

锁相放大器在介电测量中的应用

赵世富

(中国科学院物理研究所)

锁相放大器具有灵敏度高、抗干扰性强的优点,已成为微弱信号检测的有力工具。它不仅同一般交流电压表一样可以测量信号电压的振幅,而且可以测量信号电压相对于参考电压的相位。也就是说,锁相放大器可以测量矢量电压。我们将锁相放大器的这一特点用于测定介质样品的复阻抗,进而确定样品的损耗、等效电阻、等效电容和介电常数。

与电桥相比,用锁相放大器测量样品的复阻抗有如下优点:1. 抗干扰能力强,异于信号频率的杂散信号不容易干扰被测系统;2. 大多数电桥只有一个或两个固定的测量频率,而锁相放大器一般都可以在较宽的频率范围内应用。例如,我们用的5204型锁相放大器可在1Hz—100kHz的频率范围内应用,有的锁相放大器可应用的频率范围还会更宽些;3. 电桥必须在平衡状态下才能测出样品的电导、电容值,而且除少数自动电桥测量速度较快外,一般手动电桥的测量速度都较慢,而锁相放大器则可连续测量,并自动记录。这对于研究样品的弛豫过程是很方便的。当然用锁相放大器测量复阻抗不如电桥测量的精度高,但它足以满足大多数物理研究的要求。

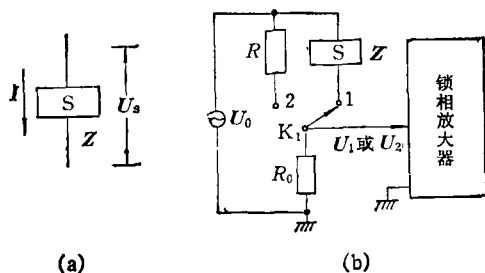


图1 锁相放大器测复阻抗的原理及测量配置图

测量原理如图1(a)所示,在样品S上加以角频率为 ω 的正弦电压 U_s ,流过样品的电流为 I_s ,被测样品的复阻抗为

$$Z = Z' + jZ'' = \frac{U_s}{I_s}$$

如果测出 U_s 和 I_s ,则可由上式求出样品的复阻抗 Z 。

图1(b)所示的线路是一种方便而准确的测量线路。图中 U_0 是频率为 ω 的正弦电压,可直接取自锁相放大器内部的振荡器输出端;锁相放大器用内参考信

号; R 和 R_0 为数值已知的电阻; S 为被测样品,其复阻抗为 Z 。锁相放大器的同相分量表头(或同相模拟输出)和正交分量表头(或正交模拟输出)分别给出 R_0 两端电压的实部和虚部。

当 K_1 在位置“1”时,锁相放大器测得 R_0 两端的电压 $U_1 = U_1' + jU_1''$ 。样品上的电压 U_s 及流过样品的电流 I_s 可分别表示为

$$U_s = U_0 - U_1$$

$$I_s = U_1/R_0$$

考虑到振荡器输出电压 U_0 是频率的函数,而且用锁相放大器直接测量 U_0 常常会受到量程的限制而需要反复改变量程,为避免上述误差和麻烦,引入一个阻值已知的附加电阻 R 。当 K_1 在位置“2”时,测得 $U_2 = U_2' + jU_2''$ 。显然

$$U_0 = \frac{U_1(R_0 + R)}{R_0}$$

$$U_s = \frac{U_2(R_0 + R)}{R_0} - U_1$$

$$Z = \frac{U_s}{I_s} = \frac{U_2(R_0 + R)}{U_1} - R_0 = Z' + jZ''$$

由此求出

$$Z' = \frac{U_2'U_1' + U_2''U_1''}{|U_1|^2} (R_0 + R) - R_0 \quad (1)$$

$$Z'' = \frac{U_2''U_1' - U_2'U_1''}{|U_1|^2} (R_0 + R) \quad (2)$$

其中 $|U_1|^2 = U_1'^2 + U_1''^2$ 。

用锁相放大器分别测出 U_1' , U_1'' , U_2' 和 U_2'' 后代入(1), (2)两式,即可计算出样品复阻抗 Z 的实部 Z' 和虚部 Z'' ,进而可推算出样品的介电损耗角 δ 以及将样品看作电阻电容并联时的等效电阻 R_p 、等效电容 C_p 或可算出将样品看作电阻电容串联时的等效电阻 R_s 和等效电容 C_s 。

$$\text{tg} \delta = -\frac{Z'}{Z''} \quad (3)$$

$$R_p = \frac{(Z')^2 + (Z'')^2}{Z''} \quad (4)$$

$$C_p = -\frac{Z''}{[(Z')^2 + (Z'')^2]\omega} \quad (5)$$

$$R_s = Z' \quad (6)$$

$$C_s = -\frac{1}{\omega Z''} \quad (7)$$

显然,如果用手操作测量 U'_1, U''_1, U'_2 及 U''_2 , 再由(1)~(7)式计算样品的各种等效介电参数是很麻烦的,特别是在需要大量测量这些参数的情况下更是一种繁琐的劳动。我们将图1(b)所示的测量系统与数字电压表 KETHLE 192 及微处理机 APPLEII 结合起来组成一个自动测量系统,如图2所示。

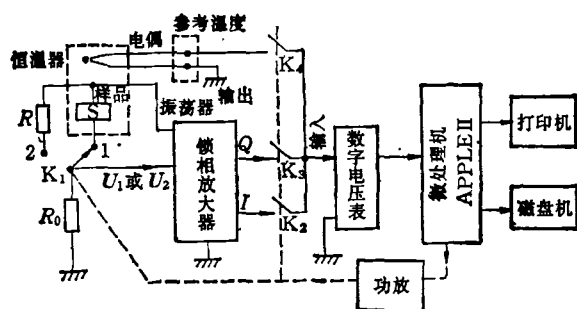


图2 锁相放大器、数字电压表和微处理机组成的自动介电参数测量系统

APPLE II 具有多个与外界交换信息的输入输出接口,是一种较方便的数据采集和控制实验的微处理机。数字电压表测得的数据通过 IEEE 488 接口传送给微处理机进行计算处理。图2中四只干簧继电器的触点 K_1, K_2, K_3 和 K_4 分别由微处理机内游戏输入输出接口的第12、13、14和15脚上的电压控制^[1],而这些电压受 APPLE SOFT BASIC 语言中某些特定的 POKE 语

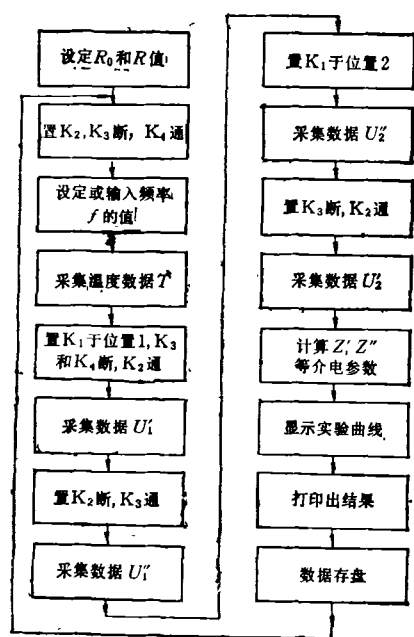


图3 程序流程图

句的控制,可为 0V 或 5V^[1]。将这些电压放大,以便有足够的功率推动干簧继电器。当 K_1 处于位置“1”时,分别接通 K_2 和 K_3 , 这时数字电压表测出 U'_1 和 U''_1 ; K_1 置于“2”时,分别接通 K_2 和 K_3 , 测得 U'_2 和 U''_2 ; 接通 K_4 , 测得样品的温度。以上测量过程是在预先用 BASIC 语言编制好的程序诱导下顺序自动进行的。测得的实验曲线直接显示在微处理机的荧光屏上。数据由打印机输出,亦可由磁盘机存入磁盘,以供进一步分析处理。程序流程图如图3所示。显然,用图2所示的系统研究样品的介电性质是十分简便的。

表1 锁相放大器和电桥对一些电阻电容网络的测量结果

R与C连接方式	测试频率 f(Hz)	电桥读数		锁相放大器测量结果	
		R(kΩ)	C(pf)	R(kΩ)	C(pf)
串联	1506	6.14	4.65×10^4	6.590	4.801×10^4
串联	1506	62.4	7.37×10^3	62.49	7.378×10^3
串联	1506	777	281	769.1	273.1
并联	1507	772	281	763.8	281.8
并联	1506	5.75×10^3	52.4	5.947×10^3	54.18
并联	1507	1.15×10^4	52.5	1.162×10^4	52.8
串联	26700	770	15	794.5	14.63
串联	8360	770	15	827.7	15.28
串联	1088	6.16	4.70×10^4	6.620	4.798×10^4
串联	10.5	7.19	4.66×10^4	8.032	4.375×10^4

表1列出,在几个典型的频率下,分别用上述方法和用 GR 1616 精密电容电桥对一些电阻电容网络测量的结果。我们假定用电桥测出的值更接近真实值。用锁相放大器在各种条件下测得的结果与真实值比较,其偏差均小于 7.5%。对研究一般的物理问题来说,这样的测量误差是允许的。仅当被测阻抗很大(大于 $10^5 \Omega$) 或很小(小于 500Ω) 时,测量误差才会变得更大。

为了减小测量误差,在选择 R 和 R_0 时应尽量满足: $|Z| > 10R_0$ 和 $|Z| \approx R$ 。同时,在连接实验装置时,测量引线应尽可能用屏蔽良好的短线,干簧继电器及被测样品也应当分别置于良好的屏蔽盒中。

测量样品的阻抗谱是研究超离子导体电化学性质的重要方法。我们将上述系统用于研究 $Li_2Ti_2O_7$ 晶体在低温下的介电行为和化合物超离子导体的电化学性质。

参 考 文 献

- [1] Apple II Reference Manual, Apple Computer Inc. (1981), 23—25; 100.
- [2] Applesoft BASIC Programming Reference Manual, Apple Computer Inc., (1981), 134—135.