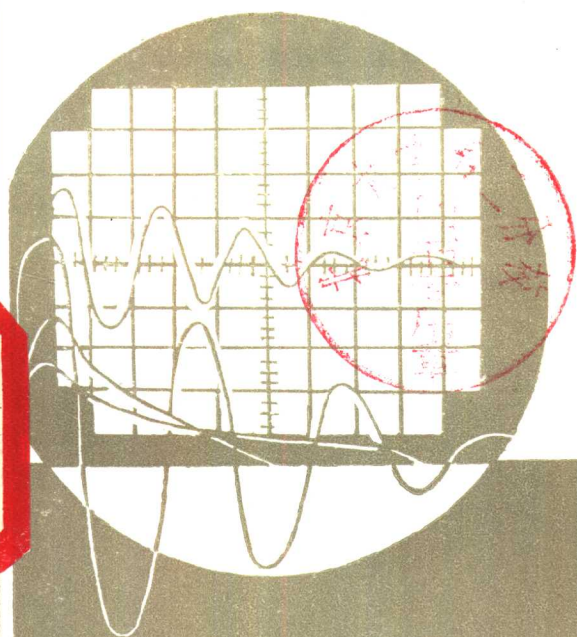


中学物理演示实验丛书

电磁振荡和电磁波

王兴乃 著



科学普及出版社

中学物理演示实验丛书

电磁振荡和电磁波

王兴乃 著

内 容 提 要

“中学物理演示实验丛书”是参照中学物理教材体系而编写的，可供中学物理教师参考，也可供学有余力的学生作课外研究小组的活动材料。

《电磁振荡和电磁波》是丛书中的一本，内容包括：用电流计和示波器显示阻尼振荡和无阻尼振荡；用电子管振荡器、晶体管振荡器等演示电磁波的发送、接收和电谐振；用电子管发射机、教学信号源等演示调幅和检波。

中学物理演示实验丛书

电 磁 振 荡 和 电 磁 波

王 兴 乃 著

责任编辑：田 一

封面设计：马晓光

*

科学普及出版社出版(北京白石桥紫竹院公园内)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京印刷一厂印刷

*

开本：787×1092 毫米 1/32 印张：3¹/₂。字数：67千字

1982年6月第1版 1982年6月第1次印刷

印数：1—18,200册 定价：0.29元

统一书号：13051·1279 本社书号：0402

前 言

“中学物理演示实验丛书”是参照中学物理教材体系而编写的，可供中学物理教师参考，也可供学有余力的学生作课外研究小组的活动材料。

鉴于当前我国各中学设备条件差异较大，编写时我们特别注意到：对同一演示课题提供多种演示方法，既介绍传统有效的演示方法，也介绍广大教师在实践过程中创造和总结的新方法新经验；所用仪器和器材既要充分利用“坛坛罐罐”便于教师就地取材，也要配合现行教材的要求介绍新配仪器的使用方法；此外还要介绍一些现代化演示手段以开拓眼界和启发创新。

演示实验是启发学生感性认识并由此过渡到理性认识的手段，必须使学生在观察演示实验的过程中抓住本质特征进一步思考，因此在编写中还根据演示课题的具体情况作适当的必要的教学法说明。再者，正确使用仪器同了解仪器所依据的或涉及的原理是有密切关系的，因而本书在某些章节对演示仪器和演示方法所依据的理论也作简要的说明。

本丛书的编写是一种初步尝试，限于我们的水平，难免有缺点和错误，望读者和有关人士惠予批评指正。

“中学物理演示实验丛书”编委会

1981年7月

目 录

第一节 电磁振荡	1
(一) 阻尼振荡用电流计显示	1
(二) 阻尼振荡用示波器显示	15
(三) 无阻尼振荡用电流计显示	20
(四) 无阻尼振荡用示波器显示	26
第二节 电磁波的发送、接收和电谐振	32
(一) 用共振来顿瓶演示	32
(二) 用赫兹振荡器演示	37
(三) 用电子管振荡器演示	41
(四) 用电子管超高频振荡器演示	51
(五) 用晶体管振荡器演示	62
(六) 用教学信号源演示	71
第三节 调幅和检波	77
(一) 用电子管发射机演示	77
(二) 用晶体管发射机演示	83
(三) 用教学信号源演示	93

第一节 电 磁 振 荡

(一) 阻尼振荡用电流计显示

用电流计显示振荡电流的基本电路，如图 1-1 所示。其中 E 是电源的电动势， C 是电容器的电容， L 是振荡线圈的自感系数， R_L 是振荡线圈的电阻， R_g 是电流计的内阻。电流计中线圈的自感系数与 L 比较起来甚小，略而不计。

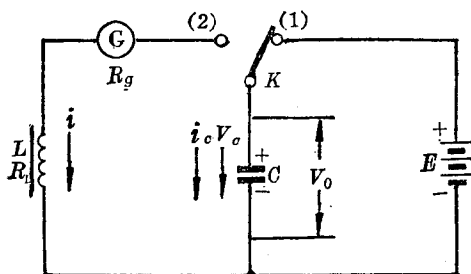


图 1-1

将电键 K 和线端 (1) 接通，电容器 C 充电，当电容器两极板的电压达到稳态 V_0 时，再将电键 K 和线端 (2) 接通，这时电容器 C 上所积的电荷就会通过 LCG 所组成的电路放电。那末，在什么条件下才能产生振荡电流？振荡电流衰减的快慢和什么有关？使用电流计来显示有什么特殊要求？这些都是设计本演示实验必需考虑到的问题。

根据克希荷夫定律， LCG 电路中瞬时放电电流 i 和电容器两极板

间的瞬时电压 V_c 有如下的关系：

$$(R_g + R_L)i + L \frac{di}{dt} + V_c = 0$$

V_c 是随着电容器极板上的电荷 q 而改变的，即 $V_c = \frac{q}{C}$ ，代入上式得：

$$(R_g + R_L)i + L \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} = 0$$

把上式对时间微分，并加以整理得：

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + (R_g + R_L) \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \frac{dq}{dt} = 0$$

因为 $i = \frac{dq}{dt}$ ，则得 i 的二次微分方程式

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + (R_g + R_L) \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = 0 \quad (1)$$

根据微分方程理论进行计算，并用电路的初始条件：即 $t=0$ 时， $i=0$ ， $V_c=V_0$ ，则得到放电电流 i 的通解

$$i = \frac{V_0}{2KL} e^{-\Delta t} (e^{k_1 t} - e^{-k_1 t}) \quad (2)$$

式中 $K = \sqrt{\Delta^2 - \omega_0^2}$ ， $\Delta = \frac{R_g + R_L}{2L}$ ， $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ 。

如果电路中的参数是 $\Delta > \omega_0$ ，也就是 $R_g + R_L > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ，此时 K 是实数，则 LCG 电路中的放电电流 i 的表达式即为：

$$\begin{aligned} i &= \frac{V_0}{2KL} e^{-\Delta t} (e^{k_1 t} - e^{-k_1 t}) \\ &= \frac{V_0}{2KL} e^{-\Delta t} \sinh kt \end{aligned} \quad (3)$$

后者是用双曲线函数表示的。从(3)式里可以看出，这时的放电电流 i 不能改变方向，是一非振荡过程，如图 1-2 中(甲)所示。这种电路叫做过阻尼电路。

如果电路中的参数是 $\Delta < \omega_0$ ，也就是 $R_L + R_g < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ，此时 K 是

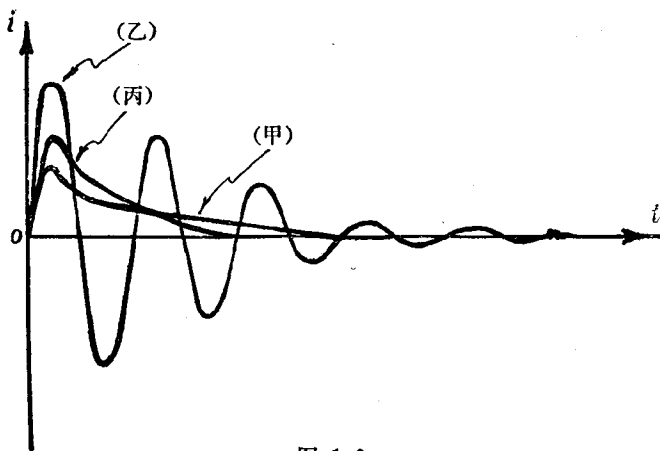


图 1-2

虚数，则 LCG 电路中的放电电流的表达式为：

$$i = \frac{V_0}{\omega L} e^{-\Delta' t} \sin \omega t = I_0 e^{-\Delta' t} \sin \omega t \quad (4)$$

式中

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \Delta'^2}$$

从(4)式里可以看出：这时的放电电流 i 虽然是作周期性变化，但振幅 $I_0 e^{-\Delta' t}$ 是随时间作指数衰减，是一种有阻尼的振荡电流，如图 1-2 中(乙)所示。这种电路叫做欠阻尼电路。

如果电路中的参数是 $\Delta = \omega_0$ ，也就是 $R_L + R_g = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ，此时 $\omega = 0$ ，

(4) 式成为一不定式，用极限方法求得，当 ω 趋近于零时， $\frac{\sin \omega t}{\omega}$ 的极限为 t 。则 LCG 电路中的放电电流的表达式为：

$$i = \frac{V_0}{L} e^{-\Delta' t} \cdot t \quad (5)$$

从(5)式中可以看出，这时的放电电流 i 也不能改变方向，是非

振荡过程到阻尼振荡过程的过渡，如图 1-2 中(丙)所示。这种电路叫做临界阻尼电路。

理论分析结果，得出下列几点：

第一、电路的参数 $R_g + R_L < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 或 $R_g + R_L \geq 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 是判别 LCG 电路内是否产生振荡电流的条件。振荡电流只有在 $R_g + R_L < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 的条件下，才能够产生。

这是因为：当电流通过线圈和电流计时，由于有电阻存在，要消耗电能转变为热量。振荡电路中的电阻 ($R_L + R_g$) 越大，在电路里损耗的电能也就越多。当电路中的电阻大到一定程度 ($R_L + R_g \geq 2\sqrt{\frac{L}{C}}$) 时，电容器在充电后所储存

的电能，还没有完成一次全振荡，就已全部消耗于电阻上转变为热能，所以就不会有振荡电流形成。这种现象，和浸在粘度大的油中的摆的运动相似，把摆推开平衡位置以后，只是慢慢地回到原来的平衡位置，并不作振动。

第二，当振荡电路中产生振荡电流时，振荡的固有周期 T 是

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R_L + R_g}{2L}\right)^2}}$$

从此可以知道，振荡电路的周期除了和 L 、 C 有关以外，还跟电路中的电阻有关，电阻大时，周期也会变大。这是由于电阻对于电荷的运动有阻碍作用造成的。如果电路中的电阻 ($R_L + R_g$) 与自感系数 L 相比甚小，可以略而不计时，则

$$T \approx 2\pi\sqrt{LC}$$

第三, 振荡衰减的快慢, 决定于 $\frac{R_L + R_g}{2L}$ 数值的大小

(令 $\frac{R_L + R_g}{2L} = \Delta$), Δ 越大衰减越快, Δ 越小衰减越慢。 Δ

叫做阻尼系数或衰减系数。

可见当 L 不变时, 电阻 $(R_L + R_g)$ 越大, Δ 也就越大, 振荡衰减就越快。不同 Δ 值的振荡持续情况, 见图 1-3, 其中 (甲) Δ 值最大, (乙) Δ 值较小, (丙) Δ 值更小。这是由于电路中的电阻越大, 振荡电流通过电阻时, 电能损耗也越快的缘故。

从以上的讨论可知, 为了满足产生振荡电流的条件, 获

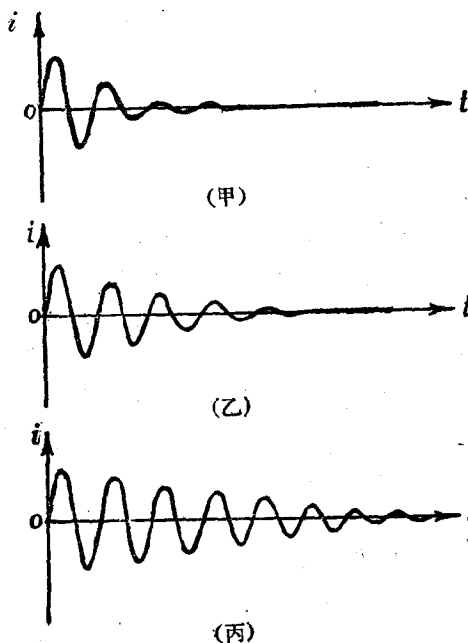


图 1-3

得和电流计相匹配的较大的振荡周期和衰减较慢的振荡电流，就应选用自感系数 L 尽量大的线圈，再配上适当容量的电容。决不可使用 L 小的线圈或无限地增加所配电容器的容量 C 。否则，乍看起来似乎能获得较大的周期，实际上已破坏了产生振荡的条件，不能产生振荡电流了。另外，线圈的直流电阻 R_L 还应尽量的小，否则虽然能产生振荡电流，周期也够大，但衰减太快，也达不到用电流计显示的目的。因此振荡线圈 L 是这一实验的关键元件。

经证明，这个线圈的自感系数在 1000 亨利以上，电阻在 300~400 欧姆以下，较为适宜。自感系数这样大而电阻又如此小的线圈，收音机电源变压器的初、次级线圈或感应圈的次级线圈等成品线圈，是不能满足要求的，这就需要特制一个。

振荡线圈的制作

制作时，铁心可取截面 6.4×6.5 (厘米)² 的硅钢片^① (见图 1-4)。在绝缘骨架上 (见图 1-4(乙)) 用直径为 0.51 毫米的高强度漆包线，共绕约 9500 匝，于 2500 匝、5000 匝、7500 匝、8200 匝和 8500 匝处各抽一头，分别为 (2)、(3)、(4)、(5) 和 (6)^② (见图 1-4(丙))，(1)、(7) 分别为线圈的始端与终端。绕制时，为了在一定的空间里能绕下较多的匝数，线匝要绕紧，排线要整齐，层间不必垫绝缘纸。

绕完后，把抽头引出，刮掉漆皮，焊接于安装在骨架边缘的接线柱上，并标明符号。在线圈的最外层包上绝缘纸或塑料薄膜等，作为防护层。

① 这是利用现成铁心的数据，如果有其他尺寸的铁心，也可以采用。但必需注意铁心截面大些，线径粗些，匝数多些，以满足 L 和 R_L 的要求才好用。

② 为了使这个振荡线圈能和“无阻尼振荡”实验共用，故多抽了几个头。

插铁心时，为了加大线圈的自感系数 L ，硅钢片要采用交叉(对插)插法。插上铁心后，要用夹件装紧。制成的振荡线圈，见图 1-4(丁)。

粗略测定，它的自感系数 $L \approx 1270$ 亨利，直流电阻 $R_L \approx 300$ 欧姆。

这个线圈和容量 $C = 200$ 微法的电容配合起来组成图 1-1 所示的振荡电路时，其 $2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2\sqrt{\frac{1270}{200 \times 10^{-6}}} \approx 5039$ 欧姆， $R_L + R_g \textcircled{1} = 300 + 37.5 = 337.5$ 欧姆， $R_L + R_g$ 是远小于 $2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 。这时振荡周期

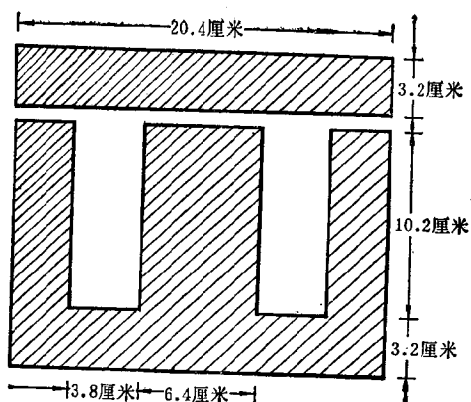
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R_L + R_g}{2L}\right)^2} \approx 3.17 \text{ 秒}。$$

阻尼系数 $\Delta = \frac{(R_L + R_g)}{2L} \approx \frac{1}{7.5} \text{ 秒}^{-1}$ ，也就是振荡开始后经过约 7.5 秒，振荡电流的振幅才会减小为开始的 $1/e$ (约为 $1/3$)。这样就基本上满足了用演示用电流计来显示的要求。

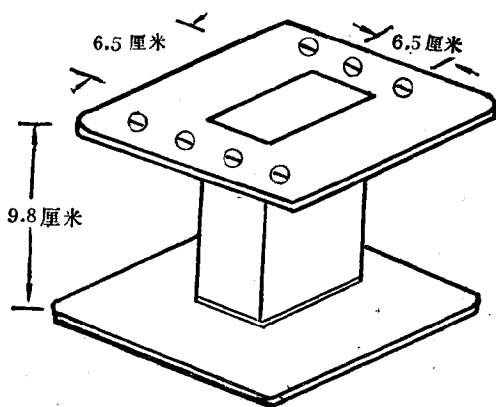
电流计的使用

电流计本身是一个具有阻尼的振动系统(有空气阻尼、摩擦阻尼以及起着主要作用的电磁阻尼等)。这样，当振荡电流通过电流计时，它的转动系统在振荡电流作用下，总是要激起两种运动：一种是振荡电流所激起的受迫振动，它能够真正地反映出振荡电流的变化情况；另一种是振荡电流所激起的固有振动，它不仅不能反映振荡电流的真实情况，反而在开始的前几次振动中必然要迭加在受迫振动上，使实验效果降低。那末，怎样才能将固有振动的影响减小到最小限

① 演示用电流计(J-DB 1 型)的内阻为 37.5 欧姆。

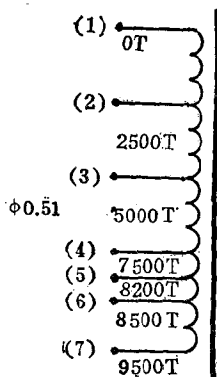


(甲)

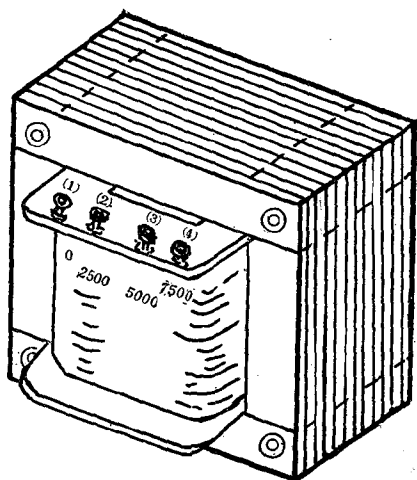


(乙)

图 1-4



(丙)



(丁)

图 1-4

度，不至于明显地降低演示效果呢？

把仪器接在电路里，从接通电路起到指针的摆动振幅不大于标度尺的 1% 时为止，这段时间，叫做仪表的阻尼时间。阻尼时间大，仪表的指针经过相当长时间的一系列摆动，最后才能达到静止；阻尼时间小，情况与此相反。因此，在这一实验里若使用阻尼时间较长的电流计，振荡电流所激起的固有振动的影响极为明显，我们从电流计指针摆动的现象中，很难判断是振荡电流的振荡还是它的固有振动。所以，使用阻尼时间较长的电流计是不能真正地反映出振荡电流的情况的。若使用阻尼时间较短的电流计，情形与此就不一样了，振荡电流所激起的固有振动衰减得很快，影响不

显著。这样，电流计指针的摆动现象，就比较真实地反映了振荡电流的变化情况。因此，在这个演示里，应使用阻尼时间尽量短的电计。

电流计的阻尼时间，可用下面所介绍的方法进行粗略的测定。摇晃一下电流计，从指针偏转一个较大的角度起用秒表开始记时，待指针接近静止时所记录的时间，即约为电流计的阻尼时间。

应用阻尼时间不同的电流计进行同一实验的结果，见表1-1。从而可以看出，阻尼时间过长的电流计实验的真实性是很差的，远超过理论上所能摆动的次数。

表 1-1

使用电流计的 种类和阻尼时间		振荡电路的参数			作阻尼振荡时电流计 指针的摆动情况		
种 类	阻尼时 间(秒)	电 容 (微法)	自感系数 (亨利)	固有周期 (秒/次)	电流计指 针摆动次 数(次)	前三次摆动 平均周期 (秒/次)	指针摆动 总时间 (秒)
检流计① (北京仪器厂)	< 2	200	1270	3.16	5~6	2.98	14.0
灵敏电流计 4200型(广大)	< 2	200	1270	3.16	5~6	2.98	14.3
灵敏电流计 (大华)	< 2	200	1270	3.16	5~6	2.98	14.3
灵敏电流计 (北京教学 仪器厂)	< 3	200	1270	3.16	6~7	2.96	16.5
灵敏电流计② (J-DB2X型)	< 25	200	1270	3.16	23~24	2.85	23.3
演示用电流计 (J-DB1型)	< 6	200	1270	3.16	4	3.50	15.8

① 也是供学生实验用灵敏电流计的一种。

② 这种电流计内没有电磁阻尼器。

阻尼时间很长的电流计，怎样来减小它的阻尼时间呢？

我们知道，电表的阻尼，可用支持线圈的铝质线圈架来

完成，也可以由转动线圈自身来完成。这是因为当线圈在磁场中运动时，必然产生感生电动势，只要线圈与线路上某一电阻构成闭合电路，在电路中就要产生电流。这个电流和磁场的相互作用，便产生了与动力转矩反向的阻尼转矩，起到了阻尼的功用。阻尼特性和阻尼时间的长短，由电流计内部结构和电路的情况不同而异。

如果把电流计按图 1-5 所示的情况接入电路中，电阻 R_1 是供给阻尼电流通路和作为测量时分流器的电阻，它的阻值由几欧姆到几十欧姆；电阻 R_2 是用来控制阻尼状态和阻尼时间的电位器^①，它的阻值可由 0~100 欧姆。

当电位器 R_2 的阻值减小时，可使线圈中的阻尼电流增大，这时阻尼加强，而阻尼时间缩短。实验证明，当 R_1 的阻值是 15 欧姆， R_2 用电位器，当它的阻值调得合适时，可使 J-DB 2 X 型灵敏电流计的阻尼时间，减小到 2 秒以下。用于演示的效果，与使用其他电流计大体相同，见表 1-2。

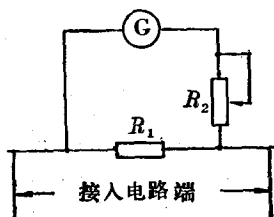


图 1-5

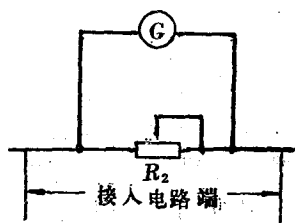


图 1-6

为了简便，电阻 R_1 也可以省略，把电位器和电流计并联后再串入电路中，见图 1-6。道理和前者相同，效果也差不多。同时还可以用它来控制电流计指针的摆动幅度，使之

① 或滑动变阻器和电阻箱等。

表 1-2

电流计种类	振荡电路的参数			作阻尼振荡时电流计指针的摆动情况		
	电 容 (微法)	自感系数 (亨利)	固有周期 (秒/次)	电流计指 针摆动次 数 (次)	前两次摆动 平均周期 (秒/次)	指针摆动 总时间 (秒)
检 流 计 (北京仪器厂)	200	1270	3.16	5~6	2.93	14.0
灵敏电流计 (J-DB2X 型)	200	1270	3.16	5~6	2.90	13.6

不致过载。

现在一般学校中所用的电流计，种类繁多。通过以上的讨论可知，在这一实验里不管是哪一种电流计都可以使用。但阻尼时间过长者，必须加上控制阻尼时间的电阻后，再接入电路里。

电容器的选择

电路中的电容器，只是在每次实验开始时充电一次，振荡期间并没有能量补充，而且是在交流状态下工作。因此宜采用介质损耗较小，漏电小，无极性的电容器，如油浸纸介电容器，金属化纸介电容器等。电解电容器由于介质损耗大^①，不宜用于交流状态下工作，故最好不用。应用两种电容器进行同一实验时的结果，见表 1-3。

从表 1-3 可以看出，在相同实验条件下，用油浸纸介电容器，比用电解电容器，电流计指针的摆动次数要多，实验效果要好。

① 电解电容器的介质损耗，有氧化物介质损耗，电解液电阻损耗等，比油浸纸介电容器大得多。