

如何为无线状态监控系统 选择最佳MEMS传感器—— 第二部分：如何检测机械故障

Richard Anslow, IC设计工程师

Chris Murphy, 应用工程师

简介

本系列文章的第一部分“[如何为无线状态监控系统选择最佳MEMS传感器——第一部分](#)”介绍了Voyager无线CbM模块，以及在使用MEMS加速度计无线测量振动时需要注意的一些关键特性。第二部分将重点描述常见的交流感应电机(ACIM)故障，并详细介绍如何识别和诊断特定的故障类型，以及三轴MEMS加速度计相对于其他振动传感器的优势。

电机和资产故障对制造业的影响

当工厂中的重要电机突然意外故障，会导致停产。如果需要更换特定的部件，或者甚至更换整个电机，那么有可能需要耗费很长的时间。计划外停机的成本是按计划停机成本的10倍。¹工厂每年的平均停机时间约为800小时。¹在这些信息的推动下，随着无线技术与MEMS传感器技术的新进展相互结合，使得CbM开始快速发展，最终推动工厂和维护经理快速部署高度有效的无线CbM系统来降低因计划外停机导致的损失。虽然三轴MEMS传感器可能是这场无线革命的中心，但对于这些振动传感器究竟能做什么，大家仍然不是十分清楚。

三轴MEMS加速度计适合用于振动传感器频谱的什么位置？

为了减少生产停机时间，必须了解电机内部的潜在故障，做好故障处理准备。虽然单轴模拟输出MEMS传感器（专用于和压电振动传感器相比）在故障诊断能力方面，最近已经达到了与低级/中级压电传感器相似的性能水平，但本文更侧重于介绍三轴MEMS加速度计中常见的窄带宽监控（0 Hz至1 kHz）。并非所有

的CbM部署都侧重于诊断甚至是预测资产故障。有些资产可以接受在后期阶段执行故障检测，所以，传感器性能和成本可以稍低一些。在这些地方，可以使用三轴MEMS加速度计，作为提供高性能（噪声低至25 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ）和低成本的替代方案，如图1所示。如果比较ADXL356和压电传感器PZT 8，两者之间的成本相差20倍，但之间并无什么高性能、低成本的MEMS可作为替代。预计在未来几年，这一领域将取得显著发展。

为什么需要在CbM应用中检测10 Hz/600 rpm以下的振动？

低频CbM振动测量的范围通常是0.1 Hz至10 Hz，或者在6 rpm至600 rpm带宽之间。低频应用比一般的机械监控更为复杂，因为低于10 Hz (600 rpm)的运动产生的振动非常小。虽然众所周知，使用高灵敏度的传感器来测量高频振动数据有助于检测到某些故障（轴承脱落、齿轮啮合和泵气蚀），并且可能了解资产的剩余有效寿命，但还需要注意，在接近直流或0 Hz时也存在重要信息。所以，在0 Hz时，可以使用一些特殊用途的非接触式传感器（例如电涡流位移传感器或接近传感器）来准确地检测电机轴的位移或失调，甚至是检测高频振动，但相比MEMS，它们很难进入某些应用，且成本也更高昂。MEMS并非用于取代可以在极端条件下检测低于0.1 nm的位移的电涡流传感器。³但是，如果设计人员想要采用低成本CbM系统，或者甚至是能够检测低至0 Hz的加速度的无线系统，那么，MEMS加速度计是非常经济高效的替代产品。

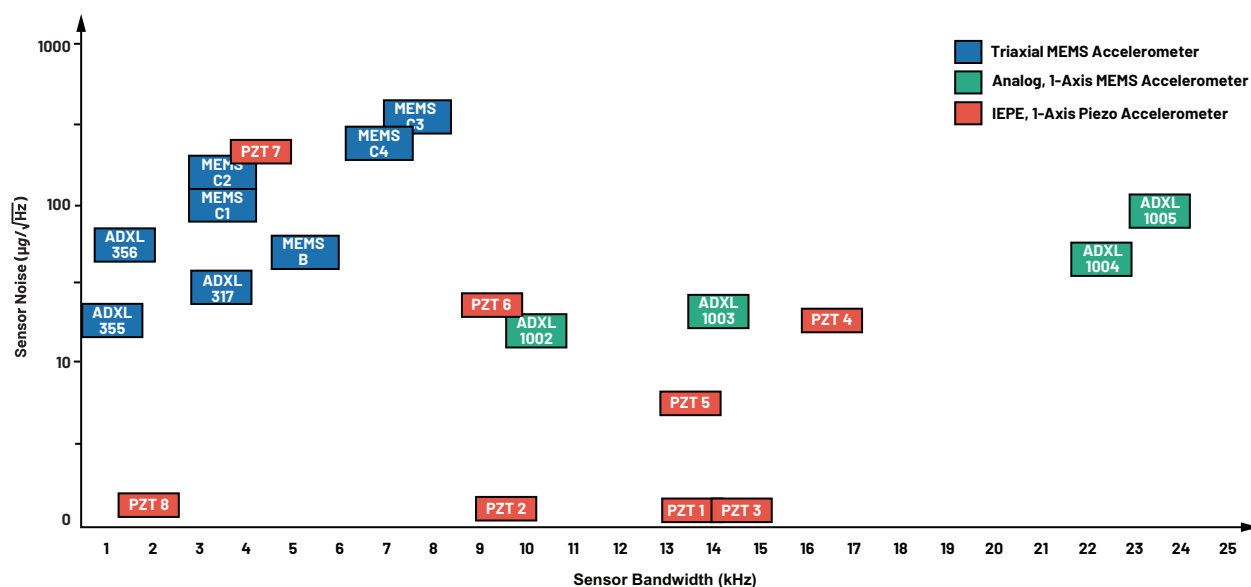


图1. 适用于CbM的三轴MEMS传感器和更高性能的MEMS和IEPE传感器的比较。

造纸和纸浆加工、食品和饮料、石油和天然气、风力发电、金属加工和采矿等行业都使用转速低于1 Hz的低速电机；因此，振动传感器需要能够检测这些基本转速，这至关重要，特别是在试图检测失衡和失调故障时。我们可以使用频率响应从0.1 Hz开始的专用低频IEPE传感器或压电传感器，但2 Hz至5 Hz的通用传感器更为常用。与压电传感器相比，MEMS的一个关键优势在于：它可以检测低至0 Hz，产生倾斜信息。我们无法在模态激励器上实施这种测试，所以测量范围被限制为0.01 Hz，如图2所示。需要注意的是，压电传感器的成本更加高昂，且正如预期一样，在0.1 Hz以上的范围内，具有更出色的噪声性能，但在0.1 Hz以下的范围内，MEMS传感器的噪声性能更为出色，可以低至0.01 Hz，直到0 Hz。多轴MEMS加速度计的所有轴都具有这种低频性能特性，可以帮助维护和设施工程师进一步了解其资产的低频动态特性，以前，即使是使用高度专业的压电传感器也无法实现这种特性。

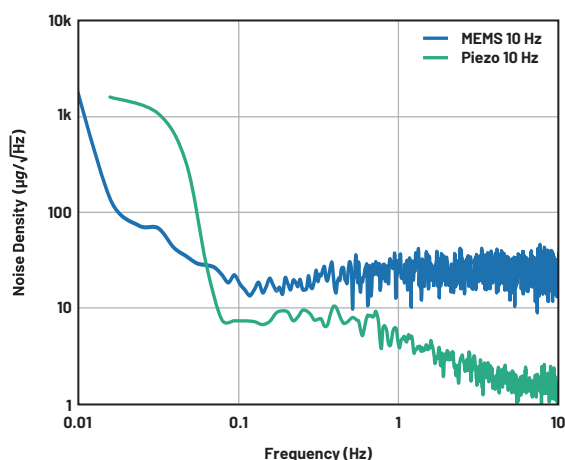


图2. MEMS与压电传感器的低频响应。

通常，建议加速度计的频率响应是轴转速的40到50倍，以监测轴承，对于风扇和变速箱，频率响应应高达叶片通过频率的5倍。⁴ 转速极慢的机器，例如造纸机辊轮、螺旋输送机 and 碎石机等都装有滚子轴承。有些机器的Rpm转速可能低至0.2 Hz或12 rpm。⁵ 在检测和诊断失衡、失调和机械松动等问题时，1×、2×和3× rpm转速信息至关重要。冲压机器的曲柄轴承可能以低至0.18 Hz或11 rpm的转速运行。⁵ 对于无线CbM系统，电涡流传感器因为功耗高，目前尚不可用。MEMS加速度计为基于压电加速度计和电涡流传感器的多模态振动和位移测量提供了一种性能更低、成本更低的替代方案。

使用Voyagers三轴MEMS加速度计检测基座松软或倾斜问题

ACIM的尺寸和功率可能各不相同，且较大的电机要求基座坚实，如图3所示。工业泵是一个典型应用，电源通过直接连接或通过一些耦合组件从轴传输至泵。这些连接失调可能为径向、轴向或切向。为了保持稳固对准，必须通过将泵固定到坚实基座上来尽量减小振动。稳定、坚实且硬度均匀的基座可以减少振动，提高可靠性，从而有效延长电机的使用寿命。我们通常使用螺栓直接将工业泵固定在底板上，并将配套设备对准放置和固定在相同的底板上。然后，将该总成固定到混凝土基座上。

如果基座太过灵活或不均匀，可能导致出现对准问题，使得振动幅度增大，最终出现计划外停机。会在安装电机、运行的初始阶段、经过维护或维修之后，以及在计划维护期间执行对准测试。可以使用各种机械检测设备来检测失调，例如塞规、千分尺和千分表。广泛使用激光对准系统等替代工具来对准电机轴和它们驱动的设备。

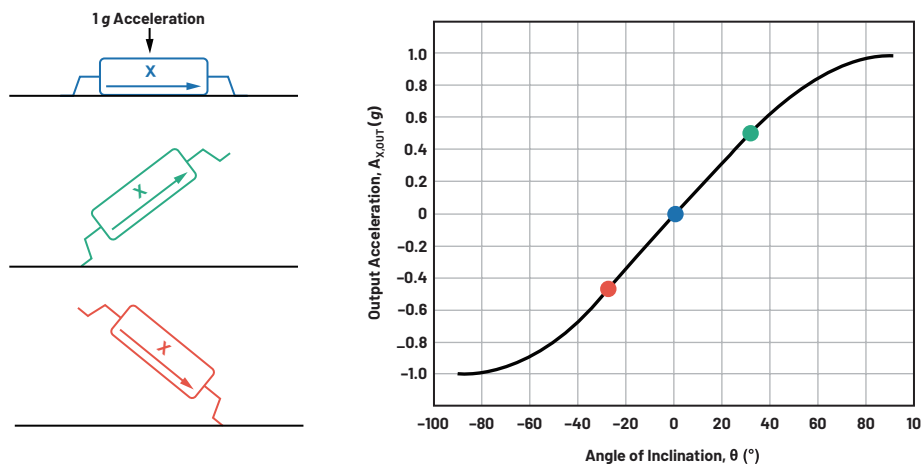


图4. MEMS加速度计的敏感轴垂直于1g。

开始运行之后，会定期维护，检查电机与底座之间的对准或电机安装是否存在异常，但这可能需要几个月的时间。目前的维护方案基于振动数据来检测失衡和失调，几十年来，这种做法一直很成功。在低重力条件下，MEMS三轴传感器可以连续监测和检测振动和倾斜的变化，这两者结合，会使测量更准确，且可能能够提早检测出故障。

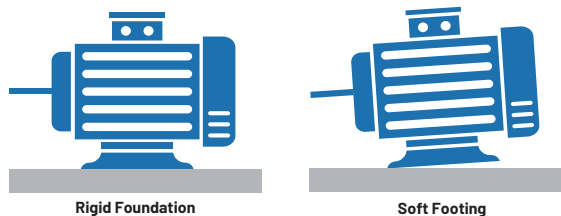


图3. 对准旋转设备时，基座松软是一个很常见的问题。

MEMS加速度计如何测量倾斜？

如图4所示，将单轴加速度计平稳置于平面上时，它的敏感轴与重力方向垂直，所以输出0 g。当传感器向重力方向倾斜时，它会检测到1g场产生的加速度。图4所示的曲线的倾斜度表示设备的灵敏度。注意，随着水平面与X轴之间的角度增大，灵敏度降低。

从图5中，可以看到Voyager模块测量重力导致的加速度或静态加速度。模块垂直放置，z轴上的加速度为1g，x轴和y轴上的加速度为0 g。当Voyager模块在x轴上倾斜4°，在22 s处，可以很容易看出这种倾斜（作为直流失调），如图5所示。要将测量到的加速度转换为倾斜角度，需要取测量到的加速度的反正弦 $\sin^{-1} 0.07g = 4^\circ$ 。

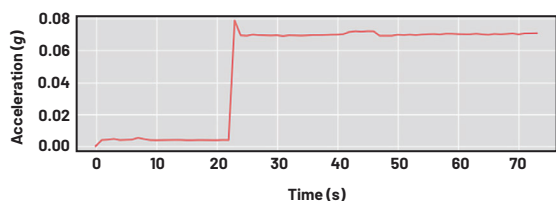


图5. Voyager模块在静态条件下检测4°倾斜。

对于CbM应用，在振动条件下检测倾斜时，存在几个问题。首先，其检测难度比在静态条件下更高，需要考虑更多因素。其

次，倾斜应用通常会限制带宽，以降低噪声(<100 Hz)，但是CbM应用需要使用更宽的带宽（1 kHz或更高）。如图6所示，检测资产或电机倾斜的最大范围可能限制为 $\pm 5^\circ$ 或 ± 87 mg，在可能存在高g振动的情况下，这可能是一项挑战。

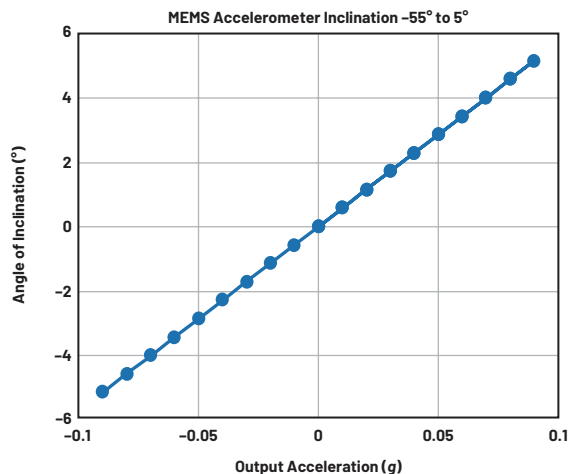


图6. 静态条件下的输出加速度与倾斜角度。

对测量到的加速度应用三角函数，很容易会产生倾斜角度。但是，如果检测到冲击事件或振动，则会影响倾斜角度测量，如图7所示，2 g冲击事件导致产生82°倾斜角度。

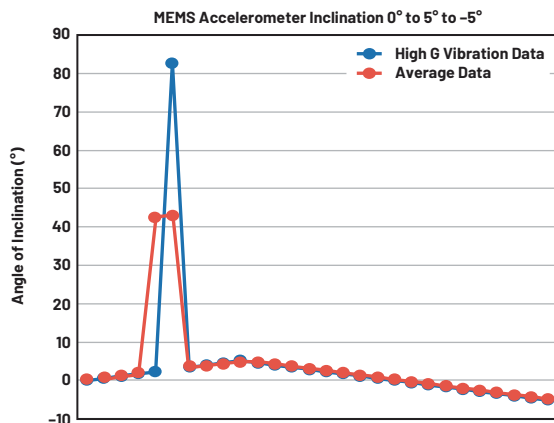


图7. 存在高g振动时的倾斜数据和平均数据。

虽然瞬时撞击、冲击或振动不会影响到电机的实际倾斜角度，但在将加速度转换为倾斜角度的过程中，会将这些数据当做实际倾斜值，如图7所示。取这些数据的平均值，或生成平均值是消除这些异常的常见方法，Voyager平台GUI具备此功能，如图8所示。

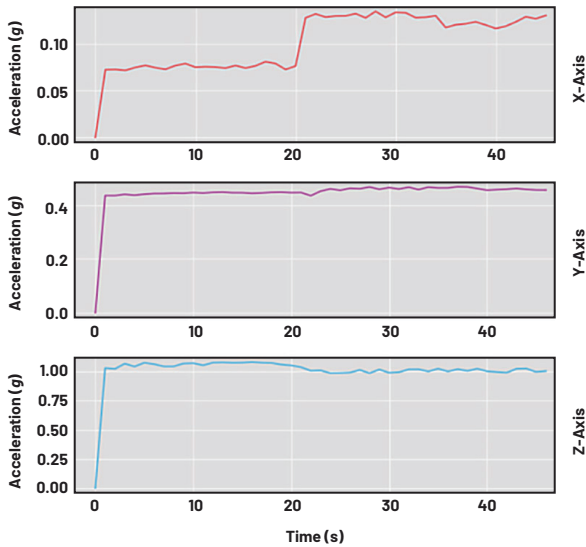


图8 三个轴的振动平均值。

图8所示的测量显示电机从1秒开始运行，在约18秒的位置出现 4° 倾斜。虽然从y轴和z轴可以观察到一些变化，但在x轴上清楚地检测到了这种倾斜。这是三轴振动传感器的关键优势之一，在本例中，它主要用于检测z轴上的振动，然后是y轴。x轴可以更准确地检测出倾斜，因为它不在测量振动的轴的范围之内。虽然在动态条件下，很难准确确定实际的倾斜量，但简单表述电机和可允许的倾斜范围也可以得出不错的结果。当测量到z轴为3 g，y轴为1.3 g，x轴为0.2 g时（如图9所示），计算出图8所示的倾斜角度为 $\sin^{-1} 0.07 g = 4^\circ$ 。Voyager模块的静态倾斜分辨率约为 0.2° 。

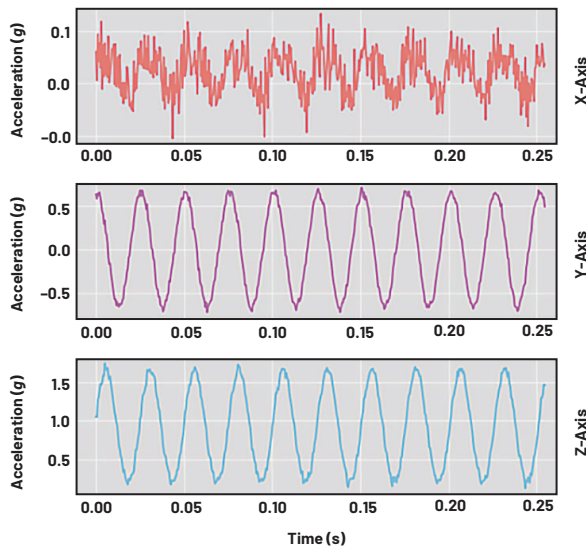


图9. 时域图：显示三个轴上测量到的振动。

在设计能够检测倾斜角度的MEMS无线振动模块时，需要考虑的另一个重要（数据手册）参数是g范围。MEMS传感器在遭受超出g值范围的振动时，会产生削波，它会表现为直流失调，会增大得出的倾斜测量值的误差。这意味着，在选择MEMS传感器，用于在振动条件下检测倾斜角度时，必须确保g范围相较于潜在的冲击、撞击或振动时间幅度，还留有余量，以避免出现这种失调。

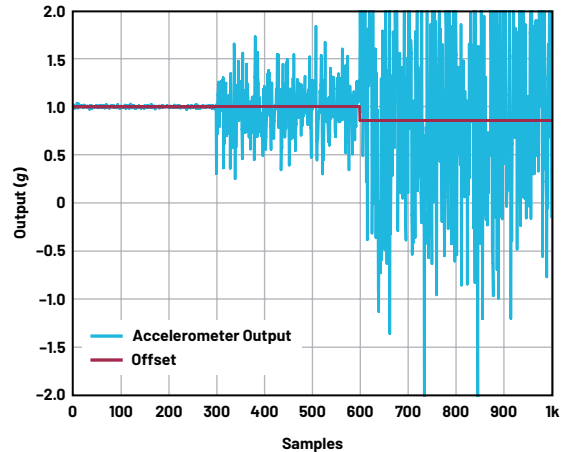


图10. ± 2 g量程范围的加速度计因为非对称削波而振动校正。

使用Voyager检测故障

Voyager三轴振动测量解决方案能够识别故障并提供见解，单轴解决方案不具备此能力。基于振动的故障检测是一个复杂的过程，期间需要使用许多数学模型，甚至AI来诊断故障。之所以使用Voyager模块给出的测量结果，是为了显示相较于单轴传感器，三轴测量结果更为准确，是用于诊断特定故障的更加可靠的方法。

图11显示SpectraQuest检具，它能够在模拟真实机器的器件上执行受控实验。如果能深入了解负载失衡、转子翘起或偏心、转子轴弯曲，以及轴承/轴承套受损导致的故障的特征，即可通过模拟深入了解振动特征。Voyager无线模块安装在壳体上（如图11所示），所在位置有利于测量径向（z和y方向）振动幅度，以及轴和负载所在方向上的轴振动。

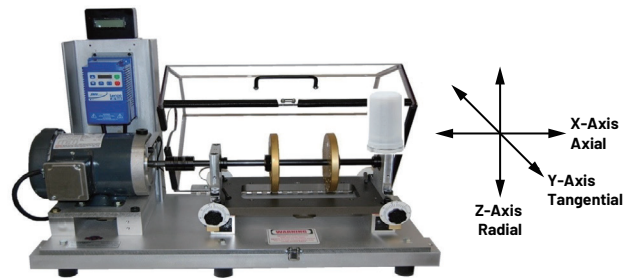


图11. SpectraQuest检具。

失衡和失调

失衡和失调这两种故障特征被分为一组，经常会在同一个FFT分析中出现。如图12所示，电机转子重心周围的重量分布不均会导致失衡，引发转子振动，给轴承带来额外的压力。这些振动会使轴承受到过度磨损，进而产生更多噪声，如果不维护，可能导致轴承，甚至整个电机出现故障。

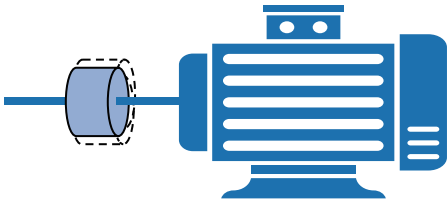


图12. 转动轴周围的重量分布不均。

如图13所示，当转子、耦合组件和从动轴没有对中时，会发生转子失调。这种失调可能是倾斜的，是平行的，或者两者皆有。失调导致的最常见的振动具有 $1\times$ rpm频率。 $2\times$ rpm频率可能超过 $1\times$ 频率，但这种情况并不常见。请注意，轴弯曲和失衡也会产生 $1\times$ rpm频率的振动。

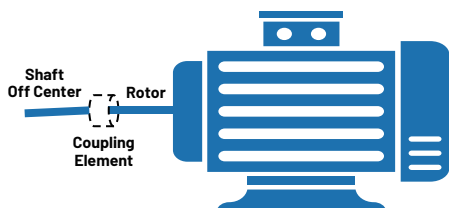


图13. 转子和从动设备轴的中心线不在一条直线上。

失衡负载

如果与基准背景振动噪声相比，在 $1\times$ 转速下振动幅度增大，那么系统可能失衡。为了模拟失衡，将通过添加配重，使其重量达到最大的负载放置到SpectraQuest检具的轴上。该系统以3000 rpm运转，我们增加5 kg负载。图14显示，与预期基准振动相比，在z径向方向上，在 $1\times$ 转速时振动幅度明显增大。图15显示对从x、y和z轴收集的振动幅度执行的FFT分析。在y和z径向方向，在 $1\times$ 转速时振动幅度明显增大，但在x轴方向，在 $9\times$ 和 $10\times$ 转速时振动幅度也明显增大，而在使用单轴传感器时，我们无法检测到后者。

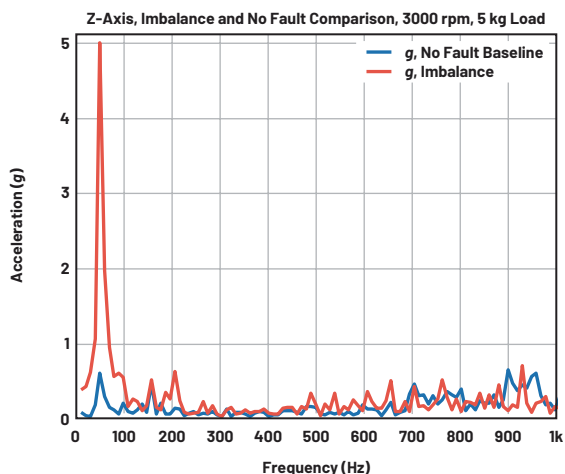


图14. 在负载为5 kg，转速为3000 rpm时的失衡FFT分析（z轴与基准比较）。

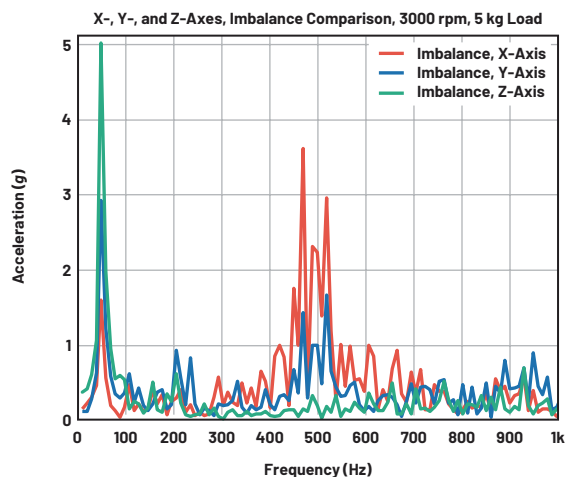


图15. 在负载为5 kg，转速为3000 rpm时的失衡FFT分析。

转子翘起

图16显示对附加到SpectraQuest检具上的翘起的转子（偏离轴 0.5° ）执行的FFT分析。频谱显示，在 $1\times$ 转速下，振动幅度大幅增大，但在 $3\times$ 、 $4\times$ 、 $5\times$ 、 $6\times$ 、 $7\times$ 、 $8\times$ 、 $9\times$ 和 $10\times$ 的谐波下，轴向振动幅度也会重复增大。与失衡负载一样，翘起的转子会在轴向上显示故障特征，使用单轴振动传感器时无法识别这种特征。

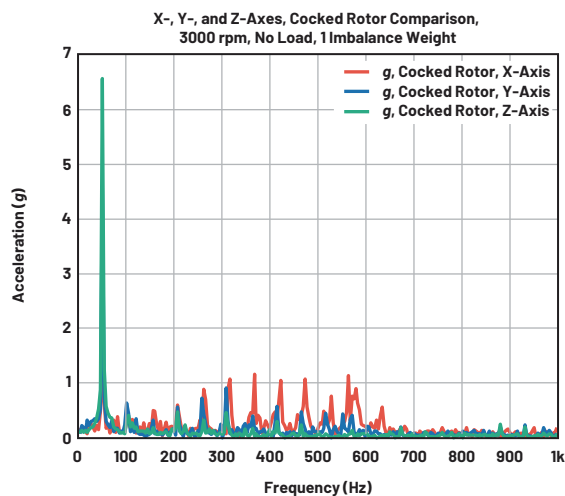


图16. 在转速为3000 rpm，无负载，有一个失衡重量时，对翘起的转子的FFT分析。

偏心转子

图17显示对附加到SpectraQuest检具上的偏心转子执行的FFT分析。频谱显示在第一个1×谐波位置，幅度大幅增加，表示径向(z)方向上存在失调，但在轴向的3×谐波位置，也出现大幅增加，这表示存在失调。^{6,7} 三轴传感器会捕捉偏心转子导致的失调和失衡，而单轴传感器解决方案无法检测到这些问题。

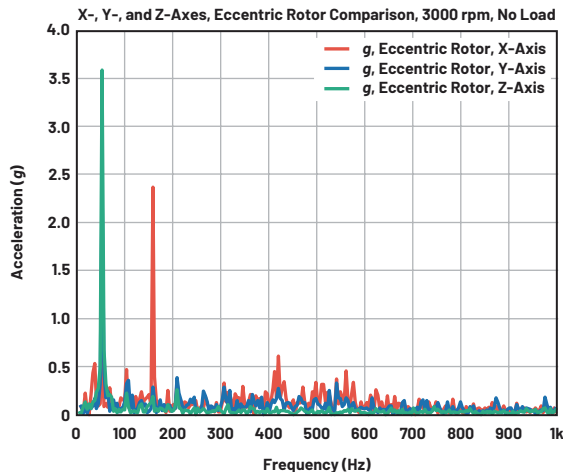


图17. 在转速为3000 rpm，无负载时对偏心转子的FFT分析。

弯曲的轴

图18显示对附加到SpectraQuest检具上的弯曲的轴执行的FFT分析。频谱显示在第一个1×谐波位置，幅度大幅增加，表示径向(z)和(y)方向上存在失调，但在轴向的3×谐波位置，也出现大幅

增加，这表示存在失调。另一个峰值出现在y方向1×谐波位置，可以帮助区分弯曲的轴和偏心转子故障。三轴传感器捕捉弯曲的轴导致的失调和失衡，而单轴传感器解决方案无法检测到这些问题。

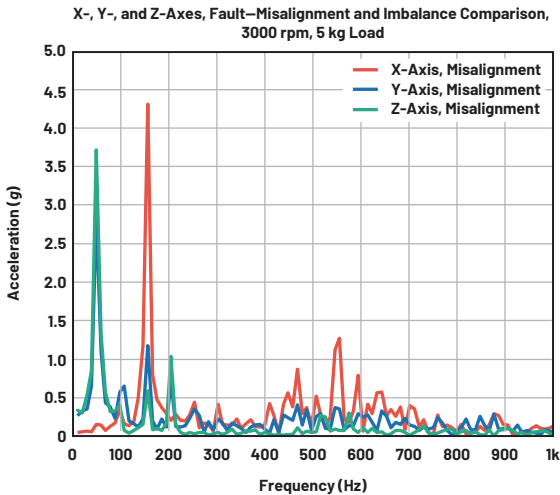


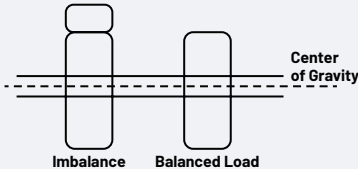
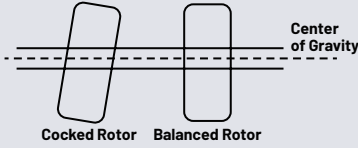
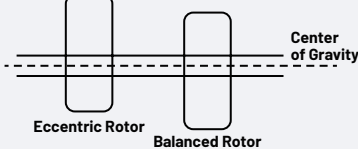
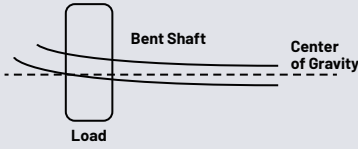
图18. 在转速为3000 rpm，无负载时对弯曲的轴的FFT分析。

表1汇总列出最常见的机器故障，这些故障出现的频率很低。

轴承缺陷

基于轴承的几何形状，可以将轴承缺陷分为几个基本的类型。轴承内环轨道损坏频率(BPFI)和轴承外环轨道损坏频率(BPFO)是滚动元件滚过轴承外圈或内圈的缺陷时产生的频率。

表1. 模拟的故障描述和故障特征

模拟的故障	附加到轴上的负载或转子	失衡故障的特征?	失调故障的特征?	其他故障特征?
质量失衡——质量分布不均。添加质量，达到最大负载限制。		✓	✗	✗
转子翘起。转子偏离轴0.5°。		✓	✗	✓
偏心转子。转子偏离中心——附加到轴上时，中心点不对称。		✓	✓	✗
弯曲的轴。为了进行描述，对反向的图像进行了夸大。		✓	✓	✗

轴承内环轨道损坏频率

将内环存在缺陷的轴承装到SpectraQuest检具上，通过存在缺陷的轴承箱，牢固连接杆和负载。可以使用以下公式来计算BPFI，

$$BPFI = \frac{N}{2} \times F \times \left(1 + \frac{B}{P}\right) \times \cos \theta$$

其中 F 表示频率， N 表示环数， B 表示环直径， θ 表示接触角， P 表示节圆直径。对于SpectraQuest检具，用户手册中提供了与其相关的计算。基于5/8"转子轴承使用的8个滚动元件，滚动元件的直径为0.3125"，节圆直径为1.318"，计算4.95×基本转速下的BPFI。

图19显示安装在SpectraQuest检具上的Voyager传感器对轴承内环缺陷故障执行的FFT分析。在y轴（径向）上大约250 Hz (~4.95×)的位置取BPFI值。值得注意的是，在z径向轴上也是如此，但振动幅度没有这么大而明显。

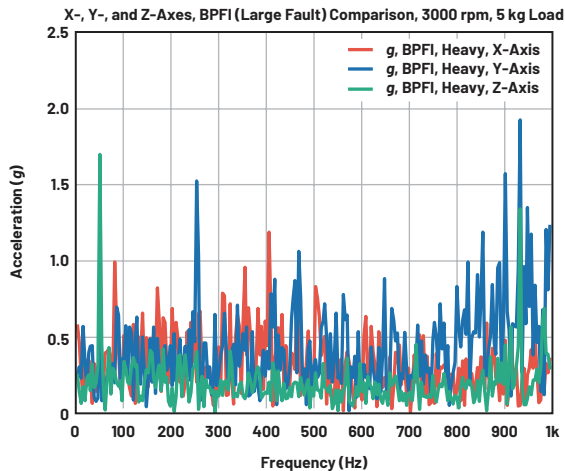


图19. 在负载为5 kg，转速为3000 rpm时的BPFI FFT分析。

轴承外环轨道损坏频率

将外环存在缺陷的轴承装到SpectraQuest检具上，通过存在缺陷的轴承箱，牢固连接杆和负载。可以使用以下公式来计算BPFO，

$$BPFO = \frac{N}{2} \times F \times \left(1 - \frac{B}{P}\right) \times \cos \theta$$

对于SpectraQuest检具，用户手册中提供了与其相关的计算。基于5/8"转子轴承使用的8个滚动元件，滚动元件的直径为0.3125"，节圆直径为1.318"，计算3.048×基本转速下的BPFO。

图20显示安装在SpectraQuest检具上的Voyager传感器对轴承外环缺陷故障执行的FFT分析。在y轴和z轴（径向）上大约150 Hz (~3.048×)的位置取BPFO值。值得注意的是，与4.95× BPFI预估特征相比，BPFO 3.048×预估特征下的幅度没有这么大。

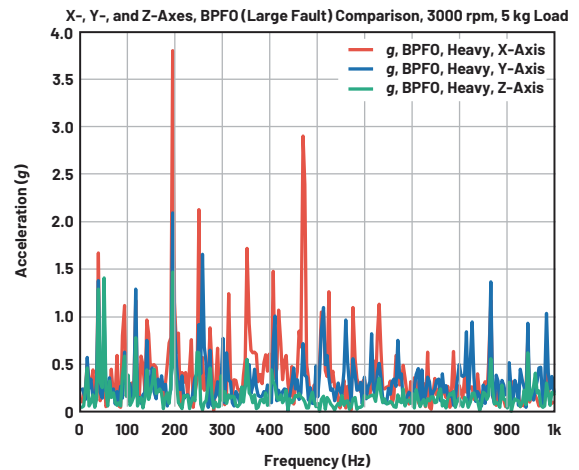


图20. 在负载为5 kg，转速为3000 rpm时的BPFO FFT分析。

诊断故障：如何在算法中使用故障特征

表2显示，Voyager三轴振动传感器在轴向采集故障特征，这些特征可用于区分具体的故障。例如，偏心 and 翘起转子故障都会导致在系统转速(1×)下，振动幅度大幅增加。但是，在轴向上，偏心转子仅在3×谐波时显示了一次增加，而翘起转子在3×、4×，以及高达10×谐波时都出现了增加。我们可以在算法中使用这些简单的谐波模式，以区分两种故障。Voyager三轴解决方案可以提供相关信息，单轴解决方案则不具备此能力。

另一个示例是：区分失衡负载和弯曲的轴。在系统转速(1×)下，失衡负载和弯曲的轴都会导致振动幅度增加。1×增加发生在径向方向（垂直方向和水平方向）。但是，在轴向上，失衡负载导致在9×和10×谐波位置出现增加，与之相比，弯曲的轴导致在3×谐波位置（失调特征）发生增加。

如前所述，弯曲的轴和偏心转子缺陷可以通过弯曲的轴在径向(y)方向上的大幅增加来区分，在偏心转子测试中则没有出现这种情况。

对于轴承故障，Voyager三轴解在径向水平(y)方向上取BPFI，而不是在垂直径向方向上取该值。如果使用单轴解决方案，就无法检测到这种轴承内环缺陷故障，除非用户恰好猜对了g幅度最大的轴。

表2. 常见的机器故障的故障频率特征汇总

故障	轴上的故障特征，以及常见的故障频率 (基本转速的1x或多倍)		
	Z轴 (径向——垂直)	Y轴 (径向——水平)	X轴 (轴向)
失衡负载	1x	1x	9x、10x
偏心转子	1x		3x
转子翘起	1x		3x、4x、5x、6x、 7x、8x、9x、10x
弯曲的轴	1x	1x	3x
BPFO (轴承外环 轨道损坏频率)	3x (BPFO)、4x	3x (BPFO)、4x	
BPFI (轴承内环 轨道损坏频率)	1x	5x (BPFI)	

结论

虽然MEMS的最新进展大大推动了它在CbM中的应用，但它的功能仍有不确定性，且存在很大差异。本文简要介绍适用于CbM的三轴MEMS传感器与更高性能的单轴MEMS传感器和压电/IEPE传感器的功能，以明确各种传感器的功能。压电传感器通常在较高的频率下具有较低的噪声，而MEMS可以提供接近于0 Hz的较低噪声，适合许多CbM应用。此功能与三个传感轴耦合，甚至能在振动条件下执行粗略的倾斜检测，很适合检测底座松动。

我们在检具上模拟各种故障，明显可以看出，Voyager模块中的三轴MEMS传感器能够检测失衡、失调、轴承问题、转子翘起和弯曲轴等等故障。此外，三轴传感器能够准确识别特定故障，所以，三轴MEMS传感器非常适合对振动测量系统实施状态监控。

在本系列文章的第三部分中，我们将探讨Voyager模块的不同功率模式、其电源和软件架构，以及如何优化其性能。

参考资料

- ¹ “计划外停机时间：这究竟有多么糟糕？” Intech Automation Intelligence, 2021年4月。
- ² Brian Graney和Ken Starry. “滚动元件轴承分析。” 材料评估, 第70卷, 第78-85页, 2011年。
- ³ “电涡流原理NCDT。” Micro-Epsilon。
- ⁴ Bjorn Ryden. “使用振动传感器进行预测性维护。” TE Connectivity, 2021年。
- ⁵ “低频机器监控：测量考虑。” Wilcoxon Sensing Technologies。
- ⁶ R. Keith Mobley. 预测性维护简介。Butterworth-Heinemann, 2002年。
- ⁷ “解锁性能。” IndustryWeek and Emerson。
- ⁸ Olav Vaag Thorsen和Magnus Dalva. “海洋石油、石化、天然气接收站和炼油厂中的感应电机的故障调查。” IEEE石油与化工业技术会议论文集(PCIC '94), 1994年。

作者简介

Richard Anslow是ADI公司自动化与能源业务部互连运动和机器人团队的系统应用工程师。他的专长领域是基于状态的监测和工业通信设计。他拥有爱尔兰利默里克大学颁发的工程学士学位和工程硕士学位。联系方式: richard.anslow@analog.com。

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

