

# 2024 中国研究生创“芯”大赛·EDA 精英挑战赛

## 赛题指南

### 一、赛题名称：

片上无源器件的智能综合

### 二、命题企业：

国家集成电路设计自动化技术创新中心

### 三、赛题主席：

金洲（中国石油大学（北京））

### 四、赛题背景：

无线通信的迅猛发展，极大地推进了高频电路的研究。射频集成电路（Radiofrequency integrated circuits, RFICs）作为通信系统中必不可少的部件，随着频率的不断升高也有着越来越严格的要求，如何设计低成本、小尺寸、高质量的射频集成电路一直是研究的热点。无源器件是射频电路的重要组成部分，通常而言，无源器件的拓扑结构不固定，几何参数与其电气性能的关系不明确，这给设计带来了巨大的挑战，尤其是在高频电路中，传统的依赖等效电路的设计方法已经很难适用。作为片上无源器件必不可少的元件，螺旋电感、变压器在混频器、振荡器、功率放大器

等电路中起着至关重要的作用，高性能的片上螺旋电感及片上变压器对于电路性能有着显著改进。

作为模拟电路中最大的基本元件，螺旋电感及变压器的形状会极大地影响电路布局。它们通常由许多几何参数所定义，成千上万组几何参数中能同时满足设计规范和要求的寥寥无几。这种与建模相反的工作被称为综合。螺旋电感和变压器的综合一直是无源器件设计中的一个重大挑战。在毫米波电路中，螺旋电感及变压器尺寸和布局的综合是射频集成电路设计自动化的关键。

为了解决该问题，机器学习辅助优化（Machine-learning-assisted optimization, MLAO）方法已逐渐应用于螺旋电感的综合。与基于知识的方法不同，MLAO 方法学习的是输入和输出之间的映射关系，因此不需要过多的物理机理。一般来说，该方法需要利用全波仿真软件获取一定数量的样本，然后通过人工神经网络（Artificial neural network, ANN）、高斯过程回归（Gaussian process regression, GPR）、支持向量机（Support vector machines, SVM）或任何其他机器学习算法训练以获得代理模型。

## 五、赛题描述：

参赛者需利用出题方给定的模型进行无源器件（电感和变压器）的自动综合。出题方将会提供关于电感的模型供参赛者验证

自动综合算法的有效性和鲁棒性，所有模型的输入参数为几何参数，输出参数为对应无源器件的电参数。模型的具体内容见本章第四节。本题的考核标准为无源器件自动综合的高效性、可迁移性。

### 5.1 问题一：单端电感的自动综合

参赛者利用出题方提供的单端电感的模型，需解决以下情况的综合问题：

**最小化面积：**

在大多数场景下，螺旋电感的可用面积是受到限制的。因此，设计人员必须在有限的面积内达成指标，用到的面积越小越好。面积 $A$ 计算方法见附录。

本题需要参赛者设计一种综合算法，用于综合小面积单端四边螺旋电感，它要满足如下指标：工作频率 $f_{\text{target}} = 40 \text{ GHz}$ ，目标电感值为 $L_{\text{target}}$ ，同时还需要满足 $Q_{40\text{GHz}} > Q_{\text{target}} = 10$  且  $f_{\text{SRF}} > 80 \text{ GHz}$ 。即需要综合的问题为

$$\begin{aligned} & \min(A) \\ \text{s. t. } & \left\{ \begin{array}{l} \text{几何约束} \\ \frac{|L_{40\text{GHz}} - L_{\text{target}}|}{L_{\text{target}}} < 0.05 \\ Q_{40\text{GHz}} > Q_{\text{target}}, f_{\text{SRF}} > 80\text{GHz} \end{array} \right. \end{aligned}$$

## 5.2 问题二：可变线宽、可伸缩的差分电感的自动综合

在实际的电路设计中可用的面积往往并不是正多边形，因此规则的正多边形电感不利于空间分配，容易造成空间上的浪费。考虑到这一点，赋予传统螺旋电感结构更多的维度从而改变它的形状。但是会显著提高综合的难度。

本题要求参赛者充分考虑问题一提出的综合算法的鲁棒性和高效性，将其拓展至可变线宽、可伸缩的差分电感的自动综合问题。解决问题一的综合问题。

请各位参赛者注意，问题二不会提供可变线宽、可伸缩的差分电感的模型，仅提供模型的输入输出格式（具体格式见 3.4），参赛者须根据出题方提供的格式进行算法的适配。

## 5.3 问题三：变压器的自动综合

片上变压器综合问题一直是困扰射频电路设计人员的难题。传统的变压器设计需要设计人员具有丰富的经验和代价高昂的全波电磁仿真迭代，十分耗时。与电感相比，变压器参数众多且相互影响，并且设计工程中需要考虑的指标也更多，因此变压器的高效快速的自动综合非常具有挑战性。

本题要求参赛者充分考虑提出的电感的综合算法，将其拓展成片上变压器的自动综合算法，解决下面的综合问题：

## 1. 单频点最大化可用增益

变压器结构采用对称叠层四边形，综合目标为 50GHz 频点处初次级线圈感值  $L_p = L_s = L_{target}$ ，初次级线圈品质因数  $Q_p > Q_{target}$ ,  $Q_s > Q_{target}$  耦合系数  $k = k_{target}$ ，寻求工作频点处最大可用增益  $G_{max}$  最大化。即该综合问题表述为：

$$\begin{aligned} & \max(G_{max}) \\ \text{s. t. } & \left\{ \begin{array}{l} \text{几何约束} \\ \frac{|L_p - L_{target}|}{L_{target}} < 0.05 \\ \frac{|L_s - L_{target}|}{L_{target}} < 0.05 \\ Q_s > Q_{target} \\ Q_p > Q_{target} \\ \frac{|k - k_{target}|}{k_{target}} < 0.1 \\ A < 80 \mu m \times 80 \mu m \end{array} \right. \end{aligned}$$

请各位参赛者注意，问题三片上变压器的模型，仅提供模型的输入输出格式（具体格式见 3.4），参赛者须根据出题方提供的格式进行算法的适配。

## 5.4 问题指标说明和提交要求

### 1. 问题一：

#### (1) 几何参数指标

几何参数是定义螺旋电感器形状和尺寸的关键因素，问题一中涉及的几何参数包括：

- a) 线宽 (Line Width) : 螺旋电感中金属线的宽度, 单位为微米 ( $\mu\text{m}$ )。
- b) 线距 (Line Spacing) : 相邻金属线之间的距离, 单位为微米 ( $\mu\text{m}$ )。
- c) 电感内径 (Inductance Inner Diameter) : 螺旋电感的内径, 单位为微米 ( $\mu\text{m}$ )。
- d) 电感匝数 (Turns) : 螺旋电感的匝数, 即绕组的圈数。

表格 1 模型样本的取值范围

参数	范围
线宽/ $\mu\text{m}$	1.5-8
线距/ $\mu\text{m}$	1.5-3.0
电感内径/ $\mu\text{m}$	10-100
最大面积/ $\mu\text{m}^2$	100 $\times$ 100
圈数	1-4

## (2) 性能参数指标

性能参数是衡量螺旋电感器电气性能的关键指标, 问题一中涉及的性能参数包括:

- a) 电感值(L): 电感的感值, 单位为亨利(H)或微亨利( $\mu\text{H}$ )。
- b) 品质因数(Q): 描述电感性能的一个重要参数, 表示电感的“质量”, 无单位。

- c) 自谐振频率 ( Self Resonant Frequency ) : 电感达到谐振状态的频率, 单位为吉赫兹 ( GHz )。
- d) 面积 ( Area ) : 电感的总面积, 单位为平方微米 (  $\mu\text{m}^2$  )。

## 2. 问题二:

### (1) 几何参数指标

- e) 几何参数是定义螺旋电感器形状和尺寸的关键因素, 问题二中涉及的几何参数有:
  - f) 最大线宽 ( max Line Width ) : 螺旋电感中金属线的最大宽度, 单位为微米 (  $\mu\text{m}$  )。
  - g) 最小线宽 ( min Line Width ) : 螺旋电感中金属线的最小宽度, 单位为微米 (  $\mu\text{m}$  )。
  - h) 线距 ( Line Spacing ) : 相邻金属线之间的距离, 单位为微米 (  $\mu\text{m}$  )。
  - i) 电感内径 ( Inductance Inner Diameter ) : 螺旋电感的内径, 单位为微米 (  $\mu\text{m}$  )。
  - j) 电感匝数 ( Turns ) : 螺旋电感的匝数, 即绕组的圈数。
  - k) 伸缩率 ( Deform Ratio ) : 可变螺旋电感内径长宽的比例。

表格 2 样本的取值范围

参数	范围
线宽/ $\mu\text{m}$	1.5-8
线距/ $\mu\text{m}$	1.5-3.0
电感内径/ $\mu\text{m}$	10-100
圈数	1-4
伸缩率	0.1-1.0

## (2) 性能参数指标

性能参数是衡量螺旋电感器电气性能的关键指标，问题二中涉及的性能参数包括：

- a) 电感值(L): 电感的感值,单位为亨利(H)或微亨利( $\mu\text{H}$ )。
- b) 品质因数(Q): 描述电感性能的一个重要参数,表示电感的“质量”,无单位。
- c) 自谐振频率(Self Resonant Frequency): 电感达到谐振状态的频率,单位为吉赫兹(GHz)。
- d) 面积(Area): 电感的总面积,单位为平方微米( $\mu\text{m}^2$ )。

## 3. 问题三:

### (1) 几何参数指标

几何参数是定义变压器形状和尺寸的关键因素,问题三中涉及的几何参数包括:

初级线圈内径 ( Primary Coil Inner Diameter )：初级线圈内圈的直径，单位为微米 (  $\mu\text{m}$  )。

次级线圈内径 ( Secondary Coil Inner Diameter )：次级线圈内圈的直径，单位为微米 (  $\mu\text{m}$  )。

初级线圈线宽 ( Primary Coil Line Width )：初级线圈导线的宽度，单位为微米 (  $\mu\text{m}$  )。

次级线圈线宽 ( Secondary Coil Line Width )：次级线圈导线的宽度，单位为微米 (  $\mu\text{m}$  )。

中心错位距离 ( Center Offset Distance )：初级线圈和次级线圈中心之间的水平偏移距离，单位为微米 (  $\mu\text{m}$  )。

开口系数：可利用开口系数和线圈宽度计算开口宽度，单位为微米 (  $\mu\text{m}$  )。

初/次级线圈伸缩率 ( Deform Ratio )：变压器线圈内径长宽的比例。

表格 3 样本的取值范围

参数	范围
初级线圈内径/ $\mu\text{m}$	40-300
初级线圈线宽/ $\mu\text{m}$	2-20
初/次级线圈伸缩率	0.1-1
次级线圈内径/ $\mu\text{m}$	40-300
次级线圈线宽/ $\mu\text{m}$	2-20

开口系数/ $\mu\text{m}$	2-5
中心错位距离/ $\mu\text{m}$	0-50

## (2) 性能参数指标

性能参数是衡量变压器电气性能的关键指标，本赛题中涉及的性能参数包括：

- a) 初次级线圈电感值 ( $L_p$ 、 $L_s$ )：初次级线圈的感值，单位为亨利 (H) 或微亨利 ( $\mu\text{H}$ )。
- b) 初次级线圈品质因数 ( $Q_p$ 、 $Q_s$ )：描述变压器性能的一个重要参数，表示初次级线圈的“质量”，无单位。
- c) 自谐振频率 (Self Resonant Frequency)：变压器达到谐振状态的频率，单位为吉赫兹 (GHz)。
- d) 耦合系数 ( $k$ )：衡量初次级和次级线圈之间能量传输效率的参数，通常介于 0 到 1 之间，无单位。
- e) 最大可用增益 ( $G_{\text{max}}$ )：表示变压器能够实现的最大信号增益，单位分贝 (dB)。
- e) 面积 (Area)：电感的总面积，单位为平方微米 ( $\mu\text{m}^2$ )，计算方式见附录。

## 4. 提交要求：

- (1) 原工程项目代码
- (2) 服务器上可执行文件 (\*.exe)
- (3) 一份设计报告，说明算法设计和测试效果

其中对于可执行文件的要求是：

- a) 命名：problem\_<i>.exe
- b) Linux (Centos7) 服务器环境可以正常运行
- c) 输出结果命名：result\_<i>.mat
- d) 程序的执行示例：problem\_1.exe /xxx/xxx/test\_input.mat  
/xxx/xxx/result\_1.mat

备注：<i>指的是问题序号，test\_input.mat 为出题方用于综合的目标。

## 六、评分标准：

### 6.1 评分总则

- e) 总分 100 分，其中问题一总分 30 分，问题二总分 30 分，问题三总分 40 分。
- f) 评分总则：参赛选手提交的程序，每一问执行三次不同的目标组合的综合问题。每次综合结束，对所有参赛者提供程序的表现情况进行排名，得到每队参赛者的分值。

## 6.2 排名规则说明

排名按照达到性能要求比较时间和达到截止时间比较性能两种方式进行。每次综合,出题方会设置一个目标值(即问题一、二中的 $A$ 和问题三中的 $G_{max}$ )。若在截止时间内达到目标性能并满足所有约束的参赛者,按照其运行的等效时间进行排名,时间越短,得分越高。若在截止时间内未达到目标性能或未能满足所有约束条件的参赛者,出题方将会计算其性能分,并进行排名,性能分越高,得分越高,对于性能分为 0 的参赛者,该次综合得 0 分。

### 1. 性能分计算说明

性能分按其性能得分并减去违背约束得分获得。每个问题出题方设置一个得分区间,优于此区间的记 1 分,低于此区间的记 0 分,在此区间内的按照比例进行赋分。

例如:某一最大化问题的得分区间为 10-20,若某队的性能为 15,记 0.5 分,若某队性能为 9,记 0 分,若为 22,记 1 分。

#### (1) 对于约束违反的处理:

若几何约束有违反,则该次综合记 0 分。

若其余性能约束有违反按照下面的细则进行扣分:

a) 若实际约束值与设定约束值相对误差在 20%以内,则扣除

性能得分对应百分比的分值：

问题一：

违反约束个数	1	2	3
扣除百分比	10%	30%	50%

问题二：

违反约束个数	1	2	3	4
扣除百分比	10%	20%	30%	40%

问题三：

违反约束个数	1	2	3	4	5	6
扣除百分比	10%	20%	30%	40%	50%	60%

b) 若实际约束值与设定约束值相对误差在 20% 以外，则该次综合记 0 分。

备注：1) 对于面积约束，长宽有一项不满足则认为违背约束。

例如：某队的性能得分为 0.5 分，若在问题一中有一条约束违反且在 20% 的相对误差内，则扣除  $0.5 * 10% = 0.05$  分，若在问题一中有一条约束违反且超过 20% 的相对误差，则性能得分记为 0 分。

## 6.3 额外说明

1. 对于使用单线程的参赛者等效时间 = 综合执行时间 + 模型调用次数 \* 计时时间。其中问题一和问题二中每次调用提供的模型计时 2.5 分钟，问题三中每次调用计时 5 分钟。对于采用了多进程的参赛者，按等效时间 = 综合执行时间 +  $\frac{\text{总调用次数} * \text{调用计时} * 1.2}{\text{进程数}}$  计算时间。

2. 参赛者参赛和评分测试均在组委会提供的算力平台上进行，程序的进程/线程数不得超过 16。

3. 出题方将根据赛题服务器的实际配置情况，在后续 Q&A 环节给出具体的运行时长限制。

## 七、附录：

### 7.1 平面螺旋电感

电感是射频电路的重要组成部分，振荡器、混频器等电路都包含了电感。而平面螺旋电感具有结构简单、易集成的优势，在集成电路中有着广泛的应用。传统的平面螺旋电感结构如下图所示，主体形状为正多边形，例如正四边形、正六边形、正八边形等，描述传统平面螺旋电感的几何参数有线宽、线距、内径以及圈数等，根据电感拓扑结构是否对称分为单端螺旋电感和对称螺旋电感。

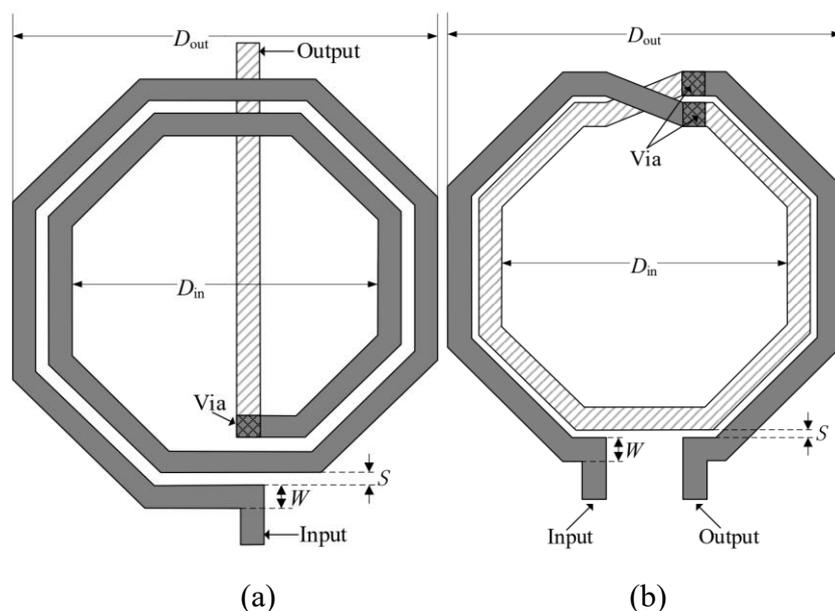


图1 正多边形螺旋电感 (a)单端螺旋电感 (b)差分螺旋电感

## 7.2 可变螺旋电感

平面螺旋电感结构简单，复杂度低，但在实际的电路设计中可用的面积往往并不是正多边形，因此规则的正多边形电感不利于空间分配，容易造成空间上的浪费。为了提高版图面积利用率，可以使用一种可变螺旋电感。

本赛题所考虑的可变螺旋电感的结构如图 2 所示，相比于传统螺旋电感，螺旋电感的形状由 $D_{inh}$ 和 $D_{inw}$ 同时控制，定义伸缩率

$$\gamma = \frac{D_{inh}}{D_{inw}}$$

当 $\gamma = 1$ 时，此时的螺旋电感退化为传统的正多边形电感，当 $\gamma > 1$ 时，此时的螺旋电感处于拉伸状态，电感的面积与金属总长度均进一步增加，同时金属占整个面积的比重减小；当 $\gamma < 1$ 时，此时的螺旋电感处于压缩状态，电感的面积与金属总长度均进一步减小，同时金属占整个面积的比重增大。此时，螺旋电感的面积为：

$$A = D_{outw} \times D_{outh}$$

图 3 展示了处于拉伸状态的单端螺旋电感以及处于压缩状态的对称螺旋电感。此外，当金属宽度由外向内依次缩减时可以有效提升电感的品质因数，因此采用可变线宽替代恒定线宽，线宽由 $W_{max}$ 和 $W_{min}$ 决定。

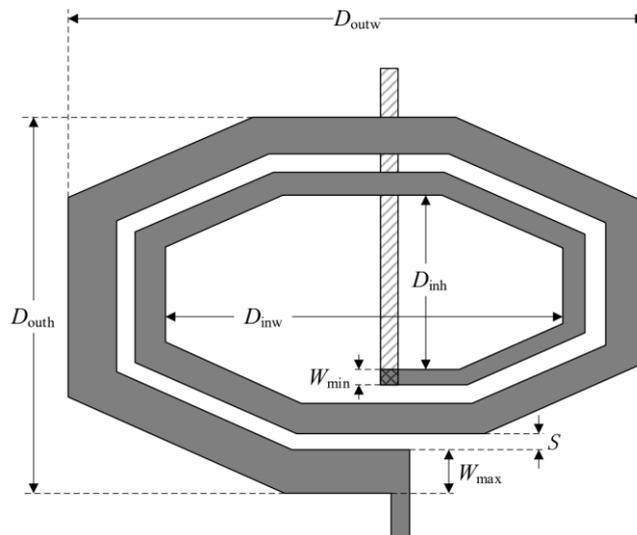


图2 可变螺旋电感的结构

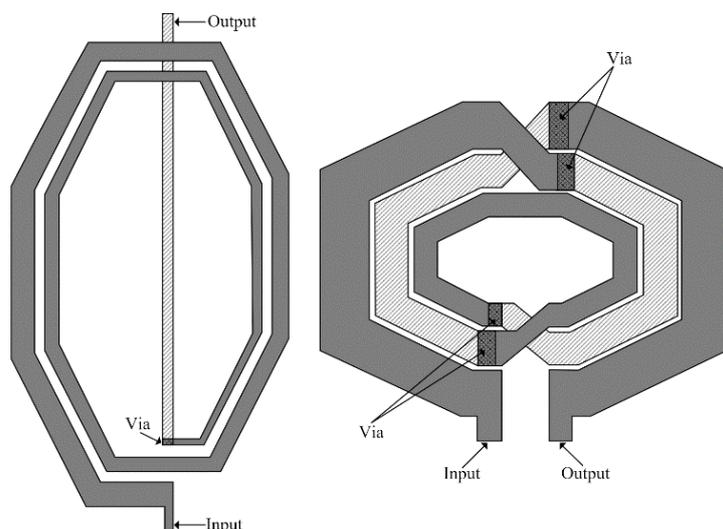


图3 拉伸的单端螺旋电感与压缩的对称螺旋电感

可变螺旋电感的形状可以由最大线宽 $W_{\max}$ 、最小线宽 $W_{\min}$ 、线距 $S$ 、圈数 $N$ 、内径宽度 $D_{in}$ 和伸缩率 $\gamma$ 描述。通过调整螺旋电感的伸缩率就可以轻松改变它的形状从而使它可以适应任意矩形区域，这将为布局工作带来极大的便利。

### 7.3 片上螺旋电感的感值曲线及品质因数曲线

随着电路工作频率的提升，片上螺旋电感的寄生效应变得愈发严重。尤其是在毫米波频段，寄生电容的影响会导致自谐振现象，如图 4 所示。通常，片上螺旋电感的感值曲线包括两个部分：平滑段和谐振段。电路设计者通常希望在目标工作频段内，电感值的波动尽可能小，即使谐振频率尽可能远离工作频段。

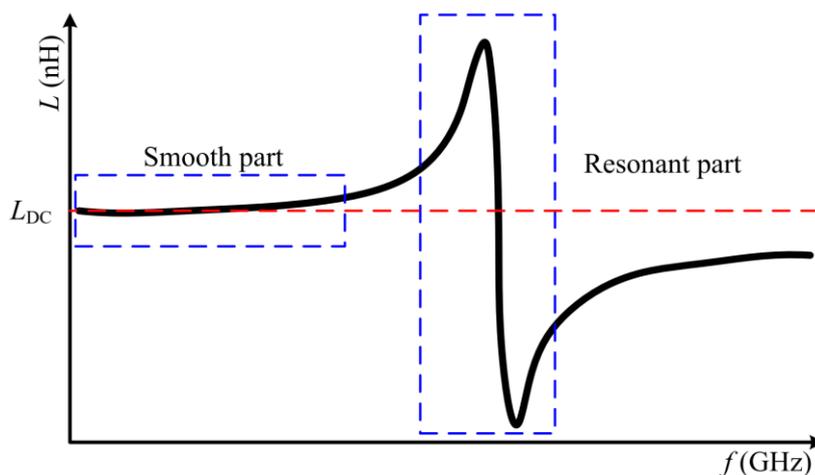


图4 L 曲线

图 5 显示了片上螺旋电感的品质因数曲线，这条曲线通常可以分为  $Q>0$  和  $Q<0$  两部分， $Q=0$  处的频率即为自谐振频率。通常情况下，我们希望在电路的工作频段内， $Q$  值不仅能保持在大于 0 的范围内，而且尽可能地高。

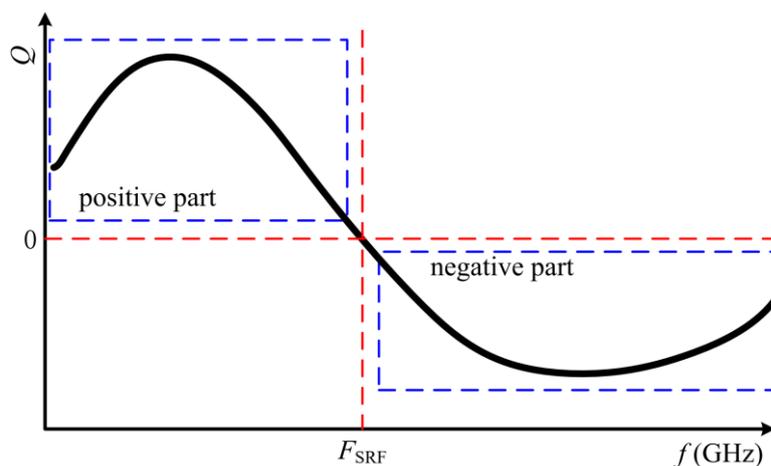


图5 Q 曲线

## 7.4 片上变压器

片上无源变压器是射频设计中的重要元器件，可以在射频

集成电路中实现阻抗匹配、信号耦合、功率传输、直流隔离等功能，它对于减小元件数目和芯片面积有着重要作用，尤其在差分电路中，变压器的分支巴伦具有极其特殊的重要地位。片上无源变压器是在片上无源电感的基础上发展起来的，螺旋结构是实现片上无源电感和变压器最常用的结构，片上螺旋变压器由两个螺旋电感耦合而成，通常由多个几何参数定义。

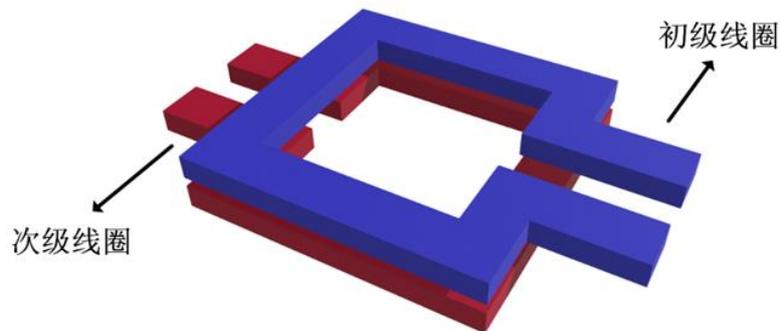


图6 1:1 叠层式片上变压器

图 6 所示的结构是一个典型的 1:1 叠层式片上变压器，其包括初级线圈和次级线圈两部分。与片上螺旋电感类似，对于任意一级线圈来说，其几何参数主要包括线圈内径、线宽、线距（对于 1:1 片上变压器来说线距即端口间距）、线圈伸缩率等。

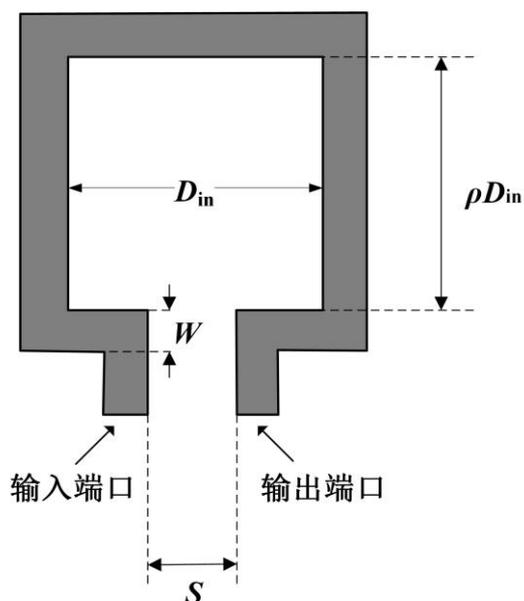


图7 片上变压器线圈几何参数

除了常规的线圈几何参数外，在实际设计时还会将片上变压器两级线圈的中心偏移量纳入考量之中，以控制片上变压器的耦合系数，如图 8 所示。通常来说，两级线圈中心偏移量越大，相互之间的磁耦合越小，则产生的互感越小。

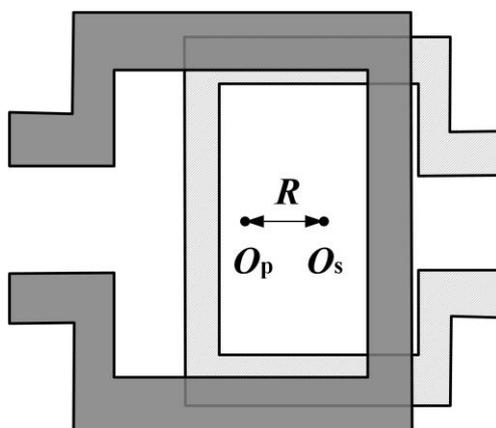


图8 片上变压器初次级线圈中心偏移量

## 7.5 片上变压器面积计算方法

本节提供了一种片上变压器面积计算的参考方法，如图所示。其中， $O_p$ 和 $O_s$ 分别表示变压器初级线圈和次级线圈的内圈多边形的几何中心； $R$ 为两级线圈几何中心的欧氏距离； $W_p$ 和 $W_s$ 分别为初级线圈和次级线圈的线宽； $D_p$ 和 $D_s$ 分别为初级线圈和次级线圈的原始内径； $\rho$ 为线圈伸缩率。不考虑线圈端口长度对面积的影响，片上变压器面积的计算公式可以表示如下：

$$Area = (W_p + W_s + R + \frac{\rho}{2}(D_p + D_s)) \cdot (2W_p + D_p)$$

需要说明的是，片上变压器面积的计算方式不唯一，本节仅提供一种参考计算方法。本赛题所评估的面积为片上变压器除去两级线圈输入输出端口后剩余部分的面积大小(即图 9 中粗虚线黑框内的部分)。

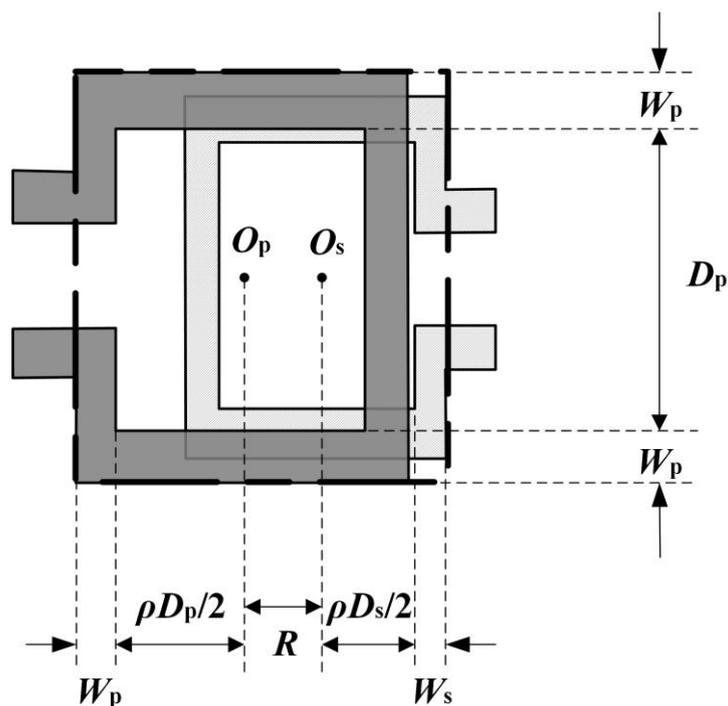
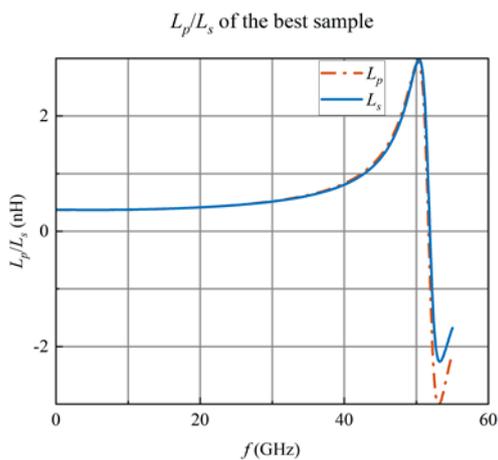


图9 片上变压器面积计算方法参考示意图

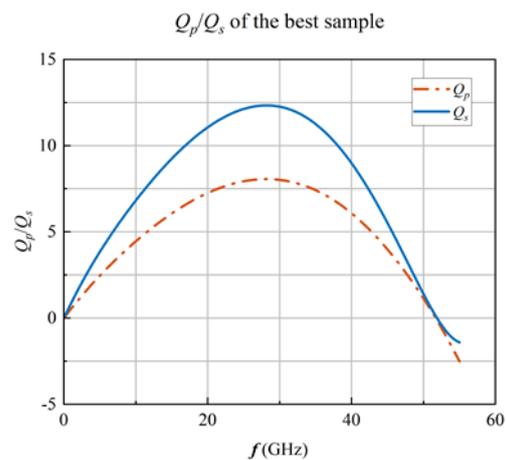
## 7.6 片上变压器的性能参数曲线

片上变压器究其本质是两个或多个相互耦合的电感线圈耦合在一起，基本功能是将交变电流从初级线圈经电磁感应耦合到次级线圈，并且在传输过程中产生尽可能小的功率损耗。本文仅对两个线圈的变压器进行研究，变压器的性能参数与电感的性能参数相似，但也有不同。片上变压器的结构更加复杂，也带来更多的寄生效应，性能描述也更复杂。片上电感的性能一般只需要用电感值、品质因数和自谐振频率就可以表示，但片上变压器除

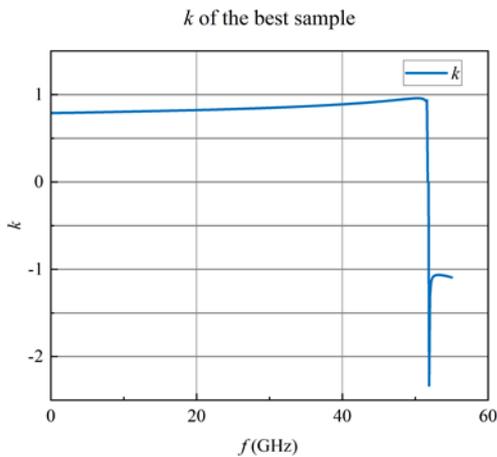
了初次级线圈各自的感值和品质因数，还要考虑电感间的耦合。片上变压器的主要电学性能参数包括初次级自感，互感，初次级品质因数，耦合系数，最大可用增益( Maximum Available Gain )，插入损耗( Insert Loss )，带宽( Bandwidth )线圈匝数比和自谐振频率。这些性能不都是独立存在的，有着复杂的联系。设计目标是使电路尽可能地满足某些目标，不会也不可能满足全部性能指标，需要根据具体电路进行均衡设计。例如，在保持匝数固定的同时，设计一个具有大占地面积的变压器将允许金属导体具有更大的宽度和横截面，较大的导体横截面可以减少欧姆损耗。然而，由于与衬底的重叠面积较大，寄生电容随之增加，这也导致了带宽下降。因此，为了实现平面结构变压器的高 Q 值，必须牺牲自谐振频率和面积。



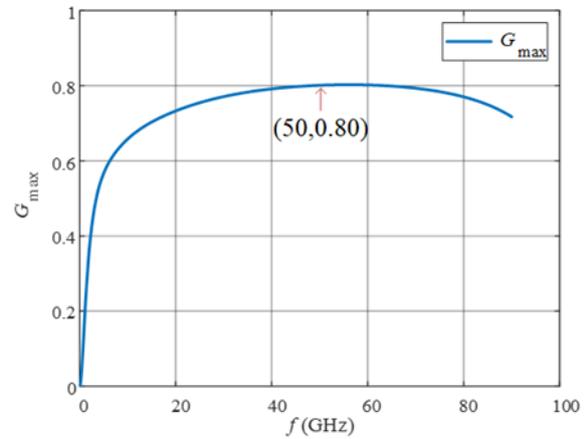
(a) 样本典型初次级线圈感值



(b) 样本典型初次级品质因数



(c) 样本典型耦合系数



(d) 样本典型最大可用增益

图10 1:1 叠层式片上变压器典型性能曲线

图 10 为一个典型 1:1 叠层式片上变压器典型性能曲线，图 10 (a) 为初次级电感感值，图 10 (b) 为初次级品质因数，图 10 (c) 为变压器耦合系数，图 10 (d) 为变压器最大可用增益。

## 八、参考文献：

- [1] F. Passos et al., "PACOSYT: A Passive Component Synthesis Tool Based on Machine Learning and Tailored Modeling Strategies Towards Optimal RF and mm-Wave Circuit Designs," in IEEE Journal of Microwaves, vol. 3, no. 2, pp. 599-613, April 2023.
- [2] M. G. Bernardo, R. C. S. Freire, A. A. L. de Souza and É. C. A. Mélo, "Scalable Modeling and Synthesis of On-Chip Spiral

Inductors," 2019 4th International Symposium on Instrumentation  
Systems, Circuits and Transducers (INSCIT), Sao Paulo, Brazil,  
2019 .

\*本赛题指南未尽问题，见赛题 Q&A 文件