

三种测量脉冲电容器分布电感 方法的比较

中国科学院力学研究所 胡昌信 詹秀云 张 赛

理论上计算电容器的分布电感是十分困难的,用实验方法进行测量显得特别重要。本文对脉冲电容器分布电感的三种测量方法,即短路放电法、高频Q表法、二次谐振法进行了实验对比和分析。

在电力工程、电讯工程和近代物理的研究中,经常要求测量脉冲电容器的分布电感。比如,在高压强流放电、水电效应、高频振荡回路、等离子体研究和气体放电激光器中便是如此。特别是在有关快速脉冲放电中,分布电感的存在,使放电电流前沿变缓、脉宽加长、幅值降低,这就势必会减弱强放电所产生的力学、声学效应和激光泵浦功率。为突出电感的影响,常将高频或脉冲条件下使用的电容器用简化的电容和分布电感串联电路等效。

除了极特殊的情况外,理论上计算电容器的分布电感是十分困难甚至是不可能的,用实验方法进行测量显得特别重要。自从文献[1]、[2]提出用二次谐振法测量分布电感以来,已得到某些应用。但是,在大多数条件较好的实验室,仍沿用传统的短路放电法,在无线电领域,还常用高频Q表来测分布电感。

本文对上述三种测量方法进行了对比实验。

一、二次谐振法与短路放电法测量结果对比

1、变频率二次谐振法(文献[2]称固定电容法)测量DMG30—0.2型分布电感。

(1)变频率法的基本原理、测量电路和方法已由文献[2]中图3、公式(11)给出,此处不赘述。我们用此法测量了无锡电力电容器厂去年试制的DMG30—0.2型(额定电压

30kV,标称容量0.2μf)低电感脉冲电容器,所得关系曲线如图1所示。图中曲线 $L_x =$

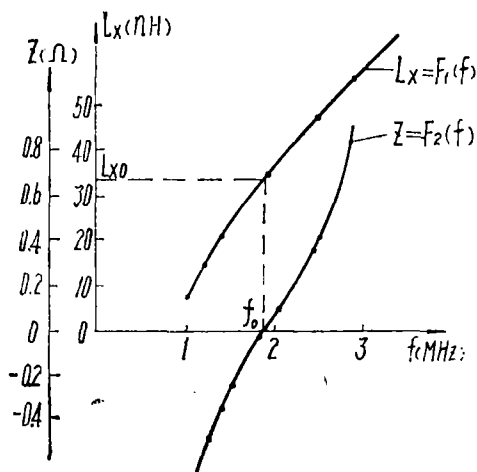


图1 变频率二次谐振法测量DMG30—0.2分布电感曲线

$F_1(f)$ 是由直接测量所得数据按变频率法计算公式得到的

$$L_x = \frac{f_1^2(C + C_0) - f_2^2 C_0}{4\pi^2 f_1^2 f_2^2 C C_0} \dots\dots (1)$$

式中 L_x —电容器分布电感,单位亨利, C_0 —被测电容器标称容量,单位法拉, C —标准电容,单位法拉, f_1 、 f_2 —第一次和第二次谐振时频率,单位赫芝。而另一条曲线 $Z = F_2(f)$ 是脉冲电容器的阻抗特性曲线,是在求出 L_x 后由计算公式

$$Z = 2\pi f L_x - \frac{1}{2\pi f C_0} \dots\dots (2)$$

间接绘制的，它表示该电容器的等效阻抗与纯电容不同，还必须考虑分布电感的影响。 $Z = F_2(f)$ 与横轴 f 的交点 f_0 就是脉冲电容器在短路放电时的固有振荡频率，由 f_0 作垂线与曲线 $L_x = F_1(f)$ 相交，就得到了相应的固有分布电感 L_{x0} 。

图 1 中 $f_0 = 1.93\text{MHz}$ 和 $L_{x0} = 34\text{nH}$ 这一对数据，虽是用谐振法求出的，它也正是用短路放电法所得到的数据。由上述可见，二次谐振法不仅能求出 L_x 随 f 的变化关系，还可以代替短路放电法，求得电容器在直接短路时的固有振荡频率和分布电感。

(2) 由图 1 和文献[2]的测量曲线得出(文献[2]图 4 中的曲线是用变电容法测得的)，分布电感 L_x 是否随频率 f 的增加而上升，是与电容器本身的结构型式紧密相连的。凡属金属外壳结构，如 DMG 型和 CMY-N 型， L_x 均随 f 增加而上升；而凡属胶木绝缘外壳，如 MY 型， L_x 均基本不随 f 而变化。可能原因是：高频时，由于电磁感应作用和涡流损耗，金属外壳阻碍高频电磁场的变化，频率越高，影响越严重，等效来看，犹如增加了分布电感。因此，在快速放电条件下，若单从要求分布电感恒定，不随放电频率而变这一点出发，则胶木外壳结构优于金属外壳结构。

(3) 脉冲电容器在实际使用时的频率不能超过 f_0 ，因此 f_0 就是极限使用频率。

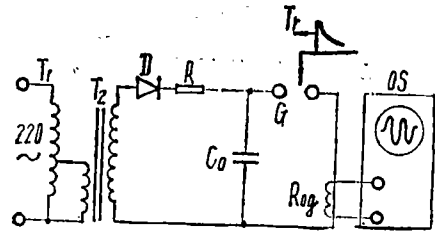
当 $f < f_0$ 时，容抗大于感抗，电容器正常使用。对于金属外壳，在低于 f_0 的频率下使用时， $L_x < L_{x0}$ ，所以分布电感影响小。

当 $f > f_0$ 时，感抗大于容抗，此时电容器在放电回路中已变成一个电感器，这显然是不允许的。

2、短路放电法测量 DMG30-0.2 的分布电感

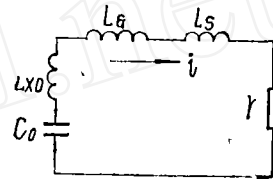
短路放电法测量分布电感原理上是很简单的，实际测量电路如图 2、分析所用的等效电路如图 3。

具体测量方法是： T_1 调压， T_2 升压，经 D 整流后，在 C_0 上得到一直流高压 U_0 。用触发



T₁—调压器，T₂—高压变压器，D—高压硅堆，R—限流电阻，C₀—被测电容器及其标称容量，G—隔离球隙，Tr—触发电脉冲，Rog—罗高夫斯基电流测量线圈，OS—高速示波器。

图 2 短路放电法测量 DMG30-0.2 分布电感电路图



L_{x0} —电容器分布电感， L_g —球隙电感， L_s —回路接线电感， r —回路接线电阻。

图 3 图 2 的等效电路

脉冲 T_r 使球隙 G 击穿(实验中，我们用一块金属片钉在一根长有机玻璃绝缘杆上，当需要放电时，用金属片将 G 短路)，被测电容器 C_0 直接短路放电，用 R_{og} 测量放电电流波形，从示波器上拍得照片，量得电流周期后，便可算出分布电感。

由等效电路图 3，对于电容、电感、电阻串联放电回路，电流频率

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_x C_0} - \frac{r^2}{4L_x^2}} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{式中 } L_x = L_{x0} + L_g + L_s \dots\dots\dots (4)$$

一般情况下电阻 r 很小，当略去 r 时，可得放电周期， $T = 2\pi \sqrt{L_x C_0}$ ，从而得到

$$L_x = \frac{T^2}{4\pi^2 C_0} \dots\dots\dots (5)$$

C_0 是已知的，若从照片量得 T ，即可算出 L_x 。

应该指出，目前许多实验室在用短路放电法测量分布电感时，往往使求得的分布电感值过大，一般实验工作到此结束。

我们对 DMG30-0.2 电容器测得的短路放电电流波形如图 4 所示。横座标的时标刻度是 1 微秒/大格，通过光学放大器，读得电流周

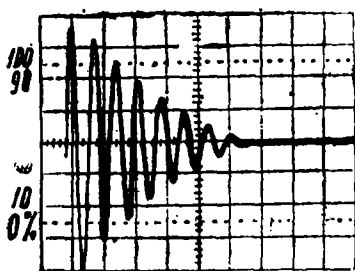


图 4

期, $T = 0.72\mu\text{s}$, 由 (5) 式算得

$$L_x = \frac{(0.72 \times 10^{-6})^2}{4\pi^2 \times 0.2 \times 10^{-6}} = 65.7\text{nH}$$

这显然比由二次谐振法在固有振荡频率时得到的 34nH 大了许多。但实际上, 由 (4) 式可知, 这样求出的电感应是放电回路的总电感, 其中还包括球隙电感 L_G 和接线电感 L_S 。为了提高短路放电法的测量精度, 必须设法排除 L_G 和 L_S 。

常用来排除接线电感 L_S 的方法有两种: 计算法和测量法。

(1) 当放电回路接线尺寸给定时, 可以通过计算法求得 L_S [3]。但是由于接线电感不仅与尺寸有关, 而且还与接线所在的空间位置、形状和所包围的面积均有关, 因而计算总是粗略的。

(2) 从高压放电回路中取下接线, 用电桥或高频 Q 表直接测量 L_S , 由于 (1) 中所述原因, 测量也不准确。

我们是这样来排除 L_G 和 L_S 的。

(3) 由 (5) 式, 电感 L_x 与外加于电容器上的电压 U_0 无关, 因此可选用很低放电电压, 约 3kV 左右, 球隙距离很短, 仅 2mm , 放电时不用外加触发, 而用小片金属将 G 短路, 这样 L_G 极小, 可以忽略。若按一般经验估计, 此时 L_G 大约只有 $2 \sim 3\text{nH}$ 上下。

(4) 两次放电法排除接线电感

受二次谐振法思想的启发, 采用二次短路放电法来消除接线电感是很可取的, 方法如下: 第一次放电已如前述, 求得 $L_{x1} = 65.7\text{nH}$, 回路接线用的是矩形截面的薄铜片, 量得整个回路接线尺寸为

长 \times 宽 \times 厚 = $105\text{mm} \times 25\text{mm} \times 0.3\text{mm}$
第二次放电, 将同样截面的铜片接线加长一倍, 使:

长 \times 宽 \times 厚 = $210\text{mm} \times 25\text{mm} \times 0.3\text{mm}$

其他所有条件均不变, 再拍得一次放电电流波形, 如图 (5) 所示。用光学放大器, 读得此

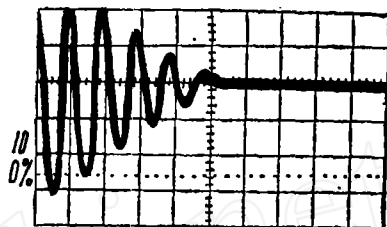


图 5

时电流周期 $T_2 = 0.86\mu\text{s}$, 按 (5) 式算得 $L_{x2} = 93.7\text{nH}$ 。两次放电所得电感之差显然就是第二次放电比第一次放电所加长的这一段接线的电感, 也就是第一次放电时回路的接线电感, 即

$$L_S = L_{x2} - L_{x1} = 28\text{nH}$$

再从第一次所得的电感 L_{x1} 中减去 L_S , 由 (4) 式, 当球隙电感 L_G 可以忽略时, 其差值就是 DMG30-0.2 型脉冲电容器在短路放电时的真实分布电感 L_{x0} 。即

$$L_{x0} = L_{x1} - L_S = 65.7 - 28 = 37.7\text{nH}$$

由此得电容器的固有振荡频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{x0}C_0}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{37.7 \times 10^{-9} \times 0.2 \times 10^{-6}}} = 1.83\text{MHz}$$

为了考查数据的可靠性, 我们改变放电电压, 并用无感分流器测量电流波形, 均得到基本一致的结果。

比较二次谐振法和两次短路放电法得到的 f_0 和 L_{x0} , 它们之间的相对偏差为

$$\varepsilon_{f_0} = \left| \frac{1.83 - 1.93}{1.83} \right| = 5.5\%$$

$$\varepsilon_{L_{x0}} = \left| \frac{37.7 - 34}{37.7} \right| = 9.8\%$$

用放电法得到的分布电感比用谐振法得到的要大一些。但是如果计入放电球隙电感 L_G , 估计两种测量方法的结果将会更加接近。

二、高频Q表法测量分布电感结果

文献[2]曾用变电容法,本文用变频率法测量了数种脉冲电容器的分布电感曲线,均得到了很有规律性的结果,所得 f_0 、 L_x 数值与短路放电法相比也相当接近。

但是当用型号QBG-1A品质因数测量仪(即高频Q表)来测量这些电容器的分布电感时,数据分散性和上下跳动极大,无法得出规律性结果和确切数值。QBG-1A技术说明书[4]称:该仪器可用于测量电容器分布电感,计算公式为

$$L_f + L_s = \frac{1}{4\pi^2(f_1^2 - f_2^2)} \left(\frac{1}{C_{x1}} - \frac{1}{C_{x2}} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

L_f —分布电感, L_s —接线电感, f_1 、 C_{x1} 、 f_2 、 C_{x2} —分别为两次测量中的频率和电容值。当被测电容器电容量大于500pF时,对电容值的测量应采用串联法,此时式中

$$C_{x1} = \frac{C_{11} \cdot C_{12}}{C_{11} - C_{12}}, \quad C_{x2} = \frac{C_{21} \cdot C_{22}}{C_{21} - C_{22}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

C_{11} 、 C_{12} 、 C_{21} 、 C_{22} 分别为测量电容时由Q表上直接读取的数值,具体测量方法和计算详见说明书[4]。

我们对某厂生产的CI90-25-0.008型(额定电压2.5kV,标称容量8000pF)脉冲电容器进行了仔细测量,由所得数据可见, $L_f + L_s$ 的数值是没有规律的,波动很大,得不到可信数据。 L_s 经实测为0.17 μ H,在整个测量中没有换过接线,仅改变测试频率。

那么为什么有人愿意用高频Q表法测分布电感呢?这是因为如果只测一个点,是可以得出数值的,一般也就拿去使用。因此出现这种情况:不同的人对同一台电容器所测的结果大不相同;即使是同一人,在不同的时间去测也会得到差别很大的数据。可能正是由于这个原因,人们总觉得分布参数(包括电容器的分布电感和电感线圈的分布电容)是捉摸不定,变化无常的,常常因人因时而异。

经分析,高频Q表测分布电感的根本缺陷

是,该仪器不能用于测量500pF以上的电容器容量,加上公式(6)的计算误差,故不能测分布电感。由测量结果可以看出,在用串联法测大电容时,哪怕是所有其他条件都不变,测量中只是由于对电容值的某一读数 C_{11} 有1pF的变化时(这是极可能的),由(7)式就可使电容器的容量变化很大。如当 C_{11} 的读数取为279pF时, $C_{x1} = 8370$ pF,当读取 $C_{11} = 280$ pF时, $C_{x1} = 7560$ pF,这样最后可使 $L_f + L_s$ 由0.44 μ H变化到1.82 μ H,可见由1pF的读数变化所引起的分布电感的变化有多大!

三、几点看法

通过对脉冲电容器分布电感三种测量方法,即短路放电法、高频Q表法、二次谐振法的实验对比和分析,可得出以下一些看法。

1、短路放电法是一种传统测量方法,物理概念明确,计算简便,目前实验室多采用。此法的不足之处是,一是精度不够高;二是要使用专门放电和照相设备,一般电容器生产厂家不具备这种条件;三是实验较麻烦,不够安全,且只能得到分布电感的一个特定值。

若采用本文提出的两次短路放电法,将可以有效消除放电回路接线电感,大大提高测量精度。

2、高频Q表法不适宜作容量在500pf以上电容器分布电感的测量。

3、二次谐振法是近年提出来的一种新方法,同样具有物理概念明确,计算简单的优点,同时它还具备:

(1)设备普通,测量程序简便灵活,能测出分布电感随使用频率的变化曲线,有了这一曲线,可使对电路的分析更加准确。

(2)二次谐振法可以自动或通过计算完全消除接线寄生参数和显示仪器输入电容所带来的影响,提高测量精度,证明见文献[2]。

(3)变频率法较之变电容法,前者调谐和读数误差小调节范围大,测量手续更简便,精度可达1%。变电容法的精度约为5%[2]。

(下转38页左栏)

过 L_1 后成平行光束由半透反射镜 M 反射并通过主透镜 L_2 聚焦于电度表转盘边缘上。由转

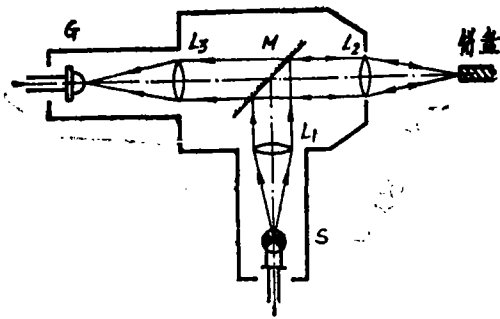


图3 光电瞄准头光路

盘边缘反射回来的光束再通过 L_2 、半透反射镜 M 及透镜 L_3 会聚于光敏元件 G (3DU5C)上, G 输出的信号控制着与之联用的时间基准——KZD—B型多用电度表校验器。因此,被测电度表转盘转动一圈(或几圈)所用的时间即可以从KZD—B上以数字显示形式读出。

因为光源 S 并非绝对的点光源,而是具有一定长度的灯丝,因而轴外光线将照射在 L_1 直径以外的光电瞄准头主体壳内壁上(图4中的阴影部分)引起漫反射,这些散射的杂光通过 M 、 L_3 等将在 G 上产生干扰,引起信号混

乱,致使计时装置误动作。为此,我们在 S 与 L_1 之间的适当位置设置了一个控制成像光束的光阑 P 。如图4所示,光阑 P 正好挡去了有害的阴影部分光线(图4省略了 M ,也省略了对称部分的光线)。

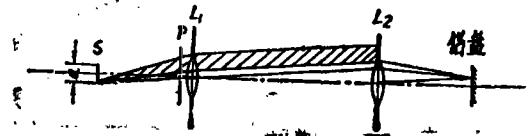


图4 光阑 P 的作用原理

综上所述,该试验台因其光电瞄准头主透镜相对孔径较大($D:f \approx 1:2.5$),且设有消杂光光阑,因此具有调焦锐利、信号明确、计时动作灵敏的特点;在整个台子设计中应用了齿轮齿条、多头螺杆、燕尾导轨等多种运动机构,因而操作十分平稳舒适,由于挂表板、主体箱和底座之间运动关系搭配得当,该试验台可以在空间向任意方向作不小于 3° (最大可达 4.5°)的无级倾斜。因之,可以对被测电度表进行超过标准所规定的恶劣条件试验,这一点,对于试验新型式、新结构的电度表来说,有时是十分必需的。

(上接27页)

(4)在不具备短路放电法条件的工厂和实验室,可以用二次谐振法代之。

(5)利用二次谐振法原理,将信号发生器、显示设备和电感电容等元件按原理电路图作适当连接组装,有可能使分布电感测量仪器化。

无锡电力电容器厂吴浩波、郭俊伟同志提供了部分实验数据,谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] 胡昌信,《激光》,V7,№8(1980),47—50。
- [2] 胡昌信《电子测量技术》,№4(1982),28—32。
- [3] (德)H.海特维西著,李远译,《电感计算》,国防工业出版社,1960年版,第12—22页。
- [4] 南京土壤仪器厂,《QBG—1A型品质因数测量仪技术说明书》,第14—15页。

(上接32页)

dB 处出现第二个极点,解决的办法是在运放的输出端到地之间引入一个RC网络。这个网络的作用是在电路中产生一个零点,通过调整RC乘积可以达到零,即相对消的目的。

五、工艺要求

(1)低阻测量时电流较大,整机走线要合理,注意一点接地。

(2)整个电路共有七只运放,每一只运放要在印刷板上单独退藕,正负稳压源的输出端要各串一个数毫亨的小电感。

(3)对有源电桥的印刷线路板要采取屏蔽措施。