

高等学校试用教材

电子线路实验

武汉大学电子线路教材编写组

高等教育出版社

教育部推荐教材

电子线路实验

通信工程专业本科课程实验教材

清华大学出版社

... 于 仅 试 用 教 材

电 子 线 路 实 验

武汉大学电子线路教材编写组

高 等 教 育 出 版 社

本书根据一九七七年十月高等学校理科物理教材会议拟订的教材编写大纲编写的。

书中主要包括：元件的识别和测量、电子仪器使用、各种放大器、脉冲、集成电路等实验。由魏慧如、张梦涛和陈端刚合编。

本书连同武汉大学《电子线路》教材编写组编写的《电子线路》一书可作为综合大学和师范院校物理系的试用教材，也可供从事电子线路的工作人员参考。

高等学校试用教材

电子线路实验

武汉大学电子线路教材编写组

•

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

水利电力出版社印刷厂印装

•

787×1092 1/32 印张10.5 插页1 字数250 000

1979年5月第1版 1987年4月第9次印刷

印数190 431—200 440

书号 13010·0291 定价 1.65元

序

由于电子学的迅速发展及其在物理学中的广泛应用, 物理学工作者不仅需要掌握电子学的基础理论知识, 还必须具有一定的实际工作能力。因此, 在学习“电子线路”课程时, 做好电子线路的实验是一个重要的环节。通过实验使学生进一步理解电子线路的工作原理, 学会使用常用的电子仪器, 掌握基本的无线电测量方法和安装、调整电路的基本技能。具体要求如下:

1. 正确地 and 比较熟练地使用常用的电子仪器。
2. 掌握一些常用元器件参数的测量方法以及电路的基本特性的测量方法。
3. 能对稍为复杂的电路正确地安装和调整, 检查和排除常见的故障, 使电路工作正常。
4. 能运用基础理论知识正确地分析实验中所发生的各种现象, 正确地整理、分析实验结果和数据。

根据编写大纲的要求及本书所涉及的范围, 实验内容大致可分为五个方面: 一、基本实验方法的训练, 包括练习使用基本仪器、学习安装焊接等; 二、晶体管单元线性电路实验; 三、晶体管多级电路及综合电路实验; 四、脉冲与集成电路实验; 五、电子管整机电路实验。选取这些内容是想使得本课程既能跟上电子学的迅速发展又能照顾当前的实际情况, 以适应生产和科研的需要。本书共有 20 个实验, 大约可分为 25 次实验, 每次实验约为 3 学时(课堂学时)。每个实验的必做内容和选做内容没有单独列出, 以便于各校根据具体实验条件自行确定。

本书根据 1977 年高等学校理科物理教材会议通过的“电子线

路实验教材编写大纲”，由魏慧如、张梦涛、陈端刚合编。由于编写时间仓促，加上实验条件和水平的限制，必定有缺点和错误，希读者给以批评和指正。

武汉大学电子线路教材编写组

1979年4月

目 录

实验一	元件的认识和测量	1
附录	(一) JT-1 型晶体管特性图示仪	10
	(二) JS-6A 型晶体管试验器简介	19
	(三) QBG-3 型高频 Q 表	22
	(四) WQJ-1A 型精密万用电桥	26
	(五) WQ-5 型万用电桥	30
实验二	常用电子仪器的使用	34
附录	(一) XFD-6 型低频信号发生器	49
	(二) GB-9 型电子管毫伏表	51
	(三) DA-16 型晶体管毫伏表	53
	(四) XFG-7 型高频信号发生器	55
	(五) SBT-5 型同步示波器	61
	(六) SB-10 型示波器电原理图	67
实验三	单级低频放大器的设计、安装和测试	68
附录	安装和焊接技术简介	83
实验四	负反馈放大器	92
实验五	射极输出器	106
实验六	推挽功率放大器	116
附录	(一) BS-2 型失真度测量仪	124
	(二) 双迹示波器	127
实验七	差分放大器	132
实验八	调谐放大器与 LC 振荡器	141
附录	(一) 频率特性测试仪(扫频仪)简介	149
	(二) E323A 型通用计数器	153
实验九	两级低频放大器	162

实验十	多级宽带放大器	170
实验十一	调幅与检波	183
实验十二	超外差收音机的调整	198
实验十三	整流、滤波与稳压	211
附录	PZ8 型直流数字电压表	224
实验十四	RC 电路瞬态过程的研究	229
实验十五	晶体管脉冲单元电路	239
实验十六	TTL 与非门电路	246
实验十七	简单计数器	254
实验十八	集成运算放大器	263
实验十九	文氏电桥振荡器	272
实验二十	示波器中的扫描与同步	279
附录 I	电阻器和电容器的性能和规格	291
附录 II	常用半导体器件参数和特性选录	302

实验一 元件的认识和测量

一、实验目的

1. 认识电阻的种类、标称值、功耗和误差；认识电容的种类、标称值、耐压和误差。
2. 了解电桥法、谐振法测量电阻、电容、电感的原理。
3. 了解晶体管特性图示仪的简单原理及使用方法。
4. 学会使用 Q 表和万用电桥。

二、实验原理

1. 电桥法

在无线电元件的测量中，常用电桥法来测量电容、电感和电阻等元件。用电桥法测量电阻比用欧姆计法(即用万用电表)测量电阻的精确度高。

(1) 测量原理

交流电桥的一般形式如图 1-1 所示。它由四个桥臂组成，被测元件为其一臂，其他三个臂则为三个已知的阻抗元件或二个电阻和一个阻抗元件，并用交流电源供电。电桥的平衡条件是：

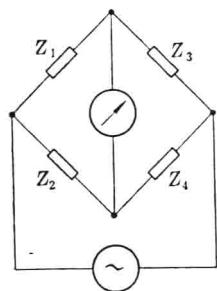


图 1-1 交流电桥的基本形式

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (1-1)$$

由于桥臂阻抗 Z 是由电容、电感及电阻组成的复数阻抗，则(1-1)式可用复数的指数形式来表达，有如下形式：

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

为了保持上式相等, 必须使

$$\begin{cases} Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3 \\ \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \end{cases} \quad (1-2)$$

从(1-2)式可以看出: ①要使交流电桥平衡, 必须分别使相对臂的幅值乘积及幅角之和相等。即必须同时调节二个参数(即振幅与相角)才能使电桥平衡。②如果被测元件是阻抗, 则必须有一个臂也是阻抗, 其余两臂通常是电阻, 以减小调节上的复杂性。③相邻臂上的阻抗具有同样的特性(同是电感性或电容性); 相对臂上的阻抗具有不同的特性。利用以上这些特点, 可以组成各种形式的测量电桥, 常用的有以下几种:

(2) 电阻电桥(直流电桥)

当被测元件是电阻时, 则电桥的各臂都为电阻, 其线路如图 1-2 所示。根据平衡条件得:

$$R_x = \frac{R_3}{R_4} R_2 \quad (1-3)$$

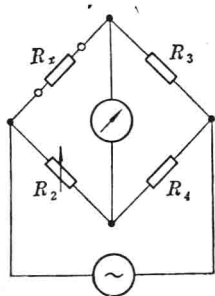


图 1-2 电阻电桥

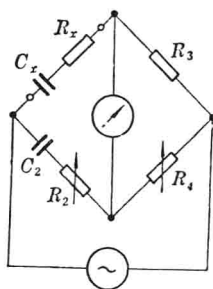


图 1-3 电容电桥

(3) 电容电桥(交流电桥)

当被测元件 Z_x 是电容性元件时, 从(1-2)式可以看出和 Z_x 相邻臂上的阻抗 Z_2 也应该是电容性的元件, 电桥线路如图 1-3 所示。其平衡条件为:

$$Z_x = \frac{R_3 Z_2}{R_4}$$

即
$$\left(R_x - j \frac{1}{\omega C_x} \right) = \frac{R_3}{R_4} \left(R_2 - j \frac{1}{\omega C_2} \right)$$

得:
$$\begin{cases} R_x = \frac{R_3}{R_4} R_2 \\ C_x = \frac{R_4}{R_3} C_2 \end{cases} \quad (1-4)$$

被测电容的损耗角正切

$$\operatorname{tg} \delta = R_x \omega C_x = 2\pi f R_2 C_2$$

其中 f 为交流电源的频率。

(4) 电感电桥(交流电桥)

当被测元件是电感性元件时,可以在相对臂上用电容去平衡,组成如图 1-4 的电桥。电桥平衡条件为:

$$Z_x = \frac{R_3 R_2}{Z_4}$$

即

$$\begin{aligned} (R_x + j\omega L_x) &= \frac{R_3 R_2}{\frac{1}{\frac{1}{R_4} + j\omega C_4}} \\ &= R_3 R_2 \left(\frac{1}{R_4} + j\omega C_4 \right) \end{aligned}$$

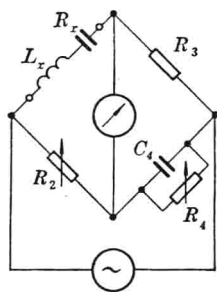


图 1-4 电感电桥

得
$$\begin{cases} R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4} \\ L_x = R_2 R_3 C_4 \end{cases} \quad (1-5)$$

被测电感的品质因数 $Q_x = \frac{\omega L_x}{R_x} = 2\pi f R_4 C_4$ 。

由以上电桥线路可知,只要已知电桥的三个臂的 R 、 C 值,就能求出测量臂的 R 、 C 、 L 的值。万用电桥就是运用电桥原理来测

量元件参数的仪器。由于高频时的分布参数影响电桥的平衡，因此，电桥法测量元件参数宜在低频时使用。

2. 谐振法

在高频时测量阻抗元件的参数往往使用谐振法。

(1) 串联谐振电路中电感量的测定

图 1-5 为 L 、 C 串联电路。当在串联电路两端加上已知频率为 f 电压为 u_s 的信号时，调节电容器 C 使电路谐振于信号频率 f 时，在电容器 C 两端测得其电压降的最大值为 u_{CM} 。如果忽略电容器 C 的损耗，由已知 C 的电容量就可求出被测电感 L 的电感量 L_x 、 Q_x 值和电感 L 本身的电阻 R_x 。

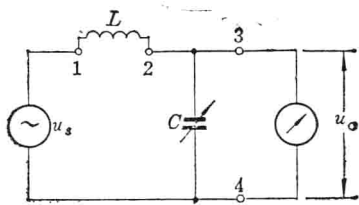


图 1-5 L 、 C 串联电路

根据电路谐振时的一般阻抗公式：

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R$$

可列出电路谐振时的关系式

$$u_c = \frac{u_s}{Z} \cdot \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega C R} u_s$$

得

$$\frac{u_c}{u_s} = \frac{1}{\omega C R} = Q$$

则被测电感的参数可由下列各式求得

$$\begin{cases} L_x = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \\ Q_x = \frac{\omega L_x}{R_x} = \frac{1}{\omega C R_x} = \left| \frac{u_c}{u_s} \right| \\ R_x = \frac{1}{2\pi f C Q_x} \end{cases} \quad (1-6)$$

(2) 串联代替法

在测出串联谐振电路中的电感 L 及其 Q 值的基础上, 利用谐振法可测出和电感 L 串联的阻抗 ($Z_x = R_x + jX_x$) 的参数, 如图 1-6 所示。

在未接入 Z_x 之前, 电路于 $C = C_1$ 时谐振。

则有 $\omega L = \frac{1}{\omega C_1}$

$$Q_1 = \frac{1}{\omega C_1 R}$$

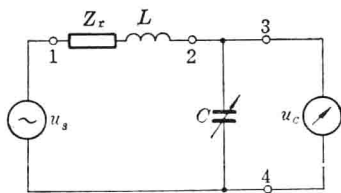


图 1-6 串联代替法测 LC 参数

接入 Z_x 后, 电路失谐, 调节电容器 C , 当 $C = C_2$ 时, 电路重新谐振。这时测得电容器 C 两端的电压为 u_{c_2} 。根据电路谐振条件

$$X_x + \omega L = \frac{1}{\omega C_2}$$

因此 $X_x = \frac{1}{\omega C_2} - \omega L = \frac{C_1 - C_2}{\omega C_1 C_2} = \frac{C_1 - C_2}{2\pi f C_1 C_2}$

当 $C_2 > C_1$ 时, X_x 为负数, 即被测元件是电容性元件。

则 $X_x = \frac{1}{\omega C_x}$

$$C_x = \frac{1}{\omega X_x} = \frac{C_1 C_2}{C_2 - C_1} \quad (1-7)$$

当 $C_2 < C_1$ 时, X_x 为正数, 即被测元件是电感性元件。

则 $L_x = \frac{C_1 - C_2}{(2\pi f)^2 C_1 C_2} \quad (1-8)$

由于
$$\frac{u_{c_2}}{u_s} = Q_2 = \frac{1}{R + R_x} = \frac{1}{2\pi f C_2 (R + R_x)}$$

可算出被测元件(电感)的参数

$$\begin{cases} R_x = \frac{1}{2\pi f C_2 Q_2} - R = \frac{C_1 Q_1 - C_2 Q_2}{2\pi f C_1 C_2 Q_1 Q_2} \\ Q_x = \frac{X_x}{R_x} = \frac{Q_1 Q_2 (C_1 - C_2)}{C_1 Q_1 - C_2 Q_2} \end{cases} \quad (1-9)$$

此法适用于来测量大电容及小电感等低阻抗元件。

(3) 并联代替法

同样,在已知串联谐振电路中的电感 L 和 Q 值时,利用谐振法可测得和电容器 C 并联的阻抗

$$Z_x \left(\frac{1}{Z_x} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{jX_x} \right) \text{ 的参数, 如图}$$

1-7 所示。

在未接入 Z_x 之前,使电路在 $C=C_1$ 时谐振,记下 C_1 与 Q_1 之值。

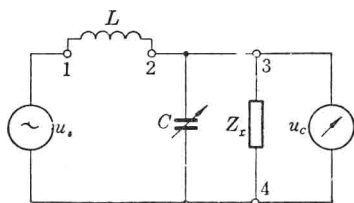


图 1-7 并联代替法测 LC 参数

接入 Z_x 后,不改变谐振频率 f ,使电路在 $C=C_2$ 时重新谐振。

测出 u_{c_2} , 由于 $|u_{c_2}| \gg |u_s|$, 从而得出 $Q_2 = \frac{|u_{c_2}|}{|u_s|}$, 记下 Q_2 及 C_2 之值。

$$\begin{aligned} \text{由电路的总阻抗 } Z &= R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_2} + Z_x \\ &= R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_2} + \frac{1}{\frac{1}{R_x} + \frac{1}{jX_x}} \end{aligned}$$

根据电路谐振时电抗为 0, 进行近似运算

得
$$X_x = \frac{1}{2\pi f (C_2 - C_1)}$$

当 $C_2 < C_1$ 时,被测元件是电容性元件。

$$\text{则} \quad C_x = C_1 - C_2 \quad (1-10)$$

当 $C_2 > C_1$ 时, 被测元件是电感性元件

$$\text{则得} \quad \begin{cases} L_x = \frac{1}{(2\pi f)^2(C_2 - C_1)} \\ R_x = \frac{Q_1 Q_2}{2\pi f C_1 (Q_1 - Q_2)} \\ Q_x = \frac{R_x}{X_x} = \frac{Q_1 Q_2 (C_2 - C_1)}{C_1 (Q_1 - Q_2)} \end{cases} \quad (1-11)$$

Q 表就是根据谐振法测量元件参数的原理而设计的仪器。

3. 晶体管特性图示法

晶体管特性图示法是一种直观、读测简便、准确、迅速测试晶体管特性的方法。它的简单原理如下:

以测量晶体管的输出特性为例。图 1-8 为共射极连接, 其输出特性就是在一定的基极电流 I_b 的条件下, 晶体管的 U_{ce} 与 I_c 的关系曲线。如果从晶体管的基极 b 注入电流 I_b , 在集电极和发射极之间加入一个脉动直流电压 u_s (全波整流电压), 于是就产生集电极电流 I_c , 并且流过取样电阻 R_1 , 在 R_1 上产生反映 I_c 波形及大小的取样电压 U_1 (见图 1-8)。当我们将集电极电压 U_{ce} 和取样电压 U_1 同时分别送入示波器的 X 轴放大器和 Y 轴放大器, 则在示波器荧光屏上显示出一条曲线, 此曲线就是在某一 I_b 下的 $I_c \sim U_{ce}$ 关系曲线, 即输出特性曲线。

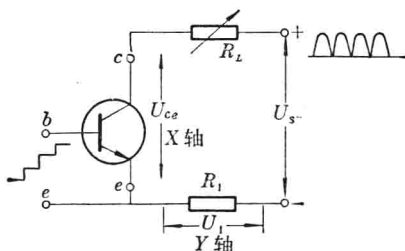


图 1-8 图示法测量晶体管输出特性原理图

如果基极注入电流 I_b 不是一个固定值，而是一个阶梯电流，而且每个阶梯的时间间隔和集电极的周期相等，在示波器上对应每个阶梯 I_b 将显示出一条 $I_c \sim U_{ce}$ 输出特性曲线，有 N 个阶梯就将同时显示出 N 条输出特性曲线，成为一组输出特性族，如图 1-9 所示。

图中每条曲线分开两条来画，是为了表明其走向，实际上它们是重合在一起的。

同样，可以根据晶体管不同特性的要求，取出适当的信号加于示波器的 X 轴和 Y 轴，示波器就能显示出所需的特性曲线。例如晶体管共射极连接的输入特性，就是反映 I_b 与 U_{be} 的关系曲线。只要将阶梯电流 I_b 注入基极，并同时送入 X 轴，

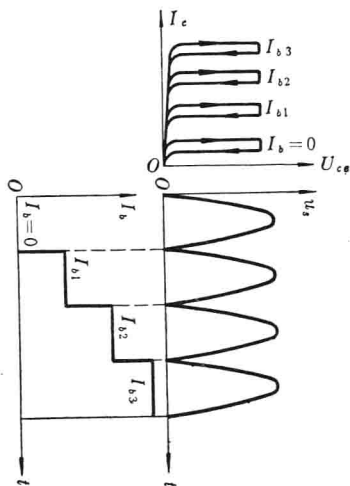


图 1-9 晶体管输出特性曲线族的形成

再把随 I_b 而变的基极电压 U_{be} 送至 Y 轴，于是示波器就显示出 $I_b \sim U_{be}$ 关系曲线。如图 1-12 所示的输入特性曲线。晶体管特性图示仪就是利用上述原理而设计的可以测量晶体管多种特性的仪器。

三、实验内容

1. 用晶体管特性图示仪观察一只小功率硅管和一只小功率锗管的共发射极输入特性、输出特性，并在图上找出 β 值。再测量它们的 I_{CE0} 、 U_{CE0} 、 I_{CB0} 、 U_{CB0} 。

2. 测一只硅稳压管的正向特性和反向击穿电压。

(提示：二极管特性的测量，将被测管插入 C 、 E 插座，即 $\textcircled{C}-\text{D}-\textcircled{E}$ ，只要改变集电极扫描电压的极性，就可测出二极管的正向和反向特性。想一下本实验应选择什么极性?)

3. 用万用电表测量一组电阻的阻值。列表记录测量值,并记下各电阻的种类名称、标称值、功耗、误差。附表格形式如下:

名称 测量仪器	电 阻					
	种类名称	标称值	功耗	误差	测量值	相对误差
万用电表						
万用电桥						

4. 用万用电桥测量同一组电阻的阻值。记录形式同上。

5. 用万用电桥测量一组电容器的电容量。列表记录测量值,并记下各电容器的种类名称、标称值、耐压、误差。

6. 用万用电桥测量一组电感的电感量及其 Q 值。

7. 用 Q 表测量同一组电容器的电容量,以及测量同一组电感的电感量和 Q 值。

8. 用晶体管测试仪测量以上晶体三极管的 I_{CE0} 、 I_{CB0} 、 h_{ie} 及 β 值。 $(I_c=1\text{mA})$

四、实验报告

1. 以表列出用不同仪器测量的每个电阻、电容、电感的测量值,并算出测量值与标称值的相对误差。

2. 以表列出所测晶体管的参数并对应标明该晶体管的型号。

3. 从以上测量结果归纳一下各种测量仪器的主要特点及其适用范围。

4. 回答问题

(1) 有一只电容量的标称值为 $50\mu\text{F}$ 的电解电容和一只40瓦日光灯的镇流器(其电感量约为 1.5H)，问能否用 Q 表去测量? 能否用万用电桥去测量?