

# 射频电路中的电感

方 涌

(船舶重工集团公司 723 所, 扬州 225001)

**摘要** 介绍了几种射频电路中常见的电感形式, 给出了其电感值和  $Q$  值的计算公式, 可用于工程中设计和分析电感, 并阐述了几种电感的实际应用。

**关键词** 射频电路 电感元件 低通滤波器

## 0 引 言

频率在 2 GHz 以下的射频电路中, 分布参数尺寸往往太大, 在许多场合不便使用。集总元件体积小, 因而在有源与无源电路中有广泛的应用。然而电感是非标准的元件, 很难找到电感元件的器件手册。如何制作高质量电感元件是射频电路的一个重要问题。

## 1 射频电路中电感元件的实现

### 1.1 直金属带电感

直金属带和导线段可用来实现低电感, 典型值可达 2 ~ 3 nH, 其电路形式见图 1。

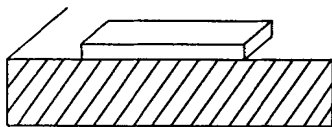


图 1 直金属带电感

金属带的电感量  $L$  可由下式计算:

$$L = 2l \{ \ln[l / (w + t)] + 0.5 + (w + t) / (3l) \} \quad (1)$$

式中:  $l$  为导体长度;  $w$  为导体宽度;  $t$  为导体厚度。

金属带的  $Q$  值计算公式为:

$$Q = 2 fL / R \quad (2)$$

$$R = KR_s l / [2(w + t)] \quad (3)$$

$$K = 1.4 + 0.127 \ln(w / 5t) \quad (4)$$

式中:  $R$  为金属带的电阻;  $f$  为工作频率;  $R_s$  为导电材料的表面电阻;  $K$  为修正因子。

### 1.2 单圈电感

单圈电感值一般小于 10 nH。其形状如图 2 所示。

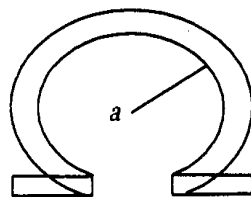


图 2 单圈电感示意图

单圈电感的计算公式如下:

$$L = 1.257a \cdot \{ \ln[a / (w + t)] + 0.078 \} \quad (5)$$

式中:  $a$  为半径;  $w$  为线宽;  $t$  为导体厚度。

单圈电感的  $Q$  值计算公式与直金属带电感的  $Q$  值计算公式相同。但  $R = KR_s \pi a / (w + t)$ 。如果线宽远小于圈的直径, 则可按直金属带电感公式算。

单圈电感可应用于阻抗匹配电路和小型化的微波滤波器中, 与交指电容器形成谐振电路。图 3 为一个使用单圈电感的三阶低通滤波器, 该滤波器具有最平坦响应, 截止频率为 4 GHz, 右侧为测试曲线, 实测与计算值比较吻合。

### 1.3 平面螺旋电感

在需要较大电感量时, 常采用多圈平面螺旋

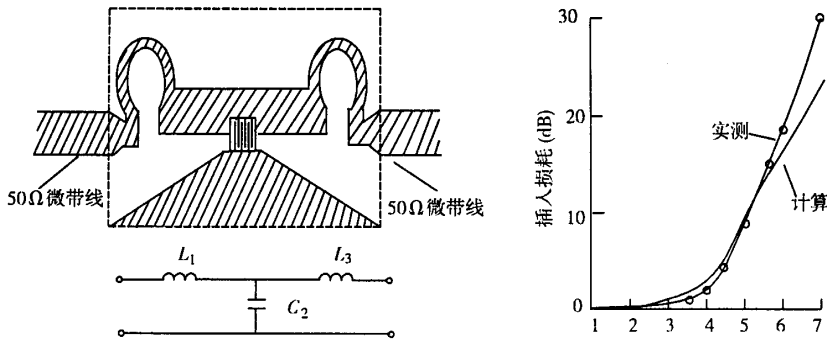


图 3 使用单圈电感的三阶低通滤波器

线,平面螺旋电感的电路形式见图 4。平面螺旋电感值的计算:

$$L = \mu n^2 d_a c_1 [\ln(c_2 / ) + c_3 \cdot + c_4 \cdot ^2] / 2 \quad (6)$$

式中:  $\mu$  为磁导率;  $n$  为螺旋圈数;  $d_a$  为内外直径

的算术平均值;  $= d_{out} - d_{in} / (d_{out} + d_{in})$  表示电感的“空心”程度;  $c_1 \sim c_4$  是电感的几何形状系数,由表 1 定义。该公式可以达到 2%~3% 的准确度。

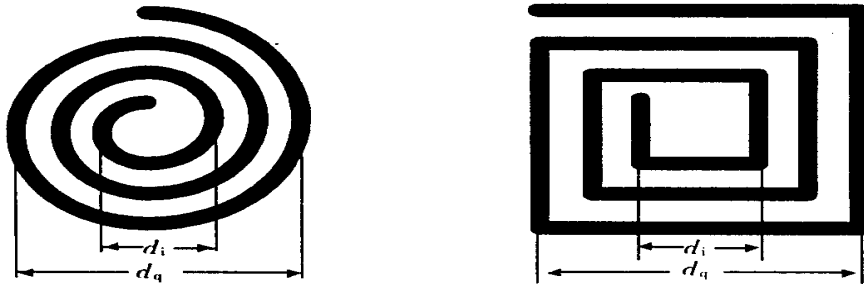


图 4 平面螺旋电感

表 1 平面螺旋电感的几何形状系数

形状	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$
方形	1.27	2.07	0.18	0.13
六边形	1.09	2.23	0	0.17
八边形	1.07	2.29	0	0.19
圆形	1.00	2.46	0	0.20

平面螺旋电感的  $Q$  值计算公式与直金属带电感的  $Q$  值计算公式相同,  $R = KR_s l / w$ , 这里的  $K$  由下式计算:

$$K = 1 + 0.333(1 + s/w)^{(-1.7)} \quad (7)$$

由平面螺旋电感的  $Q$  值计算公式看出, 要想提高  $Q$  值, 螺旋线的宽度  $w$  应尽可能大, 外径尺寸  $d_0$  应尽可能小。当外径尺寸  $d_0$  相同时,

圆形平面螺旋电感比方形的平面螺旋电感的  $Q$  值约高出 10%, 但其电感量约小 20%。为了使平面螺旋电感具有最大的  $Q$  值, 应取  $d_o / d_i = 0.24$ 。在制作射频扼流圈时, 用方形平面螺旋电感比圆形平面螺旋电感要省面积。

以上 3 种电感如果考虑到金属带和地板之间的电容, 上述计算电感公式还需乘上修正因子

$K_g$ :

$$K_g = 0.57 - 0.145 \ln(w/h) \quad (8)$$

式中:  $h$  为衬底厚度;  $(w/h) > 0.05$ 。

### 1.4 圆形金属线电感

一般集成电路的引线多为圆形金属线, 在 HMIC 中, 键合线是用来连接有源和无源电路元件的, 而在 MMIC 中键合线则用来实现 MMIC

与外界的连接。其电感值由下式估算：

$$L = 5.08 \times 10^{-3} l [\ln(l/d) + 0.386] \quad (9)$$

式中： $l$  为圆形金属线的长； $d$  为圆形金属线的直径。

### 1.5 螺管电感

空心螺管电感有着较好的  $Q$  值，可以工作到 2 GHz 的频率。但需手工绕制，大量制造时不易保证其一致性。

根据以下公式：

$$P = L/N \quad (10)$$

$$D_w = 0.7P \quad (11)$$

$$D_t = D_f + D_w \quad (12)$$

$$L_0 = 2.45 \times 10^{-9} \times (D_t N)^2 / L \quad (13)$$

式中： $P$  为螺距； $L$  为螺管长度； $N$  为匝数； $D_w$  为导线直径； $D_t$  为螺管外径； $D_f$  为螺管内径； $L_0$  为单位长度的电感量。

设：

$$X = 1/[1 + 0.45 D_t/L - 0.05(D_t/L)^2]$$

$$S = 1 - 2L[2.31 \lg(1.73 D_w/P) +$$

$$0.366 \times (1 - 2.5/N + 3.8/N)] / (D_t N X)$$

可得螺管电感值  $L$  为：

$$L = L_0 X S \quad (14)$$

对于已知电感，我们可以选定导线的直径和螺管的内径，用迭代法解一个关于  $N$  的一元方程组来决定  $N$ 。

设： $V = L/D_t$

$$Y = [0.301468V + 0.493075]V +$$

$$0.227858/V$$

则螺管电感  $Q$  值为：

$$Q = MD_t F^{1/2} [1 - (2F \sqrt{LYD_t})^2] \quad (15)$$

其中：

$$0.2 < V < 1 \text{ 时, } M = [(58.635V - 171.154)V + 200.674]V + 0.089708;$$

$$1 < V < 5 \text{ 时, } M = [(0.75118V -$$

$$9.49018)V + 42.506]V + 68.1191.$$

频率在 2 GHz 以下，经常用螺管电感取代四分之一波长的短路线做射频扼流电感，以减少电路面积。用线径较粗的漆包线绕成的空心螺管电感，适用于大功率功放中。

### 1.6 传输线电感

频率在 2 GHz 以上，集总元件很难实现高  $Q$  值的电感，这时可用微波传输线来近似。图 5 为传输线电感等效电路图。

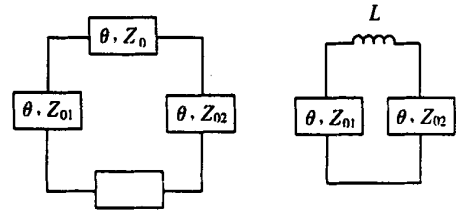


图 5 传输线电感等效电路

图 5(b) 可用图 5(a) 来近似，通过对 2 个电路的  $S$  参量分析可以得到：当电学长度很小时 ( $\sin \theta \approx \theta$ ) 时， $S_{11} = 2fL/Z_0$  ( $Z_0$  为特性阻抗)， $S_{22} = (Z_{01} \cdot Z_{02})^{1/2}$ ， $S_{12} = 1/8$ 。

事实上，传输线电感在 800 MHz 至数 GHz 的频率上有着广泛的应用。典型的应用为微波低通滤波器。根据上述计算公式设计了一个五阶 LC 切比雪夫低通滤波器，纹波为 0.01 dB，截止频率 900 MHz，串联电感线都用传输线电感。实际滤波器的指标与理论值其本符合。

## 2 结束语

本文给出了 6 种射频电路的电感电路形式和近似设计公式，并给出了实际应用的例子。6 种电感计算公式虽为近似公式，但精度较高，实际设计与理论计算比较符合，可用于工程中。