

交流电桥实验

一、 实验目的

- 1.学习和掌握交流电桥之**串联电容桥**的原理与使用方法。
- 3.学习和掌握交流电桥之**麦氏电感桥**的原理与使用方法。

二、 实验仪器

本实验使用 QJ_d^a 型组合式交直流两用电桥实验仪，含下列 6 个组件模块：

- ①信号源检流计组件（E/G）
- ②比例臂组件（ R_a ； R_c ）
- ③电容 / 损耗电阻臂组件（ C_N / R_N ）
- ④读数臂组件（ R_b ）
- ⑤待测元件臂组件（ R_x / C_x / L_x ）
- ⑥学生操作平台（电路板）

三、 实验原理

1. 概述

交流电桥是一种比较式仪器，在电测技术中占有重要地位。它主要用于测量交流等效电阻及其时间常数；电容及其介质损耗；自感及其线圈品质因数和互感等电参数的精密测量，也可用于非电量变换为相应电量参数的精密测量。常用的交流电桥分为阻抗比电桥和变压器电桥两大类。习惯上一般称阻抗比电桥为交流电桥。本实验中交流电桥指的是阻抗比电桥。交流电桥的线路虽然和直流单臂电桥线路具有同样的结构形式，但因为它的四个臂是阻抗，所以它的平衡条件、线路的组成以及实现平衡的调整过程都比直流电桥复杂。

2. 仪器结构

组件①-1：信号源。直流电源 0~9 V 连续可调；交流信号源频率 1000 Hz，输出 0~2 V 连续可调，均由数字电压表显示输出；与下文①-2 在同一机箱中。

组件①-2：检流计。直流电桥采用高增益、精密运放驱动下的指针检流计，以提供足够高的灵敏度；交流电桥采用双表头相量检流计，一个表头着重显示不平衡信号的实部 $U_{//}$ （即余弦分量），另一个着重显示不平衡信号的虚部 U_{\perp} （即正弦分量）。

组件②：比例臂组件。1 只 8 档电阻开关，1 只定值电阻 R_C 。用于交、直流量程转换。

组件③：电容/损耗电阻臂组件。1 只定值电容 C_N ，7 只特殊步进值的十进电阻开关组成可变电阻 R_N ，做为测量 L 、 C 时用到的标准臂模块。

组件④：读数臂组件。4 只十进电阻开关。交、直流通用。

组件⑤：待测元件臂组件。

组件⑥：学生操作平台是整合其它 5 个模块平台和纽带，其与检流计联接的部分设有灵敏度调节旋钮，配合组件①-1 的输出调节，抑制初调时检流计太大幅度的摆动。其与电源联接的部分设有通断开关、换向开关，前者用来核验真零点，或用于经常性的补充调零；后者用来修正热电势或不对称干扰造成的误差。

3. 仪器原理

1) 直流电桥

直流惠斯顿电桥的原理简单，即平衡时对臂电阻的乘积数值相等： $R_x R_c = R_b R_a$ 。用 3 个已知电阻和 1 个待测电阻可以构成如图 6-1 所示的惠斯顿电桥，图 6-3 为实物联线图。调节各已知臂使检流计没有电流流过，此时电路内的电势关系如图 6-2b 所示，电桥达到平衡状态，由此可得平衡解为：

$$R_x = \frac{R_a}{R_c} R_b \quad (1)$$

惠斯顿电桥又称为**单臂电桥**，其适合测量的范围是 $10 \sim 10^8 \Omega$ ，属于中等大小的电阻值。当待测电阻小到接近于引线电阻、接触电阻的数量级（约 $10^0 \sim 10^{-4} \Omega$ ），时，任务变成了低电阻的测量，单臂电桥已不能胜任，需用**双臂电桥**来测量，双臂电桥就是直流电桥之**开尔文电桥**，在此不多加赘述。图 6-2 以矢量的形式给出不平衡电势 U_{MN} 随桥臂变化的示意图。从（a）图开始，当调节桥臂 R_b 由小逐渐增大时，正向不平衡电势 U_{MN} 随之逐渐减小，所以检流计从右偏状态逐渐回零，达到（b）图， U_{MN} 缩成一点，电桥平衡。但若继续使 R_b 增大，不平衡电势 U_{MN} 将从零变负且幅值逐渐增大，驱动检流计从指零状态逐渐向左偏转，如（c）图所示。此处画出图 6-2 的用意，是为了帮助同学建立一个全新的视点与习惯，即逐步习惯于运用矢量图解法分析电路中的电压关系，以便领会和用好下面的交流电桥相量图。事实上，图 6-2 中箭头所表达的电势仅仅是一维的标量；而处在幅

值、相角二维空间里的交流电压相量，才具有典型的矢量属性。

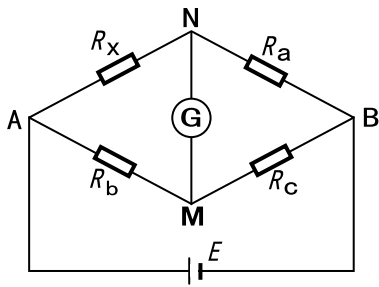


图6-1 惠斯顿电桥电路

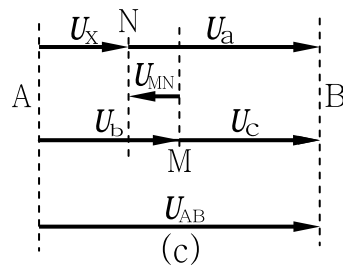
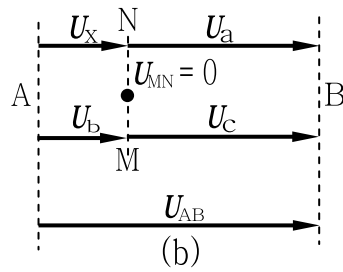
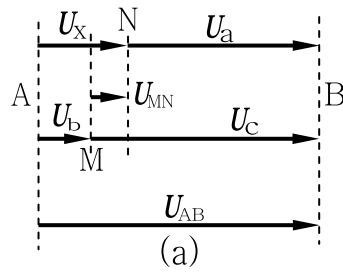


图6-2 惠斯顿电桥电势变化图

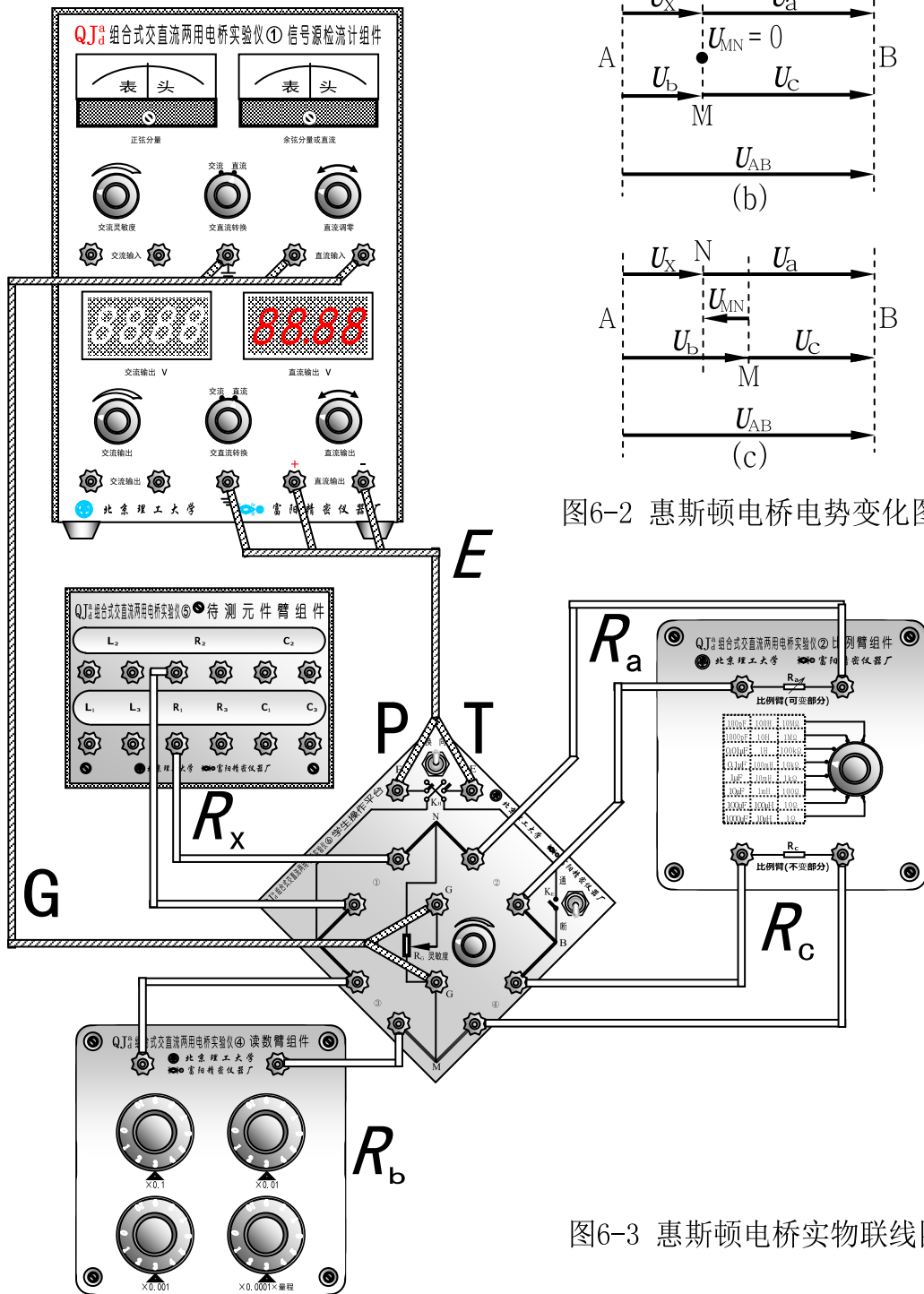


图6-3 惠斯顿电桥实物连线图

2) 交流电桥

交流电桥的平衡包含两个要素：

(1) 对臂阻抗模的乘积相等： $|Z_A||Z_X| = |Z_B||Z_C|$ ；

(2) 对臂相角和相等： $\varphi_A + \varphi_X = \varphi_B + \varphi_C$ 。

由于交流电桥电路种类繁多，证明冗杂，难以直观理解，因此我们用相量半圆图建模，它既是简明直观的定性物理模型，又是准确量化的数学模型，可用于收敛性分析、平衡方程的证明或推导、具体测量值的计算，是一种可操作性较强的分析手段，它对交流电桥的研制、使用和教学均有借鉴价值。

相量半圆图构图规则：

(1) 画单个相量。用有向线段表示 L 、 R 、 C 上的交流电压相量 U_L 、 U_R 、 U_C ，有向线段的长度表示电压幅值，有向线段与 $O-X$ 轴正方向的夹角表示电压初相角。

(2) 画电源相量。用平行于 $O-X$ 轴的相量 AB 表示电源电压相量 E ， A 是左端（起点）， B 是右端（箭头）。

(3) 画 $L-R$ 串联支路的相量。因为 $L-R$ 串联支路直接并联在电源 E 的两端，所以相量 U_L 的起点与 A 重合，相量 U_{R1} 的箭头与 B 重合；另外， U_L 的箭头和 U_{R1} 的起点重合在一起，简称 M 点。 U_L 与 U_{R1} 成 90° 角，角的顶点 M 处在 AB 的上方，则 $\triangle ABM$ 是以 AB 为斜边的直角三角形。如果支路中的电感、电阻不止一个，则所有电感都归拢到左边，集总为一个 L ，对应相量 U_L ；所有电阻都归到右边，集总为一个 R ，对应相量 U_R 。此时 $\triangle ABM$ 还是那个直角三角形，只不过直角边 AM 、 MB 各自可以分成几段来定量表示实际的各个电感、电阻。

(4) 画 $R-C$ 串联支路的相量。因为 R_2-C 串联支路直接并联在电源 E 两端，所以相量 U_{R2} 起点与 A 重合，相量 U_C 箭头与 B 重合；另外， U_{R2} 的箭头和 U_C 的起点重合在一起，简称 N 点。 U_{R2} 与 U_C 成 90° 角，角的顶点 N 也处在 AB 上方，但不一定与上文 M 重合。与上文同理， AN 、 NB 可表示多个电阻、电容。

(5) 画顶点轨迹一半圆图。以 AB 为直径画上半圆，则顶点 M 、 N 都在半圆上。当 L 、 R_1 、 R_2 、 C 的大小变化时，相量 U_L 、 U_{R1} 、 U_{R2} 、 U_C 将各有增减；但因 $\angle M$ 、 $\angle N$ 恒为 90° ，点 M 、 N 将永远在半圆上，只是沿弧滑动而已。

(6) 相量图与阻抗图。把各电压相量的字母改写成对应的感抗、阻抗、容

抗字母，相量图马上变成准确的阻抗图——阻抗图和相量图是相似图形。

下面以串联臂电容桥和串联臂电感桥为例进行分析。

2) —1 串联电容桥

串联电容桥的电路如图 6-4 所示，图 6-6 为实物接线图。图中 C_X 与 r_x 合起来才是被测电容，它是一个复杂系统。其中 C_X 是理想电容（ X_{CX} 是其容抗）， r_x 是该电容的介质损耗电阻（与 C_X 并联）和电极导体电阻（与 C_X 串联）折合成一个总的串联电阻。为避免啰嗦，平时我们仍然说“ C_X 是被测电容”。 C_N 为介损很低的标准电容（ X_{CN} 是其容抗）， r_N 是为了测量未知电容的损耗电阻而另外设置的标准电阻箱，而不是 C_N 的损耗电阻， C_N 的损耗电阻可以忽略不计，但在精密测量的场合可加以修正； R_a 是比例臂（量程）电阻， R_b 是比较臂（读数）电阻；M、N 是检流计 G 的接线点；P、Q 是阻抗性质分界点（Q 隐含在 C_X 器件内）；A、B 是信号源电压相量 \dot{U}_{AB} 的两端。与图 6-4 对应的相量图如图 6-5。平衡后 P、Q 在圆弧上某处重合，M、N 在半圆内某处重合。由图 6-5 中的几何关系 $\triangle ABP \cong \triangle ABQ$ 可以导出电路的平衡解为

$$C_x = C_N \frac{R_b}{R_a}, \quad (2)$$

$$r_x = r_N \frac{R_a}{R_b}, \quad (3)$$

$$D_x = \tan \delta_x = \omega R_N C_N, \quad (4)$$

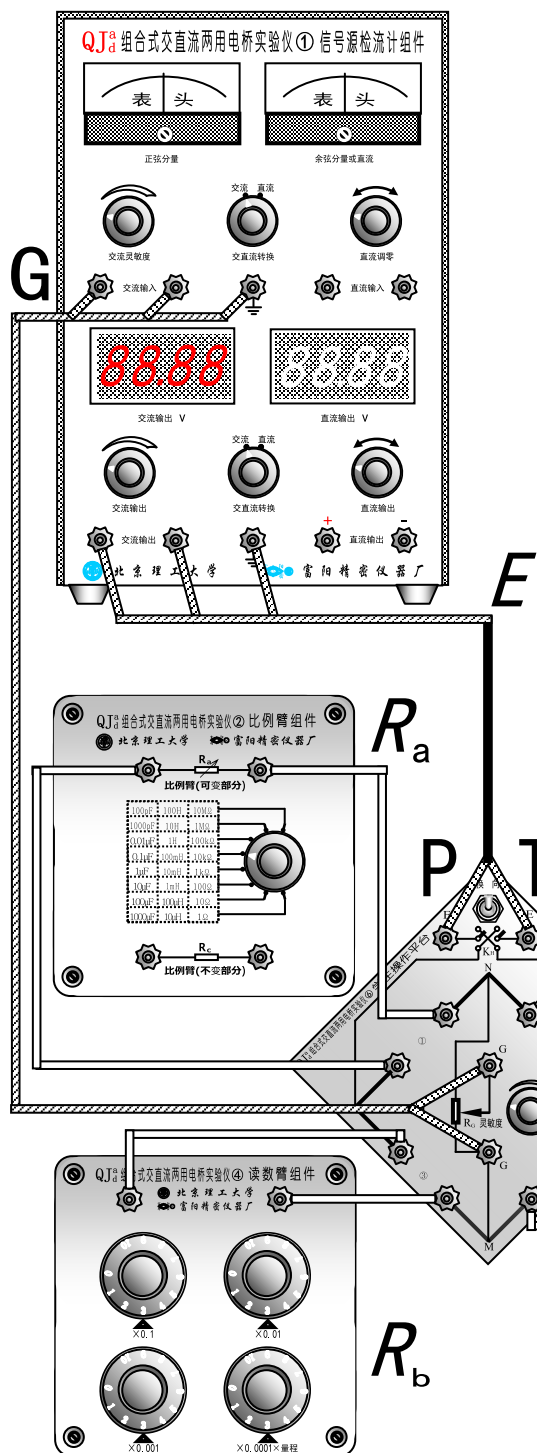


图6-6 串联电容桥桥实物联线图

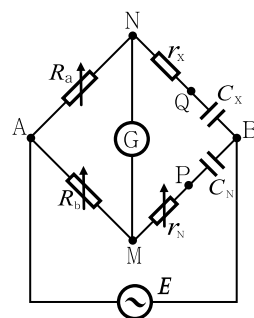


图6-4 串联电容桥电路

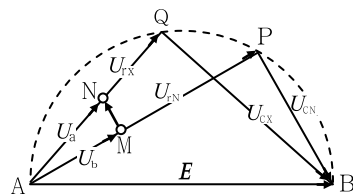


图6-5a 串联电容桥相量图

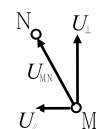
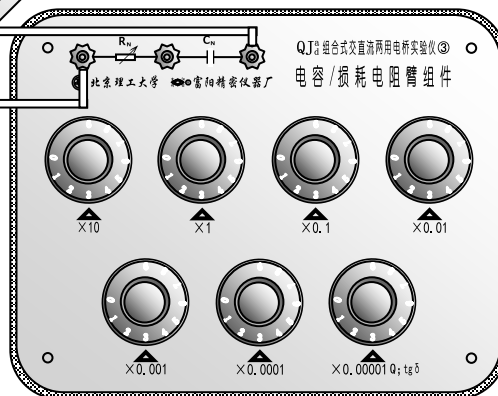
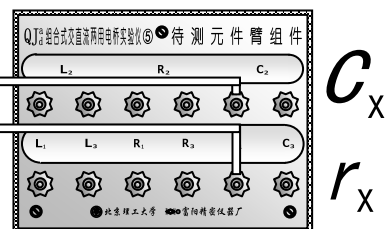


图6-5b 不平衡信号相量图



2)—2 串联电感桥

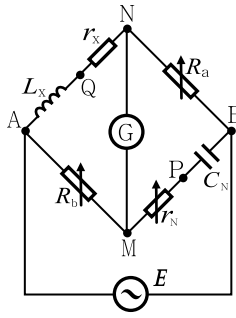


图6-7 串联电感桥电路

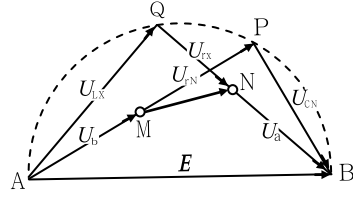


图6-8a 串联电感桥相量图

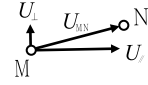


图6-8b 不平衡信号

串联臂电感桥的电路如图 6-7 所示，与之对应的相量图如图 6-8 所示，调平衡后 P、Q 在圆弧上不重合，M、N 在半圆内某处重合。由图中的几何关系

$$\triangle MBP \cong \triangle AMQ$$

可以导出电路的平衡解为：

$$L_x = \frac{C_N R_a R_b}{1 + \omega^2 C_N^2 r_N^2}, \quad (5)$$

$$r_x = \frac{\omega^2 C_N^2 r_N^2 R_a R_b}{1 + \omega^2 C_N^2 r_N^2}, \quad (6)$$

$$Q_x = \frac{1}{\omega r_N C_N}, \quad (7)$$

与电容桥类似，调平过程也会使 P、Q 沿半圆周滑动，但并不要求 P、Q 在弧上某处重合，而要让 M、N 在半圆内某处重合。减小 R_N 可使 M 向右向上滑动，减小 U_b 可使 N 向右向下滑动，二者交替调节可使 M、N 两点趋于重合，两只检流计的指针均指向零刻线，电路达到平衡。如果循环往复调节不会收敛到平衡态。可以怀疑量程选择不对，改变 R_a 的档位重新按上述方法调节平衡。

2)—3 麦氏电感桥（并联电感桥）

麦氏桥的实物联线图见图 6-10。用相量法推导出麦氏桥的平衡方程，得麦氏桥的平衡解如下：

$$L_x = R_a R_b C_N \quad (11)$$

$$r_x = R_a R_b / R_N \quad (12)$$

$$Q_{\text{麦}} = \omega L_x / r_x = \omega R_N C_N \quad (13)$$

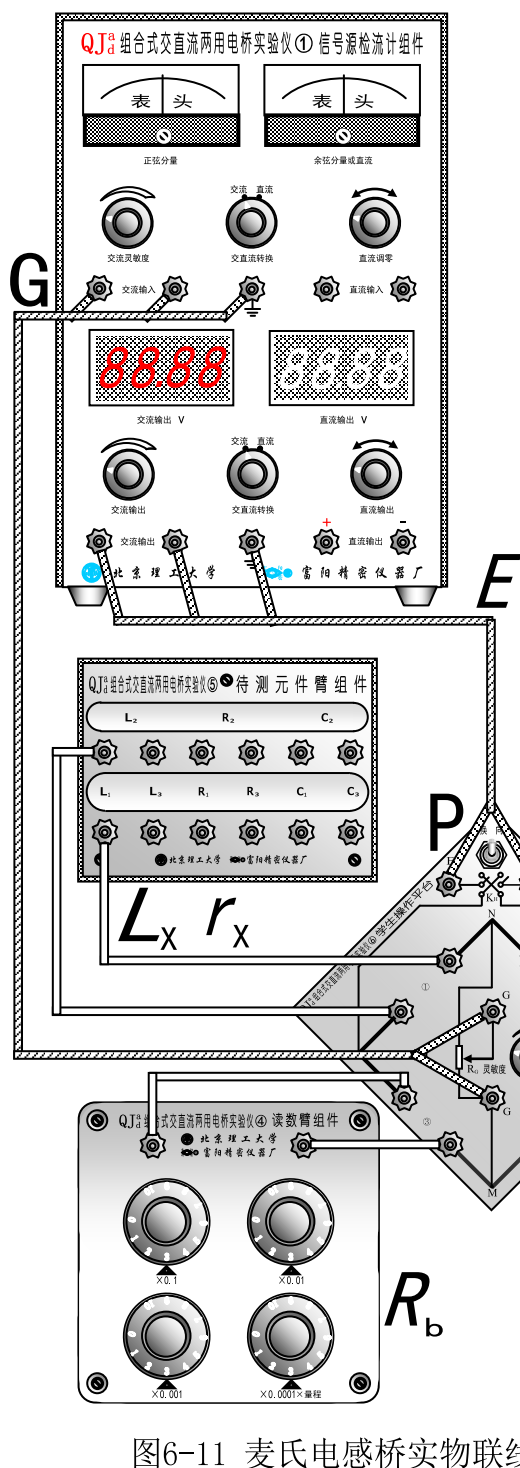


图6-11 麦氏电感桥实物联线图

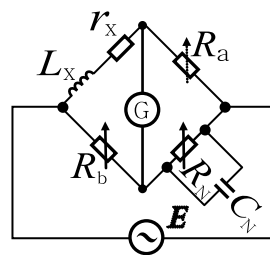


图6-9 麦氏电感桥电路

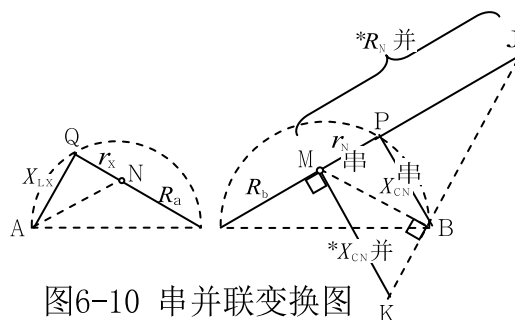


图6-10 串并联变换图

四、 实验内容和步骤

1. 熟悉实验系统

在课前认真预习的基础上,观察熟悉 QJ_d^a 型组合式交直流两用电桥实验仪的 6 个组件模块,对它们的功能用途、结构特点、操作(联接、调节、保护)方式、形成一个初步印象;找到电源开关、电源线、插头插座的位置。对照本讲义提供的各幅接线图,粗略摆一摆仪器的布局。

2. 用惠斯顿电桥测电阻 (选做)

(1) 安全预设

通电前要做好安全预设。

1) 与输出信号有关的开关都取关断状态。

2) 与输出信号、灵敏度有关的旋钮都旋到最小档或位。

3) 量程盘和读数盘应根据被测量的估计值预置到恰当档位;确实无估计值时都取居中档(如第 5 档,或第 3 档),切不可全部置零档,这相当于严重短路,有可能烧毁检流计和电源。

4) 通电前要将电路联接完整,不得在桥臂空缺(例如无待测臂)的状态下通电,严重不平衡对检流计不利。

5) 通电前要将组件①-1/-2 的两个**交直流转换**旋钮都预置到直流状态。

6) 将两端都有插头的电源线,插入组件①后背的插座和墙上的配电板,关断该仪器的总电源开关。

7) 通电前要核查有关检流计(本项测量用到的是**余弦分量或直流**检流计),如果其指针没有准确指零,可用针状工具尝试拨动表头下部的圆弧形拨盘,使指针准确指零。该项操作可称为**冷调零**,调的是机械零点。

(2) 接线

照图 6-3 接出图 6-1 的电路,

1) 本实验被测电阻 R_x 是**组件⑤待测元件臂**面板上居中的 3 只电阻 R_1 R_2 R_3 ,可单独测量、可 2 只串/并联测量、可 3 只串/并联测量。

2) 仔细观察判断**学生操作平台**(电路板组件),弄清哪些线路已在平台内接通,哪些元件(如电阻、开关等)已经设置在平台内。

3) 每 2 个接线柱组成一个端子口,有①②③④号端子口分布在 4 个桥臂上,

GG 口和 EE 口各在一条对角线上,看清楚哪个口该接哪个组件。譬如第④号端子口要接入定值电阻 R_c , 作为一个桥臂, R_c 在组件②比例臂的下部, 这一点是很特殊的, R_c 在以下两个实验电路中都将不会出现。

4) 每两个相关接线柱上的接线叉, 其取向最好一致(平行), 可以是横平或者竖直, 或 45° 角, 这样可使整体线路清爽有序, 也可以避免影响调节附近的开关、电位器。

5) 为使线路不乱, 也为减小干扰, 所配导线都很短。有 2 条较长的两芯屏蔽线, 线的一头有 3 个端子, 其中 2 个芯线端子接到组件①的交/直流输出(或输入)接线柱上, 剩下 1 个是屏蔽皮端子, 就近接到接地接线柱上; 线的另一头只有 2 个端子, 需要接到学生操作平台的 EE 端(或 GG 端)。

(3) 通电-调零-调平衡-盲测

确认组件①的直流输出调节旋钮和组件⑥的 R_s 灵敏度旋钮都在最小位, 组件⑥的 K_E 在断档。打开后背的总电源开关, 直流输出 V 数字表应当亮起, 余弦分量或直流检流计的指针可能有偏转, 这是检流计电路的本底电位不对, 不代表电桥不平衡。仔细转动直流调零旋钮令该检流计的指针准确指到零刻线上, 这就纠正了检流计电路的本底电位, 可以称为热调零, 调的是电气零点。接下来接通组件⑥的开关 K_E , 将 R_s 灵敏度旋钮稍稍调大一点, 然后把组件①的直流输出调节旋钮稍稍调大一点, 譬如零点零几伏(在直流输出 V 数字表上显示), 最大能输出 9Vdc 用来测较大的电阻, 一般情况下没有必要那么高。只要能使检流计偏转 5~10 小格就行, 仅为显示电桥四臂尚未平衡而已。仔细调节组件④读数盘, 从高位到低位依次调节, 直到检流计确实指零。所谓灵敏度够用, 是指达到平衡后转动最后一个读数盘时, 检流计的偏转仍然可以被分辨出来(被感知)。必要时提高灵敏度, 把电压增加到 0.5~1.5V 再调平衡, 记录组件④的 4 个读数盘示值所构成的四位有效数字 n , n 是一个归一化无量纲数字, 变化范围是 0.0000~1.1110。还需记录组件②比例臂的当前示值 M 。组件②的面板上有一幅 8 行×3 列的表格, 第 1 列自上而下写有 8 个电容量程值 $\square\square\mu F$, 第 2 列自上而下写有 8 个电感量程值 $\square\square mH$, 第 3 列自上而下写有 8 个电阻量程值 $\square\square\Omega$; 旋钮可旋转 8 档, 每一档都会指到一行(3 个)量程值。当前量程值 M 应处在第 3 列与旋钮箭头当前所指行的交点上。 M 表示的是满量程值, 而且具有单位 Ω (或

mH、 μF)，M 乘以 n 就等于测量结果 Z：

$$Z = M \cdot n \quad (14)$$

不确定度分析的要求尺度由教师掌握。

一般情况下无法了解被测样品的估计值，所以刚开始调平衡时电桥远离平衡态，不平衡电压 U_{MN} 较大，检流计往往出现深度超量程偏转，指针停牢在左极限或右极限，调节读数盘好象见不到效果。这时要静下心来，尽可能调小组件①的直流输出调节旋钮和组件⑥的 R_0 灵敏度旋钮，然后调节第一读数盘，先调到第 10 档，检流计应为右极限偏转，然后按顺序-9-8-7...逐档减小。减小到某一档时，检流计突然变为左极限偏转，那好，说明平衡点必定处在改为左偏那一档与没改左偏以前那一档之间，准确位置（即具体读数）还要靠后边 3 只读数盘仔细调节确定。第一读数盘就定格在这一档了，接下来用完全相同的办法调节第二读数盘、第三读数盘、第四读数盘；最后断开组件⑥上的 K_E ，观察检流计是否准确指零。如果有偏差，是因为随着时间流逝，电路状态会有一个缓慢的漂移，实验中需要不定期（例如在正式读取数据前）核查和微调检流计零点，这个可以称为**补充调零**，调的是状态漂移。补充调零后再接通 K_E ，微调 4 个读数盘，顺序读记 4 个盘的示值，就是上文所说的归一化无量纲四位有效数字 n。

为了考察热电势及不对称干扰引入的误差，可将组件⑥的换向开关 K_H 切换到相反一端，然后完全重复上文叙述的操作步骤，所得读数 $n_{反}$ 可供分析研究，与 n 取平均可消除系统误差。

上文所说将第一读数盘从第 10 档逐档减小，如果减至 0 档还不见检流计改向左偏，一般来说，若不是电路出了故障，那就是当前的量程档不合适。将 4 只读数盘都调到居中档（例如第 5 档），将组件②比例臂（量程盘）增大 1 档或几档，为的是确保检流计先处于右偏状态；然后逐档减小量程盘，直到检流计改向左偏，就是针对当前待测样品的最佳量程档（或次佳，顶多再调整 ± 1 档）。此后的操作完全按照上文所述，从第一读数盘逐档减小做起。

到此为止，我们讨论的是难度较高的盲测法，即在全然不知待测样品估计值的前提下，用一触即翻的高精度高灵敏度仪器进行粗糙的试探工作，等同于获得估计值进而完成精密测量。本实验中提供电容和电感值的量程档（ R_a ），通过调节 R_b 。本条款“2. 用惠斯顿电桥测电阻”叙及的内容具有普遍性，下文不再

重复，请同学随时返回来参阅。

3. 用串联电容桥测电容

电路见图 6-4，实物接线图见图 6-6。与图 6-1、6-3 相比，组件⑤比例臂、组件⑤待测元件臂交换了左右位置，成为左②右⑤；组件③取代了 R_C 的位置——右下角第④端子口。组件③内含 C_N 和 R_N ， C_N 是 1 只定值电容， R_N 是 7 只特殊步进值的十进电阻开关组成的可变电阻。二者接入电路时要串联。被测电容 C_x 是组件⑤右端的 3 只电容 C_1 C_2 C_3 。本实验只测量电容 C_3 的数值及其损耗角正切。

将组件②的检流计部分和信号源部分都由直流转换到交流，信号输出 0~2V，1000Hz。只要灵敏度够用，信号电压尽量调低些，譬如 0.3V、0.5V 或 1.0V。所谓灵敏度够用，是指转动最后一个读数盘时，检流计的偏转仍然可以被分辨出来。

与上文直流检流计不同，交流检流计不需要做热调零。操作中也需留心查看要不要补充调零，但补充调零也是用冷调零完成。

为方便电桥平衡调节，表一中给出了测量电容 C_3 数值的量程 R_a 。改变信号输出电压分别为 0.3V、0.5V 和 1.0V，先调节 R_b 使交流检流计指针接近零刻度线，再调节 R_N 使两检流计的指针同时指向零；提高组件⑥ R_0 和交流检流计的灵敏度，反复调节 R_b 和 R_N 直至电桥平衡。读出电容值 ($R_a \times R_b$) 及其损耗角正切 R_N 。具体调节可参阅上文对电阻的测量。将在不同输出信号电压下的测量结果记入表一。将组件⑥的换向开关 K_H 切换到相反一端，然后完全重复上文叙述的操作步骤，得到新的读数 C_3' 和 R_N' ，两次取平均以消除系统误差。

4. 用麦氏电感桥测电感（选做）

电路见图 6-9，实物接线图见图 6-11。与图 6-4、6-6 相比，组件②比例臂、组件⑤待测元件臂又换回了左⑤右②；右下角组件③变成 C_N 和 R_N 并联。被测电感 L_x 是组件⑤左端的 3 只电感 L_1 L_2 L_3 。电感测量的调节过程参照电容的测量，不再赘述。

表 1 串联电容桥测电容数据表 (R_a 取 $0.1 \mu\text{F}$)

电压	电容测量					介质损耗角正切	
	R_b	C_3	R_b'	C_3'	$\overline{C_3}$	$\text{tg } \delta$	$\text{tg } \delta'$
0.3V							
0.5V							
1.0V							

$$\overline{C_3} = ? \quad \text{tg } \delta = ?$$

五、思考题

1. 用不同的电桥电路测量 R 、 C 、 L 元件时，刚开始调平衡为什么总是强调信号电压尽量要低？到后来精细调平衡时可以把电压调到最大吗？以什么为限度？