

· 实验方法与技术 ·

# 超低频时域谱仪及其应用

沈文彬 李家宝 陈敏 李景德

(物理学系)

## 摘 要

根据因果律及线性响应理论研制超低频时域谱仪。采用国际优先数或等时间间隔取样,并在傅里叶变换前进行时域拟合。用纸介电容证明了唯象理论所预言的同一介质样品在不同的条件下应出现自由和随机两种不同的弛豫规律;对铁氧体蕊电感的研究,分出了线性和非线性项。

**关键词** 时域,傅里叶变换,采样,弛豫,频域

## 1 实验设备

自从1970年Hyde提出第一台时域谱仪样机以来<sup>[1]</sup>,国内外一些实验室设计了多种形式的时域介电弛豫谱仪<sup>[2~4]</sup>。它们都是以广泛成立的线性响应理论为基础,按照因果律的普遍原理而设计的。前者把实验结果和介质的微观运动、物质结构信息联系起来,后者是解谱的依据。

作者最近研制的不同于传统谱仪的多功能时域谱仪在BASIC和汇编语言支持下工作。测量时用BASIC语言人机对话,对话完毕,计算机和仪器的各部分自动地进行动作。图1是谱仪原理方框图。

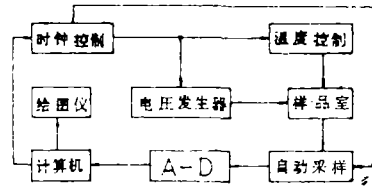


图1 时域谱仪方框图

Fig.1 Block diagram of the time-domain spectrometer

图1中的计算机用IBM PC/XT或APPLE II。样品室的温度控制可以是恒温或线性升、降温;加在样品上的电压可以是上升、下降阶跃或按外加任意波形;采样电路是专门设计的自动或人工换挡毫伏计,量程分 $\pm 10$ 、 $\pm 1$ 、 $\pm 0.1$ 、 $\pm 0.01$ 、 $\pm 0.001V$ 共5档,包括正负逻辑判断功能,它的最小感量为 $1\mu V$ ,精度为 $\pm 0.1\%$ ;A-D转换后可给出4位有效数字;因A-D转换时间的限制,最小取样时间为 $30\mu s$ ,故仪器频域上限为 $10^4 Hz$ ,若采样延续一天,则频域下限为 $10^{-5} Hz$ 。

测量时既可按等时间间隔采样又可按国际优先数时间间隔采样。在以频率或时间为横坐标的实验曲线中,各段保持相同的精度。计算机的终端显示器的纵横坐标可按线性、对数、幂数规律显示取样数据。根据显示结果很快可找到最合适的拟合公式。然后解谱或由绘图仪描出结果。

本文1990年4月11日收到

### 2 线性响应的测量

由于仪器可以研究任何二端网络的时域谱，故可用 RC 样品的充放电来说明线性响应弛豫谱的分析方法。

图 2 中的套图为实验样品。C = 20.1 μF，为 CZJD 型纸介电容器；R = R<sub>1</sub> + R<sub>2</sub>，R<sub>1</sub> = 1.001 MΩ，R<sub>2</sub> = 1.998 kΩ；RC = 20.16 s，充电电压为 117 V。在 t = 0 时开始充电或放电。终端显示器显示 R<sub>2</sub> 上的电压由三部分组成

$$V(t) = V_1(t) + V_2(t) + V_3 \tag{1}$$

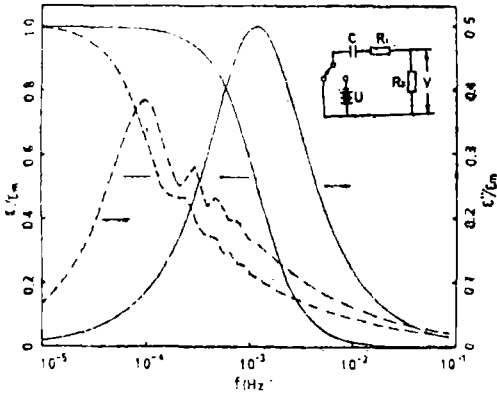


图2 恒电场和零电场下的超低频复介电常数  
Fig.2 Ultralow frequency complex dielectric constant under constant and zero electric field

其中非零常数 V<sub>3</sub> = 0.8128 mV 只出现于充电时域谱中，相应于电容的漏电电阻为 286.6 MΩ。(1) 式中的 V<sub>1</sub>(t) 对充放电过程都相同，它的指数式衰减规律给出的时间常数对充放电过程分别为 20.99 s 和 21.09 s。两者都比 RC 值略大，电容介质的损耗使等效的 R 值增大 4 ~ 5%。在充电过程中 V<sub>2</sub>(t) 为吸收电流，而放电过程中 V<sub>2</sub>(t) 为电容器吸收电流的释放所产生的信号。根据唯象理论它们分别遵从随机和自由弛豫规律，计算机拟合表明，其充电过程

$$V_2(t) = 0.8058 \exp(-t/134.32) \tag{2}$$

而放电过程

$$V_2(t) = 10.17 t^{-\frac{1}{2}} \exp(-\sqrt{t}/2133.5) \tag{3}$$

(2)、(3) 式表明实验结果证实了理论的预言<sup>[5]</sup>。对 (2)、(3) 式作傅里叶变换，积分上限取 5000 s，可以得到绝缘纸介质的吸收与释放电流对其超低频介电常数  $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$  的贡献。图 2 中的实线是由充电过程得出的，虚线是放电过程的结果，其中  $\epsilon_m$  为某个常数。充电时电介质处于恒定电场的作用，而放电时接近零电场，故不同条件下的复  $\epsilon$  有所区别。

### 3 非线性响应

共振型样品的等效电路可用 RLC 元件来代替，参见图 3 中的套图。其中 L = 21.1 H，为电感线圈的电感；R<sub>1</sub> = 121 Ω，为电感线圈的电阻；R<sub>2</sub> = 97.5 Ω，为取样电阻；C = 9.79 μF，为 CZJD 型纸介电容。t = 0 时，在二端网络上加上由 22.5 V 到零的阶跃电压，讯号 V 比例于电容器 C 的放电电流。由于电感 L 的存在，V(t) 讯号表现为阻尼振荡。谱仪按 2 ms 的时间等间隔采样。实验表明：每相邻两个过零点给出的半周期 T/2 是不相等的，前几

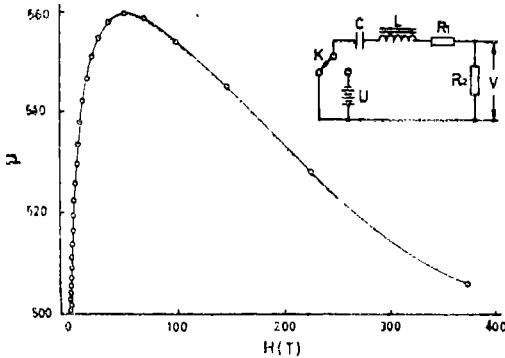


图3 铁氧体的μ(H)曲线

Fig. 3. The μ(H) curve of a ferrite

个半周期明显地偏离了正弦分布, 时间较长以后的点大致为正弦分布, 实验点的振幅按指数规律衰减, 首先用T和相角α来拟合使所有过零点的位相 φ = nπ, n = 0, 1, 2 …, 得到

$$\begin{cases} \varphi = (2\pi/T)(x - 2.2 + \alpha), t = x \times 10^{-8}s \\ T = 112.78 + 0.06426(x - 2.2)e^{-(x-2.2)/310.9} \\ \alpha = x(242 - x)(566 - x)(1040 - x)(1096 - x)(2272 - x)^2 \cdot 3.4815 \times 10^{-20} \end{cases} \quad (4)$$

考虑到振幅衰减及非线性修正得到最后的拟合公式

$$V(t) = -0.670e^{-(x-2.2)/237.9} \sin \varphi - 1.020e^{-(x-2.2)/87.87} \sin^3 \varphi - 5 \times 10^{-5} \quad (5)$$

其中x以ms为单位, 上式的拟合结果与实验结果几乎完全重合。

利用时域谱仪研究非线性现象可得定量结果, 如阻尼振荡的半周期和振幅相联系, 周期的大小决定于电感L中含有的铁氧体的导磁系数, 振幅决定了流过线圈中的电流, 从而决定了铁氧体中的磁场强度

$$H = NV_m/R_2 \quad (6)$$

$$\text{而 } L = \mu\mu_0 N^2 B, (2\pi/T)^2 = 1/LC \quad (7)$$

其中N = 260匝/cm<sup>2</sup>, B = 15 × 2.5 × 2 = 75(cm<sup>3</sup>), V<sub>m</sub>为相对导磁系数等于μ的半周期的V(t)幅值。因此

$$\mu = T^2/4\pi^2\mu_0 N^2 BC \quad (8)$$

类似于RC样品, 将RLC串联电路(图3中的套图)看成一个等效的含有介质的电容器, 则可以定义广义的复介电常数<sup>[6]</sup>

$$\eta(\omega) \equiv \eta' - i\eta'' = \int_0^\infty Y(t) e^{-i\omega t} dt / \int_0^\infty V(t) dt \quad (9)$$

实验测量时间为2s, 将(4)、(5)式的函数V(t)代入上式作傅里叶变换时, 积分上限可在3s处截断, 得到图4所示的频域谱。

原则上时域理论只适用于线性电介质, 若不出现非线性效应, 则由实验结果得出的频域谱是唯一的。但是, 由于样品中存在铁氧体的非线性效应, 所得到的η(ω)并非二端网络的唯一的特性。例如η(ω)和阶跃电压的大小有关。在图4中, 除10Hz附近的基波谐振峰外, 还出现30Hz附近的较小的三次谐波的谐振峰。实验表明, 当阶跃电压减少时, 三次谐波变弱乃至无法观察, 这时出现的效应接近线性; 当阶跃电压增大时, 三次谐波变强甚至出现更高次谐波的响应。这就是η(ω)的不确定的一面。

但是图4的结果定性地也有确定的一面, 电路的LC值确定的固有频率11.07Hz附

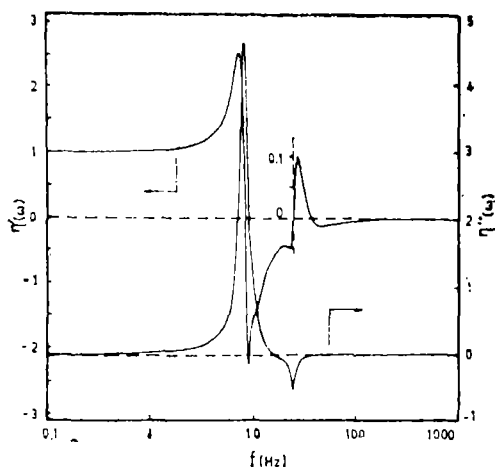


图4 共振型广义复介电常数频域谱  
Fig.4 The frequency-domain spectrum of generalized complex dielectric constant in resonance type

近出现了强烈的共振吸收峰，它使振幅按(5)式的指数形式衰减；同时，强阻尼效应使实际共振响应频率略为降低至稍少于10Hz。其次，三次谐波附近的损耗 $\eta''(\omega)$ 为负，说明基波的振荡能激发产生三次谐波而不是吸收能量。

利用标准电路元件构成的模拟样品的测试结果表明：改进了的时域方法不仅可以研究弛豫型样品而且可以研究共振型样品的介电谱，它在研究固体功能材料和器件中将提供新的应用。

#### 参 考 文 献

- 1 Hyde P J. J Inst Elect Engrs, London, 1970; 117:1891
- 2 Mopsik F I. Rev Sci Instrum, 1984; 55: 79
- 3 Husimi Y, Wada A. Rev Sci Instrum, 1976; 47: 213
- 4 周漪琴, 李炜, 早川礼之助. 绝缘材料通信, 1987; 9
- 5 李景德, 物理学报, 1984; 33(11): 1563
- 6 Bottcher C J F, Bordewijk P. Theory of electric polarization, New York, 197

8

## A Ultralow Frequency Time-domain Spectrometer and Its Application

Shen Wenbing\* Li Jiabao Chen Min Li Jingde

#### Abstract

A Spectrometer is designed based on the theories of causality and linear response. Sampling data are in equal interval of time or of time logarithm. Fitting is adopted in the time-domain before the Fourier transform. It is convenient to use for measurement in the frequency range of  $10^{-5} \sim 10^4$  Hz. For a paper condenser, the free and random relaxations under different conditions predicted by phenomenological theory are confirmed. For a ferrite-induction coil, the linear and nonlinear terms of inductance are separated and  $\mu(H)$  curve of the ferrite is resulted.

**Keywords** time-domain, Fourier transform, sampling, relaxation, frequency-domain

\*Department of Physics