

简介

Qvar 是意法半导体推出的一款静电传感器，适用于人体存在检测和运动检测、触摸检测和用户界面 (UI) 应用。

本应用笔记涵盖 Qvar 感应通道的配置和操作指南。

在塑料地板上行走然后触摸金属门把手时，人体通常会感知到轻微的触电感。脱下羊毛衫时，可能会产生微小的电火花。在衣服上反复摩擦气球，可以将它粘住。这些日常生活中的种种迹象表明：物体之间的摩擦可以产生静电或电荷。事实上，发生摩擦接触的物体之间都会产生静电。有时，接触的物体之间即便没有发生摩擦，两者分开后也会产生静电。

世间万物都是由原子构成的，每个原子都有一个带正电的原子核，原子核被大量电子包围。当两种不同的材料密切接触（如摩擦）时，其中一种材料吸引电子的能力可能更强，导致部分电子被拉拽到该材料中。当这两种材料分开时，其中一种材料可获得更多的电子（带负电），而另一种材料将失去一些电子（带正电），具体情况取决于二者的功函数。这种现象通常被称为摩擦起电 (triboelectricity) 或摩擦起电效应 (triboelectric effect)，“tribo”表示摩擦。日常生活中摩擦起电现象非常普遍，因此静电传感器可用于检测或感知各种人类活动、机械系统或工业过程。

目前流行的传感器普遍采用声学、电阻、电容、压电、光学和电磁感应技术，而静电传感器尚未获得广泛应用。相对于其他类型的传感器而言，静电传感器具有高性价比和高灵敏度等优势。

1 静电荷感应原理

材料之间发生接触或者材料与固体表面或液体表面接触，均会在材料上产生静电荷。可以通过电极和电子信号调节电路检测到电荷的存在，但是具体的电荷量通常不易测得。

带电粒子转移会导致电场波动，进而在电子电路中产生信号。如果电极嵌入绝缘体中或者电极与带电粒子之间没有直接接触，则感应过程是通过静电感应实现的。如果电极暴露于电荷中，则由于电极与带电粒子之间发生物理接触而导致电荷转移。

如果使用暴露于电荷中的电极，将同时发生静电感应和电荷转移，但通常以前者为主。如果经绝缘处理的电极连接到具有输入电阻 R_i 的信号调节电路，则后者可以测量电子流并产生可测量的输出。

静电传感器基于静电感应或电荷转移的感应原理，与电磁效应之间没有任何关联。静电感应传感器与电容传感器的感应原理相似。这是因为带电物体可以视为电容器的一个极板，而电极本身可以视为另一个极板。带电物体与电极之间的相对运动将改变两个极板之间的距离，从而改变电容值。同理，带电物体上的电荷量可能会随时间发生变化，因此极板之间的电压也会变化。

Qvar 代表电荷 ($= Q$) 变化 ($= \text{var}$)。它是一种能够测量准静电电位变化的电位感应通道，适用于以下应用：

- 接触式和非接触式人体运动检测与人体运动步态分析
- 人体存在检测
- 用户界面 (UI)
- 漏水检测

下文以人体运动为例进行介绍。行走、跑跳等人类日常行为会产生静电，因此人体本身自带电位 (U)。

这种静态电位变化在几毫秒内消失，因为人体通过空气 (C_x) 或鞋底 (C_s) 和地板 (C_F) 与大地之间存在耦合电容。

下图显示了一个站立的人和一个行走的人，分别标有相应的电位和电荷术语，图片下方包含这些术语的解释。

图 1. 站立与行走

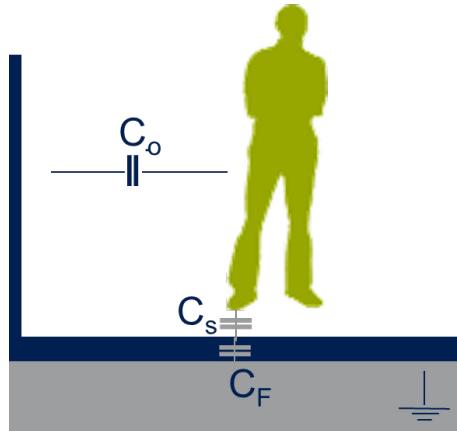


- U_{BML} = 静止人体电位
- Q_{BML} = 静止人体电荷
- dU_{BS} = 行走人体电位
- dQ_{BS} = 行走人体电荷

以静止人体为例，根据下图所示的模型，计算人体本身与大地之间的耦合电容。

图 2. 人体模型

$$U_{BML} = \frac{Q_{BML}}{C_B}$$



由于人体行走而随时间发生变化的 U_{BS} (人体电位) 使用如下模型进行计算:

$$\text{grad } U_{BS} = \frac{dU_{BS}}{dt} = Q_{BS} = \left(\frac{1}{\epsilon a S} \frac{dx}{dt} - \frac{x}{\epsilon a S^2} \frac{dS}{dt} \right)$$

其中:

x = 脚与地板之间的距离

S = 脚与地板的实际接触面积

ϵa = 鞋底与地板之间气隙的介电常数

请注意, 这里出现两个重要术语。

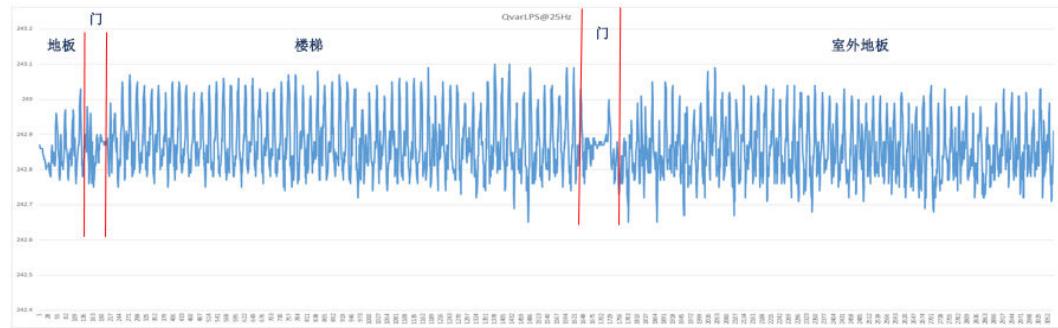
第一个术语是 dS/dt 。该术语表示鞋底运动与电位变化的关系, 其中 S 是脚与地面之间的实际接触面积。

第二个术语是 dx/dt 分数表示。该术语表示 x 变化与电位变化的关系, 其中 x 是脚与地面之间的距离。

人体行走时, 上述 2 个因素的变化成反比。脚与地面之间的实际接触面积增加时, 脚与地面之间的距离就会减少, 反之亦然。

下图显示了人体佩戴电极 (不接触皮肤) 的情况下连续行走时的 Qvar 感应信号。

图 3. 在室内和室外行走时的 Qvar 信号



具体而言, Qvar 感应通道可以检测到该电极上感应到的差分电位变化。

电极有以下三种放置方法:

1. 放在人体上但不接触皮肤
2. 放在人体上且接触皮肤
3. 不放在人体上

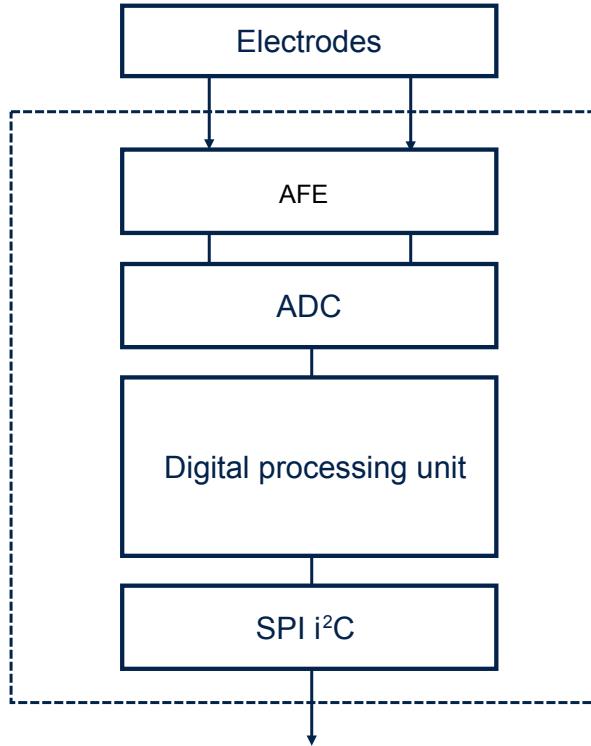
前两种称为 Qvar 贴身功能, 第三种称为 Qvar 雷达功能。

对于 UI 和漏水检测应用，最好选择专用电极（参见 第 5.1 节 用于用户界面应用的 Qvar）。

2 Qvar 感应通道架构

下图显示了器件（包含外部电极）的高层框图。

图 4. Qvar 感应通道架构



此架构的主要模块包括：

- 外部电极：必须将一个或两个电极连接到相应的引脚，Qvar 才能够采集感应数据。电极的数量以及尺寸由具体应用决定
- Qvar 模拟前端 (AFE)
- 模数转换器 (ADC)
- 数字处理器
- SPI 或 I²C 通信接口

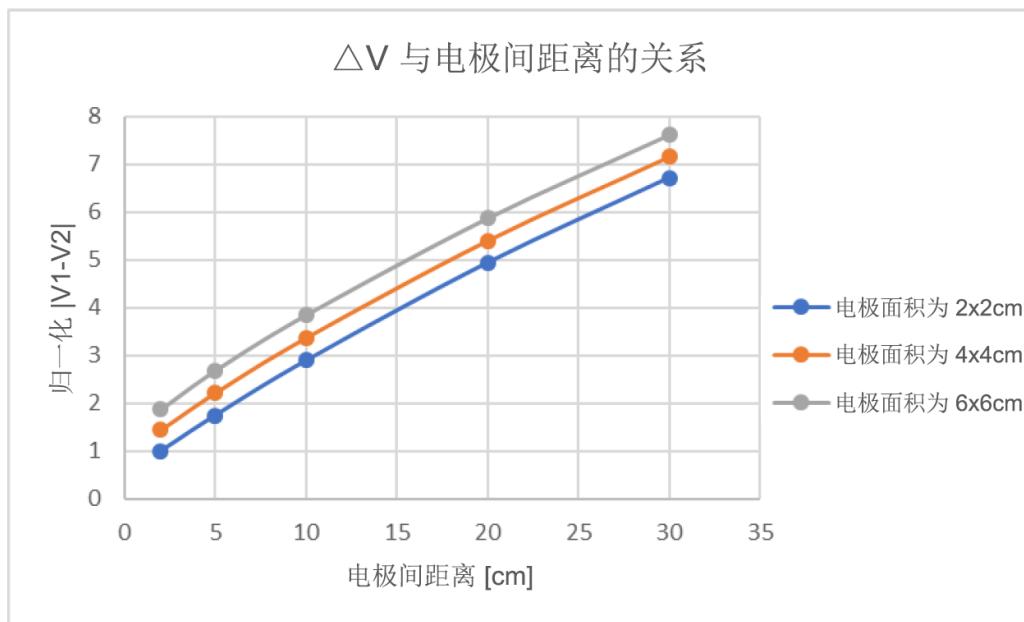
3 电极

众所周知，电极的尺寸、形状和材质等特性对 Qvar 通道输出的结果影响极大。

例如，传感器灵敏度与电极面积之间存在线性关系。传感器的灵敏度随着电极面积的增大而逐渐升高。

这种线性关系得到仿真结果的证实。下图显示了电极间距在 2 cm 到 30 cm 的范围内变化时，电极面积与电位差之间的线性关系。

图 5. Qvar 感应通道仿真结果



常用的电极材料有铜、银、锡或 ITO（氧化铟锡）等。电极材料对传感器灵敏度的影响非常大。

通常选择低电阻导电材料作为电极材料。相对于其他材料，铜的电阻率较低（参见表 1），因此导电性良好。导体的电阻率越低，电极中电荷的移动能力越强。因此，大多数应用使用铜作为 PCB 电极。由于电极通常作为 PCB 的金属表面，因此带有阻焊保护层，以防短路和防腐蚀。

表 1. 材料的电阻率

材料	电阻率 ($\Omega \times \text{cm}$)
铜	1.68×10^{-6}
银	1.59×10^{-6}
锡	1.09×10^{-5}
氧化铟锡	1.05×10^{-3}

使用电阻率更高的材料将导致传感器灵敏度降低。在这种情况下，可以通过增大电极面积来降低电阻。

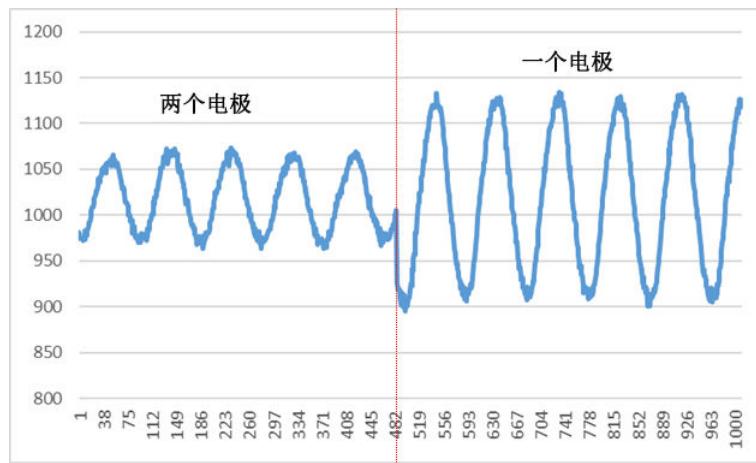
最后一个因素是电极的数量及其布局。在实际应用中 Qvar 感应通道可以连接一个电极或两个电极。

下图显示了两种电极配置（一个电极与两个电极）下外部噪声信号的振幅变化。当两个电极距离过近（低于 30 cm）时，共模耦合交流功率出现衰减。

将两个电极间的距离大于 30 cm 时，外部噪声的振幅显著增大，应通过算法来补偿此参数。

通常，选择合适的电极尺寸和电极间距即可获得最佳的信噪比 (SNR)。

图 6. 不同电极配置下的外部 50 Hz 噪声信号



Qvar 感应通道可以使用一个电极或两个电极。

这些电极必须连接到 QVAR1 和 QVAR2 引脚（引脚说明和连接，请参见数据手册）。在这两种配置下，Qvar 均发出差模信号，但对于单电极配置，对静电场变化的灵敏度会增强，因为共模信号没有充分抑制。人体存在检测中推荐使用单电极配置。

当电力线噪声较强时，建议使用双电极配置，以便抑制噪声。使用双电极配置还可以检测信号到达的方向。两个电极距离较远时可以获得两个感应点，可根据 Qvar 信号的符号来检测信号到达的方向。

如果不使用第二个电极，可以将引脚浮空。

4 数据采样的寄存器配置

用于使能和使用 **Qvar** 的配置参数与具体的传感器相关。以下各节详细介绍了嵌入 **Qvar** 的传感器，以及开启传感器和读取数据的指令。每个传感器都可以将 **Qvar** 数据就绪中断路由到传感器的中断引脚。

还可以选择 **Qvar** 缓冲器的等效输入阻抗（如果支持该功能）。有关该主题的更多信息，请参见数据手册。

用于写入和读取数据的伪指令采用以下结构：

`Write(register_to_write, data_to_write); MultiRead(register_to_read, pointer_to_data_buffer, data_bytes_to_read);`

4.1 ILPS22QS

使能 **Qvar**:

- `Write(0x10, 0x08); // ODR 设为 1 Hz`
- `Write(0x12, 0x80); // QVAR_enable`

Qvar 与压力传感器共用此 ODR，有关该值的更多信息，请参见数据手册或相应的应用笔记。

要读取输出数据，必须读取寄存器 28h、29h 和 2Ah:

- `MultiRead(0x28, (uint8_t*)&qvar_out, 3)`

Qvar 数据存储在变量 **qvar_out** 中（以 LSB 表示）。要将该值转换为 mV，在以下公式中插入此传感器的 **Qvar_Gain** 值 (438000):

- $\text{value[mV]} = \text{value[LSB]} / \text{Qvar_Gain}$

需要注意的是，**Qvar** 与压力传感器使用同一组输出寄存器。因此，如果使能 **Qvar**，则无法读取压力输出。

Qvar 引脚务必采用推荐的外部连接和电极网络，详情请参见数据手册。

4.2 LSM6DSV16X

使能 **Qvar** 并将数据就绪中断路由到 INT2:

- `Write(0x10, 0x07); // 在高性能模式下开启加速度计`
- `Write(0x11, 0x07); // 在高性能模式下开启陀螺仪`
- `Write(0x16, 0xC0); // QVAR_enable, QVAR_DRDY_INT2 激活`

要读取输出数据，必须读取寄存器 3Ah 和 3Bh:

- `MultiRead(0x3A, (uint8_t*)&qvar_out, 2)`

Qvar 数据以 240 Hz 的固定 ODR 存储在变量 **qvar_out** 中（以 LSB 表示）。要将该值转换为 mV，在以下公式中插入此传感器的 **Qvar_Gain** 值 (78):

- $\text{value[mV]} = \text{value[LSB]} / \text{Qvar_Gain}$

此外，**Qvar** 数据可以存储在 FIFO 中（将 COUNTER_BDR_REG1 (0Bh) 寄存器中的 QVAR_BATCH_EN 位置 1），还可以由 MLC/FSM 逻辑进行处理。通过设置 CTRL7 (16h) 寄存器中的 QVAR_C_ZIN [1:0] 位来选择 **Qvar** 缓冲器的等效输入阻抗。最后，可以使用 CTRL10 (19h) 寄存器中的 QVAR_SW 位在内部调换连接到 QVAR1 引脚和 QVAR2 引脚的输入电极。

Qvar 引脚务必采用推荐的外部连接和电极网络，详情请参见数据手册。

4.3 LSM6DSV16BX

使能 Qvar 并将数据就绪中断路由到 INT2:

- `Write(0x10, 0x07); // 在高性能模式下开启加速度计`
- `Write(0x11, 0x07); // 在高性能模式下开启陀螺仪`
- `Write(0x16, 0xCC); // QVAR_enable, QVAR_DRDY_INT2 激活, 两个引脚均激活`

要读取输出数据, 必须读取寄存器 3Ah 和 3Bh:

- `MultiRead(0x3A, (uint8_t*)&qvar_out, 2)`

Qvar 数据以 240 Hz 的固定 ODR 存储在变量 `qvar_out` 中 (以 LSB 表示)。要将该值转换为 mV, 在以下公式中插入此传感器的 `Qvar_Gain` 值 (78):

- $\text{value[mV]} = \text{value[LSB]} / \text{Qvar_Gain}$

Qvar 引脚可以单独使能, 以便在单端模式或者差分模式下与 CTRL7 (16h) 寄存器中的 `AH_QVAR1_EN` 位和 `AH_QVAR2_EN` 位结合使用。

此外, Qvar 数据可以存储在 FIFO 中 (将 COUNTER_BDR_REG1 (0Bh) 寄存器中的 `AH_QVAR_BATCH_EN` 位置 1), 还可以由 MLC/FSM 逻辑进行处理。通过设置 CTRL7 (16h) 寄存器中的 `AH_QVAR_C_ZIN[1:0]` 位来选择 Qvar 缓冲器的等效输入阻抗。最后, 可以使用 CTRL10 (19h) 寄存器中的 `AH_QVAR_SW` 位在内部调换连接到 QVAR1 引脚和 QVAR2 引脚的输入电极。

Qvar 引脚务必采用推荐的外部连接和电极网络, 详情请参见数据手册。

5 应用示例

Qvar 可用于改进和简化用户界面 (UI)，具体表现为，在用户与电极接触时以较高的精度感应电荷变化。

可以通过开启 Qvar 传感器来使能 UI (如第 4 节 数据采样的寄存器配置中所述)，然后可以使用专用固件函数处理传感器数据，或者直接将传感器数据反馈到有限状态机以节省资源和功耗，具体配置可以参考第 5.3 节 使用 FSM 时的寄存器配置。

5.1 用于用户界面应用的 Qvar

触控设备应用通常使用按钮，但触控感应界面更简洁、性价比更高。

Qvar 可用作触摸敏感界面，只需将一个结构简单的电极连接到此传感器即可检测触摸、按压甚至滑动操作。

可以通过微控制器上运行的算法来检测对电极执行的所有操作，如果传感器上具有机器学习内核 (MLC) 和有限状态机 (FSM) 功能，还可以直接实现检测。

第 5.3 节 使用 FSM 时的寄存器配置中介绍了两个 FSM 示例，一个示例是入耳检测算法，另一个示例是只需一种配置即可检测到单指触摸、双指触摸、三指触摸、长按和滑动操作。

5.1.1 用于触摸感应的电极

可以使用以下两个信号来检测触摸或长按操作：Q+ 或 Q- (数据手册中的 QVAR1/QVAR2) 和 GND。

设计目标是用户同时触摸 Q+ 和 GND 区域。为此，可以采用多种不同的设计。

我们在内部测试阶段曾使用下图所示的电极，使用 4 个引脚 (按 GND、Q+、GND 和 GND 的顺序) 只是为了匹配 4 引脚连接器。使用 2 个引脚即可获取信号。

这些电极印在柔性电路板上，接触面 (铜制) 暴露在外部。为了检测触摸手势，将其置于设备的触摸区域。

电路板尖端裸露的铜线是实际的电极。

同时按压这两个电极时，传感器会测量到较高的电荷变化，导致输出信号会达到饱和状态。信号饱和电平与连接的引脚相关：Q+ 和 Q- 的作用相反。

因此，信号饱和相当于按下按钮。

图 7. 柔性电极示例



本示例中的电极尺寸为 10 mm x 10 mm，但电极尺寸在 UI 应用中的重要性低于人体存在检测，因此在挑选电极时应考虑到触摸区域电极的便利性。

这种布局是触控感应界面的理想之选，仅用指尖按压电极区域即可轻而易举的触摸到两个电极。

下图展示了另一个电极示例，此电极印在 PCB 板上，其中 Q+ 信号与 GND 信号以另一种图案交错排列。仅图案存在区别，其尺寸可以根据实际需要进行调整。

图 8. 用于触摸检测的 PCB 电极示例



请注意，可以同时使用上述两种 UI 界面，即一个“按钮”使用交错排列的 Q+ 和 GND，而另一个“按钮”使用 Q- 和 GND。

在这种情况下，输出信号的饱和电平可能为高电平，也可能为低电平，由按下的具体按钮决定。如果同时按下两个按钮，信号的饱和电平通常为低电平，但根据不同的路径阻抗，也可能为高电平。

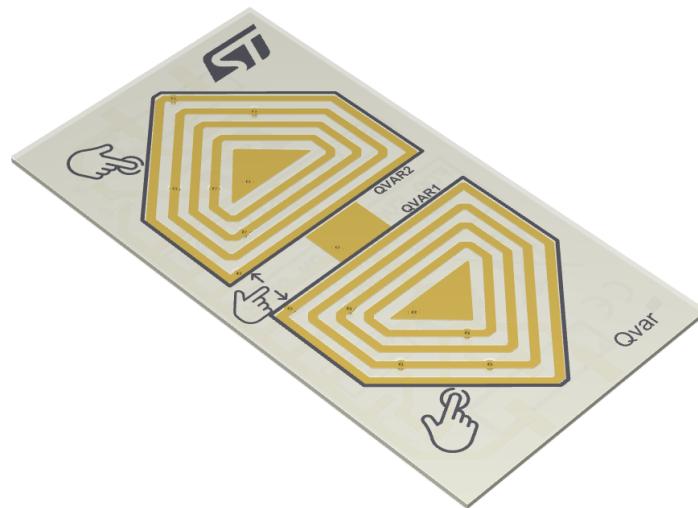
5.1.2 用于滑动感应的电极

如第 5.1.1 节 用于触摸感应的电极中所述，可以使用两个“按钮”来感应电极区域的滑动操作。

滑动检测应用的原理是：当用户先后快速连续触摸两个按钮时（两个 Qvar 输出先后短接到 GND），信号在正负饱和之间变化。

下图展示了滑动测试的电极设计。

图 9. 用于滑动检测的 PCB 电极示例



两侧的箭头由同心层（一侧是 Q+、另一侧是 Q-）和 GND 构成，中心的正方形区域连接到 GND。

触摸界面的尺寸可以根据具体应用进行调整。必须同时触摸 Q 和 GND。

为了检测到滑动操作，还需要使用相应的算法。常用方式是分别设置 Q+ 和 Q- 的阈值，以便检测其中一个电极是否短路（即，是否按下了相应的按钮）。当信号输出先后超出这两个阈值时，算法应检测到一个方向上的滑动；当信号输出以相反顺序先后超出这两个阈值时，算法应检测到另一个方向上的滑动。

两个电极仍可作为按钮使用，由固件/软件来分析信号并进行交互检测。

5.1.3 用于漏水检测的电极

漏水检测的前提条件是：水作为导体能够像手指一样转移电荷。

其工作原理与触摸电极相同，因此 Q+ (或 Q-) 和 GND 电极之间遇水即可发生短路。

我们测试了多种电极结构，最终确定如下图所示的漏水检测电极结构，此电极结构可以根据实际需要进行调整。

图 10. 用于漏水检测的电极示例



在结构内部，外部接线连接到塑料结构凹槽内的两个金属环。主体结构采用 3D 打印技术制造。

如果将漏水检测设备水平放置在水面上（如上图所示），即使表面的水量极小依然可以检测到。

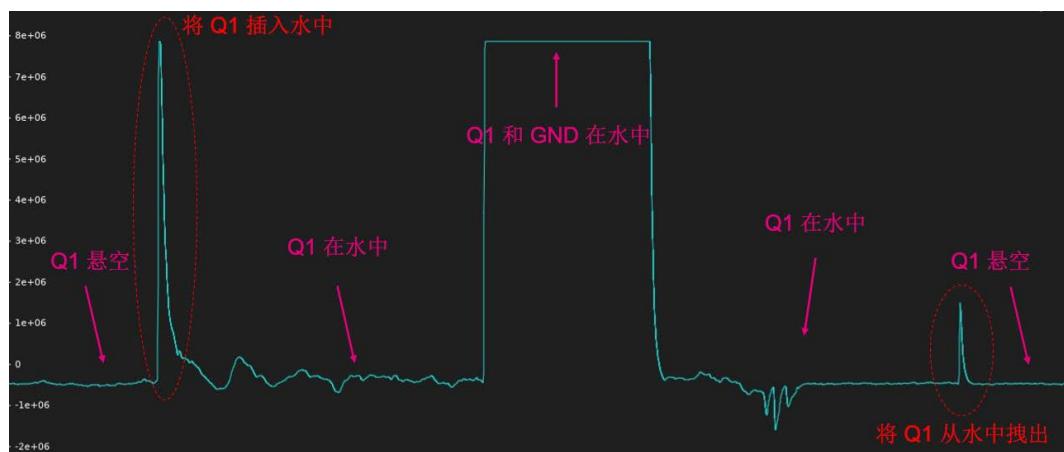
当两个电极完全浸泡在水中时，Qvar 感应通道与 GND 之间会发生短路。

这会触发信号饱和，类似于触摸感应电极。

如果将漏水检测设备垂直放置在容器内，只有当水位到达上端的金属表面时才会触发 Qvar 响应，因此如果要检测固定水位，可以通过设置两个电极之间的距离来开发具体的应用。

请注意，当其中一个电极在水中而另一个电极浮在水面上时，Qvar 信号噪声较大，但通过引入简单的计算公式可以明确检测到水同时接触两个电极的过程，具体如下图所示。

图 11. 漏水检测示例



在漏水检测应用中，当水位下降到检测阈值以下时，固定金属环的结构表面可能残留水分，请注意此因素。

如果残留的水层过大，则会触发短路和信号饱和。

就这一点来说，垂直配置的结果更稳定可靠。

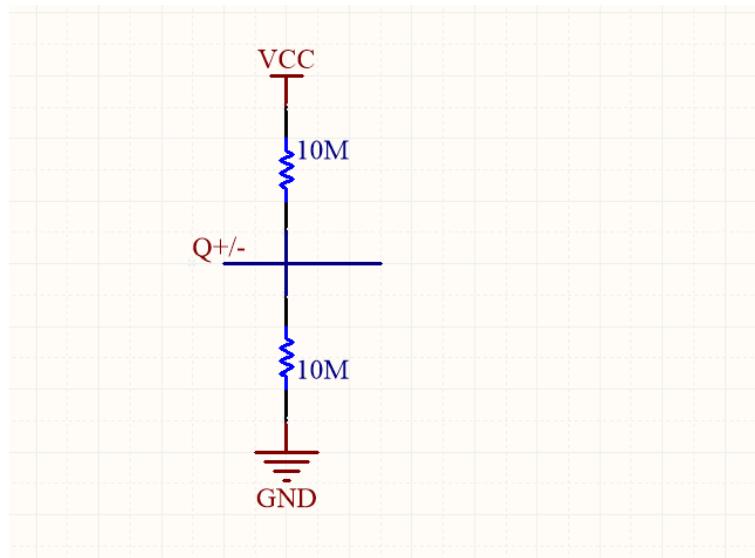
5.1.4 UI 的极化电路

适配器输出的信号在默认状态（当两个引脚均浮空时）下存在偏移值，该信号根据极化程度接近或恰好处于饱和电平。

如果没有极化电路，偏移无法得到控制，偏移量取决于过孔和导线中的不匹配问题。通过使用如下图所示的极化电路，这种不匹配问题会转移到分压器的大电阻上。

这样，即使电阻器的精度为 $\pm 1\%$ ，也可以获得 ± 1300 LSB 左右的较大偏移。

图 12. 极化电路

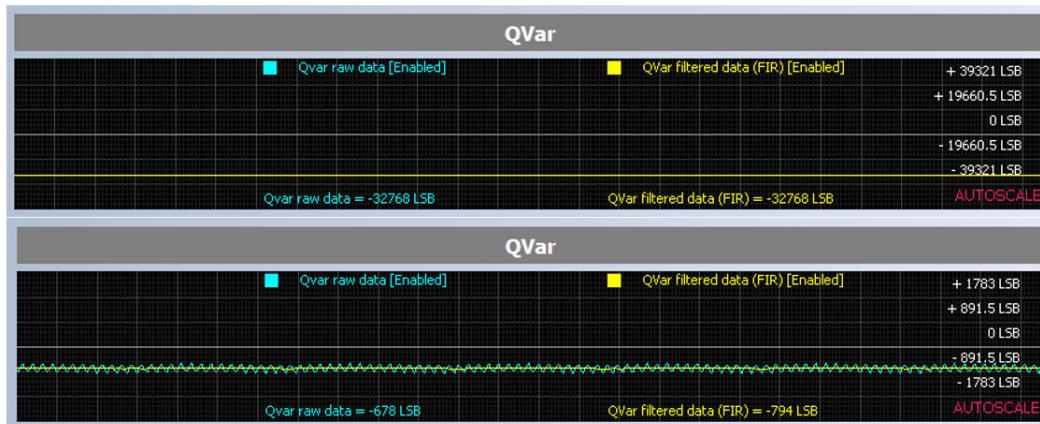


此外，信号具有大量的正负值可供利用，两个电极可分别用于实现不同的功能。例如，当与接地电极结合使用时，它们可以提供两个由单个传感器管理的“按钮”。

触摸 Q+ 和 GND 时，信号达到正饱和状态。触摸 Q-（数据手册中的 QVAR2）和 GND 时，信号达到负饱和状态。

下图举例显示了一个非常严重的不匹配问题，即产生的偏移量非常高，已经接近饱和低电平 (-32000 LSB)，而在适配器上使用极化电路后，偏移量降到了 -700 LSB。

图 13. 在偏移量较高的适配器上使用极化电路之前（上图）和之后（下图）的 Qvar 信号示例

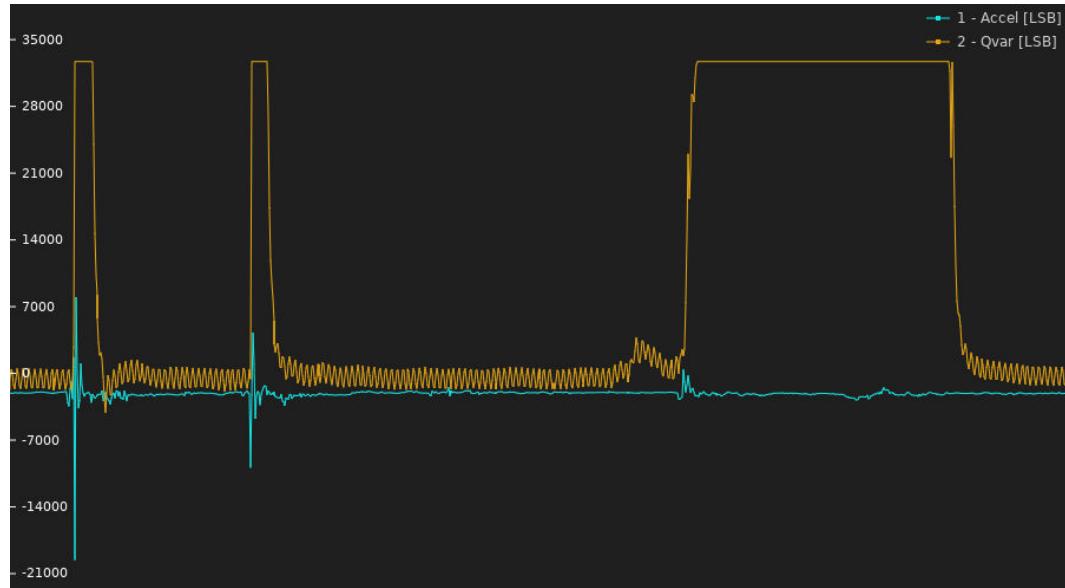


5.1.5 UI 应用中的触摸感应示例

在用户界面应用中，通常使用加速度计来检测单击或双击操作，在触摸设备时，加速度计可以检测到任何微小冲击。在加入 Qvar 后，不仅可以区分点击或触摸操作，还可以识别长按操作，而加速度计传感器无法做到这一点。下图显示了两次点击和一次长按（触摸电极区）的连续操作。

使用的电极和极化电路来自上一节的内容。

图 14. Qvar (黄色) 和加速度计 (浅蓝色) 的点击和长按对比



加速度计和 Qvar 均检测到两次点击操作，但只有 Qvar 检测到长按操作并显示相关信号。

Qvar 检测到的信号与电极设计密切相关。

对于 UI 应用，该电极 (Q+ 或 Q-) 应该紧邻接地电极，以便触摸操作同时作用于这两个电极。

5.1.6 50 Hz 信号处理

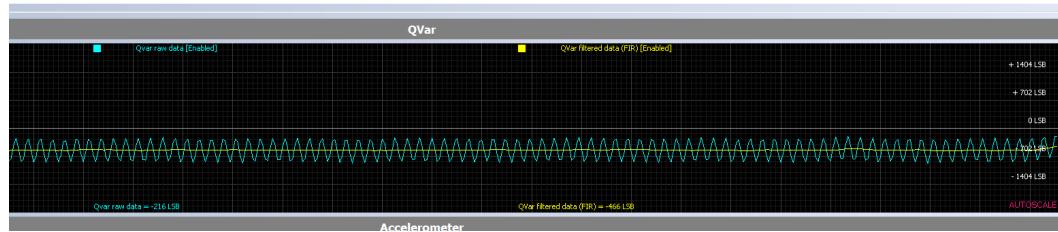
Qvar 可检测到 50/60 Hz 电源外部噪声。

此噪声可以使用数字带通 FIR 滤波器来滤除。

设计滤波器时，应满足具体应用所需的信号响应时间和降噪程度。

在下图中，原始信号显示为浅蓝色，滤波后的信号显示为黄色。

图 15. Qvar 原始信号 (浅蓝色) 和滤波后的信号 (黄色)



5.2 用于雷达应用的 Qvar

Qvar 电荷感应功能可实现无接触感应，因此适用范围广泛。

有关 Qvar 功能原理的详细介绍，请参见本应用笔记的第 1 节 静电荷感应原理。本节介绍的原理和提示可作为使用 Qvar 电荷感应功能开发特定应用的指南。

请注意，我们的内部测试结果表明，单电极配置是雷达应用的首选。

5.2.1 人体存在检测

如前文所述，人体带有静电，靠近 Qvar 电极时，电极会检测到电荷发生变化。

有一些情况难以区分（例如，辨别人类或动物，或者辨别运动方向），但在实际应用中通过精确的特征描述可以实现人体存在检测。

我们对各种电极进行了内部测试，还测试了多种尺寸和形状。最终得出下图所示的最佳布局。

图 16. 用于雷达应用的 Qvar 电极



请注意，周围的环境会干扰检测到的信号。

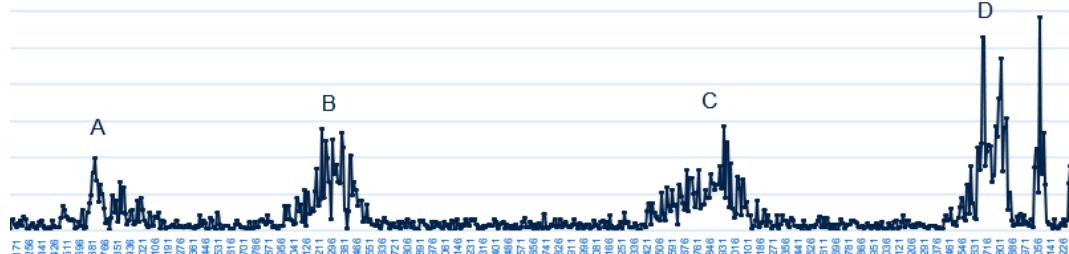
例如，室内测量与室外测量的噪声强度（主要针对 50/60 Hz 信号）存在显著差异。

传感器连接电源还是连接小号电池，也会导致噪声强度存在显著差异。

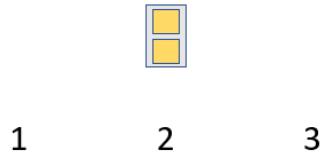
甚至是放置电极的表面材料也会影响信号增加量。

下图展示了使用此电极采集的数据示例（50/60 Hz 滤波）。

图 17. Qvar 数据采集（4 个点分别代表人体的 4 种移动方式）



不同的点代表以不同的移动方式接近传感器。具体可以参考下图，图中用黄色标示的是电极，它与三个位置在垂直方向上的距离为 1 米。



- A. 1 个人从点 2 移动到点 1
- B. 1 个人从点 1 移动到点 3
- C. 2 个人从点 3 移动到点 2
- D. 1 个人从点 1 移动到点 2

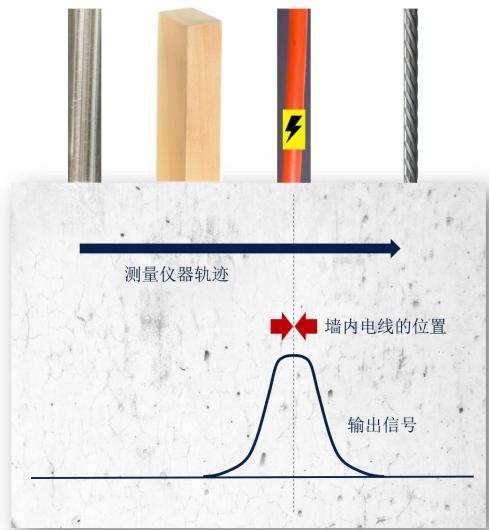
如图所示，2 个人经过电极时的信号较宽，但 1 个人以慢速经过电极时的信号也较宽，这两种情况很难区分。

5.2.2

电线检测

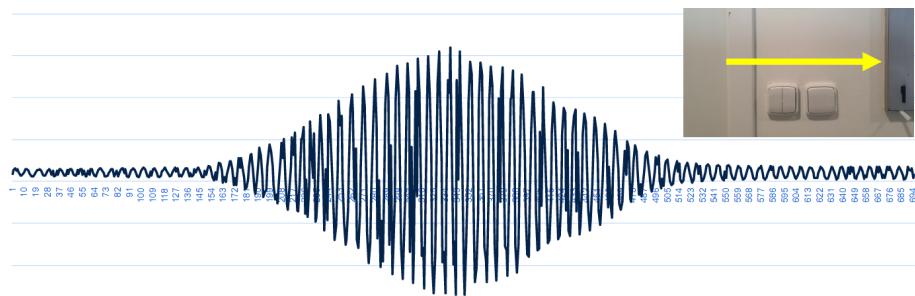
50/60 Hz 噪声在多种应用中可能是一个不利因素，但它可用于检测电极附近的电线。主要原理如下图所示。

图 18. 电线检测

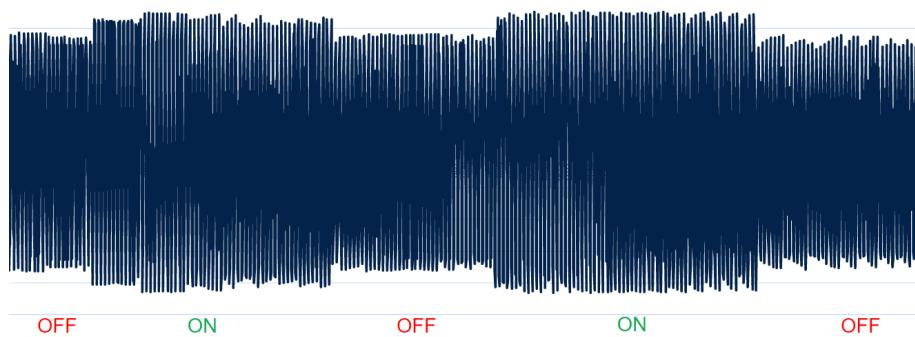


使用的电极与存在检测应用一致，沿墙壁移动电极时，可以检测到墙壁内的电线，无论是否通电。以通电的电灯开关电线为例，测试结果如下图所示。

当在开关上方侧向移动电极时，可以在墙壁内敷设电线的位置检测到强烈的信号。



此外，还可以检测开关是接通状态还是关闭状态。在这种情况下，由于两种状态的信号差异并不大，最好事先检测其中一种状态的信号作为参照。



5.3 使用 FSM 时的寄存器配置

为了识别 UI 应用的不同模式，可以使用微控制器上运行的算法，或者使用传感器上运行的有限状态机（如果可用）。

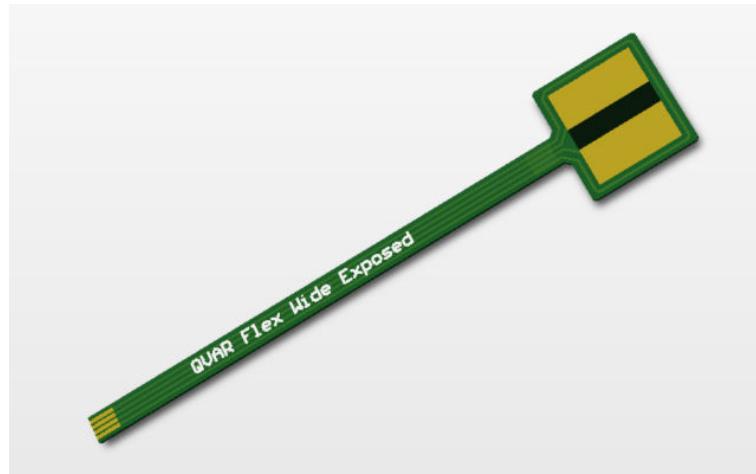
下文介绍了一些使用 FSM 的配置示例。

有关有限状态机的更多信息，请参见相应器件的 **FSM** 应用笔记。

5.3.1 入耳检测

入耳检测可以视为一种长触摸手势，设备接触到耳朵内部后 Qvar 可以检测到该操作。

图 19. 用于 FSM 入耳检测的电极



使用的电极如图 19 所示，它使用 **Q+** 引脚和 **GND** 引脚来检测电荷变化，并在 Qvar 检测到人体与电极接触时触发 **INT2** 中断。

在入耳检测应用中使用了 **LSM6DSV16X**，具体配置如图 20 所示。

在此配置中，加速度计 ODR 为 30 Hz，Qvar ODR 为 240 Hz，加速度计的电流消耗为 195 μ A，Qvar 的电流消耗为 15 μ A，FSM 的电流消耗为 4 μ A，总计 214 μ A。Qvar 数据的阈值设为 32000 LSB。由于外部传感器（在本例中为 Qvar）的灵敏度保持默认值（即 0.0015，对应的半精度浮点数 (HFP) 为 1624h），因此 FSM **THRESH1** 值设为 48.000。

下文将对入耳检测状态机进行介绍。

图 20. 入耳检测配置

BYTE #	NAME	7	6	5	4	3	2	1	0
00h	CONFIG A	01 (1 个阈值)		11 (3 个掩码)		00		01 (1 个短定时器)	
01h	CONFIG B	0	0	0	0	0	0	0	0
02h	SIZE				1Eh (30 字节)				
03h	SETTINGS	00		0	0	0		00	
04h	RESET POINTER				00h				
05h	PROGRAM POINTER				00h				
06h	THRESH1					5200h (48.000)			
07h									
08h	MASKA					80h (+X)			
09h	TMASKA					00h			
0Ah	MASKB					01h (‘入耳’输出)			
0Bh	TMASKB					00h			
0Ch	MASKC					00h (‘未入耳’输出)			
0Dh	TMASKC					00h			
0Eh	TC					00h			
0Fh	TI3					0Ah (10 个样本)			
10h	SINMUX					23h			
11h	02h					02h			
12h	SELMA					66h			
13h	SRP					33h			
14h	LNTH1 TI3					73h			
15h	SELMB					77h			
16h	OUTC					99h			
17h	SELMA					66h			
18h	SRP					33h			
19h	GNTH1 TI3					53h			
1Ah	CRP					44h			
18h	SELMC					88h			
1Ch	CONTREL					22h			
1Dh	STOP					00h			

指令部分说明

- **PP = 10h**
无需样本集即可执行附带参数 02h 的 SINMUX 命令。它用于选择“外部传感器”作为状态机的输入。由于 CTRL7 (16h) 寄存器的 QVAR_EN 位置 1，因此选择 Qvar 传感器。在这种情况下，Qvar 数据可用作外部传感器的 +X 轴。PP = PP + 2。
- **PP = 12h**
无需样本集即可执行 SELMA 命令。选择 MASKA (80h)。PP = PP + 1。
- **PP = 13h**
无需样本集即可执行 SRP 命令。RESET POINTER 设为下一个状态，即 14h。PP = PP + 1。
- **PP = 14h**
需要样本集才能执行 LNTH1 | TI3 条件。如果 Qvar 数据小于或等于 THRESH1，则 PP = RP。如果连续 10 个样本的 Qvar 数据均大于 THRESH1，则 PP 递增 (PP = PP + 1)。
- **PP = 15h**
无需样本集即可执行 SELMB 命令。选择 MASKB (01h)。PP = PP + 1。
- **PP = 16h**
无需样本集即可执行 OUTC 命令。产生中断，并根据选定的临时掩码 (01h) 更新 OUTS 寄存器。PP = PP + 1。
- **PP = 17h**
无需样本集即可执行 SELMA 命令。选择 MASKA (80h)。PP = PP + 1。
- **PP = 18h**
无需样本集即可执行 SRP 命令。RESET POINTER 设为下一个状态，即 19h。PP = PP + 1。
- **PP = 19h**
需要样本集才能执行 GNTH1 | TI3 条件。如果 Qvar 数据大于 THRESH1，则 PP = RP。如果连续 10 个样本的 Qvar 数据均小于或等于 THRESH1，则 PP 递增 (PP = PP + 1)。

- **PP = 1Ah**
无需样本集即可执行 CRP 命令。RESET POINTER 被恢复为默认值, 即 10h。PP = PP + 1。
- **PP = 1Bh**
无需样本集即可执行 SELMC 命令。选择 MASKC (00h)。PP = PP + 1。
- **PP = 1Ch**
无需样本集即可执行 CONTREL 命令。产生中断, 并根据选定的临时掩码 (00h) 更新 OUTS 寄存器。PP = RP。

只能在加速度计和陀螺仪传感器均处于掉电模式时执行 FSM 配置。有关完整的设备配置, 请参考以下脚本:

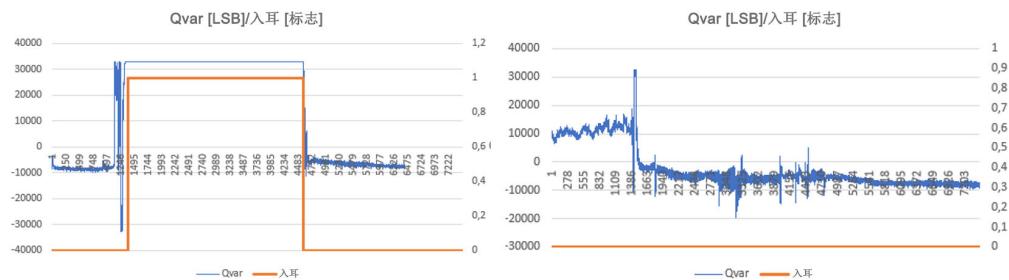
1. 将 00h 写入寄存器 10h // 将加速度计传感器设为下电模式
2. 将 00h 写入寄存器 11h // 将陀螺仪传感器设为下电模式
3. 将 80h 写入寄存器 01h // 使能对内嵌功能寄存器的访问
4. 将 01h 写入寄存器 05h // EMB_FUNC_EN_B (FSM_EN) = '1'
5. 将 4Bh 写入寄存器 5Fh // EMB_FUNC_ODR_CFG_B (FSM_ODR) = '01' (26 Hz)
6. 将 01h 写入寄存器 46h // FSM_ENABLE = '01h'
7. 将 01h 写入寄存器 0Fh // FSM_INT2 = '01h'
8. 将 40h 写入寄存器 17h // PAGE_RW: 使能写操作
9. 将 11h 写入寄存器 02h // 使能对内嵌高级功能寄存器的访问, PAGE_SEL = 1
10. 将 7Ah 写入寄存器 08h // PAGE_ADDRESS = 7Ah
11. 将 00h 写入寄存器 09h // 将 00h 写入寄存器 FSM_LONG_COUNTER_L
12. 将 00h 写入寄存器 09h // 将 00h 写入寄存器 FSM_LONG_COUNTER_H
13. 将 01h 写入寄存器 09h // 将 01h 写入寄存器 FSM_PROGRAMS
14. 将 01h 写入寄存器 09h // 执行空写操作, 以递增写入地址
15. 将 00h 写入寄存器 09h // 将 00h 写入寄存器 FSM_START_ADDRESS_L
16. 将 04h 写入寄存器 09h // 将 04h 写入寄存器 FSM_START_ADDRESS_H
17. 将 41h 写入寄存器 02h // PAGE_SEL = 4
18. 将 00h 写入寄存器 08h // PAGE_ADDRESS = 00h
19. 将 71h 写入寄存器 09h // CONFIG_A
20. 将 00h 写入寄存器 09h // CONFIG_B
21. 将 1Eh 写入寄存器 09h // SIZE
22. 将 00h 写入寄存器 09h // SETTINGS
23. 将 10h 写入寄存器 09h // RESET_POINTER
24. 将 00h 写入寄存器 09h // PROGRAM_POINTER
25. 将 00h 写入寄存器 09h // THRESH1 LSB
26. 将 52h 写入寄存器 09h // THRESH1 MSB
27. 将 80h 写入寄存器 09h // MASKA
28. 将 00h 写入寄存器 09h // TMASKA
29. 将 01h 写入寄存器 09h // MASKB
30. 将 00h 写入寄存器 09h // TMASKB
31. 将 00h 写入寄存器 09h // MASKC
32. 将 00h 写入寄存器 09h // TMASKC
33. 将 00h 写入寄存器 09h // TC
34. 将 0Ah 写入寄存器 09h // TIMER3
35. 将 23h 写入寄存器 09h // SINMUX
36. 将 02h 写入寄存器 09h // 02h
37. 将 66h 写入寄存器 09h // SELMA
38. 将 33h 写入寄存器 09h // SRP
39. 将 73h 写入寄存器 09h // LNTH1 | TI3
40. 将 77h 写入寄存器 09h // SELMB
41. 将 99h 写入寄存器 09h // OUTC

42. 将 66h 写入寄存器 09h // SELMA
43. 将 33h 写入寄存器 09h // SRP
44. 将 53h 写入寄存器 09h // GNTH1 |TI3
45. 将 44h 写入寄存器 09h // CRP
46. 将 88h 写入寄存器 09h // SELMC
47. 将 22h 写入寄存器 09h // CONTREL
48. 将 00h 写入寄存器 09h // STOP
49. 将 01h 写入寄存器 02h // 禁止对内嵌高级功能寄存器的访问, PAGE_SEL = 0
50. 将 00h 写入寄存器 17h // PAGE_RW: 禁止写操作
51. 将 00h 写入寄存器 01h // 禁止对内嵌功能寄存器的访问
52. 将 02h 写入寄存器 5Fh // MD2_CFG (INT2_EMB_FUNC) = '1'
53. 将 74h 写入寄存器 10h // CTRL1_XL = '74h' (正常模式, 30 Hz)
54. 将 B0h 写入寄存器 16h // CTRL7 = 'B0h' (使能 Qvar, Zin = 235 MΩ)

以下折线图分别为将设备放入耳朵并取出（左侧）时以及刚从桌子上拿起设备（右侧）时的信号响应示例。

根据左图可知, 当设备接触耳朵内的皮肤时, 信号达到饱和状态, 并且 FSM 返回 1, 直到从耳朵内取出电极为止。根据右图可知, 当拿起设备时, 信号发生波动, 但没有达到饱和状态, 因此 FSM 输出没有上升。

图 21. FSM 的信号响应



附录 A

参考文献

- Yong Yan, Yonghui Hu, Lijuan Wang, Xiangchen Qian, Wenbiao Zhang, Kamel Reda, Jiali Wu, Ge Zheng, "Electrostatic sensors – Their principles and applications", Measurement, Volume 169, February 2021, article 108506
- Chen Xi, Zheng Wei, Cui Zhanzhong and Li Pengfei , "Research on the detection method based on human body quasi-electrostatic field," IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2011, pp. 357-359, doi: 10.1109/ICEMI.2011.6037834

版本历史

表 2. 文档版本历史

日期	版本	变更
2022 年 1 月 11 日	1	初始版本
2022 年 2 月 23 日	2	更新了第 4.1 节“ILPS22QS”
2022 年 7 月 15 日	3	更新了第 1 章“静电荷感应原理” 更新了第 4.2 节“LSM6DSV16X” 增加了第 4.3 节“LSM6DSV16BX” 更新了第 5.1 节“用于用户界面应用的 Qvar” 更新了第 5.1.1 节“用于触摸感应的电极” 增加第 5.1.2 节“用于滑动感应的电极”、第 5.1.3 节“用于漏水检测的电极”和第 5.2 节“用于雷达应用的 Qvar”
2022 年 8 月 11 日	4	更新了 图 18. 电线检测 少量文本更新

目录

1	静电荷感应原理	2
2	Qvar 感应通道架构	5
3	电极	6
4	数据采样的寄存器配置	8
4.1	ILPS22QS	8
4.2	LSM6DSV16X	8
4.3	LSM6DSV16BX	9
5	应用示例	10
5.1	用于用户界面应用的 Qvar	10
5.1.1	用于触摸感应的电极	10
5.1.2	用于滑动感应的电极	12
5.1.3	用于漏水检测的电极	13
5.1.4	UI 的极化电路	14
5.1.5	UI 应用中的触摸感应示例	14
5.1.6	50 Hz 信号处理	15
5.2	用于雷达应用的 Qvar	16
5.2.1	人体存在检测	16
5.2.2	电线检测	18
5.3	使用 FSM 时的寄存器配置	19
5.3.1	入耳检测	19
附录 A		23
版本历史		24
目录		25
表一览		26
图一览		27

表一覽

表 1.	材料的电阻率	6
表 2.	文档版本历史	24

图一覽

图 1.	站立与行走	2
图 2.	人体模型	3
图 3.	在室内和室外行走时的 Qvar 信号	3
图 4.	Qvar 感应通道架构	5
图 5.	Qvar 感应通道仿真结果	6
图 6.	不同电极配置下的外部 50 Hz 噪声信号	7
图 7.	柔性电极示例	10
图 8.	用于触摸检测的 PCB 电极示例	11
图 9.	用于滑动检测的 PCB 电极示例	12
图 10.	用于漏水检测的电极示例	13
图 11.	漏水检测示例	13
图 12.	极化电路	14
图 13.	在偏移量较高的适配器上使用极化电路之前（上图）和之后（下图）的 Qvar 信号示例	14
图 14.	Qvar（黄色）和加速度计（浅蓝色）的点击和长按对比	15
图 15.	Qvar 原始信号（浅蓝色）和滤波后的信号（黄色）	15
图 16.	用于雷达应用的 Qvar 电极	16
图 17.	Qvar 数据采集（4 个点分别代表人体的 4 种移动方式）	16
图 18.	电线检测	18
图 19.	用于 FSM 入耳检测的电极	19
图 20.	入耳检测配置	20
图 21.	FSM 的信号响应	22

重要通知 - 请仔细阅读

意法半导体公司及其子公司（“意法半导体”）保留随时对 **ST** 产品和/或本文档进行变更、更正、增强、修改和改进的权利，恕不另行通知。买方在订货之前应获取关于意法半导体产品的最新信息。意法半导体产品的销售依照订单确认时的相关意法半导体销售条款。

买方自行负责对意法半导体产品的选择和使用，意法半导体概不承担与应用协助或买方产品设计相关的任何责任。

意法半导体不对任何知识产权进行任何明示或默示的授权或许可。

转售的意法半导体产品如有不同于此处提供的信息的规定，将导致意法半导体针对该产品授予的任何保证失效。

ST 和 **ST** 标志是意法半导体的商标。关于意法半导体商标的其他信息，请访问 www.st.com/trademarks。其他所有产品或服务名称是其各自所有者的财产。

本文档中的信息取代本文档所有早期版本中提供的信息。

© 2021 STMicroelectronics - 保留所有权利