_s R_a R_b$$

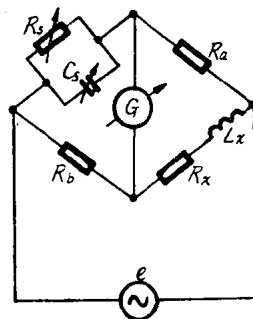


图1-1-6 麦克斯威尔电桥原理图

使上式两边的实数和虚数部分各自相等, 则可解得 R_x 、 L_x 和 Q 的值为

$$R_x = \frac{R_a R_b}{R_s} \quad (1-1-10)$$

$$L_x = C_s R_a R_b \quad (1-1-11)$$

$$Q_{\text{低}} = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega R_s C_s \quad (1-1-12)$$

由(1-1-12)式可见, 由于 C_s 数值较小, 因此可以测量品质因数 Q 较低的线圈的电感量。 Q 值的测量范围在“0~10”内。

【例】在图1-1-6的交流电桥中, 已知: $R_a = R_b = 1000$ 欧, 测量电源的频率 f 为1000赫, 当电桥平衡时, $R_s = 250$ 欧, $C_s = 0.2$ 微法。

求: R_x 、 L_x 和 Q 值。

解:

$$R_x = \frac{R_a R_b}{R_s} = \frac{1000 \times 1000}{250} = 4000 \text{ 欧}$$

$$L_x = C_s R_a R_b = 0.2 \times 10^{-6} \times 1000 \times 1000 = 0.2 \text{ 亨}$$

$$Q = \omega C_s R_s = 2\pi \times 1000 \times 0.2 \times 10^{-6} \times 250 = 0.314$$

同直接测量电容器的损耗因数相似, 如果使图1-1-5和图1-1-6中的 C_s 固定不变, 同时测量电源频率 f 也不变, 而将 R_s 改成可变电阻, 则根据(1-1-9)式和(1-1-12)式可得被测电感的品质因数 Q 值分别为

$$Q_{\text{高}} = \frac{\omega L_x}{R_x} = \frac{1}{\omega C_s R_s} = K \frac{1}{R_s}$$

$$Q_{\text{低}} = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega C_s R_s = K' R_s$$

因此, 在 R_s 的刻度上可以直接标刻出各品质因数的数值。在测量电感时, 可以从 R_s 的刻度上直接读出被测电感线圈的品质因数 Q 值。

四、用谐振电桥测量电感

要测量电感量较大的阻抗时, 可采用谐振电桥, 其原理图如图 1—1—7 所示。将标准电容 C_s 串联在被测阻抗臂上, 调整 C_s 使 L_x 与 C_s 产生串联谐振。当谐振时, 被测阻抗臂上的电容 C_s 和电感 L_x 互相抵消, 只留下被测电感的有效电阻 R_x , 再调整 R_s 就可使电桥平衡。

当电桥平衡时, 因为

$$\omega L_x = \frac{1}{\omega C_s}$$

$$R_a R_s = R_b R_x$$

所以

$$L_x = \frac{1}{\omega^2 C_s} \quad (1-1-13)$$

$$R_x = \frac{R_a}{R_b} R_s \quad (1-1-14)$$

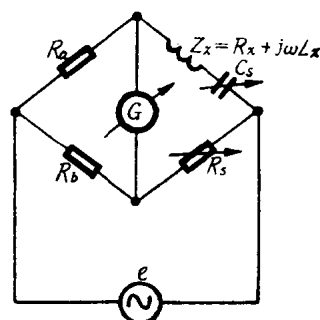


图 1—1—7 谐振电桥原理图

由 (1—1—13) 式可见, L_x 与角频率 ω 的平方成反比, 因此要求测量电源的频率必须很精确, 才能得到精确的测量结果。

五、测量铁芯线圈的电感量

铁芯线圈的电感量是铁芯的恒定磁化强度和交变磁化强度的函数。它随流进铁芯线圈的电流 (包括直流分量和交流分量) 的大小而改变。另外, 它还与剩磁及电流的频率有关。

因此, 测量铁芯线圈的电感量所选用的频率和电流的数值, 应和该线圈在实际工作时所用的频率和电流值相同, 其测量原理图如图 1—1—8 所示。

图中有直流电源和交流电源。直流电源的电流通过铁芯线圈 L_x 和电阻臂 R_2 , 电流值可从电流表 A 上读出, 并应和被测电感在工作时所通过的电流值相似。由于这个直流电流的大小调节和测量是在电桥对角线上进行的, 因此电桥的平衡与它的大小无关。

调节 R_1 和 R_s 使电桥平衡, 则

$$L_x = R_1 R_2 \frac{C_s}{1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2} \quad (1-1-15)$$

从图 1—1—8 可见, 电桥的平衡指示器 (耳机) 是经由扼流圈 L_p 和电容器 C 组成的滤波器再接到电路中去。滤波器的作用是将指示器电路中的交流和直流分开。

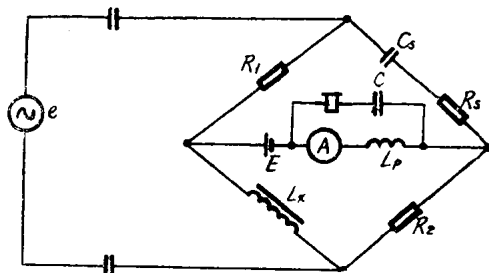


图 1—1—8 用电桥法测量铁芯线圈电感量的原理图

六、互感的测量

测量互感的方法是将所要测量的线圈先串联起来，测出其总电感 L' ，然后将其中一个线圈的两引线调换位置再串联起来，又测得其总电感为 L'' ，则

$$L' = L_1 + L_2 + 2M$$

$$L'' = L_1 + L_2 - 2M$$

此两式相减得

$$M = \frac{L' - L''}{4} \quad (1-1-16)$$

应该注意，用这种方法测量互感时，两线圈间的耦合要好，否则测量精确度将会很低。

第二节 WQJ-05型万能电桥

一、概 述

WQJ-05型万能电桥是一种精密测量仪器，它能测量电阻、电容和电感（包括铁芯线圈的电感）等元件的参量，也可测出电容的损耗因数 $\text{tg}\delta$ 和电感的品质因数 Q 。

该电桥的主要特点：

1. 桥路上的电阻和标准电容都采用高精度元件，以保证测量的精度。
2. 具有200赫、400赫和1千赫三种频率的振荡器，用做测量电源，可适用于各种条件下的测量。
3. 检测放大器带有选频网络和晶体管限幅器，使电桥具有很高的选择性和平衡点附近的灵敏度。
4. 当采用外接标准电容代替仪器内部的标准电容时，可扩大电桥对电容、电感测量时的量程。
5. 能够外接60赫~10千赫振荡器或50赫市电做为测量电源，也能外接检流计（平衡指示器）。
6. 采用部件式结构，使维护检修方便。

该万能电桥的测量转换采用琴键开关。面板上备有“外接测量电源”、“外接检流计”、“外接选频网络”、“外接标准电容”等接线柱。当需要扩大量程或提高测量精度时，可以很方便地利用这些接线柱与外接仪表连接。电桥内部底盘和面板电路用插头和插座连接，使用、维护和检修都很方便。

二、电路原理

WQJ-05型万能电桥由桥路、音频振荡器（音频测量电源）、平衡检测指示器和电源四部分组成。其方框图如图1—2—1所示，原

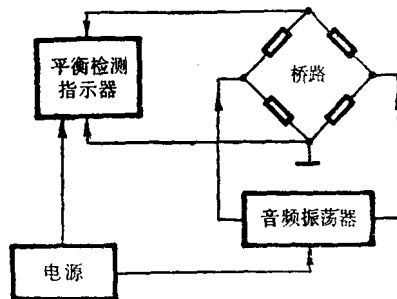


图1—2—1 WQJ-05万能电桥方框图

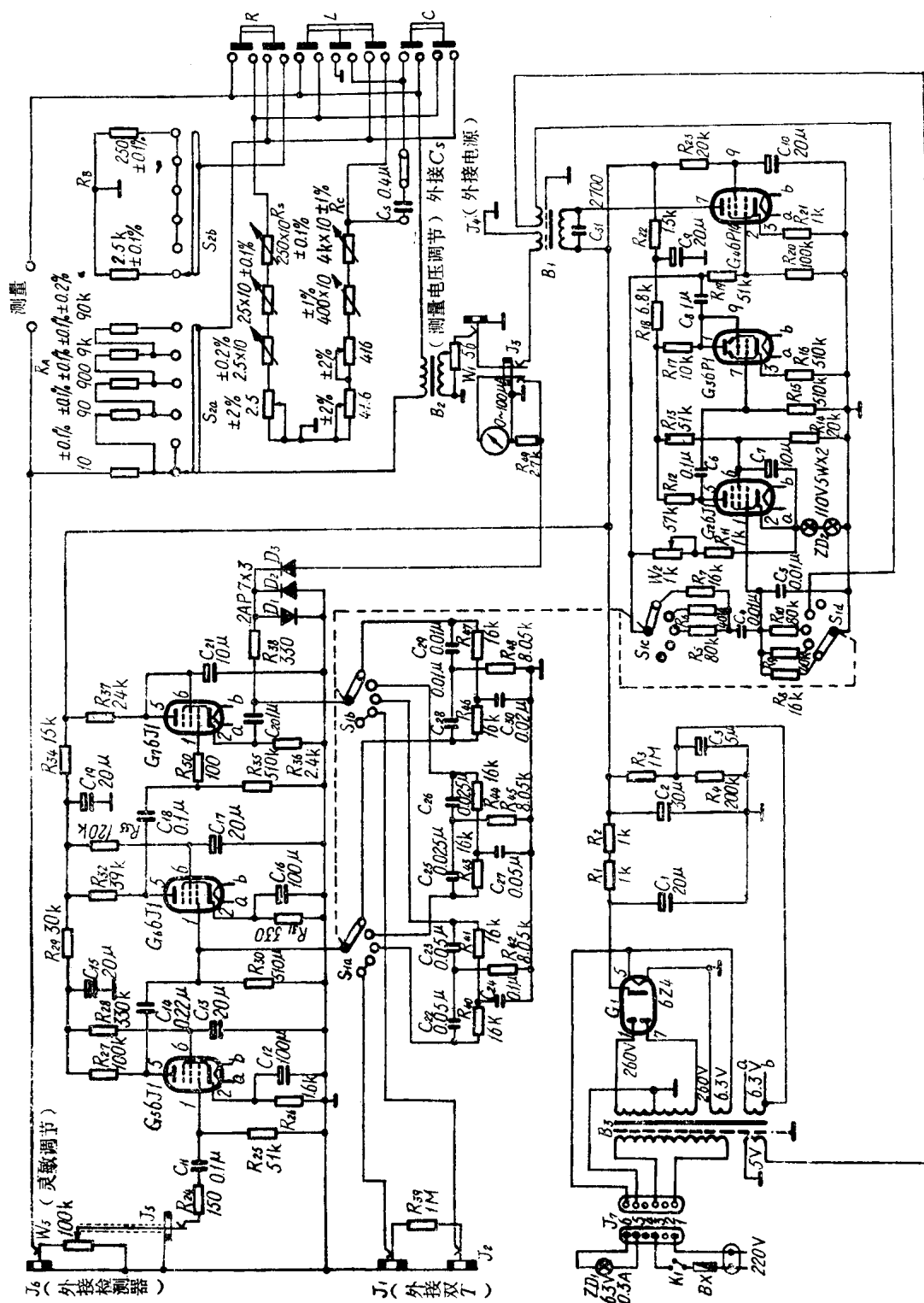


图 1-2-2 WQJ-05 万能电桥原理图

理图如图 1—2—2 所示。

(一) 桥路部分

桥路部分是 WQJ-05 万能电桥的主体电路。它由可变标准电阻箱 R_A 、 R_B 、 R_C 、 R_D ，标准电容 C_s 及琴键开关 “R、L、C” 组成。测量时，由琴键开关控制接成所需的测量桥路。

(二) 音频振荡器

音频振荡器产生 200 赫、400 赫和 1 千赫三种音频振荡信号，做为桥路测量电源。它由电子管 G_2 (6J1)、 G_3 (6P1) 和 G_4 (6P14) 组成。 G_2 、 G_3 组成文氏电桥振荡器， G_4 为功率放大器。

文氏电桥振荡器包括文氏电桥和两级振荡放大器 G_2 、 G_3 。

G_2 、 G_3 为一个普通阻容耦合放大器，在工作频段内总相移为 360° 。图 1—2—3 是该振荡器在输出信号频率为 200 赫时的简化电路图。图中， $R_5 = R_{10} = 80$ 千欧， $C_4 = C_5 = 0.01$ 微法。

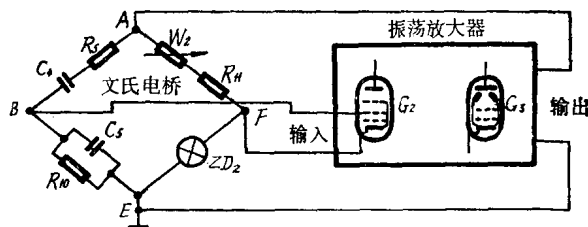


图 1—2—3 文氏电桥振荡器的简化电路图

文氏电桥的 ABE 支路由阻容串并网络 (R_5 、 C_4 、 R_{10} 、 C_5) 组成，它构成振荡器的选频网络和正反馈支路。 G_3 的输出电压由它的阳极经 C_8 送到串并联阻容网络，再经该网络分压后，将阻容并联电路 (R_{10} 和 C_5) 上的电压送至 G_2 的栅极，形成正反馈。

ABE 支路上的阻容串并网络是一个具有选频特性的四端网络，其简化电路及其频率特性如图 1—2—4 所示。

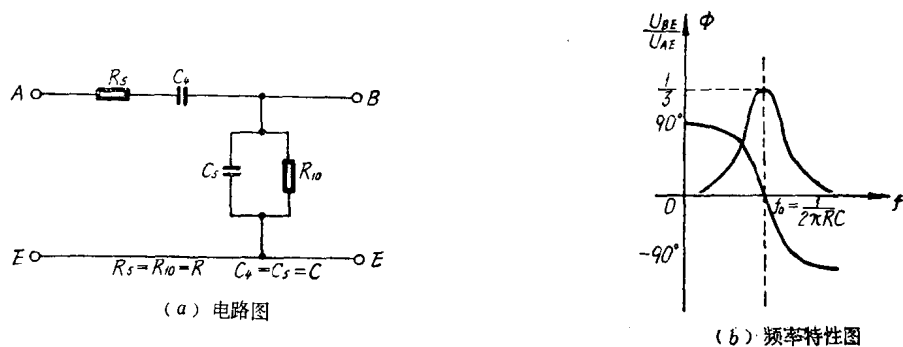


图 1—2—4 阻容串并网络及其频率特性图

当 $f = f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 时，阻容串并网络的传输系数 $\frac{U_{BE}}{U_{AE}}$ 有一个极大值为 $\frac{1}{3}$ ，并且相位移为零。这时电容的容抗刚好等于电阻的阻值，即

$$R = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{1}{2\pi f_0 C}$$

当 $f > f_0$ 时，电容容抗下降，使

$$R > \frac{1}{2\pi f C}$$

这时串臂电容 C_4 的降压作用相对减小，串臂中电阻 R_5 起主要作用。与此同时，并臂电容 C_5 的分流作用却相对增大，起到主要作用，因此随着频率增高，传输系数 $\frac{U_{BE}}{U_{AE}}$ 将下降，相位

移 ϕ 将增大。当 f 趋近无限大时, $\frac{U_{BE}}{U_{AE}}$ 将趋近于0, ϕ 将趋近于 -90° 。

当 $f < f_0$ 时, 串臂中电容 C_4 起主要作用, 并臂中电阻 R_{10} 起主要作用, 随着频率 f 的减小, 传输系数将减小, 相位移将增大。当频率 f 趋近于0时, $\frac{U_{BE}}{U_{AE}}$ 将趋近于0, ϕ 将趋近于 $+90^\circ$ 。

由于两级阻容耦合放大器本身在很宽的频带内的相位移为 360° , 因此只有在 $f = f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 时, 才符合振荡器所需的相位平衡条件。这时, 振荡器才能产生振荡, 这个频率就是振荡器的振荡频率。若从振幅平衡条件来看, 在上述的振荡频率时, $\frac{U_{BE}}{U_{AE}} = \frac{1}{3}$, 要求两级放大器的放大倍数为

$$K_0 = K_2 \cdot K_3 = 3$$

即可产生等幅振荡。因此, 阻容串并联正反馈网络的选频特性是文氏电桥振荡器能成为单一频率的正弦振荡器所必须的。调节正反馈网络的 R_5 和 R_{10} , 可改变振荡器的振荡频率。

文氏电桥的 AFE 支路由电位器 W_2 、电阻 R_{11} 和钨丝灯泡 ZD_2 组成。它构成文氏电桥的负反馈支路。 G_3 的输出电压经该支路分压后, ZD_2 上的电压直接送到 G_2 的阴极。它与正反馈支路 R_{10} 和 C_5 上的正反馈电压反向串联, 形成负反馈。文氏电桥的正反馈用来产生振荡, 负反馈(小于正反馈量)用来稳幅, 以减小振荡器本身的非线性失真, 改善频率响应和稳定输出。 ZD_2 (110伏5瓦)具有正温度系数(即通过它的电流增大时, 其电阻值随之增加), 可以加强稳幅作用。若由于某种原因使振荡幅度减小时, ZD_2 的电阻值便随之减小。这将使负反馈支路的负反馈电压跟着减小, 而使原有振荡幅度的减小得到补偿。调节电位器 W_2 可以改变振荡器的负反馈深度, 用以调整振荡器的振幅。在正常情况下, G_3 输出电压为7~8伏。

G_2 、 G_3 和 G_4 均为普通的阻容耦合放大电路。由功率放大器 G_4 放大后的音频振荡信号经输出变压器 B_1 送到电位器 W_1 (调节测量电压大小), 再经变压器 B_2 送到测量桥路的电源接线端。

文氏电桥振荡器是应用很广泛的低频信号源。在WQJ-05型万能电桥、XFD-7A型低频信号发生器、PB-2型十进频率仪、QF867型阻容载频振荡器等仪器中, 都采用这种振荡器来产生频率和幅度比较稳定的低频正弦波信号。

(三) 平衡检测指示器

平衡检测指示器是用来检测电桥平衡情况的。它由检测选频放大器(G_5 、 G_6 和 G_7)、限幅器(D_1 和 D_2)和检波指示器(D_3 及微安表)三部分组成。

1. 检测选频放大器

检测选频放大器由检测放大器和双T型选频反馈网络组成, 其方框图如图1-2-5所示。

检测放大器由两级普通的阻容耦合放大器(G_5 和 G_6)和一级阴极输出器(G_7)组成。利用双T型选频负反馈网络的作用产生选频特性。 G_7 的阴极(C_{20} 、 R_{38} 的交点)输出电压 U , 经过双T型反馈网络取出反馈电压 U_β , 送到 G_6 的栅极, 构成电压并联负反馈电路。

双T型负反馈网络实际上是一个带阻滤波器, 它的阻带中心频率就是测量电源的频率,

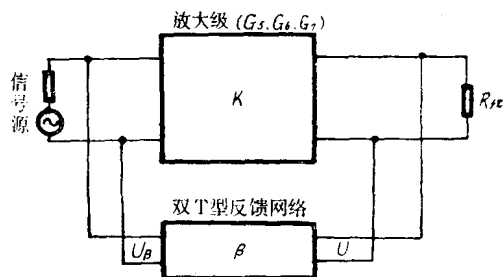


图1-2-5 检测选频放大器的方框图

检测放大器就工作在这一频率上。譬如测量电源的频率为 1 千赫时，双 T 型反馈网络的阻带中心频率也是 1 千赫，其电路和频率特性如图 1—2—6 所示。1 千赫以上的高通特性，是由 C_{28} 、 C_{29} 和 R_{48} 所组成的对称 T 型高通滤波器得到的；1 千赫以下的低通特性，则是由 R_{47} 、 R_{48} 和 C_{30} 组成的对称 T 型低通滤波器得到的，两者并联就构成了双 T 型网络。

本来检测放大器 G_5 、 G_6 和 G_7 是没有选频特性的，但接入双 T 型负反馈网络后，放大器就有了选频特性。因为双 T 型网络的阻带特性使测量电源频率的负反馈受到抑制（每个双 T 型网络的阻带中心频率对应于一个内部测量电源频率）。但对其它频率来说，由于处在双 T 型网络的通带之内，因此通过双 T 型网络产生很深的负反馈。这样就减小了检测选频放大器在这些频率上的放大量，而形成如图 1—2—7 所示的选频放大特性。由图可见，检测选频放大器的频率特性刚好与双 T 型负反馈网络的频率特性相反。

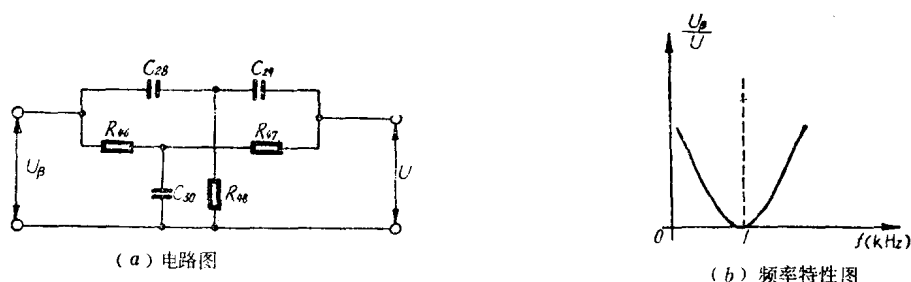


图 1—2—6 1 千赫双 T 型反馈网络电路图及其频率特性图

检测放大器采用选频放大，可以减小杂音电压以及测量电源的谐波电压对平衡指示的干扰。因为当电桥接近平衡时，平衡检测器所检测到的电压是很微弱的。这时杂音电压的存在会使电桥平衡时的指示器指不到 0。采用检测选频放大器可压缩放大器的工作频带，减少放大器的杂音（因放大器的内部杂音与放大器频带有关，频带窄，杂音小）。

由于被测元件有某些寄生参数，如被测电感的寄生电容、被测电阻的寄生电感和寄生电容等使电桥不可能在所有频率上都达到平衡，因此当电桥调到对测量电源频率平衡时，受到电源谐波的影响，仍然可能输出较大的不平衡电压。采用选频放大器就可以抑制这种由测量电源频率的谐波成分引起的干扰。

2. 限幅器

D_1 和 D_2 (2A P7) 组成一个双向并联二极管限幅器，其作用是保护检测指示器的表头。当电桥不平衡时，检测放大器的输出较大，由于检测指示器的微安表头的灵敏度很高，可能损坏表头。接入限幅器后，使检测放大器送到检测指示器的电压受到限制，即使电桥不平衡，灵敏度控制旋钮 W_3 调到最大，也能保证表头的安全。限幅器电路的原理图如图 1—2—8 所示。

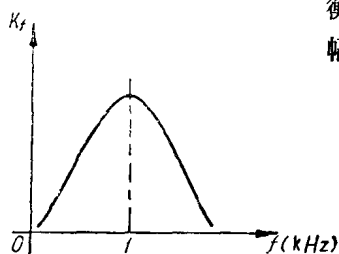


图 1—2—7 检测选频放大器的频率特性图

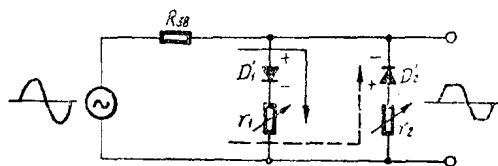


图 1—2—8 限幅器原理图

图中的 D_1 和 D_2 用理想二极管 D'_1 、 D'_2 和它的正向交流内阻 r_1 、 r_2 代替。二极管的正向交流内阻与其两端的电压有关。当输入信号较大时，二极管的正向交流电阻很小。正半周 D_1 导通，负半周 D_2 导通，输出端电阻很小，输出电压几乎全部降落在电阻 R_{38} 上，输出电压限制在 D_1 、 D_2 导通管压降上，因此对输入大信号起到限幅作用。当电桥接近平衡时，输入信号电压很小， D_1 、 D_2 不能导通， r_1 、 r_2 变得远大于 R_{38} ， R_{38} 几乎不起降压作用，限幅作用可以忽略。可见限幅器并不影响电桥接近平衡时检测器的灵敏度。

3. 检测指示器

检测指示器由 D_3 (2AP7) 和微安表头组成。它们组成一个串联型二极管半波检波电路，检波后的直流分量由微安表 (83C1型 0~100微安) 指示。

(四) 电源部分

WQJ-05型万能电桥的直流高压由整流管6Z4整流后供给。电源滤波采用阻容“ π ”型滤波器。音频振荡器和检测放大器各电子管的灯丝电压，由电源变压器 B_3 的灯丝线圈供给。直流高压输出端经 R_3 和 R_4 分压，获得大约50伏的直流正电压引至灯丝线圈的 b 端，提高了灯丝的直流电位，以抑制各管灯丝引入的交流噪声。

B_3 的5伏线圈还供给桥路变压器 B_2 交流电压，作为桥路50赫的测量电源，它由测量电源选择开关 S_1 控制。

三、主要技术指标

(一) 测量范围

1. 电阻：0.1欧~1.1兆欧。
2. 电容：10微微法~110微法。
3. 电感：0.01毫亨~110亨。
4. 电容损耗因数：0.001~100 (测量电源频率为1千赫)。
5. 电感品质因数：0.1~100 (测量电源频率为1千赫)。

(二) 三种频率音频振荡器

1. 输出功率 ≥ 60 毫瓦。
2. 输出电压 ≥ 2.6 伏。
3. 波形失真 $< 4\%$ 。

(三) 检测放大器

1. 频率响应：60赫~10千赫为3分贝带宽。
2. 灵敏度 > 0.5 毫伏。

(四) 电源

220伏，50~60赫。

四、面板布置

WQJ-05万能电桥的面板布置如图1—2—9所示。

琴键开关上标有“R、L、C”符号用以转换测量类别。倍率选择开关 S_2 是改变量程的。电容和电感的测量倍率是按照电桥内部所使用的标准电容 $C_s = 0.4$ 微法直接刻度的。被测元

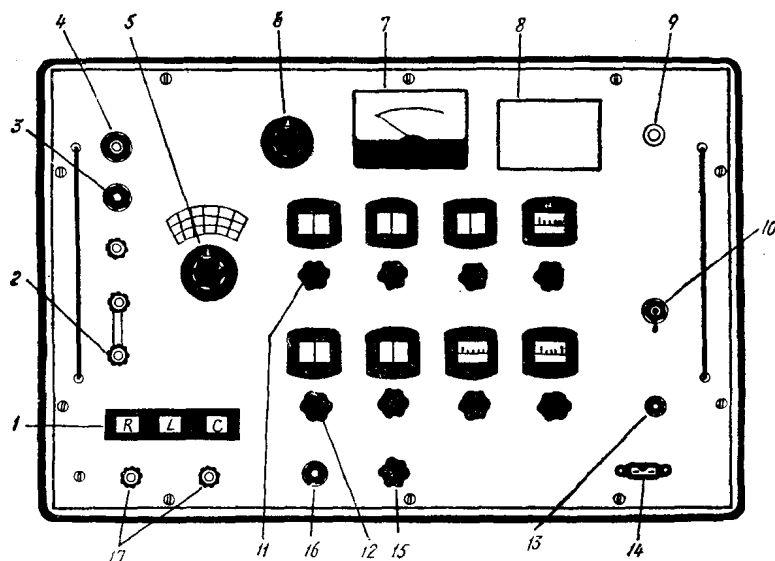


图 1-2-9 WQJ-05 万能电桥面板布置

1——测量选择琴键开关(R、L、C)；2——标准电容 C_s （分内部、外接）接线柱；3——外接电源插孔；4——测量电压调节电位器 W_1 ；5——倍率选择开关 S_2 ；6——测量电源选择开关 S_1 ；7——平衡检测电表；8——电桥使用简单说明；9——电源指示灯；10——电源开关 K_1 ；11——四个数据测定旋钮；12—— Q 、 $\lg \delta$ 的四个测定旋钮；13——熔丝；14——电源插孔；15——灵敏度调节旋钮 W_3 ；16——外接检流计塞孔；17——测量接线柱。

件 R、L、C 值的读数，由电桥面板中间的上排四个数据测定旋钮（ $\times 1$ 、 $\times 0.1$ 、 $\times 0.01$ 、 $\times 0.001$ ）确定。前三个旋钮均为十进制步进可变电阻，最后一个旋钮是一个滑线式电位器，带有百分度盘，可读出二位数字。利用这四个旋钮，被测元件的读数至少可读出五位数值。面板下排又有四个旋钮，它们是电容损耗因数 $\lg \delta$ 或电感品质因数 Q 的测定旋钮，其读数是按测量电源频率为 1 千赫时，电桥内部标准电容 $C_s = 0.4$ 微法直接刻度的。测量电源选择开关 S_1 有“200 赫”、“400 赫”、“1000 赫”、“50 赫”和“外接”五档。进行测量时可参考被测元件的使用频率或按照面板右上方的“简要使用说明”，确定 S_1 的位置。面板最下边中间位置是灵敏度调节旋钮 W_3 ， W_3 控制检测指示器的平衡灵敏度，平时应将它调至最小，即逆时针方向旋到底。面板左边的三个接线柱是外接标准电容接线柱，当使用电桥内部标准电容（ $C_s = 0.4$ 微法）时，下边和中间两个接线柱用短路片接好。当使用外接标准电容时，上边和中间两个接线柱用短路片接好，而把外接标准电容接到下边和中间两个接线柱上。

五、使用方法和注意事项

（一）使用前的准备

1. 接通电源，开启电源开关 K_1 ，电源指示灯 ZD_1 亮。预热约 15 分钟，待仪器进入正常工作状态后再使用。
2. 将仪器面板上四只数据测定旋钮（ $\times 1$ 、 $\times 0.1$ 、 $\times 0.01$ 、 $\times 0.001$ ）和四只电容损耗因数或电感品质因数测定旋钮（ $\times 10$ 、 $\times 1$ 、 $\times 0.1$ 、 $\times 0.01$ ）均旋至 0 位。
3. 将外接标准电容短路片向下接好。
4. 将灵敏度调节旋钮 W_3 向逆时针方向旋至最小，平衡检测器表针应指到 0 位。

5. 将测量电源选择开关 S_1 旋到适当位置,通常可使用1千赫,以便于读数。

(二) 电阻测量

1. 测量原理

测量电阻的原理图如图1—2—10所示,它属于一种惠斯登电桥。被测电阻 R_x 、标准电阻 R_s 、比率臂 R_A 和 R_B 构成电桥的四个臂。根据电桥平衡原理,可以求出

$$R_x = \frac{R_A}{R_B} R_s$$

式中 $\frac{R_A}{R_B}$ 称为电阻测量倍率,倍率数值由倍率选择开关 S_2 指示。

R_s 的数值由4个数据测定旋钮读出。

测量电阻时的测量电源频率一般选为50赫,当被测电阻的分布电容和分布电感较大时,测量结果与直流电桥略有差别。

2. 测量方法

(1) 将被测电阻连接在测量接线柱上,要接牢。

(2) 将琴键开关“R”按下,使电桥处于电阻测量的状态。

(3) 根据被测电阻的标称值,将倍率选择开关 S_2 扳至适当挡,若被测电阻为百位数,则应置于“100欧”档;若为千位数,则应置于“1千欧”档;其余依次类推。

(4) 调节灵敏度调节旋钮 W_3 ,使平衡检测器指针(以下简称“指针”)指向中间位置。

(5) 按顺序调节4个数据测定旋钮,使指针趋向0,再调节灵敏度调节旋钮 W_3 ,使指针处于中间位置,然后调节数据测定旋钮。这样反复调节,使灵敏度调节旋钮向顺时针方向转到最大位置,而指针趋于0,则电桥平衡。

(6) 当电桥平衡后,倍率选择开关 S_2 的指示数值与数据测定旋钮 R_s 的乘积即为被测电阻值。例如: S_2 指向1千欧,数据测定旋钮的 $\times 1$ 旋钮指向2、 $\times 0.1$ 旋钮指向5、 $\times 0.01$ 旋钮指向3、 $\times 0.001$ 旋钮指向7,则被测电阻值

$$R_x = 1000 \times (2 + 0.5 + 0.03 + 0.007) = 2537 \text{ 欧}$$

(三) 电容测量

1. 测量原理

测量电容时,按下琴键开关“C”,组成如图1—2—11所示的电容测量桥路。图中的被测电容用一个无损耗电容 C_x 和一个损耗电阻 R_x 串联来等效。根据电桥平衡原理,以及电容的容量与容抗成反比的关系,当电桥平衡时可得

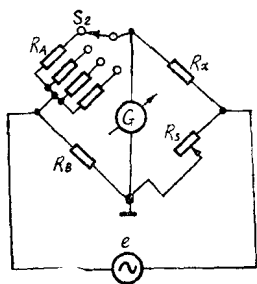


图 1—2—10 测量电阻的原理图

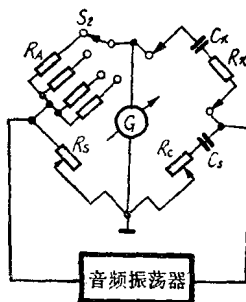


图 1—2—11 测量电容的原理图

$$C_x = \frac{R_s}{R_A} C_s = \frac{C_s}{R_A} R_s$$

$$R_x = \frac{R_A}{R_s} R_c$$

式中 $\frac{C_s}{R_A}$ 称为电容测量倍率，由倍率选择开关 S_2 指示。

R_s 的数值可由面板上四个数据测定旋钮读得，即

$$C_x = \frac{C_s}{R_A} R_s = S_2 \text{ 读数值} \times R_s \text{ 指示值}$$

被测电容的损耗因数为

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_x R_x = \omega C_s R_c = 2\pi f C_s R_c = K R_c$$

式中

$$K = 2\pi f C_s$$

当测量电源频率 $f = 1000$ 赫、标准电容 $C_s = 0.4$ 微法时，

$$K = 2\pi f C_s = \text{常数}$$

则 $\operatorname{tg} \delta$ 与 R_c 成正比，由 R_c 的数值可直接刻度出被测电容的损耗因数。调节仪器面板上的四个电容损耗因数测定旋钮，实际上是改变 R_c 的大小，而 R_c 的大小又反映了 $\operatorname{tg} \delta$ 的大小。

2. 测量方法

(1) 将被测电容连接在测量接线柱上，要接牢。

(2) 将琴键开关“C”按下，使之处于电容测量状态。

(3) 根据被测电容的标称值，将倍率选择开关 S_2 扳至适当档。若被测电容之标称值为 0.2 微法，则 S_2 应置于“0.1 微法”档，其它依次类推。

(4) 调节灵敏度调节旋钮 W_3 ，使平衡指示器指针指向中间位置。

(5) 按顺序调节数据测定旋钮 $\times 1$ 、 $\times 0.1$ 、 $\times 0.01$ 、 $\times 0.001$ ，使 W_3 向顺时针方向旋至最大位置，而指针向 0 方向到达最小值，再按顺序调节损耗测定旋钮 $\times 0.01$ 、 $\times 0.1$ （一般 $\times 1$ 、 $\times 10$ 不用）及数据测定旋钮 $\times 0.001$ ，使指针偏向 0，则电桥达到平衡（若调节损耗测定旋钮 $\times 0.01$ 、 $\times 0.1$ ，只能使指针离开 0 点，则证明电容损耗极微）。

例如： S_2 指向 0.1 微法，数据测定旋钮 $\times 1$ 指向 4、 $\times 0.1$ 指向 8、 $\times 0.01$ 指向 7、 $\times 0.001$ 指向 5，损耗测定旋钮 $\times 0.01$ 指向 1，则被测电容

$$C_x = 0.1 \times (4 + 0.8 + 0.07 + 0.005) = 0.4875 \text{ 微法}$$

该电容的损耗因数

$$\operatorname{tg} \delta = 0.01 \times 1 = 0.01 = 1\%$$

当使用 1 千赫以外其它频率作测量电源时， $\operatorname{tg} \delta$ 值读数应乘以 $\frac{\text{所使用频率}}{1 \text{ 千赫}}$ 倍。

(6) 当测量电解电容时，测量电源频率应取 200 赫，测量电压适当调低（因电解电容上的交流压降很小）。

(四) 电感测量

1. 测量原理

测量电感时，按下琴键开关“L”，组成如图 1—2—12 所示的电感测量桥路。图中，被测电感用一个无损耗电感 L_x 和一个损耗电阻 R_x 串联来等效。因为被测电感臂和标准电容臂阻抗性质相反，所以它们分别接于桥路的相对两臂之中。这种电桥叫“麦克斯威尔电桥”，它只能测品质因数 Q 较低的线圈的电感。当电桥平衡时，可得

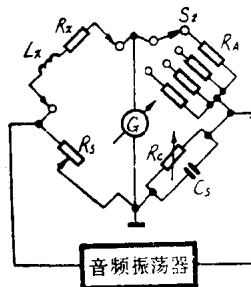


图 1—2—12 测量电感的原理图