

航空航天推进器高温加速度计的设计和选择标准

介绍

在航天推进系统中,用于测量的加速度计和压力传感器在设计和制造过程中需要特别考虑。专门的应用经常需要使用单独的传感器型号,必须能够在更宽的温度范围内使用,例如, -251°C 至 $+705^{\circ}\text{C}$ (-420°F 至 $+1300^{\circ}\text{F}$), 同时提供高精度、稳定性和可靠性。高温航空航天推进传感器的典型应用包括在飞行和测试单元中测量燃气涡轮发动机,以及火箭发动机和推力器总成。同样的传感器可能需要承受辐射,并被用于监测核电站或宇宙飞船内部的振动,或液体推进剂的低温条件。这些环境带来了大量的测量挑战。

材料和施工技术必须得到优化,不仅要提高高温性能,而且要允许在不退化的情况下,在伽玛和中子辐射中进行操作。无论是在飞机发动机、航空器还是发电站,这些传感器必须提供高水平的准确性、稳定性和可靠性。因此,在设计和制造过程中,诸如低温和高温等极端环境中使用的仪器需要特别考虑。本文将讨论新型高温剪切模式加速度计的设计与选择标准及其对涡轮发动机健康监测的好处。

命名如下:

BiTi	=	压电陶瓷晶体铋钛酸盐
dB	=	分贝, $20 \log(a / a_0)$
$^{\circ}\text{C}(^{\circ}\text{F})$	=	摄氏度(华氏度)
FFT	=	快速傅里叶变换
FRF	=	频率响应函数
g, 1g	=	9.8 米每秒的平方
g - pk	=	正弦波的峰值加速度
g-pk-pk	=	完全正弦波, 峰到峰加速度振幅
Hz	=	周期每秒的频率
IR	=	绝缘电阻, 单位欧姆
mV / g	=	加速度计的灵敏度, 每 g 多少毫伏
pC	=	pico - coulomb, 测量电荷
Q 因子	=	质量因子描述一个欠阻尼谐振器
RFI	=	射频干扰
rms	=	均方根值, 0.707 乘以 g - pk
UHT-12 TM	=	合成压电单晶
V	=	伏特

一、燃气轮机发动机监测传感器

发动机健康监测加速度计的主要目的是检测与不平衡状态有关的高振动水平；然而，也可以通过数据执行额外的发动机健康监测。与发动机健康监测需求相关的具体性能需求最终决定了功能需求(例如:加速度计的频率响应)。



(图 1) 649°C (1200°F) 中的振动测试

在十几年的时间里，UHT-12TM晶体的357E90型剪切模式加速度计在地面以及航空衍生物涡轮发动机(图2a)上提供了成功的振动测量。这个系列产品的最新产品是一个差分剪切输出版本，型号EX611A20(图2b)



图 2a



图 2b

UHT-12TM 剪切模式加速度计

航空燃气涡轮发动机振动监测应用中存在重大技术挑战。传感器必须在较高的操作温度下，在高振幅、高频振动的情况下，解决低振幅、低频振动问题。发动机平衡读数仪表将加速度积分成速度或位移。当加速度被积分时，即使是低水平的失真也会在速度和位移信号中产生较大的误差，很容易超过发动机的平衡报警水平。虽然对时域或FFT数据的分析可以用作诊断工具，但很难(如果不是不可能的话)从平衡仪表处理的数据中区分出根本原因。有许多潜在的设计准则可以在低频率下引起信号异常。更详细地请查看一下这些特征及其与加速度计性能的关系。

二、材料选择

压电传感器由天然压电晶体和人工极化多晶硅铁电陶瓷制成。传感材料的选择取决于环境和性能要求。每一种材料都有其独特的特点和优点，在不同的应用中表现出它的特点。天然水晶往往提供最高的温度范围和最低(或零)热电输出。然而，在等效的电荷输出情况下，铁电陶瓷提供了扩展的频率范围和更小的尺寸。表1根据温度和热电磁化率对物料类型进行排序，从而使其适合于热压负荷不稳定的发动机应用。

Natural versus Ceramic Crystals					
Material	Natural Piezoelectric Single Crystals	Ferroelectric Ceramic, Piezoceramics	Piezoelectric Coefficient pC/N	Maximum Useable Temp °C	Pyroelectric
UHT-12 shear	X		12	650	No
UHT-12 compression	X		6	650	No
Quartz shear	X		4	250	No
Quartz compression	X		2.2	200	No
Tourmaline shear	X		3.5	650	Yes
Tourmaline compression	X		1.8	650	Yes
Bismuth Titanate		X	21	500	Yes
Bismuth Titanate derivatives		X	14	600	Yes

(表1) 压电材料举例

单一的天然晶体，如石英和电气石，本质上是压电的。大多数用于传感器的自然产生的单晶都是在实验室里而不是在开采中生长的，从而可以保证质量的一致性降低了供应的风险。此外，天然水晶的人造方面能使新的、更高的性能变化得以发展。电气石是个例外，它只有通过采矿才能获得，因此供应链是不确定的，而且成本也变得过高，无法在传感器中使用。

铁电陶瓷材料本身并不具有压电性，因为在化学配方中，它们是一个随机的多晶体取向。为了使陶瓷成为压电材料，每个晶体结构的单个偶极必须对齐。对齐过程包括对材料施加高电压，以使铁电陶瓷元件内的两极区域对齐。人工极化过程完成后，被称为“极化”，晶体可能经历一个预老化过程，然后可以在传感器中使用。

铁电陶瓷具有明显更高的灵敏度或每单位力的电荷输出。一种常用的高温传感器材料BiTi(铋钛酸盐)，它的产量是天然水晶的三到四倍。BiTi可用温度高达510°C(950°F)。陶瓷材料中可以添加各种化合物来改变传感器的特性，但是高温的范围是以牺牲灵敏度为代价的。BiTi的缺点包括在传感器内部对一个经过仔细控制的环境条件的要求，以及一个永久稳定的氧气压力水平，以保持其运行特性。

新的UHT-12™晶体在任何大气中都很适用，这些传感器充满惰性气体，如氩气或氮气。UHT-12™水晶不表现出任何热电输出，并提供可靠的操作温度接近650°C(1200°F)。虽然这种材料的原始电荷输出不像通常使用的BiTi那样高，但是材料的额外好处包括相对较低的电容和较高的工作温度的绝缘电阻，当使用差分电荷放大器时，会导致低噪声操作。

一个经常被忽视的BiTi和UHT-12™的比较是在一种用于剪切方向的传感元件配置中使用材料的能力。物理和过程限制阻止了BiTi在剪切模式下运行，因此传统的高温传感器仍然

是用压缩模式传感元件制造的。另一方面，如果做适当的准备，UHT-12™可以用于剪切配置。在第五节中进一步讨论了这两种传感元件配置的优点和特性：机械装配。

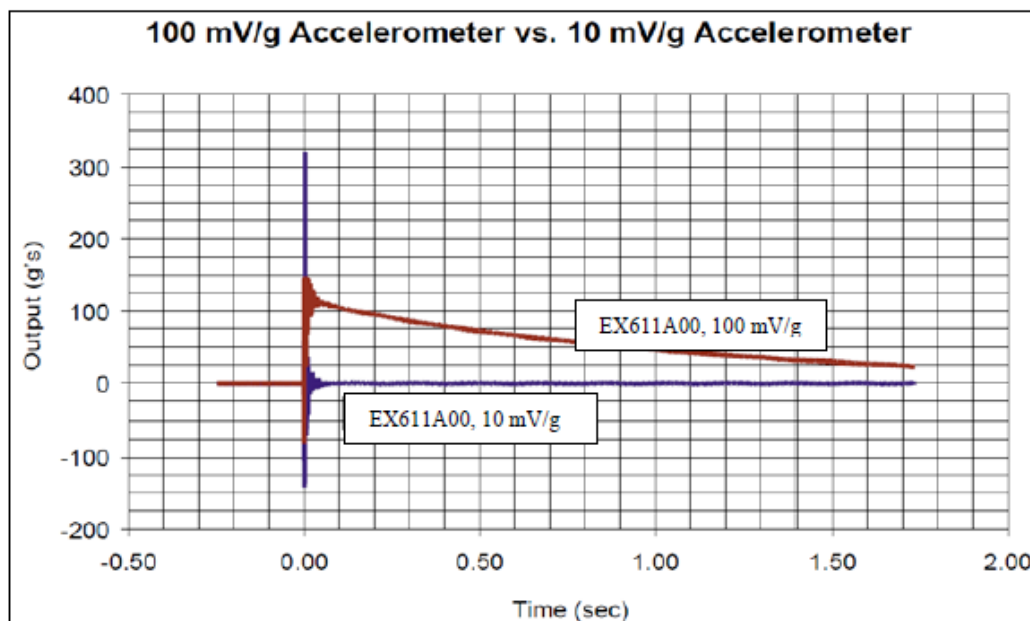
三、绝缘电阻

极低的IR (绝缘电阻) 可以产生电荷放大器的信号输出漂移;然而，这不是一个设计正确满足产品规格的加速度计，并与适当设计的电荷放大器一起使用时常见的问题。现有BiTi 发动机加速计在485°C(905°F)温度下可能IR值约100 k欧姆, 而在相同的温度下UHT-12™晶体的值大约是十倍。虽然任何电荷放大系统的噪声都依赖于多种因素，但UHT-12™的较大IR值是一个重要的优点，因为系统噪声增益是电荷放大器中的反馈电阻和输入电阻的函数。较大的IR值降低系统噪声增益。在下面的第七节中，由于这个原因，新的10 pC / g传感器的分辨率可以与传统的高灵敏度50 pC / g BiTi传感器相媲美。除了作为决定测量系统固有分辨率的因素外，系统噪声增益也具有放大外部噪声的特性(如RFI)，因此是一个重要的特征。新的UHT-12™加速度计将会对外部施加的噪音敏感度比基于BiTi的系统低约8分贝(2.5倍)。

四、轴向共振引起的电气削波

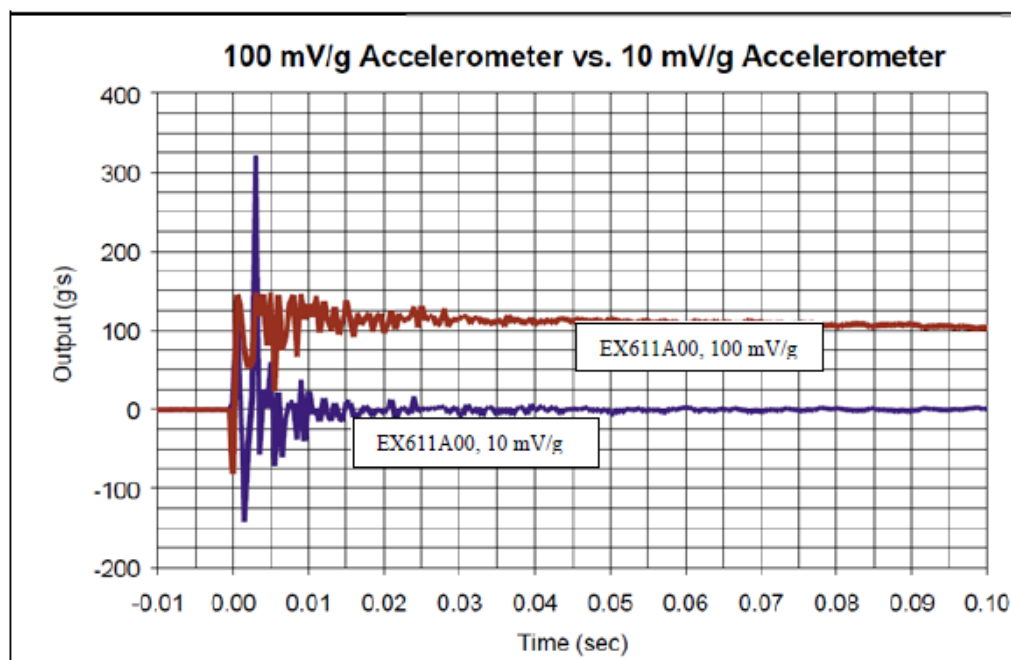
大的振动水平可以超过放大器的量程，导致错误的低频信号。更常见的是，超量程是加速计的机械共振激发的结果。压电加速度计具有非常高的Q因数，其共振放大倍数接近100x。如果激励频率与加速度计的谐振频率相对应，则可以将10g信号放大到1000g，超过电子器件的量程。如果观察到，低频误差与加速度计共振的激发同时发生，这个问题可以从光谱输出的观察中得到诊断。如果在完成测试并对数据进行评估后，测试工程师观察到明显的数据存在问题的迹象，例如基线电压的衰减或强制响应FRF测量的一致性下降，可能是信号被裁掉的结果。

图3显示了UHT-12™型号EX611A00，通过电荷放大器系统转换为灵敏度为100 mV / g 加速度计。它测量的信号峰值，饱和，然后基准电压指数衰减回到零。这种类型的行为表明输入超过了100 mV / g系统的加速度计测量范围(50g - pk)和饱和的电荷放大器。在100 mV / g系统中，错误的峰值输出表明峰值水平为150 g - pk，重新调整量程后的UHT-12™型号EX611A00为10 mV / g加速度计系统，测量的数据表明，峰值水平为325 g - pk。由100 mV / g加速度计测量的实际峰值水平，是电荷放大器饱和限制其最大输出的结果。10mV / g系统的325 g -pk输出在500g - pk的规格量程范围内。



(图3) 加速度计输出信号

图4中扩展的信号显示了加速度计电荷放大器系统的幅值水平，其结果是100 mV / g灵敏度不同于10 mV / g系统。信号超过了50 g - pk的测量范围，并饱和了较高灵敏度(100 mV / g)、低量程范围(50 g)加速度计。有时，图4所示的信号可能与加速度计的故障相混淆，甚至更糟的是，如果只看频域数据，就根本没有注意到。



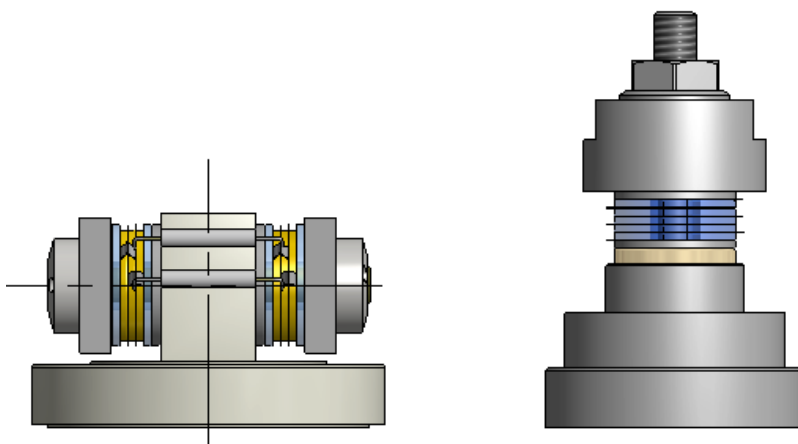
(图4) 加速度计输出信号，扩展了时间轴

解决这个问题的一个方法是设计一个加速度计，它的轴向共振不符合发动机叶片通过频率或发动机中任何其他事件的自然频率。为了实现这一目标，对于加速度计设计者来说，与

发动机仪表系统集成商密切合作是非常重要的。或者，由于传感器与电荷放大器(通常是发动机监控器的一部分)一起工作，所以通常很好的测量方法是信号通路使用低通滤波器。这不仅降低了共振的Q因子，而且还增加了扩展传感器的有效平坦区域的频率响应。

五、机械装配

一种天然的单晶材料可以在剪切或压缩模式下使用(图5)。剪切模式设计会产生电荷。剪切方向vs压缩。由于剪切模式的配置压电晶体, 不太容易受到基座应力 (压力基本在晶体上不转化为压力), 不太容易受到与热瞬态有关错误的影响, 更重要的是选择性的拒绝互调效果, 抗偏轴应力输入和热特性几乎是免疫的。

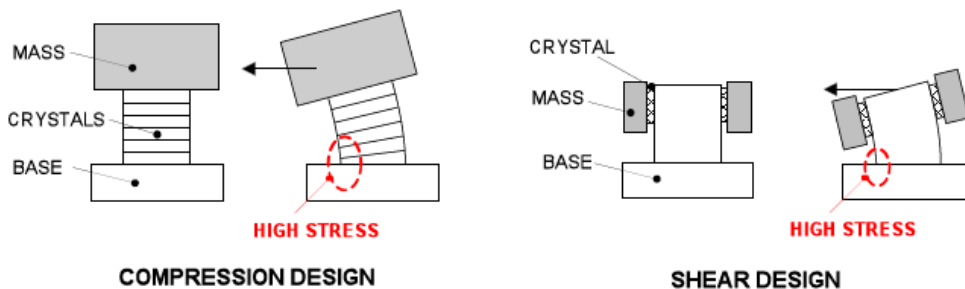


(图5) 剪切模式(左)及压缩模式(右)的装配

A: 横向共振

燃气轮机的叶片通过频率可引起加速度计的横向共振。一般来说，剪切模加速度计的横向共振设计范围从标称轴向谐振频率的约67%到75%; 压缩设计大约是名义轴共振频率的33%。在横向激励下，加速度计的振动灵敏度很小，信号输出通常很小，不超过电子器件的量程范围。然而，由于高Q(在横向方向约50)，低水平振动的频率与横向共振会导致质量块的大振幅运动。这种大的振幅运动将非均匀的应力施加到压缩模式设计的加速度计晶体上，经常导致扭曲的非线性信号。这种扭曲的信号将包含低频率谱成分，它们混合后会出现假的低频信号。在时域内，由于晶体呈非线性应力，畸变会出现大量的小台阶。如果横向激励被另外一个40赫兹的低频调制，高频横向振动信号将被错误调制到40Hz(互调失真)。

除了具有一般较高的横向谐振频率外，新的剪切加速度计设计还提供了两个额外的优点。首先，与压缩设计不同的是，当受到横向振动时，晶体与最高弯曲应力区域机械解耦，如图6所示。第二，与压缩晶体不同，剪切切割晶体只对所期望的剪切应力作出响应，对压缩、弯曲和平面应力没有响应。



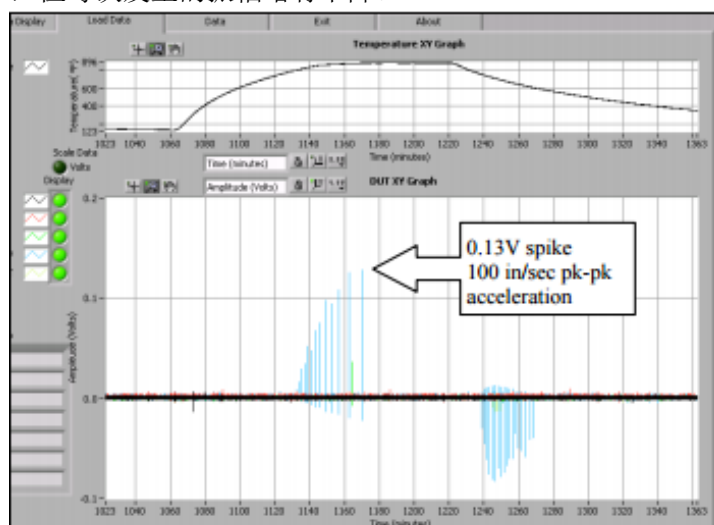
(图6) 横向振动产生的压力

“横向激励另一方面发生在共振之外的频率。”在涡轮飞机发动机中，高频(如:13 kHz)叶片传递激励可以达到极高的水平(数百个g的rms)。在这种情况下，加速度计的质量块的横向运动将会很大，尽管13 kHz的激励与加速度计的共振不相对应。这个问题不能通过改变加速度计的横向共振频率来解决。在压缩设计中，通过特别注意设计晶体堆栈方面提高加速度计的线性度，如:表面光洁度、镀层、平整度、堆栈预负荷和堆栈同心度等解决了问题。正如前面所指出的，剪切模式的设计要宽容得多。传感晶体的位置以及它们在剪切模式结构中运行的事实，本质上导致了较少的不需要的输出。

B. 杂散噪声来源

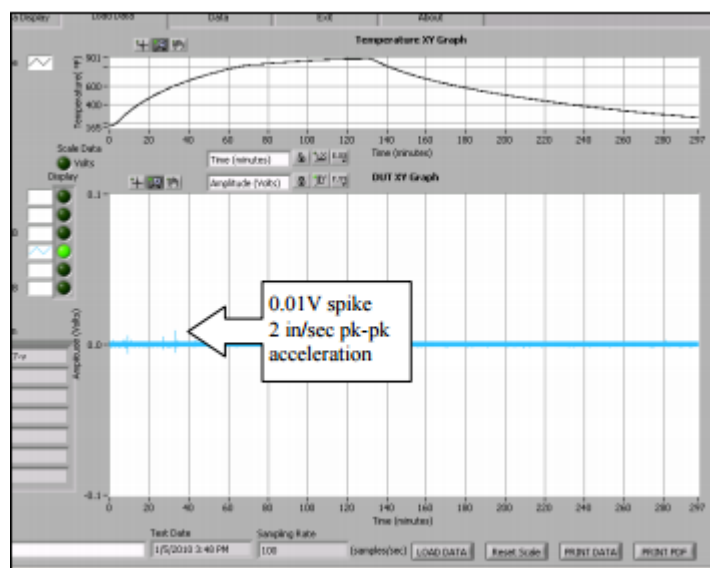
当受到温度梯度时，压缩元件组件(如图6所示)将经历不同的配合面和预载螺栓的差异膨胀/收缩。当差异膨胀足够大时，传感器可以产生相应的电功率输出，当应力释放时，部件瞬间相互滑动。此外，压电陶瓷和电气元件都是热电性，这意味着电荷是由于温度的变化而产生的。在时域内，这两个虚假噪声源可以作为一个阶跃输出，以信号调节器的时间常数的速率衰减。示例数据如图7所示，用于压缩加速计的设计。

此数据揭示了正向的峰值输出大约13 g当温度增加到483°C (900°F), 时间1170分钟。当积分到速度时，结果是100 in / sec pk - pk。在冷却阶段，尖峰现象重复出现，在负极方向以更大的速率，但每次发生的振幅略有下降。



(图7) 压缩模式热响应的一个示例数据集

新的UHT-12™剪切设计，仅对剪切应力进行响应，对热变化具有更大的容忍度，因为这些变化发生在加速度计的主轴上，而传感元件的方向为90度，为振动的主轴。剪切模式UHT-12™加速度计始终显示低振幅峰值。UHT-12™也没有热电输出，这在热瞬变事件中是一个额外的优势。图8显示了新UHT-12™剪切设计热响应的一个示例数据集。



(图8) 剪切设计热响应的一个示例数据集

对于发动机平衡仪表，加速度计的阶跃输出看起来像一个大的低频信号。问题发生在温度变化的过程中，比如从怠速到全速起飞。

六、热电影响

温度、带宽、安装和其他方面的权衡都必须在高温应用中加以考虑。温度效应超出了操作环境的限制。温度变化可能产生额外的输出，并可能改变灵敏度和其他参数。压电传感器不能在恒定温度下产生输出，因为它们不能在任何恒定的输入下产生输出。然而，它们可以对温度的变化产生一个输出。

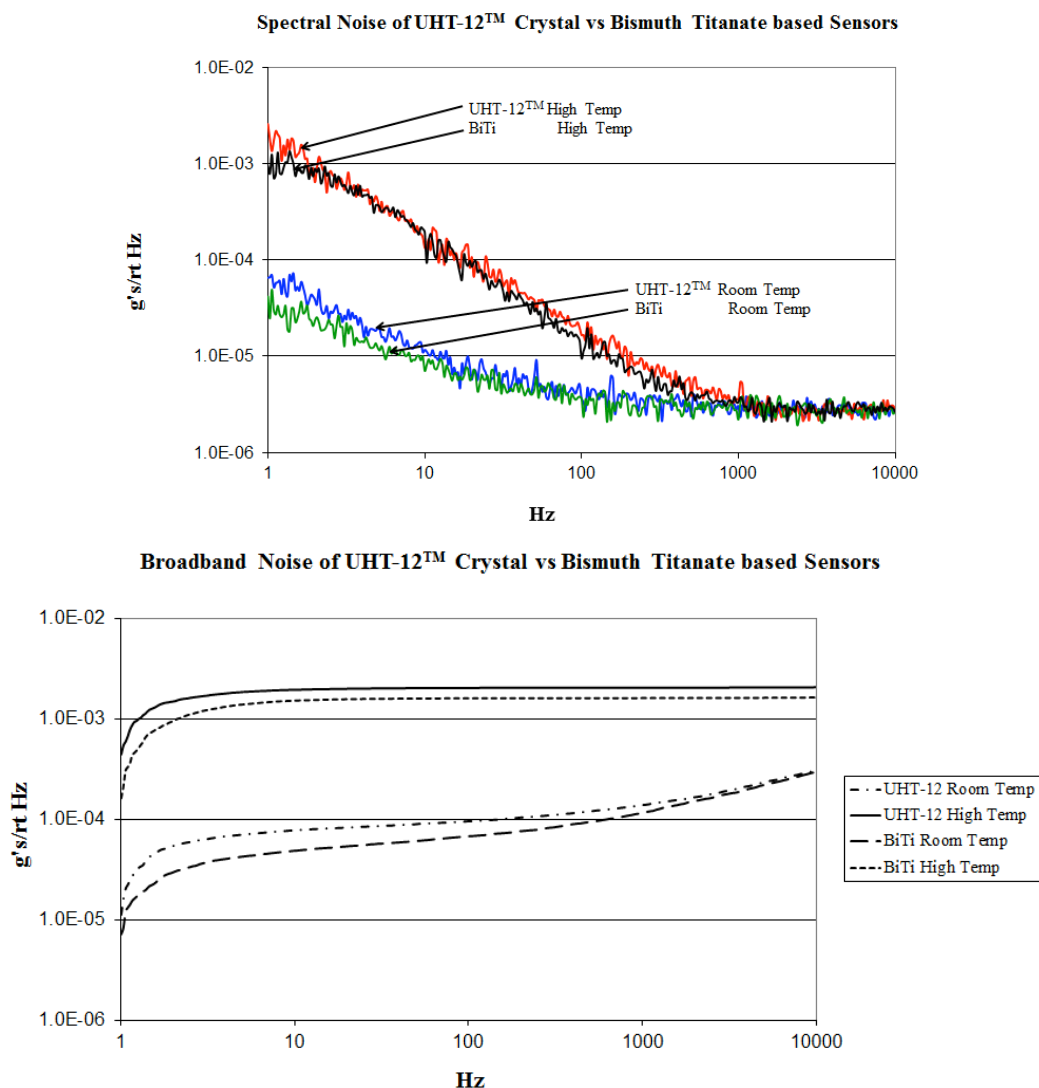
一些压电材料通常以热电方式表现，并产生响应温度梯度的输出。与这些温度梯度相关的热膨胀倾向于改变晶体-传感器组件的预载应力，并进一步加剧传感器输出。有时，压电传感器可以显示出在巨大的温度变化后输出的尖峰脉冲，这可以归因于热电场的静电表面放电。热电放电后的峰值不仅与压电材料有关，而且与传感器的各个部件的设计和加工有关。

在压缩模式中使用铁电陶瓷材料的设计将比压电剪切设计或使用天然水晶的热电输出更大。首先，压缩模式加速度计的压电材料直接与环境通过传感器的基座耦合。第二，铁电材料对垂直于极化轴的表面的均匀温度变化敏感。

热电输出是一种低频现象，通常远低于感兴趣的频率范围。在测量系统电子学中，可以通过使用高通滤波降低其影响。

七、信号噪声比

虽然传统的BiTi生产的灵敏度为50 pC / g，而UHT-12™水晶只能提供5~10 pC / g并已证明适合涡轮振动测量。这种低灵敏度为更小的部件、更轻的重量和更广泛的频率响应提供了更多的机会。在当今的低噪音电子和高动态范围模拟数字转换器的世界里，根本不需要一个更大、更高灵敏度的元素。事实上，当UHT-12™传感元件与传统的BiTi传感器相比具有较低的电容和较高的绝缘电阻时，它与一个合适的差分电荷放大器结合，提供了一个标准化的25 mV / g输出(产生+ / - 5 V的波动，量程+ / - 200 g)。动态范围大于120分贝，提供一个比0.002 g (宽带从1hz到10,000 Hz) 更好的测量分辨率。



(图9) UHT-12™晶体传感器与BiTi传感器的信号噪声比

两个配置传感器的比较:一个具有非常高的绝缘电阻(如传感器暴露在室温下)和一个较低的绝缘电阻(如每个传感器暴露在485°C)。可以看出，绝缘电阻的降低在两种情况下都增加了系统的噪声。但是请注意，两个系统的系统分辨率是相当的。虽然新的UHT-12™加速

度计的电荷输出是BiTi传感器的1 / 5,但两者都有大约2mg的本底噪声(相对于规定的10mg)。

八、结论

传感器理论和实际的发动机数据都支持加速度计采用高温剪切技术作为超过传统压缩设计成为首选测量解决方案。商用、合成、天然压电晶体(UHT-12™)的使用,提供了更高的操作温度、无热电输出、更高的绝缘电阻、更好的长期可靠性和长期的商业采购安全性等额外好处。注意UHT-12™材料也允许使用剪切敏感元件配置。高温BiTi材料不能在剪切结构中发挥作用。

在UHT-12™剪切模式、高温加速计和压缩模式设计的发展过程中,已经得到了一些经验教训。

1. 剪切模式对比压缩模式设计的测量误差更小
2. 剪切结构的螺栓是对称的,使输出非线性最小化,特别是传感器共振处
3. 使用惰性气体可以最大限度地减少污染问题和内部零件的氧化
4. 在考虑温度和振动的极端情况下,传感晶体元件堆栈前的螺栓预拉伸方法和设计提供了一致的预压
5. 选择合适的超级合金金属可以使感应晶体元件堆栈随温度增长最小化,从而使预载更均匀
6. 采用非热电晶体材料可以减少热误差
7. 采用合成晶体材料如UHT-12™对比BiTi,以改善长期稳定性,晶体材料不会因氧气缺乏而降低性能
8. 采用合成晶体材料,如UHT-12™对比BiTi,扩展高端传感器温度范围(相位变化点大于1427°C(2600°F))

若您对本文有任何问题,请联系我们咨询: pcbchina@pcb.com。