

摘要

德州仪器 (TI) 在业界较早推出了电感数字转换器，彻底改变了电感式感应技术。此后，TI 发布了采用 LDC 技术的整个器件系列，提供的器件具备扩展功能和更多特性。本应用手册讨论了当前可用的 LDC 器件，总结其功能，并针对各种应用可采用的器件提供建议。

内容

1 LDC 应用	2
1.1 轴向感应.....	2
1.2 事件计数.....	3
1.3 其他感应类型.....	3
2 电感式感应工作原理	3
3 LDC 器件特性概述	5
3.1 采样率.....	5
3.2 传感器 L 测量和参考频率.....	6
3.3 传感器 R_P 测量.....	6
3.4 传感器 R_P (电流) 驱动功能.....	6
3.5 开关输出功能.....	6
3.6 传感器频率范围.....	6
3.7 多通道感应.....	6
3.8 电源管理.....	7
3.9 内部算法.....	7
4 器件系列	8
4.1 电感式触控器件.....	8
4.2 多通道 LDC 器件.....	9
5 总结	12
6 修订历史记录	12

插图清单

图 1-1. LDC 感应配置.....	2
图 2-1. 交流磁场中的导体.....	3
图 2-2. 并联电感式传感器的电气模型.....	4
图 4-1. LDC3114 方框图.....	8
图 4-2. LDC1614 方框图.....	9
图 4-3. LDC1101 方框图.....	10
图 4-4. LDC0851 方框图.....	11

表格清单

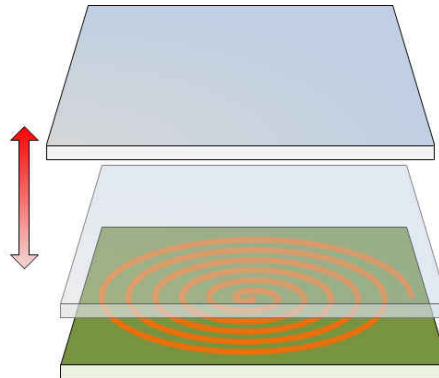
表 3-1. LDC 器件比较.....	5
----------------------	---

商标

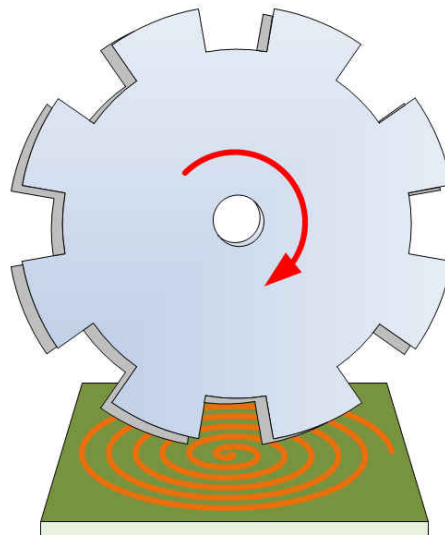
所有商标均为其各自所有者的财产。

1 LDC 应用

电感式感应仅使用交流磁场提供导电物体的非接触式感应。这种方法具有许多显著特性，包括低成本、高可靠性、低功耗，并且即使在严苛的环境（高温或潮湿、脏污或油腻）下也能稳定运行。此外，TI 的 LDC 器件不需要永磁体，也不受永磁体的影响。LDC 技术可以测量范围广泛的目标运动配置，如图 1-1 所示。



Axial Sensing



Event Counting

图 1-1. LDC 感应配置

1.1 轴向感应

在轴向感应配置中，导电目标沿垂直于线圈平面的轴移动，如图 1-1 的上半部分所示。LDC 传感器测量因目标移动而引起的电感变化。目标限制在仅沿一个轴移动。随着目标与传感器的距离发生变化，LDC 输出将与目标距离一致。

这种常见配置可用于各种系统，包括测量挤压材料以及感应门处于打开还是关闭状态。

1.1.1 按钮和键盘

轴向感应配置可用于人机界面 (HMI) 应用，如使用连续金属表面的按钮或键盘。通过将薄至 10 μ m 的金属膜附着到内表面，可采用非导电材料（如玻璃、塑料甚至木材）构造电感式触摸按钮。这类技术可用于构造耐用、防

水、寿命长并能够适应恶劣环境的界面，而采用其他技术则无法实现。有关使用 LDC1614 实现此功能的详细信息，请参阅 [触摸金属按钮参考设计](#)。

部分 LDC 器件（如 LDC2114）包括相应的算法和输出功能，使得此类器件可作为当前现有机电实现方案的直接替代产品并能简化软件设计。更多有关这些算法的信息，请参阅 [《LDC2112 和 LDC2114 内部算法功能》](#) 应用报告。

有关使用 LDC 感应来制作更可靠的弹片开关的另一个例子，请参阅 [16 按钮电感式键盘](#)。

1.2 事件计数

旋转感应的一个特例可被称为事件计数，通常用于测量旋转速率。图 1-1 的下半部分对此进行了说明。通过监测周期性的目标相互作用（例如与轮齿的相互作用），可以测量电机的旋转速率。[LDC0851 事件计数参考设计](#) 提供了此类配置的 LDC 测量示例。

基于 LDC 的事件计数也可用于 HMI 的控制旋钮；请参阅 [32 位置编码器旋钮](#)，以了解使用 LDC0851 实现此类应用的一种方式。

1.3 其他感应类型

LDC 技术不限于上述配置。例如，可以实现导体物体的接近检测。LDC 技术也可用于识别金属成分。

除了螺旋跟踪式 PCB 电感器外，LDC 技术还可以使用多种传感器。例如，使用 LDC 技术测量弹簧的伸展和收缩。

2 电感式感应工作原理

流过电感器的交流电流将产生交流磁场。如果将导电材料（如金属物体）带入电感器附近，磁场将在导体表面上感应循环电流（涡流）。

涡流是导体的距离、尺寸和成分的函数。涡流产生自己的磁场，这与传感器电感器产生的原始磁场相反。由于与原始磁场相反，原始磁场会被削弱；与电感器自由空间电感相比，这会降低电感。

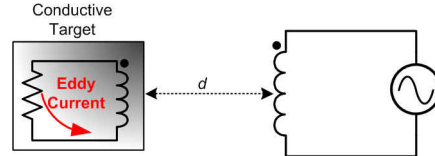


图 2-1. 交流磁场中的导体

可使用 L-C 谐振器产生适合于感应的电磁场。L-C 谐振电路的一种拓扑为并联 R-L-C 结构，如图 2-2 所示。为了简化电感器振幅的计算，通常使用并联电气模型。对于电感式感应应用，电阻元件表示寄生电路损耗，而不是离散元件。

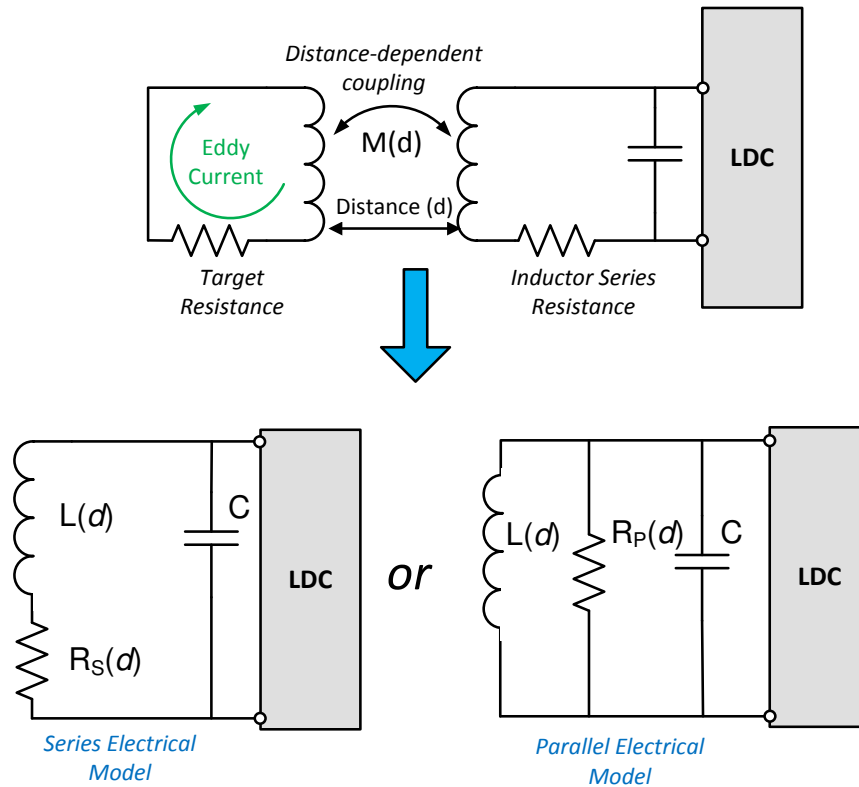


图 2-2. 并联电感式传感器的电气模型

电路以方程式 1 给出的频率谐振：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

目标位置的任何变动都会导致电感值 $L(d)$ 发生变化，进而导致谐振频率发生变化。这样，测量频率变化可用于确定电感变化，因此基于目标位置。此外，通过监测注入 LC 电路的能量，可以测量 $RS(d)$ 。TI 的各种 LDC 器件使用这两种原理中的一种或两种来确定目标位置的变化，具体取决于特定的器件。

Analog Wire 博客文章 [《电感式感应：应测量 \$L\$ 、 \$R_p\$ 还是两者都测量？》](#) 比较了两种不同的测量技术，并推荐了更合适的待监测参数。

3 LDC 器件特性概述

要为特定应用确定合适的 LDC 器件，需要基于若干器件参数。表 3-1 对各种 LDC 器件进行了比较。

表 3-1. LDC 器件比较

	LDC3114	LDC2112/4	LDC1312/4 LDC1612/4	LDC0851	LDC1101
电源电压	1.71 至 1.89 V	1.71 至 1.89 V	2.7 至 3.6 V	1.71 至 3.46 V	1.71 至 3.46 V
典型睡眠电流	5 μ A	5 μ A	35 μ A	不适用	135 μ A
典型关断电流	不适用	不适用	0.2 μ A	0.14 μ A	1.4 μ A
传感器频率范围 (越宽越好)	5 MHz 至 30MHz	1 MHz 至 30 MHz	1 kHz 至 10 MHz	300 kHz 至 19 MHz	500 kHz 至 10 MHz
传感器最小 R _p (越低越好)	350 Ω	350 Ω	1 k Ω /Ch0 = 250 Ω	不适用	1.25k Ω
输出 R _p 测量分辨率	不适用	不适用	不适用	不适用	16 位
输出 L 测量分辨率	12 位	12 位	LDC131x : 12 位 (16 位有效输出增益) LDC161x : 28 位	不适用	16 位或 24 位
最大参考频率 (越高越好)	不适用	不适用	40MHz	不适用	16MHz
内部基准振荡器	是	是	是	不可用	否
通道数量	4	LDC2112 : 2 LDC2114 : 4	LDC1312/LDC1612 : 2 LDC1314/LDC1614 : 4	1 (使用第二个传感器 进行参考比较)	1
最大采样率	160SPS	80SPS	LDC1312/4 : 13.3 kSPS LDC1612/4 : 4.1kSPS	4kSPS	180kSPS
汽车版本	LDC3114-Q1	不适用	LDC1312-Q1 LDC1314-Q1 LDC1612-Q1 LDC1614-Q1	不适用	不适用
开关输出	是，基于传感器 L	是，基于传感器 L	否	是，基于传感器 L	是，基于传感器 R _p 或 L
接口	I ² C - 400kbit 推挽式输出	I ² C - 400kbit 推挽式输出	I ² C - 400kbit	推挽式输出	SPI - 8MHz
独立操作 (无需 MCU)	是	是	否	是	否

3.1 采样率

LDC 器件的最大采样率介于 4kSPS 和 180kSPS 之间。4kSPS 足以应对广泛的应用，因为物理运动通常比电子信号慢得多。例如，在 4kSPS LDC 的 250 μ s 采样时间间隔内，以 100kph 速度行驶的汽车移动的距离不到 7mm。

一般来说，对 LDC 器件而言，要在采样率和有效分辨率之间进行权衡。应用手册《[优化 LDC161x 和 LDC1101 的 L 测量分辨率](#)》(SNOA944) 和《[优化 LDC131x 的 L 测量分辨率](#)》(SNOA945) 详细介绍了这一主题。

3.2 传感器 L 测量和参考频率

LDC 器件根据 [方程式 1](#) 中的关系测量传感器频率，从而确定传感器电感。需要某个源的参考频率。

部分 LDC 器件（如 LDC1314）可选择使用内部振荡器或外部参考振荡器，而其他器件（如 LDC1101）则需要外部振荡器。对于给定的采样频率，能够使用较高参考频率的器件可提供较高的测量分辨率。

如果 LDC 需要外部振荡器，则应为低抖动 ($<100\text{ps}_{\text{RMS}}$)、频率稳定且占空比为 50% 的方波。

3.3 传感器 R_p 测量

TI 的一些 LDC 器件能够测量传感器的并联谐振阻抗 (R_p)。可以对该 R_p 测量进行缩放，以匹配传感器 R_p 的范围，从而优化测量。

R_p 测量基于目标的电阻率，因此测量值将随目标温度的变化而变化；许多金属具有显著的电阻率温度系数 (temp-co)，这会导致根据系统温度改变测量值。例如，铜的温度系数 (temp-co) 为 $4300\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。如果目标温度变化 20°C ，LDC 将出现大于 8% 的 R_p 偏移，这对于应用而言可能是一个过大的误差。

由于温度系数较大， R_p 测量更适用于温度范围非常有限的应用，或监测目标温度的应用，或需要测量传感器能量损失或材料成分的应用。

LDC1101 提供极高的 R_p 测量精度，建议将其用于传感器频率高于 500kHz 的任何 R_p 测量。

3.4 传感器 R_p (电流) 驱动功能

随着目标离传感器越来越近，更多的能量消散在目标涡流中。这种能量损失需要用 LDC 器件来替代，以保持传感器振荡。每个 LDC 都具有一个它能够驱动的最小型传感器 R_p ；其中， R_p 越低，传感器损耗越大。理想的情况应是能够驱动损耗更高的传感器，它可带来更大的系统设计灵活性。甚至对于 L 测量应用， R_p 驱动也是一个考虑因素。

传感器驱动的术语因器件而异 - 在 LDC1101 上，RPMIN 设置用于控制传感器驱动。对于 LDC1312、LDC1314、LDC1612 和 LDC1614 器件，传感器驱动由 IDRIVE 设置进行配置。

对于使用 LDC0851 的应用，只要传感器电感和电容在数据表中指定的工作范围内，就不需要考虑因传感器驱动器电路设计而引起的传感器 R_p 。

3.5 开关输出功能

LDC0851 是一种具有单引脚开关输出的电感式比较器。LDC1101 可以配置为根据 R_p 或 L 转换结果切换 SDO 输出引脚，甚至能够动态地更改阈值。

如果需要此功能，当最大采样率小于 4kSPS 时，建议所有应用使用 LDC0851。如果应用需要更高的采样率，则建议使用 LDC1101。

3.6 传感器频率范围

传感器频率与电感器的物理尺寸相关。当传感器的频率取决于其电感和电容时，较高的频率通常与较小的电感（线圈）相关，反之亦然。

感应范围也与电感器（线圈）尺寸相关；较大的线圈具有更大的感应范围。因此，较大的低频传感器通常比较小的高频传感器距离目标更远。

3.7 多通道感应

多通道 LDC 提供了使用单个 LDC 器件设计多传感器系统的能力。多个传感器可配置一个专用参考传感器或采用差分传感器配置，以补偿环境变化。

LDC1612/4、LDC1312/4、LDC2112/4 和 LDC3114 使用内部开关多路复用器对其活动的传感器通道进行顺序采样，该多路复用器可在通道之间提供出色的匹配。通过选通外部参考，可以配置多个 LDC1101 器件进行同步 L 采样。

3.8 电源管理

主动转换时，LDC 器件通常消耗约 3mA 电流，主要取决于传感器 R_p 和电源电压。一些 LDC 器件具有非活动模式，在这种模式下，它们消耗的电流极小，因此更适合功率受限的应用。

LDC0851 的典型关断电流消耗仅为 140nA，LDC1312/4 和 LDC1612/4 的典型关断电流为 200nA，这使得这些器件成为电池供电系统的上佳选择。许多应用不需要非常高的采样率，因此，只要可能，通过调整占空比使 LDC 进入非活动模式能够显著节省电流。例如，LDC1312 应用以 20sps 采样时，消耗的电流约为 140 μ A。更多有关管理 LDC 器件功耗的信息，请参阅 TI 应用手册 [《电感式感应应用中适用于多通道 LDC 的功率降低技术》](#) (SNOA949)。

电感式触控 LDC 器件 (如 LDC2114 和 LDC3114) 可以按选定的扫描速率定期对所有活动的通道进行采样，然后自动返回到超低功耗模式，而无需任何 MCU 交互。

3.9 内部算法

电感式触控 LDC 器件 (如 LDC2114 和 LDC3114) 包括内部算法，可以自动处理传感器测量，并在没有任何 MCU 资源的情况下指示何时按下了按钮。这些算法为环境变化、按钮触发力的变化和可配置的扫描速率提供补偿，以使按钮更快地响应按压动作或极大地降低电源电流。

4 器件系列

4.1 电感式触控器件

移动电感式触控 LDC 器件 LDC3114 以及 2 通道 LDC2112 和 4 通道 LDC2114 是高分辨率 LDC，其内部算法已针对电感式触控应用进行了优化。内部算法提取对应于按钮按压的电感变化，并可通过专用输出引脚报告此事件。每个通道有一个专用传感器可以检测与小于 200nm 的金属偏转相对应的传感器移频。传感器频率可高达 30MHz，这使得圆形按钮可小至 2.4mm，矩形按钮可小于 2.0mm × 7.0mm。LDC3114 和 LDC2112/4 传感器可构建在 PCB 或柔性 PCB 之上。

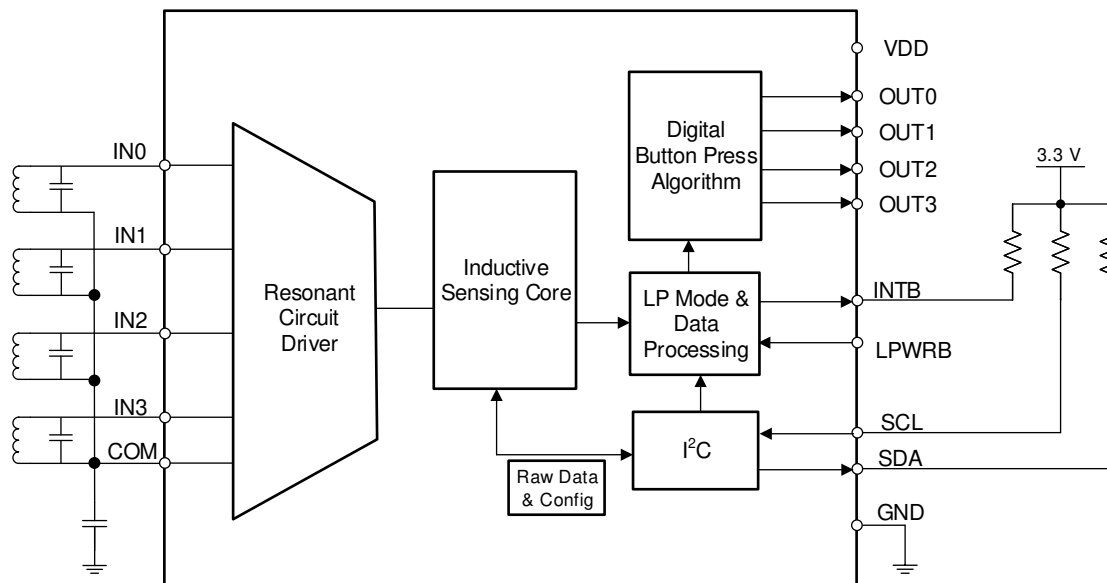


图 4-1. LDC3114 方框图

这一系列 LDC 的主要特性包括：

1. 单个器件支持多个按钮 - 最多 4 个按钮
2. 待机电流低于 5 μ A，平均工作电流低于 10 μ A
3. 传感器频率范围广泛 - 从 1MHz 到 30MHz
4. 专用输出引脚用于模拟机械按钮操作
5. 扫描速率高达 160SP
6. 电源电压范围为 1.71V 至 1.89V
7. I2C 接口用于配置和数据读回

4.1.1 电感式触控 LDC 推荐应用

电感式触控器件适用于各种替代按钮应用，包括移动和可穿戴系统以及工业和白色家电。

4.2 多通道 LDC 器件

多通道 LDC 系列由 LDC1312、LDC1314、LDC1612 和 LDC1614 组成。

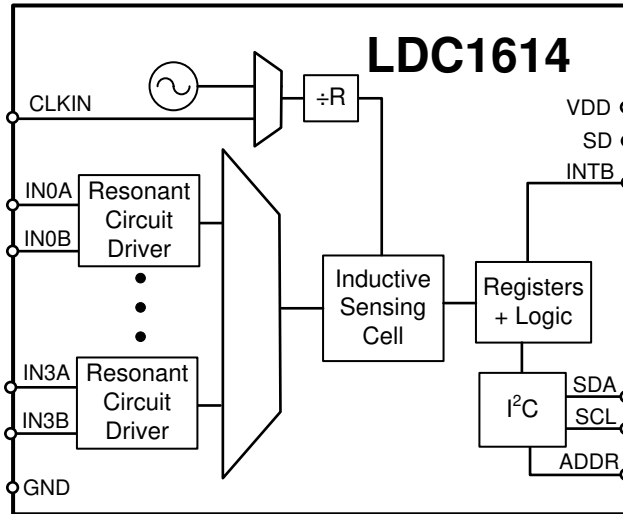


图 4-2. LDC1614 方框图

该架构的主要特性包括：

1. 单个器件上具有多个传感器 - 多路复用 2 或 4 通道转换，实现出色的通道间匹配
2. 电源电压范围为 2.7V 至 3.6V
3. LDC1612/4 的确定性采样率为 40SPS 至 4.1kSPS
4. LDC1312/4 的确定性采样率为 40SPS 至 13.3kSPS
5. 最大传感器频率范围为 1kHz 至 10MHz
6. 最大考频率为 40MHz
7. 两种低功耗非活动模式 - 睡眠（典型值小于 35 μ A）和关断（典型值小于 200nA）使得该系列适合电池供电应用

LDC161x 器件的分辨率为 28 位，而 LDC131x 的有效分辨率为 16 位。

这些器件的主要限制来自 I2C 总线带宽，而单通道转换能够以高达 4kSPS 的速度读取，当使用多个通道时，最大可获取的采样率成比例降低。该系列器件的一个良好特性是通用寄存器设置和通用尺寸 - 相关编程和设置在该系列中的所有器件间是兼容的。此外，LDC1312 和 LDC1612 共享 12 引脚 WSON 封装，而 LDC1314 和 LDC1614 共享 16 引脚 WQFN 封装。

4.2.1 多通道 LDC 推荐应用

多通道器件用途广泛，建议用于大多数应用。多通道功能对于需要绝对测量的系统或需要监测多个传感器的系统非常有用。

LDC1612/4 提供极高的分辨率，是高分辨率差分传感器配置等应用的上佳之选，还可以支持金属触摸按钮。

分辨率较低、采样率较高的 LDC1312/4 是低分辨率应用的理想选择。

4.2.2 LDC1101

LDC1101 在所有 LDC 中具有极高的 R_p 测量分辨率，并且器件间的匹配明显更好。它包括了与 LDC1612 相同的测量内核（高分辨率 L 测量块），但测量分辨率为 24 位。

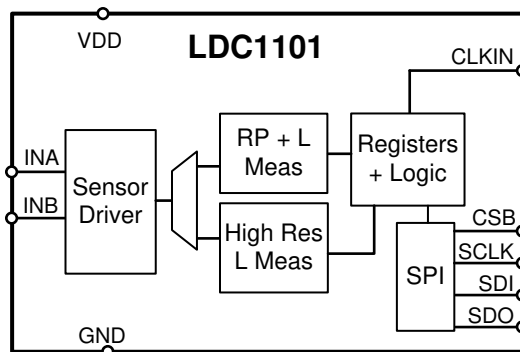


图 4-3. LDC1101 方框图

该器件的主要特性包括：

1. R_p 测量分辨率最高为 16 位
2. 电源电压范围为 1.71V 至 3.46V
3. LDC 采样率最高为 180kSPS
4. 传感器频率范围为 500kHz 至 10MHz
5. 最大参考频率为 16MHz
6. SDO 引脚上的开关输出功能
7. 小型 10 引脚 DFN 外形尺寸，减少外部无源器件数量
8. 两种低功耗非活动模式 - 睡眠 ($<135 \mu A$) 和关断 ($<1.4 \mu A$)

4.2.2.1 LDC1101 推荐应用

LDC1101 提供极高的 R_p 测量分辨率和精度，建议用于需要 R_p 测量的任何应用。

建议将 LDC1101 用于采样率要求超过 13.3ksps (LDC1312/4 能够达到的最高速度) 的任何 LDC 应用。

以 1.8V 电源运行且占用空间小，因而 LDC1101 适用于许多便携式应用。

4.2.3 LDC0851

LDC0851 是一种低成本的电感式比较器，根据感应电感和参考电感之间的差异产生输出。ADJ 引脚上的一对电阻器可用于调整灵敏度或开关距离；不需要其他配置。LDC0851 将一个电容器用于这两个传感器，这提高了两个传感器的匹配性，也降低了系统成本。LDC0851 没有任何寄存器，因此不需要任何 MCU 配置即可运行。

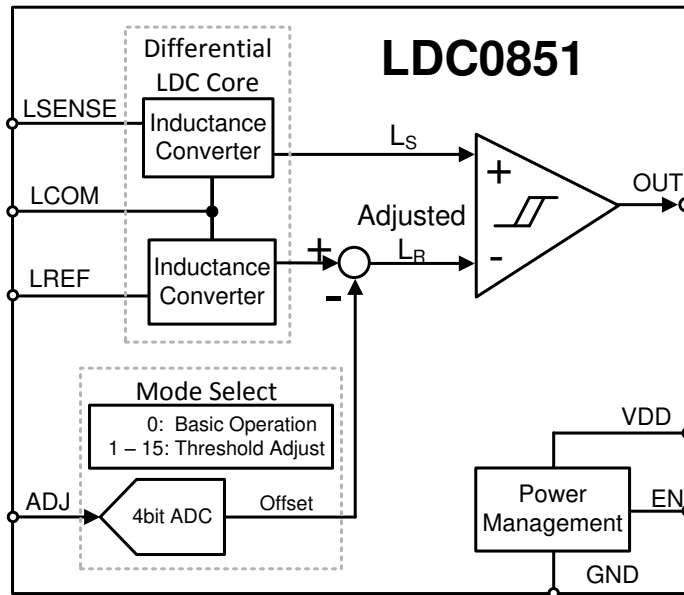


图 4-4. LDC0851 方框图

该器件的主要特性包括：

1. 操作简单
2. 仅由 ADJ 引脚上的两个电阻器进行配置
3. 本征温度与系统补偿
4. 电源电压范围为 1.71V 至 3.46V
5. 传感器频率范围为 300kHz 至 19MHz
6. 小型 8 引脚 DFN 外形尺寸

LDC0851 的传感器驱动设计使得它能够在其设计要求（基于传感器 L 和传感器 C）的范围内驱动几乎任何传感器，而不需要考虑传感器 R_p 。

4.2.3.1 推荐应用

建议将 LDC0851 用于当前使用霍尔传感器的应用，如接近开关测量。此外，LDC0851 还可代替光学传感器，用于旋转编码器应用，其优点是不受灰尘和污垢的影响，而灰尘和污垢会干扰光学解决方案。

5 总结

LDC 感应器件是一款适用于各种应用的出色解决方案。根据应用和系统需求，选择合适的 LDC 器件只需考虑几个因素；主要包括开关功能、采样率和器件分辨率。

6 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 C (November 2019) to Revision D (June 2021) Page

- 添加了 LDC3114 吞吐量文档..... 2
- 删除了整个文档中的 LDC100x 和 LDC1051..... 2
- 删除了与线性和横向感应相关的参考文献和图表。..... 2

Changes from Revision * (July 2016) to Revision C (November 2019) Page

- 删除了整个文档中的 LDC1000 引用..... 1

Changes from Revision A (January 2017) to Revision B (July 2018) Page

- 添加了 LDC2112/4 表条目..... 5
- 更新了列以在页面布局中包含 LDC1612/4 和 LDC1312/4..... 5
- 添加了“内部算法”部分..... 7
- 添加了 LDC2112/4 部分..... 8
- 更新了多通道 LDC 封装选项..... 9

Changes from Revision * (July 2016) to Revision A (January 2017) Page

- 已更新以反映数据表参数..... 5
-

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