

电感计算

海特維西著

國防工業出版社



73.155
422

出版者的話

本书节譯自德文“Induktivitäten”(一书)，主要内容是介绍各种导线在不同排列时的分布电感和各种形状线圈(空心)的电感的计算方法。

书中詳細地闡述了：导线的长短、形状、排列形式与电感的关系；应怎样选择无线电元件的结构才能使分布电感达到最小的程度，以适应高频的要求；在整机设计中导线怎样排列，其分布电感多大，以及怎样去减少分布电感等。书中还闡述了空心线圈的设计计算。

本书特点是：收集的資料系統，计算方法除了用公式外，还輔有图表，可以用图解法快速地求取結果。

本书可作为无线电元件设计和整机线路设计人員的重要参考資料，亦可供大专无线电元件制造与设计专业学生参考。

3/477/02

导言 自感和互感

电流通过每根导线或电路时即在其周围产生磁场，此种磁场的磁力线构成闭合曲线；这些磁力线也穿过电路的面积，磁力线通过电路面积的多寡与电路的形状有关。

流过的电流的变动引起磁通的变动，并感应产生电动势。感应的电动势与加在此电路上的电动势的作用相反。

自感是电路的一种特性，它反抗流过电流的变动。

抵抗电流变动的一种形式表现为反电动势，这种反电动势是由电流变动而引起的。自感因此是电路的一种常数，用字母 L 表示。

电感在技术制上的单位为亨 (H)，毫亨 (mH) 或微亨 (μH)，在绝对制中为厘米。

$$1 \text{ 亨} = 10^3 \text{ 毫亨} = 10^6 \text{ 微亨} = 10^9 \text{ 厘米。}$$

电流在一秒钟的时间内均匀地变动 1 安培时，如在电路内因自感而产生的电压为 1 伏，则此电路的电感为 1 亨。即：

$$U = \mp \frac{\Delta I}{\Delta t} L \text{ (伏),}$$

$$L = U \frac{\Delta t}{\Delta I} \left[\frac{\text{伏秒}}{\text{安}} \right] = (\text{亨})。$$

要建立磁场要做功，磁场消灭时会放出能。电流均匀地变动 1 安培时将感应得 $U \cdot t = L \cdot I$ 伏秒。在这段时间里电流的平均值为 $\frac{1}{2} I$ ；二者乘积为能：

$$A = \frac{1}{2} L I^2 \text{ (瓦秒)}。$$

目 录

导言 自感和互感.....	3
第一章 电感的计算公式.....	4
一、直长导线的自感.....	4
二、单线圈的电感.....	12
三、单层线圈的电感.....	15
四、多层线圈的电感.....	22
第二章 互感和耦合系数.....	27
一、直长导线的互感.....	30
二、线圈之间的互感.....	34
三、单层圆柱形线圈之间的互感.....	38
四、多层线圈之间的互感.....	40
附录.....	42

73.155
422

出版者的話

本书节譯自德文“Induktivitäten”(一书)，主要内容是介绍各种导线在不同排列时的分布电感和各种形状线圈(空心)的电感的计算方法。

书中詳細地闡述了：导线的长短、形状、排列形式与电感的关系；应怎样选择无线电元件的结构才能使分布电感达到最小的程度，以适应高频的要求；在整机设计中导线怎样排列，其分布电感多大，以及怎样去减少分布电感等。书中还闡述了空心线圈的设计计算。

本书特点是：收集的資料系統，计算方法除了用公式外，还輔有图表，可以用图解法快速地求取結果。

本书可作为无线电元件设计和整机线路设计人员的重要参考资料，亦可供大专无线电元件制造与设计专业学生参考。

3/477/02

目 录

导言 自感和互感.....	3
第一章 电感的计算公式.....	4
一、直长导线的自感.....	4
二、单线圈的电感.....	12
三、单层线圈的电感.....	15
四、多层线圈的电感.....	22
第二章 互感和耦合系数.....	27
一、直长导线的互感.....	30
二、线圈之间的互感.....	34
三、单层圆柱形线圈之间的互感.....	38
四、多层线圈之间的互感.....	40
附录.....	42

导言 自感和互感

电流通过每根导线或电路时即在其周围产生磁场，此种磁场的磁力线构成闭合曲线；这些磁力线也穿过电路的面积，磁力线通过电路面积的多寡与电路的形状有关。

流过的电流的变动引起磁通的变动，并感应产生电动势。感应的电动势与加在此电路上的电动势的作用相反。

自感是电路的一种特性，它反抗流过电流的变动。

抵抗电流变动的一种形式表现为反电动势，这种反电动势是由电流变动而引起的。自感因此是电路的一种常数，用字母 L 表示。

电感在技术制上的单位为亨 (H)，毫亨 (mH) 或微亨 (μH)，在绝对制中为厘米。

$$1 \text{ 亨} = 10^3 \text{ 毫亨} = 10^6 \text{ 微亨} = 10^9 \text{ 厘米。}$$

电流在一秒钟的时间内均匀地变动 1 安培时，如在电路内因自感而产生的电压为 1 伏，则此电路的电感为 1 亨。即：

$$U = \mp \frac{\Delta I}{\Delta t} L \text{ (伏),}$$

$$L = U \frac{\Delta t}{\Delta I} \left[\frac{\text{伏秒}}{\text{安}} \right] = (\text{亨})。$$

要建立磁场要做功，磁场消灭时会放出能。电流均匀地变动 1 安培时将感应得 $U \cdot t = L \cdot I$ 伏秒。在这段时间里电流的平均值为 $\frac{1}{2} I$ ；二者乘积为能：

$$A = \frac{1}{2} L I^2 \text{ (瓦秒)}。$$

第一章 电感的计算公式

对于几种不同几何形状的电感可以算出磁力线的数目或磁场的能量。

在下列方程式中特别注意其完整性及准确性。所有方程式所得结果之准确度最小达5%，这对于工程师和物理学家的一般要求已经足够满足了。

由于导线内电流分布是随着频率而变动的，因此电感同样也与电流频率有一定的关系。使人最感兴趣的是在低频时电流均匀地分布在整个截面上的电感值和频率近于无穷大时的电感极限值。后者在任何情况下均小于低频时的电感值，因为高频时的集肤效应使磁力线密度减弱。但这两值之间的差别一般很少。

一、直长导线的自感

开路的自感可认为是封闭电路电感的一部分。

封闭电路的总自感等于各部分的自感之和加每一部分对所有其他部分间的互感之和。

1. 单根直圆导线的自感

若导线的长度为 l (厘米)、直径为 d (厘米)、导磁系数为 μ ，则自感为：

$$L_0 = 2l \left(\ln \frac{4l}{d} - 1 + \frac{\mu}{4} \right) \text{ (厘米)} \quad (1)$$

式中 L_0 是低频时的自感。

对于非磁性物质 (如铜)，则：

$$L_0 = 2l \left(\ln \frac{4l}{d} - 0.75 \right) \text{ (厘米)} \quad (2)$$

对于綫长 $l < 100d$ 的很短导綫，則必須在括弧內增加 $\frac{d}{2l}$ 的数值。在頻率增加时电感趋于极限值。

$$L_{\infty} = 2l \left(\ln \frac{4l}{d} - 1 \right) \text{ (厘米)}. \quad (3)$$

图 1 所示为各种綫长和綫徑的自感极限值。

中頻时的电感为：

$$L = 2l \left(\ln \frac{4l}{d} - 1 + \mu\delta \right) \text{ (厘米)}. \quad (4)$$

式中 δ 是集肤效应因数。

銅的 δ 值系由直徑 d 和頻率 f 决定，其数值可由图 2 中取得。

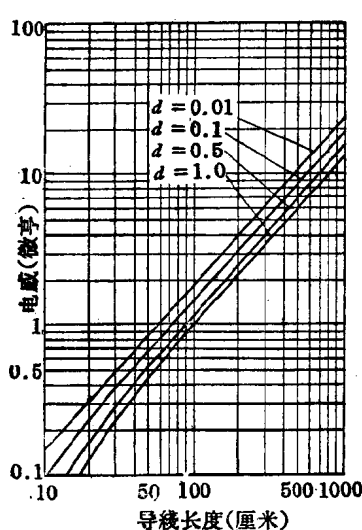


图 1 高频时单根直圆导綫的自感。

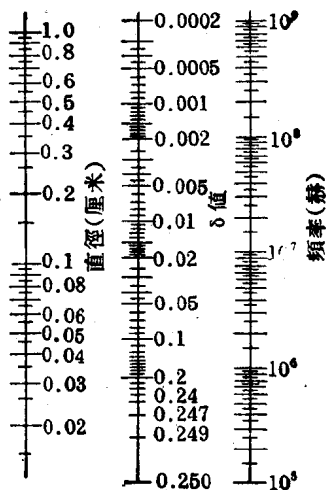


图 2 集肤效应修正因数 δ 作为导綫直徑和頻率的函数。

如要从图 2 中找出銅以外的其他材料的 δ 值，可用一个等效頻率 $f' = f \cdot \frac{\rho_{Cu}}{\rho}$ 来代替实际的頻率 f 。此处的 ρ_{Cu} 是銅的比电

阻。在低頻时 δ 值接近于 0.25，在高頻时 δ 值与頻率的平方成反比，在很高的頻率时趋近于零。电感随頻率的变动相对地來說是小的，集肤效应在頻率很高时使短导线的电感变动約 6%，使长导线的电感变动約 2%。

例 1 試計算一根长度为 3 米，直徑为 5 毫米的銅綫或鋁綫在頻率为 10 兆赫时的电感。銅比电阻 $\rho_{Cu} = 0.0175$ ；鋁比电阻 $\rho_{Alu} = 0.027$ 。

$$\text{等效頻率 } f' = 10^7 \frac{0.0175}{0.027} = 6.46 \times 10^6 \text{ (赫)}。$$

由此得 $\delta_{(銅)} = 0.0053$ (用图 2 图解法求得——譯者)。

把上述数值代入方程式 (4)，于是得銅綫的电感值为：

$$\begin{aligned} L_{(銅)} &= 2 \times 300 \left(\ln \frac{1200}{0.5} - 1 + 1 \times 0.0043^{\oplus} \right) \\ &= 3975.6 \text{ (厘米)}, \end{aligned}$$

同样可得鋁綫的电感值为：

$$\begin{aligned} L_{(鋁)} &= 2 \times 300 \left(\ln \frac{1200}{0.5} - 1 + 1 \times 0.0053 \right) \\ &= 3976.4 \text{ (厘米)}。 \end{aligned}$$

在低頻时的自感值按方程式 (2) 求得：

$$L_0 = 2 \times 300 \left(\ln \frac{1200}{0.5} - 0.75 \right) = 4123.2 \text{ (厘米)}。$$

极限頻率 $f = \infty$ 时的自感按方程式 (3) 計算：

$$L_{\infty} = 2 \times 300 \left(\ln \frac{1200}{0.5} - 1 \right) = 3973.2 \text{ (厘米)}。$$

这些結果說明对所采用的尺寸、材料的品种，实际上对电感值的大小沒有多大影响，自感随頻率变动为 3.65%。

● 0.0043 是 $\delta_{(鋁)}$ ，求法是：在图 2 上根据直徑和頻率的大小，分別在直徑 = 0.5 厘米处和頻率 = 10^7 处两点联成一綫，在图 2 的当中图上的交点 便得到 $\delta_{(鋁)}$ 值 = 0.0043。——譯者

2. 一双导线的电感

每根导线长度为 l (厘米), 直径为 d (厘米), 两线间的距离为 a (厘米) 的一双导线 (来线和去线) 之自感为:

$$L = 4l \left(\ln \frac{2a}{d} - \frac{a}{l} + \mu\delta \right) \text{ (厘米)} \quad (5)$$

δ 即前述之集肤效应因数, 可由图 2 查得。

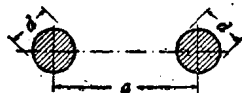


图 3

例 2 试计算频率为 10 兆赫时的一铜制双导线的电感, 此铜制双导线的长度为 3 米, 直径为 5 毫米, 两线距离为 25 厘米。

由图 2 查得 $\delta = 0.0043$, 代入方程式 (5) 得:

$$L = 4 \times 300 \left(\ln \frac{50}{0.5} - \frac{25}{300} + 1 \times 0.0043 \right),$$

$$L = 5430 \text{ (厘米)}。$$

3. 单根导线对地的电感

单根导线的直径为 d , 长度为 l , 张紧与地成水平, 离地距离为 h , 并以地作为回路, 其电感为:

$$L = 2l \left[\ln \left(\frac{l + \sqrt{l^2 + d^2/4}}{l + \sqrt{l^2 + 4h^2}} \right) + \ln \frac{4h}{d} \right] + 2 \left[\sqrt{l^2 + 4h^2} - \sqrt{l^2 + d^2/4} + \mu l \delta - 2h + \frac{d}{2} \right] \text{ (厘米)} \quad (6)$$

一切尺寸皆以厘米为单位, δ 的意义与前一样。

在大多数情况下, 直径与长度比较起来是很小的, 于是上面之公式可简化如下:

$$\text{当 } \frac{2h}{l} \leq 1 \text{ 时: } L = 2l \left(\ln \frac{4h}{d} - P + \mu\delta \right) \text{ (厘米)} \quad (7)$$

$$\text{当 } \frac{l}{2h} \leq 1 \text{ 时: } L = 2l \left(\ln \frac{4l}{d} - Q + \mu\delta \right) \text{ (厘米)} \quad (8)$$

表1 P 值和 Q 值

$\frac{2h}{l}$	P	$2l/h$	Q
0.0	0.0000	0.0	1.0000
0.1	0.0975	0.1	1.0499
0.2	0.1900	0.2	1.0997
0.3	0.2778	0.3	1.1489
0.4	0.3608	0.4	1.1975
0.5	0.4393	0.5	1.2452
0.6	0.5136	0.6	1.2918
0.7	0.5840	0.7	1.3373
0.8	0.6507	0.8	1.3819
0.9	0.7139	0.9	1.4251
1.0	0.7740	1.0	1.4672

P 为 $2h/l$ 之函数, Q 为 $l/2h$ 之函数, 其值可自表 (1) 中确定。

当长度远远超过高度时, 上面的公式可进一步化简, 在此种情况下的电感为:

$$L = 2l \left(\ln \frac{4h}{d} + \mu\delta \right) \text{ (厘米)} \quad (9)$$

例3 直径 $d = 0.5$ 厘米, 长度 $l = 300$ 厘米的一根导线, 与地之距离 $h = 25$ 厘米, 在频率 $f = 10$ 兆赫时之电感为:

按方程式 (6) 计算:

$$L = 3161 \text{ (厘米)}。$$

用化简的方程式 (7) 计算:

$$\underline{L = 3110 \text{ (厘米)}}。$$

化简的方程式 (7) 的误差此时约为 1.6%。

4. 几根平行导线对地的电感

下列公式适用于求位在同一平面内的许多平行导线的电感。此电感由每根导线的自感和导线相互间的互感加在一起而得, 在

这种情况下的准确公式是很复杂的。下列公式的准确度约为1%。

$$L = \left(\frac{L_1 + (n-1)M}{n} - l \cdot k \right) \text{ (厘米)} \quad (10)$$

式中 l —— 导线长度(厘米)。

k —— 为导线数目的函数(见表2)。

L_1 —— 单根接地导线的电感(厘米)，见方程式(7)和(8)。

M —— 两根邻近导线之间的互感，其值可由下式求之：

当 $\frac{2h}{l} \leq 1$ 时：

$$M = 2l \left(\ln \frac{2h}{a} - P + \frac{a}{l} \right) \text{ (厘米)} \quad (11)$$

当 $\frac{l}{2h} \leq 1$ 时

$$M = 2l \left(\ln \frac{2l}{a} - Q + \frac{a}{l} \right) \text{ (厘米)} \quad (12)$$

P 和 Q 的数值可由表1查得。

表2 方程式(10)内的 K 值

n	k	n	k
2	0	11	2.22
3	0.308	12	2.37
4	0.621	13	2.51
5	0.907	14	2.63
6	1.18	15	2.74
7	1.43	16	2.85
8	1.66	17	2.95
9	1.86	18	3.04
10	2.05	19	3.14
		20	3.24

例4 同上面例子，铜线长度 $l = 300$ 厘米，线径 $d = 0.5$ 厘米，导线数目 $n = 4$ ，两线距离 $a = 25$ 厘米，频率 $f = 10$ 兆赫，求其互感：

因 $\frac{2h}{l} = \frac{50}{300} = 0.167 < 1$, 故互感 M 可用方程式 (11) 求得:

$$M = 2 \times 300 \left(\ln \frac{50}{25} - 0.159 + \frac{25}{300} \right)$$

$$M = 600(0.6978 - 0.159 + 0.0834)$$

$$M = 373.3 \text{ (厘米)}$$

对于单根导线对地的电感 L_1 可按方程式 (7) 计算。在上述的例 (3) 已经算出 $L_1 = 3110$ (厘米)。

由此可得:

$$L = \left(\frac{3110 + (4-1)373.3}{4} - 300 \times 0.621 \right)$$

$$L = 872 \text{ (厘米)}。$$

5. 单根长方形直棒的电感

一根长度为 l (厘米) 其长方形截面具有宽度 b (厘米) 和厚度 c (厘米) 的直棒, 在低频时之电感为:

$$L = 2l \left(\ln \frac{2l}{b+c} + 0.5 + 0.2235 \frac{b+c}{l} \right) \text{ (厘米)} \quad (13)$$

当 $l > 50(b+c)$ 时方程式的最后一项可以略去。

例 5 $l = 300$ 厘米, $b = 0.8$ 厘米, $c = 0.25$ 厘米。

$$L = 600 \left(\ln \frac{600}{1.05} + 0.5 + \dots \right)$$

$$L = 600(6.323 + 0.5)$$

$$L = 4094 \text{ (厘米)}。$$

6. 单根同轴电缆的电感

低频时单根同轴电缆的电感为:

$$L_0 = 2l \left(\ln \frac{D}{d} + 0.25 \right) \text{ (厘米)} \quad (14)$$

式中 d —— 内导线的外径(厘米)。

D —— 外导体的内径(厘米)。

例6 電纜長度 $l = 300$ 厘米，內導線直徑 $d = 0.2$ 厘米，外導體內徑 $D = 1$ 厘米，其電感為：

$$L_0 = 2 \times 300 \left(\ln \frac{1}{0.2} + 0.25 \right)$$

$$L_0 = 1116 \text{ (厘米)}。$$

7. 具有長方形截面的雙導線之電感

雙導線之長度為 l (厘米)，導線平均距離為 a (厘米)，導線寬度為 b (厘米) 而其厚度為 c (厘米)，其電感為：

$$L_0 = 4l \left(\ln \frac{a}{b+c} + 1.5 - \frac{a}{l} + 0.2235 \frac{b+c}{l} \right) \text{ (厘米)} \quad (15)$$

例7 雙導線之長度 $l = 300$ 厘米，導線的相互距離 $a = 25$ 厘米，導線寬度 $b = 0.8$ 厘米，導線厚度 $c = 0.25$ 厘米，其電感為：

$$L_0 = 4 \times 300 \left(\ln \frac{25}{0.8+0.25} + 1.5 - \frac{25}{300} + 0.2235 \times \frac{0.8+0.25}{300} \right)$$

$$L_0 = 5508 \text{ (厘米)}。$$

8. 圓簍狀導體的電感

長度為 l (厘米) 線徑為 d (厘米) 的 n 根導線並聯並排列成圓形的 (半徑為 ρ 厘米) 簍狀導體，其電感為：

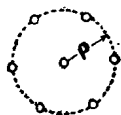


圖 4

$$L = 2l \left[\ln \frac{2l}{\sqrt[4]{0.3894 \cdot d \cdot n \cdot \rho^{n-1}}} - 1 \right] \text{ (厘米)} \quad (16)$$

例8 由六根 ($n = 6$) 長度 $l = 300$ 厘米，直徑 $d = 0.5$ 厘米的導線構成半徑 $\rho = 12.5$ 厘米的圓簍狀導體之電感為：

$$L = 2 \times 300 \left[\ln \frac{2 \cdot 300}{\sqrt[4]{0.3894 \times 0.5 \times 6 \times 12.5^5}} - 1 \right]$$

$$L = 1970 \text{ (厘米)}。$$

二、单线圈^①的电感

1. 单个圆线圈^②的电感

线圈径为 d (厘米), 线圈直径为 D (厘米) 的圆线圈之电感为:

$$L = 2\pi D \left(\ln \frac{8D}{d} - 2 + \mu\delta \right) \text{ (厘米)} \quad (17)$$

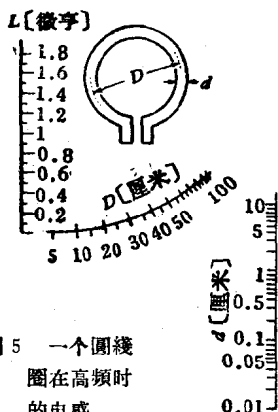


图5 一个圆线圈在高频时的电感

例9 圆线圈的直径 $D = 50$ 厘米, 导线直径 $d = 1$ 厘米, $f = 10$ 兆赫, $\mu = 1$, 其电感为:

$$L = 2\pi 50 \left(\ln \frac{8 \times 50}{1} - 2 + 1 \times 0.0023 \right)$$

$$L = 1253 \text{ (厘米)}。$$

2. 由金属扁带做成的圆线圈之电感

由宽度为 b (厘米) 且厚度和宽度来比可以略去不计的金属扁带做成的圆线圈, 其电感为:

$$L = 2\pi D \left(\ln \frac{4D}{b} - 0.5 \right) \text{ (厘米)} \quad (18)$$

例10 圆线圈直径 $D = 50$ 厘米, 带宽 $b = 5$ 厘米, 其电感为:

$$L = 2\pi 50 \left(\ln \frac{4 \times 50}{5} - 0.5 \right)$$

① 此处的线圈并非指绕组。注意两者的差别。——译者

② 原文为 5 系印错应为 8。——译者

③ $\delta = 0.0023$ 之求法见图 2 和例 (1) 的译注。——译者

④ 若用图 5 求此电感更为方便, 求法是: 在 $D = 50$ 厘米处和 $d = 1$ 厘米处两点联成一线, 则便可在 L (微亨) 刻度图上得出 $L = 1.253$ 微亨即等于 1253 厘米。——译者

$$\underline{L = 1320 \text{ (厘米)}}。$$

3. 一个具有管状截面的圓綫圈的电感

若管的內徑为 d_1 (厘米), 外徑为 d_2 (厘米), 圓綫圈的平均直徑为 D (厘米) 則在低頻时之电感为:

$$L_0 = 2\pi D \left(\ln \frac{8D}{d_2} - 1.75 - \frac{d_1^2}{2(d_2^2 - d_1^2)} + \frac{d_1^4}{(d_2^2 - d_1^2)} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} \right) \quad (\text{厘米}) \quad (19)$$

趋近极限頻率时, 方程式可近似地写为:

$$L_\infty = 2\pi D \left(\ln \frac{8D}{d_2} - 2 \right) (\text{厘米}) \quad (20)$$

例11 管之 $d_1 = 0.5$ 厘米, $d_2 = 1$ 厘米, 圓綫圈直徑 $D = 50$ 厘米, 在高頻时其电感为:

$$\underline{L_\infty = 2\pi \times 50 \left(\ln \frac{8 \times 50}{1} - 2 \right) = 1250 \text{ 厘米。}}$$

在低頻时由方程式 (19) 可算出电感为:

$$\underline{L_0 = 1305 \text{ (厘米)}}。$$

4. 由圓导綫做成的正方形綫圈的电感

导綫直徑为 d (厘米), 边长为 s (厘米) 的正方形綫圈之电感为:

$$L = 8s \left(\ln \frac{2s}{d} + \frac{d}{2s} - 0.774 + \mu\delta \right) (\text{厘米}) \quad (21)$$

例12 正方形綫圈 $s = 50$ 厘米, $d = 1$ 厘米, 由銅制成的 ($\mu \doteq 1$), 在頻率為 10 兆赫时其电感为:

$$L = 8 \times 50 \left(\ln \frac{2 \times 50}{1} + \frac{1}{2 \times 50} - 0.774 + 1 \times 0.0023 \right) \\ \underline{L = 1538 \text{ (厘米)}}。$$

5. 由圓导綫做成的长方形綫圈的电感

长方形綫圈边长为 s_1 (厘米) 和 s_2 (厘米), 对角綫长为 g (厘米), 导綫直徑为 d (厘米) 其电感为: