

等效电路—谐振法测量分布参数的原理和方法

中国科学院力学研究所 胡昌信

本文阐明了用等效电路——谐振法相结合测量分布参数的原理和方法，导出了用于实际测量的计算公式，给出了实验结果和测量精度。

一、测量方法的特点

测量一个集中电容器或电感器的分布参数在许多场合显得十分重要，比如：在高压强流脉冲放电、电水锤效应、等离子体产生和脉冲放电气体激光器的研究中，都要求陡峭的脉冲上升前沿和短的脉冲持续时间，此时必须考虑储能脉冲电容器的分布电感；而所有用在高频或超高频条件下的电感线圈，都要考虑分布电容的影响。因此，用在单次脉冲或高频下的电容器或电感器，在电路中都不能简单地把它们看成一个单一的集中元件，还必须认真考虑它们的分布参数的影响，否则将会给分析工作带来很大的困难。

然而，想从理论上计算分布参数，除了极特殊的情况以外，通常都是十分困难甚至是不可能的。本文介绍一种用等效电路—谐振法测量分布参数的方法，并给出一些计算公式，在实验中已经获得了测量结果，可资分析比较。它的特点归纳起来有二：

1. 用等效电路代替集中参数。在测量和计算时，用电容和分布电感的串联等效电路代替集中电容器；用电感和分布电容的并联代替集中电感器，如图1所示。这样的等效电路可

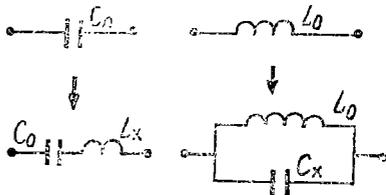


图1 等效电路代替集中参数

以充分显示在高频下分布参数的影响。

2. 在测试方法上采用谐振法——代替法相结合。这种方法实质上是二次测量法，它可以消除测量仪器、连接引线带来的误差。在寻求电路的谐振点时，既可改变可变电容，也可改变高频讯号发生器的频率，这种灵活性可以克服由于仪器或元件参数变化范围不够所带来的限制，使得测量方法具有很广的测量范围。

二、谐振法的基本原理

1. 谐振法的概念

电工学告诉我们，对于由L和C组成的简单并联支路（图2），如果从A O二端自左向右看过去的入端导纳为零，则回路发生电流谐振，由谐振条件

$$\frac{1}{\omega L} - \omega C = 0$$

得谐振圆频率

$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}} \dots\dots\dots (1)$$

图2反映的是最简单情况，实际谐振回路要比这复杂，但是任何复杂电路，只要由A O二端看进去的入端导纳为0，则电路必定发生电流谐振，A O二端就是在测试中，接谐振显示设

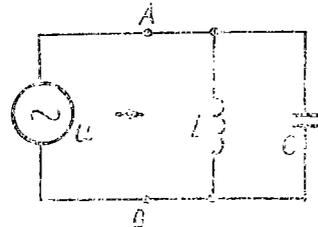


图2 LC简单并联电路

备（示波器或高频毫伏计）的两点。下面是两种稍复杂一点的电路。

2. 串并联谐振法

我们再看图3的串并联谐振电路，它仍由两条支路组成，支路1为参考电感L，支路2由可变电容C、固定电容C₀和电感L_x三者串联而成，显然由谐振条件得：

$$\frac{1}{\omega L} + \frac{1}{\omega L_x - \left(\frac{1}{\omega C} + \frac{1}{\omega C_0}\right)} = 0$$

解出L_x：

$$L_x = \frac{C + C_0}{\omega^2 C C_0} - L \quad \dots\dots\dots (2)$$

由(2)式可由已知参数直接计算L_x，不过在实际测试中，我们并不需要知道参考电感L的数值，还有另外的简便算法（见测试方法）。

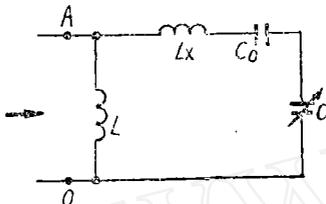


图3 串并联谐振电路

3. 多支路并联谐振法

设有一电路，由四条并联支路组成，如图4所示，每条支路的电路元件分别为L、C、L₀、C_x。从AO二端向右看过去的入端导纳若满足谐振条件，则

$$\frac{1}{\omega L} - \omega C - \omega C_x + \frac{1}{\omega L_0} = 0$$

解出C_x：

$$C_x = \frac{L + L_0}{\omega^2 L L_0} - C \quad \dots\dots\dots (3)$$

由(3)式可以计算C_x。

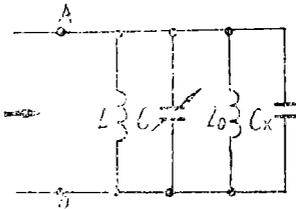


图4 多支路并联谐振电路

三、测试方法

实际上，我们是用谐振法与代替法相结合来测量分布参数，这样可以消除测量仪器和连接引线等带来的误差，提高精确度。

1. 串并联谐振法测量脉冲电容器的分布电感

线路如图5所示，它是图3的实际测量电路，主要设备和元件有：高频讯号发生器，它与参考电感L之间采用松耦合**，以避免干扰，L可以分档调节；可变电容器C；高频示波器（或高频毫伏计）。

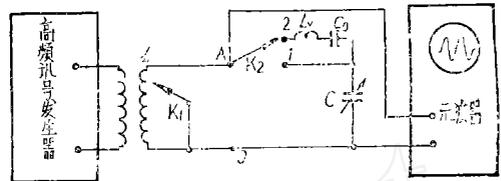


图5 串并联谐振法测分布电感线路图

C₀是被测电容器的电容量，由产品铭牌给出，L_x是其分布电感，高频时，可将电容器的等效回路看成是由电容C₀和电感L_x的串联，A O二端接示波器的偏转板或高频毫伏计。

具体测量方法分两次：

第一次将开关K₁拨到适当的档，在两次测量中固定不动，将开关K₂扳到位置1，此时被测电容器未接入，相当于图3中的L_x和C₀均被短接，或者说相当于L_x = 0、C₀ → ∞。调节讯号发生器的频率和可变电容器，使LC回路谐振，这可以由示波器（或高频毫伏计）的偏转指示最大看出，设此时的ω = ω₁ = 2πf₁、C = C₁，记下此二数据，可以看出，在应用公式(2)时，注意到L_x = 0和C₀ → ∞得

$$L = \frac{1}{\omega_1^2 C_1} \quad \dots\dots\dots (4)$$

这个结果是意料之中的。

第二次将开关K₂扳向位置2，把被测电容器接入，这时并联支路失谐，示波器上的偏转幅度明显减小。再调节讯号发生器的频率和可变电容器，使回路再次达到谐振，设这时

$\omega = \omega_2 = 2\pi f_2$, $C = C_2$, 由式(2)并将(4)式代入(2)式,得到

$$L_X = \frac{C_2 + C_0}{\omega_2^2 C_2 C_0} - L$$

$$= \frac{\omega_1^2 C_1 (C_2 + C_0) - \omega_2^2 C_2 C_0}{\omega_1^2 \omega_2^2 C_1 C_2 C_0}$$

..... (5)

或 $L_X = \frac{f_1^2 C_1 (C_2 + C_0) - f_2^2 C_2 C_0}{4\pi^2 f_1^2 f_2^2 C_1 C_2 C_0}$

..... (6)

式中使用的单位: f ——赫芝, C ——法拉, L ——亨利。

(5)式或(6)式是计算脉冲电容器分布电感的一般关系式。

实际上用谐振法——代替法测量分布参数时,并不是讯号发生器的谐振频率和可变电容器的电容量都同时改变,往往只变其中的一个,这样就出现了固定谐振频率法和固定电容法。

固定频率法:

这时有: $f_1 = f_2 = f$, 仅改变可变电容 C , 则公式(6)化简为

$$L_X = \frac{C_1 (C_2 + C_0) - C_2 C_0}{4\pi^2 f^2 C_1 C_2 C_0} \quad \text{..... (7)}$$

通常在高频时,可变电容器的电容量 C_1 和 C_2 很小,约数百微微法,而大能量储能脉冲电容器的电容量 C_0 一般都在 0.01 微法以上,所以 $C_2 \ll C_0$, (7)式更可简化为

$$L_X = \frac{C_1 - C_2}{4\pi^2 f^2 C_1 C_2} \quad \text{..... (8)}$$

固定电容法:

这时有: $C_1 = C_2 = C$, 仅改变讯号发生器的谐振频率,公式(6)化为

$$L_X = \frac{f_1^2 (C + C_0) - f_2^2 C_0}{4\pi^2 f_1^2 f_2^2 C C_0} \quad \text{..... (9)}$$

若 $C \ll C_0$, 得

*用(8)、(10)式计算, L_X 也可能出现负值,而用(7)、(9)式则不会出现这种情况。

$$L_X = \frac{f_1^2 - f_2^2}{4\pi^2 f_1^2 f_2^2 C} \quad \text{..... (10)}$$

2. 多支路并联谐振法测量高频电感线圈的分布电容

线路如图6所示,它是图4的具体化,电路

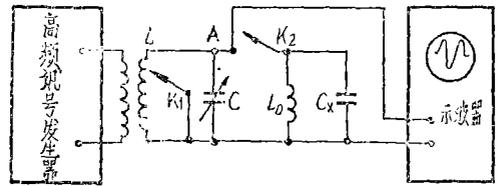


图6 并联谐振法测分布电容线路图
所需设备和元件均同图5。

L_0 是电感线圈的电感量, C_X 是其分布电容,高频时,可将线圈看成由其电感量与分布电容的并联。仍旧采用二次测量法:

第一次将 K_1 拨到适当位置,开关 K_2 不闭合,调节讯号发生器频率和可变电容器,使电路谐振,示波器偏转幅度最大,读取 $\omega = \omega_1 = 2\pi f_1$, $C = C_1$, 由(3)式,注意此时相当于 $C_X = 0$ 和 $L_0 \rightarrow \infty$, 所以

$$C_1 = \frac{1}{\omega_1^2 L} \quad \text{或} \quad L = \frac{1}{\omega_1^2 C_1} \quad \text{..... (11)}$$

第二次,保持 K_1 不变,合上开关 K_2 , 回路失谐,调节频率和电容,使电路再次达到谐振,得 $\omega = \omega_2 = 2\pi f_2$, $C = C_2$, 由(3)式

$$C_X = \frac{L + L_0}{\omega_2^2 L L_0} - C_2$$

将(11)式代入上式,化简后得

$$C_X = \frac{1}{\omega_2^2 L_0} + \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} C_1 - C_2$$

..... (12)

$$\text{或} \quad C_X = \frac{1}{4\pi^2 f_2^2 L_0} + \frac{f_1^2}{f_2^2} C_1 - C_2$$

..... (13)

(12)式或(13)式是计算高频线圈分布电容的一般关系式,同样也可分固定谐振频率法和固定电容法。这时(13)式变为(14)式(固定频率)及(15)式(固定电容):

$$C_X = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L_0} + (C_1 - C_2) \quad \text{..... (14)}$$

$$C_x = \frac{1}{4\pi^2 f_2^2 L_0} + C \left(\frac{f_1^2}{f_2^2} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (15)$$

四、测量结果和测量精度

用本文介绍的串并联谐振法对几个厂家生产的脉冲电容器的分布电感进行了测量,计有西安电力电容器厂和北京电力电容器厂生产的MY80—0.03,额定电压80kV,标称电容量0.03μF,长春793厂生产的CMY—N—80—0.025,额定电压80kV,标称电容量0.025μF。所得分布电感与频率的关系如图7所示。由曲线图可看出,CMY—N型产品的分布电感受频率影响很大,在频率 $f \geq 6\text{MHz}$ 时,分布电感 L_x 迅速上升;而在 $f < 2\text{MHz}$ 时, L_x 较MY型的小。MY型脉冲电容器的 L_x 几乎不随频率而变,故可用于任何脉宽。实际上, L_x 与频率是否有关是与脉冲电容器本身的结构型式紧密相关联

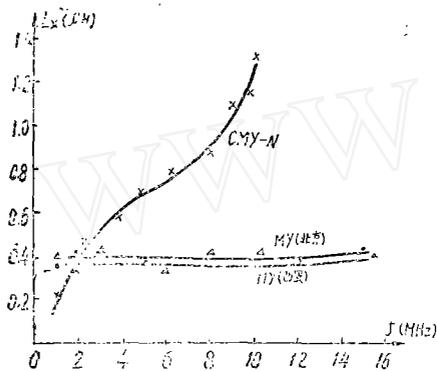


图7 分布电感与频率的关系

的,MY型是胶木绝缘外壳,而CMY—N型则是金属外壳,高频时,金属外壳显然会对放电时的脉冲电磁场产生影响,从等效电路看,就相当于增加了分布电感。

用多支路并联谐振法测量了带磁芯的罗果夫斯基线圈的分布电容,线圈参数是:磁芯型号MXO—1000,内径40mm,外径60mm,横截面是圆形,其上用0.2mm粗的铜线均匀绕110匝,电感量是12.4mH,测得各匝间总分布电

容为18.7pF,与我们实验测定的线圈的高频响应特性相符合。

下面分析误差来源和测量精度。

谐振法——代替法的重要优点在于可消除设备、引线和显示仪器的寄生电容所引起的误差,大大提高测量精度,可以证明在图5中如在L上增加一个并联引线电容 C_a 时,由二次测量法所计算得的分布电感值与没有 C_a 时一样(证明略)。

谐振法——代替法的误差来源主要有下面二种:

1. 高频讯号发生器的调谐误差,约为1%,读数误差为0.5%。
2. 可变电容器的调谐误差。由于可变电容器难于准确调至某一位置,因此在读取 C_1 和 C_2 的数值时,所致误差较大,经多次实验比较,由可变电容器调谐不准所带来的相对误差可达3.5%。

因此,用本文介绍的方法测量分布参数的精度约为5%,应该说,这是相当满意的。

结束语

由于分布参数的理论计算极其困难,因此用实验方法来测定分布参数的数值就显得格外重要。本文介绍的方法不仅从原理上解决了分布参数的测量,导出了计算公式,测出了实际数据,而且测量精度也较高,约在5%左右,可资分析比较。

考虑到由于分布参数在高频时的影响特别突出,因此采用了等效电路和二次谐振法,这样物理概念清楚,测量手续简便,而且可以有效地消除各种寄生参数引起的误差,提高测量精度。

当然,根据实际问题出发及分布参数大小不同,还可以采用别的等效电路,也可以得出相应的计算公式,这些情况读者可以自行变通处理。

** L可以自制,绕成付边多抽头的空心变压器,原边与高频讯号发生器输出端相接,付边接到被测回路,这就是松耦合,这可避免讯号发生器与测量回路间的相互干扰。L也可用别的仪器上的附件来代替。如用QBG—1A品质因数测量仪中的附件,共九只,从0.1μH~25mH。L数值的选择应保证能达到两次调谐为原则。