

# 为工业4.0启用可靠的 基于状态的有线监控 ——第2部分

Richard Anslow, 系统应用工程师;  
Dara O'Sullivan, 系统应用工程师

## 简介

在“为工业4.0启用可靠的基于状态的有线监控——第1部分”一文中，我们介绍了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。本文探讨了多个方面，包括选择合适的MEMS加速度计和物理层，以及EMC性能和电源设计。此外，还包括第一部分介绍的三种设计解决方案和性能权衡。本文为第二部分，着重介绍第一部分展示SPI至RS-485/RS-422设计解决方案的物理层设计考量。

为MEMS实现有线物理层接口的常见挑战包括管理EMC可靠性和数据完整性。但是，在RS-485/RS-422长电缆上分布SPI之类的时钟同步接口，同时在相同的双绞线（虚假电源）上部署电源和数据时，会带来更多挑战。本文讨论以下关键问题，并就物理层接口设计提供建议：

- ▶ 管理系统时间同步
- ▶ 推荐的数据速率与电缆长度
- ▶ 适用于共用电源和数据架构的滤波器设计和仿真
- ▶ 虚假电源结构中的无源元件性能权衡

- ▶ 元件选择和系统设计窗口
- ▶ 试验性测量

## 时间同步和电缆长度

设计SPI至RS-485/RS-422链路时，电缆和元件会影响系统时钟和数据同步。在长电缆中传输时，SCLK信号会在电缆中产生传播延迟，100米长的电缆会延迟约400ns到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，因而不与SCLK同步。可能的最大SPI SCLK基于系统传播延迟设置，包括电缆传播延迟，以及主机和从机元件传播延迟。

图1展示系统传播延迟如何导致SPI主机上出现不准确的SPI MISO采样。对于没有采用RS-485/RS-422电缆的系统，MISO数据和SPI SCLK会以低延迟或无延迟同步。对于采用了电缆的系统，SPI从机上的MISO数据与SPI SCLK之间存在一个系统传播延迟，如图1中的tpd1所示。回到主机的MISO数据存在两个系统传播延迟，如tpd2所示。当数据由于电缆和元件传播延迟而右移时，会发生不准确的数据采样。

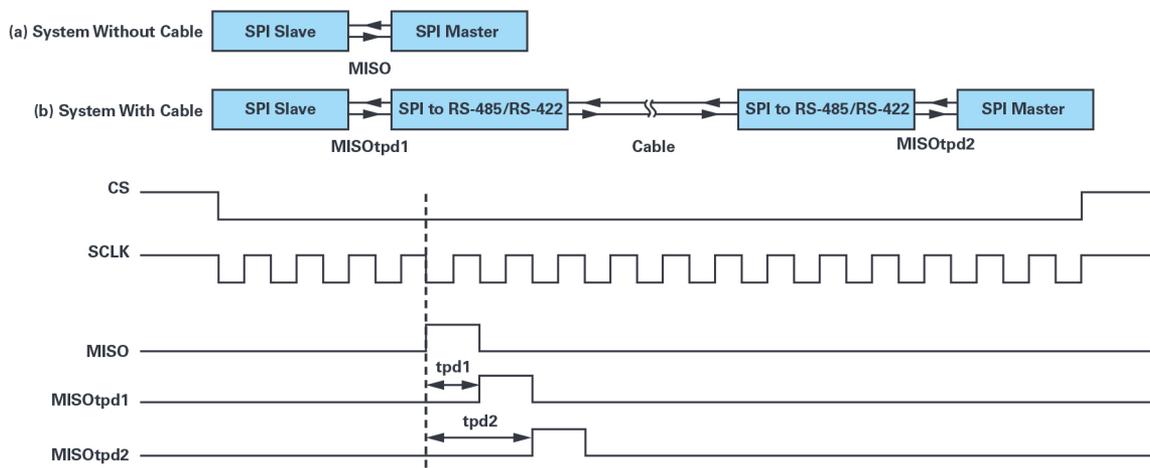


图1. 采用与不采用RS-485/RS-422长电缆的系统的MISO数据和SPI SCLK同步。

为了防止出现不准确MISO采样，可以缩短电缆长度、降低SPI SCLK，或者在主控制器中实施SPI SCLK补偿方案（时钟相位偏移）。理论上，系统传播延迟应该小于SCLK时钟周期的50%，以实现无错通信；在实践中，可以将系统延迟限值确定为SCLK的40%，这可以作为一般规则。

图2针对1.1部分中描述的两个SPI至RS-485/RS-422设计提供SPI SCLK和电缆长度指南。这种非隔离设计使用了ADI公司具备高速EMC稳健性的小型RS-485/RS-422器件（ADM3066E和ADM4168E）。这种隔离设计还采用了ADI公司的iCoupler®信号和电源隔离ADuM5401器件，可以为SPI至RS-485/RS-422链路提供更高的EMC稳健性和抗噪声干扰性能。这种设计会增加系统传播延迟，导致不可在更高的SPI SCLK速率下运行。在更长的电缆（超过30米）中传输时，强烈建议增加隔离，以帮助消除接地回路和EMC事件的影响，例如静电放电(ESD)、电快速瞬变脉冲群(EFT)，以及与数据传输电缆耦合的高压浪涌。当电缆长度达到或超过30米时，隔离和非隔离设计的SPI SCLK和电缆长度性能相似，如图2所示。

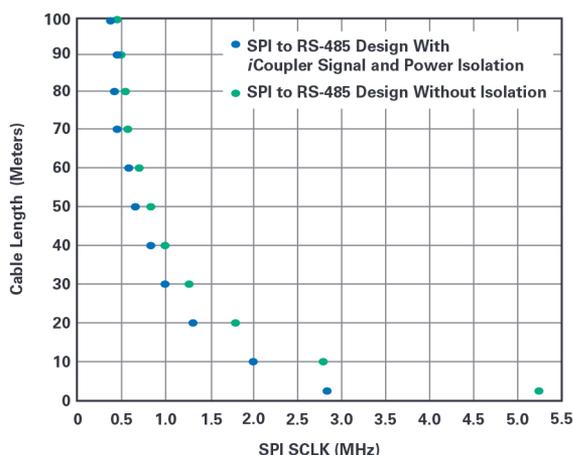


图2. 针对隔离和非隔离设计的SPI SCLK和电缆长度指南。

## 虚假电源

### 背景知识

虚假电源将电源和数据部署在一根双绞线上，在主机和从机之间实现单电缆解决方案。将数据和电源部署在同一根电缆上，可以在空间有限的边缘传感器节点上实现单连接器解决方案。

电源和数据通过电感电容网络分布在单根双绞线上，具体如图3所示。高频数据通过串联电容与数据线路耦合，可以保护RS-485/RS-422收发器免受直流总线电压影响，如图3a所示。图3所示为通过连接至数据线路的电感连接至主机控制器的电源。如图3b所示，5V直流电源对交流数据总线实施偏置。在图3c中，电流路径显示为从机和主机之间的 $I_{PWR}$ ，使用电缆远端基于状态监控(CbM)的从机传感器节点上电感从线路中获取电源。

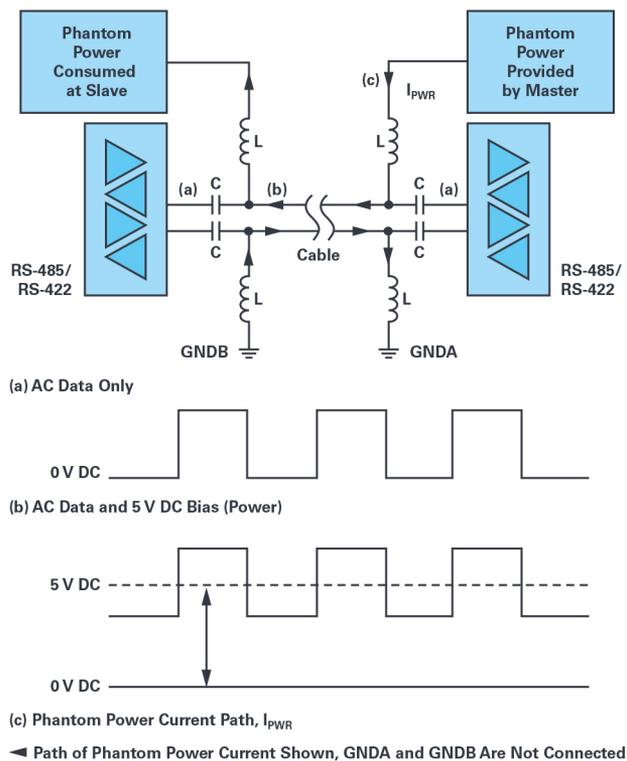


图3. 虚假电源物理层的交流和直流电压电平。

### 高通滤波器

在本文中，假设将虚假电源电感电容网络部署到两根电缆中，这会部署SPI MISO信号的RS-485/RS-422转换。图4描述主机和从机SPI至RS-485/RS-422的设计，以及SPI MISO数据线的虚假电源滤波器电路。滤波器电路采用高通电缆，所以要求传输的数据信号不能包含直流内容或极低频率的内容。

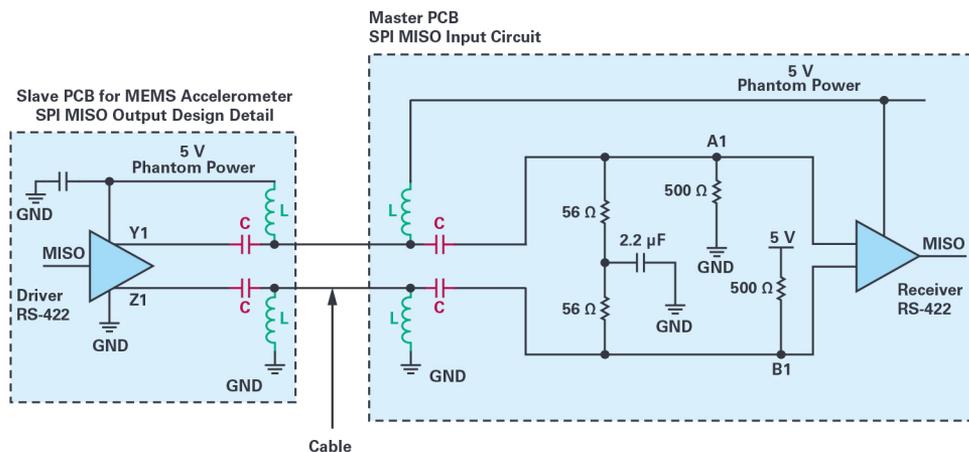


图4. SPI至RS-485/RS-422设计和虚假电源滤波器电路。

图5所示为二阶高通滤波器电路，这是对图4的简化演示。RS-485/RS-422发射器的电压输出标记为 $V_{TX}$ ，R1具备 $15\Omega$ 输出电阻。R2为 $30\text{ k}\Omega$ ，是RS-485/RS-422接收器的标准输入电阻。电感(L)和电容(C)值可以选择，以匹配所需的系统数据速率。

选择电感(L)和电容(C)值时，需要考虑最大的RS-485/RS-422总线压降和压降时间，如图6所示。存在一些标准，例如对于单根双绞线以太网<sup>2</sup>，指出的最大可允许压降和压降时间如图6a所示。对于有些系统，最大的可允许压降和压降时间值可能更大，受信号极性交越点限制，如图6b所示。

压降和压降时间可与图5中的仿真配对，以确定系统的高通频率。

对于衰减出色的系统，高通滤波器截止频率和压降要求之间的关系如公式1<sup>3</sup>所示

$$f_{HPF} \leq \frac{-\ln\left(1 - \frac{V_{DROOP}}{V_{PEAK}}\right)}{2\pi \times T_{DROOP}} \quad (1)$$

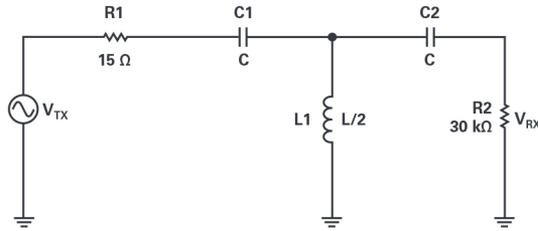


图5. RS-422发射数据路径和RS-485/RS-422接收数据路径的二阶高通滤波器。

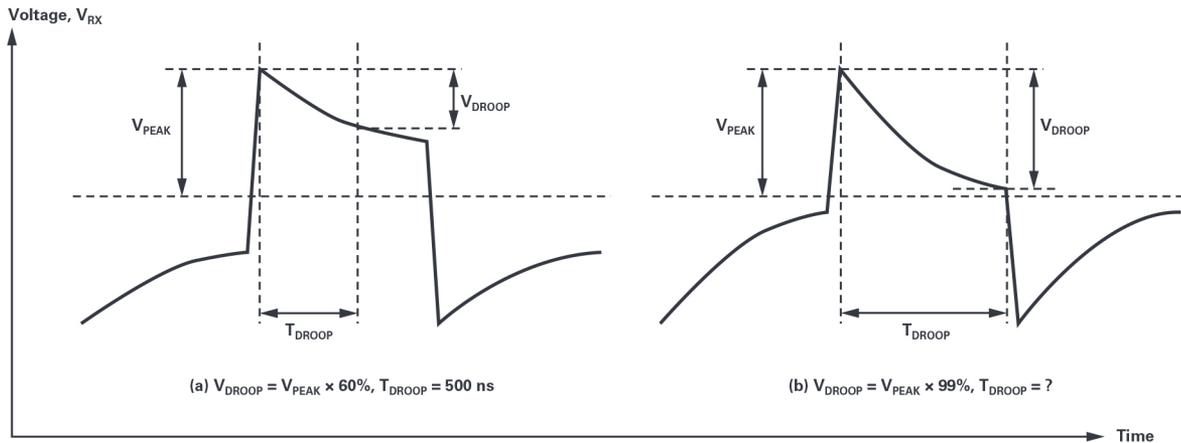


图6. RS-422接收器的压降和压降时间。

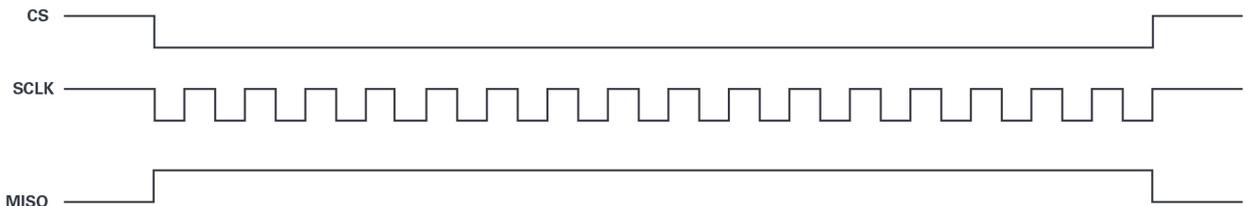


图7. 具有MISO 16位突波（所有都处于逻辑高电平）的SPI协议。

在SPI至RS-485/RS-422通信系统中增加虚假电源时，很显然可允许的最低SPI SCLK速率会受虚假电源滤波器元件限制。

为了实现不含位错误的可靠通信，需要考虑最糟糕场景下的最低SPI SCLK，例如，当所有的SPI MISO采样位处于逻辑高电平时，如图7所示。如果所有的MISO采样位都处于逻辑高电平，会导致位数据速率低于系统SPI SCLK。例如，如果SPI SCLK为 $2\text{ MHz}$ ，且所有16个位都处于逻辑高电平，那么虚假电源LC滤波器网络的速率相当于 $125\text{ kHz}$ 的SPI MISO位数据率。

如“时间同步和电缆长度”部分所示，电缆长度越长，需要的SPI SCLK速率越低。但是，虚假电源会限制最低的SPI SCLK速率。要平衡这些对立的要求，就需要小心选择和确定无源滤波器元件的特性，尤其是电感。

### 无源元件选择

在选择合适的功率电感时，需要考虑许多参数，包括足够的电感、额定/饱和电流、自谐振频率(SRF)、低直流电阻(DCR)和封装尺寸。表1提供选择的功率电感和参数。

额定电流需要满足或超过远程供电的MEMS传感器节点的总电流要求，额定饱和电流需要更大。

此电感不会给交流数据造成高于其SRF的高阻抗，在达到某个点之后，会开始呈现电容性阻抗特性。选择的电感SRF会限制在SPI至RS-485/RS-422物理层上使用的最大SPI SCLK，如图1所示。在长电缆上使用，可能不会接触到SRF电感；例如，电缆超过10米时，可能无法达到11 MHz SPI SCLK速率（产品型号为744043101的SRF）。在其他情况下，在长电缆上运行时，电感SRF可能达到更低的SPI SCLK速率（2.4 MHz、1.2 MHz）。如前所述，在虚假电源滤波器网络中使用时，电感也会限制可允许的最低SCLK速率。

值更大的电感可以采用12.7 mm × 12.7 mm封装，值更小的电感可以采用4.8 mm × 4.8 mm封装。

表2显示在通过权衡这些对立要求，以最小化电感尺寸时，会因为物理限制（内部绕组）等受到限制。

表1. 选择的功率电感参数

产品型号	L (μH)	I <sub>RATED</sub> (mA)	自谐振频率 (SRF) (MHz)	直流电阻 (DCR) (Ω)	封装尺寸 (mm)
744043101	100	290	11	0.6	4.8 × 4.8
LPS8045B-105	1000	230	1.3	3.22	8.0 × 8.0
76877530	1000	300	2.4	3.3	7.8 × 7.0
SDR0805-102KL	1000	210	3.0	4.5	7.8 × 7.8
7687714222	2200	260	1.2	6.5	10 × 10
SRR1208-222KL	2200	280	0.65	4.2	12.7 × 12.7

表2. 功率电感——对封装尺寸的限制

参数	对封装尺寸的影响
足够高的电感	电感值越高，内部绕组越多，封装尺寸越大。
更高的SRF	SRF越高，内部绕组越少，封装尺寸越小。
更高的额定和饱和电流	内部绕组更少，但封装尺寸更大。
低DCR	要实现更低的DCR，电缆需要更粗，且减少绕组。

选择合适的直流电压隔离电容时，受限因素包括瞬态过电压额定值和直流电压额定值。直流电压额定值需要超过最大的总线电压偏置值，具体如图3所示。电路或连接器短路时，电感电流会失衡，会被端电极阻抗消耗。出现短路时，需要设置隔直电容的额定值，以实现峰值瞬态电压。例如，在低功率系统中，电感饱和电流约为1 A时，对应的隔直电容额定值至少为直流50 V。<sup>4</sup>

## 系统实现

### 设计窗口和元件选择

在RS-485/RS-422长电缆上使用SPI之类的时钟同步接口，同时在相同的双绞线（虚假电源）上部署电源和数据时，存在多种设计限制，具体如图8所示。可允许的最小SPI SCLK由虚假电源滤波器元件设置，即SPI数据线上的高通滤波器数据。最大的SPI SCLK由虚假电源电感自谐振频率(SRF)或系统传播延迟设置，以SPI SCLK值更低者为准。

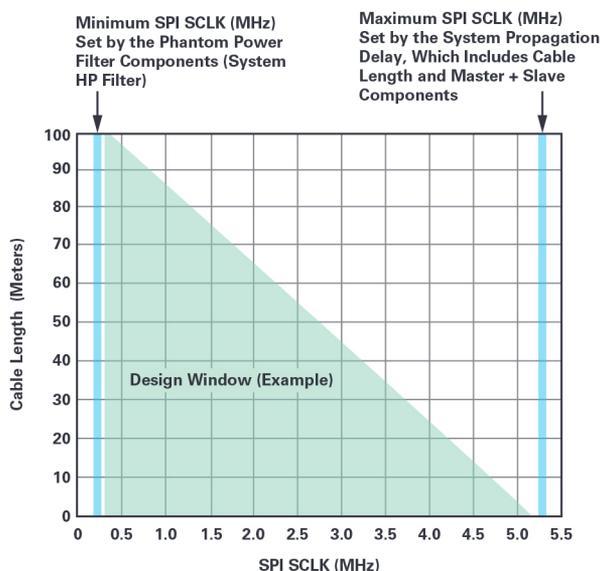


图8. 设计窗口限制。

表3提供建议使用的电感和电容值，对应的最小SPI SCLK通过模拟图5确定，使用图6和公式1作为指导。其中，假设 $V_{\text{DROOP}}$ 为 $V_{\text{PEAK}}$ 的99%。最小的SPI SCLK也会考虑最糟糕的场景，如图7所示，其中所有数据突波位都处于逻辑高电平。对应的电缆长度根据图2预估。最大SPI SCLK由系统传播延迟或电感SRF值设置。

下面是一个计算示例。

要确定最大SPI SCLK：

- ▶ 指明系统所需的电缆长度。在本例中，我们选择使用10米长的RS-485/RS-422电缆。
- ▶ 使用图2确定系统可允许的最大SPI SCLK。电缆10米长时，约采用2.6 MHz SPI SCLK。将最大SPI SCLK降低10%，以获取LC元件容差，从而提供2.3 MHz SPI SCLK。可允许的最大SPI SCLK也可能受选择的电感的SRF限制。

要确定最小SPI SCLK：

- ▶ 考虑SPI协议，其中MISO线路上的所有位都处于逻辑高电平。在本例中，我们选择使用16位SPI协议，其中会在32 SCLK瞬态期间对16位SPI MISO数据采样。如果所有16位都处于逻辑高电平，那么有效位的速率为 $2.3 \text{ MHz} / 32 = 72 \text{ kHz}$ 。
- ▶ 按照图5，在 $V_{\text{TX}}$ 上的方波为72 kHz时，可以使用多个L和C值来模拟电缆 $V_{\text{RX}}$ 远端上的电压波形。在电缆长度增加时，电感值和电感封装尺寸会增加。电容值也会增加。
- ▶ L和C值的选择可变，具体由所需的降压设置决定，如图6所示。在本例中，假设 $V_{\text{DROOP}} = V_{\text{PEAK}} \times 99\%$ 。
- ▶ 在 $V_{\text{TX}}$ 上使用100 μH电感、3.3 μF电容和72 kHz方波时，会产生7 μs  $T_{\text{DROOP}}$ ，其中 $V_{\text{DROOP}} = V_{\text{PEAK}} \times 99\%$ 。
- ▶ 6 μs至7 μs  $T_{\text{DROOP}}$ 相当于2.3 MHz至2.6 MHz SPI SCLK。
- ▶ 如果选择100 μH (744043101)电感，2.6 MHz SPI SCLK低于11 MHz电感SRF。

如果使用100  $\mu\text{H}$ 电感和3.3  $\mu\text{F}$ 电容，可以最大限度减小元件的PCB面积。使用更大的电感时，例如1000  $\mu\text{H}$ 或2200  $\mu\text{H}$ ，元件的PCB面积可能增大3倍。最大的SPI SCLK理论值由电感SRF设置，这实际上是不可能的，例如，在11 MHz时在没有时钟补偿的系统中使用100  $\mu\text{H}$  (744043101)。

表3. 各种虚假电源滤波器元件

L ( $\mu\text{H}$ )和产品型号	C ( $\mu\text{F}$ )	最大SPI SCLK (MHz)	最大SPI SCLK的设置因素	最小SPI SCLK	最大的RS-485/RS-422电缆长度 (米)
100 (744043101)	3.3	5.2	系统传播延迟	2.6 MHz	10
1000 (76877530)	4.7	2.4	电感SRF	700 kHz	60
2200 (7687714222)	10	1.2	电感SRF	350 kHz	>100

如果使用更大的电感，例如2200  $\mu\text{H}$ ，网络需要更多电容和电阻来衰减系统谐振。额外的元件用蓝色表示，在图9中标记为 $R_{\text{DAMP}}$  (1 k $\Omega$ )和 $C_{\text{DAMP}}$  (47  $\mu\text{F}$ )。

### 实验设置

图10所示为ADI公司的有线CbM评估平台，因此被称为Pioneer 1。此系统使用第一部分所示的SPI至RS-485/RS-422设计解决方案。Pioneer 1也包括ADcmXL3021宽带宽、低噪声、三轴MEMS加速度计，将高性能和多种信号处理功能结合到一起，以简化CbM系统中的智能传感器节点开发。SPI至RS-485/RS-422从机将ADcmXL3021 SPI输出通过10米电缆返回到主机控制器，以实施振动数据分析。SPI至RS-485设计使用虚假电源100  $\mu\text{H}$ 电感和3.3  $\mu\text{F}$ 电容来最小化从机接口解决方案的尺寸，该方案的大小为26 mm  $\times$  28 mm（不包括接口连接器）。

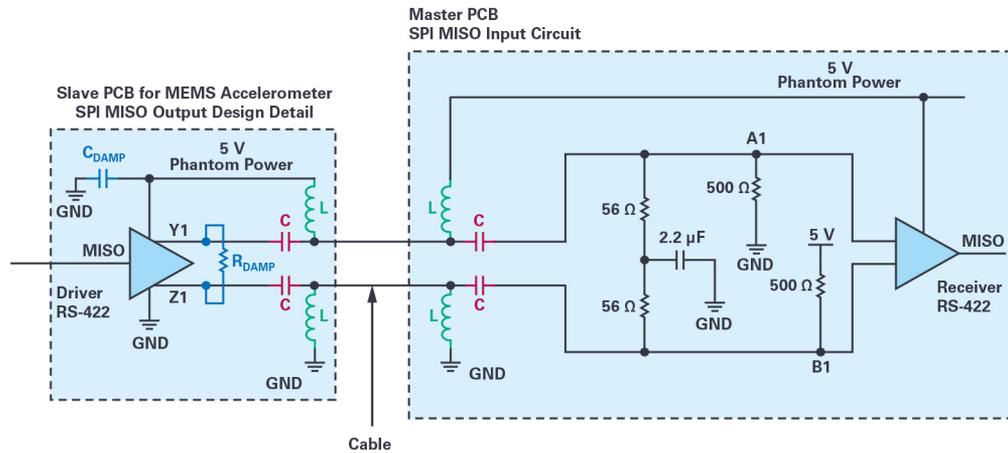


图9. 增加更多系统衰减，以支持更大的电感和电容滤波器。

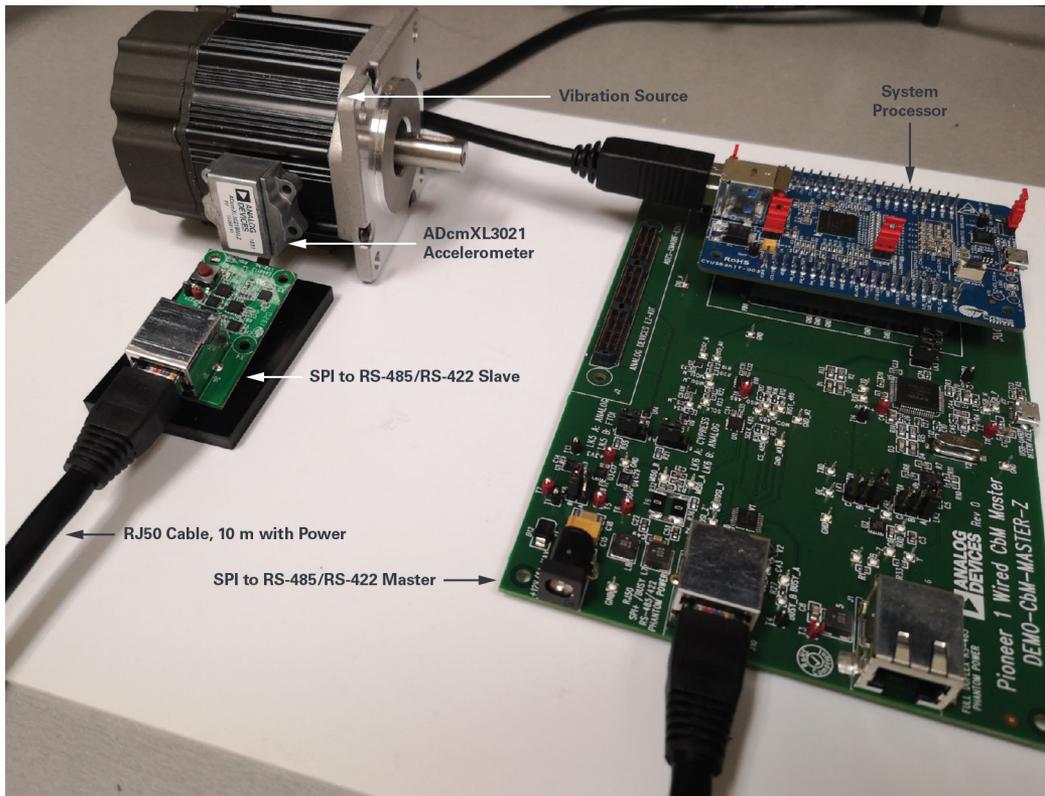


图10. Pioneer 1基于状态监控的有线评估系统。

## 虚假电源线上的交流数据波形

图11和表4显示在SPI主机和从机上，以及在RS-485/RS-422差分电压总线上测量的电压。这些电压使用图10中的示例应用设置测量。模拟信号1（黄色）和2（蓝色）是表示MISO信号（紫色）的总线压差，在SPI从机输出端测量。数字信号4（黄色）显示在主机控制器上采样的MISO。SPI主机上的MISO信号与SPI从机上的MISO的极性和相位匹配，且无传播延迟。

表4. 测量的示波器通道和信号

参数	对封装尺寸的影响
2 数字 (红色)	ADcmXL3021 BUSY, 在主机上测量
3 数字 (桔色)	ADcmXL3021 MOSI, 在主机上测量
4 数字 (黄色)	ADcmXL3021 MISO, 在主机上测量
5 数字 (绿色)	ADcmXL3021 SCLK, 在主机上测量
6 数字 (蓝色)	ADcmXL3021 CS, 在主机上测量
3 模拟 (紫色)	ADcmXL3021 MISO, 在从机上测量
2 模拟 (蓝色)	RS-422 Z引脚总线电压状态, 与MISO对应; Y和Z的差分电压, 对应3 模拟 (紫色) 和4 数字 (黄色)
1 模拟 (黄色)	RS-422 Y引脚总线电压状态, 与MISO对应; Y和Z的差分电压, 对应3 模拟 (紫色) 和4 数字 (黄色)

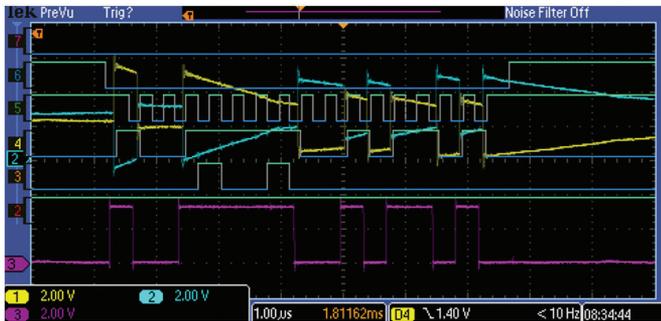


图11. 在SPI主机和从机上，以及在RS-422差分电压总线上测量的电压。

## 虚假电源线上的直流正确性

图12表示ADcmXL3021正常模式，其中包括SPI协议，该协议在MISO上发送16位数据突发，之后空闲一段时间（最短16 μs），然后再发送另一个16位数据突发。

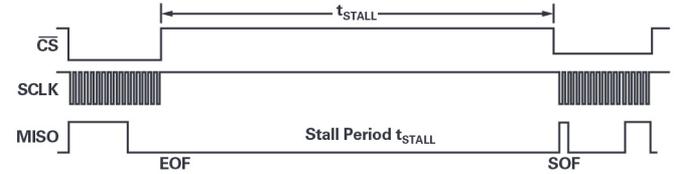
在虚假电源网络中，使用100 μH电感和3.3 μF电容：

- ▶ 在帧末尾(EOF)，RS-485/RS-422总线电压衰减回到稳定的直流状态。
- ▶ 空闲期直流稳定状态要求差分电压RS-422 B-A > 500 mV，用于反映ADcmXL3021 MISO高阻状态，以及确保ADM4168E收发器输出上提供逻辑0。如图4中的滤波器电路所示，如果使用500 Ω电阻，即可确保这个空闲状态的正确性。
- ▶ 下一个帧起始(SOF)将从低电平正确瞬变到高电平，或者保持低电平，具体由ADcmXL3021的MISO数据输出决定。
- ▶ 空闲期RS-485/RS-422总线稳定状态不与SPI SCLK边缘对应，所以随机噪声不会影响这段时间内的SPI MISO数据采样。

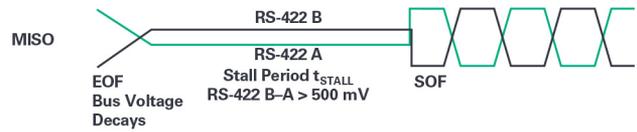
在虚假电源网络中，使用1000 μH电感和4.7 μF电容：

- ▶ ADcmXL3021 MISO输出之后依次出现EOF、空闲期和SOF，在空闲期，总线电压电平不会衰减回到500 mV最低直流稳定状态。可能出现一定的电压电平衰减，但不会衰减到500 mV。

ADcmXL3021 Normal Mode: 16-Bit Data Bursts on MISO, Followed by a Stall Time of at Least 16 μs  
Example Waveform



Phantom Power Uses L = 100 μH and C = 3.3 μF  
Example Waveform



Phantom Power Uses L = 1000 μH and C = 4.7 μF  
Example Waveform

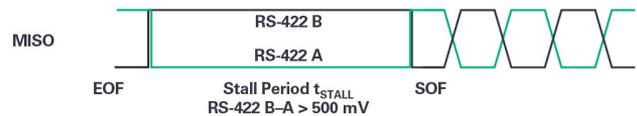


图12. 虚假电源线上的直流正确性。

## 有线评估解决方案

ADI公司开发出Pioneer 1有线系统评估解决方案，以支持ADcmXL3021三轴MEMS加速度计。如维基百科指南所述，Pioneer 1评估套件也可以利用扩展板，支持表5所示的MEMS器件。

表5. 适用于MEMS传感器的有线评估解决方案

器件	噪声密度 (μg/√Hz)	范围(g)	带宽(Hz)	#轴
ADcmXL3021	26	50	10000	3
ADXL357	80	10, 20, 40	1000	3
ADXL372		200	3200	3
ADXL355	20	2, 4, 8	1000	3
ADXL313	250	0.5, 1, 2, 4	1600	3
ADXL363	550	2, 4, 8	200	3
ADXL375		200	1600	3
ADXL362	175	2, 4, 8	200	3
ADXL345	420	2, 4, 8, 16	1600	3
ADXL350		1, 2, 4, 8	1600	3
ADXL343		2, 4, 8, 16	1600	3
ADXL312	340	1.5, 3, 6, 12	1600	3

## 参考资料

- <sup>1</sup> Richard Anslow和Dara O'Sullivan。 “为工业4.0启用可靠的基于状态的有线监控——第1部分。” ADI公司，2019年7月。
- <sup>2</sup> “IEEE 802.3bu-2016——IEEE以太网标准——修正案8：单根平衡双绞线以太网由数据线供电(PoDL)的电缆的物理层和管理参数。” IEEE，2017年2月。
- <sup>3</sup> Andy Gardner。 “PoDL：去耦网络演示。” 凌力尔特，2014年5月。
- <sup>4</sup> Andy Gardner。 “PoDL瞬时连接器和电缆短路。” 凌力尔特，2014年9月。

## 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](mailto: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。Dara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，Dara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](mailto: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](http://ez.analog.com/cn)



超越一切可能™

ADI公司  
请访问[analog.com/cn](http://analog.com/cn)

如需了解区域总部、销售和分销商，或联系客服和技术支持，请访问[analog.com/cn/contact](http://analog.com/cn/contact)。

向我们的ADI技术专家提出棘手问题、浏览常见问题解答，或参与EngineerZone在线支持社区讨论。请访问[ez.analog.com/cn](http://ez.analog.com/cn)。

©2019 Analog Devices, Inc. 保留所有权利。  
商标和注册商标属各自所有人所有。

“超越一切可能”是ADI公司的商标。

TA21691sc-11/19

