

# MEMS 振动监控简介

作者：Mark Looney

## 简介

MEMS 惯性传感器在当今的众多个人电子设备中发挥着重要作用。小尺寸、低功耗、易集成、强大功能性和卓越性能，这些因素促使着智能手机、游戏控制器、活动跟踪器、数码相框等装置不断创新。此外，MEMS 惯性传感器用于汽车安全系统可显著提高系统可靠性，并降低系统成本，使汽车安全系统能够应用于大多数汽车。

功能集成度和性能的不断f展也有助于将 MEMS 加速度计和陀螺仪应用于许多不同的工业系统。其中一些应用成为现有产品和服务的低成本替代品，而其他应用则开始率先集成惯性感测功能。作为拥有两类用户的应用，振动监控也正方兴未艾。出于维护和安全需求而用于监控机械健康状况的传统仪器仪表通常采用压电技术。高速自动化设备对振动进行监控，以触发对润滑、速度或皮带张力的反馈控制，或者关闭设备以便于维修人员快速检查。

尽管压电器件拥有成熟的用户群，但 MEMS 加速度计为新兴的用户群提供了轻松集成、降低成本等优势。另外，MEMS 加速度计先进的功能集成允许在 ADIS16229 数字 MEMS 振动传感器等器件中集成嵌入式 RF 收发器，从而实现一种集信号处理和通信功能于一体的完整解决方案。此类可编程器件可以定期自动唤醒，捕获时域振动数据，对数据记录执行快速傅里叶变换(FFT)，对 FFT 结果进行用户可配置的频谱分析，通过高效的无线传输线路提供简单的通过/失败结果，存取数据和结果，然后返回休眠状态。振动检测的新用户们认为，快速部署以及合理的拥有成本是选用完全集成式 MEMS 器件的重要原因。

## 振动监控应用

利用振动观察机器健康状况旨在将可观察到的振动与典型的磨损机制关联起来，比如轴承、齿轮、链条、皮带、刷子、轴、线圈和阀门。在一台典型机器中，至少有一种磨损机制需定期维护。图 1 展示了正常磨损机制振动与时间关系的三个例子。尽管确定这种关系需要时间和经验，但关联得当的振动特征不失为短周期定期维护的低成本替代方案。利用实际观察结果，比如振动，可在检测到报警条件（红色曲线）时快速采取行动，同时还能避免对使用寿命未到期的机器过早进行维护（蓝色和绿色曲线）。

图 1 同时还展示了机器维护周期的两种报警设置（报警、关键）以及三个阶段（早期、中期、末期）。报警水平规定了正常运行期间的最大振动频率，其中，观察到的振动不含对机器或技术支持人员的潜在危险。在正常范围时，可以使用一些仪表测量偶尔出现的振动。临界水平表示，资产存在严重受损的风险，从而给技术支持人员或环境带来不安全因素。显然，机器操作员希望在这一水平时避免操作机器，并通常会停止使用机器。当振动超过报警水平但低于临界水平时，机器仍可以继续工作，但应该提高观察频率，并可能需要进行额外的维护。

有时候，这三个操作区（正常、报警、临界）可以对应于机器维护周期的三个阶段：早期、中期、末期，每个阶段的振动监控策略可能会有所不同。例如，在早期，可能只需要每天、每周或每月观察仪器的主要振动属性。进入中期时，可能需要每小时观察一次，而在接近末期时，振动监控的频率可能还要更高，尤其是在人员或资产处于危险的情况下。在该阶段，利用便携式设备进行振动监控的机器，其重复成本将逐渐增加，与维护成本相比，可能高得让人望而却步。虽然有必要对重要资产进行特殊关照，但许多其他仪器却是无法承受这种重复成本。作为人工测量的补充，嵌入式 MEMS 传感器为要求实时振动数据的设备提供了更为经济高效的方法。

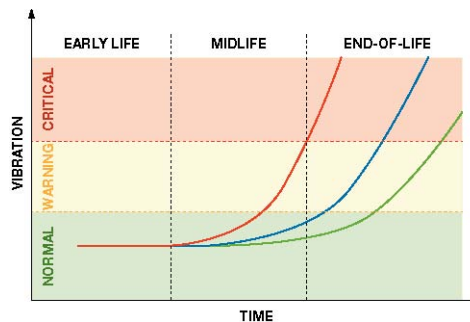


图 1. 振动与时间关系示例

## 振动的性质

振动是一种重复的机械运动。在开发振动检测仪器时，需考虑多个重要属性。首先，振荡运动往往同时具有线性和旋转元件。大多数振动检测关系都倾向于关注振荡幅度，而非绝对位置跟踪，因此，线性传感器（如 MEMS 加速度计）对于捕获运动信息而言足够了。当主要为线性运动时，了解运动方向就显得极为重要，尤其是在使用单轴传感器时。相反，3 轴传感器具有更高的安装灵活性，因为正交方向可以在一个或更多轴上拾取，而不受振动方向的影响。

由于振动具有周期性，因此，频谱分析是确定振动曲线特性（振动幅度与频率关系）的一种简便办法。图 2 所示曲线同时有宽带和窄带成分，主体振动频率约为 1350 Hz，还有 4 个谐波和一些低电平宽带成分。每一件活动设备都有其自己的振动曲线，而窄带响应一般表示设备的自然频率。

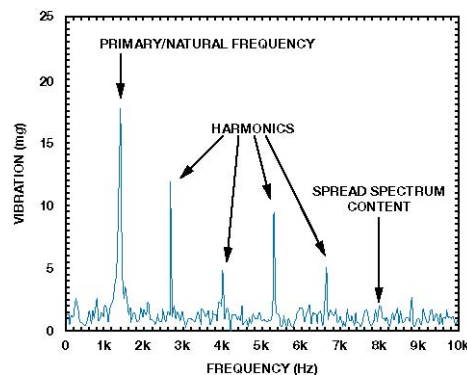


图 2. 振动曲线示例（自然频率：约 1350 Hz）

## 信号处理

传感器选择和信号处理架构取决于应用目标。举例来说，图3所示信号链持续监控特定频带，通过附近的控制面板提供报警灯和关键灯信号。制造商在机械设计方面的知识有助于带通滤波器的设计，尤其是在启动频率、停机频率和带通滚降速率方面。旋转速度、机械结构的自然频率、因故障而异的振动都可能影响带通滤波器。尽管这种方法非常简单，但当有特定机器的历史数据时，振动监控要求也可能发生变化。监控要求的变化可能导致滤波器结构的变化，从而可能造成重复的工程成本。开发人员可以通过数字化传感器响应，实现关键信号处理功能（如滤波、rms 计算和电平检测器），利用辅助 I/O 输出控制指示灯的方式，以复杂性换取灵活性，或提供数字输出。

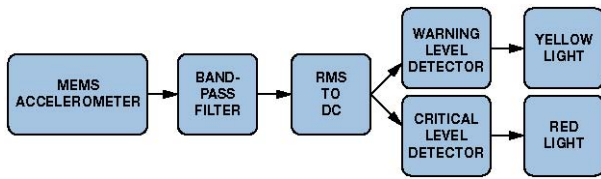


图 3. 时域振动信号链示例

图4所示为 ADIS16228 的信号链,ADIS16228 采用一个带 FFT 分析和存储功能的数字三轴振动传感器监控设备振动的频谱成分。

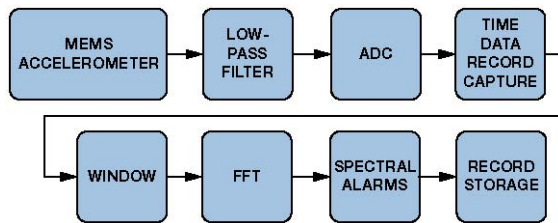


图 4. 用于频谱振动分析的 ADIS16228 信号链

## 内核传感器

两种方式的内核传感器都可以是 MEMS 加速度计。选择内核传感器时，最重要的属性为轴数、封装/装配要求、电气接口（模拟/数字）、频率响应（带宽）、测量范围、噪声和线性度。尽管许多三轴 MEMS 加速度计都支持直接连接多数嵌入式处理器，但要获得最高性能则可能要求采用具有模拟输出的单轴或双轴解决方案。例如，ADXL001 高性能宽带 iMEMS® 加速度计就利用 22-kHz 谐振提供最宽的带宽，但它只是一款单轴模拟输出器件。在配有模数转换通道的系统中，模拟输出可实现快速接口，但当前的开发趋势似乎更青睐于那些搭载了数字接口的传感器。

内核传感器的频率响应和测量范围决定其输出饱和前可以支持的最大振动频率和幅度。饱和会降低频谱响应，从而可能导致故障报警的杂散成分，即使饱和频率不影响目标频率时也是如此。测量范围和频率响应的关系如下：

$$A_{p-p} = D_{p-p} \times \omega^2$$

其中， $D$  为物理位移， $\omega$  为振动频率， $A$  为加速度。

频率响应和测量范围限制着传感器的响应，其噪声和线性度则限制着分辨率。噪声决定将在输出中响应的振动下限，而线性度则决定振动信号产生的故障谐波量。

## 模拟滤波器

模拟滤波器将信号成分限制在一个奈奎斯特区之内，即为示例系统采样速率的一半。即使滤波器截止频率处于奈奎斯特区之内，也不可能无限制地抵制高频组分，这些高频组分仍可能折回通带中。对于只监控第一奈奎斯特区的系统，这种折回行为可能产生假故障，并扭曲特定频率下的振动成分。

## 窗

在振动检测应用中，时间相干采样往往并不实用，因为时间记录起始和结束处的非零采样值会导致较大的频谱泄漏，从而可能降低 FFT 分辨率。在计算 FFT 前应用窗口函数有助于控制频谱泄漏。最佳窗口函数取决于实际信号，但通常需要衡量的因素包括过程损失、频谱泄漏、旁瓣位置和旁瓣电平。

## 快速傅里叶变换(FFT)

FFT 是分析离散时间数据的一种高效算法。该过程将时间记录转换为离散频谱记录，其中，每个采样代表奈奎斯特区的一个离散频段。输出采样的总数等于原始时间记录中的采样数，在大多数情况下，为二项级数中的一个数字(1、2、4、8、……)。频谱数据同时包括幅度和相位信息，可采用矩形或极性格式表示。采用矩形表示时，FFT 仓的一半含有模值信息，另一半则含有相位信息。采用极性表示时，FFT 仓的一半含有实部结果，另一半则含有虚部结果。

在某些情况下，幅度和相位信息都有用，但幅度/频率关系含有的信息往往足以检测关键变化。对于只提供幅度结果的器件，FFT 谱线的数量等于原始时域记录中采样数的一半。FFT 频谱宽度等于采样速率除以记录总数。在一定程度上，每个 FFT 频谱都像时域中一个独立的带通滤波器。图5为 MEMS 振动传感器的一个实际示例，其中，采样速率为 20480 SPS，始于 512 点记录。在这种情况下，传感器只提供幅度信息，因此，总数为 256，频谱宽度等于 40 Hz (20480/512)。

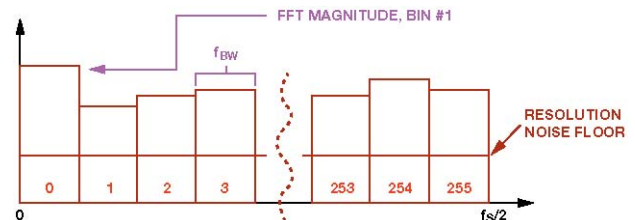


图 5. ADIS16228 FFT 输出

频谱宽度非常重要，因为当频率从一个谱线转换到一个邻近谱线时，频谱宽度决定频率分辨率，同时还决定包含的总噪声。总噪声(rms)等于噪声密度( $\sim 240 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ )与频谱宽度平方根( $\sqrt{40 \text{ Hz}}$ )之积，约合  $1.5 \text{ mg rms}$ 。对于噪声对振动分辨影响最大的低频应用，可在 FFT 过程之前采用一个抽取滤波器，这样可以提高频率和幅度分辨率，而无需更改 ADC 的采样频率。以 256 对 20480 SPS 的采样速率进行抽取计算，可使频率分辨率增强 256 倍，同时使噪声降低 16 倍。

## 频谱报警

使用 FFT 的一个关键优势是可以简化频谱报警的应用。图 6 中的示例包括 5 个独立的频谱报警，分别负责监控机器自然频率(#1)、谐波 (#2、#3 和#4) 以及宽带成分(#5)。报警和临界电平对应于机器健康振动与时间关系曲线中的电平。启动和停机频率完善了这种关系所代表的过程变量定义。在使用嵌入式处理器时，频谱报警定义变量（启动/停机频率、报警/临界报警电平）可能处于采用数字码配置的可配置寄存器中。使用相同的比例因子和谱线编号方案可大大简化这一过程。

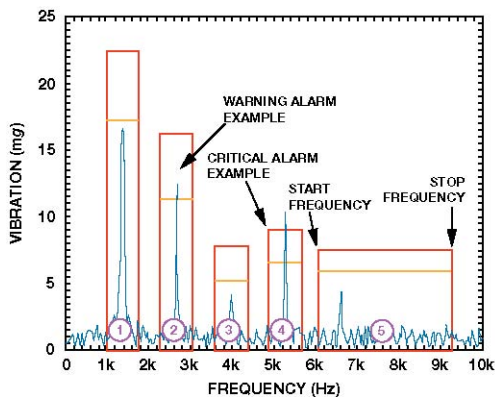


图 6. FFT 示例（带频谱报警）

## 记录管理

记录管理是与过程变量关系关联的一个关键功能。存储每台机器寿命期内不同阶段的 FFT 记录可对多种行为进行分析，然后绘制出一幅磨损曲线图，从而有助于维护和安全规划。除了汇集历史振动数据以外，捕获与电源、温度、日期、时间、采样速率、报警设置和滤波相关的条件数据也具有较大价值。

## 接口

接口取决于特定厂房中的现有基础设施。在某些情况下，有多种工业电缆通信标准（如以太网、RS-485）可供选择，因此，智能传感器与通信系统之间的接口可能是一个嵌入式处理器。

在其他情况下，相同的嵌入式处理器可用来连接智能传感器与现有无线协议，比如 Wi-Fi、ZigBee 或特定系统标准。有些智能传感器（如面向远程传感器的 ADIS16000 无线网关和 ADIS16229）配有开箱即用的无线接口，通过常见的嵌入式接口（如 SPI 或 I<sup>2</sup>C）即可使用。

## 结论

MEMS 惯性技术迎来了一个崭新的振动监控时代，并为此类仪器仪表赢得了更广泛的用户群体。性能、封装和熟悉度可能有利于压电技术继续发挥作用，但显然振动监控正在发展和进步。通过先进的功能集成和出色的适应能力，MEMS 器件在新型振动监控应用中获得了越来越多的关注。检测点的高级信号处理技术带来了巨大便利，使大多数情况下的监控负担简化为一种简单状态（正常、报警、临界）。此外，通过便利的通信通道实现的远程数据存取功能则为振动监控仪器创造了新的应用机会。放眼未来，关键性能指标（噪声、带宽和动态范围）的发展，再加上高度的功能集成，必将促使这种趋势继续向前发展。

## 参考文献

电路笔记 CN0303: [带频率响应补偿功能的 MEMS 振动分析仪](#)。

Bob Scannell MS-2507: [利用无线振动传感器实现连续、可靠的过程监控](#)。

## 作者简介

Mark Looney [[mark.looney@analog.com](mailto:mark.looney@analog.com)]

是 ADI 公司（美国北卡罗来纳州格林斯博罗）的 iSensor<sup>®</sup> 应用工程师。自 1998 年加入 ADI 公司以来，他在传感器信号处理、高速模数转换器和 DC-DC 电源转换领域积累了丰富的工作经验。他拥有内华达州大学雷诺分校电子工程专业学士（1994 年）和硕士（1995 年）学位，曾发表过数篇文章。加入 ADI 公司之前，他曾协助创立汽车电子和交通解决方案公司 IMATS，还担任过 Interpoint 公司的设计工程师。

