

通过应力和应变管理， 实现出色的高精度倾斜/ 角度检测性能

Paul Perrault, 高级现场应用工程师
Mahdi Sadeghi, MEMS产品应用工程师

简介

加速度计是一种非常不错的传感器，可以检测到开始倾塌的大桥在重力作用下，呈现细微的方向变化时的静态和动态加速度。这些传感器包括当您倾斜手机显示屏时，可以改变显示屏方向的手机应用器件，也包括受出口管制，可以帮助军用车辆或航天器导航的战术级器件。¹但是，与大多数传感器一样，该传感器在实验室或试验台上表现出色是一回事，面对荒凉、不受控制的环境条件和温度应力时要保持同等的系统级性能，则完全是另一回事了。像人类一样，当加速度计在其生命周期中承受了前所未有的应力时，系统会做出反应并可能因这些应力的影响而发生故障。

高精度倾斜检测系统在校准之后，倾斜精度一般可以优于 1° 。使用市场先进的超低噪声和高度稳定的加速度计，例如ADXL354或ADXL355，通过对可观测到的误差源进行校准，其倾斜精度可以达到 0.005° 。²但是，只有在适当减轻应力的情况下才能达到这种精度水平。例如，传感器承受的压缩/拉应力可能导致其出现高达20 mg的偏移，使得倾斜误差超过 1° 。

本文探讨采用加速度计的高精度角度/倾斜检测系统的性能指标。我们首先从微观角度分析传感器设计，以便更好地了解微米级应力和应变的影响。分析表明，如果不遵循整体的机械和物理设计方法，则会出现一些令人惊讶的结果。最后，为设计人员介绍了有助于在要求严苛的应用中充分提升性能的切实可行的步骤。

ADXL35x传感器设计

从价格和性能角度来看，基于MEMS的加速度计适用于从消费类产品到军用检测的各类应用。在ADI产品组合中，性能最出色的低噪声加速度计是ADXL354和ADXL355，支持精密倾斜检测、地震成像等应用，以及机器人和平台稳定等许多新兴应用。ADXL355具备市场先进特性，使其在高精度倾斜/角度检测应用中具有独特的优势，例如出色的噪声、偏移、重复性和与温度相关的偏移，以及振动校正和跨轴灵敏度等二阶效应。本文将以此种特

定的传感器作为高精度加速度计的示例来详细探讨；但是，本节中讨论的原理适用于绝大多数三轴MEMS加速度计。

为了更好地理解促使ADXL355实现出色性能的设计考量，我们首先回顾传感器的内部结构，阐明三轴对环境参数（例如，平面外应力）做出不同响应的原因。在许多情况下，这种平面外应力都是由传感器z轴上的温度梯度引起的。

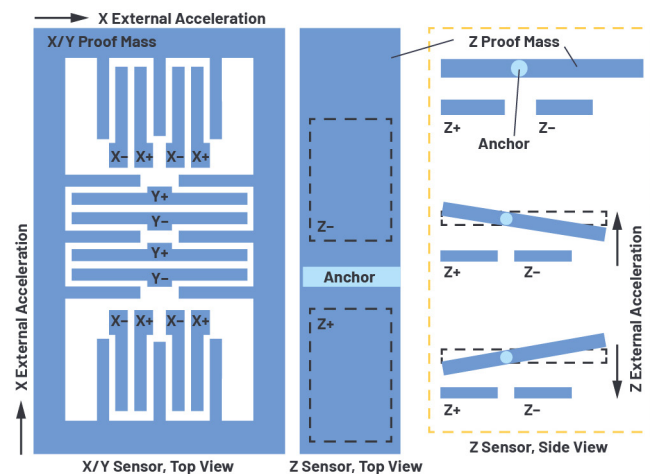


图1. ADXL355的传感器架构。对于X/Y传感器，随着检测质量块的移动，固定指与质量块所连接的叉指之间的电容会发生变化。z轴传感器上的质量块不平衡，因此可以对z轴加速度进行平面外检测。

ADXL35x系列加速度计包含一个弹簧质量系统，这与许多其他的MEMS加速度计类似。质量响应外部加速度（静态加速度（如重力）或动态加速度（如速度变化））而移动，其物理位移通过传导机制进行检测。MEMS传感器采用的最常见的传导机制包括电容式、压阻式、压电式或磁性。ADXL355采用电容传导机制，通过电容变化来检测移动，而电容变化通过读取电路可转换为电压或电流输出。虽然ADXL355对硅芯片上的所有三轴传感器都采用了电容传导机制，但X/Y传感器和Z传感器采用了两种完全不同的电容检测架构。X/Y传感器均基于差分平面内叉指，而Z传感器是平面外平行板电容传感器，如图1所示。

如果传感器上存在压缩应力或拉应力，MEMS芯片会翘曲。由于检测质量块通过弹簧悬挂在衬底上方，所以不会和衬底一起翘曲，但质量块和衬底之间的间隙会发生变化。对于X/Y传感器，由于平面内位移对叉指电容变化的影响最大，所以间隙不在电容灵敏度这个方向，这是由边缘电场的补偿作用导致的。但是，对于Z传感器，衬底和检测质量块之间的间隙实际上是检测间隙。所以，它会对Z传感器产生直接影响，因为它有效改变了Z传感器的检测间隙。此外，Z传感器位于芯片中央，只要芯片受到任何应力，该位置都会产生最大程度翘曲。

除了物理应力之外，由于在大多数应用中，z轴上的热传递都不对称，所以z轴传感器上经常存在温度梯度。在典型应用中，传感器焊接在印刷电路板(PCB)上，而且整个系统都在封装内。X和Y轴的热传递主要通过封装周边的焊点来传递，并传递到对称的PCB上。但是，在z方向，由于芯片顶部存在焊点和对流，所以热传递通过底部传导，热量会通过空气传递到封装外。由于这种不匹配，z轴上会出现残余的温差梯度。与物理压缩/拉应力一样，这会使z轴上出现并非由加速度导致的偏移。

受环境应力影响的数据评述

ADXL354（模拟输出）加速度计可以连接至任何模拟数据采集系统来实施数据分析，而ADXL355评估板经过优化，可直接放入客户系统中，从而简化了现有嵌入式系统的原型设计。为了阐明本文主旨，我们使用了小型评估板EVAL-ADXL35x。为了记录和分析数据，我们将EVAL-ADXL35x连接至SDP-K1微控制器板，并使用Mbed®环境进行编程。Mbed是适用于ARM®微控制器板的开源和免费开发环境，配有一个在线编译器，可以帮助您快速构建。SDP-K1板在连接至PC时，会显示为外部驱动器。要对该板编程时，只需将编译器生成的二进制文件拖放到SDP-K1驱动器中即可。^{3,4}

一旦Mbed系统通过UART记录数据，就形成了一个基本的测试环境，可以尝试进行ADXL355实验，并将输出传输到简单端口，用于记录数据和进一步分析。需要注意的是，无论加速度计的输出数据速率是多少，Mbed代码都以2 Hz的速率记录寄存器。在Mbed中也可以采用更快的记录速度，但本文不做阐述。

良好的初始数据集有助于确定基准性能，并验证我们后续进行的大部分数据分析中可能出现的噪声水平。使用具有吸盘装置的PanaVise铰接式虎钳⁵，这样将该设备粘附在玻璃表面时，就可以通过工作台设置实现相当稳定的工作表面。采用这种配置，ADXL355板（从侧面固定）与实验室工作台一样稳定。更高级的电力用户可能会注意到，安装这种虎钳存在倾翻风险，但这是一种简单而经济的方法，可以根据重力改变方向。如图2所示安装ADXL355板之后，持续60秒采集一组数据进行首次分析。

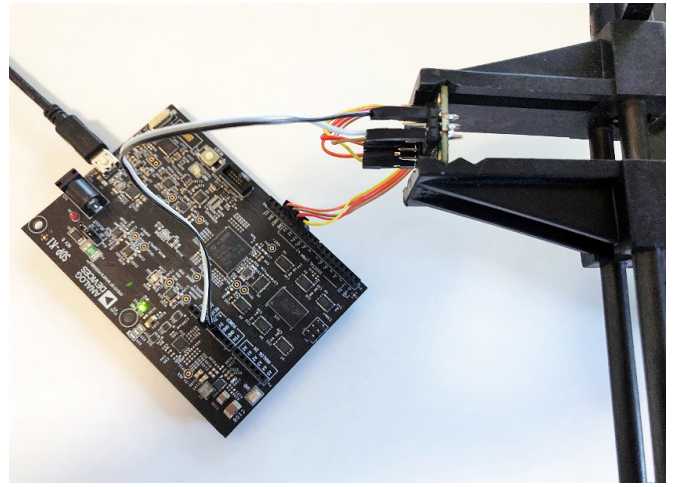


图2. 使用EVAL-ADXL35x、SDP-K1和PanaVise支架的测试装置。

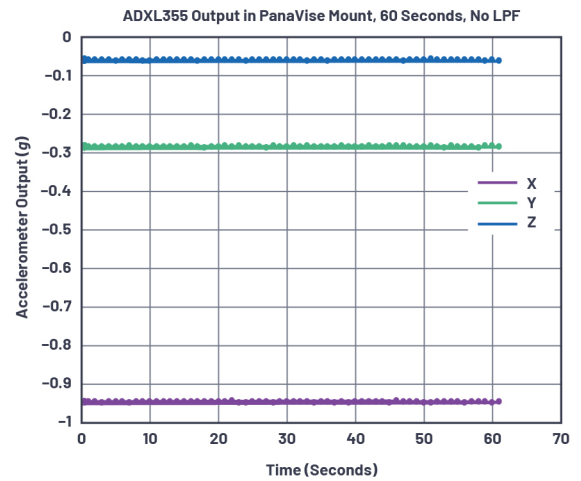


图3. 未采用低通滤波器（寄存器0x28=0x00）时的ADXL355数据，采集数据时长超过1分钟。

取120个数据点并测量标准偏差，显示噪声在800 μg 到1.1 mg之间。根据ADXL355数据手册中的典型性能规格，我们看到列出的噪声密度为25 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。在默认的低通滤波器(LPF)设置下，加速度计的带宽约为1000 Hz。假设采用砖墙式滤波器，此时噪声大约为 $25 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{1000 \text{ Hz}} = 791 \mu\text{g rms}$ 。这个初始数据集通过了首次取样测试。准确地说，从噪声谱密度向有效值噪声的转换采用的系数应可以表示一个事实，即数字LPF不会无限滚降（也就是，一个砖墙式滤波器）。有些使用1.6×系数可实现简单的RC单极点20 dB/倍频程滚降，但ADXL355数字低通滤波器不是单极点RC滤波器。无论如何，假设系数在1和1.6之间，至少可以让我们正确预估噪声近似值。

对于许多精密检测应用，相对于被测量的信号，1000 Hz带宽的范围过于宽大。为了帮助优化带宽和噪声之间的折衷空间，ADXL355采用了一个板载数字低通滤波器。在接下来的测试中，我们将LPF设置为4 Hz，这将使噪声以 $\sqrt{1000/4} \approx 16$ 的噪声系数降低。该测试在Mbed环境中使用图4所示的简单结构完成，数据如图5所示。⁶经过滤波后，噪声如预期一样显著下降。如表1所示。

```

130 // initialize the accelerometer with the right filter corner
131 // Choose 4 Hz for low speed precision
132
133 cs=0;
134 spi.write(FILTER<<1);
135 spi.write(0x08); // Set the filter LPF to be 4 Hz
136 cs=1;
137
138 //

```

图4. 用于配置寄存器的Mbed代码。

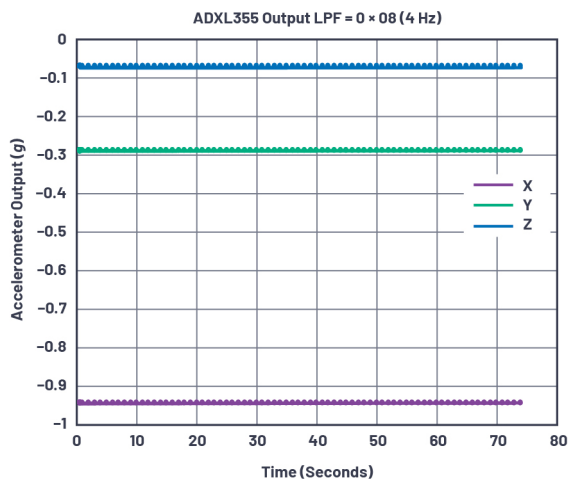


图5. LPF设置为4 Hz (寄存器0x28=0x08) 时的ADXL355数据, 采集数据时长超过1分钟。

表1. ADXL355的预期噪声和测量噪声

噪声	X		Y		Z	
	理论值 (μg)	测量值 (μg)	理论值 (μg)	测量值 (μg)	理论值 (μg)	测量值 (μg)
无滤波器	791	923	791	1139	791	805
4 Hz滤波器	50	58	50	185	50	63

表1显示, 在当前设置下, y轴的噪声高于预期的理论值。在调查了可能的原因后, 我们发现, 额外的笔记本电脑和其他实验室设备风扇的振动可能在y轴上表现为噪声。为了验证这一点, 我们转动虎钳, 让x轴到达y轴原先所在的位置, 结果显示, x轴成为了噪声更高的轴。轴与轴之间的噪声差异则似乎是仪表噪声, 而不是加速度计各轴之间噪声水平本身的差异。这种类型的测试实际上是对低噪声加速度计的“初始”测试, 从而增强了进一步测试的信心。

为了解热冲击会对ADXL355造成多大影响, 我们选用了一把热风枪⁷, 将它调整到冷风模式 (实际上比室温高几度), 以便给加速度计施加热应力。我们也使用ADXL355的板载温度传感器来记录温度。在本次实验中, 我们使用虎钳将ADXL355垂直放置, 用热风枪对封装顶部吹风。我们预期实验过程中偏移时的温度系数会随着芯片温度的升高而显现, 但任何温差热应力几乎会立即呈现出来。换句话说, 如果单个检测轴对温差热应力很敏感, 那么加速度计输出中可能出现大的起伏。删除数据变化较为平缓时的平均值, 就可轻松地同时比较三个轴。结果如图6所示。

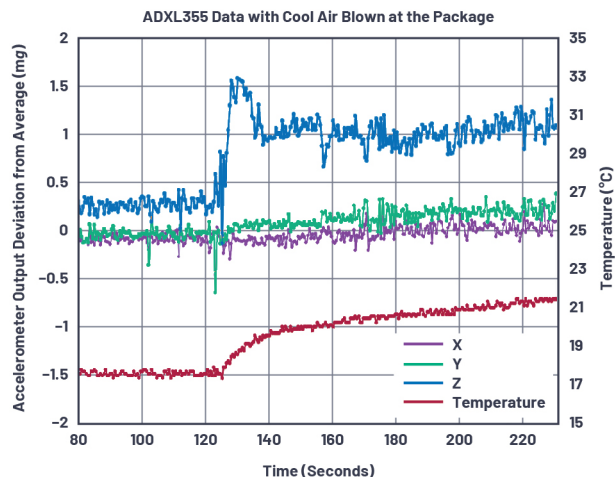


图6. 使用采用冷风模式的热风枪时, ADXL355的热冲击数据。

从图6中可以看出, 用热风枪将温度稍高的风吹到密封型陶瓷封装上。结果, z轴上出现~1500 μg的偏移, y轴上的偏移要小的多 (可能为~100 μg), x轴上则几乎无偏移。虽然许多最终客户产品的PCB顶部有外壳, 可以分散温差热应力, 但我们需要考虑这些类型的快速瞬变应力, 从这个简单测试中可以看出, 这些应力可能会表现为偏移误差。

图7显示了关闭热风枪之后, 呈现的相反的极性效应。

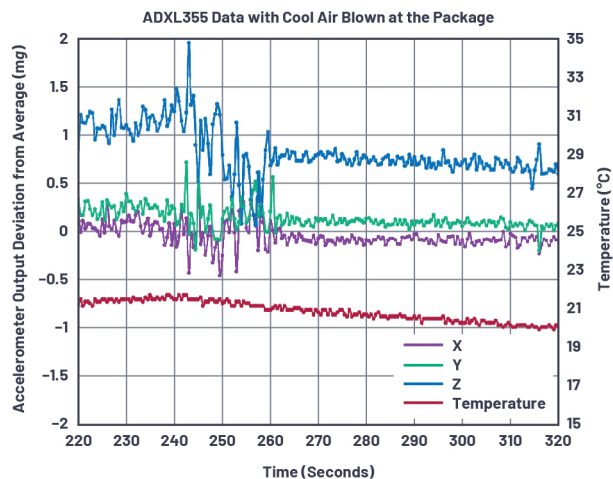


图7. 在t=240秒关闭热风枪时, ADXL355受到的热冲击。

在加热环境中使用热风枪时, 这种效果更加明显; 即温度冲击的幅度更大时。Weller热风枪的输出温度约为400°C, 所以在使用时, 需间隔一段距离, 以免因为过热或热冲击造成损坏。在本次测试中, 热风枪在距离ADXL355大约15 cm的位置吹出热风, 导致温度立即升高大约40°C, 如图8所示。

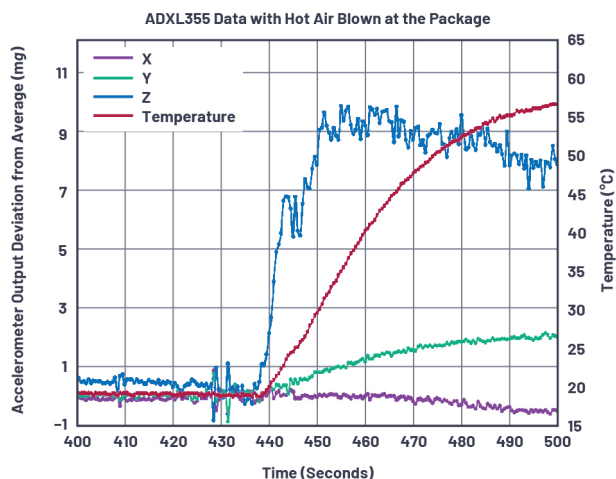


图8. 使用热风枪时，ADXL355受到的热冲击。

尽管热冲击的强度相当大，但在本次实验期间，仍然可以明显看到，z轴的反应速度要比x轴和y轴快得多。使用数据手册中的偏移温度系数，当温度发生40°C偏移时，将会看到约 $100 \mu\text{g}/^\circ\text{C} \times 40^\circ\text{C} = 4 \text{ mg}$ 的偏移，x轴和y轴最终会显示这一点。但是，我们发现，z轴上几乎立刻出现10 mg偏移，说明这种影响与温度导致的偏移不同。这是由传感器上的温差热应力/应变造成的，在z轴上表现得最明显，这是因为，如前文所述，相比x和y轴，z轴上的传感器对温差应力更敏感。

在数据手册中，ADXL355的典型偏移温度系数（失调温度系数）为 $\pm 100 \mu\text{g}/^\circ\text{C}$ 。我们需要理解此处所用的测试方法，这非常重要，因为失调温度系数是在烤箱中使用加速度计进行测量的。在传感器的温度范围内，烤箱温度慢慢上升，我们测量偏移的斜度。典型示例如图9所示。

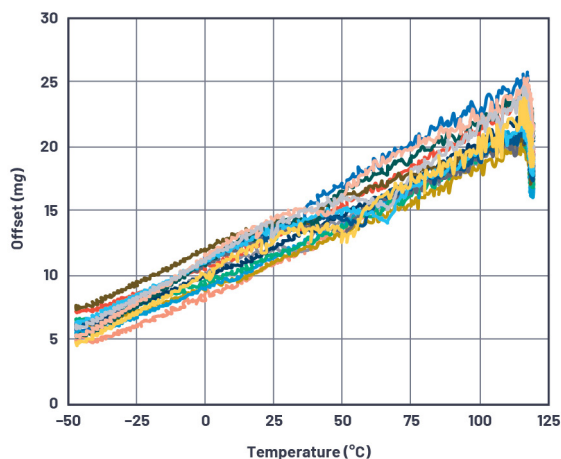


图9. ADXL355在烤箱中进行测试的温度特性。

图中显示了两种影响。一种是数据手册中描述和记录的失调温度系数。这是烤箱以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度升温，但不保温的情况下，在 -45°C 到 $+120^\circ\text{C}$ 温度范围内许多产品的平均值。从与图9类似的图表中可以得出此结果，且可以指出在高于 165°C 时为18 mg，或约 $109 \mu\text{g}/^\circ\text{C}$ ，稍微超出 $100 \mu\text{g}/^\circ\text{C}$ 典型值的范围，但仍在数据手册

规定的最小值和最大值范围内。但是，考虑一下图9右侧所示的情况，让器件在 120°C 下保温15分钟会怎么样。当设备处于高温下时，实际的偏移量下降并改善。在这种情况下，平均值在高于 165°C 时接近10 mg，或失调温度系数约为 $60 \mu\text{g}/^\circ\text{C}$ 。产生的第二种影响与温差热应力有关，传感器检测质量块在整个硅芯片器件的温度范围内稳定下来后，应力随之降低。图6到图8所示的热风枪测试也显示了这种影响，与数据手册中列出的长期失调温度系数相比，这种影响会在更短的时间量程内显现，了解这一点非常重要。对于因受总体的热动力学影响，升温速度远远慢于 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的许多系统而言，上述发现很有价值。

影响ADXL355稳定性的其他因素

在深入理解设计中的热应力之后，还需了解惯性传感器的另一个重要方面，即其长期稳定性或可重复性。可重复性是指在相同条件下长时间连续测量的准确性。例如，在一段时间内，对相同温度下同一方向的重力场进行两次测量，并观察其匹配程度。对于无法定期实施维护校准的应用，在评估传感器的长期稳定性时，偏移的可重复性和灵敏度是至关重要的因素。许多传感器制造商未在其数据手册中描述或规定长期稳定性。在ADI的ADXL355数据手册中，可重复性为10年寿命预测值，包括高温工作寿命测试(HTOL) ($T_A = 150^\circ\text{C}$ 、 $V_{\text{SUPPLY}} = 3.6 \text{ V}$ 、1000小时)、测量温度循环 (-55°C 至 $+125^\circ\text{C}$ 且循环1000次)、速度随机游走、宽带噪声和温度迟滞引起的测量偏移。如数据手册中所示，ADXL35x系列具有出色的可重复性，ADXL355的X/Y传感器和Z传感器的精度分别为 $\pm 2 \text{ mg}$ 和 $\pm 3 \text{ mg}$ 。

在稳定的机械、环境和惯性条件下，可重复性遵循平方根定律，因为它与测量的时间有关。例如，要获得x轴在两年半的时间里（对于最终产品来说，可能是很短的一段时间）的偏移可重复性，可以使用以下公式计算： $\pm 2 \text{ mg} \times \sqrt{(2.5 \text{ 年}/10 \text{ 年})} = \pm 1 \text{ mg}$ 。图10显示在23天内，32个器件的HTOL测试结果：偏移为0 g。在此图中可以清楚地看到平方根定律。还应该强调的是，由于MEMS传感器制造过程中的工艺差异，每个器件的性能都不同，有些器件的性能优于其他器件。

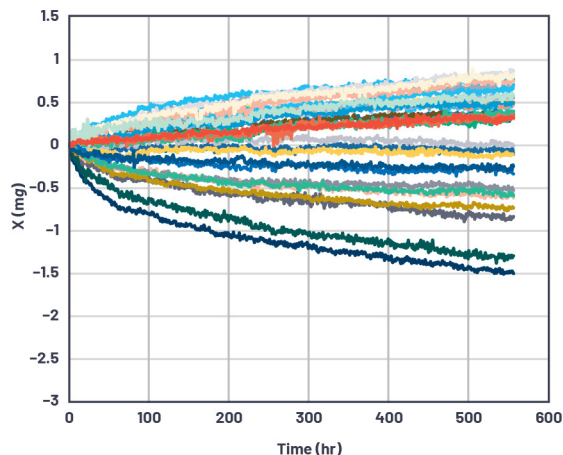


图10. ADXL355长达500小时的长期稳定性。

机械系统设计建议

经过上述分析探讨，很明显可以看出，机械安装表面和外壳设计可以帮助提升ADXL355传感器的总体性能，因为它们会影响传递给传感器的物理应力。一般来说，机械安装、外壳和传感器会构成一个二阶（或更高阶）系统；因此，在谐振或过阻尼期间，它会做出不同的响应。机械支持系统具有代表这些二阶系统的模式（由谐振频率和品质因数定义）。在大多数情况下，我们的目标是了解这些因素，并尽量减少它们对传感系统的影响。因此，选择的传感器的封装外形、所有接口和材料都应该能够避免在ADXL355应用的带宽内造成机械衰减（因为过阻尼）或放大（因为谐振）。本文对这些具体的设计考量因素不予过多探讨；但是，会简要列出一些实用项：

PCB、安装和外壳

- ▶ 将PCB牢固地粘接在刚性衬底上。使用多个安装螺钉，并在PCB背面使用粘胶，确保牢靠支持。
- ▶ 将传感器放置在靠近安装螺钉或紧固件的位置。如果PCB体积较大（约几英寸），则在板中央使用多个安装螺钉，避免PCB出现低频振动，因为这种振动会影响加速度计的测量结果。
- ▶ 如果PCB只是由凹槽/凸沿结构提供机械支撑，则使用更厚的PCB（推荐厚度大于2 mm）。在PCB尺寸较大时，增加其厚度来保持系统的刚性。使用有限元分析（例如ANSYS或类似分析），针对特定设计确定最佳PCB外形尺寸和厚度。
- ▶ 对于一些应用，例如对传感器实施长时间测量的结构健康监测应用，传感器的长期稳定性至关重要。在选择封装、PCB和粘胶材料时，应选择在长时间性能下降或机械特性变化最小的产品，以免给传感器带来额外的应力，进而导致出现偏移。
- ▶ 避免对外壳的固有频率进行假设。对简单的外壳实施固有振动模型计算，对复杂的外壳设计实施有限元分析，将会很有帮助。
- ▶ 将ADXL355和电路板焊接在一起会产生应力，导致出现高达几mg的偏移。为了减轻这种影响，建议PCB焊盘图案、导热片和铜走线导热路径采用对称布局。严格遵守ADXL355数据手册中提供的焊接指南。我们还发现，在某些情况下，在校准前实施焊料退火或热循环可以帮助缓解应力累积和帮助管理长期稳定性问题。

灌注材料

灌注材料广泛用于将电子器件固定在外壳内。如果传感器封装采用的是二次成型塑料，例如连接盘网格阵列(LGA)，则不建议使用灌注材料，因为它们的温度系数(TC)与外壳材料不匹配，会导致压力直接影响传感器，从而发生偏移。但是，ADXL355采用气密陶瓷封装，可以有效保护传感器不受TC影响。但是，灌注材料可能仍会在PCB上形成应力累积，这是因为随着时间流逝，材料的性能会退化，导致硅芯片出现微小翘曲，在传感器上形成应力。对于需要在长时间内保持稳定性的应用，一般建议避免使用灌注。低应力保形涂层（例如C型聚对二甲苯）可以提供一些防潮层，用于代替灌注。⁸

气流、热传递和热平衡

为了达到最佳的传感器性能，需要在温度稳定性得到优化的环境中设计、放置和使用检测系统，这非常重要。如本文所示，由于传感器裸片上存在温差热应力，即使微小的温度变化也可能导致意想不到的后果。以下是一些建议：

- ▶ 应将传感器置于PCB上，以最大限度降低传感器上的热梯度。例如，线性稳压器会产生大量热量；所以，它们在接近传感器时，会在MEMS上产生热梯度，并且热梯度将会随着稳压器的电流输出不同而变化。
- ▶ 尽可能将传感器模块部署在远离气流（例如HVAC）的区域，以避免频繁的温度波动。如果不可行，在封装外部或内部采取热隔离会大有帮助，可以通过热绝缘实现。注意，传导和对流热路径都需要考虑。
- ▶ 建议选择外壳的热质量，使其可以在无法避免环境热变化的应用中抑制环境热波动。

结论

本文阐述了在未充分考虑环境和机械影响的情况下，高精度ADXL355加速度计的性能会如何下降。通过整体的设计实践，同时关注系统级配置，敏锐的工程师可以获得出色的传感器系统性能。我们许多人都承受着前所未有的生活压力，但永远不会压倒我们，重要的是面对压力我们如何应对，加速度计也是这样，认识到这一点非常重要。

参考资料

¹ Chris Murphy. “为应用选择最合适的MEMs加速度计——第一部分。”《模拟对话》，第51卷，第4期，2017年10月。

² Chris Murphy. “温度变化及振动条件下使用加速度计测量倾斜。”《模拟对话》，2017年8月。

³ SDP-K1评估系统。ADI公司。

⁴ Mbed; SDP-K1用户指南。ADI公司。

⁵ PanaVise铰接式托架。PanaVise。

⁶ Mbed代码。ADI公司。

⁷ Weller 6966C热风/冷风枪。Weller。

⁸ Parylene。维基百科。

作者简介

Mahdi Sadeghi是ADI公司AIN技术部的MEMS产品应用工程师。他于2014年获得密歇根大学安娜堡分校的电气工程博士学位。他的博士论文，以及作为无线集成微系统工程研究中心(ERC WIMS)的研究员开展工作时，主要是为无人机和自动汽车平台开发传感微系统。他拥有微液压传感器和驱动器、微流体系统、适用于可穿戴设备的惯性传感系统设计，以及状态监控应用的传感解决方案等相关经验。联系方式：mahdi.sadeghi@analog.com。

Paul Perrault是一名高级现场应用工程师，工作地点在加拿大卡尔加里。他在ADI公司工作了17年，负责过100多种CPU放大器电源设计以及nA级传感器节点和节点间所有电流电平设计。他拥有加拿大萨斯喀彻温大学电气工程理学学士学位以及波特兰州立大学电气工程硕士学位。业余时间，他喜欢在乡间滑雪、在落基山石灰岩上攀岩、去当地的山丘爬山，并与年轻的家人一起在户外度过美好时光。联系方式：paul.perrault@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

