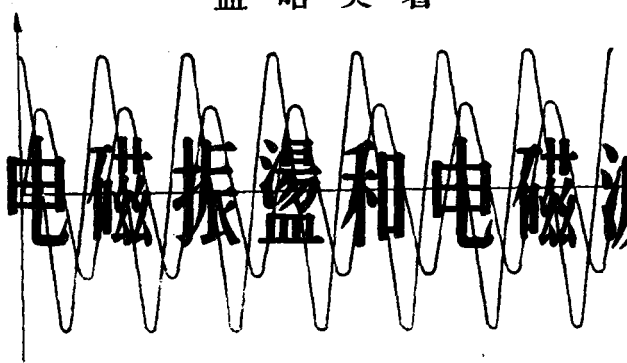


目 錄

緒 言	3
1. 电磁振盪和电磁波是什麼	3
2. 电磁波學說的簡史	4
I. 电磁振盪	4
1. 电容的充电和电場的能	4
2. 在綫圈裏建立电流和磁場的能	6
3. 簡單的振盪迴路和电磁振盪的發生	7
4. 电容和电感在交变电压下的作用	15
5. 受迫电磁振盪和諧振現象	23
6. 耦合迴路	32
7. 簡單振盪迴路的濾波作用	33
II. 电磁波的發生、輻射和傳播	34
1. 動的磁場所生的电場	34
2. 動的电場所生的磁場	36
3. 电磁波	37
4. 电磁波的發生	39
5. 天綫	50
6. 电磁波的傳播	51
結 束 語	56

孟昭英 著



电磁振荡和电磁波

人民教育出版社

這本書簡要而清楚地講述了電磁振盪和電磁波。本書分兩部分：(I)電磁振盪，(II)電磁波的發生、輻射和傳播。在前一部分中，主要講述了簡單振盪迴路和電磁振盪的發生、電容和電感在交變電壓下的作用以及受迫電磁振盪和電磁諧振現象。在後一部分中主要講述了電磁波及其發生、天線以及電磁波的傳播。

本書將能夠幫助讀者從物理意義方面加深了解有關電磁振盪和電磁波的一些初步原理。

本書可作為中學物理教師、高等師範學校和師範專科學校物理系科學生的參考書。

*

電磁振盪和電磁波

孟昭英 著

北京市書刊出版業營業許可證出字第23號

人民教育出版社出版

北京景山大街

新華書店發行 北京市印刷二廠印刷

書號：參 6295 字數：34 千

開本：757×1092 1/32 印張：1 3/4

1955年11月第一版

1956年3月第一次印刷

1-6,500冊

定價(5)一角六分

电磁振荡和电磁波^①

緒 言

1. 电磁振荡和电磁波是什麼 动态的电现象和磁现象是不能分開的。电荷运动的时候,它周围就发生磁场;磁场变化的时候,在空间中就发生感生电动势。实际上,电场和磁场都是电荷和它的运动在空间中所发生的现象;由于这种内在的联系,所以把它们完全分开是不可能的。

具有电场或磁场的空间是载有能量的。能量可以由一种形式转变成另一种形式。在转变的过程中,除了一部分能量不可避免地要被电阻所消耗而变成焦耳热,其余的可以保持和集中在所谓“集总的”回路元件里,也就是说,电场和磁场不脱离发生它们的电荷和电流。除了以上所说的循环于场源附近的场外,也可以有一部分能量以电场和磁场的形式完全脱离发生它的源,彼此维系着,“独立地”存在,并在空间中传播。为了讨论方便起见,我们把前者叫做“电磁振荡”,后者叫做“电磁波”。这并不是定义。即使是能量不脱离它的源,也不能说没有电磁波;同样,在空间传播着的电磁波,它的电场和磁场也無时不在振荡着。同时,严格地说,在非完全闭合的系统里,只要有电磁振荡,就不可能完全没有电磁波发射出

① 本文是1954年中国物理学会北京分会与北京教师进修学院联合举办的一系列为中学教师講演中一講的講稿。

去,不过,随着振盪系統的大小跟对应於振盪頻率的波長的長短的比值的不同,而有不同程度的輻射。

2. 电磁波學說的簡史 电学和磁学中的一切基本定律当然是电磁波學說的基礎。但是,作为电磁波學說中的基本观念,則是法拉第在 1830 年前後所闡明的場的學說。此後,在 1873 年,麥克斯韋發表了他的电磁波學說。这个學說不但導出了电磁波的基本性質,並且把电磁波跟光联系起來,从純电学的測量數據算出了光的傳播速率。即使这样,这个學說也沒有立刻就为當時的科学界毫無疑義地接受。直到赫茲在 1888 年用實驗証明了电磁波的發生和性質,才把电磁波學說置於無可非議的基礎上。我們用赫茲作頻率的單位●來紀念这位偉大的科学家,是非常適當的。

把實驗室科学研究中的电磁波用來做成無線电給人類服务,是 1895 年俄國的偉大科学家和發明家波波夫的成就。从那時起,到現在不过六十年,可是無線电已成为交通、文化、工業等方面不可缺少的工具,並且它的重要性更要隨着時代而大大提高。

I. 电磁振盪

1. 电容的充电和電場的能 拿一个簡單的平行板电容器來,給它充电,使它的兩板間的电势差達到 U 。這時需要做功(圖 1); 功的值是 $\frac{1}{2}CU^2$, 式中 C 表示电容器的电容。这个功並沒有損失,而是变成能量儲存在電場裏。电容器放电時,这个能量又可以放出來。如果把有電場的空間看作有電力綫

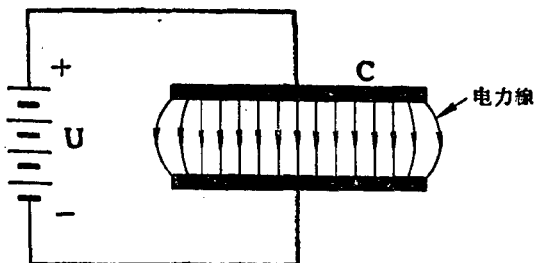


圖1 充电电容器間的電場

的空間，那麼，就可以形象地來說：建立電力綫時需要做功；電力綫消失時，電場又可以做功。

我們可以用下面的機械比喻來說明電容器的充電。把螺旋形彈簧的一端固定在桌子的平面上，讓它的另一端自由地放着。這時，彈簧既沒有被壓縮，也沒有被拉長，這相當於沒有充電時電容器間的空間。把彈簧拉長，就需要做功。所做的功變成能量儲存在彈簧裏。這相當於給電容器充電。把彈簧壓縮，就相當於以相反的方向給電容器充電。顯然，被壓縮

① 頻率是每秒 1 週的時候，叫做 1 赫茲（科學院編譯局標準名詞）。這個名詞在蘇聯和歐洲大陸各國是通用的，而用每秒若干週的幾乎完全沒有，正如沒有人用每秒若干庫侖來代替安培一樣。可是，在我國，有許多人是不習慣用這個單位，而用“週”或“週波”來代替它。我以為這是錯誤的，至少是非常不恰當的，應當提請大家注意以便改正。如果不用赫茲，至少應當用每秒週，而不能簡稱做週，正如不能用庫侖代替安培一樣。不然，在調頻中頻率的偏移的單位將引起很大的混亂。同時，“高週”這個名詞也不甚恰當，必須用“高週率”，因為高週可能了解為高週期，即低頻率；最好是用“高頻”。

或伸長的彈簧是能夠做功的。

2. 在綫圈裏建立電流和磁場的能 同樣,在一個電阻很小(可以認為沒有電阻)、電感是 L 的綫圈裏產生電流 I ,也要做功(圖2),這個功的值是 $\frac{1}{2}LI^2$ 。這時,所以需要做功,是因為在一個原來沒有電流的綫圈裏通過電流時,要產生感生電動勢,而後者的方向是阻礙電流的增大的。在有電流的綫圈裏面和它的附近,有磁場存在。我們可以認為,建流時所做的功變成能量儲存在磁場裏;或者說,建立磁力綫時需要做功。當綫圈裏的電流減小時,也產生感生電動勢。這時它的方向是阻礙電流的減小的,因此它做了功,或者說,當磁力綫消失時,原來儲存的能量又放出來。

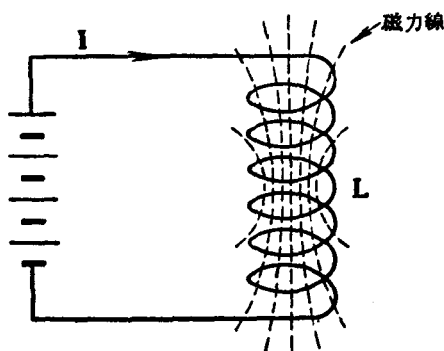


圖2 通電綫圈裏的磁場

這種情形跟物體運動時的慣性作用很類似,所以,我們可以以動能的觀念來比喻電流磁場的能,甚至可以進一步把電感 L 比作質量,把電流 I 比作運動的速率。建立電流,就好像是使一個靜止的物體運動起來一樣,需要做功。在一個已經

運動起來的物体上不再加力，那麼，这个物体靠慣性仍能維持前進，這正像感應電動勢企圖維持一个电流不变一样。电流減小時做功，正像運動着的物体減速時做功一样。

3. 簡單的振盪迴路和电磁振盪的發生 把一个电容器和一个电感器(或綫圈)並联起來，就形成一个簡單的振盪迴路，那就是說，如果給它以適當的激發，就能在它裏面發生电磁振盪。

为了簡化起見，暫時假定綫圈没有电阻，电容器不消耗能量。激發的一个方式是：先給电容器充电，然後使它經過綫圈放电(圖3)。

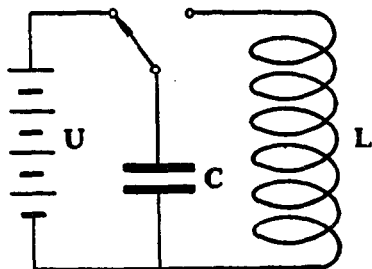


圖3 簡單振盪迴路的激發綫路

在最初使电容器放电的那一時刻，电容器兩端的電勢差就是充电時的电压，而經過綫路的电流是零，因为放电还没有開始。這時，所有的能都还是儲存在电容器的空間或介質裏。用上面的机械比喻，这相当於把桌面上的彈簧拉長。

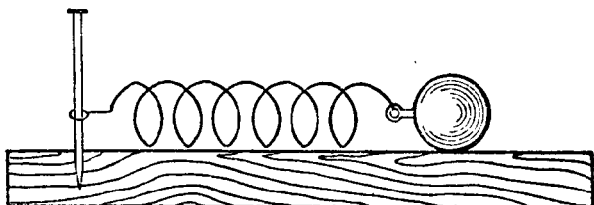
把电容器跟綫圈联接起來以後，充了电的电容器就經過綫圈放电，形成电流，在綫圈裏開始建立起磁場來。這時，电容器上的电荷減少，它兩端的電勢差隨着降低，而經過这个迴路的电流却逐漸增大。綫圈既然跟电容器是並联的，所以，电流在綫圈裏感生的電動勢是永远等於电容器兩端的電勢差的。这就是电流不能突然增長起來的原因。顯然，綫圈磁場的能量是从电容器電場的能量轉變來的。

用机械現象來比喻，电容器充电後經綫圈放电所發生的电磁振盪，就好像是把一个物体接到彈簧的自由端上，当把彈簧拉長，放開手以後所發生的机械振動一样（圖4）。电容器的充电相当於把彈簧拉長。把手放開，彈簧就要拉着物体運動起來，使物体加速。这相当於使电容器經過綫圈放电，綫圈中的电流漸漸增大。這時彈簧收縮；这相当於电容器因为放电，它兩端的电势差漸漸減小。物体的動能是从拉長了的彈簧的势能轉變來的。綫圈中的磁能則是从充了电的电容器的电能轉變來的。我們假設綫圈沒有电阻，这相当於我們假設桌面沒有摩擦。

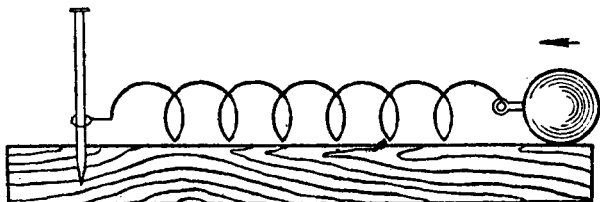
电容器的放电这样繼續下去，到它兩端的电势差近於零的時候，电势差隨時間的改变率是最快的，所以电荷隨時間的改变率也是最快的；這時放电电流達到了它的最大值。同時，电容器充电時所儲存的电能消耗到零，全部变成了磁場的能。

这相当於物体被彈簧拉着加速運動到彈簧原來的平衡位置。這時，彈簧完全沒有受到拉長或壓縮，而物体的速率則達到了最大值（圖4c）。

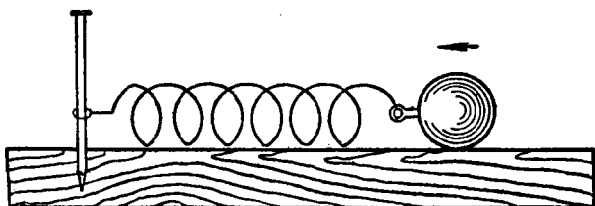
運動着的物体有慣性，所以它不会因为彈簧不再拉它就停止運動，而要繼續前進，結果把彈簧壓縮。这样，物体把它的動能变成被壓縮彈簧的势能；物体的速率漸漸減小，以至物体最後完全停止。這時彈簧被壓縮到它的最大值（圖4d）。跟这類似，因为电流是流經有电感的綫圈，所以它也不会因为电容器不再放电而停止；感生电动势要維持电流的繼續。可是，电容器已經放电到兩板上沒有电荷了，所以电流的繼續就是



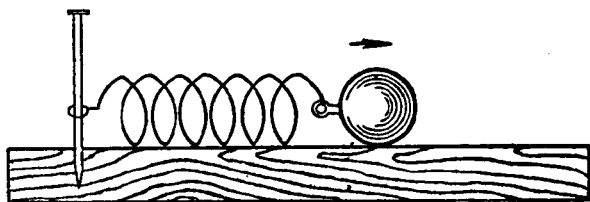
(a) 物体接在弹簧的自由端，弹簧没有被拉长，也没有被压缩。



(b) 把弹簧向右拉，使弹簧拉长，然后放开手，被拉长的弹簧将使物体向左运动。



(c) 物体被弹簧拉回到弹簧既没有拉长也没有压缩的位置。由于物体具有动能，物体将继续向左运动。



(d) 物体把弹簧压缩到某一位置后静止，然后被压缩的弹簧使物体向右运动。

圖 4 电磁振荡的机械比喻圖

使电容器向相反的方向充电。这样，磁場的磁能又轉變成重新充电的电容器的電場的電能。到全部磁能都變成電能時，電流減小到零，而電容器上的電勢差則達到最大值。這時的電勢差跟起始時的電勢差的分別，只是符號相反，正像彈簧原來是被拉長，現在是被壓縮一樣。

此後的情況跟起始的情況類似；電容器又開始放電，只是放電方向跟最初的放電方向相反。到放電完了時，電能又全都變成電流在綫圈中所產生的磁能，電流達到反方向的最大值。這時，電流又被感生電動勢所維持，而使電容器充電；到電流減小到零時，電容器被充電到最大值，成為跟最初的情況完全相同。

這樣，完成了一個整的週期。此後，現象又按以上的過程重複下去，如此繼續不已。這就是在簡單振盪迴路裏的電磁振盪。如果只考察電流，我們就看到，它由零上升到最大值，再漸漸減小到零，然後改變方向，上升到最大值，再減小到零。實際上，電流變化的波形是正弦的。同樣，電容器兩板間的電勢差，也就是綫圈兩端的電勢差，也是正弦地隨着時間而變化，只是它的相位跟電流的相位正好差 90° （圖 5）。

顯然，電磁振盪的頻率是跟電容器的電容和綫圈的電感有關係的。如果綫圈不變，使電容器充電到一定的電壓，那麼，電容器的電容越大，它所能容的電荷也越多，所能放電的時間，因而振盪的週期，也就越長。因此， C 越大，振盪週期就越大，頻率就越低。可是，這個關係並不是簡單的反比關係，而是頻率跟 C 的平方根成反比。至於頻率跟電感的關係，那

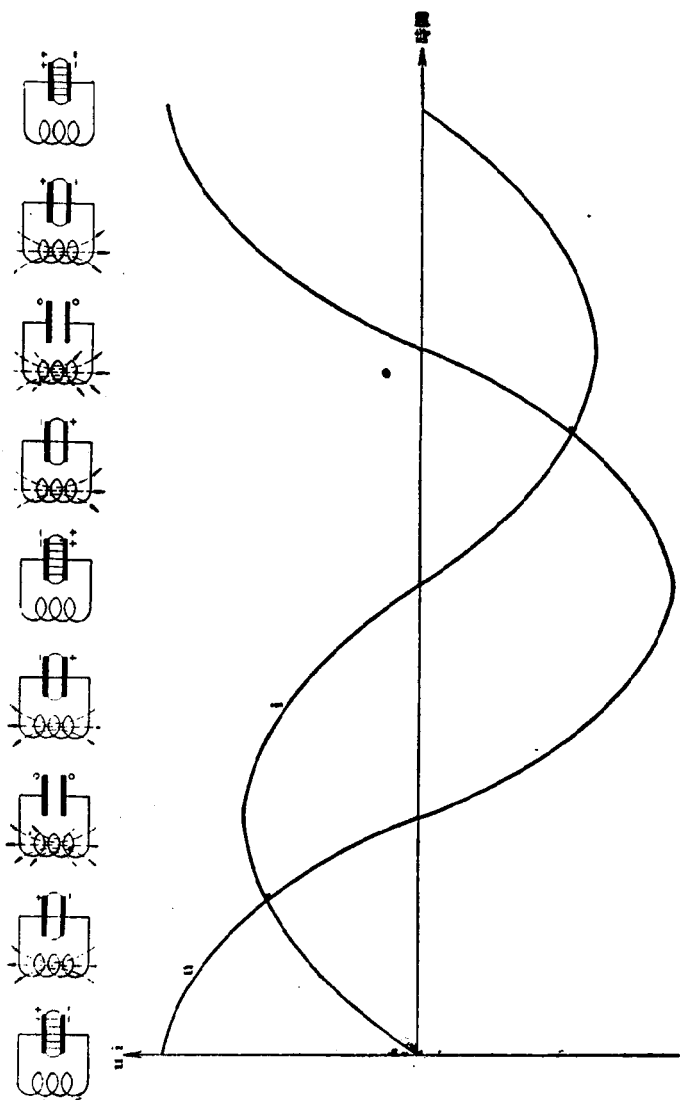


圖 5 振盪迴路裏的電流 i 和電容器兩端的電壓 u 隨時間的變化圖線

就是电感 L 越大, 所發生的感生電動勢就越大, 所以, 它阻碍电流增大和維持电流繼續的時間就越長; 頻率跟 L 的平方根也是成反比的。但是, 頻率跟电容器充电的电势差沒有關係, 可能有人这样想: 假如把电容器充电到 100 伏特, 得到一定的振盪週期, 那麼, 現在把它充电到 200 伏特, 振盪週期会不会長一些呢? 因为从 200 伏特放电到 100 伏特, 要用一定的時間, 而从 100 伏特再放电所用的時間, 不是跟原來充电到 100 伏特時開始放电所用的時間一样嗎? 如果是一样的, 那麼, 充电到 200 伏特時的週期不就比充电到 100 伏特時的週期長出一段時間嗎? 問題就在於: 在这兩種情形下, 当电容器的端电压都是 100 伏特時, 放电情況並不一样。电容器最初从 100 伏特放电時, 电流是零。但是, 电容器最初从 200 伏特放电, 当电压降到 100 伏特時, 綫圈中的电流並不是零, 而是已經達到了某一定值, 所以, 放电率比最初从 100 伏特放电時的放电率要快。在上面所举的机械振動的例子中, 週期跟彈簧最初被拉長的長度是沒有關係的, 从這裏也可以使我們理解到, 电磁振盪的週期或頻率跟最初充电的电压也是沒有關係的。

振盪頻率 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 。如果 L 的單位是亨利, C 的單位是法拉, f 的單位就是赫茲。例如, 电感是 1 亨利的綫圈和电容是 1 微法拉的电容器所組成的振盪迴路, 頻率是 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{1 \times 1 \times 10^{-6}}} \doteq 159$ 赫茲。又例如, 电容是 350 微微法拉, 振盪頻率是 500,000 赫茲, 那麼, 綫圈的电感就应当是 $L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C} = \frac{1}{4\pi^2 25 \times 10^{10} \times 350 \times 10^{-12}} \doteq 2.9 \times 10^{-4}$ 亨利或

290 微亨利。現在，如果用改變電容的方法，在用同一線圈的情形下，把頻率調節到 1,500,000 赫茲，那麼，所需的電容就應當是原來的九分之一，因為這時頻率提高了 3 倍。

根據沒有電阻的假定，電容器經線圈放電所形成的電磁振盪是等幅的。實際上，即使我們不特意加入電阻，線路中也不可避免地要有電阻；因為製成線圈的導線有電阻。振盪電流通過電阻時，要消耗能量，因此，在能的轉變中，總的能量在逐漸地減少，振盪的振幅也要隨着時間而衰減。所以，實際上，這樣的“自由的”電磁振盪永遠是減幅的。振幅衰減的快慢決定於電阻跟電感的比值。如果電阻大到一定程度，放電可能變成完全非振盪性的。等幅振盪和減幅振盪的圖 6 所示。

同樣，機械振動中也不可能沒有摩擦，因此，在上面所舉的那個例子中，物體的振動也一定是減幅的。摩擦足夠大的時候，物體也可能完全不發生來回的振動，而要漸漸地運動到平衡位置。

有電阻時，振盪的頻率要受到電阻的影響。但是，在 $R\sqrt{\frac{C}{L}}$ 比 1 小得多的時候，近似地說，振盪的頻率仍然可以認為是

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}。$$

等幅正弦振盪可以用 $i = I \sin 2\pi ft$ 來表示，式中振幅 I 是一定的， f 是頻率。至於減幅振盪，我們就要用 $i = I(t) \sin 2\pi ft$ 來表示，式中 $I(t)$ 表示振幅是隨着時間而變化的。這樣一個振幅隨着時間變化而頻率是 f 的振盪，在它一切的效用上跟下面的情形相同：無數的等幅正弦振盪，其中接

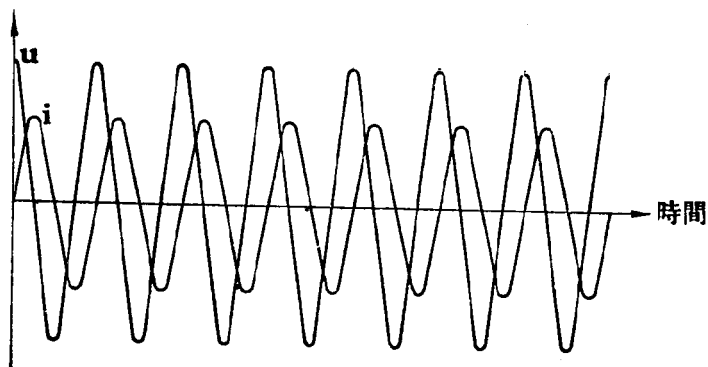


圖 6a 等幅电磁振盪

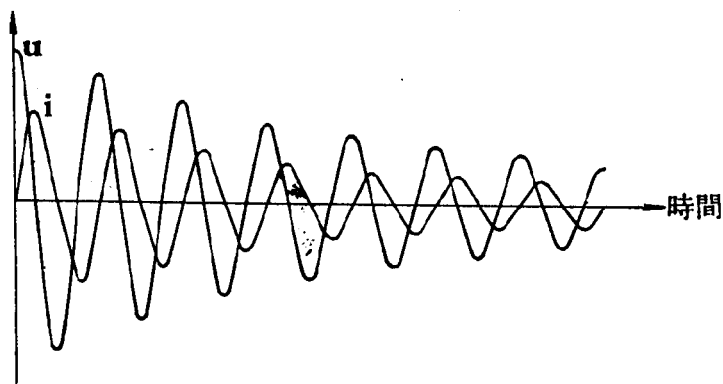


圖 6b 減幅电磁振盪

近於原來的頻率 f 的成分最強，跟 f 相差越大的成分越弱。為組成某一個減幅振盪必須給每一個頻率採用適當的振幅。衰減率越強，離開原頻率 f 的振盪的振幅就越強。衰減率越弱，就有更多的振盪靠近原頻率 f 。這樣，在效用，減幅振盪不只有一個頻率，而是有散佈在 f 兩側（包括 f 在內）的許多頻

率。这叫做“頻譜”。衰減率强的,頻譜寬;衰減率弱的,頻譜窄;完全沒有衰減的,即等幅波,頻譜就縮成一個單一的頻率。

波波夫第一次實驗用的無線電發送機,就是產生這樣的減幅振盪的。經過許多年以後,才得到了等幅振盪。減幅振盪有上面所說的很寬頻譜的短處,所以現在已經不許使用,以免發生干擾。

開閉電路時所發生的火花,時常是振盪性的。這時,導線的电感和導線間的电容形成了振盪迴路。每當開閉電燈時,無線電中要嘎嘎作響,這就是因為減幅振盪頻譜中的某些成分被接收機收下來所造成的。

4. 电容和电感在交变电压下的作用 如果在电容器上加上直流电压,那麼,在綫路裏,在充电時將有瞬時电流。当电容器兩板的电压充电到跟直流电源的电压相等時,就沒有电流了。如果在电容器的兩端加上交变电压,那就有交变电流繼續地通过这个綫路,但平均功率等於零。

为了避免由於發生瞬变現象而把問題變得複雜起來,我們將取以下的特別的開始情形。使电源的电压是正弦形的。先把电容器用電池充电到交变电压的最大值;当交变电压達到最大值時,把电容器联到电源電路上去(圖 7, a 點)。这样,綫路中最初的电流等於零,因为這時电容器兩板的电势差正等於电源的电压。此後,电源的电压開始下降,电容器就經過电源放电。最初,当电压接近於最大值的時候,电压隨時間的改变率非常慢,所以电容器上电荷的改变率即放电的电流很小。当电压下降到差不多等於零的時候,电压隨時間的改变

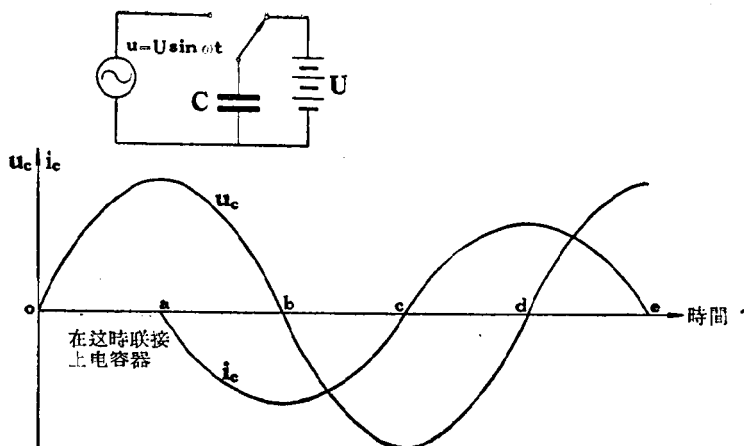


圖 7 电容器在交变电压下的作用

率最快,所以放电的电流也最大。这就是說,当电压是零的時候,电流達到它的最大值。在这一瞬間,电容器上的电荷等於零,因为它的兩板的电势差等於零。在以上这段時間即用 ab 所表示的四分之一週期內,电容器兩板的电势差稍高於电源的电压,所以,电容器經交变电源放电,这时,电容器用儲存在它的电場裏的电能对电源做功。

此後,电源的电压繼續下降,成为負值。这时,电容器就受到电源的充电,不过充电方向跟以上的相反。到負电压達到最大值時,电容器上的电荷也達到最大值,不能繼續充电了,所以,这时电流是零。在这四分之一週期(bc 段)內,电容器受到电源的充电,所以电源做功。

在以後兩個四分之一週期(cd 段和 de 段)內所發生的現象跟上面的類似,只是电压的值是从負的最大值变小,而电容