

Application Note

使用霍尔效应传感器的低功耗设计



Harish Kumar, Alicia Rosenberger, Patrick Simmons

摘要

游戏控制器和虚拟现实控制器具有可通过霍尔效应传感器实施的各种控件。由于控制器设计紧凑且由电池供电，因此效率至关重要。本文档探讨了在不影响控制器用户体验的情况下优化霍尔效应传感器功耗的各种方法。

内容

1 引言.....	2
2 低功耗模式.....	3
2.1 下电上电.....	3
2.2 按需转换.....	6
2.3 唤醒检测.....	7
2.4 变化时唤醒.....	8
3 具有多个传感器的低功耗模式.....	9
4 低功耗模式设计示例.....	10
4.1 设计示例场景 2.....	10
4.2 设计示例场景 2.....	10
5 总结.....	11
6 参考文献.....	12
7 修订历史记录.....	12

插图清单

图 1-1. 具有触发器、拇指操纵杆和按钮等用户界面的典型游戏控制器.....	2
图 2-1. 典型应用图显示了使用 EN 引脚对传感器进行下电上电的能力.....	3
图 2-2. 时序图显示了由微控制器进行下电上电时的器件电流消耗.....	4
图 2-3. TMAG5273 的典型应用图展示了使用 INT 引脚触发转换的能力.....	6
图 2-4. 按需转换的时序图.....	6
图 2-5. TMAG5273 处于唤醒和睡眠模式，响应超限情况.....	7
图 2-6. TMAG3001 通过磁轴测量进行变化时唤醒.....	8
图 2-7. TMAG3001 通过角度测量进行变化时唤醒.....	8
图 3-1. 在同一总线中将多个传感器连接在一起.....	9
图 3-2. 时序图显示了多个 TMAG5253 器件连接在一起时的信号.....	9

表格清单

表 2-1. TMAG5273 和 TMAG3001 的不同功率模式.....	4
表 2-2. TMAG5273 在具有不同睡眠时间的占空比自调节模式下的平均电流消耗.....	5
表 4-1. 场景 1 中的系统级节能.....	10
表 4-2. 场景 2 中的系统节能.....	10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

游戏控制器是一种标准用户界面，通常与 Xbox、PlayStation 等游戏机配对使用。这些游戏控制器具有许多不同的控件，其中包括触发器、拇指操纵杆、按钮和方向键，所有这些控件都需要传感器将用户的机械输入转换为电刺激。由于这些器件采用人机工程学设计，旨在实现外形小巧、便于携带并且长时间保持通电状态，因此采用尽可能紧凑的低功耗检测解决方案非常重要。本文档将探讨与游戏控制器中使用的传感器相关的不同低功耗模式的各种用例。

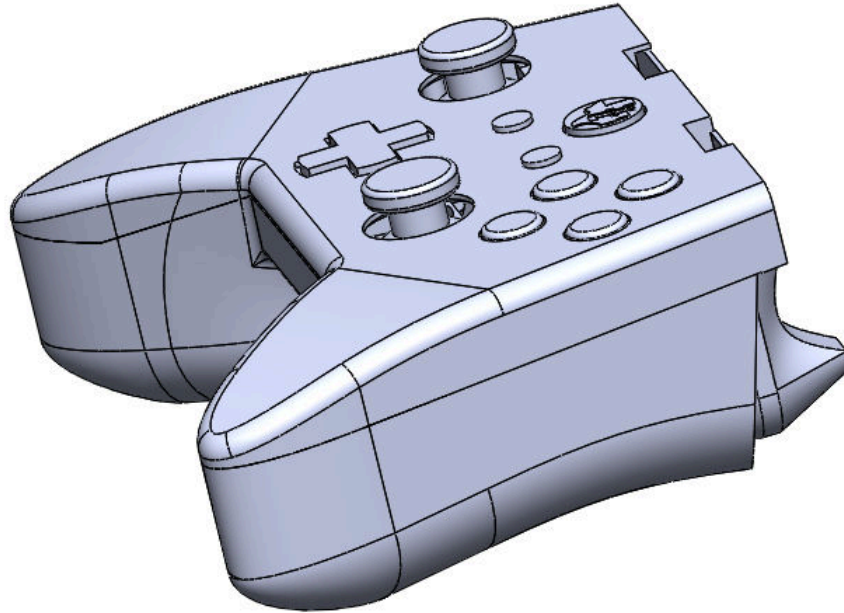


图 1-1. 具有触发器、拇指操纵杆和按钮等用户界面的典型游戏控制器

2 低功耗模式

通常，线性霍尔传感器在触发器或拇指操纵杆中用于检测精确的位置。这些传感器具有模拟输出或数字输出接口，例如 SPI 或 I²C。为了实现高效率，具有模拟输出的传感器可由微控制器进行下电上电，具有数字输出的传感器可置于触发模式或占空比自调节模式。在下面的各部分中，我们详细展示了这些实现。

2.1 下电上电

具有模拟输出的线性霍尔传感器（例如 DRV5055 和 TMAG5253）易于使用，通常用于游戏控制器中的模拟触发器和拇指操纵杆。

这些传感器可直接由电池或 1.8V 或 3.3V 等稳压电源电压供电。为了对传感器进行下电上电，传感器的电源电压可由微控制器关闭和打开，但在许多情况下，这无法实现，因为该电源电压可能也会为电路板中的其他元件供电。在这些情况下，可使用负载开关对传感器进行下电上电。为了消除负载开关等附加元件并实现所需的功效，TMAG5253 等线性霍尔传感器可提供用于下电上电的 EN 引脚。TMAG5253 等线性霍尔传感器还具有非常短的上电时间 (< 25 μs)，从而使外部 ADC 不仅能够更快地对信号进行采样，还能快速关断以降低系统功耗。下面的图 2-1 显示了传感器 EN 引脚由微控制器控制的典型图。可以使用脉宽调制 (PWM) 信号来控制 EN 引脚，从而使微控制器能够根据系统中的需要权衡采样频率和功率。

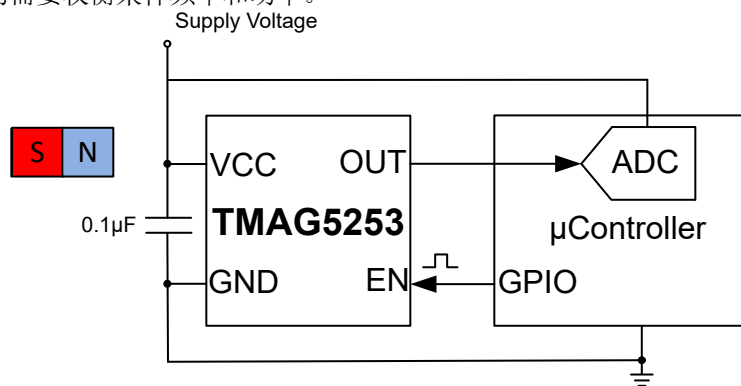


图 2-1. 典型应用图显示了使用 EN 引脚对传感器进行下电上电的能力

图 2-2 显示了使用 EN 引脚对传感器进行下电上电的时序图。传感器在运行时间 t_{active} 内打开，传感器提供与外部磁场成比例的输出，并在 t_{shdn} 内关闭以节省电量。方程式 1 显示了器件的平均电流消耗，其中 $I_{\text{CC,ACTIVE}}$ 表示运行期间的活动电流，而 $I_{\text{CC,SHDN}}$ 表示关断电流。

$$I_{\text{CC,AVG}} = \left(\frac{I_{\text{CC,ACTIVE}} \times t_{\text{ACTIVE}} + I_{\text{CC,SHDN}} \times t_{\text{SHDN}}}{t_{\text{ACTIVE}} + t_{\text{SHDN}}} \right) \quad (1)$$

例如，TMAG5253 在活动模式下的活动电流为 2.1mA，在关断模式下的活动电流小于 10nA。如果传感器以 50us 的活动时间进行下电上电并关断 100ms，则平均电流消耗为 1.06 μA。

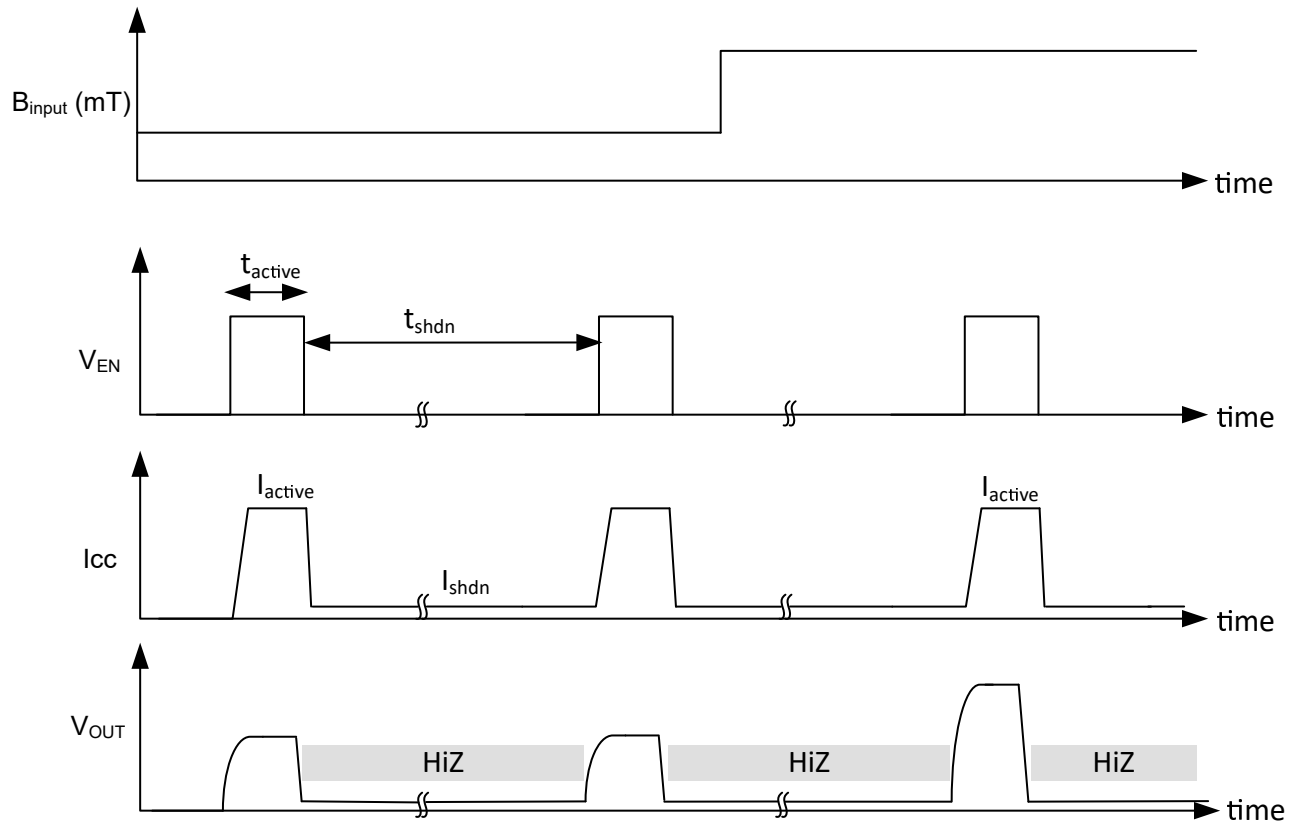


图 2-2. 时序图显示了由微控制器进行下电上电时的器件电流消耗

2.1.1 占空比自调节低功耗运行

在需要减轻微控制器负担的情况下，[TMAG3001](#)、[TMAG5273](#) 和 [TMAG5170](#) 等数字 3D 霍尔传感器可提供具有不同电流电平的多功率模式，从而降低系统功耗。表 2-1 概述了可用于 [TMAG5273](#)

和 [TMAG3001](#) 的不同功率模式。

 表 2-1. [TMAG5273](#) 和 [TMAG3001](#) 的不同功率模式

工作模式	器件功能	电流消耗 (TMAG5273)	电流消耗 (TMAG3001)
连续测量模式 (I_{CC_ACTIVE})	器件持续测量 x、y、z 轴数据的活动状态	2.3mA	2.1mA
待机模式 ($I_{STANDBY}$)	器件已准备好在触发后开始主动转换	0.45mA	0.45mA
唤醒和睡眠模式 (I_{CC_DCM})	以所配置的时间间隔唤醒以测量 x、y、z 和 temp 轴在 1000Hz 下的数据	240 μ A	230 μ A
睡眠模式 (I_{SLEEP})	超低功耗状态	1 μ A	40nA

根据系统级功率限制和所需的输出数据速率，[TMAG5273](#) 可置于任何一种功率模式下。当处于唤醒和睡眠模式时，传感器会根据用户配置的睡眠间隔进行占空比自调节。对于需要通过角度测量来确定方向和幅度的应用（例如拇指操纵杆），用户可以配置 [TMAG5273](#) 以便在每次器件唤醒时测量多个轴数据。要计算 1 个、2 个或 3 个通道的平均电流消耗、转换时间、 $t_{measure}$ 和睡眠时间，需要 t_{sleep} 。然后可以使用方程式 2 计算 [TMAG5273](#) 的平均电流消耗 $I_{CC_average}$ 。

$$I_{CC_DCM} = \frac{I_{cc, active} * T_{measure} + I_{standby} * T_{start_sleep} + I_{sleep} * T_{sleep}}{T_{measure} + T_{sleep} + T_{start_sleep}} \quad (2)$$

其中，

- $I_{cc,active}$ 是转换期间消耗的活动电流，通常约为 2.3mA

- T_{measure} 是转换所选通道所花费的时间，对于单通道，通常为 50us，对于 2 通道，通常为 75us，对于 3 通道，通常为 100us
- $I_{\text{DCM_sleep}}$ 是指唤醒和睡眠模式（也称为占空比模式）期间消耗的电流
- T_{sleep} 是传感器保持在唤醒和睡眠模式的睡眠部分的时间
- I_{standby} 是指待机模式下消耗的电流
- $T_{\text{start_sleep}}$ 是器件从占空比模式的睡眠部分转换到待机状态所需的时间。典型值为 50 μs 。
- $T_{\text{start_measure}}$ 是器件从待机状态转换到活动转换模式所需的时间

表 2-2 显示了唤醒和睡眠模式期间的平均功耗，间隔为 1ms 和 20s。

表 2-2. TMAG5273 在具有不同睡眠时间的占空比自调节模式下的平均电流消耗

睡眠模式持续时间 (ms)	三个磁通道启用时的平均电流 (uA) (VCC=1.8V)	两个磁通道启用时的平均电流 (uA) (VCC=1.8V)	一个磁通道启用时的平均电流 (uA) (VCC=1.8V)
1	220.4	174.2	125.9
5	50	39.0	27.9
10	25.9	20.3	14.6
15	17.7	14	10.1
20	13.5	10.7	7.8
30	9.3	7.4	5.5
50	6.0	4.9	3.7
100	3.5	3	2.4
500	1.5	1.4	1.3
1000	1.3	1.2	1.1
2000	1.1	1.1	1.1
5000	1.1	1.0	1.0
20000	1.0	1.0	1.0

2.2 按需转换

为了更好地控制采样时间点并保持低功耗，适用于空间受限设计的 **TMAG5273** 或 **TMAG3001** 等数字线性霍尔传感器允许微控制器仅在必要时触发转换。 **TMAG5273** 可置于低功耗待机模式，在这种模式下，微控制器可使用 **INT** 引脚或通过 **I²C** 命令触发转换，并使传感器与系统需求保持同步。图 2-3 所示为连接到微控制器的 3D 霍尔效应传感器的典型应用图。图 2-4 显示了微控制器触发转换的时序图。

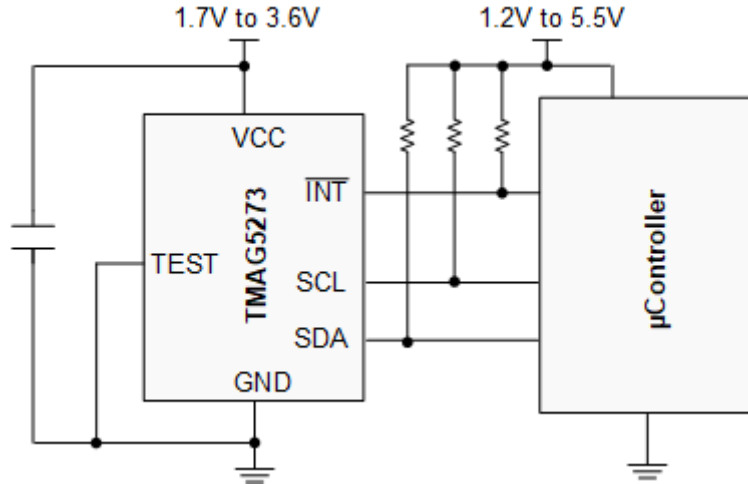


图 2-3. **TMAG5273** 的典型应用图展示了使用 **INT** 引脚触发转换的能力

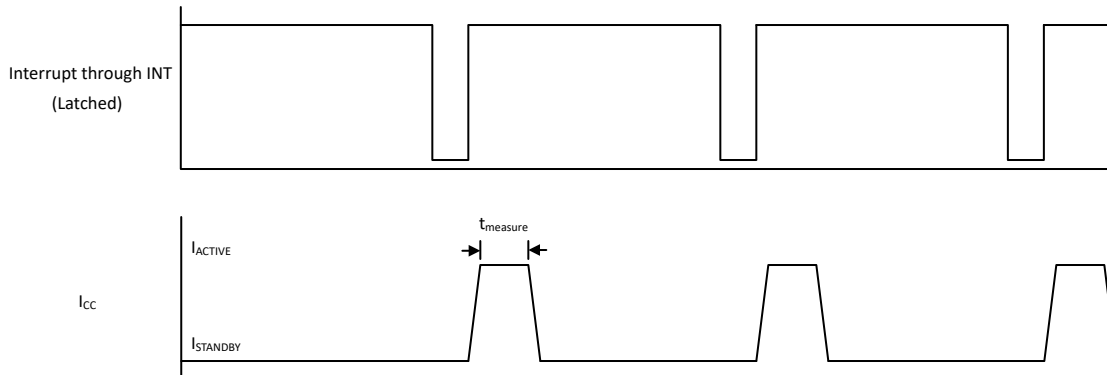


图 2-4. 按需转换的时序图

2.3 唤醒检测

此外，在唤醒和睡眠模式下，可以将类似于 **TMAG5273** 的数字 3D 霍尔传感器配置为在超过特定阈值时生成中断。在使用按钮或触发器等用户界面唤醒系统的情况下，此过程尤其有用。**TMAG5273** 等器件可置于唤醒和睡眠模式，在该模式下，传感器会在预先配置的睡眠时间间隔后唤醒，进行测量并返回睡眠状态。如果测量值超过设定的阈值，则满足中断条件。器件可以继续退出唤醒和睡眠 (W&S) 模式并进入待机模式，如图 2-5 所示。

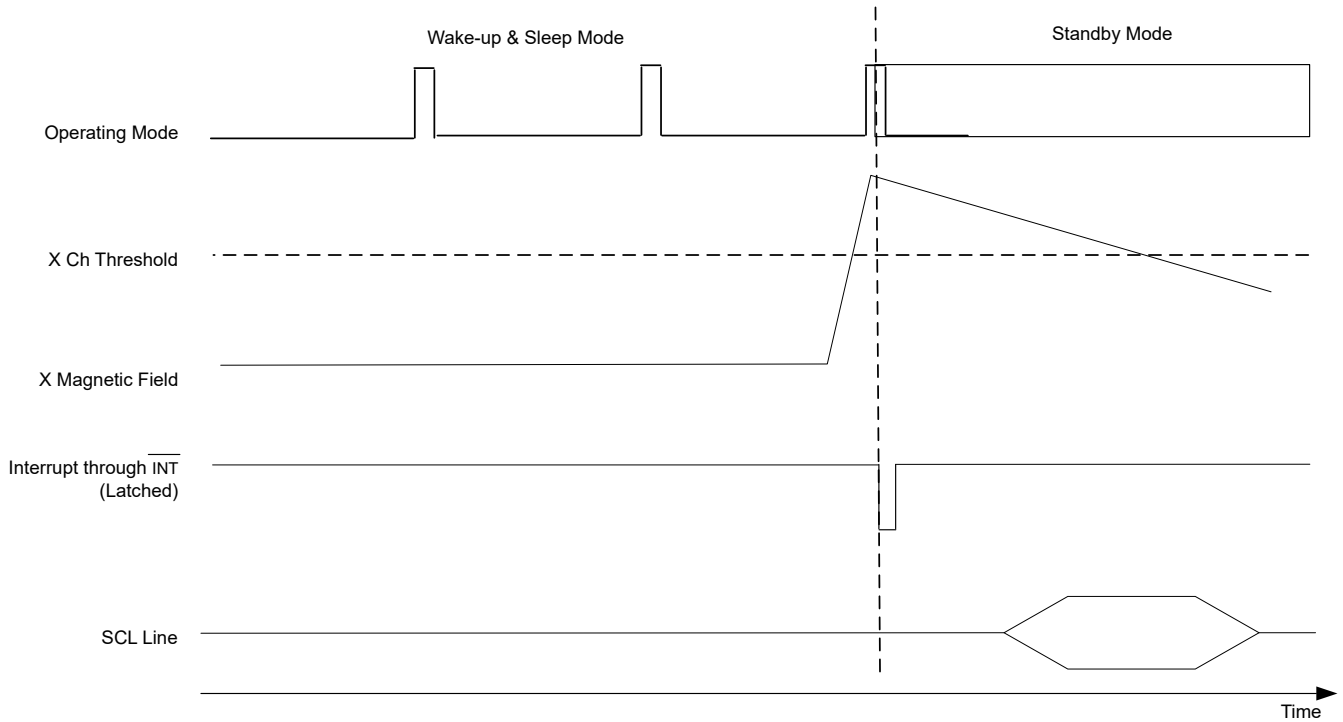


图 2-5. TMAG5273 处于唤醒和睡眠模式，响应超限情况

2.4 变化时唤醒

在变化时唤醒模式下，**TMAG3001** 监测磁轴之一或角度输出的变化，并通过提供中断响应来唤醒系统。当使用滚轮等用户界面来唤醒系统时，此功能将非常有用。该器件可以配置为在待机、活动或唤醒和睡眠模式下提供变化时唤醒响应，当获得中断响应时，新的传感器测量值将用作连续测量的参考阈值。**图 2-6** 显示了器件响应，其中器件响应 X 磁场。**图 2-7** 显示了器件响应，其中器件响应角度测量。

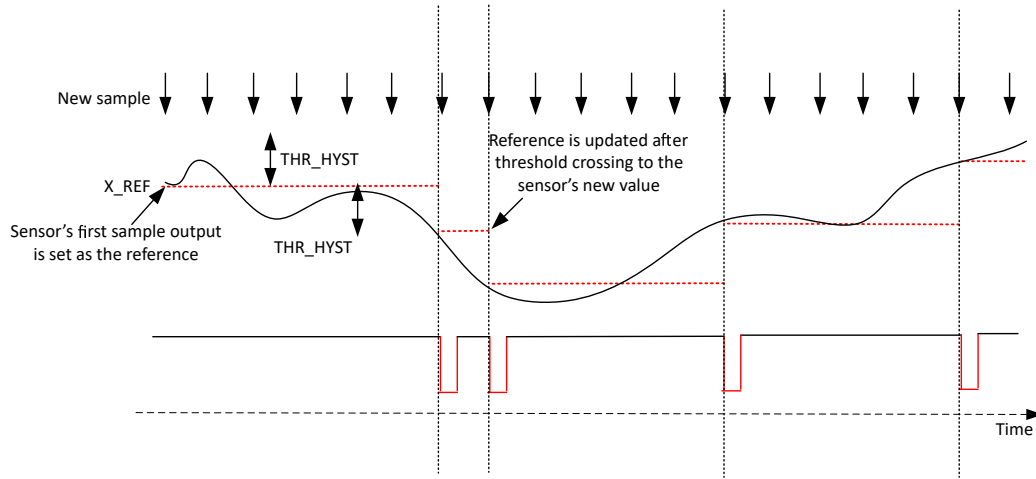


图 2-6. TMAG3001 通过磁轴测量进行变化时唤醒

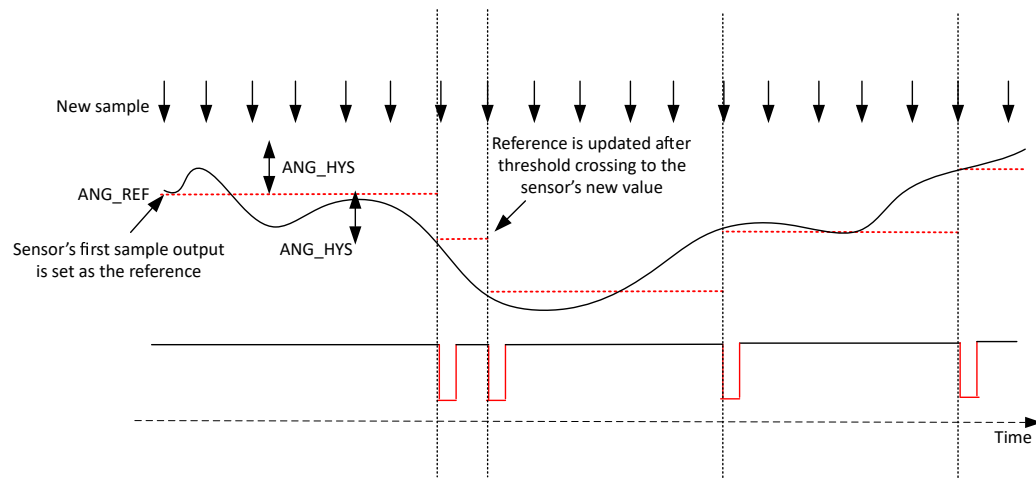


图 2-7. TMAG3001 通过角度测量进行变化时唤醒

3 具有多个传感器的低功耗模式

假设游戏控制器中的左右线性触发器使用两个不同的位置传感器来测量各自的触发位置。与使用多个 ADC 来数字化每个传感器不同，可以通过使用 EN 引脚多路复用传感器输出来减少 ADC 的数量，从而降低系统功耗，如图 3-1 所示。关断期间，TMAG5253 会将输出置于高阻抗状态，以使多个器件能够连接到同一 ADC，从而无需在系统中添加额外的多路复用器。

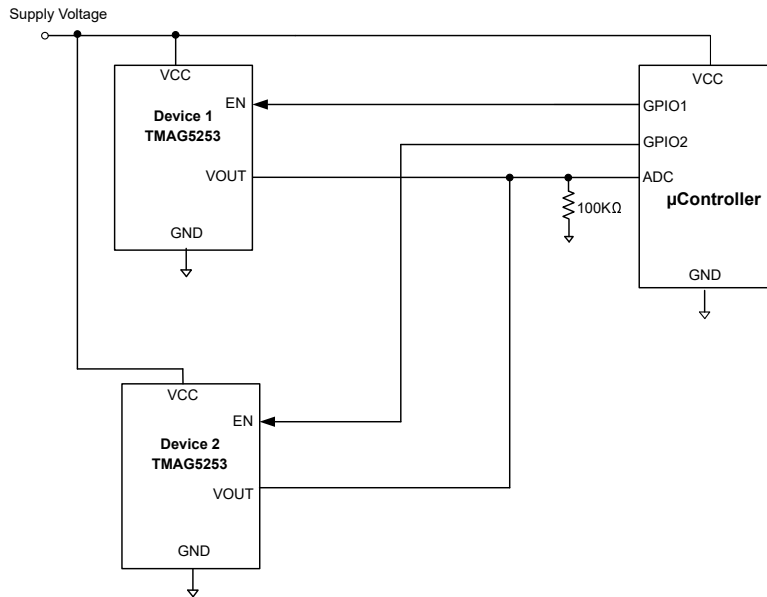


图 3-1. 在同一总线中将多个传感器连接在一起

图 3-2 所示为微控制器的 GPIO 上的时序图，该 GPIO 对两个传感器的输出进行多路复用。B₁ 和 B₂ 分别对应于器件 1 和器件 2 所见的磁场。当 GPIO1 变为高电平时，器件 1 被使能并将输出线路驱动至与场 B₁ 相对应的电压。在此期间，GPIO2 被驱动为低电平，器件 2 处于关断模式。为了避免两个器件同时导通，在器件之间切换时必须对死区时间 t_{mux} 进行编程。还必须注意，这些器件必须能够快速上电（较小 t_{on}），以便在关闭之前对其进行快速采样以节省功耗。

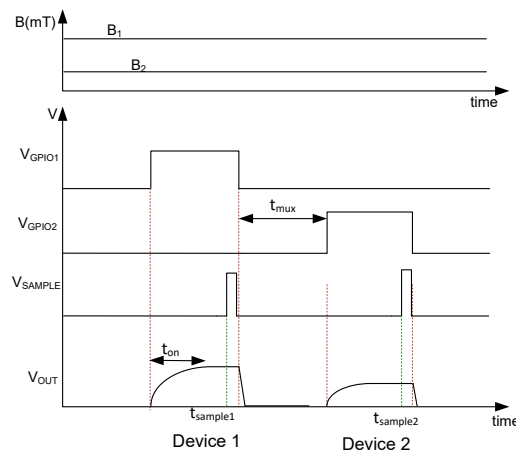


图 3-2. 时序图显示了多个 TMAG5253 器件连接在一起时的信号

4 低功耗模式设计示例

在无线游戏或 VR 控制器中，需要持续监控多个用户界面，例如触发器、拇指操纵杆和按钮。在本示例中，考虑几种可以根据前面讨论的不同方法降低系统功耗的场景。

4.1 设计示例场景 2

在此场景中，请查看在两小时游戏会话中仅通过触发器和拇指操纵杆即可实现的功耗节省。游戏控制器中的交互速度非常慢，即使是专业游戏玩家每秒最多只能点击 10 到 15 次。为了实现平滑的响应，传感器信号的采样速率可提高 10 倍，最高可达 100Hz。表 4-1 显示了两种情况之间的功耗节省比较，一种使用占空比启用了节能功能，传感器每 10ms 打开一次；另一种情况没有任何节能，即传感器只是连续打开。从分析中可以看出，通过以大约 100Hz 或每 10ms 对传感器进行一次下电上电，可以轻松地将系统总功耗降低约 100 倍。

表 4-1. 场景 1 中的系统级节能

场景 1	不节能	节能
处于工作模式的持续时间	120 分钟	0.6 分钟
被禁用或处于睡眠模式的持续时间	0 分钟	119.4 分钟
使用 1 个 TMAG5273 时每个拇指操纵杆的平均电流消耗 (如果启用了 2 个磁通道)	2.3mA	20 μ A
使用 1 个 TMAG5253 时每个触发器的平均电流消耗	2.1 mA	10 μ A (active = 50 μ s)
具有 2 个触发器和 2 个拇指操纵杆的系统的总电流消耗 (mWh)	8.8 mA	60 μ A

4.2 设计示例场景 2

对于第二种场景，请考虑无线游戏控制器打开并在超过 2 小时内保持未使用 (空闲) 状态的情况。在这种情况下，微控制器可以将未使用的用户界面置于睡眠模式，以进一步节省功耗。通过将 TMAG5273 置于睡眠模式，可将每个拇指操纵杆的电流消耗降低至 5nA。TMAG5253 的关断电流小于 10nA，触发器消耗的电流也可以降低。表 4-2 显示了分析，可帮助您了解处于 2 小时空闲模式时，仅通过触发器和拇指操纵杆即可实现的功耗节省。在表 4-2 中，假设在工作模式下，传感器每 10ms 打开 50 μ s。将此场景与传感器关断以节省功耗的模式进行比较。如下表所示，与传感器进行下电上电相比，在运行期间对器件进行下电上电可以实现的节能高出 1000 多倍。

表 4-2. 场景 2 中的系统节能

场景 2	不节能	节能
处于工作模式的持续时间	0.6 分钟	0 分钟
被禁用或处于睡眠模式的持续时间	119.4 分钟	120 分钟
电源电压	1.8V	1.8V
使用 1 个 TMAG5273 时每个拇指操纵杆的平均电流消耗 (如果启用了 2 个磁通道)	100 Hz 时为 20 μ A	5nA
使用 1 个 TMAG5253 时每个触发器的平均电流消耗	100 Hz 时为 10 μ A	20nA
具有 2 个触发器和 2 个拇指操纵杆的系统的功耗 (mWh)	100 Hz 时为 60 μ A	50nA

5 总结

磁性位置传感器是一种可行的低功耗设计，用于设计游戏控制器和 VR 控制器中的拇指操纵杆和触发器等控件。使能引脚等功能不仅有助于提高效率，还有助于减少器件数量、释放布板空间并允许单个 ADC 监控多个器件。TMAG5273 和 TMAG3001 等器件具有多种工作模式，可为用户提供多种降低器件功耗的方法，同时还可灵活地设置不同的信号链。

6 参考文献

1. 德州仪器 (TI), [在 ADS1235 和 ADS1261 中使用交流激励模式降低电桥测量偏移量和温漂](#) 应用简报。

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 * (May 2023) to Revision A (December 2023)	Page
• 通篇添加了 TMAG3001 以及“变化时唤醒”部分.....	1

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司