

为工业4.0启用可靠的基于状态的有线监控

第一部分

Richard Anslow和Dara O'Sullivan
ADI公司

基于状态的监控对于实现工业4.0至关重要。

政府举措（例如德国的工业4.0和中国的中国制造2025）正在加快制造业朝向普遍网络自动化发展的趋势。此外，智能传感器系统正在提高自动化程度，提供更多的数据来监测和控制生产过程。特别是，中国制造2025旨在快速发展包括电动汽车、新一代信息技术(IT)和电信、先进机器人和人工智能在内的高科技产业。有了更先进的系统之后，就需要采用更先进的方法来确保系统的可靠性。

对机器人和旋转机器（例如涡轮机、风扇、泵和电机）实施的基于状态的监控会记录与机器的健康和性能相关的实时数据，以便有针对性地实施预测维护和优化控制。在机器生命周期的早期进行有针对性的预测维护，可以减少生产停机的风险，从而提高可靠性、显著节约成本和提高工厂的生产率。

如何实施基于状态的有线监控解决方案？

要对工业机器实施基于状态的监控，可以利用一系列传感器数据，如电气测量、振动、温度、油品质量、声学 and 流程测量（如流量和压力）。但是，振动测量是目前最常见的，因为它可以最可靠地指示出机械问题，例如不平衡和轴承故障。本文主要研究振动传感的应用，但该方法同样适用于来自其他传感器的数据。

这种传输意味着将来自感测节点的传感器数据发送至主控制器或者云高度依赖应用。在许多应用中，一些本地数据会在终端节点处理，汇总数据随后通过无线方式发送至网络网关，或者直接通过蜂窝链路发送至云或分析服务器。在这些情况下，传输的数据量通常都相当低，而且因为终端节点是由电池供电，所有通常要求保持低功耗。在其他应用中，需要进行原始传感器数据传输。例如，在分析之前可能需要对来自多个传感器的数据进行调整和融合。在使用数据进行实时控制的应用中，也需要进行原始数据传输。在这些应用中，更可能采用有线接口作为数据传输解决方案。

工业应用的CbM可以使用ADI公司经过优化的微机电系统(MEMS)加速度计、低功耗微控制器和有线*iCoupler*®隔离接口信号链来提取、调整来自远程CbM从机的机器健康状况数据，并将其可靠回传至主控制器进行分析。随着时间的推移，可以使用机器健康数据创建基于软件的模型来确定机器行为的变化，并主动维护机器健康。在一些应用中，如数控机床，数据也可以用来实时优化系统性能。

实现有线CbM接口的挑战包括：在长电缆上运行时EMC的稳健性、以高波特率传输时数据的完整性（用于实时传输CbM数据流），以及通信物理层/协议的不匹配。ADI公司的信号链和系统级专业知识为实现有线CbM接口提供了几种可能的选择。

本文分两个部分，第一部分介绍了ADI公司的有线接口解决方案，该方案帮助客户缩短设计周期和测试时间，让工业CbM解决方案更快地进入市场。下一篇文章重点介绍详细的物理层设计考量因素，包括主控制器和有线CbM从控制器。

有线CbM设计实现

设计和部署基于状态的有线监控解决方案需要考量多个系统性能因素，并进行权衡取舍。

首先，在选择合适的MEMS加速度计时，必须考虑需要测量的故障类型，从而选择合适的带宽和噪声性能MEMS来满足系统的要求。边缘节点处理需要仔细匹配所选的处理器，以确保最高的系统灵活性。

其次，有线CbM系统的设计需要精心选择合适的有线通信协议和物理层，以实现高速实时数据流传输。实现有线接口需要仔细考虑EMC性能、数据传输电缆、连接器和电缆上的电源传输。

选择合适的MEMS加速度计

选择合适的MEMS振动传感器涵盖几个方面：

轴数

被监测的轴数通常与故障类型和传感器的安装布置呈函数关系。如果能明显看出故障涉及一个主导轴，并且在该轴上有一个

清晰的传输路径，那么采用单轴传感器就足够了。三轴传感器对于多轴中包含能量的故障或故障能量传输路径不明确的故障是有用的。

故障类型

被监测的故障类型对传感器选择有重要影响。传感器的噪声密度和带宽是这方面的重要指标，因为它们决定了能够可靠提取的振动水平和频率范围。例如，对于低转速机器的不平衡和失调故障，可能需要一个低噪声密度传感器，但带宽要求相当低，而齿轮故障检测需要传感器兼具低噪声密度和高带宽。

性能要求

除了故障类型外，了解CbM的性能要求也很重要。对基本交通灯类型的状态指示器实施报警检测，需要通过不同水平的性能来进行复杂的预测。这显然适用于正在部署的分析和算法，但也会影响传感器的选择。传感器在带宽、噪声密度和线性度方面的性能水平越高，分析能力就越强。

选择合适的信号处理

设计考量因素包括：

加速度计输出

加速度计的输出一一般是模拟或串行数字信号，通常是SPI。模拟输出传感器将需要一个数字转换阶段，也需要进行一些信号调理。这可以是一个支持前置放大器调理的分立ADC，也可以是微控制器中的嵌入式ADC。

边缘节点处理要求

为了减轻数据链路和/或中央控制器/服务器的负担，边缘节点上可能需要一些基本的FFT或信号处理算法。

数据传输协议要求

ADC或传感器的输出通常是SPI接口。它本身并不提供任何机制用于实施数据完整性检查、确定时间戳、混合来自不同传感器的数据等。在传输之前，将传感器数据封装在边缘节点的高级协议中是非常有用的。这可以提高传感器接口的稳健性和灵活性，但是要求在边缘节点上妥当处理和封装数据流。

有关更多信息，请参考《模拟对话》文章“[为您的应用选择最合适的MEMS加速度计](#)”。

将加速度计输出移植到有线通信总线

如前所述，加速度计的输出一一般是模拟或串行数字信号，通常是SPI。SPI输出可以在本地处理（允许协议灵活性），然后添加到物理层接口，或者直接移植到物理层。

SPI是一个不平衡的单端串行接口，用于短距离通信。要在更长的距离内直接将SPI移植到物理层，需要使用RS-485线路驱动器和接收器。RS-485信号传输是平衡的差分式传输，本身便能抗干扰，且通过长线缆长度时具有稳健性。

在SPI主机和从机之间的较长距离上使用SPI时，存在一些挑战。SPI从本质上是同步的，具有一个由SPI主机启动的时钟(SCLK)。SPI数据线路——主机输出从机输入(MOSI)和主机输入

从机输出(MISO)——与SCLK同步，在短距离范围内这是可以实现的。SPI还有一个有效的、低使能芯片选择(CS)信号，如果需要，它允许单独的从机寻址。

在长电缆中传输时，SCLK信号会在电缆中产生传播延迟，100米长的电缆会延迟500 ns。对于MOSI数据传输，MOSI和SCLK会被电缆延迟同等时间。然而，从从机MISO发送到主机的数据会出现两倍传播延迟，因而不再同步。

为了恢复主机和从机之间的同步，可以将来自从机的时钟信号反馈给主机，或者使用时钟相移补偿主控制器的电缆延迟。时钟的相移必须与系统的总延迟匹配。[AN-1397](#)提供主微控制器延迟补偿的实现细节。

有线通信物理层

进行长距离通信时，需要采用稳健可靠的物理层。如前所述，RS-485信号传输是平衡的差分式传输，本身便能抗干扰。系统噪声均等地耦合到RS-485双绞线电缆中的每条导线。一个信号的发射与另一个信号相反，耦合到RS-485总线的电磁场彼此抵消。这降低了系统的电磁干扰(EMI)。让RS-485非常适合CbM系统的一些额外关键优点包括：

- ▶ 更高的数据速率，电缆长度较短（小于100米）时可达50 Mbps
- ▶ 数据速率较低时，线缆长度可达1000米
- ▶ 全/半双工RS-485和RS-422多驱动器/接收器对可以使用最小量的组件，将双向SPI转换为RS-485总线信号
- ▶ 较宽的共模输入范围允许主机和从机之间具备接地电位差异

有线接口的EMC性能

在长电缆中传输时，通信网络可能会受到危害影响，例如较大的共模噪声、接地电位差异和高压瞬态。

传导和辐射噪声源可影响100米线缆长度内的通信可靠性。采用ADI公司的*iCoupler*芯片级变压器隔离技术可以提高对这些噪声源的抗干扰能力。[AN-1398](#)概述了利用*iCoupler*技术可以实现的对常见工业瞬态的抵抗力。

共模瞬变抗扰度(CMTI)是隔离器抑制高压/高压摆率噪声瞬态，并保持无误差通信的能力。[信号和isoPower®隔离器件](#)提供最低25 kV/μs的共模瞬变抗扰度，也可以在不造成永久门锁或损坏的情况下承受最大100 kV/μs。

在工厂自动化环境中，系统设计人员通常无法控制提供通信网络的电气装置。最好的做法是假定存在接地电位差异。在运动控制系统中，可能会产生数百伏的接地电位差异。RS-485通信节点需要电流隔离电源和数据线路能在这些环境中可靠地运行。信号和isoPower隔离器件提供峰值可达600 V（基础）或353 V（增强型）的最大连续工作电压。在存在较大接地电位差异的情况下，基础绝缘支持实现可靠的通信。增强型绝缘保护操作人员免于在厂区受到电击。

在有线通信网络中，暴露在外的连接器和电缆可能遭受许多严苛的高压瞬态影响。与变速电力驱动系统的EMC抗扰度要求相关的系统级IEC 61800-3标准，要求最低±4 kV（接触）/±8 kV（空

气)的IEC 61000-4-2 ESD保护。ADI公司的新一代RS-485收发器提供高于 ± 8 kV (接触) / ± 8 kV (空气) IEC 61000-4-2 ESD保护。

数据线路上的幻象电源

在主控制器和远程CbM传感器节点之间分配电力和数据线路需要采用创新的解决方案来降低电缆成本。将数据和电力线路融合在单一双绞线上意味着可以大幅节省系统成本,以及可以在空间有限的终端传感器节点位置采用更小的印刷电路板(PCB)连接器解决方案。

功率和数据通过电感电容网络分布在双绞线对上。高频数据通过串联电容与数据线路耦合,同时保护RS-485收发器免受直流总线电压影响。主控制器上的电源通过电感器连接到数据线路,然后使用电缆远端的CbM从传感器节点上的电感器进行滤波。

电缆两端的电感应良好匹配,以避免产生差分模式噪声,自谐振频率应至少达到10 MHz,避免对ADI公司新一代振动测量系统的实时突发模式产生干扰。注意,电源和数据耦合解决方案必须添加到不需要直流数据内容的数据线路中,例如MOSI或MISO到RS-485的扩展件。

推荐的解决方案和性能取舍

基于所提出的设计考量,以下组件为稳健的有线工业振动测量解决方案提供了最佳路径。

- ▶ ADcml3021, 宽带宽、低噪声、三轴振动传感器
- ▶ ADuM5401/ADuM5402, 四通道、2.5 kV隔离器, 采用集成DC/DC转换器
- ▶ ADM3066E, 50 Mbps半双工RS-485收发器
- ▶ ADM4168E, 30 Mbps双通道RS-422收发器
- ▶ LTC2858-1, 20 Mbps全双工RS-485收发器
- ▶ ADP7104, 20 V、500 mA、低噪声CMOS LDO稳压器

推荐解决方案

ADcml3021 MEMS加速度计对于这三种解决方案都是通用的。这个加速度计具备超低噪声密度($25 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$),支持出色的分辨率。ADcml3021也具备宽带宽(从直流一直到10 kHz, 5%平坦度),可以跟踪许多机器平台上的关键振动特征。ADcml3021为客户提供一个经过机械优化的铝封装,可以在广泛的频率范围内提供与集成MEMS传感器的稳定耦合。这就保证了可以可靠提取和调理从受测设备获得的振动特征。

ADcml3021可以提供SPI输出,可以直接与RS-485/RS-422器件连接,也可以通过微处理器和/或iCoupler信号和功率隔离与RS-485/RS-422器件连接,如图1所示。为了实时监测工业设备上的振动特征,ADcml3021提供实时流传输模式,其工作速率约为12 Mbps SPI。

为了将实时流传输SPI模式连接到RS-485总线,必须选择数据速率出色的组件。

对于图1所示的选项1和选项2(可以经由SPI直接与RS-485连接),ADM3066E和ADM4168E提供一个可靠的接口,在从机振动传感器节点实现SPI 3接收、1发射(3+1)配置。SPI CS接收信号使用ADM3066E、SPI CLK和MOSI实现,MISO信号使用ADM4168E实现。在实时流传输模式下运行时,ADcml3021向主微控制器发送一个中断信号,以在新数据突发可以捕获时进行标记。中断信号(/BUSY)也可以使用ADM4168E传输给主机。

完整的解决方案由主机发送至ADcml3021的三个信号(MOSI、CS、CLK),以及从ADcml3021发回主机的两个信号(MISO、/BUSY)组成。5x单端信号仅用ADM4168E和ADM3066E两个组件就可以转换为差分信号。差分信号可以使用RJ50连接器和插头转换,与工业标准RJ45以太网连接器相比,这两者占用的PCB面积几乎相同。ADM3066E和ADM4168E收发器提供大于 ± 8 kV (接触) / ± 8 kV (空气) IEC 61000-4-2 ESD保护,在直接连接到有线电缆接口时,提供必需的可靠性。

对于选项3,微控制器可以预先处理ADcml3021 SPI输出,也可以在SPI和其他串行接口(例如UART)之间执行协议转换。UART是RS-485接口常用的一种异步协议。UART由发射和接收信号以及发射使能信号组成,所有这些信号都可以直接连接到全双工RS-485收发器,例如LTC2858-1。在全双工模式下,LTC2858-1允许同时进行双向数据传输,这与SPI双向数据传输的要求相匹配。该微控制器可以处理同步SPI到异步UART协议的转换。

ADuM5401/ADuM5402是业界体积最小的信号和电源隔离器件。它们包含一个集成式DC/DC转换器,采用5.0 V或3.3 V电压时(5.0V输入电源),可提供最高500 mW调节隔离功率。

在图1中,选项2包含ADuM5401,它从数据总线获取5 V DC,然后为ADcml3021提供3 V隔离电源。ADuM5401还包括4个信号隔离通道,采用支持3+1 SPI隔离的配置。

图1中的选项3包含ADuM5402,它与ADuM5401相似。关键的区别在于ADuM5402提供2个发射和2个接收数字隔离通道。

如前所述,ADuM5401/ADuM5402可以提高有线CbM接口的EMC抗扰度,保护ADcml3021免受RS-485电缆接口上的高压干扰和接地电位差异。

性能取舍

表1使用许多关键指标比较了这三种解决方案,包括设计灵活性、PCB面积、解决方案成本、复杂性和EMC性能。

在CbM传感器节点集成一个微控制器将增加设计的灵活性,但会增大PCB面积,且增加软件复杂性。由于主CbM节点将配有一个处理器,这意味着图1中的选项3本质上将是一个双微控制器系统,与主CbM节点上的单个微控制器相比,该系统的启动和运行速度将更慢。

选项1和选项2的设计灵活性较低,但是提供了一种更快速部署的路径,因为它们支持在RS-485链路上集成复杂度低且透明的SPI。选项1和选项2还可以采用比选项3体积更小的PCB,这需要

额外的PCB区域来敷设微控制器和相关电路（例如，一个时钟振荡器和几个无源组件）。

将*i*Coupler信号和电源隔离添加到选项2和选项3会占用最小的PCB面积，且可以提高EMC性能（超过使用RS-485/RS-422收发器的片内保护可以实现的性能）。

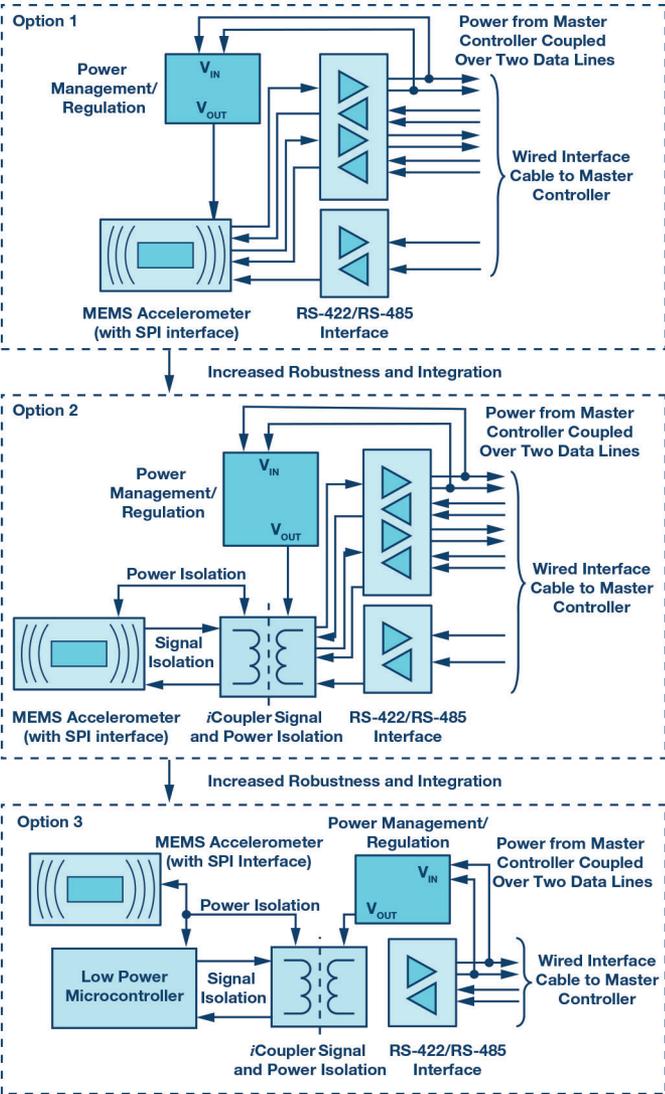


图1 实现可靠、高度集成、有线MEMS加速度计基于状态监测的解决方案的选项。

表1. CbM选项之间的取舍比较

解决方案选项	设计灵活性	PCB面积	解决方案成本	复杂性/集成度	EMC性能
1	低	低	低	低	中
2	低	低/中	低/中	低	高
3	高	中	中	中	高

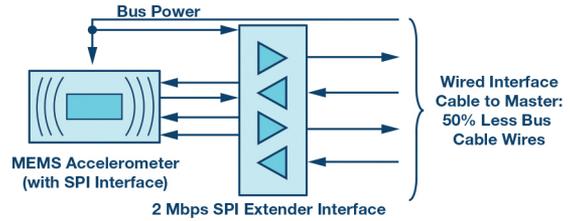


图2. LTC4332 SPI扩展接口帮助节省线缆成本。

数据速率较低的解决方案

对于以较低的数据速率（小于2 Mbps）运行的有线应用，LTC4332 SPI扩展器提供了一种替代方案，用于加固主从传感器节点之间的SPI链接。LTC4332可以传输SPI数据，包括通过两条双绞线传输的中断信号。该解决方案可以显著节约成本，因为与标准解决方案相比，它最多可节省50%的总线线缆。

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。

Dara O'Sullivan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经理。他的专长领域是工业运动控制应用的功率转换、控制和监测。他拥有爱尔兰科克大学工程学士、工程硕士和博士学位。自2001年起，他便从事研究、咨询和工业领域的工业与可再生能源应用方面的工作。联系方式：dara.osullivan@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



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

©2019 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. TA21221sc-6/19

analog.com/cn

