

摘要

若要从 LDC 获得出色性能，需要适合测量的传感器。本应用手册涵盖了为特定应用设计传感器时需要考虑的参数。具体的关注领域包括基于 PCB 的传感器的物理布线特性、传感器电容器的注意事项以及最大限度地减小或补偿寄生效应的技术。

内容

1 传感器	2
1.1 传感器频率.....	2
1.2 R_S 和 R_P	3
2 电感器特性	4
2.1 电感器形状.....	4
2.2 匝数.....	5
2.3 多层.....	7
2.4 电感器尺寸.....	11
2.5 自谐振频率.....	13
3 电容器特性	17
3.1 电容器 R_S 、 Q 和 SRF.....	17
3.2 寄生电容的影响.....	17
3.3 电容器放置.....	17
4 物理线圈设计	18
4.1 使用 WEBENCH 的示例设计过程.....	18
4.2 PCB 布局建议.....	21
5 总结	22
6 参考文献	22
7 修订历史记录	22

插图清单

图 1-1. 传感器频率与电感和电容之间的关系.....	2
图 1-2. R_S 和 R_P	3
图 2-1. RLC 模型.....	4
图 2-2. 采用圆形螺旋电感器的轴向检测.....	4
图 2-3. 用于旋转编码的梯形电感器.....	5
图 2-4. 扁平圆形螺旋电感器.....	5
图 2-5. 18mm 圆形电感器的电感与匝数之间的关系.....	6
图 2-6. 多层电感器结构 (串联)	7
图 2-7. 四层串联传感器的简化电气模型 (忽略 R_P)	8
图 2-8. 双层传感器的互感 (忽略 R_P)	8
图 2-9. 多层并联线圈原理图.....	9
图 2-10. 多层并联电感器.....	10
图 2-11. R_P 与归一化目标距离之间的关系.....	11
图 2-12. 电感与归一化目标距离之间的关系.....	11
图 2-13. 非圆形线圈的传感器“直径”	12
图 2-14. 电感器中的寄生电容分量.....	13
图 2-15. 电感 T 与频率之间的关系.....	14

图 2-16. 使用 VNA 测量 SRF.....	14
图 2-17. 绕线电感器寄生电容.....	15
图 2-18. 向外缠绕方法.....	15
图 2-19. 蜂房式线圈的绕组交叉.....	15
图 2-20. 向外缠绕和绕组交叉组合.....	16
图 4-1. WEBENCH 线圈设计器工具.....	18
图 4-2. 最大限度地减少传感器附近的铜.....	21

商标

WEBENCH® is a registered trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 传感器

LDC 检测应用使用由一个电感器与一个电容器并联组成的传感器来形成一个 L-C 谐振腔振荡器。

1.1 传感器频率

从以下公式可以看出，电感和电容决定了传感器频率：

$$f_{SENSOR} (Hz) = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

图 1-1 展示了通过电容器和电感器值实现的多种传感器频率设置。例如，5MHz 传感器可以使用 1nF 的电容器和大约 25μH 的电感器。更多有关如何构建该图的信息，请参阅 Analog Wire 博客文章 [电感式检测：传感器频率限制](#)。

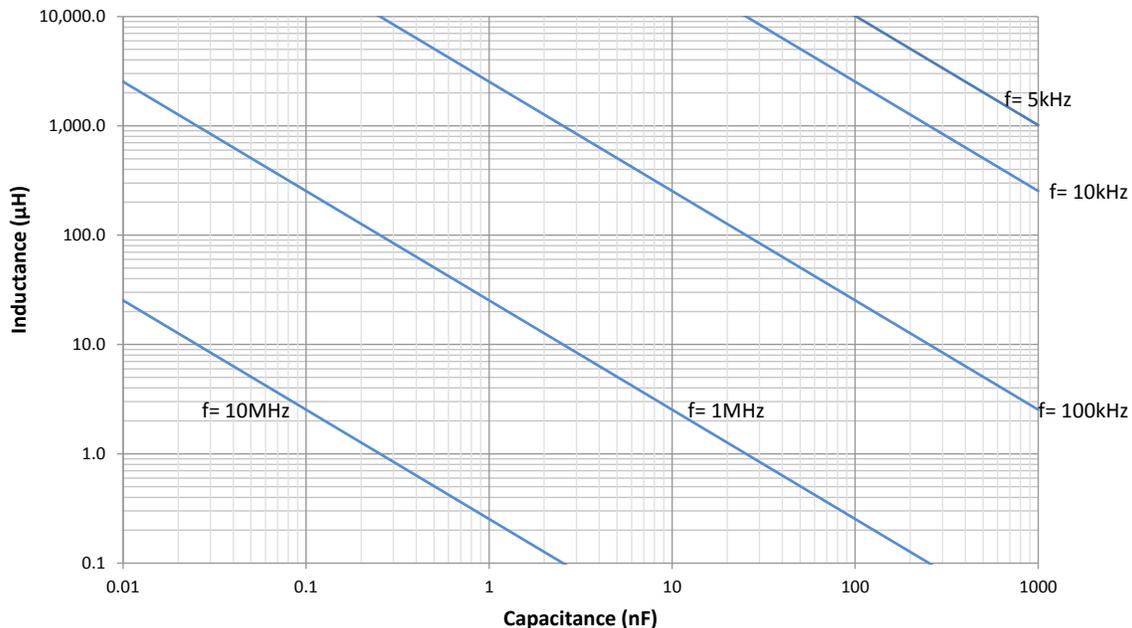


图 1-1. 传感器频率与电感和电容之间的关系

TI 的 LDC 器件在很宽的频率范围内工作，对于 LDC1312 系列和 LDC1612 系列器件，该范围为 1kHz 至 10MHz。LDC0851 可在高达 19MHz 的频率下工作，LDC211x 和 LDC3114 可支持高达 30MHz 的传感器频率。

务必记住，工作频率会因目标位置而变化。通常，当目标最接近传感器时，传感器频率最高。最高频率不能超过 LDC 的指定工作范围。

1.2 R_S 和 R_P

由于用于构造电感器的导体中存在串联损耗，电感式传感器本质上是有损耗的。这些电阻损耗主要有两个来源 - 目标或其他附近导体中耗散的能量，以及电感器导电绕组的分布式损耗。测量 R_P 时，目的是仅测量目标上的涡流损耗。传感器中的分布式损耗降低了 LDC 的测量动态范围。即使在使用 LDC131x 或 LDC161x 器件测量电感（仅 L）时，较高的损耗也会降低测量精度。

用户可以通过两种方式之一以电气方式表示该损耗 - 作为串联模型或并联模型，如图 1-2 所示。在串联表示中， R_S 越高，寄生损耗就越多，LDC 需要将更多的能量驱动到传感器中以维持振荡。与并联模型相比，该模型能够更好地匹配系统的物理特性。

并联模型更容易确定给定传感器峰值电压所需的传感器电流。对于并联模型，很明显，如果 R_P 过低，则会使传感器振荡衰减。如果 R_S 变得过高（这与 R_P 变得过低相同），LDC 可能无法有效驱动传感器，从而导致噪声增加甚至传感器振荡崩溃。

可以使用以下公式通过 R_S 计算 R_P ：

$$R_P = L / (R_S C) = (2 \pi f_{\text{SENSOR}} L)^2 / R_S$$

从以上公式可以清楚地看出， R_P 是传感器频率和传感器电感的函数。系统中出现的最低传感器 R_P 必须处于 LDC 驱动能力范围内。

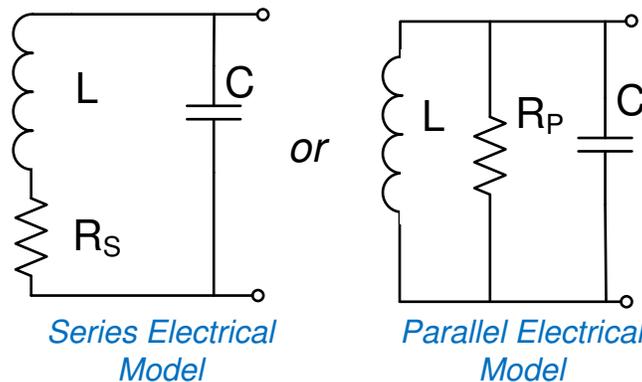


图 1-2. R_S 和 R_P

1.2.1 交流电阻

传感器会在特定频率范围内振荡，因此始终在所需的频率下使用交流电阻至关重要。除非另有特别说明，否则本应用手册中的电阻始终为交流电阻。

通常，建议尽量减小 R_S 以提高传感器性能。

1.2.2 趋肤效应

直流电流可以利用导体的整个横截面。不过，在较高的频率下，电流更倾向于沿着导体表面流动。这种趋势被称为趋肤效应，它主要是电导率和频率的函数。对于铜导体，超过 95% 的 1MHz 电流在厚度仅为 0.2mm 的外壳表面流动。在频率为 10MHz 时，95% 的电流在厚度仅为 0.06mm（距离导体表面）的外壳中流动。

趋肤效应是较高频率下 AC R_S 增大的主要原因。该效应也会影响目标表面上的涡流 - 产生的涡流在最靠近电感器的导电目标表面上流动。

2 电感器特性

为了更好地了解如何获得传感器的卓越性能，必须将传感器分解为电感器和电容器元件。需要考虑几个电感器特性，尽管对于给定的传感器似乎有无限的可能性，但通过使用此处提供的指南，用户可以快速聚焦于合适的传感器设计。

图 2-1 展示了传感器的并联 R-L-C 电气模型。

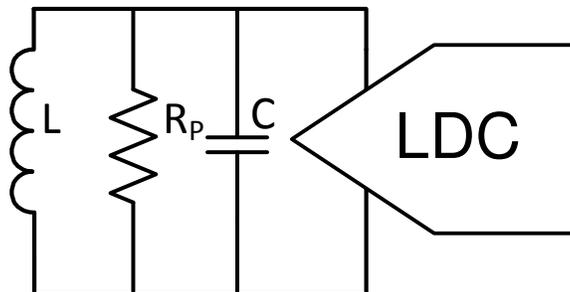


图 2-1. RLC 模型

首先，本应用手册需要回顾决定传感器功能的基本特性。

2.1 电感器形状

电感器形状是电感器的一个重要特性，因为它决定了所产生磁场的形状。圆形螺旋与其他形状相比可产生更对称的磁场，并且就电感与 R_S 而言是最佳的形状。通常，建议使用圆形电感器以获得尽可能高的检测能力，除非因特定的系统要求而需要对替代形状进行权衡。

对于几乎所有的接近应用（其中目标以与传感器平面正交的方式移动），合适的形状是对于给定区域具有最佳 Q （和最低 R_S ）的圆形传感器，如图 2-2 所示。

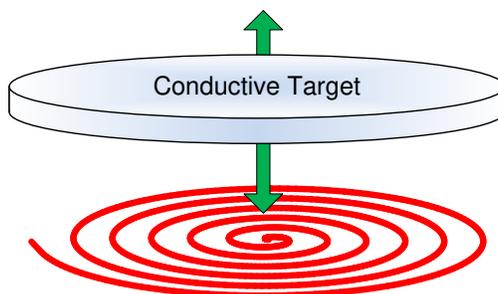


图 2-2. 采用圆形螺旋电感器的轴向检测

对于其他应用，不同的形状可能更合适。对于基于 PCB 的传感器，设计替代形状比绕线式电感器容易得多。例如，矩形线圈可用于精确地检测沿 X 轴的移动，同时降低对 Y 轴偏移的敏感度。

2.1.1 不同电感器形状的示例使用

图 2-3 是一个梯形电感器示例。对于物理尺寸较小的旋转测量应用，与圆形线圈相比，使用一组梯形电感器会增加电感器面积；这种面积的增加会使传感器电感增大。这对于非常小的传感器尺寸特别有用，其电感可能低于 LDC 可以有效驱动的最小电感。在这种情况下，如果电感不够高，可能需要使用一个额外的串联 SMT 电感器。更多详细信息，请参阅 Analog Wire 博客文章 [电感式检测：如何将微型 2mm PCB 电感器用作传感器](#)。

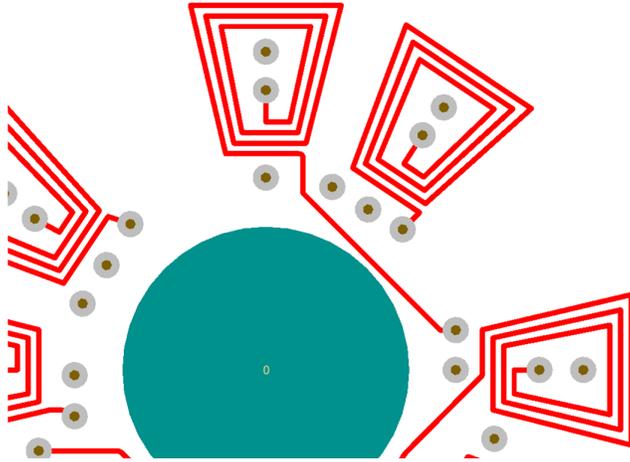


图 2-3. 用于旋转编码的梯形电感器

2.2 匝数

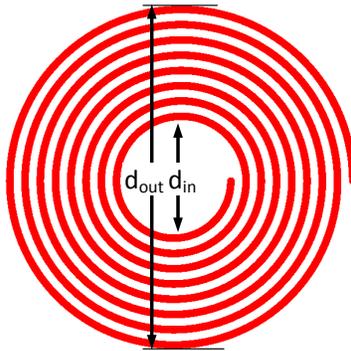


图 2-4. 扁平圆形螺旋电感器

对于单层 PCB 螺旋电感器，参考文献 [1] 中讨论的莫汉方程有助于理解电感与线圈几何形状之间的关系。该方程可用于针对各种几何形状计算线圈的总电感：

$$L = K_1 \mu_o \frac{n^2 d_{avg} c_1}{1 + K_2 \rho} \left(\ln \left(\frac{c_2}{\rho} \right) + c_3 \rho + c_4 \rho^2 \right) \quad (2)$$

其中

- K_1 和 K_2 取决于几何形状（基于电感器的形状）
- μ_o 是自由空间的磁导率，即 $4 \pi \times 10^{-7}$
- n 是电感器的匝数
- d_{avg} 是各匝线圈的平均直径 = $(d_{OUT} + d_{IN})/2$
- $\rho = (d_{OUT} - d_{IN})/(d_{OUT} + d_{IN})$ ，表示电感器的填充比 - 很小的 ρ 值表示电感器为空心电感器 ($d_{OUT} \approx d_{IN}$)，很大的值对应于 ($d_{OUT} \gg d_{IN}$)
- c_1 是取决于布局的系数（基于几何形状）（对于圆形，请使用 $c_1 = 1.0$ 、 $c_2 = 2.46$ 、 $c_3 = 0$ 、 $c_4 = 0.20$ ），对于其他形状，请参阅 [1]

总电感与匝数成正比，因此可以通过调整匝数来有效地控制总电感。不过，当增加内侧匝数（这会减小内径）时， d_{avg} 值开始减小，从而减小额外匝数产生的附加电感。对于大多数应用而言， d_{IN}/d_{OUT} 之比必须大于 0.3，以获得较高的电感器 Q。之所以需要遵守该指导原则，是因为内匝不会占很大的面积，对整体电感的贡献不大，但仍会使 R_S 增大。不过，对于目标非常靠近传感器的应用（例如金属触控）而言，低至 0.05 的比率通常是可以接受的，因为内匝可提供更高的灵敏度。更多信息，请参阅参考文献 [2]。

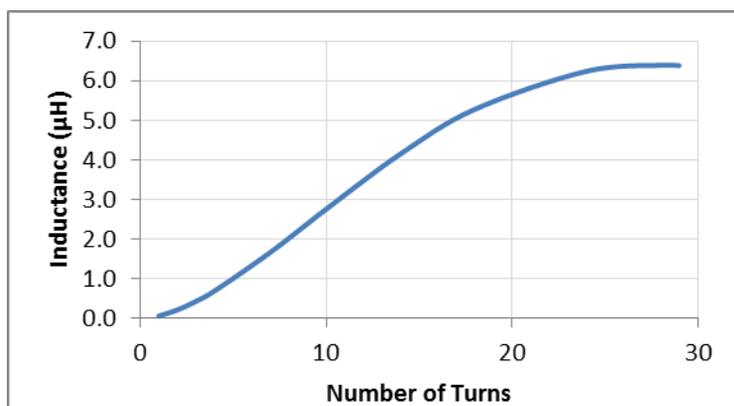


图 2-5. 18mm 圆形电感器的电感与匝数之间的关系

可添加匝数的一个关键限制是实际的最小 PCB 引线宽度 - 常见值为 0.1mm (或 0.004in)。在此约束下，传感器直径每增加 2mm，PCB 电感器最多可增加 5 匝。

在图 2-5 中，可以看到前几匝贡献的电感最多，而最后几匝贡献的电感较少。该示例采用外径为 18mm、引线宽度和引线间距为 0.15mm 的线圈，显示总电感在大约 20 匝时趋于稳定。

2.3 多层

对于 PCB 电感器，存在能够在给定直径中放置的最大匝数。如果传感器的总电感仍然过低，则在另一层添加一个额外的电感器会增加总电感。请注意，这些额外的电感器需要在物理上对齐（如图 2-6 所示），以使磁场正向叠加。这些电感器在电气上以串联方式相连接。一般而言，对于 PCB 螺旋电感器，通常可以使用第二层，因为大多数 PCB 至少有两层。

在对多个层进行布线时，务必交替改变线圈的旋转方向 - 如果顶层按顺时针旋转方向布线，则下一层必须逆时针旋转。虽然这似乎违反直觉，但为了使电流以恒定的方向持续旋转，需要采用这种物理布置。

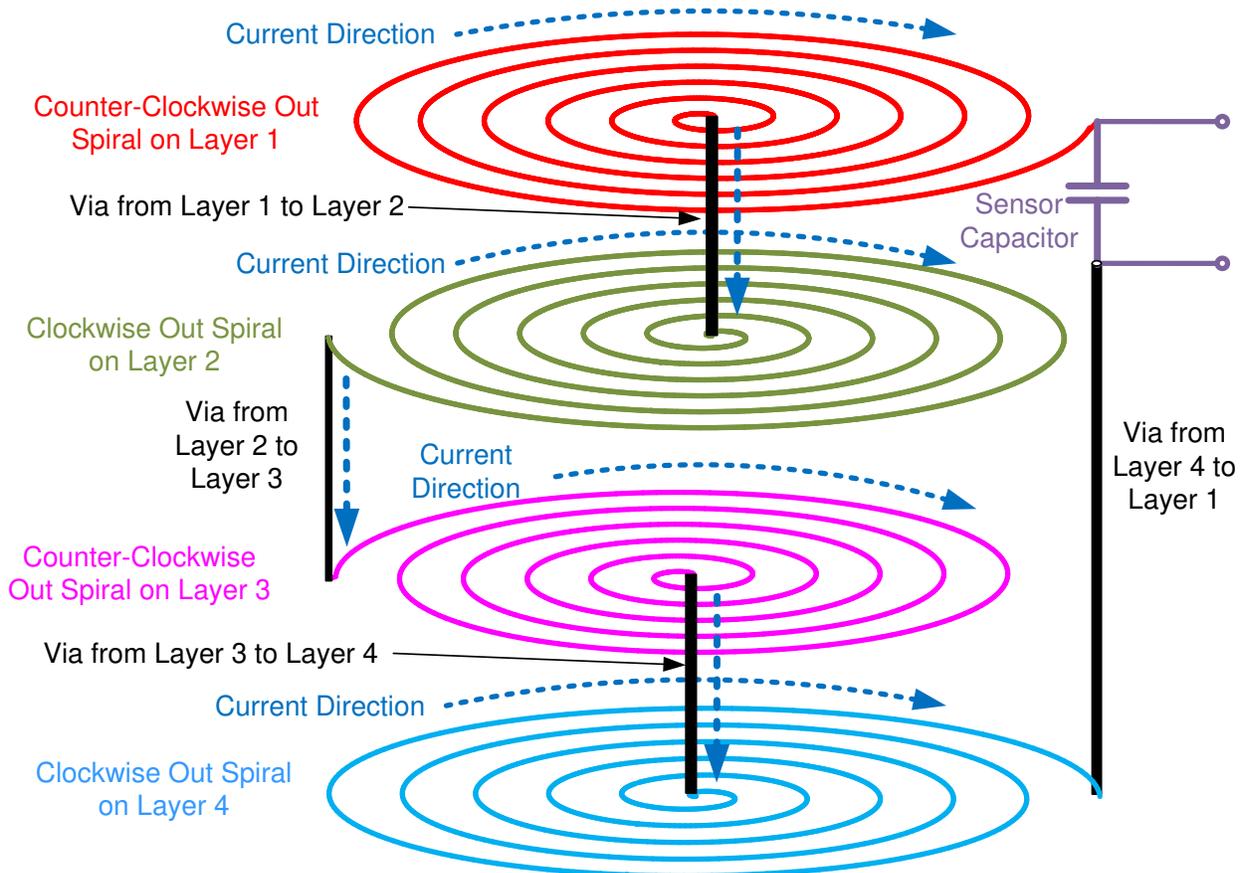
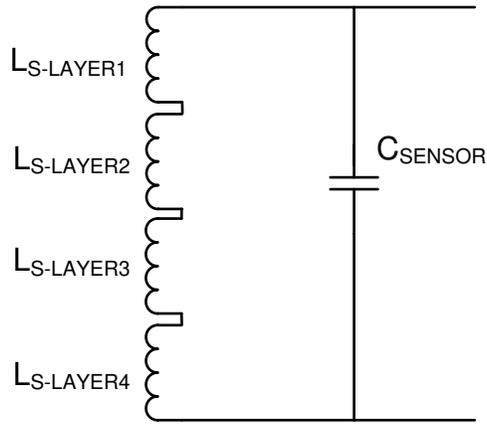
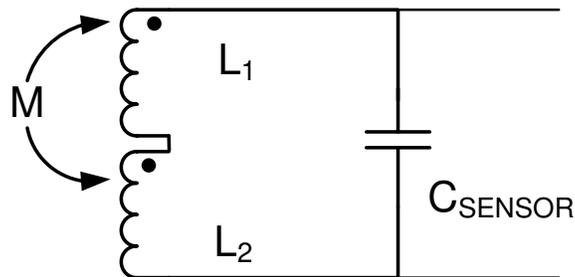


图 2-6. 多层电感器结构 (串联)

图 2-7. 四层串联传感器的简化电气模型 (忽略 R_p)

2.3.1 串联线圈的互感

对于如图 2-6 所示对齐的多层线圈，每层之间的磁场会进行耦合，从而使总电感增大。图 2-8 展示了双线圈布置的等效电路模型。

图 2-8. 双层传感器的互感 (忽略 R_p)

各个线圈磁场之间的连接均是正向的，因此串联线圈的总电感为：

$$L_{\text{TOTAL}} = L_1 + L_2 + 2M \quad (3)$$

其中

- L_1 = 线圈 1 的电感
- L_2 = 线圈 2 的电感，该电感通常与 L_1 相同，因为几何形状是相同的
- M = 线圈之间的互感 = $k \times \sqrt{L_1 \times L_2}$

参数 k 是线圈之间磁链的量度，其值在 0 和 1 之间变化，并且仅取决于线圈之间的距离。互感是稳定的，并且会使总电感增加，使其超过各个电感的简单和，如方程式 3 所示。

通常，对于磁通正向连接的 N 个串联线圈，总电感根据以下公式得出：

$$L_{\text{TOTAL}} = \sum_{i=1}^N L_i + 2 \cdot \left(\sum_{j=1}^{N-1} \sum_{m=j+1}^N M_{j,m} \right) \quad (4)$$

方程式 4 考虑了相邻层中的线圈之间以及交替层中的线圈之间存在磁链。线圈之间的互感程度取决于各层之间的间隔，因此各个互感会有所不同。

例如，如果一个线圈的外径为 18mm，引线宽度和引线间距为 0.15mm，匝数为 12，则其电感为 3.5μH。如果在 1.0mm 厚的 PCB 中使用 4 个此类单层电感器构建一个多层电感器，则总电感不是 4×3.5μH (14μH)，而实际上是 39μH。额外的 25μH 互感实际上大于四个线圈的 14μH。该互感具有不使传感器 R_S 增大的额外有益特性。

德州仪器 (TI) 在线 WEBENCH® 工具支持多层线圈设计，无需进行复杂的计算。可以在 <http://webench.ti.com/wb5/LDC/#/spirals> 中访问该工具。

2.3.2 多层并联电感器

若要获取分辨率最高的 R_P 测量值，必须最大限度地减小 R_S 。这也有助于改进 LDC161x 和 LDC131x 器件的 L 测量。对于四层或更多层，用户可以开始使用如图 2-9 和图 2-10 所示的并联线圈结构来降低 R_S 。该设计可能对一些需要优化 R_P 测量的应用有用。

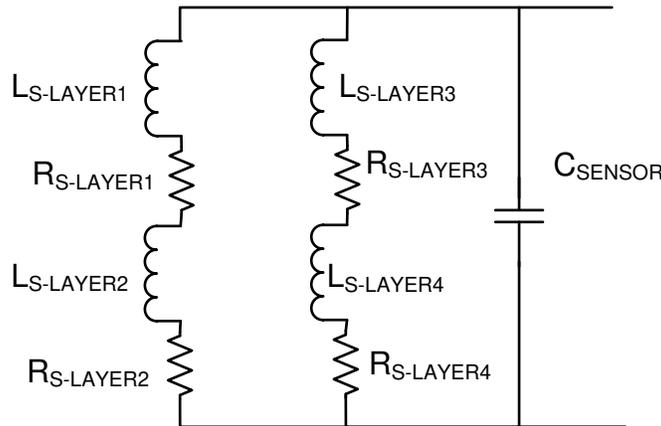


图 2-9. 多层并联线圈原理图

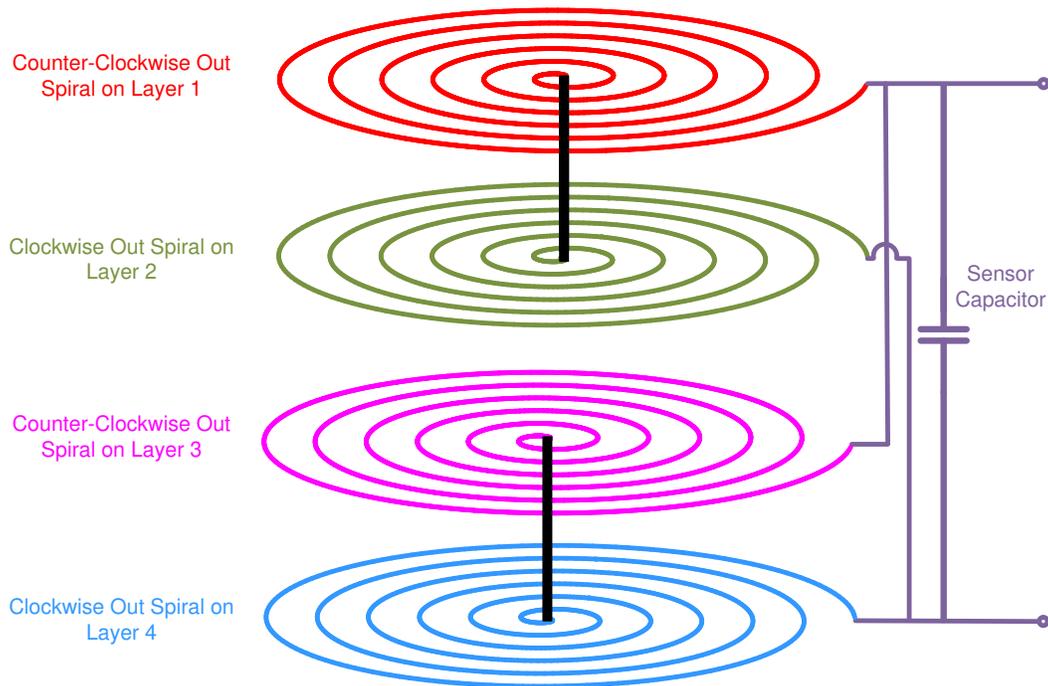


图 2-10. 多层并联电感器

2.3.3 温度补偿

当电感器由横跨多层的一对线圈组成时，多层设计使电感器具有更高的温度稳定性。应用手册 [LDC100x 温度补偿](#) 更详细地讨论了这种效果。

2.4 电感器尺寸

决定检测距离的初级电感器特性是电感器的物理尺寸。更具体地说，外径 (d_{OUT}) 决定了检测距离。为了检测目标的移动，传感器的磁场需要延伸到目标处。电感器的物理尺寸控制所产生磁场的物理尺寸。作为目标距离函数的传感器电感变化具有一致的形状，如图 2-11 和图 2-12 所示。电感变化 (相对于目标距离变化) 具有如此一致的形状，用户可以有效地调整对传感器直径 (d_{OUT}) 的响应，从而简化系统设计。

如果用户得知与磁场强度相对应的传感器总电感不会显著影响检测距离，可能会感到惊讶。

图 2-11 和图 2-12 展示了直径为 14mm 的示例传感器的传递函数。尽管不同的电感器几何形状在图的 Y 轴上具有不同的比例，但在目标按比例移动时整体形状相似。随着传感器和目标之间的距离不断减小， L 和 R_p 都会不断减小。减小量取决于目标尺寸和成分，不过对于某些目标材料而言， L 和 R_p 实际上会随着目标逐渐接近而增大。需要注意的是，在传感器/目标场景中，传感器和目标之间的磁链不会相加，相反，这些磁场是相互对立的，因此这两者之间的互感为负值。

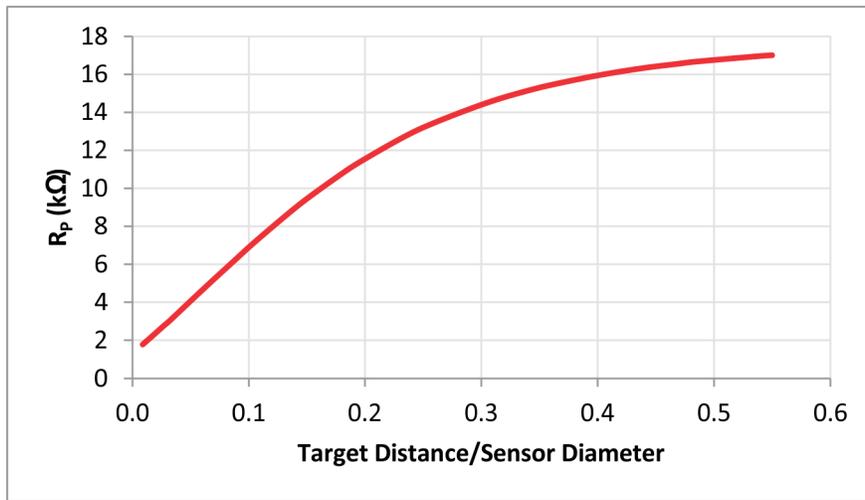


图 2-11. R_p 与归一化目标距离之间的关系

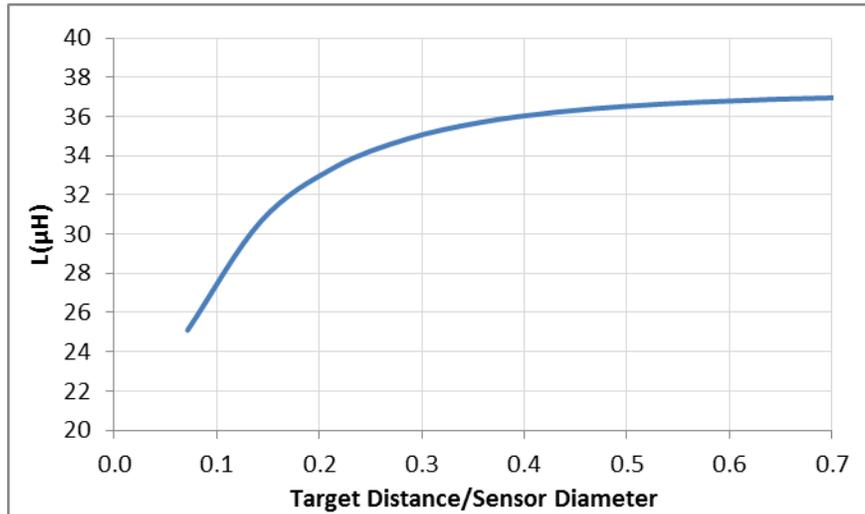


图 2-12. 电感与归一化目标距离之间的关系

对于 LDC131x 和 LDC100x 器件，有效检测距离约为传感器直径的一半。尽管 LDC161x 器件的 L 与距离响应之间的关系是相同的，但 LDC161x 的较高分辨率使其能够在较远的距离 (高达传感器直径的两倍) 下有效地检测目标移动，但有效测量分辨率较低。LDC211x 和 LDC3114 器件具有与 LDC161x 等效的检测距离。对于 LDC0851，最大开关距离为线圈直径的 40%。

如果系统需要 4mm 的检测距离，则最小传感器尺寸必须为 8mm；更大的传感器可提供更高的测量分辨率。这就引出了电感式传感器设计的第一条经验法则：使用可在应用中实际使用的最大线圈。电感式传感器设计的第二条经验法则是目标的尺寸必须与传感器相似。

在使用矩形或其他非圆形形状电感器时，检测距离基于较小的轴（而非较长的轴），如图 2-13 所示。

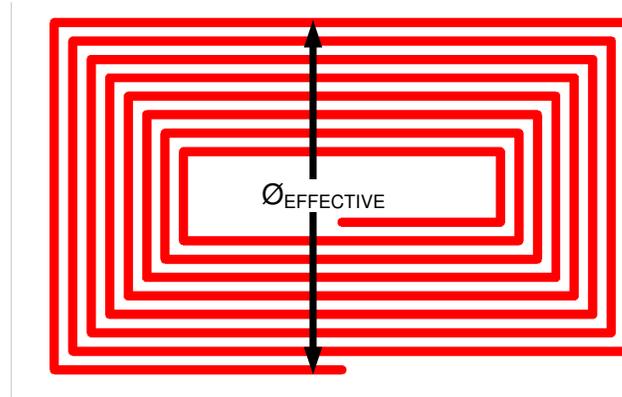


图 2-13. 非圆形线圈的传感器“直径”

2.5 自谐振频率

图 2-14 展示了电感器的各匝如何具有一定的物理面积并由电介质隔开；这会在每匝中产生很小的寄生电容。在足够高的频率下，信号更容易跨越分布式寄生电容，而不是沿着引线的螺旋绕组移动。这两条路径相匹配的频率是自谐振频率，表示为 f_{SR} 或 SRF。寄生电容不是很稳定，因此建议将传感器频率保持在 SRF 的 75% 以下。

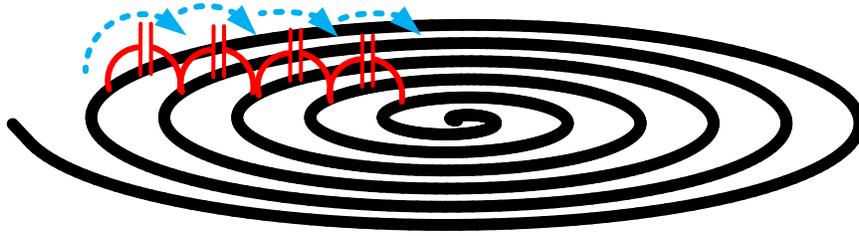


图 2-14. 电感器中的寄生电容分量

2.5.1 SRF 测量

可以使用阻抗分析仪轻松测量电感器的 SRF。使用阻抗分析仪，只需连接电感器并绘制阻抗幅度和相位与频率之间的关系图即可测量 SRF。 $\theta = 0^\circ$ 时的频率对应于 SRF。在图 2-15 所示的示例中，SRF 发生在 4.6MHz 下。请注意，SRF 是目标交互的函数 - 当目标交互变强时，SRF 几乎总是增大。

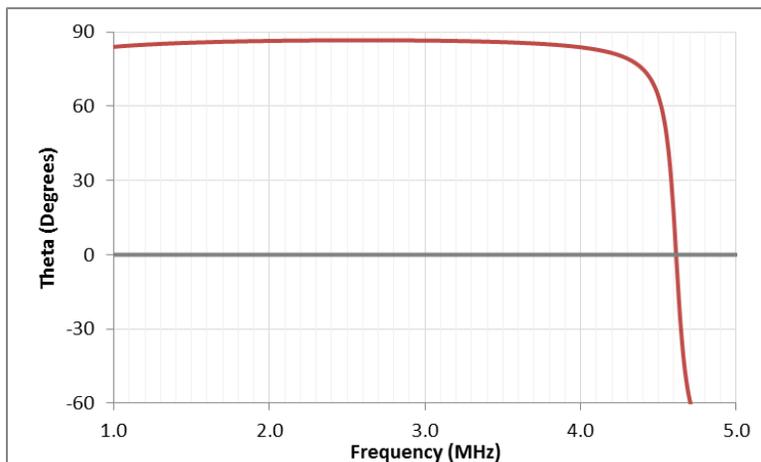


图 2-15. 电感 T 与频率之间的关系

矢量网络分析器 (VNA) 也能够执行该测量。与往常一样，对于 VNA，正确校准 VNA 非常重要。校准平面必须位于与电感器的连接处，否则偏移会在测量中引入传输线，从而导致测量误差。校准后，只需在适当的频率范围内测量 S11。SRF 是 S11 图在开路附近与实轴相交的频率，如图 2-16 所示。

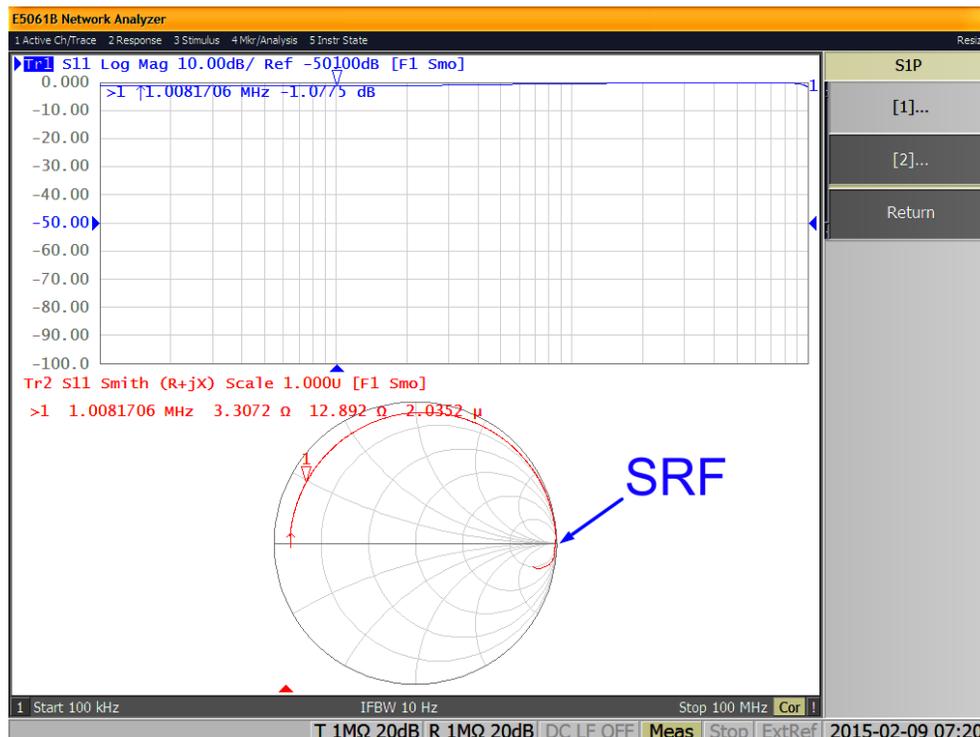


图 2-16. 使用 VNA 测量 SRF

2.5.2 可提高绕线电感器 SRF 的技术

绕线电感器通常具有非常多的匝数（或绕组数），因此，虽然它们可以具有非常高的电感和相对较高的 R_p 值，但它们通常具有低 SRF。

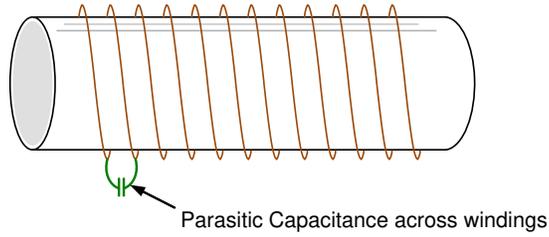


图 2-17. 绕线电感器寄生电容

SRF 高度依赖于绕组的几何形状。对于匝数很多的绕线电感器，可以通过特定的绕组模式来减小寄生电容，从而增加 SRF。第一种方法是向外缠绕线圈，然后进行横向缠绕，如图 2-18 所示。该方法会减小各匝之间的面积并具有很大的电压差。

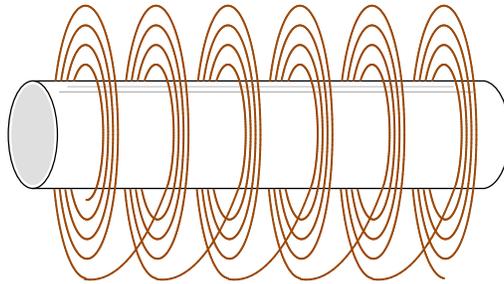


图 2-18. 向外缠绕方法

如图 2-19 所示，第二种缠绕方法是对绕组进行配置，使其以某个角度交叉，从而减小绕组之间的交叉部分面积。交叉角度必须尽可能接近 90° 。以这种方式设计的线圈通常被称为蜂房式线圈。

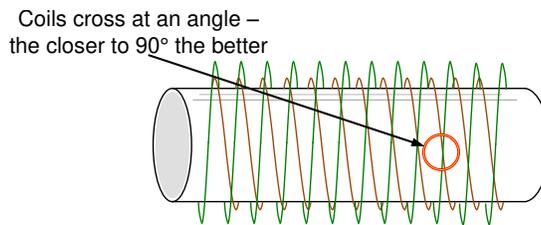


图 2-19. 蜂房式线圈的绕组交叉

将这些技术结合在一起以生成多组绕组是可以接受的，如图 2-20 所示。

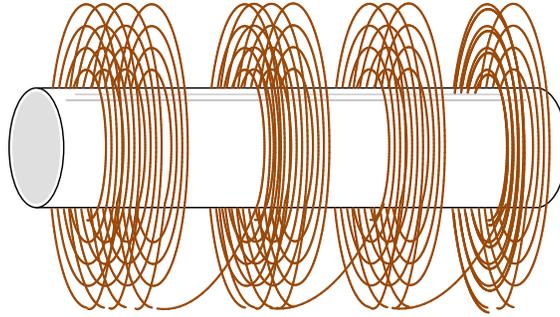


图 2-20. 向外缠绕和绕组交叉组合

3 电容器特性

传感器中使用的电容器是一种关键但经常被忽视的元件。在 LDC 应用中，我们建议使用 C0G 级陶瓷电容器（也被称为 NP0 电容器）。这些电容器使用最高质量的陶瓷电介质，因此这些电容器非常稳定，避开了许多使用其他电介质的非理想电容器：

- 未极化。
- 具有极小的老化漂移。
- 出色的温度稳定性（仅限 ± 30 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ）。
- 非常低的 ESR（等效串联电阻）- 通常小于几 $\text{m}\Omega$ 。
- 无压电效应 - 一些电介质会将物理应力转化为电荷移动，这种情况并不理想。
- 可以在极高的频率下运行。
- 几乎没有 dC/dV 效应，因此电容两端的电压不会影响电容。
- 产生的失真极小。
- 具有适合 LDC 运行的额定电压。

不过，与其他电介质相比，其单位体积电容并不大，因此很难找到超过 $0.47\mu\text{F}$ 的 C0G 电容器。对于通常用于 LDC 传感器的 47pF 至 3300pF 的电容值，C0G 电容器具有小封装尺寸且价格合理。

3.1 电容器 R_S 、 Q 和 SRF

传感器电容器的 R_S 会添加到传感器中，但与电感器相比，这种贡献通常非常低 - 对于 1000pF 0603 C0G 电容器， R_S 通常约为 $20\text{m}\Omega$ （而电感器为 2Ω 或更大）。 R_S 非常低，因此电容器 Q 通常非常高 - 远远超过 100，在某些情况下达到 1000。不过，电感器的较低 Q 值决定了响应。

电容器也具有 SRF，但通常比电感器的 SRF 高得多，因为物理尺寸和结构较小。例如，SRF 高于 200MHz 的 1000pF 电容器很容易获得。该 SRF 远高于传感器电感器的 SRF，因此它通常不会影响传感器的性能。

3.2 寄生电容的影响

尽管传感器电容看起来很简单，但在许多物理系统中很容易获得只有几 pF 的寄生电容。通常，寄生电容不是很稳定。用户仅预计传感器的电感会发生变化，因此可变电容会导致测量不准确。例如，当一个 $100\mu\text{H}$ 传感器与 10.1pF 的电容器并联时，额外的 0.5pF 寄生电容会导致自然通风条件下的传感器频率从 5MHz 变为 4.88MHz 。这相当于该传感器的电感变化了 $5\mu\text{H}$ 。如果电感的绝对值是关键测量值，那么该寄生电容变化就导致了 5% 的误差。如果传感器电容器增加至 704pF ，则传感器频率标称值为 600kHz ，但相同的 0.5pF 寄生变化仅导致从 600Hz 到 599.8kHz 的变化，这仅表现为 $0.07\mu\text{H}$ 的电感变化，误差小于 0.07%。

一些寄生电容来源包括将 LDC 引脚连接到电感器的布线、LDC 输入引脚的 ESD 结构以及电感器的实际匝数。标准 PCB 设计技术（例如更大限度地减少电感式传感器附近的接地灌铜）可以减小寄生电容。

3.2.1 建议的电容器值

对于大多数应用，通常建议使用 300pF 至 2nF 的传感器电容，除非需要特定的传感器频率。对于传感器放置在非常靠近导电目标的一些金属触控应用，低至 47pF 的较小传感器电容可能是理想选择。

3.3 电容器放置

对于 LDC1101、LDC131x 和 LDC161x 器件，建议将电容器放置在尽可能靠近电感器的位置，以尽量减小由电感器和电容器之间的引线产生的寄生 R_S 。对于 LDC0851、LDC211x 和 LDC3114 器件，必须将传感器电容器放置在尽可能靠近相应器件引脚的位置。

4 物理线圈设计

4.1 使用 WEBENCH 的示例设计过程

WEBENCH 提供两种 PCB 线圈设计方法。第一种方法找到适合特定应用的线圈设计，其中使用所需的测量能力来推荐传感器。

第二种方法是使用一款交互式设计工具，其中可以调整线圈尺寸、形状、匝数以及其他参数，以优化传感器设计，使其满足特定的需求。可以在 [WEBENCH 电感器设计工具](#) 中访问该工具。

Coil Designer

1: Select LDC Part

LDC2114

Parameter range for selected part	
Name	Range
Voltage (Oscillation Amplitude)	1 to 4 V
Operating Temperature	-40 to 125 °C
Sensor Frequency	1000k to 40M Hz
Resonance Impedance	350 to 0.01M Ω

2: Select Coil Type

Circular

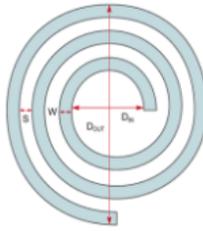
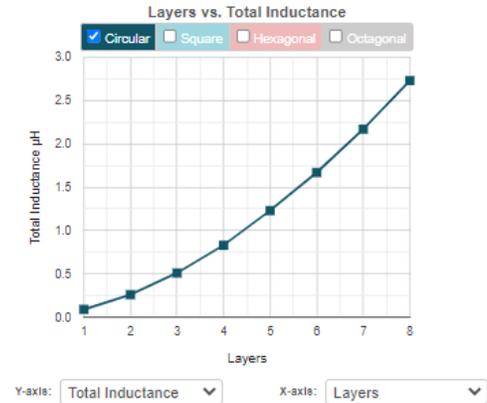


Figure :Circular selected

3: Output Graph



4: Select Coil Geometry And Other Parameters

Metric Imperial Oz-Cu: ON OFF

LC sensor capacitance(C) pF
min: 33 - max: 10000

Outer diameter of inductor(D_{out}) mils
min: 42 - max: 5900

Layers(M) Layer
min: 2 - max: 4

Turns per layer(N) Turns
min: 1 - max: 120

Trace width(W) mils
min: 2 - max: 40

Spacing between traces(S) mils
min: 2 - max: 12

Copper thickness(t) oz-Cu
min: 0.5 - max: 5

Temperature(T) °C
min: -40 - max: 125

Output Parameters	
Name	Output
Total inductance - Circular	0.26 µH
Sensor frequency	31156.22 kHz
Q factor	26.03
AC resistance (skin effect only)	1.94 Ω
Coil fill ratio	0.6
Coil inner diameter (D _{in})	70.9 mils

[View more](#)

5: Export Design

[Export to CAD](#)
[Share Design](#)
[Reset](#)
[More information](#)
[Support & Community](#)

图 4-1. WEBENCH 线圈设计器工具

可通过顶部中间的下拉菜单选择所需的线圈形状 - 选项包括：

- 圆形
- 方形
- 六边形
- 八边形

如前所述，对于大多数应用而言，圆形传感器是最佳形状，不过方形线圈可能对几何结构较小的传感器有用。

可以在屏幕的左下角输入和调整各种传感器参数。要输入的参数包括尺寸、匝数和 PCB 制造特性。

中间部分根据当前设置报告传感器特性。

最后，可以使用以下输出格式导出传感器设计：

- Altium Designer
- Cadence Allegro 16.0-16.6
- CadSoft EAGLE PCB (6.4 版或更高版本)
- DesignSpark PCB
- Mentor Graphics PADS PCB

然后将输出导入到 CAD 工具中以完成系统设计。

4.1.1 一般设计序列

建议的传感器设计过程为：

1. 确定可在应用中实际使用的最大电感器尺寸，并将 d_{OUT} 值设置为该尺寸。如果传感器靠近 PCB 边缘，则务必遵守 PCB 制造规则中有关边缘间隙的任何规定。
2. 按照 PCB 制造规则，将：
 - a. 引线宽度和引线间距设置为允许的最小值。该值通常介于 4mil (0.1mm) 和 6mil (0.15mm) 之间。
 - b. 铜厚度；这通常为 1oz 铜 (大约 $35\mu\text{m}$)。越厚越好。
3. 设置层数以匹配设计中的板层数。
4. 设置电容 - 300pF 至 2nF 的范围通常接近理想值，除非需要特定的传感器频率。如果传感器频率不在器件限值范围内，请根据需要调整电容。
5. 设置匝数，使 D_{in}/D_{out} 的比率大于 0.3。
6. 以所需的格式导出设计。

4.2 PCB 布局建议

4.2.1 最大限度地减少传感器附近的导体

为使 R_p 尽可能高，应使接地平面和任何粗引线远离传感器 - 在至少为传感器直径 30% 的范围内尽量减少任何导体。这包括接地平面和电源平面。请勿在传感器周围放置接地覆铜或在板上使用均流块。在图 4-2 中，内侧棕褐色层上的接地覆铜已凹陷，远离线圈，从而减少与内侧接地的耦合。

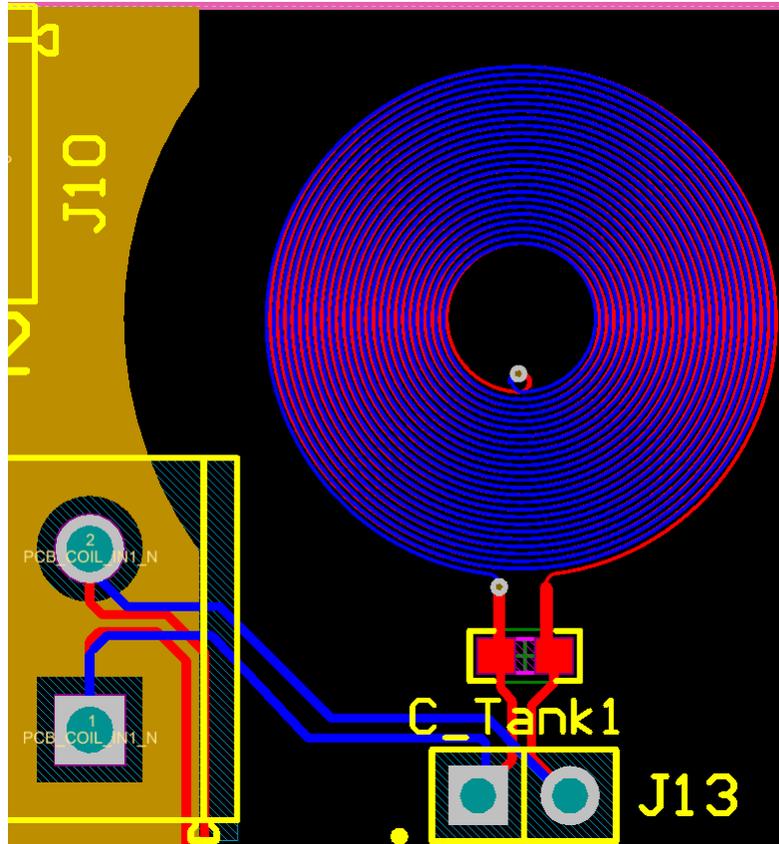


图 4-2. 最大限度地减少传感器附近的铜

4.2.2 用于 PCB 的传感器过孔和其他技术

- 内侧过孔必须靠近引线放置，而不是位于电感器的绝对中心 - 这样可以降低寄生电阻。
- 对于大多数应用而言，保持内侧 30% 的传感器区域未缠绕，但对于电感式金属按钮替代产品而言，应尽可能增加匝数。
- 传感器电容器必须尽可能靠近传感器放置，以最大限度地减小引线的 R_S 。请注意，该规则不适用于 LDC0851、LDC2112、LDC2114 和 LDC3114 器件。对于这些器件，请将传感器电容器放置在靠近相应器件引脚的位置。
- 尽可能在电感器和电容器之间使用较粗的引线。通常 10mil (0.25mm) 就足够了。
- 请勿将铁氧体磁珠用作传感器电感器 - 铁氧体磁珠不会产生对 LDC 应用有效的磁场。

5 总结

本应用报告回顾了传感器的主要特性、各种几何形状、传感器的使用以及如何构建绕线和 PCB 电感器。传感器设计的核心原则（即使用适合应用的最大传感器、尽可能使用圆形线圈以获得理想 R_S 以及使 PCB 传感器的中心 30% 保持开放）是有效的指导原则。

请记住，线圈直径必须大于最大预期检测距离的两倍，以保持足够的分辨率。

使用 NP0/C0G 级电容器作为传感器电容器，并将其放置在尽可能靠近电感器的位置。还要使用较大的传感器电容器值，以尽量减小寄生电容带来的影响。

6 参考文献

[1] S. S. Mohan, M.del Mar Hershenson, S. P. Boyd, and T. H. Lee, “Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances,” *IEEE Journal OF Solid-state Circuits*, vol. 34, no. 10, pp 1419-1424, Oct. 1999.

[2] Y.Su, X. Liu, C.K.Lee, and S.Y.Hui, “On the Relationship of Quality Factor and Hollow Winding Structure of Coreless Printed Spiral Winding (CPSW) Inductor,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 6, pp. 3050 - 3056, Jun. 2012.

- 德州仪器 (TI), [电感式检测常见问题解答](#)
- 德州仪器 (TI), [电感式检测设计计算器工具](#)

7 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision B (September 2019) to Revision C (May 2021)	Page
• 更新了标题.....	1
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式。.....	1
• 添加了对 LDC3114 器件的引用.....	1
• 为清晰起见更新了应用参考.....	1
Changes from Revision A (April 2018) to Revision B (September 2019)	Page
• 为清晰起见通篇更新了语言.....	1
• 添加了对 LDC1001 器件的引用.....	1
Changes from Revision * (March 2015) to Revision A (April 2018)	Page
• 添加了有关 LDC0851 和 LDC211x 器件性能的信息.....	2
• 更改了各节中的措辞以使表达更清晰.....	3
• 添加了有关 R_P 计算的详细信息.....	3
• 添加了 LDC0851 和 LDC211x 器件检测距离信息.....	11
• 添加了适用于 LDC0851 和 LDC211x 器件的传感器电容器放置指南。.....	17

重要声明和免责声明

TI 提供技术和可靠性数据 (包括数据表)、设计资源 (包括参考设计)、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源, 不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保, 包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任: (1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品, (2) 设计、验证并测试您的应用, (3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保或其他要求。这些资源如有变更, 恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务, TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 的销售条款 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.ti.com) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司