高等學校交流講義

無 線 電

北京師範大學李公哲編

（內部交流＊僅供參考）

中央人民政府高等教育部教材編審處

無　線　電

書號(8069)

新華書店上海發行所總經售

商務印書館上海廠印刷

一九五四年十月上海第一次印刷　　字數 91,000

印數 1—1,490　　定價 ¥6,100

本科目以講演和實驗相[redacted]於使學生瞭解並掌握收音機及發射機的基本原理和技術，使將来講授中學物理的無線電部份時，有足够的理論水平和技術經驗．對收音機各部作用的解釋不致發生困難．並對中學生課外無線電小組活動以及學校中的廣播設備，具有一定的指導與管理的能力．

在1951年開始編寫本講義時，尚未見到蘇联無線電書籍，更未獲得蘇联師範學院無線電教學大綱的参考．只能主觀地憑個人的經驗来决定章節項目，採取英美書籍，如特耳曼著無線電工程，格萊司格著無線電工程原理，以及克拉夫特實驗室所編的電子電路及電子管等書作参攷．在52年改編時，才從福里斯著普通物理學及克羅波夫著電視工程基礎二書中獲得較多的帮助．

去年（53年）再根據蘇联師範學院教學大綱，對本講義作了第三次的改編。雖已經過三度的使用和修改，對物理系三四年級學生亦雖已收得一定程度的教學效果；但以編者的專業水平，政治水平和教學經驗，尚有待於努力學習和提高，因此本講義中的遺漏和錯誤，一定還是很多的希望兄弟學校的教師同志在使用或参攷中能提出批評和指示，以便及時的加以補充和改正．

無線電目錄

無線電

第一章 交流電路

(1)電流或電壓之有效值.

在含一定電阻之電路中，若交流電流平均每秒所生之熱量和直流電流 1 安培每秒所產生之熱量相等，則此交流電流為 1 安培有效電流（effective current）或稱為 1 安培方根平均值（Root-mean-Square）交流電流在一循環中每秒所產生之平均熱量為 $\frac{1}{T}\int_0^T Ri^2dt$，但再

直流電流在同一電阻中每秒所產生之熱量為 I^2R，故由上述之定義 $I^2R = \frac{1}{T}\int_0^T Ri^2dt$.

故 I = 有效電流 $= \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2dt}$

若所用之電流係正弦波，則 $i = I_m \sin\omega t$ 故

$$\underline{I} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I_m^2 \sin^2\omega t} = \sqrt{\frac{I_m^2}{T}\left[\frac{t}{2}-\frac{1}{4\omega}\sin 2\left(\frac{2\pi}{T}\right)t\right]_0^T} =$$
$$\sqrt{\frac{I_m^2}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \underline{0.707I_m} \text{ ---------(1)}$$

又當交流電 1 安培（有效值）流過壹歐姆經電阻時，其兩端產生之電壓降下謂之一伏脫交流電壓若 $i = I_m \sin\omega t$，則流過 R 電阻時所生之電壓降下為

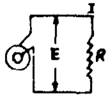
$$e = Ri = RI_m \sin\omega t = E_m \sin\omega t,$$

此式與上述之電流 $i = I_m \sin\omega t$ 同形，故 e 之有效值 E 與其最大值 E_m 之關係亦為

$$\underline{E} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \underline{0.707E_m} \text{ -------(2)}$$

(2)含有純電阻之線路，若有交流電流 $i = I_m \sin\omega t$ 流過，則線路中含純電阻 R 時，其兩端之瞬時電壓為

$$e = iR = I_m R \sin\omega t,$$

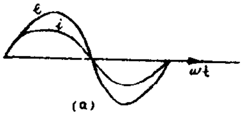


由 $i = I_m \sin\omega t$ 及 $e = I_m R \sin\omega t = E_m \sin\omega t$ 觀之，知 i 與 e 同位相，電流與電壓對時間之關係如圖 (a)所示

此種位相相同之關係，用向量表示，則如圖(b)

(b)

瞬時值，
最大值，
2 有效值，



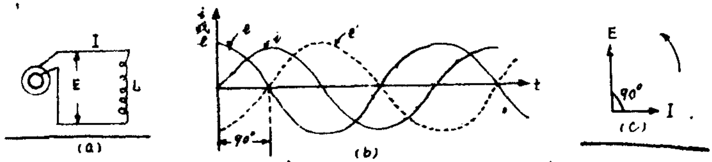
由 $e = iR = I_m R \sin\omega t$

當 $\sin\omega t = 1$ 時 $e = E_m$ $\therefore E_m = I_m R$，

或 $I_m = \frac{E_m}{R}$ $\frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{E_m}{\sqrt{2}R}$ 即 $I = \frac{E}{R}$

式中 I 及 E 皆為有效值

(3)綫路中含有純電感量 L



$\because i = I_m \sin\omega t$，故自感電動勢為 $e' = -L\frac{di}{dt} = -LI_m\frac{d\sin\omega t}{dt}$

$= -LI_m\omega\cos\omega t$，

外加電壓 e 與 e' 正相反，故

$\therefore e = \omega LI_m\cos\omega t = \omega LI_m\sin(\omega t + 90°)$

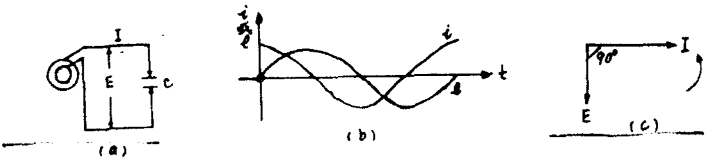
比較 $i = I_m\sin\omega t$ 及 $e = \omega LI_m\cos\omega t$，知在純電感電路中，電壓在電流之前 90°，用向量表示如圖 C 所示。

又由 $e = \omega LI_m\sin(\omega t + 90°)$ 知 $E_m = \omega LI_m$，

故 $I = \frac{E}{\omega L}$ 令 $\omega L = X_L$ $\therefore I = \frac{E}{X_L}$，

若 L 用亨利則 X_L 之數值為歐姆，

(4)綫路中含有純電容量 C，



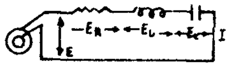
$\because q = Cv = CE_m\sin\omega t$，

$\therefore i = \frac{dq}{dt} = \omega CE_m\cos\omega t = I_m\cos\omega t = I_m\sin(\omega t + 90°)$

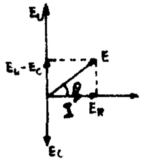
比較 $v = E_m\sin\omega t$ 及 $i = I_m\sin(\omega t + 90°)$

知在純電容電路中，電流在電壓之前90°用向量表示如圖C所示。
又∵ $i = \omega C E_m \cos \omega t$， ∴ $I_m = \omega C E_m$ ∴ $I_m = \frac{E_m}{\frac{1}{\omega C}}$
或 $I = \frac{E}{X_C}$ 式中 $X_C = \frac{1}{\omega C}$ 若C用farad表示，則X_C = 歐姆數。

(5)線路中含有R.L.C.



(a)



在串联電路中，I在R，L，C中皆一樣，故以I為參考軸為最便，今依前述之三關係，繪出電流及電壓之關係圖，如左，E_R與I同位相，E_L在I之前90°，E_C在I之後90°，E_L與E_C相差180°，故其和為E_L-E_C(或E_C-E_L)將E_R與(E_L-E_C)合成得E，此時電壓在電流之前θ度，

$$\vec{E} = \vec{E}_R + \vec{E}_L + \vec{E}_C$$

$$\therefore E = \sqrt{E_R^2 + (E_L - E_C)^2}$$

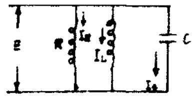
$$\therefore E = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

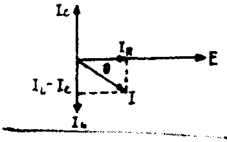
或 $I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{E}{Z}$

式中 $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ 謂之阻抗

又 $\tan\theta = \frac{E_L - E_C}{E_R} = \frac{X_L - X_C}{R}$ $\therefore \theta = \tan^{-1}\frac{X_L - X_C}{R}$

又若R L 及C並联時，其電流 I_R I_L 及 I_C 與電壓E之關係可由下列向量圖明之，(圖中以E為參考軸)





$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} = E\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}$$

$$\frac{I}{E} = \frac{1}{Z} = Y = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}$$

式中Y=導納(*admittance*)

$\tan\theta = \frac{I_L - I_C}{I_R} = \frac{\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}}{\frac{1}{R}}$ $\therefore \theta = \tan^{-1}\frac{\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}}{\frac{1}{R}}$

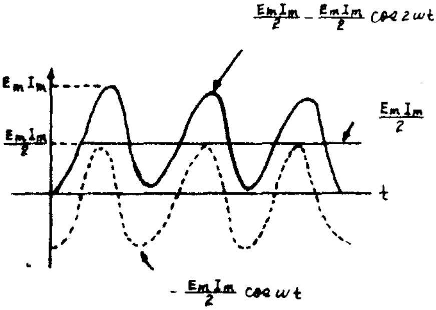
此即線間電流落後於線路電壓之角度。

(6)交流電功率

(a)在純電阻中 $i = I_m \sin\omega t$ $e = E_m \sin\omega t$

故瞬時電力 $p = ie = I_m E_m \sin^2\omega t = \frac{E_m I_m}{2} - \frac{E_m I_m}{2}\cos 2\omega t$,

電力對時間之變化可見下圖

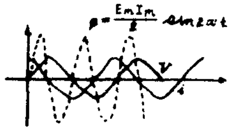


瞬時電功率之頻率為電流或電壓之頻率之兩倍,其電功率最大為$E_m I_m$,最小為零,並無負值.通常對交流電吾人所談之電功率乃平均電功率,其值為

$$P_{av} = \frac{1}{T}\int_0^T I_m E_m \sin^2\omega t\, dt = \frac{E_m I_m}{2} = EI$$

(b)在純電感中 $i = I_m \sin\omega t$, $e = E_m \sin(\omega t + 90^\circ)$

∴瞬時電力 $p = ie = I_m E_m \sin\omega t \sin(\omega t + 90^\circ) = \frac{E_m I_m}{2}\sin 2\omega t$

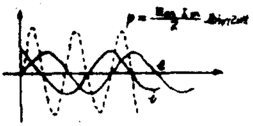


在一循環中,電功率一部為正,一部為負由圖平均電功率顯然為零.或

$$P_{av} = \frac{1}{T}\int_0^T \frac{E_m I_m}{2}\sin 2\omega t\, dt = 0$$

(c)在純電容電路中 $i = I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$, $e = E_m \sin\omega t$

∴瞬時電功率 $P = ie = I_m E_m \sin\omega t \sin(\omega t + 90^\circ) = \frac{E_m I_m}{2}\sin 2\omega t$

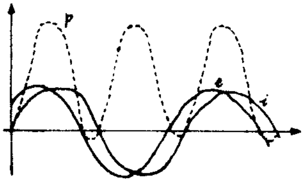


在電容電路中,P_{av}亦等於零,即電源所供給之電功率再還給電源.

(d)若電路中除含有電感,或電容,或兩者皆有之外,又含有電阻時則電流不在電壓之前θ度即落後電壓θ度故 $i = I_m \sin(\omega t + \theta)$

$e = E_m \sin\omega t$ 或 $i = I_m \sin\omega t$, $e = E_m \sin(\omega t + \theta)$

∴瞬時電功率為



$$P = I_m E_m \sin\omega t \sin(\omega t+\theta)$$
$$= \frac{I_m E_m}{2}\cos\theta - \frac{E_m I_m}{2}(\cos 2\omega t)\cos\theta$$
$$+ \frac{E_m I_m}{2}\sin 2\omega t \sin\theta$$

由圖知正半周電功率大負半周電功率，故電源必須供給一部電功率

$$P_{av} = \frac{1}{T}\int_0^T I_m E_m \sin\omega t \sin(\omega t+\theta)\,dt = \frac{E_m I_m}{2}\cos\theta$$
$$= EI\cos\theta$$

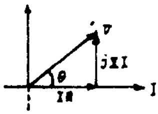
此即負荷實受之電功率也．

前式中之 P_{av} 乃負荷實受之電功率，而 E I 則係電源供給負荷之電功率，此電功率名曰表面電功率，除非在純電阻電路中，實受電功率不等於 E I，設 E I 為一定值，負荷所實受之電功率，則視負荷之性質而定，可由零至 E I，此乃因 $\cos\theta$ 之值之變化而異，$\cos\theta$ 謂之工率因數可由下式定義之．

$$\cos\theta = \frac{真實功率}{表面功率}$$

(7)複數

表示交流電流及電壓的向量用複數表示是非常方便的．



例如圖(a)電壓 V 是由電阻的電壓降下與電感的電壓降下之和用式表之

$$V = IR + jXI = V_R + jV_L \quad j=\sqrt{-1}$$
$$\therefore |V| = \sqrt{V_R^2+V_L^2},\ \theta = \tan^{-1}\frac{V_L}{V_R}$$

凡一量用 j 乘之即逆時針方向轉90° 乘以 −j 則係順時針方向轉90°

(A)向量的相加及相減

j $\quad \dot{V}_1 = a + jb \quad \dot{V}_2 = c + jd \quad$ 則 $\dot{V}_1 \pm \dot{V}_2 = (a\pm c) + j(b\pm d)$

$$= \dot{V} \quad |V| = \sqrt{(a+c)^2+(b+d)^2} \quad \theta = \tan^{-1}\frac{b+d}{a+c}$$

(B)向量的乘除

$$\dot{I} = i_1 + j i_2 \quad \dot{V} = V_1 + jV_2$$
$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V_1+jV_2}{i_1+ji_2} = \frac{(V_1+jV_2)(i_1-ji_2)}{(i_1+ji_2)(i_1-ji_2)} = \frac{(V_1 i_1 + i_2 V_2) + j(i_1 V_2 - V_1 i_2)}{i_1^2+i_2^2}$$

$$=\frac{v_1 i_1+i_2 v_2}{i_1^2+i_2^2}+j\frac{i_1 v_1-v_1 i_2}{i_1^2+i_2^2}=R+jX \quad \theta=\tan^{-1}\frac{X}{R}$$

因為電壓及電流是複數量所以 Z 也是複數量用 $R+jX$ 表之，

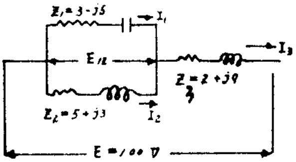
又電壓降下，$V=IZ=(i_1+ji_2)(Y_1+jX_1)=(i_1Y_1-i_2X_1)+$

$$j(i_1X_1+i_2Y_1)=V_1+jV_2$$

$$\theta=\tan^{-1}\frac{V_2}{V_1}$$

例：試求下列電路中各部之電流　　設以 E 為參考軸則

$$E=100+j0$$



Z_1 及 Z_2 之合成阻抗 $Z_{12}=\frac{Z_1\cdot Z_2}{Z_1+Z_2}$

$$=\frac{(3-j5)(5+j3)}{(3-j5)+(5+j3)}=\frac{(3-j5)(5+j3)}{8-j2}$$

$$=\frac{(30-j16)(8+j2)}{8^2+2^2}=4-j1\ \Omega$$

故總阻抗 $=Z_3+Z_{12}$．$Z=Z_{12}+Z_3$

$$=4-j1+(2+j9)=6+j8\ \Omega$$

總電流 $I=\frac{E}{Z}=\frac{100+j0}{6+j8}=6-j8\text{A}=I_3$　　$\therefore |I|=\sqrt{6^2+8^2}=10\text{A}$

$E_{12}=I_{12}Z_{12}(6-j8)(4-j1)=16-j38$ volts

$\therefore I_1=\frac{E_{12}}{Z_1}=\frac{16-j38}{3-j5}=7-j1\text{A}$　　$|I|=\sqrt{7^2+1^2}=\sqrt{50}\text{A}$

$I_2=I-I_1=6-j8-(7-j1)=-1-j7$ amp

$|I|=\sqrt{1^2+7^2}=\sqrt{50}\text{A}$

第二章 線路常數

(1)電阻

(A)廣義之電阻

在直流電路中，電阻之定義及大小可由$R=\frac{E}{I}$決定，式中E表示R兩端之電壓降下，I表示通過R之電流，由此電阻而產生電功率之損失，變為熱能散於空間，每秒所散之熱能為$P=I^2R$。然在同一之電路中，通以交流電流則所產生之損失較通過直流時所產生者為大，有時大至數百倍，在此種情形之下，交流電阻不能由歐姆定律$R=\frac{E}{I}$決定，因由此定律所決定之數值常遠小於實際所測之值此乃因交流所生之電磁場隨時間變動因而產生多種效應造成此種較大之損失，今將各種損失列舉如下：

1. 銅損　此種損失為交直流所共有者。
2. 在導体中或附近導体中所生之渦流損失。
3. 磁性物質中之磁滯損失。
4. 介質損失
5. 由於感應而使鄰近導体吸收電能之損失。
6. 電磁能輻射於空間之損失。
7. 集膚作用之損失。
8. 電暈之損失。

因有此諸損失而使一線路之交流電阻大於由歐姆定律所規定者，此交流電阻又名曰有效電阻其大小可由更普遍之焦耳定律決定之，即

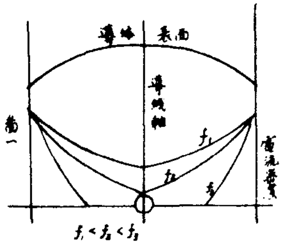
$$R=\frac{P}{I^2}\ \text{歐姆}$$

式中P表示電路中所吸收之電功率　I＝電路中之有效電流，此式不獨對交流實用，即對直流亦為正確，如前所述，$P=I^2R$。故此式乃決定電阻之普遍公式。

(B)集膚作用

直流電流在導体中乃均勻分佈者，但在交流電路中，電流並非均勻分佈，頻率越高，電流越趨集於導体之表面，此現象曰集膚作用。

其原因乃導体中間之電感量大於導体表面者之故．



左圖為在不同之頻率下電流在導体內分佈之情形．

在線圈中，集膚作用更為顯著其情況如圖2

當集膚作用存在時，導体橫断面上電流之分佈情況，乃大部電流受最少磁流環繞之情況．見圖3。

减少集膚作用之法：

①使用扁銅帶：對於同一断面積扁銅帶所呈之電阻較圓導体為小．

②使用銅管，對於同一断面積，銅管各部更有效的被利用、而銅線中部之導体則幾無用．

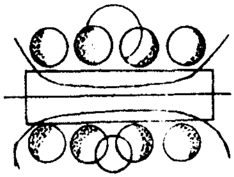
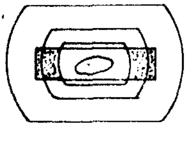


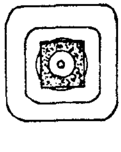
圖2

③使用編織线，編織线乃由多根之絕緣導線所編成，每經過一定距離每根導线兄由中部移到外部，故磁流對每根導线之影响皆同，故每根導线皆呈同一之電阻，又因所用之线甚細，集膚作用亦大為减小．[註] 導体之集膚作用乃下列因素之函數．

圖3



扁條導体電流與分佈之情況



方導体電流之分佈情況

$$t\sqrt{\frac{u\,f}{\rho}}$$

式中 t ＝導線之直徑

f ＝頻率

u ＝導線之透磁率

ρ ＝導線之比電阻

(C)電阻之種類

無线電中之通用之電阻器大概可分為下列兩種

1. 固定電阻器

2.可变電阻器

上兩類電阻每類又可分為：(a)電阻線繞者，(b)用炭，石墨，等導体與粘合物（如橡皮，粘土，膠木等）組成者．

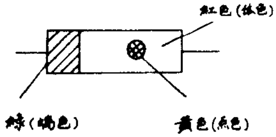
(D)電阻器之定額

一般言之，線繞電阻器多用於電功率消耗較大者，而合成電阻器則用於電功率消耗較小者，消耗電功率大者，必用大瓦特數之電阻器否則有燒毀变質之虞．

(E)電阻之顏色規定

無線電製造業联合會（R.M.A.）曾製定下列法則，以迅速認出電阻器電阻之數值，電阻器之全体顏色表第一位數字端上之顏色表第二位數字，体中之点或帶之顏色表零之個數如左圖．

數字	顏色
0	黑
1	棕
2	紅
3	橙
4	黃
5	綠
6	藍
7	紫
8	灰
9	白



上圖電阻表示250,000 Ω

又電阻界有時用三個顏色帶表出其電阻數值，此時第一帶表第一數值，第二帶表第二位數，第三帶表零之位數．

左圖表示此電阻器之電阻為250,000 Ω

又電阻器上有時另帶有金屬或銀色之帶，金代表電阻數值有加減5%之誤差，銀代表±10%之誤差．

(2)電感

(A)單層線圈之電感量．

電感量乃單位安培之磁力線環遶數，用式表之：

$$L=\frac{N\Phi}{I}\times 10^{-8}\ \text{亨利} \qquad (1)$$

式中N=線圈圈數，

ϕ=由電流I所生之與N環連之磁流。

若線圈之長度較其直徑甚大時，則線圈中通過之磁流為：

$$\phi = AH = A \cdot \frac{4\pi NI}{10\,l} \text{ ----------- } (2)$$

式中$A=\pi r^2$　r=線圈之半徑（cm），l=線圈之長度，（cm）

代(2)入(1)得　$L = \frac{4\pi^2 r^2 N^2}{10^9\, l}$　亨利

或　$L = \frac{4\pi^2 r^2}{10^9} \cdot \frac{N^2}{l^2} \cdot l = \frac{4\pi^2 r^2}{10^9} \cdot n^2 \cdot l$ 亨利

$= \frac{4\pi^2}{10^3} r^2 n^2 l$　微亨利　n=每cm之線圈數

但無線電中所用線圈其長度並不較其直徑甚大，故上式須加較正始可，故　$L = \frac{4\pi^2}{10^3} r^2 n^2 l K$ 微亨利 ------ (3)

式中K　較正因數乃（$\frac{2r}{l}$）之函數，K與$\frac{2r}{l}$之關係可見下圖：

利用(3)式即可求出一定電感量所需之圈數，但利用此式，非常麻煩，因K與l有關係，常須求甚多次方能得正確之結果。

Wheeler 曾導得下列公式

$$L = \frac{r^2 N^2}{9r + 10l}\ \mu H \text{ ----------- } (4)$$

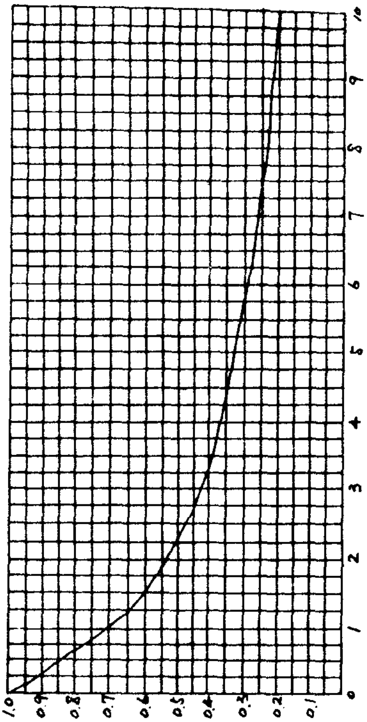
式中r=線圈半徑（英吋），N=總線圈數，l=線圈長度（英吋）只要$\frac{2r}{l}<30$其精確可在1%以內。但在無線電中，L多為已知，吾人常欲求線圈圈數。今令　$N=nl$　n=每吋圈數，代入(4)式，得

$$N = \frac{5L}{n r^2} + \sqrt{\frac{25L^2}{n^2 r^4} + \frac{9L}{r}} \text{ ------- } (5)$$

由此式即可求出所需之圈數，不若前述之法之煩，故甚為有用。

例：設欲繞一300 μH 之線圈，直徑為1吋，每吋繞120圈，問需共繞多少圈？

〔解〕 代入(5)式得$N=139$圈

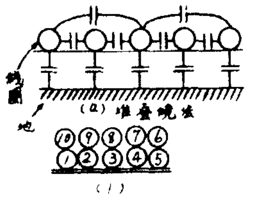


$\frac{線圈直徑}{線圈長度}$

K與線圈直徑與線圈長度之比值之關係

〔B〕多層線圈

單層線圈多用於高頻率共振電路中，多層線圈則多用於較低高頻率之共振電路及高頻率阻流圈(R.F.C)中以得較多之電抗，而阻止高頻率電流通過，多層線圈之主要缺點乃其潛佈容量較單層者甚大，線圈每圈與每圈之間及另外其他圈之間及與地之間均有潛佈容量，其情況如下圖：



在高頻率阻流圈中，潛佈容量愈小愈好，減少潛佈容量有下列數法：

(a)堆疊繞法

圖(1)為普通繞法，一圈與10圈之

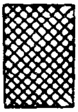
電位差比同層間之電位差大得多，因此位移電流較大，故潛佈容量增加較多，改正之法可將線圈如圖(2)之繞法：

(2)

線圈①與②或③間之電位差均不大，故潛佈容量較小。

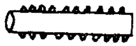
(b)蜂房式線圈

此種線圈每層線圈，線圈與線圈有間隔，且上層線圈與下層線圈之間成一交角，如此上下兩線圈接觸面積較少，故潛佈容量減少。



蜂房式線圈圖

(c)細長線圈，在細長之筒上繞以細線如圖



線圈長可減佈容量，用細線可多繞圈數因而增大電感量。

(d)分段繞法，

將多層線圈繞得狹而深的線圈且分為數段如此潛佈容量，可減至甚少。

[C]有鐵心之線圈

在無線電中，有鐵心之線圈多用於低頻率變壓器及低頻率阻流圈（A.F.C.）中，現在在廣播頻率中，亦有用特製之鐵粉心線圈者，在較高頻率中，用鐵心主要之困難為鐵心損失之增加，此種鐵心損。（主要者為渦流損失）使線圈之表面電阻增大。且鐵心之有效透磁率亦大為減少。頻率愈高，透磁率愈減少，此乃因有渦流發生不使磁力線

深入鉄心故也。有鉄心之綫圈之電感量可用下式表之：

$$L = \mu L_0$$

式中 μ = 鉄心透磁率，L_0=未插入鉄心時電感量，

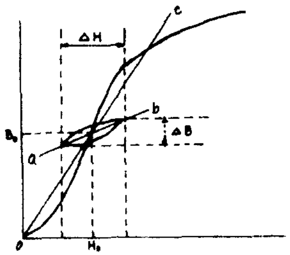
(D)交流透磁率

在無綫電中所用之低頻率变壓器及低頻率阻流圈中，在一般情况之下除直流外尚有較小之交流成分，在此種情况下，吾人所最関心者乃對交流成分所呈之電感量之大小。

若直流之磁化力為H，由此而生之磁流密度為B，則增加△H時，使B增加△B，則交流透磁率μ_Δ可由下式定之，即

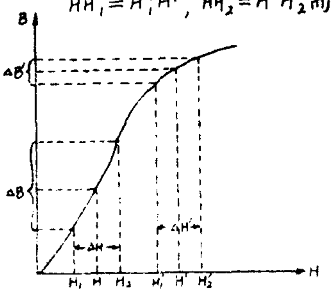
$$\mu_\Delta = \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

當小的交流波加於直流磁化力之上時，則在磁化曲綫上對應一定直流之H_0及B_0之處，生一小磁滯環其情形如下圖所示：



在此圖中△H與交流之振幅之兩倍成正比且對直流之電感量與OC傾度成正比，而對交流之電感量則與ab傾度成正比而ab之傾度則較OC為小，故電感量亦必較小，又交流透磁率隨直流磁化力之增加而变小其情况可由下圖明之：

$HH_1 = H_1'H'$，$HH_2 = H'H_2'$ 而 $\Delta B > \Delta B'$



故 $\mu_\Delta > \mu_\Delta'$

故對H之電感量大於對H'之電感量

因 $L = \frac{0.4\pi N^2 A \mu_\Delta}{l \times 10^8}$ 亨利

而 $L' = \frac{0.4\pi N^2 A \mu_\Delta'}{l \times 10^8}$ 亨利之故

式中N=線圈數，A=斷面積，