

为应用选择最合适的MEMS加速度计——第二部分

作者: Chris Murphy

共享



简介

为应用选择最合适的加速度计可能并不容易, 因为来自不同制造商的数据手册可能大相径庭, 让人难以确定最为重要的技术指标是什么。在本文第二部分, 我们将从可穿戴设备、状态监控和物联网应用的角度重点讨论各项关键技术指标和特性。

可穿戴设备

关键指标: 低功耗、小尺寸、旨在增强节能性能的集成特性以及可用性。

用于电池供电型可穿戴应用的加速度计的关键指标是超低功耗(通常为 μA 级), 以确保尽量延长电池寿命。其他关键指标是尺寸和集成的特性, 比如备用ADC通道和深度FIFO, 其作用是增进终端应用的电源管理和功能性。由于这些原因, 可穿戴应用中通常采用MEMS加速度计。表1所示为部分生命体征监测(VSM)应用及其在具体应用中的对应设置。用于可穿戴应用的加速度计通常可以对运动分类; 检测自由落体; 测量运动是否存在以确定是使系统上电、关断还是休眠; 辅助实现数据融合, 供ECG和其他VSM测量使用。同样的加速度计也用在无线传感器网络和物联网应用中, 因为它们具有超低功耗的特性。

在为超低功耗应用选择加速度计时, 必须在数据手册中标称的功耗水平下观察传感器的功能。要观察的一项关键指标是带宽和采样速率是否会降至无法测量可用加速度数据的水平。有些竞争产品通过每秒关断并唤醒的方式达到维持低功耗的目的, 但这样做

会错过关键的加速度数据, 因为有效采样速率下降了。为了测量实时人体运动的范围, 需要大幅提高功耗。ADXL362和ADXL363不会通过欠采样混叠输入信号; 它们采用全数据速率对传感器的整个带宽进行采样。功耗随采样速率动态变化, 如图1所示。需要注意的是, 这些器件可在功耗仅为 $3\mu\text{A}$ 的状态下, 以最高400 Hz的速率进行采样。在可穿戴设备中, 这些较高的数据速率可实现额外的功能, 如单击/双击检测。采样速率可降至6 Hz, 以便在被拾起时或者检测到运动时设备能启动, 此时的平均功耗为270 nA。这也使ADXL362和ADXL363非常适合植入式应用, 因为在这种应用中电池更换非常困难。

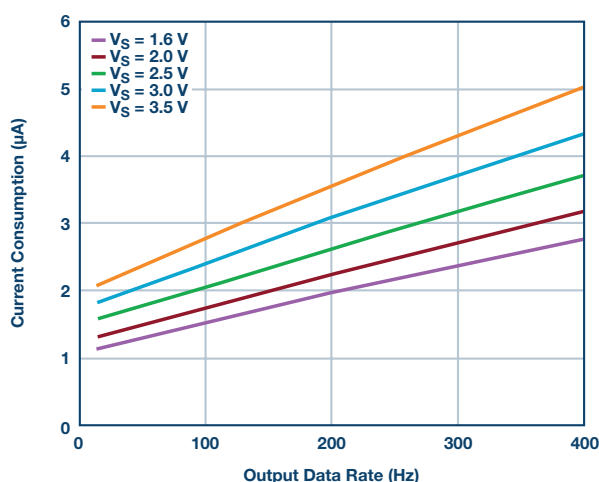


图1. ADXL362电源电流与输出数据速率的关系。

表1. VSM可穿戴应用的运动检测要求

	计步器	跌落	光学心率	单击(SW)	休眠	运动开关	ECG	ADXL362/ ADXL363
g 设置	2 g	8 g	4 g 或 8 g	8 g	2 g	2 g	4 g 至 8 g	2 g 至 8 g
ODR (Hz)	100	400	<50	400	12.5	6	<100	400
功耗	1.8 μA	3 μA		3 μA	1.5 μA	0.3 μA		10 nA 至 3 μA
FIFO (样本集或时间)	150	越深越好	1秒	越深越好	20	否	1秒	512秒或13秒
ADC	否	否	是	否	否	否	是	否/是
噪声($\text{mg}/\sqrt{\text{Hz}}$)	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	175 μg 至 500 μg
数据采集	24/7	24/7	随机	24/7	检测到运动时		练习过程中连续	全部
必要特性	RSS、8位	触发模式FIFO		触发模式FIFO	低噪声	MCU关		全部 (RSS除外)

在部分应用中，加速度计每秒只需轮询一次或几次加速度即可。对于此类应用，ADXL362和ADXL363提供了一种唤醒模式，功耗仅为270 nA。ADXL363集成了一个三轴MEMS加速度计、一个温度传感器（典型比例因子为0.065°C）和一个板载ADC输入（用于同步转换外部信号），采用小尺寸、薄型(3 mm x 3.25 mm x 1.06 mm)封装。加速度和温度数据可存储在512样本多模FIFO缓冲器中，允许保存的数据时长高达13秒。

ADI公司开发了一款仅供演示使用的VSM手表（如图2所示），旨在展示ADXL362等超低功耗器件在电池供电和空间受限应用中的潜力。



图2. VSM手表 (集成多款ADI器件, 旨在凸显超低功耗、小尺寸轻型产品)。

ADXL362用于追踪运动和记录运动，帮助从其他测量结果中消除干扰伪像。

状态监控(CBM)

关键指标：低噪声、宽带宽、信号处理、g范围和低功耗。

CBM需要监控多项参数，比如机器振动，其目的是发现和指示可能发生的故障。CBM是预防性维护的一个重要组成部分，其技术

通常用于驱动涡轮机、风扇、泵、电机等机械。CBM加速度计的关键指标是低噪声和宽带宽。在撰写本文之时，提供3.3 kHz以上带宽的MEMS加速度计的竞争公司非常少，有些专业制造商提供的最高带宽为7 kHz。

随着工业物联网的发展，业界越来越重视减少布线和利用无线、超低功耗技术。这使得MEMS加速度计在尺寸、重量、功耗等方面优先于压电加速度计，并且有可能实现集成智能特性。CBM中最常用的传感器是压电加速度计，因为这类传感器具有良好的线性度、SNR、高温工作性能和宽带宽（典型范围为3 Hz至30 kHz，有些情况下可能高达数百kHz）。然而，压电加速度计在DC范围下的性能欠佳（如图3所示），因此在较低频率至DC范围内可能会出现大量故障，尤其是在风力涡轮机和类似的低RPM应用中。压电传感器的机械性质使其难以像MEMS一样实现大批量生产，并且成本更高，在接口和电源方面的灵活性也比较低。

MEMS电容式加速度计具有更高的集成度，功能也更为丰富，支持自检、峰值加速、频谱报警、FFT和数据存储，抗冲击性能高达10000 g，具有直流响应能力，并且尺寸更小、重量更轻。ADXL354/ADXL355和ADXL356/ADXL357具有超低的噪声和出色的温度稳定性，非常适合状态监控应用，但其带宽限制使其无法进行更加深入的诊断分析。然而，即便带宽范围有限，这些加速度计也能提供重要的测量值；例如，在设备转速超低的风力涡轮机状态监控中。这种情况下，需要低至直流的响应。

ADXL100x系列单轴加速度计针对工业状态监控应用而优化，测量带宽高达50 kHz，g值范围高达±100 g，并且拥有超低的噪声性能——因而在性能方面可与压电加速度计不相上下。

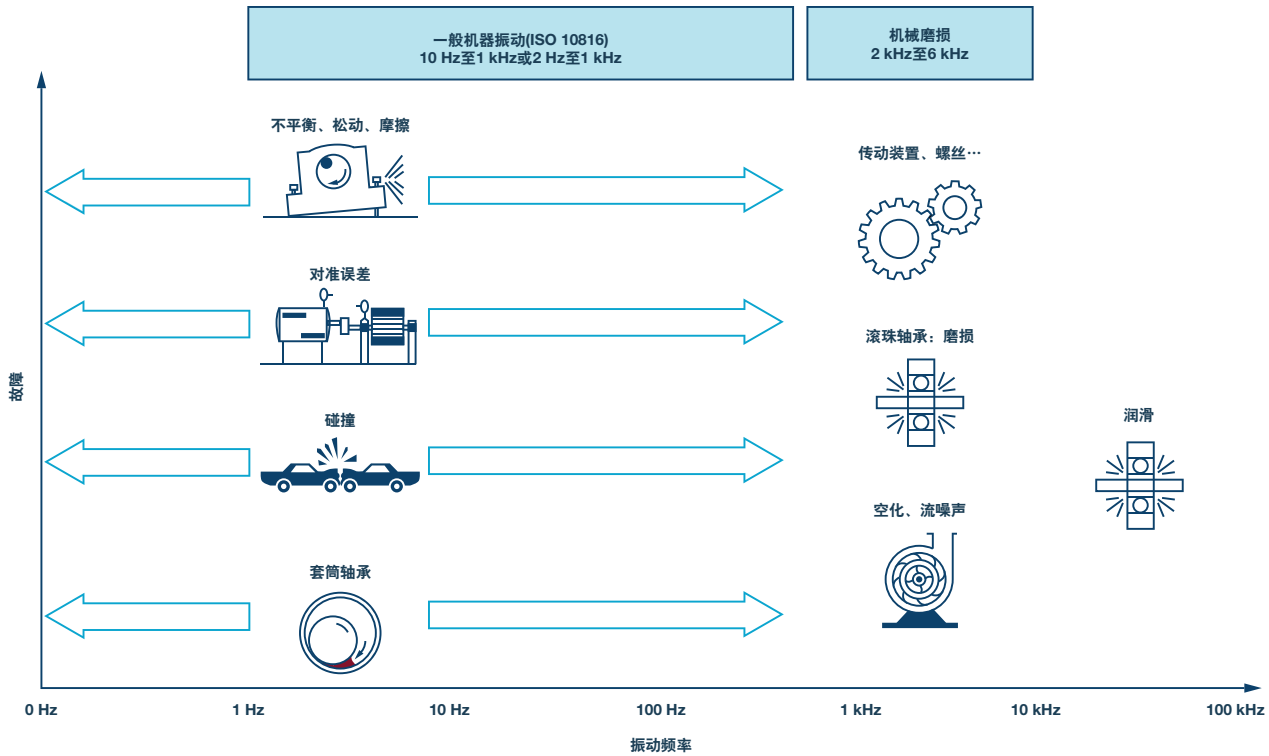


图3. 转动设备故障振动伪像。

有关ADI MEMS电容式加速度计与压电加速度计的详细讨论请参阅以下文章：[MEMS加速度计性能已臻成熟](#)。

ADXL1001/ADXL1002的频率响应如图4所示。旋转机械中发生的主要故障（如套筒轴承损坏、对准误差、不平衡、摩擦、松动、传动装置故障、轴承磨损和空化）都在ADXL100x系列状态监控加速度计的测量范围以内。

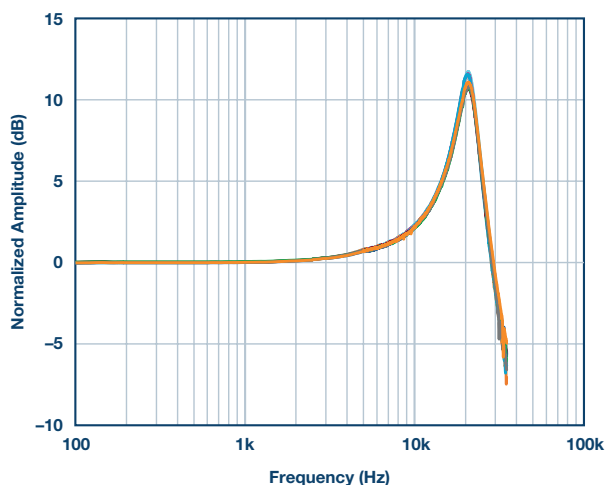


图4. ADXL1001/ADXL1002的频率响应、高频(>5 kHz)振动响应；激光振动计控制器以ADXL1002封装为基准以提高准确性。

压电加速度计通常不集成智能特性，而MEMS电容式加速度计（如ADXL100x系列）则集成了超量程检测电路，当发生超过指定 g 值范围约2倍的严重超量程事件时，该电路可报警。在智能测量和监控系统的开发中，这项功能非常关键。ADXL100x运用某种内部时钟智能禁用机制来在持续发生超量程事件时保护传感器元件，比如，电机发生故障时就会出现情况。这种方式可以减轻主机处理器的负担，并能增加一个传感器节点的智能化程度——这两项都是状态监控和工业物联网解决方案的关键指标。

MEMS电容式加速度计在性能上已经取得巨大飞跃，因此，新的ADXL100x系列已经开始强力竞争并夺得以前由压电传感器主导的阵地。ADXL35x系列具有优质的超低噪声性能，还能取代CBM应用中的传感器。新型CBM解决方案和模式已经开始与物联网架构相融合，形成更好的检测、连接及存储与分析系统。ADI公司的最新加速度计将为边缘节点带来更加智能的监控，帮助工厂管理方实现完全集成的振动监控和分析系统。

对这些MEMS加速度计形成进一步补充的是第一代CBM子系统，即ADIS16227及ADIS16228半自主型全集成式宽带宽振动分析系统（如图5所示）；这两款产品具有众多特性，比如六频段可编程报警、2级报警和故障定义设置、旨在减少误报的可调响应延迟、带状态标志的内部自检等。频域处理包括针对各轴的512点、实数值FFT和FFT均值功能，后一功能可降低本底噪声变化，从而提高分辨率。ADIS16227和ADIS16228全集成式振动分析系统可以缩短设计时间，降低成本，降低处理器要求，减少空间限制，使其成为CBM应用的理想选择。

物联网/无线传感器网络

关键指标：功耗、支持智能节能和测量的集成特性、小尺寸、深度FIFO和合适的带宽。

整个行业对物联网的前景都心知肚明。为了实现这种前景，将来几年需要部署数百万计的传感器。绝大多数这些传感器都会被安装在操作不便或空间受限的位置（如屋顶、街灯顶部、塔桅、桥梁、重型机械内等），以实现智能城市、智能农业、智能楼宇等概念。由于存在诸如此类限制，很可能一大部分这些传感器需要采用无线通信和电池供电方式，也可能需要某种形式的能量采集方式。

物联网应用的趋势是尽量减少以无线方式传输至云端或本地服务器进行存储和分析的数据，因为现有方法需要很高的带宽并且成本较高。通过在传感器节点进行智能处理，可以把无用数据与有用数据区分开，减少传输大量数据的必要性，从而降低带宽和成本要求。这就要求传感器具备智能特性，同时还要维持超低的功耗水平。标准物联网信号链如图6所示。在网关以外，ADI公司可为各个模块提供解决方案。请注意，并非所有解决方案都需要无线连接，对于众多应用来说，有线解决方案仍有必要，无论是RS-485接口，4 mA至20 mA，还是工业以太网等。

使节点具备一定的智能之后，就可以通过信号链只传输有用的数据——节省电能和带宽。在CBM中，在传感器节点局部完成的处理量取决于多个因素，如机器的成本和复杂性、与状态监控系统的成本。传输的数据从简单的超范围报警到数据流不尽相同。ISO 10816等标准规定了相应的报警条件，当给定尺寸的机器以特定RPM转速运行时，如果振动速度超过预设阈值，机器就会输出报警信号。ISO 10816的目的是优化被测系统及其滚动轴承的有效寿命，因此需要减少传输的数据量，从而为在WSN架构中的部署提供更好的支持。

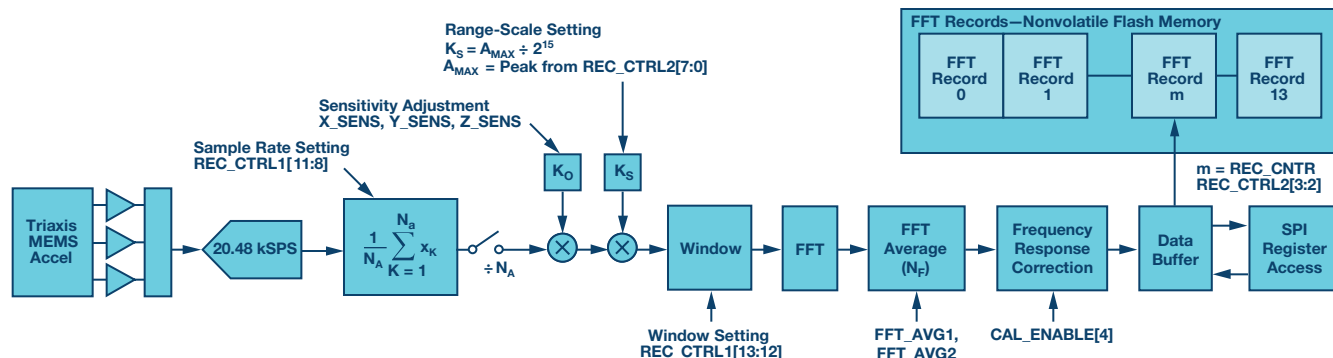


图5. 数字三轴振动传感器，集成FFT分析和存储系统。

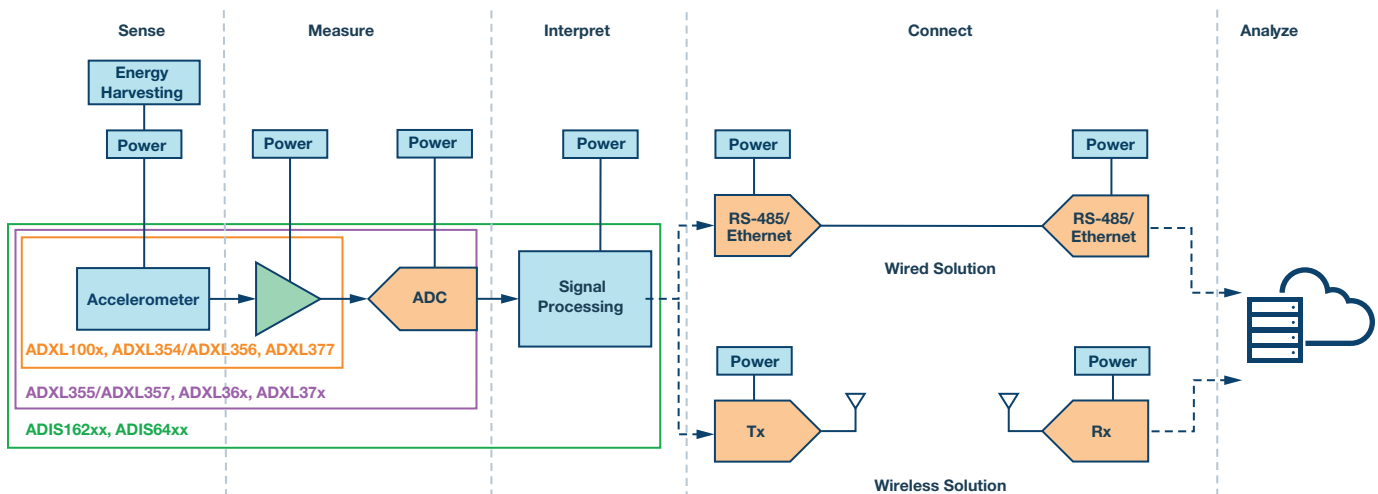


图6. ADI公司的边缘传感器节点解决方案。

对于用在ISO 10816应用中的加速度计，要求其 g 值范围为50 g 或以下并在低频下保持低噪声，因为系统会周期性地把加速度数据整合起来，以形成以mm/sec rms为单位的单一速度点。当整合含有低频噪声的加速度计数据时，速度输出中的误差可能会线性增大。ISO标准规定的测量范围为1 Hz至1 kHz，但用户都希望整合低至0.1 Hz的数据。传统上，在电荷耦合压电加速度计中，这受到了低频高噪声水平的限制，但ADI下一代加速度计能使本底噪声最低保持在直流水平，只受信号调理电子器件 $1/f$ 的噪声转折频率的限制，通过细心的设计可使该值降至0.01 Hz。MEMS加速度计既可以用在面向低成本设备的经济型CBM应用中，也可以整合到嵌入式解决方案之中，因为与压电传感器相比，它们的尺寸更小、成本更低。

ADI公司广泛的加速度计产品是要求超低功耗的智能传感器节点的理想选择，其中集成多种特性，有助于延长电池寿命、减少带宽用量并因此降低成本。物联网传感器节点的部分关键指标有低功耗（ADXL362、ADXL363）和丰富的特性集合，以实现能量管理和特定数据检测，如过阈值活动、谱线轮廓报警、峰值加速值和超长活动或非活动（ADXL372、ADXL375）。

在把加速数据存储在FIFO中并检查是否存在活动事件时，所有这些加速度计都能使整个系统处于关断状态。发生冲击事件时，事件发生前收集的数据被冻结在FIFO中。如果没有FIFO，如果要在事件发生之前捕捉样本，就要求处理器连续采样并处理加速信号，结果会大幅缩短电池寿命。ADXL362和ADXL363 FIFO可以存储超过13秒的数据，因而能清楚展示活动触发之前发生的事件。不使用功率占比，而是在所有数据速率下均采用全带宽架构，由此防止输入信号混叠，从而维持超低功耗。

资产状况监控

关键指标：功耗、支持智能节能和测量的集成特性、小尺寸、深度FIFO和合适的带宽。

资产状况监控(AHM)一般指在一定时间内对高价值资产进行监控，无论是在静止状态或还是在运输途中。这些资产可能是船运集装箱里的货物、远程管道、平民、战士、高密度电池等，此类资产容易受到撞击或冲击事件的影响。对于可能影响资产功能性或安全性的此类事件，物联网提供了一种理想的报告基础设施。对于AHM中使用的传感器，关键指标是能测量与资产相关的高 g 冲击及冲击事件并同时保持超低功耗。当把这类传感器嵌入电池供电或便携式应用中时，要考虑的其他关键传感器指标包括尺寸、过采样和旨在精确处理高频成分的抗混叠特性，还有各种智能特性，以通过增加主机处理器休眠时间并允许用中断驱动算法检测和捕获冲击特性延长电池寿命。

ADXL372低功耗型 $\pm 200 g$ MEMS加速度计可满足新兴资产状况监控市场对智能物联网边缘节点的需求。该器件含有专门针对资产状况监控市场开发的多项独有特性，可简化系统设计，并在系统层次实现节能目的。高 g 事件（如冲击或撞击）通常与较宽频率下的加速度成分密切相关。要准确捕获这些事件，需要宽带宽，因为在带宽不足的条件下进行测量会显著降低记录事件的幅度，导致错误。在数据手册中这是要特别注意的一项关键参数。有些器件达不到奈奎斯特采样速率标准的要求。ADXL375和ADXL372提供捕获整个冲击特性的选项，可用于进一步分析而无需主机处理器干预。使用冲击中断寄存器并结合加速度计的FIFO，可实现该功能。如图7所示，为了在触发事件之前确定冲击特性，有充足FIFO非常重要。如果FIFO不足，就无法记录和维持冲击事件以供进一步分析。

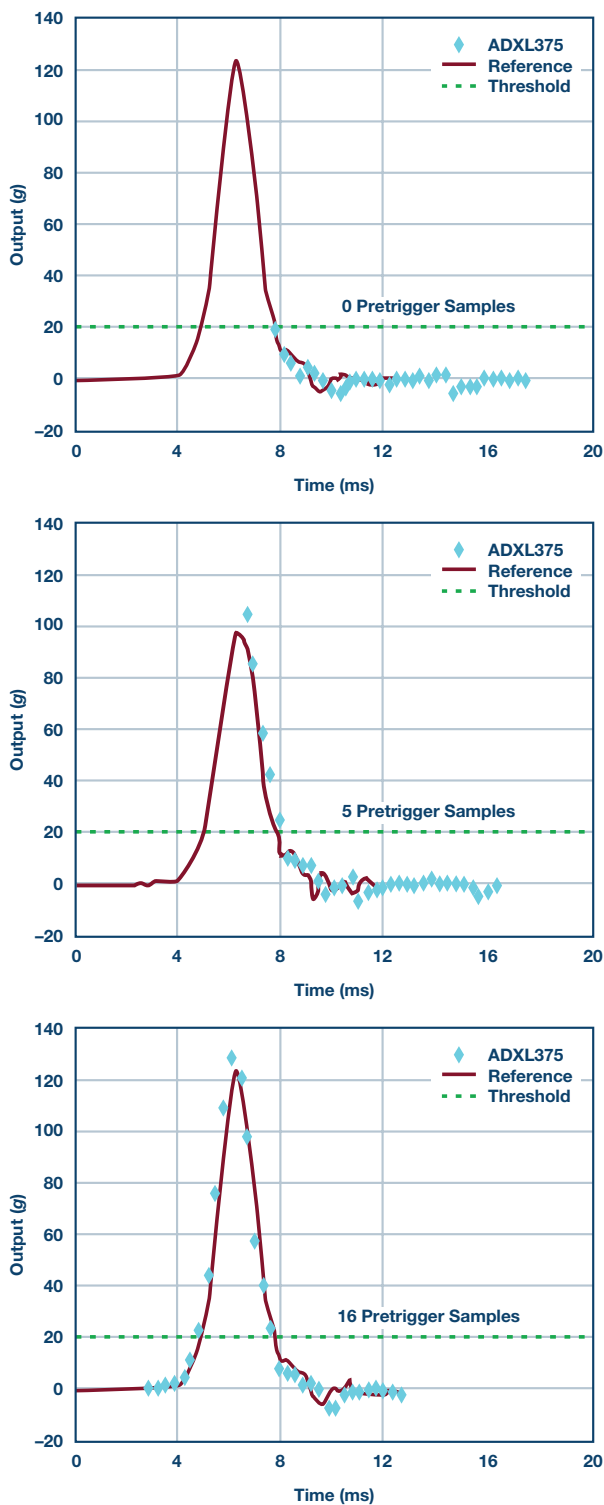


图7. 准确捕获冲击特性。

ADXL372的工作带宽可在超低功耗水平下达到3200Hz。陡峭的滤波器滚降也有利于有效抑制带外成分，为此，ADXL372集成了一个四极低通抗混叠滤波器。如果没有抗混叠滤波，凡是频率超过输出数据速率一半的输入信号都会混叠进目标测量带宽，导致测量误差。该四极低通滤波器提供用户可选滤波器带宽，因而可为用户应用带来极大的灵活性。

借助即时导通冲击检测特性，用户可以对ADXL372进行配置，使其能在超低功耗模式下捕获高于特定阈值的冲击事件。如图8所示，在发生冲击事件之后，加速度计会进入全测量模式，以便准确地捕获冲击特性。

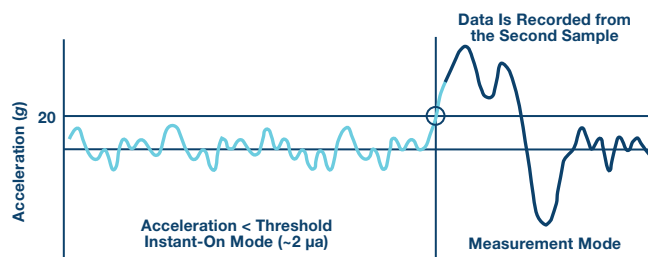


图8. 默认阈值下的即时导通模式。

有些应用要求只记录来自冲击事件的峰值加速样本，因为此类样本本身就能提供充足的信息。ADXL372 FIFO可以为每个轴存储峰值加速样本。FIFO中可以存储的最长时长为1.28秒（400 Hz ODR条件下，512个单轴样本）。3200 Hz ODR条件下的170个3轴样本相当于一个50 ms的时间窗口，足以捕获到典型的冲击波形。对于不要求完整事件特性的应用，通过只存储峰值加速信息，可以大幅增加FIFO读取操作之间的时间，从而实现进一步节能。512个FIFO样本可以通过多种方式分配，包括下列方式：

- ▶ 并行3轴数据的170个样本集
- ▶ 并行2轴数据的256个样本集（用户可选）
- ▶ 单轴数据的512个样本集
- ▶ 170个冲击事件峰值集 (x, y, z)

适当使用FIFO，使主机处理器能在加速度计自主收集数据时长时间保持休眠，可以降低系统级功耗。或者，使用FIFO收集数据可以减轻主机处理器的负荷，使它能处理其他任务。

市场上还有其他几款具有类似高g性能的加速度计，但它们不适合AHM/SHM物联网边缘节点应用，因为它们的带宽较窄，功耗较高。在提供低功耗模式的情况下，无法进行准确测量的一般都是低带宽。ADXL372真正实现了即用即忘的AHM/SHM实施模式，促使最终客户在可行的情况下重新考虑潜在资产类别。

结论

ADI公司提供面向多种应用的广泛加速度计产品，其中有些产品未在本文中重点讨论，比如航位推算、AHRS、惯性测量、汽车稳定和安全、医疗对准等。我们的新一代MEMS电容式加速度计非常适合要求低噪声、低功耗、高稳定性和温度稳定性的应用；具有低补偿的特性，并且集成众多智能特性，可提升系统整体性能并降低设计复杂度。ADI公司提供所有相关数据手册信息，旨在帮助您为您的应用选择最合适的器件。以上列出的所有器件以及其他器件均可供评估和原型制作使用。更多信息，请访问：analog.com/MEMS。

参考文献

- Broeders, Jan-Hein. “[从可穿戴设备过渡到医疗设备](#)，” ADI公司，2017年。
- Scannel, Bob. “[嵌入式智能和通信可实现可靠且连续的振动监控](#)，” ADI公司，2015年。
- Spence, Ed. “[关于状态监控的MEMS加速度计您需要知道哪些](#)，” ADI公司，2016年。

Chris Murphy [chris.murphy@analog.com]是欧洲中央应用中心的应用工程师，工作地点在爱尔兰都柏林。他于2012年加入ADI公司，为电机控制和工业自动化产品提供设计支持。他拥有电气工程研究硕士学位和计算机工程学士学位。



Chris Murphy

该作者的其它文章：

[为应用选择最合适的MEMS加速度计——第一部分](#)

第51卷，第4期