

# 智能边缘第1部分：边缘节点

Ian Beavers  
ADI公司

工业物联网(IoT)正在酝酿广泛的转变，这种转变不仅将使互联机器间的相互检测成为一种竞争优势，还将使其成为必不可少的基本服务。工业物联网以边缘节点为起始点，后者是检测和测量的目标切入点。这是物理世界与计算数据分析进行交互的接口所在。互联的工业机器可检测大量的信息，进而用于制定关键决策。这种边缘传感器可能远离存储历史分析的云服务器。它必须通过将边缘数据聚合到互联网的网关进行连接。理想情况下，边缘传感器节点具有很小的规格尺寸，可在空间受限的环境中轻松进行部署。

## 检测、测量、解读、连接

在这个包含多个部分的工业物联网系列文章的第一部分，我们将分解和研究大型物联网框架中边缘节点检测和测量能力的基本方面：检测、测量、解读和连接数据，同时还将考虑功率管理和安全性。每个部分都将探讨一组独特的挑战。边缘节点的智能管理对成功实施来说十分关键。在一些情况下，超低功耗(ULP)是最重要的性能指标。在关键事件期间，当传感器从睡眠模式唤醒时，可以过滤掉绝大多数的潜在数据。

传感器构成工业物联网电子生态系统的前端边缘。测量阶段将检测到的信息转换为有意义的数字，如压力、位移或旋转的可量化值。在解读阶段，边缘分析与处理会将测量数据转换为可操作的事件。<sup>1</sup>只有最有价值的信息才应越过节点连接到云，以供预测或历史处理。在整个信号链中，都可以根据初始的可接受性限制来抑制或过滤数据。理想情况下，传感器节点应仅发送绝对必要的信息，并且应在获得关键数据后尽快制定关键决策。

边缘节点必须通过有线或无线传感器节点(WSN)连接到外部网络。在信号链的这一部分中，数据完整性仍然十分关键。如果通信不一致、丢失或损坏，则优化检测和测量数据几乎没有价值。通信期间数据丢失是不可接受的。存在电气噪声的工业环境可能十分恶劣和艰苦，尤其是在存在大量金属物体情况下进行射频通信时。因此，必须在系统架构设计期间预先设计鲁棒的通信协议。

ULP系统的功率管理以选择调节器元件来实现最大效率为起点。但是，由于边缘节点也可能以快速占空比唤醒和睡眠，因此还应考虑上电和掉电时间。外部触发器或唤醒命令能够帮助快速提醒边缘节点，使其开始检测和测量数据。

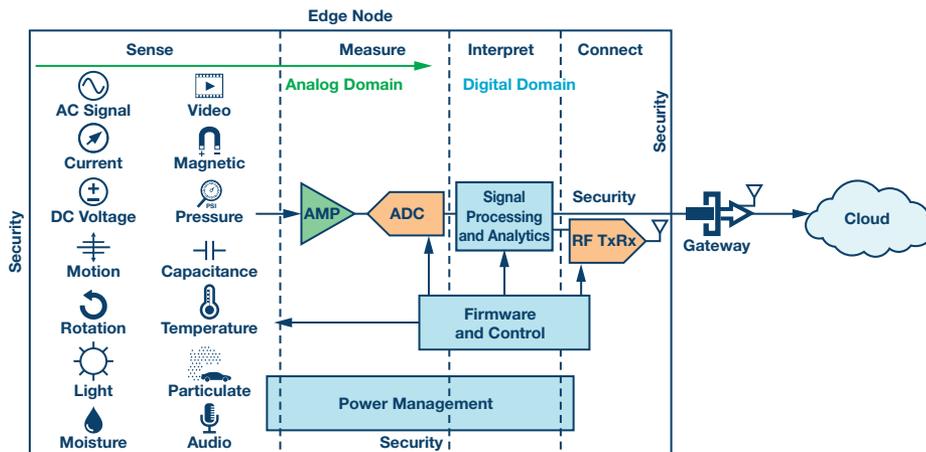


图1. 边缘节点器件智能地检测、测量和解读数据并将其连接至与云相连的互联网网关。数据可以通过一些形式的分析进行预处理，然后再传输以进行更深的数据挖掘智能分析。

数据安全性也是工业物联网系统必须考虑的一个问题。我们不仅需要确保边缘内的数据安全无虑，还必须确保其对网络网关的访问免受恶意攻击。决不允许仿冒边缘节点来获取网络访问以进行不法活动。

## 智能始于边缘

边缘处具有众多检测解决方案，这些解决方案可能不只是单个分立器件。边缘可能存在多种不同的无关数据采集。温度、声音、振动、压力、湿度、运动、污染物、音频和视频只是其中可检测的部分变量，这些数据会经过处理并通过网关发送至云，以进行进一步的历史和预测分析。

毫不夸张地说，传感器就是工业物联网的支柱，<sup>2</sup>但更准确的说法应该是，它们是获得洞察的中枢神经系统。边缘节点检测和测量技术是目标数据的“出生地”。如果在解决方案链的这一阶段如实地记录了不良或错误的数，则云中再多的后期处理也无法挽回损失的价值。

任务关键型系统（如具有高风险结果的医疗健康和工厂停机监控系统）要求质量数据测量具有完整性的鲁棒性。数据质量至关重要。误报或遗漏可能代价高昂，而且非常耗时，甚至可能威胁生命。代价巨大的错误会导致需要额外的维护，还会使得效率低下，甚至有时候不得不禁用整个物联网系统。因此智能始于边缘节点，而此处也适用那句老话：如果输入的是垃圾，那么输出的也一定是垃圾。

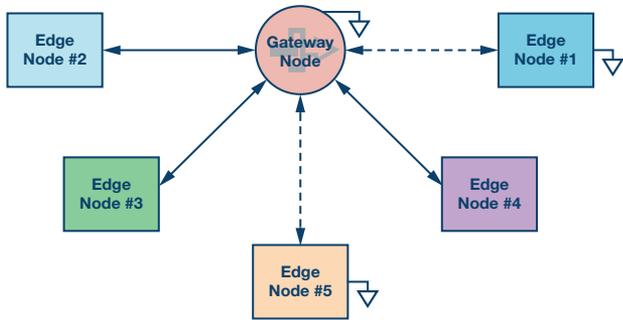


图2. 很多有线和无线边缘节点输出可自主连接到网关节点，以便在传输至云服务器之前进行聚合。

## 能够访问数据宝藏也就意味着需要承担重大的责任

在没有边缘节点智能的传统信号链解决方案中，数据只是数据。非智能节点不会帮助生成用于制定可行决策的智慧和知识。<sup>1</sup>可能存在大量对系统目标性能没有影响的原始低质量数据。<sup>3</sup>转换所有这些数据并将其发送至最终云存储目的地可能需要消耗大量的功率和带宽。

相比之下，智能分区边缘节点检测和测量能够将数据转换为有效的信息。智能节点可降低整体功耗，缩短延迟并减少带宽浪费。<sup>4</sup>这使得具有较长延迟的反应型物联网可以转变成实时的预测型物联网模式。物联网仍然适用基本的模拟信号链电路设计理念。对于复杂的系统，通常需要拥有深厚的应用专业知识来解读已处理的数据。

## 优化的智能分区最大程度地提升了云价值

只有最重要的测量信息才需要通过网关发送至云端以进行最终处理。在一些情况下，大多数数据根本不重要。<sup>5</sup>但是，对于本地实时决策所需的时间关键型系统数据，应在将其聚合到可进行远程访问的远端节点之前及早依其行事。相反，通过预测模型利用历史值来影响长期洞察的信息是云处理的理想应用。通过将数据归档到庞大的数据库以供追溯处理和决策使用，发挥出了云处理和存储的强大优势。<sup>6</sup>

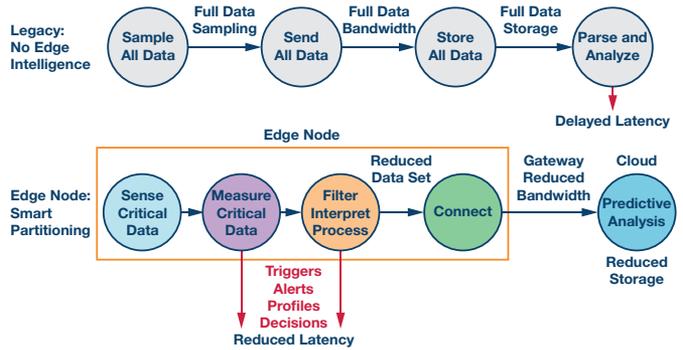


图3. 边缘节点的智能分区解决了以前无法解决的新挑战。信号链中更早的精简处理和智能实现了更高效的整体物联网解决方案。

## 实时决策依赖于边缘

物联网传感器主要为模拟传感器。具体的工业应用要求将决定边缘节点前端所需传感器的动态范围和带宽。在将信号转换为数字表示并传输到边缘外部前，信号链的前端将处于模拟域内。如果选择不当，模拟信号链中的各个元件都有可能限制边缘节点的整体性能。动态范围将为目标满量程传感器相对于本底噪声或下个最高无用信号的差值。

由于物联网传感器通常会同时寻找已知和未知活动，因此模拟滤波器并非始终有意义。数字滤波会在对信号进行采样后执行。除非在传感器的前端使用模拟滤波器，否则基波的谐波或其他杂散信号可能混入检测的信息并与目标信号竞争功率。因此，在设计阶段应该针对时域和频域中的意外检测信号制定应对计划，防止干扰伪像出现在测量数据中。

检测到的信息通常由信号链中接下来的ADC进行测量。如果使用分立元件来设计物联网边缘节点，则在选择测量ADC时应该注意不要减小传感器的动态范围。嵌入式ADC的输入满量程范围通常与传感器输出幅度匹配良好。理想情况下，传感器输出应消耗几乎整个ADC输入范围（在1 dB内），而不使ADC发生饱和，也不会范围限制处被裁减掉。但是，也可以使用放大器级来对传感器输出信号进行增益或衰减，以便使ADC自身的动态范围达到最大。ADC满量程输入、采样率、位分辨率、输入带宽和噪声密度都会影响边缘节点的信号测量性能。

前端放大器可以嵌入在节点的测量级或作为分立元件置于ADC前。放大器的增益、带宽和噪声也可以增强边缘节点的性能。

信号链中传感器之后的测量ADC通常采用以下两种采样架构类型之一：奈奎斯特速率或连续时间 $\Sigma\text{-}\Delta$  (CTSD)，其中后者在嵌入式ADC中更为常见。一个奈奎斯特速率ADC将会有个标称的平坦噪声层，等于采样频率的一半，即 $f_s/2$ 。CTSD结合使用过采样率和带通陷波，使噪声超出目标带宽，从而增加动态范围。在了解边缘节点的模拟带宽和动态范围时，测量ADC架构及其分辨率非常关键。

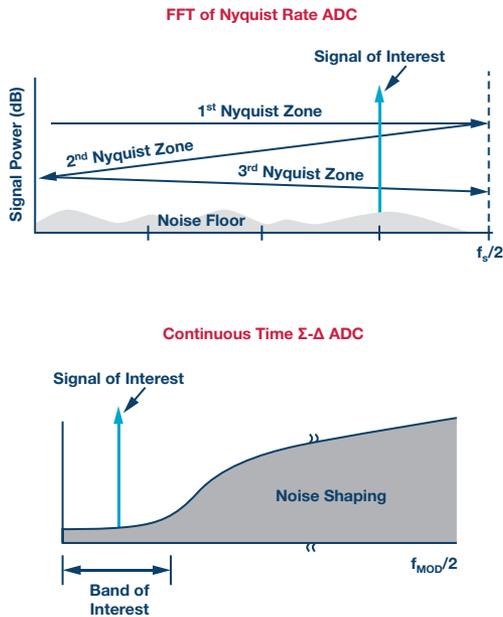


图4. 如果物联网传感器上没有前端模拟滤波器，奈奎斯特速率ADC会将超出第一奈奎斯特区域的高阶频率折叠回目标带宽中。相比之下，具有过采样调制时钟的CTSD ADC架构使用噪声整形来在目标频段中实现高动态范围。由于CTSD具有固有滤波能力，因此对信号混叠不太敏感。

例如，在频域中，1 Hz单位带宽的噪声密度是基于ADC的SNR以及噪声在ADC采样频谱上的分布宽度。在奈奎斯特速率ADC中，噪声频谱密度（每1 Hz带宽）为 $0 \text{ dB} - \text{ADC信噪比(SNR)} - 10 \times \log(f_s/2)$ ，其中 $f_s/2$ 为采样率除以二或ADC的单个奈奎斯特区域。理想SNR的计算公式为 $\text{SNR} = 6.02 \times N + 1.76 \text{ dB}$ ，其中N为ADC位数。但是，ADC的实际SNR涉及到晶体管 and 半导体处理的非理想因素，这包括电气噪声和晶体管级元件瑕疵。这些非理想因素会导致SNR性能降到理想性能以下，因此请查阅ADC数据手册以了解SNR性能。

边缘节点的动态范围将由传感器的动态范围、信号的放大率（如果需要）和ADC满量程动态范围组成。如果传感器的满量程输出信号未达到ADC满量程范围输入的1 dB以内，则ADC的部分动态范围将会闲置。相反，如果来自传感器的输入超出ADC的量程，则会造成采样的信号失真。在计算边缘节点的动态范围时，放大器带宽、增益和噪声也是需要考虑的一部分。传感器、放大器和ADC的总电气噪声将为各RMS分量的平方和的平方根。<sup>7</sup>

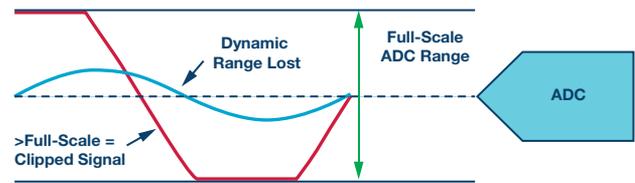


图5. 传感器信号输出幅度与ADC的输入满量程不匹配而出现动态范围丢失（蓝色）的示例。需要使用放大器最大程度地增大传感器的动态范围，同时防止ADC发生饱和（红色）。信号匹配必须考虑整个边缘节点信号链的带宽、动态范围和噪声。

## 智能工厂

在工业物联网中，机器振动状态监控将会是一项非常重要的应用。新型或传统机器设备可能拥有多个关键的机械元件，例如转轴或齿轮，这些元件可能装有高动态范围的MEMS加速度计。<sup>8</sup>这些多轴传感器将对机械的振动位移进行实时采样。测量后，振动信号可以进行处理并与理想的机器配置进行比较。<sup>9</sup>在工厂中，通过分析这类信息，可以帮助提高效率、减少停机情况并提前预测机械故障。在极端情况下，可迅速关闭机械元件正在急剧恶化的机器，从而避免造成进一步的损坏。

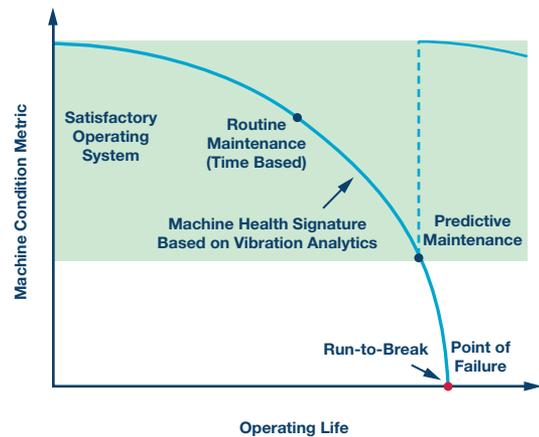


图6. 虽然可以定期执行例行机器维护，但这通常不是根据机器状况而智能进行的。<sup>10</sup>通过分析特定机器操作的振动性能，可在边缘节点处发出预测故障点和维护里程碑警告。

通过实现边缘节点分析，可以显著缩短决策时间延迟。图7显示了这样的一个示例，在这个示例中，在超出MEMS传感器警告阈值限制后，系统立即发送了警告。如果事件极其严重而被认定为关键事件，可授权节点自动禁用违规设备，以防止发生非常耗时的灾难性机械故障。

或者，可以调用触发信号以使能另一个检测和测量节点（如备用机器元件上的节点），以便开始根据第一个事件来解读数据。这样可以减少来自边缘节点的采样数据总量。要确定相对于标称值的任何振动异常，前端节点在设计上必须达到所需的检测性能。检测和测量电路的动态范围、采样率和输入带宽应该足以识别任何偏移事件。

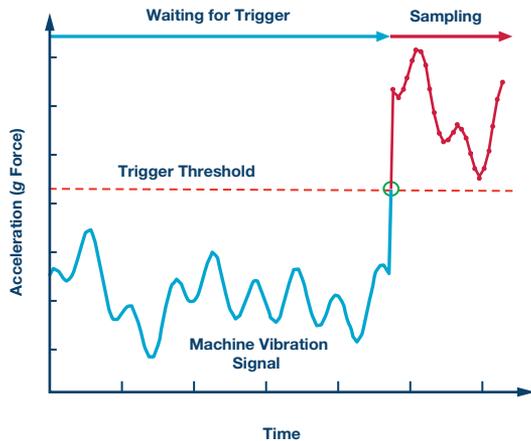


图7. 机器振动采样数据的时域表示，其中比较器阈值可决定是否将检测和测量数据传送到边缘以外。系统可保持低功耗状态以过滤大部分信息，直到通过阈值交叉事件实现数据优势为止。

## 智慧城市

另一种工业物联网边缘节点应用为具有嵌入式视频分析的智慧城市工业摄像机。根据智慧城市的定义，城市的使命是将无数的信息和通信点汇聚到一个凝聚的系统中，以实现对城市资产的管理。一种常见的应用是提供停车位空缺提醒和占用检测。调试期间会为各摄像机预先确定视场。分析机制中可以定义和使用边界边缘检测来识别各种对象及其运动。在边缘处，不仅可以分析对象的历史运动，还可使用数字信号处理(DSP)算法来根据对象轨迹计算预测的路径。



图8. 利用边缘节点视频分析，可在低功耗系统中确定对象类型检测、轨迹和边界交叉，而无需将全带宽视频数据发送至云端进行分析。只需传输时间戳及痕迹对象坐标和类型。

在类似的频率滤波中，终端处理通常不需要全带宽的视频分析帧。通常，不用于安全目的时，只需要完整视频帧的一小部分。在固定安装的摄像机上，帧与帧之间的大部分可视数据为静态数据。静态数据可以过滤掉。在一些情况下，只需要分析目标对象的边界交叉数或运动坐标。缩减的信息子集可以采用痕迹坐标的形式传输至信号链中的下一网关。

边缘节点视频分析可提供多种滤波解读来区分各种对象类型，例如汽车、卡车、自行车、人类和动物等。这种抽取操作减少了云服务器上所需的数据带宽和计算能力，而如果要分析下游发送的全帧速率视频数据，则会占用大量的数据带宽和计算能力。

室内摄像机应用可以识别穿过入口边界的人数，还可调整房间的照明、加热或制冷。要在极端照明条件或其他具有挑战性的照明条件（如降雨）下实现视觉有效性，室外摄像机可能需要具有高动态范围。每像素8位或10位的典型成像传感器可能无法在所有检测情形中的照明条件下，提供足够的亮度动态范围。相较于以240 Hz的刷新速率查看快速运动，工业分析摄像机上可以使用较慢的帧速率来监控活动。



图9. 通过在边缘节点处部署采用DSP对象检测算法的高动态范围成像传感器, 即使在低照明条件下, 也可以确定运动和边界入侵。这个示例使用视觉对比来定义室内工厂/办公室(左侧)和室外停车场(右侧)的边缘检测。

## 平台级解决方案

ADT7420是一款具有突破性性能的4 mm × 4 mm数字温度传感器, 内置16位ADC, 分辨率可达0.0078°C, 功耗仅为210 μA。ADXL362是一款超低功耗、3轴MEMS加速度计, 在运动触发唤醒模式下, 以100 Hz采样速率工作时功耗仅为2 μA。它不使用功率占比, 而是在所有数据速率下均采用全带宽架构, 从而防止了输入信号混叠。ADIS16229是一款具有嵌入式射频收发器的双轴18 g数字MEMS振动传感器。它还具有512点数字FFT能力, 提供了片上频域信号处理功能。

支持DSP的Blackfin低功耗成像平台(BLIP)<sup>11</sup>可基于成熟的数字信号处理工具实现工业视觉设计的快速原型制作。优化的软件库为设备制造商提供了用于运动检测、人数统计和车辆检测的开箱即用解决方案。

## 参考文献:

- <sup>1</sup> Colm Prendergast. “[互联世界中的智能分区和价值创造](#)”。物联网专题演讲: 2015 IESA视觉峰会。
- <sup>2</sup> Stephen Lawson. “[物联网不断将分析能力推向边缘](#)”。PCWorld: IDG News Service, 2016年。
- <sup>3</sup> Lisa Morgan. “[边缘分析——物联网数据洪流的解药](#)”。InformationWeek: UBM Electronics, 2016年。
- <sup>4</sup> Daniel Kirsch. “[边缘分析的价值](#)”。Hurwitz & Associates Services, 2015年。
- <sup>5</sup> Jason Stamper. “[物联网将分析能力驱动至网络边缘的原因](#)”。451 Research, 2015年。
- <sup>6</sup> Steve Nelson. “[端到端探索物联网](#)”。Element14: Newark Electronics, 2014年。
- <sup>7</sup> Umesh Jayamohan. “[了解ADC信号链中放大器噪声对总噪声的贡献](#)”。《模拟对话》, 2013年2月。
- <sup>8</sup> Robert Randall. “[基于振动的状态监控](#)”。澳大利亚新南威尔士州: 新南威尔士大学, 2010年。
- <sup>9</sup> Ed Spence. “[利用MEMS加速度计的优势进行状态监控](#)”。Electronic Design, Penton Publishing, 2016年。
- <sup>10</sup> Jamie Smith. “[用于工业物联网的智能边缘设备](#)”。ARC工业论坛, 2015年。
- <sup>11</sup> Blackfin低功耗成像平台(BLIP)。ADI公司, 2014年。

## 作者简介

Ian Beavers是ADI公司自动化、能源和传感器部(美国北卡罗来纳州格林斯博罗)的产品工程经理。他于1999年加入公司。Ian拥有超过19年的半导体行业工作经验。Ian于美国北卡罗来纳州立大学获得电气工程学士学位并于格林斯博罗分校获得工商管理硕士学位。联系方式:  
[Ian.Beavers@analog.com](mailto:Ian.Beavers@analog.com)。

## 在线支持社区

访问ADI在线支持社区, 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[ezchina.analog.com](http://ezchina.analog.com)

**全球总部**

One Technology Way  
P.O. Box 9106, Norwood, MA  
02062-9106 U.S.A.  
Tel: (1 781) 329 4700  
Fax: (1 781) 461 3113

**大中华区总部**

上海市浦东新区张江高科技园区  
祖冲之路 2290 号展想广场 5 楼  
邮编: 201203  
电话: (86 21) 2320 8000  
传真: (86 21) 2320 8222

**深圳分公司**

深圳市福田中心区  
益田路与福华三路交汇处  
深圳国际商会中心  
4205-4210 室  
邮编: 518048  
电话: (86 755) 8202 3200  
传真: (86 755) 8202 3222

**北京分公司**

北京市海淀区西小口路 66 号  
中关村东升科技园  
B-6 号楼 A 座一层  
邮编: 100191  
电话: (86 10) 5987 1000  
传真: (86 10) 6298 3574

**武汉分公司**

湖北省武汉市东湖高新区  
珞瑜路 889 号光谷国际广场  
写字楼 B 座 2403-2405 室  
邮编: 430073  
电话: (86 27) 8715 9968  
传真: (86 27) 8715 9931

©2017 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. Ahead of What's Possible is a trademark of Analog Devices. TA15307sc-0-B/17(A)

[analog.com/cn](http://analog.com/cn)



超越一切可能™