

如何为无线状态监控系统 选择最佳MEMS传感器—— 第一部分

Chris Murphy, 应用工程师
Richard Anslow, 系统应用工程师

本系列文章的第一部分将讨论选择用于恶劣RF环境的合适MEMS传感器和无线收发器的一些设计考虑因素。本文将介绍Voyager平台，这是一款稳健型低功耗无线网络振动监控平台，它让设计人员能够将无线解决方案快速部署到机器或测试设置中。本系列文章的第二部分将讨论Voyager可以检测的各种故障，例如不平衡、未对准和轴承缺陷。本系列文章的第三部分继续关注Voyager，将会详细讨论其实际功耗性能，以及多种不同工作模式——既有较高数据速率模式，也有超低功耗模式。

简介

MEMS加速度计的性能最近已经发展到可以与普遍存在的压电振动传感器竞争的程度。MEMS振动传感器的关键优势包括更低功耗、更小尺寸、更高集成度、宽带宽以及低于100 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的噪声水平等，对于维护和设施工程师而言，这意味着可以通过全新的状态监控(CbM)范式检测、诊断、预测并最终避免机器故障。MEMS加速度计的功耗非常低，因此现在可以用无线解决方案代替有线系统，用小巧轻便的三轴模拟器件取代单轴笨重的压电传感器，越来越广泛的机器现在可以用经济高效的方式连续监控。

状态监控的趋势

全球有数以百万计的电动机在持续运行，消耗全世界大约45%的电力¹。在这些电动机中，最重要的一些电动机可能会受到有线状态监控系统的监控。根据一项研究，接受调查的公司中有82%曾经历过计划外维护，成本最高达到每小时250,000美元。对于那些经历过计划外停机的公司，基于两次停机事件的平均值，停机平均持续4小时，平均损失为200万美元²。

另一项研究发现，70%的公司不知道资产何时需要进行维护或升级工作。缺乏意识加上停机成本，推动公司走向数字化，大约50%的公司计划投资于数字孪生和人工智能(AI)³。随着工业4.0运动的大规模开展，企业组织积极研究工业版图的数字化，以此提高生产力和效率。

该运动的一个关键方面是向无线传感器系统发展的趋势。未来几年，状态监控行业将出现显著增长，其中无线安装将占到增长的很大一部分⁴。据估计，到2030年，全球制造业将部署近50亿个无线模块⁵。众所周知，最关键资产需要有线状态监控系统，但当前部署的所有其他资产呢？对于一些老旧设施，安装有线解决方案是不可行的，这就增加了对无线状态监控解决方案的需求。

状态监控系统的安装和维护

有线状态监控系统在性能、可靠性、速度和安全性方面非常出色，因此部署在最关键的资产上。由于这些优势，有线系统仍然更有可能部署在新建设施上。安装有线状态监控系统时，工厂车间可能不得到处布设线缆，这可能很困难，尤其是当某些机器不能受到干扰时。工业有线传感器网络通常使用200英尺(60 m)线缆，单条布设的成本从3000美元到20,000美元不等，包括材料和人工费用⁶。某些情况下需要线束，这会增加额外的复杂性，安装可能很耗时。如果电缆通过现有基础设施布设，那么在受损或需要升级的时候，可能无法更换或重新布线。

虽然无线系统初看起来可能更昂贵，但更简单的维护程序加上易于扩展的能力，可以显著节省状态监控系统全生命周期的成本。维护路线更少，布线和相关硬件也更少，这些都能节省成本。根据所需的报告级别不同，电池最长可以使用数年。如果可以部署基于能量采集的无线系统，那么维护将变得更容易，而且成本更低。选择无线系统后，下一个要关注的方面是哪种技术最适合您的状态监控应用？

无线传感器网络比较

无线网络尽管已经部署了数十年，但直到最近才在工厂车间广泛部署，这要感谢低功耗技术的进步以及无线网络对恶劣RF干扰的耐受力的提高。本节讨论各种网格网络的优点。

网络技术

有多种常见技术可用于创建低功耗、低数据速率网络，例如 Bluetooth® Low Energy、Zigbee和6LoWPAN。如果您想开发一个传输数据量相对较低、传输距离较短的密集无线传感器节点集群（比如工厂车间就需要这样的节点集群），那么这些低数据网络或多对多网络技术会是不错的选择。

网格网络可用于基础设施节点并相互无线连接，如图1所示。如果两个特定节点之间的通信链路受到干扰或噪声的影响，这些节点可以互相帮助，扩展无线电信号，甚至可以将信号重新路由。网格技术最重要的特性之一是能够通过网络中的其他微尘将数据从一个微尘发送到另一个微尘，从而能够创建一个覆盖大面积的大型互连设备网络，而消耗的功率则非常少。例如，在图1中，微尘1和微尘3之间的距离很长，因此它们不能直接通信。但是，在微尘1和微尘3之间不存在直接链路的情况下，微尘1可以通过微尘2向微尘3传输数据。

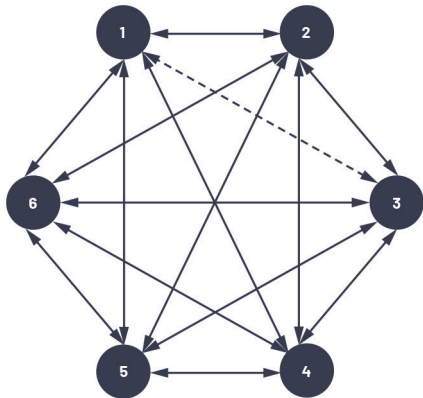


图1. 展示多对多通信的网格网络中的微尘集群示例

图2显示了一个工厂车间示例，其中微尘1测量一台电机的振动。此数据需要传输到微尘6，但其间的距离超出了收发器的能力。数据直接从微尘1传输到微尘6的话，需要更高的发射功率和更高的接收器灵敏度。更高的发射功率一般意味着峰值电流消耗更高，因而需要更大的电池。若使用网格网络，此数据可以沿着微尘1到微尘6之间的每个微尘跳过去，最终到达目的地。每个设备在较小范围内传输所需的功率，远小于在整个工厂车间形成更长的直接无线链路所需的功率。

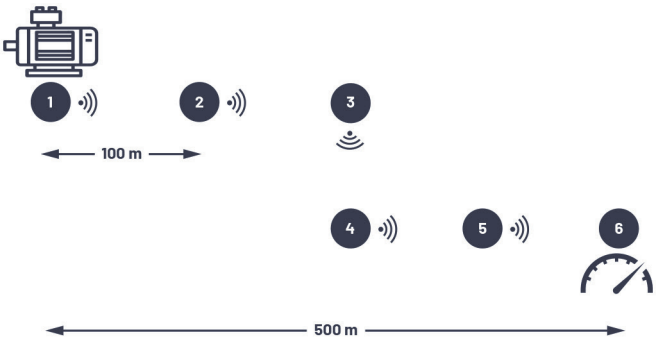


图2. 在工厂车间实施的网格网络，展示了数据跳跃

网格网络的主要优点如下：

- ▶ 自主配置：随着工业4.0成为现实，以及企业数字化程度的提高，工厂经理必须寻求更好的性能。这种探索的一个重要方面是要能在较小的地理位置添加高密度的无线设备集群，同时保持高度可靠的性能——在某些情况下几乎与有线系统一样好，而且几乎不需要手动配置，因为微尘可以自行配置。
- ▶ 自愈：网格网络在不断路由数据，因此不断受到来自工厂车间的噪声、干扰、多路径、衰落反射等的干扰。SmartMesh® IP系统（管理器和节点）持续监测每个节点的噪声水平并共享此数据，以便重新路由信号，使其远离可能存在高噪声的路径。
- ▶ 覆盖范围：只需添加或删除微尘，即可轻松调整网络的大小。如图2所示，覆盖面积可以轻松扩展，而无线设备无需增加功耗。

表1总结了各种网格技术及其能力。

表1. 不同网格网络的比较

特性	Wi-Fi	BLE	Zigbee	基于6LoWPAN的网格
电源	数小时	数月	数月/数年	数年
节点	32	32,767	64,000	100/50,000
范围(P2P)	100 m	10 m	最长300 m	最长300 m
数据速率	11 Mbps至300 Mbps	1 Mbps	250 kbps	250 kbps
信道跳频	✗	✗	✗	✓
碰撞缓解	✗	✗	✗	✓
自愈	✓	✓	✓	✓
99.999%可靠性	✗	✗	✗	✓

其他低功耗无线技术

LoRa或LoRaWAN可以实现远距离（长达6英里）的低数据速率通信，同时消耗的功率非常低。它基于各种频段，并实现了点对点通信。因此，对于低功耗、长距离的点对点通信，这些解决方案很理想。NB-IoT或蜂窝网络的实施成本更高、更复杂，功耗高于网格技术，而传输的数据量却更小。但是，它确实提供高质量的蜂窝服务和对云的直接访问。如果您的无线解决方案需要长距离蜂窝接入以及比Zigbee高的数据速率，那么LTE-M可能值得考虑。

MEMS取代压电振动传感器的演变

直到最近，在检测关键资产和旋转机械的早期振动故障特征方面，MEMS传感器还不足以与IEPE振动传感器竞争，如图3所示。MEMS传感器的主要限制在于噪声、带宽和g范围。低噪声是检测低水平振动以实现更早的故障检测甚至预测的关键。带宽很重要，因为许多资产/电机故障，如气穴现象、轴承问题和齿轮啮合等，最早常常发生在5 kHz以上的频率，当然时间对于检测故障至关重要。g范围也很重要，因为较大的资产可以产生高达数百g的冲击或撞击，这可能会破坏专为不太苛刻的操作而设计的MEMS传感器。

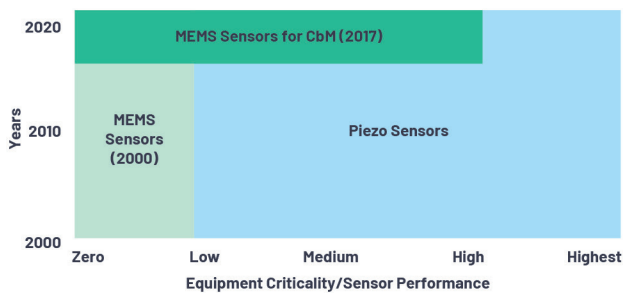


图3. 用于状态监控应用的MEMS性能的演变

从历史上看，大多数MEMS传感器是为多种应用而设计的，因此通常不会有多个特定于应用的特性，但状态监控至少需要三个特性。汽车碰撞检测MEMS传感器是具备高级特性且特定于应用的单一部件的一个很好的例子。此类传感器被设计为具有高 g 范围，但带宽和/或噪声性能不足以用于状态监控和其他许多应用。开发适用于状态监控应用的MEMS传感器非常困难，这就是迄今为止成功的供应商很少的原因。

为了突出展现用于状态监控的MEMS性能的这些进步，我们对2010年和2017年发布的两款单轴模拟输出MEMS振动传感器进行了比较，如表2所示。两款MEMS加速度计均设计用于状态监控应用中的振动检测。这两款传感器的带宽都相当高，但噪声改进最为显著，以至于MEMS传感器现在可以与压电IEPE振动传感器竞争。

表2. 用于状态监控的第一代和第二代MEMS传感器的比较

规格	2010 ADXL001	2017 ADXL100x	改善
轴数	1	1	—
g 范围	$\pm 70/\pm 250/\pm 500$	± 50 至500	—
带宽(kHz)	10	11	—
谐振(kHz)	22	21	—
噪声密度	4 mg/ $\sqrt{\text{Hz}}$	25 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	160×
跨轴灵敏度	2%	1%	2×
温度范围	-40°C至+125°C	-40°C至+125°C	—
功耗(mA)	2.5	1	2.5×
待机电流(mA)	—	0.225	—

一些高性能工业三轴MEMS传感器上也实现了这种噪声改善，如表3所示。这些传感器并非专门为振动检测而设计，但它们是性能高超的MEMS传感器，能够在全带宽下检测到低于1 mg rms的振动。再加上出色的稳定性和可靠性，这些传感器已被证明在

各种机械的状态监控应用中非常有效，无论是用作唯一的振动传感器，还是与其他宽带宽MEMS/IEPE传感器搭配使用。超低噪声、窄带宽(<5 kHz) MEMS传感器在检测许多资产的振动方面可以发挥关键作用，通常用在低转速和亚赫兹的情况下，或用在直流响应有利的情况下，例如纸张/工厂加工、食品/制药、风力发电、金属加工业。表3突出展现了多轴MEMS传感器性能从2009年到2017年的改善。应该注意的是，为了实现更宽的带宽、更低的噪声和更高的 g 范围，待机电流等规格相比更通用的MEMS传感器会更高。

表3. MEMS三轴传感器性能的改善

规格	2009 ADXL345	2017 ADXL356	改善
轴数	3	3	—
g 范围	2/4/6/8/16	± 40	2.5×
带宽(kHz)	1.6	2至3	1.25×至2×
谐振(kHz)	5.5	5.5	—
噪声密度	3 mg/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 3.9 mg/ $\sqrt{\text{Hz}}$	80 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	37×至49×
跨轴灵敏度	1%	1%	—
温度范围	-40°C至+85°C	-40°C至+125°C	25%×
功耗(μA)	140	150	~
待机电流(μA)	0.1	21	210×

状态监控系统通常使用什么级别的振动传感器？

计划外停机会导致损失大量收入的公司继续依赖有线解决方案，它们基于12位至20位分辨率传感器，可提供最为可靠和精确的性能。此外，有线安装的较高成本也很容易被证明是合理的。对于重要性较低的资产，性能要求并不那么严格，资本支出上限可能要低得多。10位至16位的振动传感器分辨率是可以接受的，这是当今大多数基于MEMS的无线状态监控系统所涵盖的范围。

重要性较低的资产对高性能振动检测也有需求，随着工业公司寻求数字化并加强其改善性能、生产和效率的努力，这种趋势会继续增长。从历史上看，成本一直是限制在重要性较低的资产上使用压电振动传感器的因素，但随着越来越多的设计人员意识到MEMS传感器在此类情况下可以提供的价值和灵活性，这一状况现已开始改变。图4显示了从10位到24位的潜在振动传感器分辨率。尽管MEMS的分辨率明显较低，但性价比优势很有吸引力，足以监控中低重要性的资产提供合理性。

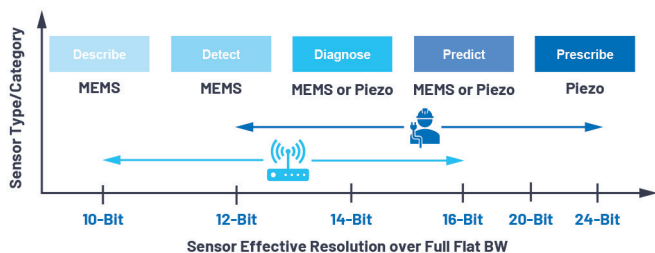


图4. 传感器类型和相应的分辨率

MEMS传感器的主要优势之一是低功耗，通常在 μA 范围内，甚至 nA 范围也是可能的。这使得它们非常适合于无线状态监控应用。有些压电传感器的功耗低至 $200\ \mu\text{A}$ 左右，但它们缺乏集成特性，而且与MEMS相比价格昂贵。确实存在一些基于压电传感器的专用无线振动传感器，它们可以在高达 $104\ \text{kHz}$ 的采样速率下提供24位分辨率，但与MEMS解决方案相比，电池寿命非常有限。这种无线振动传感器系统通常具有8小时的连续电池寿命。MEMS的另一个关键优势是可以将多达三个轴集成到一个小封装中。三轴压电传感器会更加昂贵、更大，并且需要更多的信号调理电路，这使得它们更不适合无线应用。

未来趋势：对新收入来源的渴望

在世界各地工厂当前部署的旋转机器中，泵占有很大的比例，预计到2025年，其全球市场将从383.4亿美元增长到469.2亿美元⁷。其中一些泵对于确保流程持续畅通无阻地运行至关重要，这就需要状态监控以避免计划外停机。这种泵的未来会怎样？根据Frost&Sullivan最近的一份报告，泵将具备分析能力并变得智能化。泵OEM的增长将由服务驱动，服务基于分析、人工智能或机器学习(ML)，旨在提供有关提高泵性能和可靠性的诊断信息。研究发现，2025年之后，泵OEM收入的60%可能是来自与服务相关的活动，泵行业将从基于产品的模式转变为基于服务的模式⁷。推动这种转变的主要因素是制造业的快速数字化(IIoT)，以及状态监控硬件和算法、人工智能、机器学习的进步。预计水/废水处理厂、炼油厂、天然气生产厂等传统重工业在寻求数字化运营时会使用这些智能泵。新建设施很可能会使用有线状态监控系统，但老旧设施上的现有设备怎么办？为了将这种基于服务的模式应用于已部署的泵和其他旋转机械，无线状态监控系统可以提供快速、无缝和可靠的解决方案。

EV-CBM-VOYAGER3-1Z无线状态监控模块

Voyager平台（如图5所示）是一款稳健型低功耗无线网格网络振动监控平台，它让设计人员能够将无线解决方案快速部署到机器或测试设置中。设计人员可以快速评估用于振动监控的ADI MEMS传感器技术，同时评估用于工业无线检测的SmartMesh IP技术。总体目标是加速客户资产监控和解决方案开发。微尘包括一个机械外壳和带有 $\frac{1}{4}$ -28行业标准螺柱附件的安装硬件。Voyager解决方案可以轻松地直接安装到电机或测试电路上。

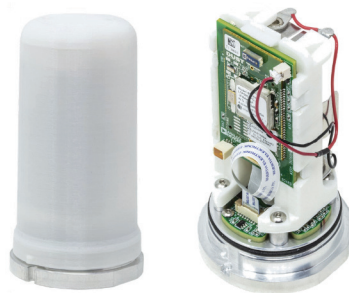


图5. Voyager无线状态监控模块

SmartMesh IP

SmartMesh IP无线传感器网络产品是IC和预认证PCB模块，带网格网络软件，使得传感器可以在恶劣的工业物联网(IIoT)环境中进行通信。它们面向IP兼容性而构建且基于6LoWPAN和802.15.4e标准。6LoWPAN由Internet Protocol第6版(IPv6)和低功耗无线个人区域网络(LoWPAN)组成，是一种基于互联网协议(IP)的网络，类似Wi-Fi。SmartMesh IP产品线支持低功耗，即使在恶劣和不断变化的RF环境中，也能提供99.999%以上的数据可靠性。

图6显示了一个高度可扩展、自成型的多跳无线节点网格网络，结合监视性能和安全性并与主机应用程序交换数据的网络管理器，它能收集和中断数据。当管理器和微尘通电后，网络会自动形成。位于管理器范围之外的微尘将通过范围内的微尘转发数据包。此外，如果节点的通信链路受到噪声干扰，可以使用另一条链路/路径以不同的工作频率重定向数据/数据包，使数据可以绕过或远离干扰源，SmartMesh IP的自愈能力或如同有线网络一样的可靠性(99.999%)正是来源于此。

Voyager套件已经过SmartMesh IP微尘跳跃测试。在此测试中，超出网络管理器范围的微尘可以跳过范围内的微尘，如图6所示。多跃点网络可确保范围外微尘能将数据传输至网络管理器。

SmartMesh IP最适合用在何处？

SmartMesh IP网络定位于工业物联网(IIoT)应用。在工厂环境中，传感器通常以集群形式部署在资产上，如图7所示。需要定期甚至连续监控的资产可以放置在工厂车间的不同位置，但在大多数情况下，它们之间的距离不会超过100 m。例如，SmartMesh IP已成功部署在数据中心中，数以千计的节点形成高密度集群。

过去，低功耗无线通信设备在应对工厂车间产生的干扰方面很吃力。这不仅是SmartMesh IP擅长的方面，而且它是专门为在密集集群中部署而设计的，这种集群需要类似有线的可靠性以及同步监控或控制。

SmartMesh IP网络使用时间同步信道跳频(TSCH)链路层进行通信，这是ADI公司SmartMesh IP团队开创的一种技术，也是WirelessHART(IEC 62591)和IEEE 802.15.4e等无线网格网络标准的基本构建模块。在TSCH网络中，网络中的所有微尘都在数微秒内同步。网络通信被组织成时隙，以实现低功耗分组交换、成对信道跳频和全

路径分集。通过使用TSCH，SmartMesh IP器件可以在计划通信之间以超低功耗休眠，从而使占空比通常小于1%。网络管理器利用TSCH确保微尘准确地知道何时通信、监听或休眠。这样就确保了网络上不会发生数据包冲突，并且每个节点的功耗都非常低——路由节点的典型功耗小于50 μ A。

SmartMesh IP网络是现有的最安全网络之一。SmartMesh IP网络中的所有流量都受到端到端加密、消息完整性检查和设备身份验证的保护。此外，SmartMesh网络管理器包含支持网络安全联接、密钥建立和密钥交换的应用程序。

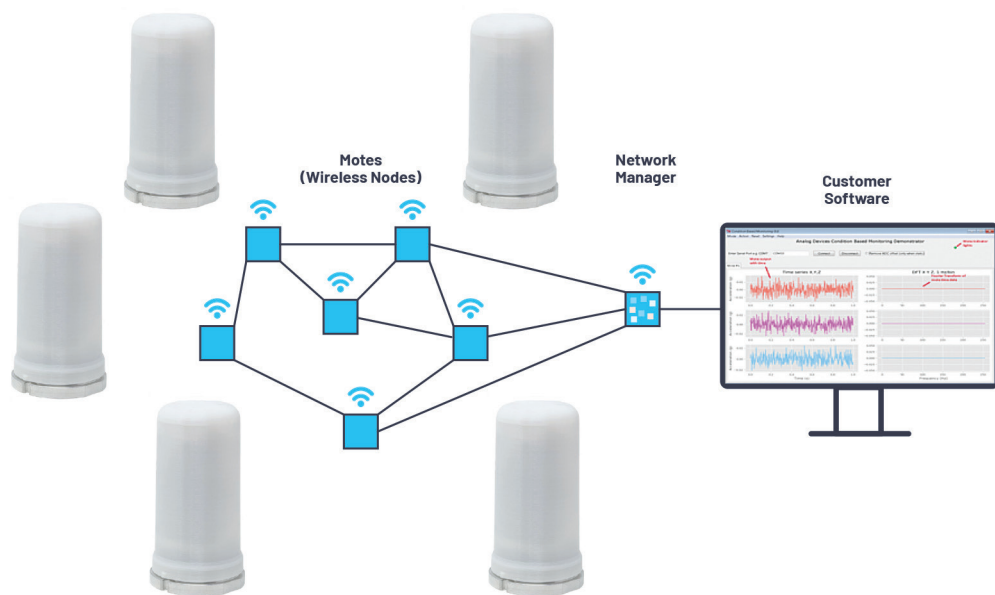


图6. SmartMesh连接

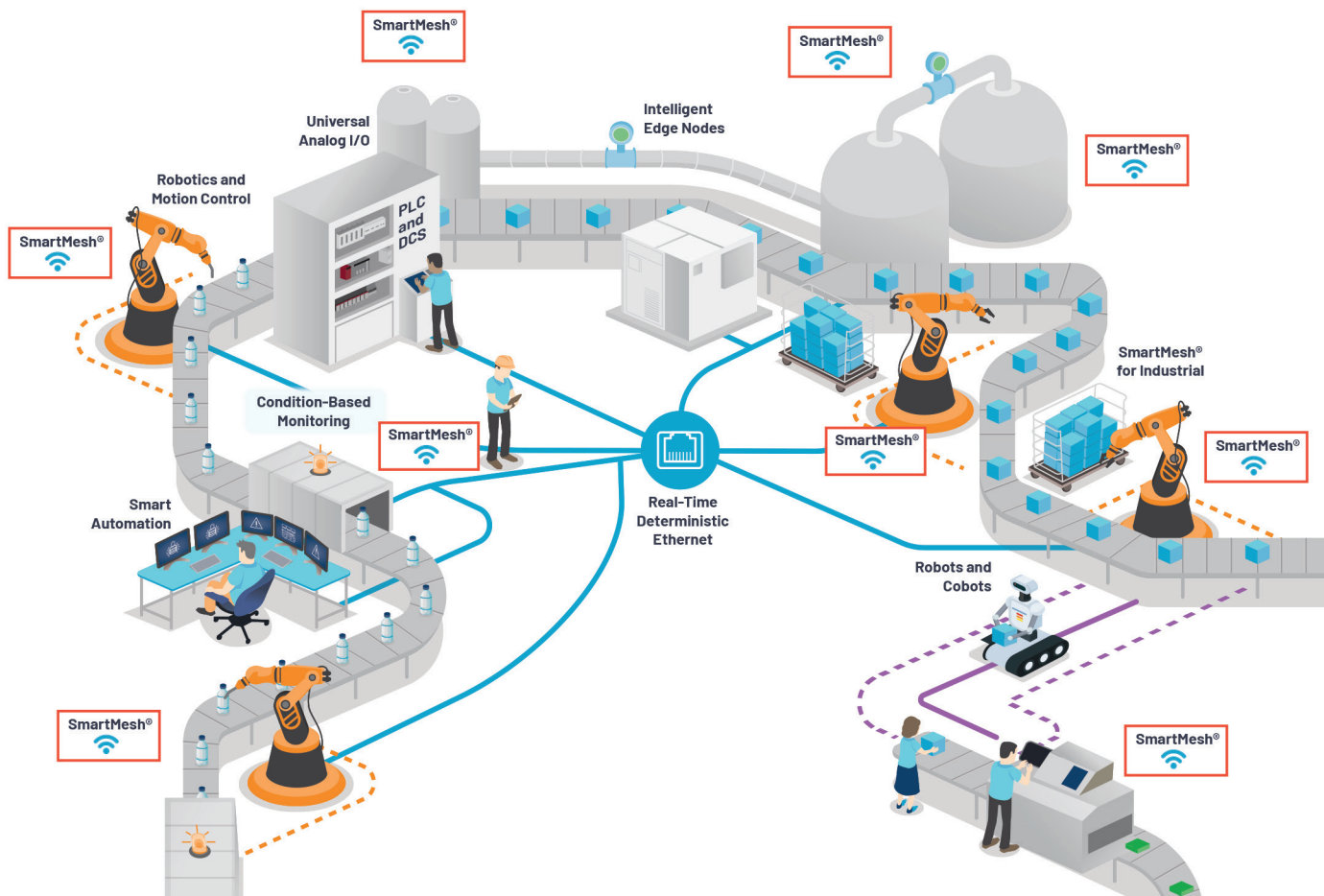


图7. 在工厂车间附近放置的高密度传感器

Voyager信号链

图8显示了无线振动监控平台的概要。它还包含一个三轴 [ADXL356](#) 振动传感器板和一个低功耗微控制器 [ADuCM4050](#)。另外还有一个鲁棒的低功耗SmartMesh IP [LTC5800](#)板和芯片天线。该套件包含一个SmartMesh IP USB加密狗，用作无线网络的网络管理器。嵌入式固件和GUI代码可在[GitHub](#)上获得。

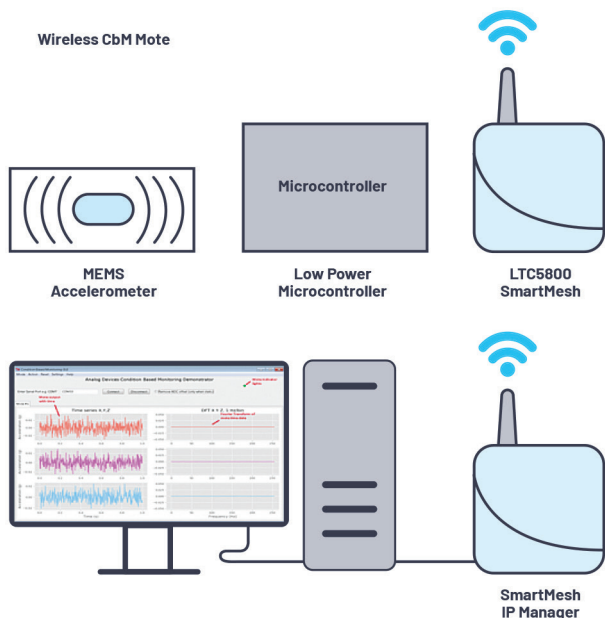


图8. Voyager硬件和GUI概览

Voyager模块的电池寿命是一个关键设计特性, 因此它选择了高性能、低功耗器件来检测、调理、处理和传输振动数据, 如图9和图10所示。

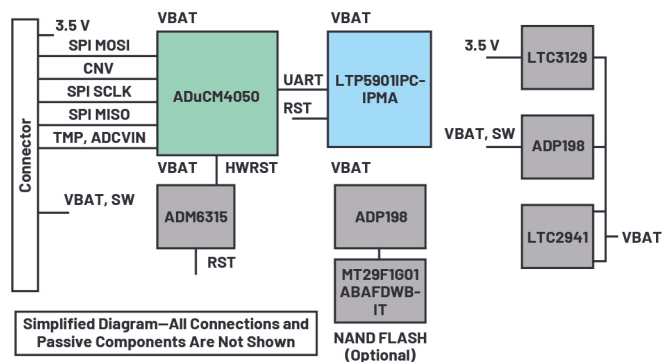


图10. ADuCM4050/SmartMesh的高级框图

Voyager信号链功耗

每个信号链器件的活动和待机功耗（取自数据手册的最差情况性能）分别如图11和图12所示。请注意，这¹不包括SmartMesh IP收发器，因为其功耗比简单的活动或待机模式功耗更微妙。信号链的实际功耗会更低。在活动模式下，ADuC4050的功耗最大，因为它以高达1.8 MSPS的速率对振动数据进行采样、滤波，然后执行DFT，再通过UART将数据发送到SmartMesh IP收发器之前。

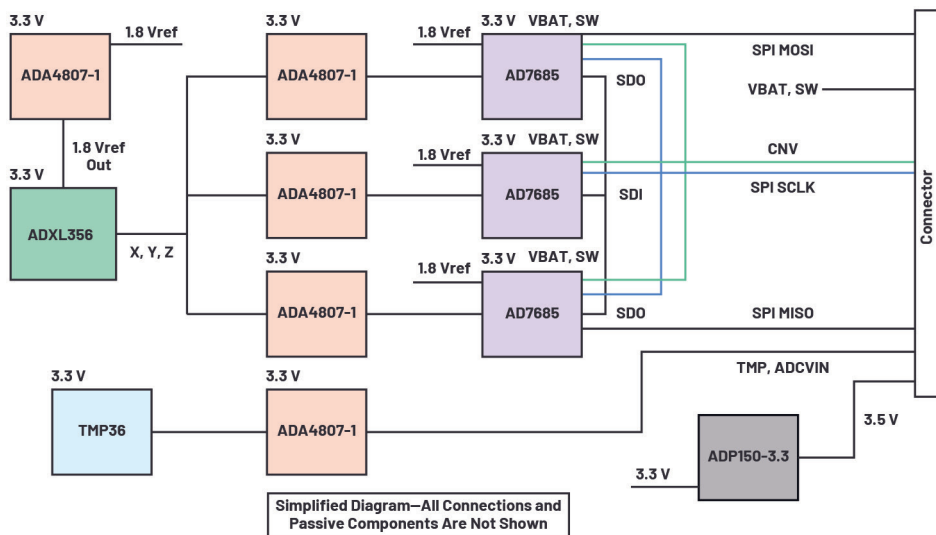


图9. ADXL356信号链的高级框图

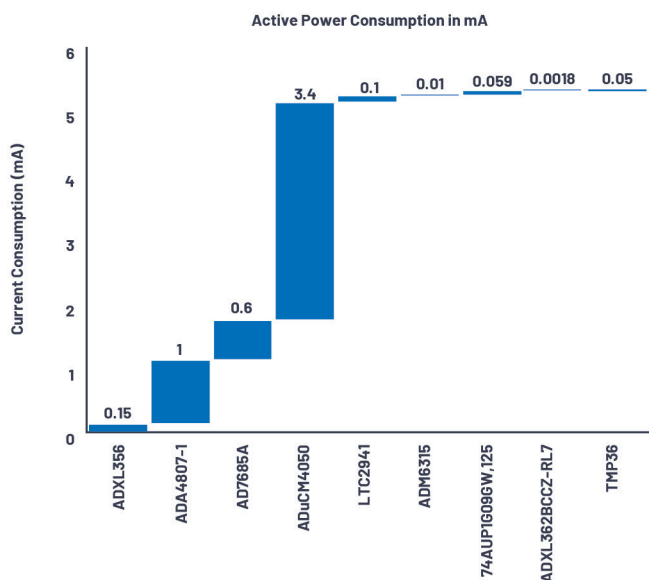


图11. 活动模式下的信号链功耗

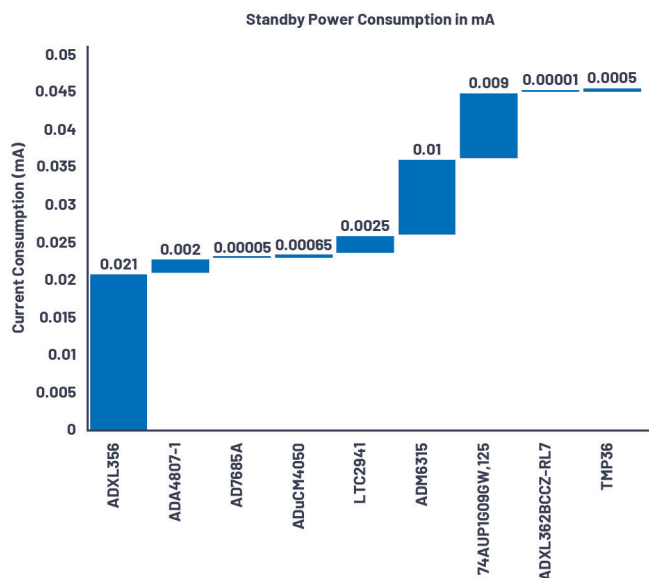


图12. 待机模式下的信号链功耗

图11和图12显示，当系统传输数据和处于待机模式时，MEMS加速度计的活动和待机电流非常重要。无论是打算运行周期监控方案（例如每6小时一次）还是运行连续监控方案，这些指标对于确保电池供电的传感器有效运行至关重要。在活动模式下，ADXL356的功耗约占信号链功耗的1.4%。与典型压电传感器相比，ADXL356的功耗要低得多。典型的压电传感器使用4 mA恒定电流和24 V至30 V电源，功耗接近100 mW。虽然有更低功耗的压电传感器可以将功耗降低90%，但它们仍然不适合长期用于电池供电的传感器网络。

在待机模式下，ADXL356消耗信号链电流的39%。这看起来很高，但为了更好地了解由此产生的噪声与功耗的性能权衡，应该对适用于状态监控应用振动检测的各种MEMS传感器进行比较和鉴定，如表4所示。

表4. 支持状态监控的MEMS加速度计的活动和待机功耗与Voyager信号链的活动和待机功耗的比较

	ADXL356	MEMS B	MEMS C1	MEMS C2	MEMS C3	MEMS C4
轴数	3	3	3	3	3	3
活动电流	150 μ A	1.3 mA	239 μ A	239 μ A	310 μ A	145 μ A
计算的信号链活动总功耗的百分比	1.40%	12.30%	2.30%	2.30%	2.93%	1.40%
待机电流(μ A)	21	16	0.5	0.5	5	0.9
计算的占信号链待机总功耗的百分比	39%	30%	0.93%	0.93%	9.30%	1.70%
g范围	± 40	± 2 、 ± 4 、 ± 8 、 ± 16	± 16	± 64	± 20	± 8 、 ± 16 、 ± 32
带宽(kHz)	1.5	6.3	4.2 (2.9)	4.2 (2.9)	8.2/8.5/5.6	8 (5.1)
噪声密度(μ g/ $\sqrt$ Hz)	80	75 (110)	130	300	675	630

图13和图14显示了活动和待机模式下MEMS传感器的电流消耗和噪声。ADXL356和MEMS C4的活动功耗最低，不过新设计不再推荐使用后者。MEMS B的活动功耗最高（比ADXL356高11.5倍），但应该注意的是，MEMS B噪声最低且带宽较宽，因此与所有MEMS C传感器相比，其性能更高。

虽然ADXL356和MEMS B的待机电流最高，但这些传感器的噪声性能比图14所示的其他器件要好1.6到9倍。电流消耗和噪声密度之间的反比关系很明显，当为电池供电的应用选择MEMS振动传感器时，应考虑这一点。

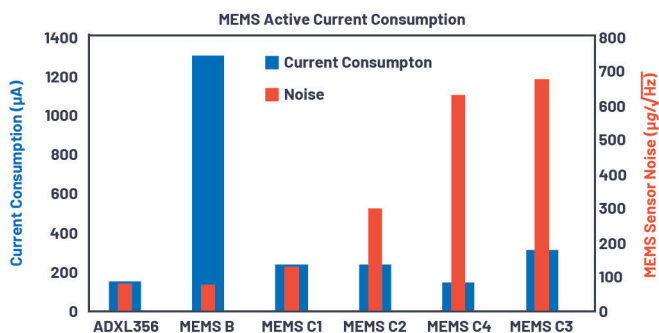


图13. MEMS传感器待机功耗与噪声密度的比较

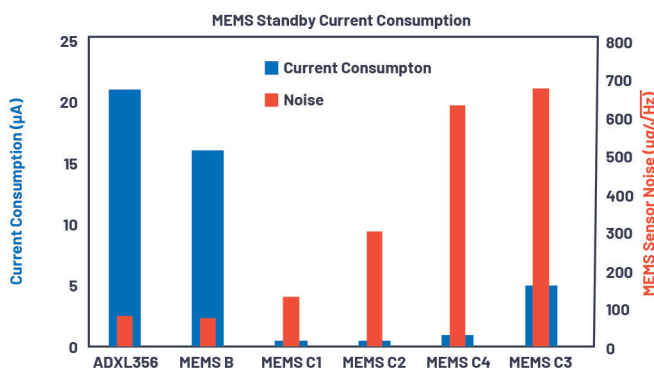


图14. MEMS传感器活动功耗与噪声密度的比较

ADXL356的另一个关键优势是陶瓷封装，这使其可在整个温度范围内提供出色的稳定性和性能。考虑到无线设备中使用的大多数MEMS传感器会被放到IP6x防护等级的外壳中，陶瓷封装至关重要。在某些情况下，外壳还会灌封化合物。陶瓷封装可以承受灌封化合物带来的外力，以保持传感器的数据手册性能。对于塑料封装的MEMS器件，灌封可能不适合，因为封装的挠曲会降低传感器的性能。

MEMS开启/上电时间

对于MEMS传感器而言，上电时间是指从关断到待机模式所需的时间。开启或启动时间是指从待机到测量模式所需的时间，如表5所示。对于ADXL356，当输出在最终值的5 mg范围内时，该规格有效。

表5. MEMS传感器上电时间

产品型号	上电/启动时间	开启时间	注释
ADXL356 (ms)	<10	<10	典型值
MEMS B (ms)	10		典型值
MEMS C1 (ms)	20至50	2至1300	最小值/最大值
MEMS C2 (ms)	20至50	2至1300	最小值/最大值
MEMS C3 (ms)	0.1		模拟输出: $5 \times R \times C$
MEMS C4 (ms)	20至50	2至1300	最小值/最大值

当监控关键设备时，应考虑这些时间，因为如果开启时间太长，当系统从待机进入测量模式时，可能会丢失关键振动数据。在对无线节点进行周期供电以节省电力的系统中，在不同功耗模式之间转换时的功耗变得更加重要。考虑表5所示的开启时间，当MEMS C1、MEMS C2和MEMS C4经过1.3 s以上的时间（最差情况）才测量到有效数据时，其他传感器已经完成测量并处于待机模式好一会了，从而能节省更多电量。图15比较了ADXL356、MEMS B和MEMS C1从待机模式转换到测量模式的情况，测量加速度数据1 s，假设电源在此转换期间以线性斜坡变化，然后经过4.5 s返回待机模式。尽管MEMS B具有更快的上电/启动时间，但1 s测量的活动电流消耗明显高于ADXL356。同样，在最差情况下，MEMS C1需要1.3 s才能进入测量模式，这意味着它必须保

持更长时间才能测量到与ADXL356和MEMS B相同的数据，因而会消耗更多功率，如表6所示。如果MEMS B和ADXL356以MEMS C1的最差情况速度测量数据，则二者都有55%的时间处于待机模式，而MEMS C1处于该模式的时间只有几毫秒。

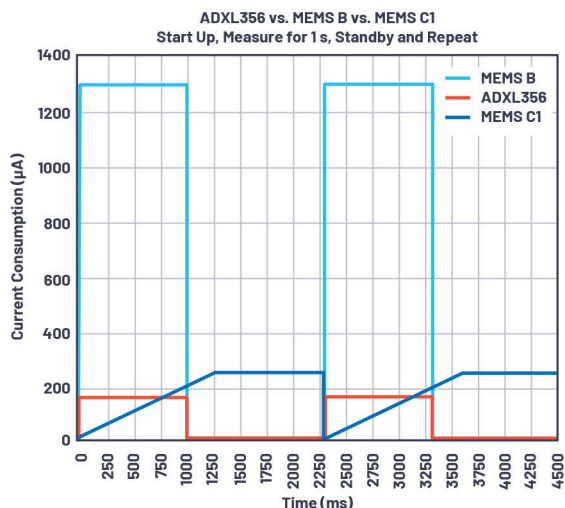
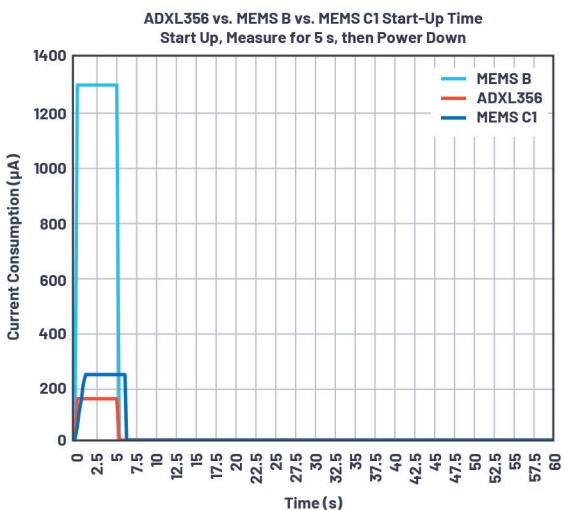


图15. ADXL356、MEMS B和MEMS C1的电流消耗：启动，然后以MEMS C1的最差情况启动时间进行1s的测量，在4.5 s内重复两次。

表6. 相对于图15的平均电流

	MEMS B	ADXL356	MEMS C1
平均电流(µA)	573	77	172

图16显示了每分钟进行5 s的活动数据测量的电流消耗，器件在其余时间处于待机模式。平均电流如表7所示。



即使以较低的频率进行测量（每60秒测量5秒），MEMS C1和ADXL356的平均电流消耗也非常接近，尽管二者的活动和待机电流消耗不同。如果测量频率较低，则在两次测量之间关断MEMS传感器以减少电流消耗的做法更加可行，如图17所示，其中ADXL356的平均电流消耗最低。

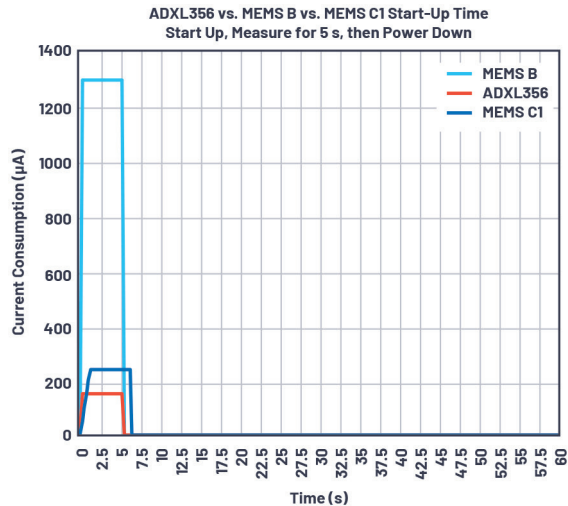


图17. ADXL356、MEMS B和MEMS C1的电流消耗：启动，然后进行5 s的测量，然后关断，总计60 s。

表8. 相对于图17的平均电流

	MEMS B	ADXL356	MEMS C1
平均电流(µA)	113	13	23

SmartMesh IP的功耗

SmartMesh IP收发器（如LTC5800）具有几种不同的功耗曲线。图18显示了数据手册中各模式对应的最大功耗。然而，对于合理的操作，网络中的典型SmartMesh芯片配置的功耗会低得多。多种因素将决定实际功耗，包括：报告间隔（每分钟1个数据包还是每秒1个数据包），需要多少跳数来传输数据，有效载荷大小（1字节至90字节），以及路径稳定性（例如，80%的室内环境具有密集的网络）。

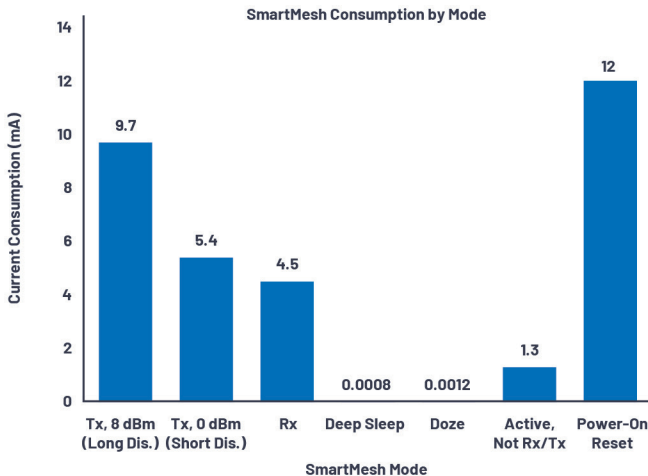


图18. SmartMesh IP电流消耗（最差情况数据手册规格）

实际电池寿命取决于许多因素，例如：微尘收集和传输数据的时间与微尘睡眠时间的关系。有效载荷大小、路径稳定性、传输间隔、跳跃深度和许多其他因素，都会影响SmartMesh IP微尘的功耗。基于一些关键因素，可以使用一款非常有用且精确的工具——[SmartMesh功耗和性能估算器](#)——来估算性能与功耗，如图19所示。

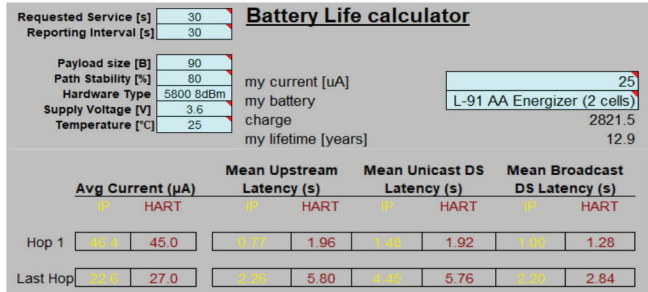


图19. SmartMesh功耗和性能估算工具

Voyager模块：发送一个完整的数据集

为了评估功耗，了解从无线微尘传输一个完整的数据集到SmartMesh IP管理器需要多少数据包会很有用。报告间隔为1 s时，从微尘发送到管理器的数据速率为每分钟60个数据包。x轴、y轴和z轴采样数据各包括512个时域样本，每个样本16位（2字节）。FFT数据也被计算和发送，如图20所示。

$(512 + 512/2) \times 3 = 2304$ 样本，因此 2304×2 字节 = 4608 字节。一个SmartMesh数据包中发送90个字节。4608 字节 / 90 字节 = 51.2 数据包。从无线微尘传输一个完整的数据集到SmartMesh IP管理器需要52个SmartMesh数据包。

为了进行功耗估计，我们使用有20个微尘的网络作为例子，微尘以4跃点布置，每跃点有5个微尘。将数据有效载荷大小设置为90字节，并将报告速率设置为每秒1个数据包，跃点1微尘的SmartMesh IC（静态条件）消耗587.9 µA。对于最差情况的动态条件，建议将功耗提高30%，得到 $587.9 \mu A \times 1.3 = 764.3 \mu A$ 。SmartMesh功耗和性能估算工具确认了这些结果。

图21显示了带4个跃点的Voyager模块在两种情况下的最差电池寿命估计（ $2 \times$ Saft LS14500），一种是微尘每60分钟激活一次，另一种是每分钟激活一次，持续60分钟。正如预期的那样，在60分钟内微尘每分钟传输一次的情况下，电池寿命要短得多。位于跃点1的微尘要接收微尘2、3、4发送的所有数据，因此它执行的工作更多。跃点1的电池寿命为19.1天（0.052年），而跃点4的电池寿命为20.1天（0.054年）。当微尘每小时传输1分钟时，跃点1的电池寿命为1.38年，跃点4的电池寿命为2.12年。

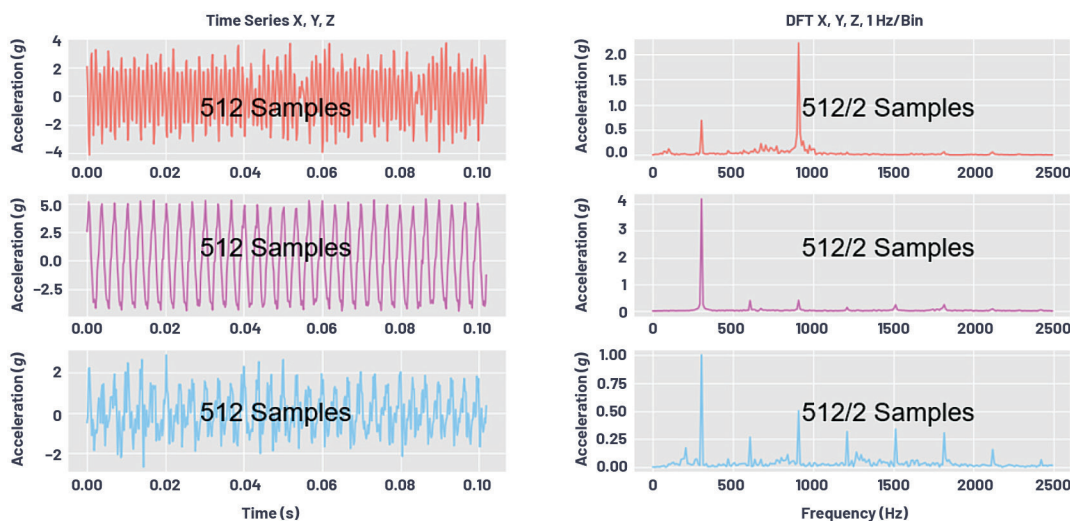


图20. 显示时域和频域数据的Voyager GUI

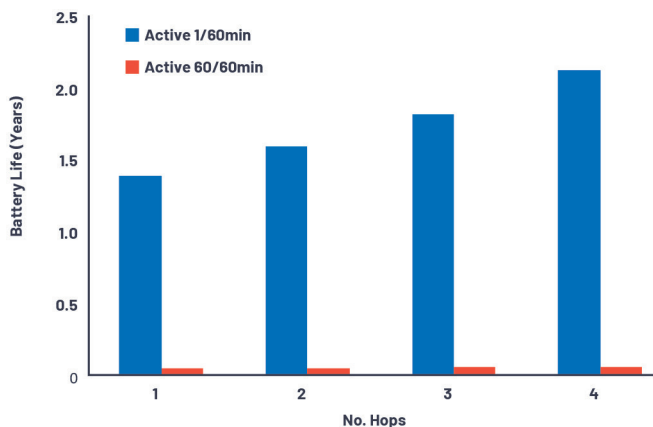


图21. SmartMesh电池寿命与传输数据所需跳数的关系

结论

本文讨论了推动状态监控市场当前快速发展和增长的一些关键趋势。低功耗、高性能MEMS传感器和高保真度、低功耗信号链器件，是为状态监控行业提供无线能力的关键，而无线能力是快速部署资产并开始挽回每年因计划外停机造成的500亿美元损失所必需的。网格技术综述概要说明了相互竞争的无线技术之间的主要差异，并强调了哪些技术最适合恶劣的RF环境——这些环境需要同步监控和控制以及类似有线的可靠性。

选择最合适的MEMS传感器可能很困难，有许多因素需要考虑，例如噪声、带宽和g范围，但还必须考虑一些较少提到的数据手册规格（如开启时间）和无线系统所需的数据速率，因为这有助于确定最可行的操作模式和数据速率。

在工厂车间等恶劣RF工作环境中使用的无线设备必须能以低功耗提供稳健的通信。本文给出了SmartMesh器件的数据手册最差情况值与使用SmartMesh功耗和性能估算工具计算的功耗估计值，以便读者对可能的情况有一个大致的了解。建议使用此工具做进一步探究，因为传感器网络可以根据具体需求进行定制，从而更好地估计可能的电池寿命和性能。在本系列文章的第二部分，我们将介绍Voyager平台如何能尽早检测各种机器故障，第三部分将讨论Voyager模块的功耗和不同工作模式。

参考文献

- 1 Zachary Shahan. “Electric Motors Use 45% of Global Electricity, Europe Responding [+ Electric Motor Infographic]”。CleanTechnica, 2011年6月。
- 2 Graham Immerman. “The Real Cost of Downtime in Manufacturing”。MachineMetrics, 2018年5月。
- 3 Vanson Bourne. “The Costs, Causes & Consequences of Unplanned Downtime”。ServiceMax, 2017年。
- 4 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。
- 5 “Manufacturing a More Connected Industry”。Ericsson。
- 6 “Sensor Networking Cost Model”。Advantech B+B SmartWorx。
- 7 “Frost & Sullivan: Intelligent Pumps with Analytics Capabilities Are Expected to be the New Norm”。Frost & Sullivan, 2020年7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。他拥有电子工程硕士学位和计算机工程学士学位。联系方式：christopher.murphy@analog.com。

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。

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

