

LDC1000 线圈设计指导

秦洋阳

South China Application Team

摘要

电感传感是一项非接触传感技术，不仅可用来测量位置、运动以及目标物的成分，而且还用来检测弹簧的压缩、扩张与扭曲度。LDC1000 是 TI 推出的业界首颗电感数字转换器，其能够完成对 LC 网络电感和阻抗的测量，从而实现电感传感技术。在设计电感传感系统时，除了要考虑相关的电路设计，更重要的是要考虑系统需求并设计相应的线圈。本文简要介绍 LDC1000 的工作原理，重点讨论各种线圈的设计要点，并给出应用示例。

目录

| | |
|------------------------|----|
| 1,引言 | 2 |
| 2,LDC1000 工作原理简介 | 2 |
| 3,PCB 线圈与系统设计 | 4 |
| 3.1PCB 线圈几何参数设计..... | 5 |
| 3.2 目标物选择 | 8 |
| 3.3 谐振频率选择..... | 9 |
| 4,线圈设计示例 | 11 |
| 5,特殊线圈应用 | 12 |
| 6,总结 | 12 |
| 7,附件 | 12 |
| 8,参考资料 | 12 |

Figures

| | |
|-------------------------------------|----|
| Figure 1. LDC1000 系统结构简图..... | 2 |
| Figure 2. LDC1000 结构框图 | 3 |
| Figure 3. PCB 线圈示意图 | 5 |
| Figure 4. LDC1000 位移输出变化曲线 | 6 |
| Figure 5. 不同直径线圈 Q 值与谐振阻抗曲线 | 6 |
| Figure 6. 不同层数线圈 Q 值与谐振阻抗曲线 | 7 |
| Figure 7. 不同线径、线距线圈 Q 值与谐振阻抗曲线..... | 8 |
| Figure 8. LDC1000 不同金属灵敏度测试曲线 | 9 |
| Figure 9. LDC1000 内部电感测量模块等效图 | 10 |
| Figure 10. 系统位移测量测试结果..... | 11 |

Tables

| | | |
|-----------------|--------------------------------------|----|
| Table 1. | 不同直径线圈自谐振频率 | 7 |
| Table 2. | 不同层数线圈自谐振频率 | 7 |
| Table 3. | 不同线径、线距线圈自谐振频率..... | 8 |
| Table 4. | LDC1000 不同谐振频率下的分辨率和采样率 | 10 |

1,引言

LDC1000 是 TI 推出的业界首颗电感数字转换器，其能够完成对 LC 网络电感和阻抗的测量，从而实现电感传感技术。在设计电感传感系统时，除了要考虑相关的电路设计，更重要的是要考虑系统需求并设计相应的线圈。本文简要介绍 LDC1000 的工作原理，重点讨论各种线圈的设计要点。

2,LDC1000 工作原理简介

LDC1000 是单片集成电感传感芯片，只需外接电感和谐振电容即可工作，其典型工作结构图如 Figure 1 所示：

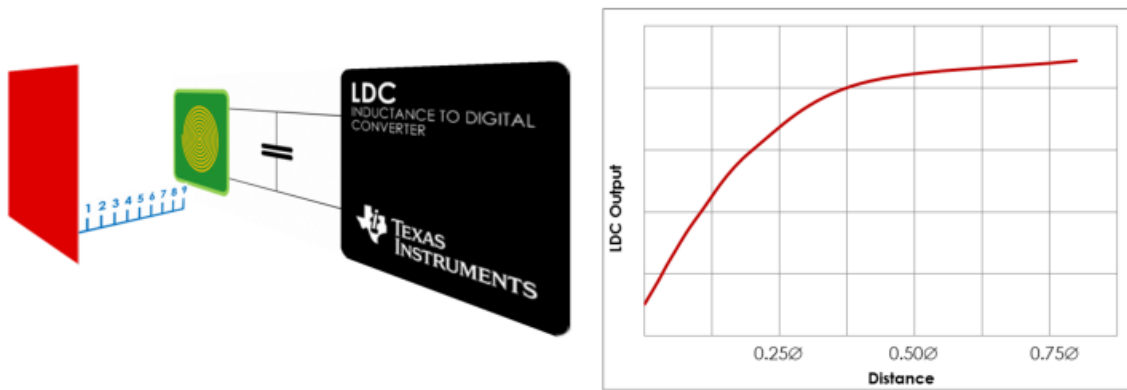


Figure 1. LDC1000 系统结构简图

当 LDC1000 工作时，其输出引脚向外置电感输出高频激励信号，在电感附近会产生一个高频磁场，此时当有金属物接近时，高频磁场就会在金属物内部产生涡流效应，这种涡流电流会产生一个新的磁场进而影响原来的磁场，从而改变了原来 LC 网络的电感值和阻抗，不同的接近距离，不同的金属类型，不同的金属尺寸都会产生不同大小的影响，从而实现距离，金属类型，尺寸大小等测量；而通过系统的设计，可以把测量的物理量扩展到距离、角度、位移、开关、力、形变、振动等等各种物理量，因此 LDC1000 的应用非常广泛。

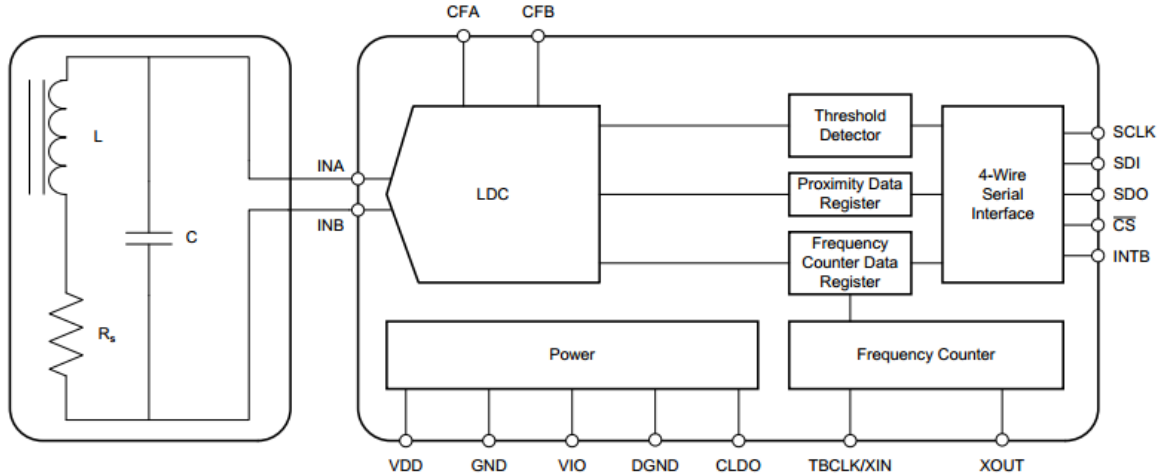


Figure 2. LDC1000 结构框图

如 Figure 2 所示为 LDC1000 结构框图，图中左边 LRC 方框图部分是外部电感和谐振电容的等效原理图，L 表示电感的电感值， R_s 是电感的等效串联电阻，C 是外接的谐振电容。LDC1000 内部有一个高频振荡器，不断输出扫频信号，当外部 LC 网络发生谐振时，LC 谐振回路的阻抗最大，此时输出引脚处电压最大，通过维持输出引脚保持在某个最大电压值，从而维持 LC 网络总是处于谐振状态。

通过电路分析知识，可以知道如上图所示的 LC 并联网络属于非理想 LC 并联电路，当其发生谐振时，其谐振频率为：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{CR^2}{L}} \quad \text{公式 1}$$

在绝大多数情况下， CR^2 要远小于 L，即可以近似的认为：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{公式 2}$$

谐振时，LDC 内部定时计数器可以完成对谐振频率 f_0 的测量，而电容 C 是已知的，因此可以计算出待测电感；同时也可以看出，电容 C 也会影响谐振频率，而不同的谐振频率将对电感传感系统产生不同的影响，本文 3.3 节将给出详细的讲述。

根据电路分析知识，可以知道非理想 LC 并联电路谐振时阻抗为：

$$Z = \frac{L}{RC} \quad \text{公式 3}$$

可以看出谐振时，网络阻抗表现为电阻特性，通过内部的阻抗测量单元，可实现对阻抗的测量。谐振回路的阻抗除了可以作为测量结果输出外，同时也会影响到电感传感系统的测量。首先，谐振回路的阻抗必须大于 798Ω 以满足 LDC1000 的工作条件，而且由于谐振回路阻抗会随着金属的接近而减小，所以谐振回路阻抗必须留有一定的裕量；其次较高的谐振回路阻抗能够提高探测灵敏度，因为金属物的接近可以等效为外部阻抗和谐振回路阻抗的并联，较高的谐振回路阻抗能够更灵敏地发现金属物的接近。

在保持 LC 谐振的前提下，更进一步的，由公式 2 可以得出：

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} \quad \text{公式 4}$$

代入公式 3 中，最终可以得出：

$$Z = \frac{\omega^2 L^2}{R} \quad \text{公式 5}$$

又已知线圈的品质因素 Q 为：

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad \text{公式 6}$$

因此谐振时线圈阻抗又可以写为：

$$Z = Q\omega L \quad \text{公式 7}$$

综上所述可以看出， Q 值和阻抗都是和频率、电感正相关，而和线圈等效串联电阻负相关。另外阻抗又和 Q 值正相关， Q 值越高，阻抗越高。由于 LDC1000 是依靠 LC 并联谐振原理完成电感和阻抗的测量的，对于非理想并联谐振电路来说，谐振回路的 Q 值主要由电感的 Q 值决定，因为谐振电容的 Q 值往往很高。 Q 值决定了谐振回路的频率稳定性，即相位噪声， Q 值越高，谐振回路的谐振频率越稳定，噪声越低，同时阻抗越高。因此为了得到良好的信噪比和较高的谐振回路阻抗，在线圈设计过程中要尽量提高线圈的 Q 值。

提高谐振频率是提高 Q 值的一种方法，但不能无限地提高谐振频率，首先谐振频率必须要满足 LDC1000 的频率工作范围：5kHz~5MHz。其次由于分布电容的存在，所有的电感都具有自谐振频率，在大多数应用中，谐振频率要小于 80% 的自谐振频率，这是因为 LDC1000 电感计算中，认为谐振电容是不变的常数，电感的分布电容往往不够稳定，会随着温度、湿度等变化而变化，从而影响电感的测量；另外由于分布电容往往只有几个皮法，而当目标接近电感传感器时，除了会影响电感外，还有产生额外的感应电容，这个微小的感应电容也会影响电感测量的结果。

所以在线圈的设计过程中，要尽量提高阻抗和 Q 值，并且尽量保证较高的自谐振频率，从而保证系统设计的灵活度。

3,PCB 线圈与系统设计

从理论上讲，所有具有电感特性的元件，包括线圈、电感、弹簧等等都可以作为 LDC 的测量元件。由于 PCB 线圈具有低成本、高灵敏度、设计灵活、一致性优良等特点，因此大多数 LDC 应用中使用 PCB 线圈作为电感传感器。

上文中已经提到，LDC1000 可以完成对 LC 并联电路电感和阻抗的测量，但是由于阻抗易受温度影响，详细参考 SNAA212 "LDC1000 Temperature Compensation"，而电感具有良好的稳定性，因此除了在金属鉴别以外的大多数应用中，推荐使用电感作为测量参数。本文主要从电感角度出发，讲述线圈设计要点。当然阻抗在灵敏度和噪声等方面也有类似的特点，也可以以此作为参考。

在具体的系统设计中，需要考虑的参数有：PCB 线圈几何参数设计、目标物选择以及谐振频率选择，其中 PCB 线圈几何参数设计将决定感应距离，同时也会影响线圈的阻抗、Q 值和自谐振频率；目标物选择会影响测量的灵敏度；而谐振频率的选择不仅影响到线圈的阻抗和 Q 值，并且还会影响 LDC1000 的采样率和分辨率等等参数，下文将重点围绕这三个参数详细讲述。

3.1 PCB 线圈几何参数设计

PCB 线圈结构图如下图 Figure 3 所示，图中以双层板线圈为示例，从图中可以看出，线圈几何参数设计需要涉及到 4 个参数：线圈直径 (D)、线圈线径 (w)、线圈线距 (s) 以及线圈层数 (本图中是 2 层)。

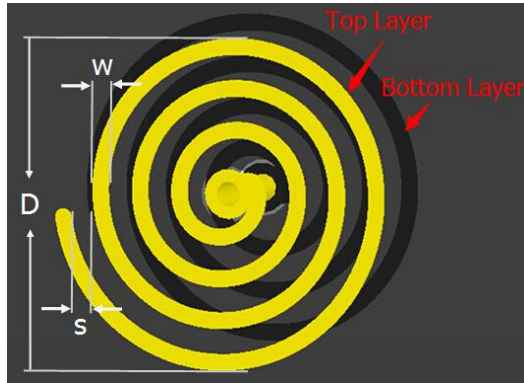


Figure 3. PCB 线圈示意图

对电感传感来说，PCB 线圈的直径非常重要。因为 PCB 线圈直径很大程度上决定了线圈附近磁力线的分布，因此也就决定了传感器的有效感应距离，同时也决定了传感器对于目标物距离变化的感应灵敏度。

为了形象地说明这个问题，通过对 5mm、10mm，14mm，20mm 以及 50mm 共 5 种不同直径的线圈进行测试，其中 5mm 线圈使用 4 层板，其它使用双层板，线径和线距都是 6mil（本文中所有 PCB 线圈均使用 1.6mm 板厚、1oz 铜厚工艺）。测试时使用铝合金 6061 作为目标物，且目标物的直径大于等于线圈直径，不断改变目标物和线圈之间的距离，记录距离变化时电感的变化，实验结果如 Figure 4 所示：

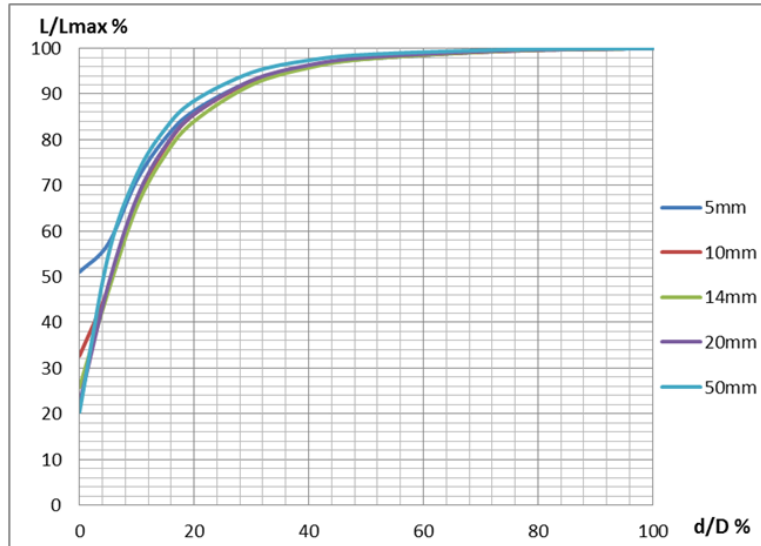


Figure 4. LDC1000 位移输出变化曲线

图中横轴表示线圈距离目标物距离与线圈直径的百分比比值，纵轴则是线圈当前电感值与线圈最大电感值（线圈附近无金属物时的电感值）的比值。从图中可以看出，5种不同直径的线圈有着相似的位移电感响应曲线，Figure 4中5mm线圈在位移零点处相对其它线圈区别较大，这是因为5种线圈的厚度都是1.6mm，当线圈直径很小时，线圈厚度所造成的零点位置的定义会有所误差，因为在测试过程中都是以线圈直面目标物的那一面作为位移起始零点的。

从 Figure 4 中可以读出以下信息：

- 1, 对于 PCB 线圈而言，最大感应距离大约是线圈的直径；
- 2, 随着线圈和目标物距离的增大，灵敏度快速下降；
- 3, 当线圈和目标物距离大于线圈半径时，灵敏度已经严重下降，因此要想保持良好的灵敏度，线圈和目标物距离要小于直径的一半，最好是直径的四分之一。

同时 PCB 的直径也会影响线圈的 Q 值、阻抗以及自谐振频率，下图 Figure 5 给出了不同直径线圈 Q 值及阻抗随频率的变化图。

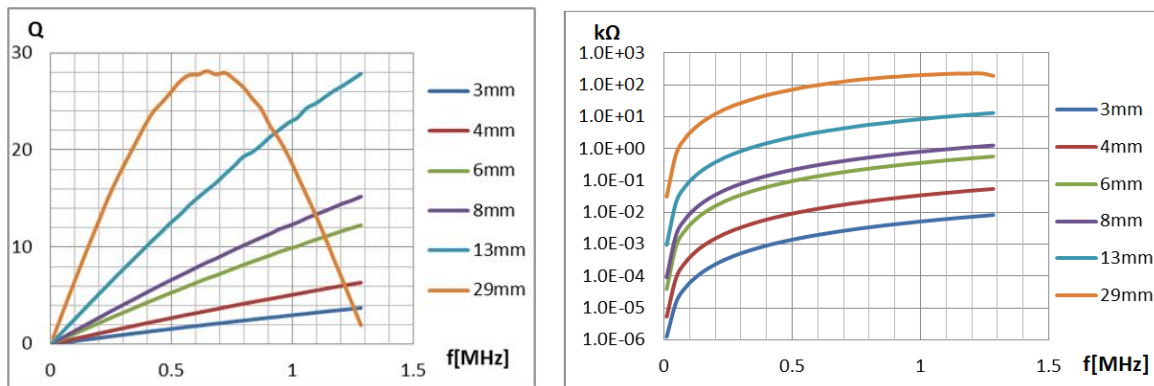


Figure 5. 不同直径线圈 Q 值与谐振阻抗曲线

注：Figure 5 中的线圈均为 4mil 线径、4mil 线距的四层板线圈，其自谐振频率如下 Table 1 所示：

Table 1. 不同直径线圈自谐振频率

| 线圈直径 | 3mm | 4mm | 6mm | 8mm | 13mm | 29mm |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 自谐振频率 | >10MHz | >10MHz | >10MHz | >10MHz | 9.3MHz | 1.3MHz |

从 Figure 5 和 Table 1 中可以看出，在同样线径、层数以及工作频率的情况下，直径越大，Q 值越高，同时阻抗也越大，然而线圈的直径越大，其自谐振频率越低。

除了直径大小外，PCB 层数、线径线距（在实际设计中线圈线径与线距往往相同或者相近，所以这两个参数一起论述）也会决定线圈的 Q 值、阻抗以及自谐振频率。下图 Figure 6 和 Figure 7 依次给出不同 PCB 层数线圈 Q 值及阻抗随频率变化图、不同线径线距线圈 Q 值及阻抗随频率变化图。

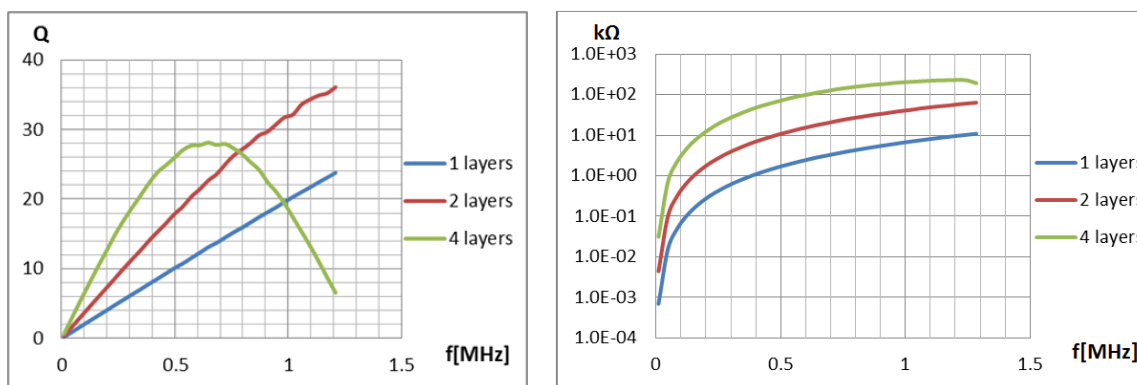


Figure 6. 不同层数线圈 Q 值与谐振阻抗曲线

注：Figure 6 中的线圈均为 4mil 线径、4mil 线距、29mm 直径线圈，其自谐振频率如下 Table 2 所示：

Table 2. 不同层数线圈自谐振频率

| 线圈直径 | 1layers | 2 layers | 4 layers |
|-------|---------|----------|----------|
| 自谐振频率 | >10MHz | 3.7MHz | 1.3MHz |

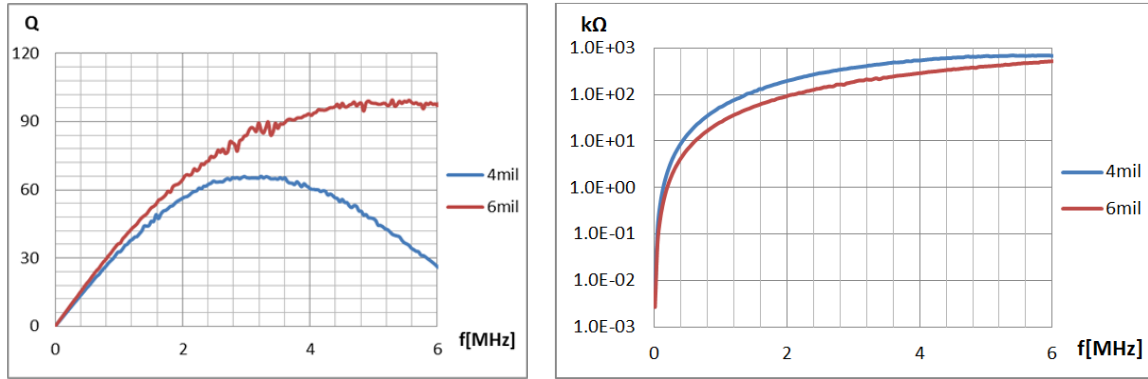


Figure 7. 不同线径、线距线圈 Q 值与谐振阻抗曲线

注：Figure 7 中的线圈均为 50mm 直径单层线圈，其自谐振频率如下 Table 3 所示：

Table 3. 不同线径、线距线圈自谐振频率

| | | |
|-------|--------|--------|
| 线圈直径 | 4mil | 6mil |
| 自谐振频率 | 7.5MHz | >10MHZ |

从 Figure 6 和 Table 2 中可以看出，在同样直径、线径以及工作频率情况下，线圈 PCB 的层数越多，Q 值越高，同时阻抗也越大，然而线圈 PCB 的层数越多，其自谐振频率越低。从 Figure 7 和 Table 3 中可以看出，在同样直径、线圈 PCB 层数以及工作频率情况下，线圈线径和间距对 Q 值的影响不大，线圈的线径和间距越小，阻抗越大，然而自谐振频率越低。

综上，对于线圈设计来说，要尽量保证线圈拥有足够高的阻抗和 Q 值，但在实际的系统设计过程中很多参数会受到系统限制。在线圈直径受到限制的应用中，由于小的线圈 Q 值和阻抗较小，所以尽量使用多层板并使用较小的线径和线距；而对于要实现大量程测距的应用，由于线圈直径较大，为了避免自谐振频率的限制，可以根据需求选择较少的 PCB 层数，并使用相对较大的线径和线距。

3.2 目标物选择

上文对线圈各个几何参数设计作了详细地讲解，然而除了线圈几何参数会影响电感传感灵敏度以外，金属类型也会影响电感传感的灵敏度。

Figure 4 中使用同样的金属、不同直径的线圈来测试直径和灵敏度之间的关系，这里使用同样 14mm 直径的线圈，四种不同的金属：铝合金 6061、紫铜 CDA110、不锈钢 321 和不锈钢 410 来测试金属类型不同对位移电感灵敏度的影响。实验结果如 Figure 8 所示。

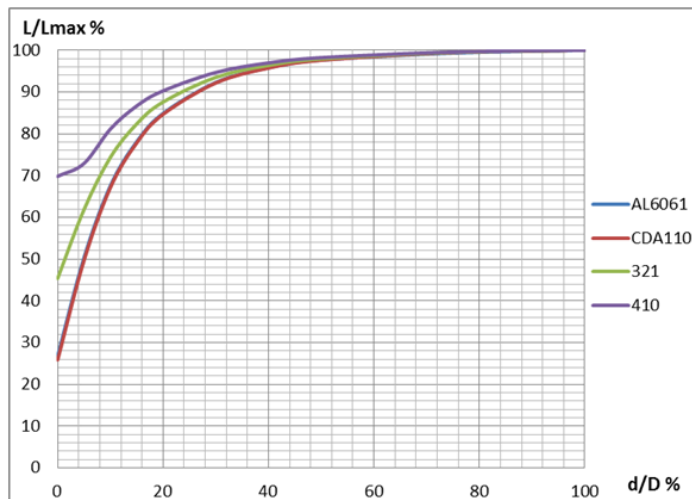


Figure 8. LDC1000 不同金属灵敏度测试曲线

图中横轴表示线圈距离目标物距离与线圈直径的百分比比值，纵轴则是线圈当前电感值与线圈最大电感值（线圈附近无金属物时的电感值）的比值。从图中可以看出，铝合金和紫铜具有良好的灵敏度，其次是非磁性的不锈钢 321，灵敏度最差的是磁性的不锈钢 410。

因此可以知道，铜和铝具有较好的灵敏度，这是因为其具有良好的电导率，而磁性钢灵敏度最差，这是因为静磁效应和电涡流效应对电感的影响是相互制约的。所以选择高电导的非磁性金属作为目标物有利于提高距离测量灵敏度。

3.3 谐振频率选择

上文中已经提到，LDC1000 工作时，需外接电感和谐振电容，谐振电容的选择可以决定谐振频率。首先谐振频率必须满足 LDC1000 的频率范围，即 5kHz~5MHz。当然这只是一个非常基本的条件，频率的选择还会影响趋肤深度、转换速度、分辨率以及电感 Q 值，另外线圈自谐振频率和 LDC1000 芯片对谐振回路阻抗的要求也会限制谐振频率的选择。

趋肤效应是指高频信号会趋向于沿着导体表面流过。而 LDC1000 来说，频率越高，其在目标金属上的感应涡流越趋向于出现在目标金属表层。关于趋肤深度的详细推导和计算的问题，已经有很多成熟的资料，这里不做讲述，只是提示当在需要透过金属测量另外的目标、或者需要检测金属内部特征等应用中时，尽量选择较低的谐振频率。

LDC1000 的转换速度及分辨率也受谐振频率的影响，为了说明这个问题，需要简单介绍 LDC1000 内部电感测量原理。



Figure 9. LDC1000 内部电感测量模块等效图

Figure 9 为 LDC1000 内部电感测量模块的简化等效图（并非实际结构）， f_{sensor} 是 LC 并联谐振回路的谐振信号，经过调理后进入内部电感测量模块。 f_{sensor} 首先经过内部倍频器，频率变为原来的三倍；然后进入分频器，该分频器的分频系数由 LDC1000 内部寄存器设置，分频系数即寄存器中 **Response Time**；最后经过分频的信号进入 24 位定时器， F_{ext} 为定时器时钟，由外部晶体或者 MCU 提供，定时器测量分频后信号的周期，从而实现 f_{sensor} 频率的测量。

通过的分析可以知道，LDC1000 的转换速度 Data Rate 为：

$$\text{Data Rate} = \frac{f_{\text{sensor}}}{\text{Response Time}} \times 3 \quad \text{公式 8}$$

从公式 8 中可以看出，LDC1000 的转换速度不是恒定的，因为首先分频器决定测量积分的时间，可以通过芯片内部寄存器设置不同的 **Response Time** 来改变采样率，当然 **Response Time** 越大，计数器积分时间也就越长，分辨率越高；另外传感器的谐振频率决定了信号的周期，从而影响采样率，谐振频率越高，信号周期越短，转换速度也就越快。

除了转换速度，LDC1000 的分辨率也是受谐振频率影响的。同样根据上面的原理分析可以知道，LDC1000 的输出计数值 **Count** 的公式如下：

$$\text{Count} = \frac{F_{\text{ext}}}{3 \times f_{\text{sensor}}} \times \text{Response Time} \quad \text{公式 9}$$

从公式 9 中可以看出，计数器输出的计数值，即 LDC1000 的测量分辨率，既和定时器时钟 F_{ext} 以及 **Response Time** 有关，同时也和传感器的谐振频率有关。为了形象地给出 LDC1000 分辨率的信息，假设定时器时钟 F_{ext} 取 8MHz，**Response Time** 取 6144，给出传感器不同谐振频率下所对应的分辨率及采样率，如 Table 4 所示：

Table 4. LDC1000 不同谐振频率下的分辨率和采样率

| 谐振频率 f_{sensor} | 计数值 Count | 分辨率 Bit | 采样率 Hz |
|--------------------------|------------------|----------------|---------------|
| 5kHz | 3276800 | 21.6 | 2.4 |
| 10kHz | 1638400 | 20.6 | 4.8 |
| 50kHz | 327680 | 18.3 | 24.4 |
| 100kHz | 163840 | 17.3 | 48.8 |
| 500kHz | 32768 | 15 | 244 |
| 1MHz | 16384 | 14 | 488 |
| 2MHz | 8192 | 13 | 976 |
| 3MHz | 5461 | 12.4 | 1464 |
| 4MHz | 4096 | 12 | 1953 |
| 5MHz | 3276 | 11.6 | 2441 |

从上表可以看出，不同的谐振频率对应不同的分辨率，另外需要注意的是这个分辨率是理想的分辨率，实际应用时还会存在 1~3 个二进制位的噪声位，不同条件下噪声大小不同。当然在很多应用中可以使用数字滑动平均滤波器或者其它数字滤波方法来提高分辨率，很多情况下简易的滑动平均滤波器能够将分辨率提高 3~5 位，甚至更好。

由于 PCB 线圈属于空心电感，其 Q 值在低频情况下非常差，在大多数情况下，为了保证良好的噪声特性，尽量选择较高的谐振频率，以保证线圈足够的 Q 值。而由公式 5 和公式 7 可知谐振频率也会影响谐振电路的阻抗，已知 LDC1000 要求的谐振阻抗最小为 798Ω，有些尺寸较小的线圈，阻抗往往太小，这时可以通过提高谐振频率来提高谐振回路的阻抗，从而使其满足工作条件。当然，如前文所述，谐振频率应该还要小于 80% 的自谐振频率。

综上，LDC1000 谐振回路频率的选择既要满足一些既定的条件，同时也会影响趋肤深度、分辨率以及噪声，要根据实际应用，仔细选择。

4,线圈设计示例

上文对线圈几何参数设计、金属目标物选择以及谐振频率选择作了详细讲述。这里给出一个示例来具体说明线圈的设计方法。例如一个系统待测距离范围是 1~3mm，要求测量分辨率为 10μm，采样速度为 100Hz，具体设计步骤如下：

- 1,直径选择：由于示例要求较高的分辨率，为了保证良好的灵敏度，最大待测距离应该小于线圈直径的四分之一，所以线圈直径应该大于 12mm，这里取 14mm；
- 2,PCB 层数选择：由于 14mm 直径线圈直径相对较大，即使通过普通双层 PCB 工艺也能够实现 kΩ 级的阻抗，为了降低成本，因此在此使用双层 PCB 板；
- 3,线径线距选择：为了尽量提高线圈阻抗，这里使用 4mil 线径和线距。

因此使用 14mm 直径、4mil 线径和线距的双层板线圈作为示例线圈，线圈电感约为 20μH，为了保证较好的 Q 值和阻抗，这里使用 100pF 电容作为谐振电容，谐振频率 3.5MHz，既能够满足 LDC1000 工作条件，又具有一定的裕量。经测试，线圈谐振阻抗为 14kΩ，Q 值为 36，Response Time 取 6144，所以采样率约为 1.7kHz，理论分辨率约为 12.2 位，而通过 Figure 4 可以看出，对于 14mm 直径的线圈而言，1~3mm 的距离变化范围可以得到全量程约 20% 的电感变化范围，所以有效的理论分辨率约为 9.8 位，假设噪声位为 2 位（大量实验结果显示 LDC1000 电感测量噪声位一般约为 1~3 位，因线圈阻抗、Q 值以及系统条件不同而异），有效分辨率约为 7.8 位，因此在 1~3mm 的距离变化范围内大约可以得到 9 微米的分辨率。

搭建系统，使用铝合金作为目标金属，系统测试结果如下图 Figure 10 所示：

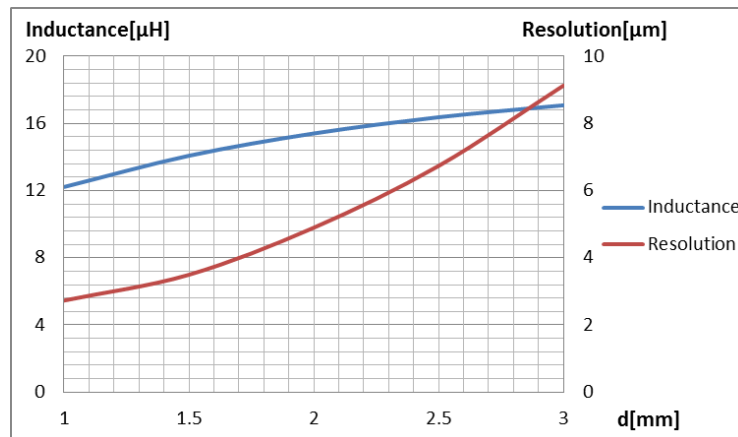


Figure 10. 系统位移测量测试结果

Figure 10 中横轴为金属目标物与线圈间的距离，主纵轴为线圈电感，第二纵轴为位移测量的分辨率。从测试结果来看，在 1~3mm 的距离变化范围内，电感变化范围为 12 μ H~17 μ H，位移测量分辨率在 1mm 处约为 3 μ m，在 3mm 处约为 9 μ m，基本符合系统设计要求。另外由于采样率约为 1.7kHz，而系统需求为 100Hz，因此可以使用数字滑动平均滤波器或者其它数字滤波方法进一步提高系统测量分辨率。

5,特殊线圈应用

PCB 线圈由于具有设计灵活成本较低等等特点，因此广泛应用于电感传感系统中，但在有些情况下，PCB 线圈不能够满足应用要求，这时可以使用一些非 PCB 线圈来满足应用要求。例如在有些要求极小尺寸线圈的应用场合中，可以使用贴片电感来作为电感传感器，例如一颗封装为 0603 的贴片电感即可用于一些极小空间范围的接近传感；另外在有些场合弹簧也可以作为电感传感器应用于 LDC1000 中，弹簧的形变会产生电感的变化，通过检测电感的变化就能感知力的变化或者位移的变化。总之一切具有电感特性的元件，包括线圈（导线线圈，PCB 线圈，或者柔性 PCB 线圈等）、电感、弹簧等等都可以作为 LDC 的测量元件。

和 PCB 线圈不同，电感一般都带有磁芯，其在较宽的频带频段范围内都具有良好的 Q 值，在大多数情况下，为了保证良好的分辨率，尽量选择相对较低的谐振频率，从而保证 LDC1000 具有足够多的计数值，当然较低的谐振频率也会降低 LDC1000 的转换速度。而对于弹簧元件而言，很多弹簧由于其 Q 值和阻抗都很低，因此要选择尽量高的谐振频率，提高 Q 值和阻抗，有些弹簧在最高的谐振频率下可能也达不到 LDC1000 要求的阻抗范围，这时可以在弹簧上串联一个固定的电感，然后再接入 LDC1000，从而使得 LC 谐振电路的阻抗满足 LDC1000 的要求，当然由于串联了电感器，最终会牺牲系统的分辨率。

6,总结

线圈设计对于 LDC1000 来说至关重要，上文讲述了线圈设计的一些要点，包括线圈几何尺寸设计、目标物选择、谐振频率选择等，并介绍了一下特殊线圈的应用。在实际系统，需要综合考虑多方面需求，从而设计出合适的线圈。另外用户也可以通过 TI 的在线仿真设计工具 WEBENCH 计算并设计相应的线圈。

7,附件

无。

8,参考资料

1. *LDC1000 Inductance to Digital Converter Rev.A (SNOSCX2A)*

重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或间接版权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独自负责满足与其产品及其应用中使用 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独自负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

| | 产品 | | 应用 |
|---------------|--|--------------|--|
| 数字音频 | www.ti.com.cn/audio | 通信与电信 | www.ti.com.cn/telecom |
| 放大器和线性器件 | www.ti.com.cn/amplifiers | 计算机及周边 | www.ti.com.cn/computer |
| 数据转换器 | www.ti.com.cn/dataconverters | 消费电子 | www.ti.com.cn/consumer-apps |
| DLP® 产品 | www.dlp.com | 能源 | www.ti.com.cn/energy |
| DSP - 数字信号处理器 | www.ti.com.cn/dsp | 工业应用 | www.ti.com.cn/industrial |
| 时钟和计时器 | www.ti.com.cn/clockandtimers | 医疗电子 | www.ti.com.cn/medical |
| 接口 | www.ti.com.cn/interface | 安防应用 | www.ti.com.cn/security |
| 逻辑 | www.ti.com.cn/logic | 汽车电子 | www.ti.com.cn/automotive |
| 电源管理 | www.ti.com.cn/power | 视频和影像 | www.ti.com.cn/video |
| 微控制器 (MCU) | www.ti.com.cn/microcontrollers | | |
| RFID 系统 | www.ti.com.cn/rfidsys | | |
| OMAP应用处理器 | www.ti.com.cn/omap | | |
| 无线连通性 | www.ti.com.cn/wirelessconnectivity | 德州仪器在线技术支持社区 | www.deyisupport.com |

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated