

选择最合适的预测性维护传感器

Chris Murphy, 应用工程师

简介

基于状态的监控(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)涉及使用CbM、机器学习和分析等的技术组合来预测即将发生的机器或资产故障。在监测机器的健康状况时,需选择最合适的传感器,以确保能够检测、诊断甚至预测故障,这点至关重要。目前有许多传感器被用于检测旋转机器及其负载中的故障,从而避免意外停机。由于许多旋转机器(电机、齿轮、泵和涡轮机)以及非旋转机器(阀门、断路器和电缆)监控都用到了PdM技术,所以很难对每个传感器进行排序。

许多工业电机被设计为可以在连续生产应用中运行20年,例如化学/食品加工厂和发电设施,但有些电机无法达到预期的使用寿命。¹这可能是由于电机运行量不足、维护程序的数量不足、缺乏对PdM系统的投资,或者根本没有PdM系统。PdM使维护团队能够安排维修时间,避免造成意外停机。通过PdM提早预测机器故障也可以帮助维护工程师确认和修复运行效率低下的电机,从而提高性能、生产力、资产可用性和使用寿命。

最佳的PdM策略是:有效利用尽可能多的技术和传感器来提早检测故障,且检测结果高度可信,如此则无需使用一刀切式的传感器解决方案。本文尝试阐明为什么预测性维护传感器对于提早检测PdM应用中的故障至关重要,以及它们有哪些优缺点。

系统故障时间线

图1显示了从安装新电机到电机发生故障期间发生的事件的时间表,以及推荐使用的预测性维护传感器类型。安装新电机时,电机提供保修。几年后,保修期将满,此时会更加频繁地执行手动检查。

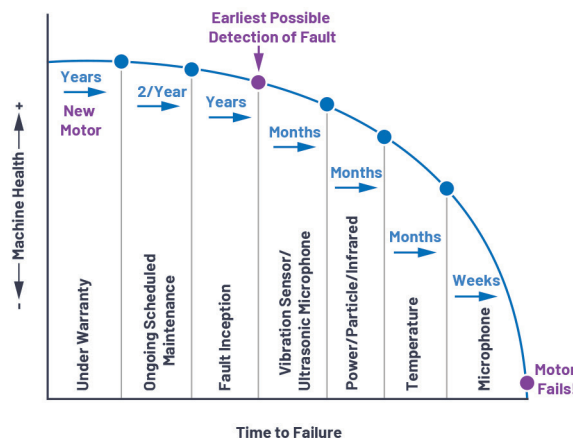


图1. 机器健康状况与时间。

如果故障发生在两次定期维护检查之间,则很可能导致意外停机。在这种情况下,至关重要是使用合适的预测性维护传感器来尽可能提早检测潜在故障,所以,本文将着重介绍振动和声学传感器。振动分析通常被认为是使用PdM的最佳起点。²

预测性维护传感器

有些传感器能够比其他传感器更早地检测某些故障,例如轴承损坏,如图1所示。在这一节中,我们将讨论常用于尽可能提早检测故障的传感器,一般是加速度计和麦克风。表1显示传感器规格列表,以及它们可以检测到的一些故障。大多数PdM系统只使用其中一些传感器,因此必须确保除了使用合适的传感器来检测这些潜在的关键故障之外,还要深入了解这些故障。

表1. 常用于实施CbM的传感器

测量	传感器	重要信息	目标故障
振动	压电式加速度计	低噪声、频率高达30 kHz、在CbM应用中广泛使用	轴承状态、齿轮啮合、泵气蚀、未对准、不平衡、负载条件
振动	MEMS加速度计	低成本/功率/尺寸、频率高达20 kHz+	轴承状态、齿轮啮合、泵气蚀、未对准、不平衡、负载条件
声压	麦克风	低成本/功率/尺寸、频率高达20 kHz	轴承状态、齿轮啮合、泵气蚀、未对准、不平衡、负载条件
声压	超声麦克风	低成本/功率/尺寸、频率高达100 kHz	压力泄漏、轴承状态、齿轮啮合、泵气蚀、未对准、不平衡
电机电流	分流、电流变压器	低成本、非侵入性、通常在电机供电时测量	偏心转子、绕组问题、转子条问题、供电不平衡、轴承问题
磁场	霍尔、磁力计、搜索线圈	低成本/尺寸、频率高达250 Hz、在温度范围内保持稳定	转子条、端环问题
温度	红外热成像	一次性配备成本高昂、精准的多项资产/热源	由于摩擦、负载变化、过度启停、供电不足等造成的热源位置变化
温度	RTD、热电偶、数字	低成本、小尺寸、准确	由于摩擦、负载变化、过度启停、供电不足等造成的温度变化
油品质量	颗粒监测器	粘度、颗粒和污染	检测磨损碎片

传感器和系统故障注意事项

工业和商业应用中超过90%的旋转机器都使用滚动轴承。³电机的故障部件分布如图2所示，从中可以清楚看到，在选择PdM传感器时，需要特别关注轴承监测。为了检测、诊断和预测潜在故障，振动传感器必须具有低噪声和宽带宽。

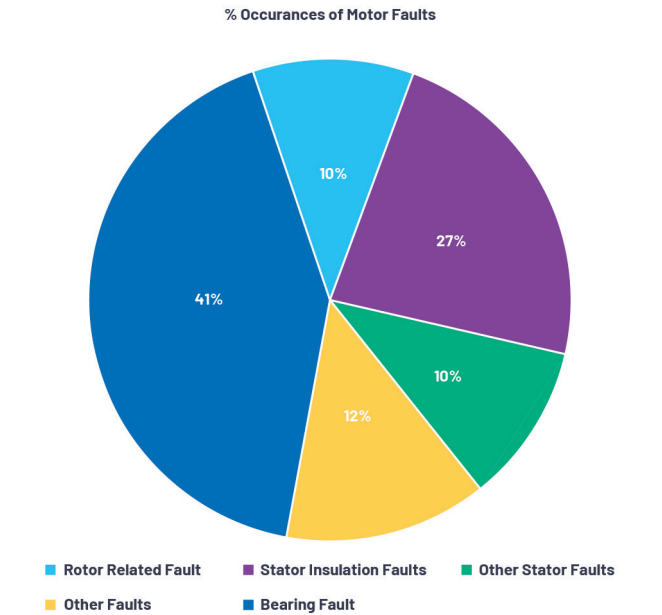


图2. 电机部件出现故障的百分率。⁴

表2显示与旋转机器相关的部分常见故障，以及一些用于PdM应用的相应振动传感器要求。为了尽早发现故障，PdM系统通常需要使用高性能传感器。资产中使用的预测性维护传感器的性能水平与在整个流程中持续可靠运行的资产的重要性相关，而不是与资产本身的成本相关。

表2. 机器故障和振动传感器注意事项概述

传感器要求	常见的机器故障			
	不平衡	未对准	轴承缺陷	齿轮缺陷
低至中等噪声 >100 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	✓	✓		
低噪声 <100 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$			✓	✓
带宽: 5×至10×基频	✓	✓		
带宽: >5 kHz			✓	✓
多轴检测	✓	✓		
对转动缓慢的机器的低频响应	✓			
较高的g范围			✓	

根据电机振动或移动（峰值、峰峰值和rms）期间的能量，我们可以确定机器是否不平衡或未对准等。有些故障（例如轴承或齿轮缺陷）不是很明显，特别是在早期，不能单单通过增加振动频率来识别或预测。解决这些故障通常需要将具备低噪声 (<100 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)和宽带宽(>5 kHz)的高性能预测性维护振动传感器与高性能信号链、处理、收发器和后处理器配对。⁵

用于PdM的振动、声波和超声波传感器

微机电系统(MEMS)麦克风的PCB上包含一个MEMS元件，通常采用金属外壳，顶部或底部端口中可以包含声压波。MEMS麦克风提供低成本、小尺寸且有效的方法来检测机器故障，例如轴承状况、齿轮啮合、泵气蚀、未对准和不平衡。这使得MEMS麦克风成为电池供电应用的理想选择。它们可以放置在距离噪声源较远的位置，且不会侵入。当多个资产同时运行时，麦克风的性能可能会受到来自其他机器的噪声或环境因素（例如灰尘或湿度进入麦克风的端口孔）的影响。大多数MEMS麦克风数据手册仍然列出相对良性的应用，例如移动终端、笔记本电脑、游戏设备和相机等。有些MEMS麦克风数据手册将振动检测或PdM列为潜在应用，但它们也提到，易受机器冲击和搬运不当影响的传感器可能对产品造成永久损坏。其他MEMS麦克风数据手册表明，机械冲击耐受力高达10,000 g。目前还不清楚这些传感器是否适合在可能存在冲击的严苛操作环境中运行。

MEMS超声波麦克风分析让我们能够在噪声增大的情况下监测复杂资产中的电机的健康状况，这是因为它能听到非音频频谱（20 kHz至100 kHz）内的声音，在这个频谱下，噪声要少得多。低频声音信号的波长一般约在1.7厘米到17米之间。高频信号的波长约在0.3厘米到1.6厘米之间。当波长的频率增加时，能量相应增加，使得超声波更具方向性。在试图找出轴承或外壳中的故障时，这非常有用。

表3. 预测性维护传感器的性能规格

传感器	成本 (千片订量 报价)	3 dB带宽	DC 响应	噪声/SNR	无线CbM的 潜在电池寿命	自测
压电 加速度计	\$25 - \$500+	2.5 kHz - 30 kHz+	否	<1 µg/√Hz - 50 µg/√Hz	短到中等	否
MEMS 加速度计	\$10 - \$30*	3 kHz - 20 kHz+	是	<25 µg/√Hz - 100 µg/√Hz	中等到长	是
MEMS 麦克风	<\$1 - \$2	20 kHz	否	57 dB - 74 dB	长	否
MEMS 超声	<\$1 - \$2	100 kHz	否	65 dB	长	否

*MEMS加速度计模块的价格可能超过30美元，但它们是完整的系统解决方案，而提到的所有其他器件都只是传感器。

**重点：最差、中等、最好

加速度计是最常用的振动传感器，振动分析是最常用的PdM技术，主要用于涡轮机、泵、电机和齿轮箱等大型旋转设备中。表3和表4显示在选择高性能MEMS振动和声学传感器，以及典型压电振动传感器时需要考虑的一些关键规格。每一列中的数据代表该类别的最小/最大差异值，与相邻列无关。

CbM行业有望在未来五年内实现显著增长，其中很大部分增长是受无线安装推动。⁶由于尺寸、缺乏集成功能和功耗等原因，压电式加速度计不太适合无线CbM系统，但是存在典型功耗在0.2 mA至0.5 mA的解决方案。MEMS加速度计和麦克风非常适合电池供电的PdM系统，因为它们体积小、功耗低、性能高。

所有传感器都具有合适的带宽和低噪声，但MEMS加速度计是唯一能够提供直流响应的传感器，可以在非常低的转速下检测不平衡和倾斜。MEMS加速度计还具备自测功能，可以验证传感器100%可用。这在安全关键型安装中可能会很有用，因为在这些安装中，可以通过验证传感器是否仍在工作来更简单地达到系统标准。

可以完全密封采用陶瓷封装的MEMS加速度计和采用机械封装的压电式加速度计，以在严苛、脏污的环境中使用。表4主要列出传感器的物理、机械和环境性能。从中可以看出每个传感器之间的关键差异，例如集成、恶劣环境耐受能力、机械性能，以及连接到旋转机器或装置的能力。

表4. 预测性维护传感器的机械规格

传感器	尺寸	轴数	振动机械封装	工业标准接口	集成功能	机械连接	环境耐受度
压电式加速度计	中等	1-3	是	是	否	是	极佳
MEMS加速度计	小/中等*	1-3	是	是	是	是	极佳
MEMS麦克风	小	1	否	否	否	非接触式	良好
MEMS超声波	小	1	否	否	否	非接触式	良好

*MEMS模块通常包含ADC、处理器和根据传感器调谐的滤波，以优化性能，并节省信号链对空间的需求。

**重点：最差、中等、最好

在三个轴上检测振动数据可以提供更多诊断见解，实现更精准的故障检测。虽然并非所有PdM安装都需要如此，但这是压电和MEMS加速度计在数据质量、布线和空间节省方面的明显优势。

当长时间暴露在湿度增加的环境下时，MEMS麦克风显示出高达-8dB的失真。⁷虽然这不是一个明显缺点，但如果您是在高湿度严苛环境下使用PdM应用，则值得考虑。在这种情况下，驻极体电容麦克风(ECM)比MEMS麦克风更具优势。其他影响麦克风性能的环境因素还有：风、气压、电磁场和机械震动。⁸

在良好的环境中，MEMS麦克风在PdM应用中提供出色性能。目前，还缺乏将MEMS麦克风安装到存在高振动、脏污或高湿度的严苛操作环境中的相关信息。振动会影响MEMS麦克风的性能，这是一个需要考虑的问题；但是，它们的振动灵敏度低于ECM。⁹如果无线PdM解决方案将使用MEMS麦克风，安装盒上需要有一个孔或端口，以便声音信号到达传感器，这进一步增加了设计的复杂性，且让其他电子元件更易脏污或受潮。

电容式MEMS加速度计技术的最新进展使得小型、低成本、低功耗无线CbM解决方案可以用在不太重要的资产中，因此能够实现更深入地诊断洞察，以便实施管理和保持关键系统正常运行。这些进展也使得MEMS加速度计在用于更加传统的有线CbM系统中时，性能更接近压电式加速度计。压电式加速度计具有如此低的噪声和宽带宽，加上与工业标准连接（ICP和IEPE）耦合，几十年来一直是实施振动测量的典型传感器。MEMS加速度计已经调整为可以和IEPE标准模块连接，如图3所示。该转换电路以Circuits from the Lab®参考设计为基础。该电路是基于一种特殊的PCB进行设计，这种PCB可以在宽频带上工作，以在后期设计成一个机械模块。

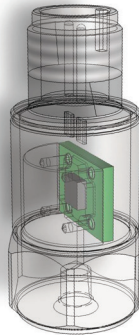


图3. MEMS加速度计、IEPE参考、PCB设计允许在IEPE机械模块中改进ADXL100x系列CbM加速度计。注：ADI公司不生产IEPE机械模块。

图4所示的设备包含三个单轴MEMS加速度计、三个ADC、一个处理器、内存和算法，这些都集成在一个机械模块中，共振超过50 kHz。这突出显示了MEMS加速度计在传感器节点上集成智能的能力，确保传感器与相应的信号链和处理功能配对，以实现出色性能。此模块可以执行FFT，触发各种时域或频域报警，并生成域静力，这对算法或机器学习工具能否预测故障至关重要。

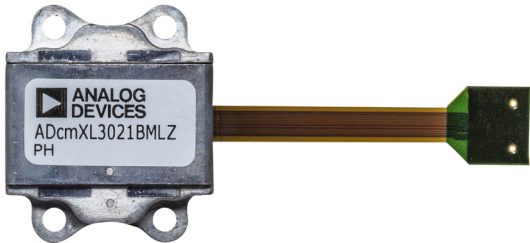


图4. 三轴MEMS CbM模块，集成了ADC、处理器、FFT、统计数据，以及机械封装，谐振频率超过50 kHz。

在为PdM解决方案选择合适的振动传感器时，真正的挑战在于配对传感器，以匹配资产最可能出现的故障模式。目前还未能证实MEMS麦克风足够坚固，能够在恶劣环境中可靠地检测所有基于振动的故障模式，而振动检测和加速计的行业标准已经成功实施并可靠地执行了几十年。已经证明MEMS超声波麦克风能够比加速度计更早地检测轴承故障，这种潜在的共生关系可以为您提供理想的PdM解决方案，以满足您未来对资产实施振动分析的需求。

虽然难以推荐在PdM系统中使用哪种振动传感器比较好，但是可以使用已经成功应用并不断改进的加速度计。ADI公司提供一系列MEMS加速度计，从通用、低功耗、低噪声、高稳定性和高g，一直到智能终端节点模块，如图4所示。ADcmXL3021是一个专用PdM模块解决方案示例。ADI公司率先推出了支持PdM的MEMS加速度计系列（20 kHz+带宽、25 µg/√Hz噪声密度），且仍是少数能够提供如此高性能的MEMS加速度计的提供商之一。ADI公司继续在传感器、信号链解决方案、机械模块、平台、机器学习算法、人工智能软件平台和整体系统解决方案等领域处于领先地位，支持在挑战性环境中对工业旋转机器实施预测性维护。

如需更多信息，请访问analog.com/CbM或联系CIC.EMEA@analog.com。

参考

¹Leslie Langnau。 “传感器帮助您充分利用您的电机。” *Machine Design*，2000年9月。

²Bram Corne、Bram Vervisch、Colin Debruyne、Jos Knockaert、Jan Desmet。 “比较MCSA和振动分析，以检测轴承故障——案例研究。” 2015年IEEE国际电机与驱动会议(IEMDC)，IEEE，2015年5月。

³Brian P. Graney、Ken Starry。 “滚动元件轴承分析。” *Materials Evaluation*，第70卷第1期，The American Society for Nondestructive Testing, Inc.，2012年1月。

⁴Pratyay Konar、R. Bandyopadhyay、Paramita Chattopadhyay。 “使用子波网络和神经网络检测感应电机的轴承故障。” 第四届印度人工智能国际会议论文集，IICA 2009，Tumkur，印度卡纳塔克邦，2009年12月。

⁵Pete Sopcik、Dara O'Sullivan。 “传感器性能如何支持状态监控解决方案。” 《模拟对话》，第53卷，2019年6月。

⁶按产品（硬件、软件）、监测流程（在线、便携）、部署、行业（油气、发电、金属和采矿、水和废水、汽车），以及区域划分的电机监测市场——至2023年的全球预测。Research and Markets，2019年2月。

⁷Pradeep Lall、Amrit Abrol、David Locker。 “持续暴露在温度和湿度环境下对MEMS麦克风的可靠性和性能的影响。” ASME 2017年度关于封装和集成电子和光子微系统的国际技术会议和展览，2017年9月。

⁸Marcel Janda、Ondrej Vitek、Vitezslav Hajek。 《感应电机：建模和控制》。InTech，2012年11月。

⁹Muhammad Ali Shah、Ibrar Ali Shah、Duck-Gyu Lee、Shin Hur。 “设计MEMS麦克风，实现更高性能的方法。” *Journal of Sensors*，第1卷，2019年3月。

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。他拥有电子研究工程硕士学位和计算机工程学士学位。联系方式：christopher.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



世健系统(香港)有限公司
世健国际贸易(上海)有限公司

www.excelpoint.com.cn
info@excelpoint.com.hk

香港 +852 2503 2212
成都 +86 28 8652 7611
济南 +86 531 8096 5769
深圳 +86 755 8364 0166
西安 +86 29 8765 1058
合肥 +86 155 5513 8919
无锡 +86 150 6181 5662

上海 +86 21 2220 3188
福州 +86 591 8335 7003
南京 +86 25 8689 3130
苏州 +86 512 6530 8103
重庆 +86 136 2830 7074
惠州 +86 136 8076 4680
烟台 +86 155 5222 0532

北京 +86 10 6580 2113
广州 +86 20 3893 9561
宁波 +86 574 8386 5759
武汉 +86 27 8769 0883
大连 +86 156 4083 6155
沈阳 +86 156 0405 4122
郑州 +86 138 0384 6359

长沙 +86 731 8892 5495
杭州 +86 571 8528 2185
青岛 +86 532 8502 6539
厦门 +86 592 504 2386
东莞 +86 158 8963 8656
天津 +86 139 2065 6573
珠海 +86 137 2622 4480