

用于状态监控的高保真振动采集平台

Chris Murphy, 应用工程师

摘要

本文说明MEMS技术的最新进展如何将加速度传感器推到前沿，在状态监控应用中与压电传感器抗衡竞争；还将讨论如何使用使这一切成为可能的新开发平台。在**第2部分**，我们将着重介绍支持该开发平台的软件框架，以及如何将其与热门的数据分析工具集成，以开发机器学习示例，最后，介绍如何将其部署到各种资产上。

状态监控(CbM)和预测性维护(PdM)简介

状态监控(CbM)涉及使用传感器来测量当前的健康状态，以监测机器或资产。预测性维护(PdM)需要组合使用CbM、机器学习和分析等多种技术，以预测未来的资产维护周期或可能发生的故障。预计全球设备健康监测将显著发展，因而知晓和了解关键的趋势势在必行。越来越多的CbM公司开始采用PdM来提高其产品的差异化优势。关于CbM，维护和设备管理人员现在有了新的选择，比如无线装置，以及更低成本的高性能装置。虽然大部分CbM系统的基础设施保持不变，但现在我们可以将新的MEMS技术直接集成到以前主要采用压电式传感器，或因成本障碍而未进行监控的系统中。

状态监控—工程挑战和设计决策

在典型的CbM信号链设计中，需要考虑许多不同的工程规范和技术，这些规范和技术都在不断改进，其复杂性也在不断增加。现在有各种类型的客户，他们可能具备某个领域的专业知识，例如算法开发（仅软件）或硬件设计（仅硬件），但并非始终同时精通这两个方面。

对于希望专注于算法开发的开发人员，他们要求数据信息库能够准确预测资产故障和停机。他们不想设计硬件，或者解决数据完整性故障；而是想使用确实高度保真的数据。同样，对于希望提高系统可靠性或降低成本的硬件工程师，他们需要一种

可以轻松连接到现有的基础设施的解决方案，从而可以对现有解决方案进行基准测试。他们需要易于使用和导出的可读格式访问数据，以免浪费时间来评估性能。

许多系统级挑战都可以采用平台方法解决（从传感器到算法开发），从而支持所有类型的客户。

CN0549是什么？它如何帮助延长设备的寿命？

CN0549 CbM开发平台

CN0549状态监控平台是一种高性能、现成的硬件和软件解决方案，可以将高保真的振动数据流从资产传输到算法/机器学习开发环境中。该平台为硬件专家提供了一个经过测试和验证的系统解决方案，可以提供高度精准的数据采集、与资产之间的可靠机械耦合，以及高性能宽带振动传感器。同时提供所有硬件设计文件，帮助您轻松集成到设计的产品中。CN0549对软件专家也很有吸引力，它概括了状态监控信号链硬件挑战，让软件团队和数据专家能够直接开始开发机器学习算法。重要特性和优点包括：

- ▶ 易于安装到资产中，同时保持机械耦合信号的完整性
- ▶ 具有IEPE数据输出格式的宽带MEMS加速度计传感器
- ▶ IEPE、模拟输入带宽从DC到54 kHz的高保真数据采集(DAQ)解决方案
- ▶ 嵌入式网关捕捉和存储原始数据，用于本地或联网处理
- ▶ 使用ADI的IIO示波器应用实时显示频域数据
- ▶ 直接将传感器数据流传输至热门的数据分析工具，例如Python和MATLAB®

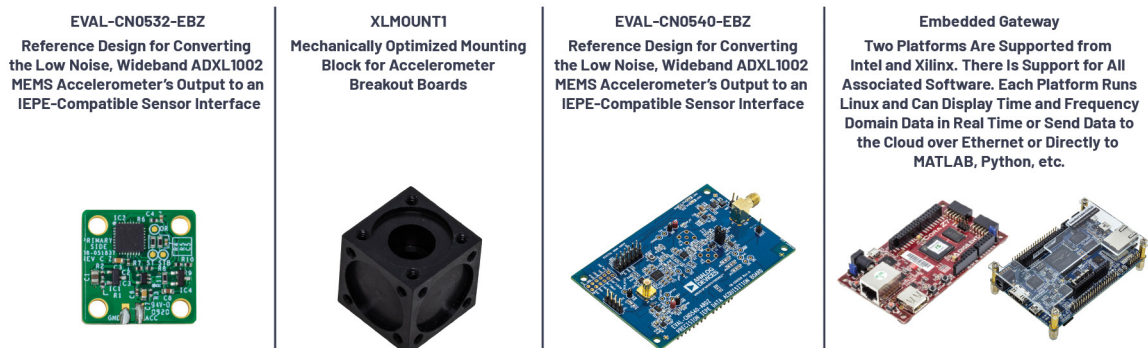


图1. 构成CbM开发平台的元件。

CbM开发平台主要由四种不同的元件构成（如图1所示），我们将分别逐一介绍，然后介绍整个组合解决方案。

高度精准、高保真的数据捕捉和处理

在带宽更宽、传感器噪声更低时，可以更早检测到故障，例如轴承问题、气蚀和齿轮啮合。数据采集电子设备必须确保测量的振动数据高度保真，这一点非常重要；否则可能导致重要的故障信息丢失。确保振动数据保真，这样我们就可以更快地发现变化趋势，且非常自信地提供预测性维护建议，从而减少机械元件不必要的磨损，随之延长资产的使用寿命。

对重要性较低的资产实施状态监控的经济高效的方法

压电式加速度计是最关键的资产上使用的最高性能的振动传感器，对于这些资产来说，性能比成本更重要。一直以来，压电传感器的高成本都阻碍了对重要性较低的资产实施状态监控。现在，MEMS振动传感器在噪声、带宽和 g 范围等方面都不逊于压电式传感器，这让维护和设备管理人员能够更深入地了解重要性较低的资产，这些资产以前采用故障排除或被动维护计划。这主要是因为MEMS的性能高，成本低。现在，我们可以使用经济高效的方法来持续监控中低等重要性的资产。我们可以利用先进的振动传感技术，轻松识别和修复资产上不必要的磨损，帮助延长资产的使用寿命。这也有助于提高设备的整体效率，减少机器或工艺停机时间。

监控资产—检测问题

对于CbM和PdM，可以使用多种不同类型的检测模式。大部分应用都涉及电流检测、电磁检测、流量监控和其他几种模式。振动检测是CbM中最常用的模式，压电式加速度计则是最常用的振动传感器。在本节中，我们将回顾技术进步如何推动振动传感器领域不断发展，以及这对应用决策产生什么样的影响。

MEMS与压电式加速度计

压电式加速度计是性能非常高的传感器，但要达到该性能，需要做出许多设计取舍。例如，压电式加速度计通常都是用在有线安装中，这是因为它们会消耗过多功率、体积可能很大（尤其是三轴传感器），且成本高昂。综合上述所有这些因素，在整个工厂内使用压电式传感器是不现实的，所以，它们一般只用在关键资产上。

MEMS加速度计一直没有足够的带宽、噪声过高， g 范围也仅支持监控不太重要的资产，这种情况直到最近才发生改变。MEMS技术的最新进展克服了这些限制，使MEMS振动传感器能够监控低端资产，也能监控非常重要的资产。表1显示了压电式传感器和MEMS传感器在CbM应用所需的重要特性。MEMS加速度计体积小、可通过电池供电运行数年、成本低，且性能不逊于压电式传感器，正快速成为许多CbM应用的首选传感器。

CN0549 CbM开发平台兼容MEMS和IEPE压电式加速度计，可在不同传感器类型之间进行基准比较。

表1. MEMS与压电式加速度计

	压电	MEMS
直流响应		✓
耐冲击		✓
集成机会（3轴、ADC、警报、FFT）		✓
性能随时间和温度的变化		✓
功耗		✓
体积（越小越好）		✓
自测		✓
实现类似性能的成本		✓
噪声	✓	
带宽	✓	✓
机械连接	✓	✓
行业标准接口	✓	✓
g 范围	✓	✓

现有IEPE基础设施中使用MEMS加速度计

如表1所示，与压电式传感器相比，MEMS加速度计现在可以提供具有竞争力的规格和性能，但是，它们能够取代现有的压电式传感器吗？为了便于设计人员评估并使用MEMS加速度计来取代压电式加速度计，ADI设计了一个接口，它可以兼容CbM应用中实际使用的IEPE标准压电式传感器接口。

IEPE传感器接口和机械安装(CN0532)

CN0532（如图2所示）是一个IEPE转换电路，让MEMS加速度计和现有IEPE传感器一样，直接与IEPE基础设施无缝连接。

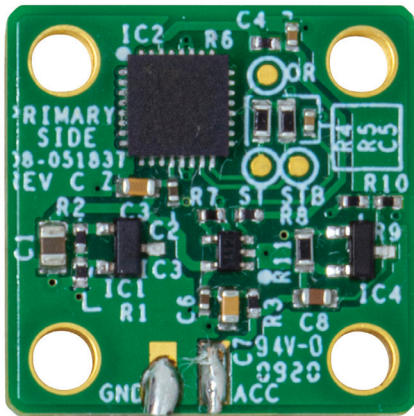


图2. CN0532 MEMS IEPE转换电路。

单轴MEMS传感器通常有三条输出线路：电源、接地和加速度输出。IEPE基础设施只需要两条：一条线路接地，另一条传输电源/信号。电流传输给传感器，当传感器检测到振动时，由同一条线路输出电压。

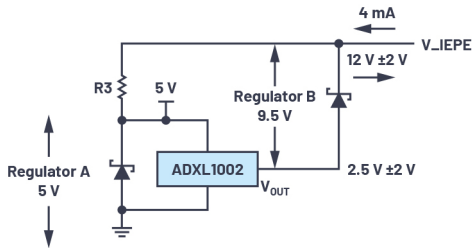


图3. 说明MEMS传感器如何与现有的IEPE基础设施（电源和数据）连接的简化示意图。

CN0532 PCB的设计厚度为90 mils，以保持数据手册中给出的MEMS加速度计的频率响应性能。测试装置采用螺钉安装，开箱即可进行测试。安装块、PCB和焊锡膏等均进行了广泛表征，以确保全带宽机械转换功能、最大限度地提高传感器带宽内各类故障的可见性，并通过捕捉这些故障来延长资产的使用寿命。这些解决方案让CbM设计人员能够轻松将MEMS加速度计集成到他们的资产中，并与现有的压电式基础设施无缝连接。

对于高频振动测试，机械信号路径的完整性非常重要。换句话说，从信号源到传感器，振动信号必须没有衰减（由于阻尼）或放大（由于谐振）。如图4所示，一个铝质安装块（EVAL-XLMOUNT1）、四个螺钉安装座和一个厚PCB，确保对目标频率范围提供平坦的机械响应。IEPE参考设计让设计人员能够轻松使用MEMS传感器来取代压电式传感器。

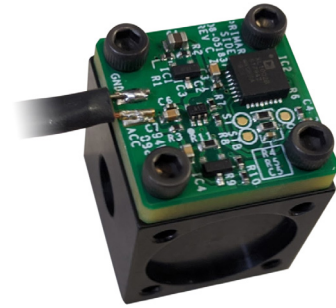


图4. 振动测量测试装置：使用EVAL-XLMOUNT1铝质安装块将EVAL-CN0532-EBZ板连接至振动台。

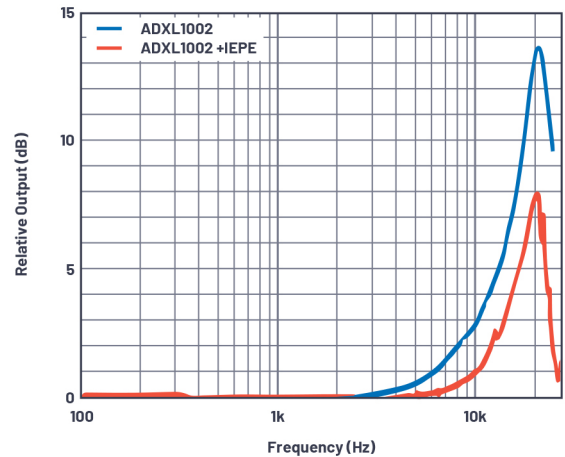


图5. EVAL-CN0532的频率响应与ADXL1002数据手册给出的频率响应的比较。

振动到比特——数据转换的完整性

现在，我们知道可以使用MEMS传感器来代替IEPE压电传感器。也知道如何将它们轻松地安装到资产上，同时保持数据表给出的性能。对于CbM开发平台，重要的一点是它能够收集高质量的转换数据（无论是基于MEMS还是基于压电式传感器），然后将数据输送至正确的环境中。接下来，我们看看如何获取IEPE传感器数据并保持最高的数据保真度，以开发最好的CbM算法或机器学习算法。我们的另一款CbM参考设计CN0540可以帮助实现上述目标。

适用于IEPE传感器的高保真24位数据采集系统(CN0540)

图6显示了一款经过实验室测试和验证的IEPE DAQ信号链。这款参考设计提供了兼容MEMS和压电式加速度计的优化模拟信号链。ADI不仅关注基于MEMS加速度计的解决方案。请注意，压电式加速度计提供出色的性能，是广泛使用的振动传感器；所以，压电式加速度计是适用于精密信号链产品的重要传感器。

图6所示的电路是适用于IEPE传感器的传感器到比特（数据采集）信号链，由电流源、输入保护、电平转换和衰减级、三阶抗混叠滤波器、模数转换器(ADC)驱动器和全差分 Σ - Δ ADC组成。CbM系统设计人员在使用压电式加速度计时，需要使用高性能模拟信号链来实现振动数据保真。设计人员只需将IEPE传感器或CN0532 IEPE传感器直接连接到CN0540 DAQ参考设计，就可以评估信号链的性能。ADI对此设计进行了广泛测试，提供开源设计文件（原理图、布局文件、材料清单等），以轻松将其集成到终端解决方案中。

CN0540 IEPE数据采集板是一种经过测试和验证的模拟信号链，专用于获取IEPE传感器振动数据，具有优于100 dB的信噪比(SNR)。市场上大多数与压电传感器连接的解决方案都采用交流耦合，不具备直流和亚赫兹测量能力。CN0540适用于直流耦合应用场景，在这些场景中，必须保留信号的直流分量，或者必须确保系统响应低至1 Hz或更低的频率。

采用2个MEMS传感器和3个压电传感器对高精度数据采集参考设计进行测试，如表2所示。从表中可以看出，每个传感器的 g 范围、噪声密度和带宽都有很大差别，价格也是如此。值得注意的是，压电传感器仍具有最佳的噪声性能和振动带宽。

对于CN0540，系统带宽设置为54 kHz，信号链噪声性能是针对在该带宽范围内能够达到>100 dB动态范围的传感器，例如，Piezotronics PCB 621B40型加速度计可以在30 kHz时达到105 dB。CN0540旨在提供超越当前振动传感器性能的带宽和精度，确保它不会成为收集高性能振动数据时的阻碍。在同一系统上比较MEMS和压电式传感器并确定基准是非常容易的。无论与MEMS传感器、压电传感器还是与两者一起工作，CN0540都能为数据采集和处理提供最佳信号链解决方案，所以必然会设计为嵌入式解决方案。

当我们说MEMS传感器能以更低成本提供相当的性能时，ADXL1002的SNR为83 dB，但与压电传感器相比，其成本低10倍以上。MEMS传感器现在可替代除最高性能的压电传感器以外的所有传感器，且成本低廉。

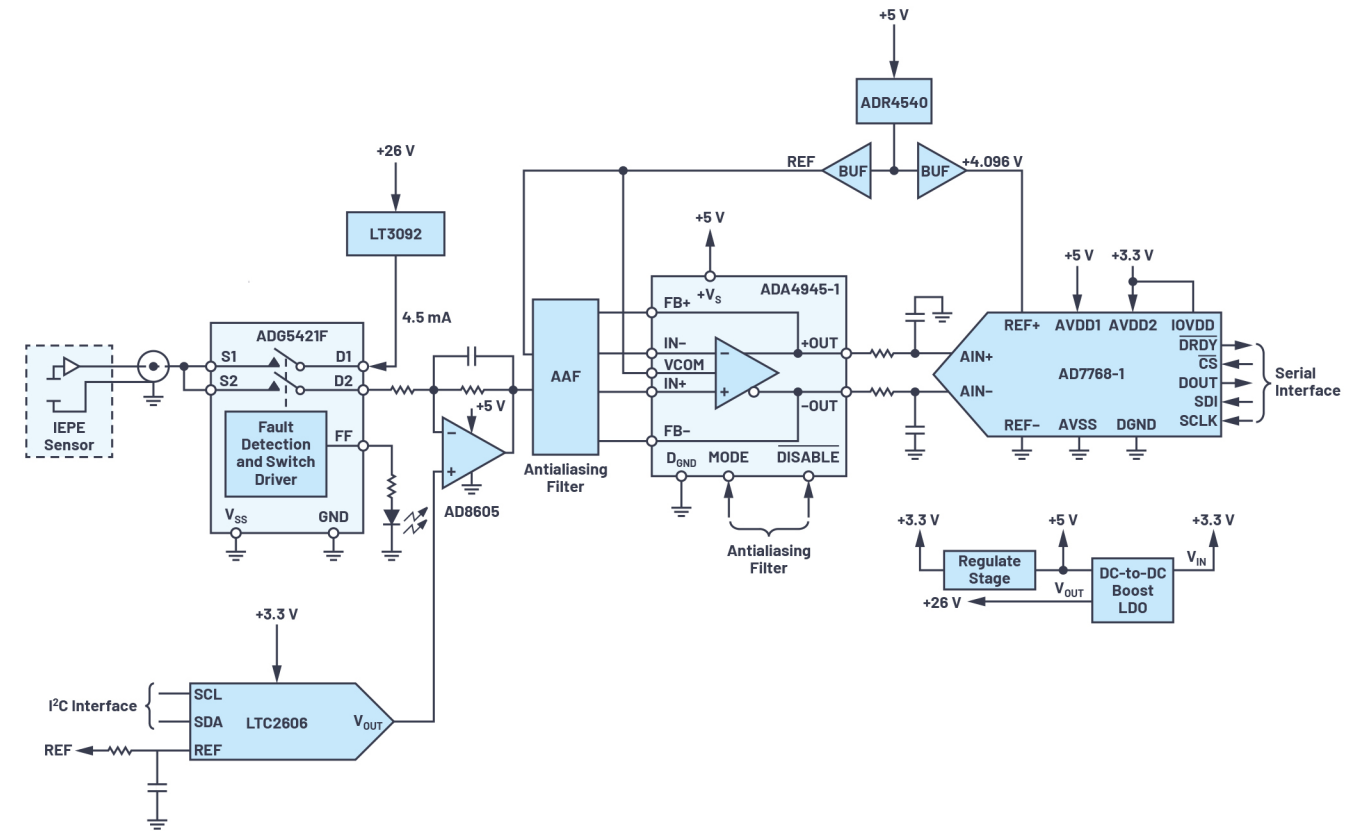


图6. CN0540: 适用于IEPE传感器，可进行高性能、宽带宽、精密数据采集。

表2. MEMS和压电传感器及其相应的噪声密度测量值

传感器	范围 (±g)	输出范围 峰峰值(V)	线性度 (%FSR)	NSD ($\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)	平坦带宽 (kHz)	平坦带宽下的噪声 ($\mu\text{g RMS}$)	平坦带宽下的动态范围 (dB)
ADXL1002	50	4	0.1	25	11	2622	82.60
ADXL1004	500	4	0.25	125	24	19365	85.32
PCB 621B40	500	10	1	10	30	1732	104.95
PCB 352C04	500	10	1	4	10	400	118.93
PCB 333B52	5	10	1	0.4	3	22	98.50

嵌入式网关

在DAQ信号链获得高保真振动数据之后，必须处理这些数据，并实时查看和/或将数据发送至机器学习或云环境，这是嵌入式网关的工作。

在本地实时处理振动数据

Intel® (DE10-Nano)和Xilinx® (Cora Z7-07S)支持两种嵌入式平台，其中包括对所有相关HDL、设备驱动器、软件包和应用的支持。每个平台都运行嵌入式ADI Kuiper Linux®，让您能够实时显示时域和频域数据，通过以太网访问实时捕捉的数据，连接热门的数据分析工具（例如MATLAB或Python），甚至连接各种云计算实例（例如AWS和Azure）。嵌入式网关可以通过以太网向您选定的算法开发工具传输6.15 Mbps（256 kSPS × 24位）。嵌入式网关的一些关键特性包括：

- Intel Terasic DE10-Nano
 - 双核Arm® Cortex®-A9 MP Core处理器，搭载采用双精度浮点单元(FPU)的800 MHz neon™框架媒体处理引擎
 - 1千兆以太网PHY，采用RJ45连接器
- Digilent Cora Z7-07S (Xilinx)
 - 667 MHz Cortex-A9处理器，紧密集成Xilinx FPGA
 - 512 MB DDR3存储器
 - USB和以太网连接

IIO示波器（如图7所示）是一款与ADI Kuiper Linux一起安装的免费开源应用，可以帮助您快速显示时域和频域数据。它基于Linux IIO框架进行构建，直接与ADI的Linux设备驱动器连接，可以在一个工具中完成设备配置、设备数据读取和可视化显示。

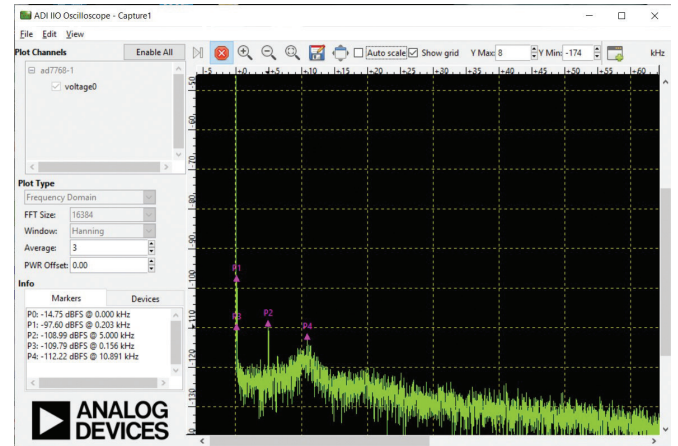


图7. IIO示波器显示5 kHz纯音的FFT。

ADI Kuiper Linux镜像也支持行业标准工具，例如MATLAB和Python。通过使用可以配合IIO框架工作的连接层，开发出IIO绑定用于将数据流直接传输至这些典型的数据分析工具。设计人员可以使用这些强大工具，结合IIO集成框架，用于显示和分析数据、开发算法，以及执行硬件环路测试和其他数据处理技术。提供完整示例，展示如何将高质量的振动数据传输至MATLAB或Python工具。

使用CN0549进行预测性维护开发

为PdM应用开发机器学习(ML)算法一般包含5大步骤，如图8所示。在进行预测性维护时，通常使用回归模型，而不是分类模型来预测即将发生的故障。向预测性模型输入的训练数据越多，其性能表现越出色。如果只输入10分钟的振动数据，可能无法检测到所有操作特性，但是如果输入10小时的数据，则检测几率大大增加，如果收集10天的数据，则模型的性能将更强。



图8. 开发PdM应用的步骤。

1. Connect and Power CN0549 Hardware, Then Attach Sensor to Asset or Vibration Shaker
2. Perform Resonance Test by Viewing Data in Real Time (Linux IIO Scope)
3. Stream Data for Use Case (For Example, 70% Load) to the ML Environment
4. Analyze Data in MATLAB, TensorFlow, Caffe, etc. to Identify Signatures of Asset Under Normal Operating Conditions at 70% Load—RMS, Peak, FFT, etc.
5. Seed or Simulate a Fault (Loose Footing, Load Imbalance, Bearing Issue) and Repeat Step 4 to Identify Unique Fault Signatures

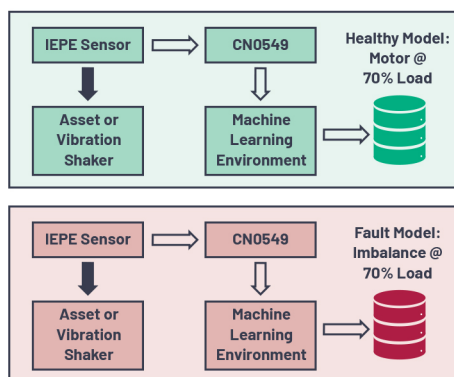


图9. CN0549示例用例。

CN0549在一个易于使用的系统中提供数据收集步骤，在该系统中，我们可以将高性能振动数据流传输至所选的机器学习环境。

MEMS IEPE传感器随附机械安装块，可以将MEMS传感器无缝安装到资产或振动台上。注意，IEPE压电传感器也可与本系统配合使用，轻松安装到资产、振动台等装置中。在将数据流传输至数据分析工具之前，应先验证传感器安装，确保不会产生任何干扰谐振。可以使用IIO示波器轻松且实时完成这种检查。系统准备就绪后，可以定义一个用例，如图9所示，例如，在70%的负载下正常运行的电机。之后，可以将高质量的振动数据流传输至基于MATLAB或Python的数据分析工具，例如TensorFlow或PyTorch（以及许多其他工具）。

通过分析，可以确认能够定义该资产的健康状况的特征和特性。建立可以定义正常运行状况的模型后，即可检测或仿真故障。可以重复使用第4步来确定能够定义故障的关键特征，由此生成模型。将故障数据与正常运行电机的数据进行比较，可得到预测模型。

以上简要概述了CbM开发平台支持的机器学习流程。需要注意的是，该平台可以确保将最高质量的振动数据传输至机器学习环境。

本文第2部分将详细介绍软件堆栈、数据流和开发策略，并从数据专家或机器学习算法开发人员的角度介绍使用Python和MATLAB的示例。此外，还将概述软件集成，以及本地和基于云的开发选项。

作者简介

Chris Murphy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。他拥有电子工程硕士学位和计算机工程学士学位。联系方式：chris.murphy@analog.com。

在线支持社区



访问ADI在线支持社区，中文技术论坛

与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

请访问ez.analog.com/cn

