

用MEMS加速度计作为拾音器实现乐器音效完美再现

作者: Rob O'Reilly, Alex Khenkin, Kieran Harney

引言

MEMS¹ (微机电系统) 利用专为半导体集成电路所开发的制造工艺设施实现生产制造。微机电结构的实现方法是通过在半导体基片上刻蚀特定的图形, 来实现传感器单元或者可以移动零点几微米的机械执行器。MEMS压力传感器是第一类批量应用的产品, 如今用于负责监测数以亿计的发动机歧管和轮胎的压力; 而MEMS加速度计则用于安全气囊、翻滚检测以及汽车报警系统, 时间也已超过15年之久。

MEMS**加速度计**²还用于消费电子领域里的运动感应, 如视频游戏与手机。MEMS微镜光学执行器用于投影仪、HDTV以及数字影院。近几年, MEMS**麦克风**³也开始进入广阔的消费市场, 包括手机、蓝牙耳机、个人计算机以及数码相机等。

本文将讨论MEMS加速度计产品中所采用的一些关键技术, 并讨论这些技术如何为声学传感器带来新应用。

MEMS加速度计技术

典型的MEMS加速度计的核心单元是一个由两组指状栅条组成的可移动条形结构: 其中一组固定到基片上一个实体地平面上; 而另一组则连接到一个安装到一组弹簧上的质量块上, 该弹簧能够根据所施加的加速度产生移动。所施加的加速度 (图1) 将改变固定和移动栅条之间的电容。⁴

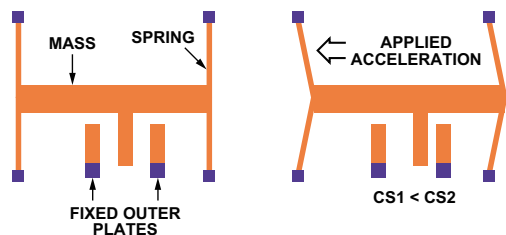


图1. MEMS加速度计结构。

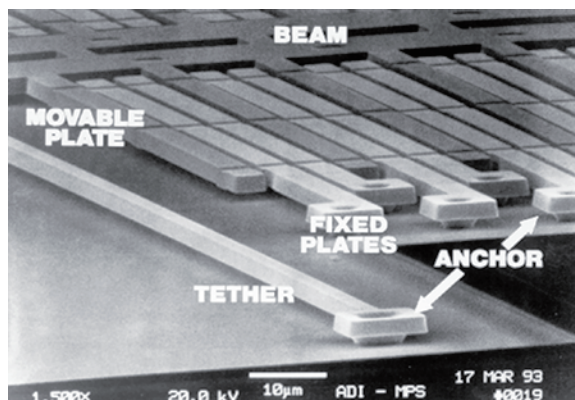


图2. ADXL50 MEMS加速度计结构。

这些MEMS结构的尺寸为微米量级 (图2), 故需要精度极高的半导体光刻和蚀刻工艺技术。MEMS结构通常采用单晶硅形成, 或者采用以极高的温度沉积到单晶硅晶圆表面上的多晶硅。采用这一灵活的技术可以形成机械特性差异很大的结构。其中一个可以控制和可改变的机械参数是弹簧刚度。设计中还可以改变传感单元的质量以及结构阻尼。传感器可以实现从零点几个 g 到数百个 g 加速度的感应, 其带宽高达20kHz。

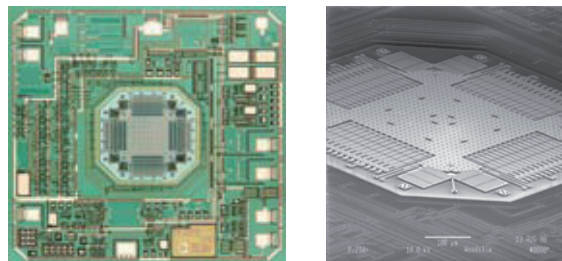


图3. ADXL202 $\pm 2 g$ 加速度计。

MEMS传感单元可以被连接到位于同一芯片 (图3) 或者不同芯片 (图4) 上的信号调理电路。对于单芯片解决方案, 传感单元的电容可以低至每 g 1-2毫微微法拉, 这相当于10-18F的测量分辨率! 而在双芯片架构中, MEMS单元的电容必须足够高, 以克服MEMS和ASIC调理电路之间连接线的寄生电容影响。⁵

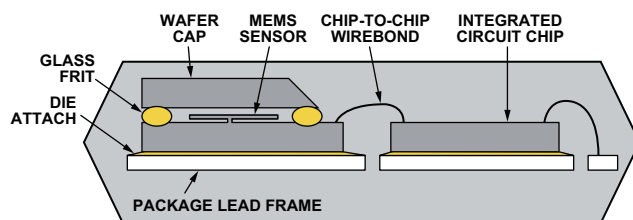


图4. 典型的双芯片加速度计的截面图。

作为振动测量传感器的加速度计

在乐器中利用振动感应传感器进行拾音的概念也并非新概念。⁶ 压电和电磁传感器是当今许多声学拾音应用的基础。由于微型的MEMS加速度计体积和质量都很小, 不会对乐器产生机械或质量载荷方面的影响, 从而在这些应用中颇具吸引力。不过迄今为止, 由于商用加速度传感器的带宽较窄, 其应用还比较有限。

加速度计技术方面的一些最新突破性进展成就了具有非常高带宽但又非常小的加速度计的量产。采用 $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 2\text{mm}$ 封装的ADXL001⁷ (图5) 高 g ($\pm 70g$ 到 $\pm 500g$) 单轴加速度计的带宽已高达22kHz, 是监测振动的理想选择, 可以通过检测设备声学特性的变化来确定电机或其他工业设备的“健康”状况。在轴承磨损的早期阶段, 利用一个贴附在系统基座上的高 g 振动传感器, 就可以检测到一个位于音频范围内的清晰振动信号。这种用来测量高达10 g 量级的特殊传感器, 显然要用作乐器的声学振动传感器是不够灵敏的。理想的声学传感器需要测量所有3个轴向上的响应, 而它却只能感应单轴运动。然而目前已经证明, 采用MEMS技术已经能够实现全音频带宽内的加速度传感器。

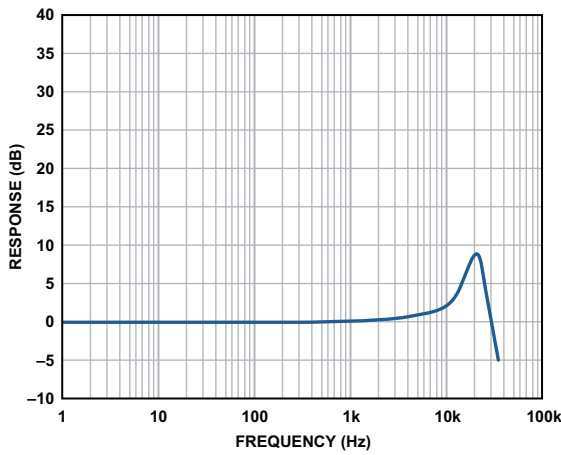


图5. ADXL001的频率响应曲线。

低 g 加速度计可以测量低至千分之一 g 级的加速度,但带宽一般被限制在5kHz左右。实际上这一限制的原因可能是需要很高带宽的商业应用太少(主要的应用包括人的运动或者重力引起的加速检测),故缺乏开发特别适用于音频频段测量的传感器的动力。

一个3轴加速度计有3个独立的输出,分别测量笛卡儿坐标中X、Y、Z轴上的加速度。ADXL330⁸ 3轴低 g 加速度计具有比传统的低 g 加速度计更宽的有效带宽,其带宽在X和Y轴上高达6kHz,而在Z轴上为1kHz左右。虽然还不够理想,但这个带宽已经使得该器件可以获取音频段上的有用信息。其输出为模拟信号,故很容易用于标准的录音设备。该器件采用标准的表贴封装,充分利用了成熟的半导体工艺制造设备。其封装尺寸为4mm × 4mm × 1.45mm (图6),可以适用于对于传统加速度计技术来说简直是不可思议的地方。其体积非常小,不会引起被测系统中质量载荷或者其他方面的改变。下面将介绍为何该低 g 加速度计可以用于吉他的声学拾音应用。

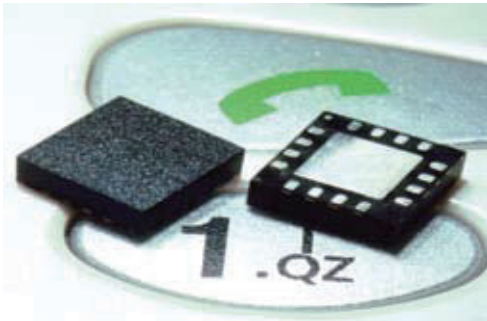


图6. MEMS加速度计,封装尺寸为4mm × 4mm × 1.45mm。

声音反馈问题

丹麦科学家Soren Larsen在上世纪20年代⁹中期首次引入了全向电容式动态麦克风,是他最早发现了声音反馈原理(称为Larsen效应)。对声学工程师来说,声音反馈一直都是一个噩梦,很少有工程师能够完全控制它,特别是在任何演出现场都不可避免。甲壳虫乐队充分感受到了这种伪声的影响,继而在1964¹⁰年决定将其添加到他们难忘的专辑“我感觉很好”的介绍曲中。随后Rock 'n' Roll也开始像驯服野兽一样利用它,利用声音反馈在摇滚乐中增添了令人耳目一新

的特色。而电吉他手,如Pete Townshend和Jimi Hendrix,则故意地把吉他靠近扬声器来利用声音反馈。随着这种风潮的消退,音频工程师继续努力消除声音反馈所引起的令人不适的听觉效果,特别是在现场演出过程中。在完美设计并经过特殊声学处理的试音室里,利用全向麦克风可以完美地录制乐器声,几乎达到惊人的现场感和保真度。理解并珍惜这一点的艺术家一直都在孜孜不倦地寻求如何能够把这种效果重现在舞台上。虽然希望能够以演播室一样的质量来录制现场演出一直都是音乐家的梦想,然而实际上这却是不可能的。即使在舞台上采用最好的音响设备,舞台也经过了极佳的声学设计,声音工程师也能精通地利用各种混响并可以拥有最佳的设备和工具,但要获得理想的音效仍然存在着难以逾越的障碍:那就是声音反馈。

声学拾音

通常通过采用定向麦克风可以把声音反馈减到最小。某种程度上这是可以的,不过需要调音工程师不停地调节,来适应舞台特性的不断变化。

利用拾音器可以对乐器声音进行放大。所采用的各种技术具有一定差异,但基本的原理都是直接感应乐器本身的振动,而并非检测空中它所产生的声波。这种做法的优点很明显:即拾音器几乎不会产生声音反馈,原因是它们对空气中传递的声波不敏感。但这种方法也有许多缺点:包括要在乐器上找到最佳的发声位置是极其困难的,压电拾音器的声学特性也远远算不上完美,它们的输出阻抗为高阻,故需要特殊的乐器输入或直驳盒(direct boxes)。此外,体积也较大,从而会影响乐器本身的自然声学特性。

于是,这些问题导致了低质量接触式麦克风的概念。假如我们采用一个表面式传感器来测量乐器本体的加速度,这要比单轴更合适。¹¹这种传感器具有更好的线性度,重量轻,从而不会影响被测乐器的声音特性。还可以进一步假定这些传感器具有类似的输出电平、输出阻抗,以及所需功率与传统麦克风相当。简言之,就是设想能够使乐师将该传感器插入到麦克风前置放大器或混音器输入的位置,就像任何其他麦克风一样。

接触式麦克风

我们在前面已经提到过加速度的概念。人耳响应的是声压,故麦克风也被设计成声压感测功能。为了简化讨论,这里直接给出一个结论,即一个靠近振动体的声压与加速度成正比。¹²问题是加速度计具有多高的带宽方可用作接触式麦克风?

为了研究清楚这个概念,将一个3轴加速度计安装到吉他上作为一个拾音器。对乐器的振动进行测量,并与内置的压电拾音器以及靠近吉他的MEMS麦克风进行比较。所用的吉他为Fender Stratacoustic,带有内置的Fender拾音器。在重量很轻的柔性电路(具有刻蚀导线的聚酰亚胺)上贴装了一个模拟输出的MEMS加速度计,并用蜂蜡将其贴装到吉他的琴桥位置,如图7所示。加速度计的X轴与吉他弦线的方向一致,Y轴与吉他弦线垂直,而Z轴则与吉他表面垂直。把一个平坦频率响应达到15kHz的MEMS麦克风安装到距弦线3英寸远的位置作为参考。



图7. 安装到Fender Stratocoustic吉它上的加速度计。

FFT频谱如图10(a)所示。作为参考, 图10(b)给出了MEMS麦克风的频率响应。

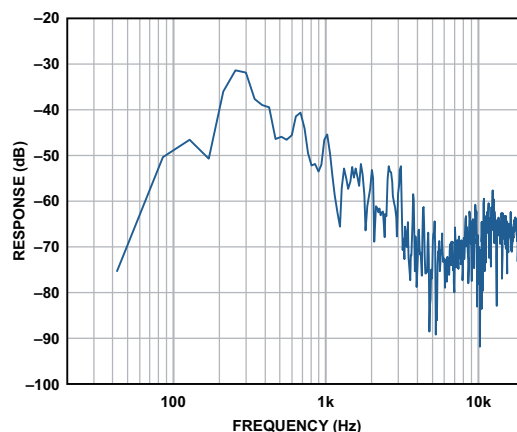


图10(a). MEMS麦克风的频谱。

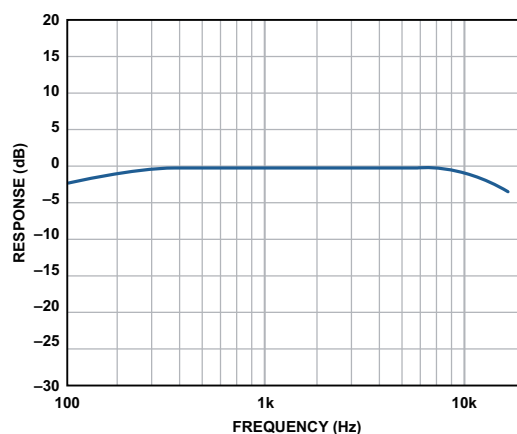


图10(b). MEMS麦克风的频率响应。

利用该加速度计、内置的压电拾音器和MEMS麦克风各自录制了一段声音。图8给出了每个传感器的时域波形, 这里没有对任何音段进行后处理。

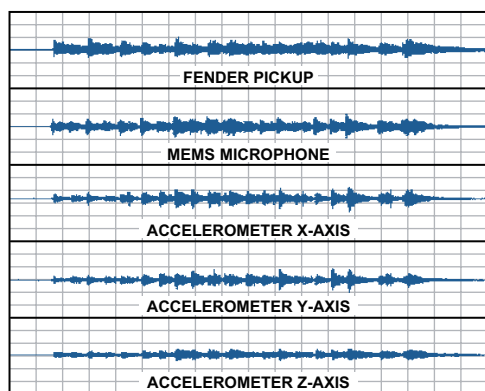


图8. 采用不同传感器的时域波形。

图9所示为在上述时域波形的一个峰值上所测得的压电拾音器的FFT频谱。结果显示响应中具有较强的低音分量。确实, 实际的音频文档中都较多地具有许多低音响应。这种声音比较悦耳 (还取决于个人偏好), 因为腔体谐振能够产生比从乐器上直接听到的更丰富的低音。

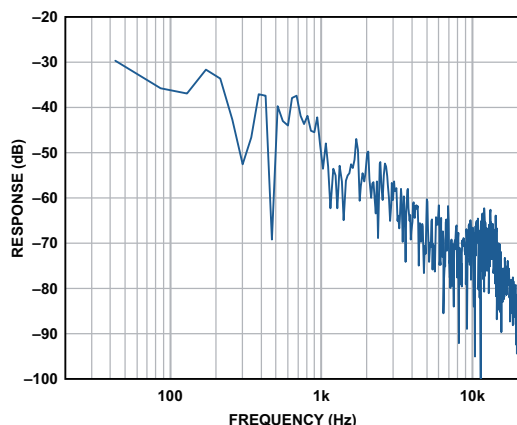


图9. 压电拾音器的频谱。

MEMS加速度计的输出非常有趣。目前其缺点包括噪声基底过高, 在音轨的开始和末尾都能听到, 且Z轴带宽明显限制到较低的频率。每个轴向上的声音再现也显著不同。

X轴和Y轴上的声音明快而清晰, 声调上有可分辨出的明显差异。正如预期, Z轴上的声音明显地主要为低音。图11中(a)、(b)、(c)分别给出了X、Y、Z轴上的频谱。

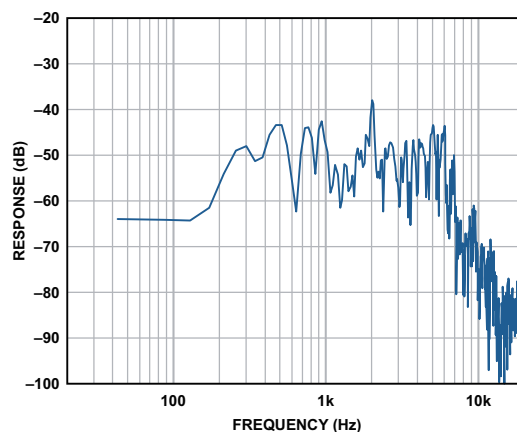


图11(a). X轴上的频谱。

MEMS麦克风的输出则非常平坦, 乐声的重现效果非常好。其音质非常自然, 均衡较好, 逼真度高。与压电拾音器相同时间点上测得的

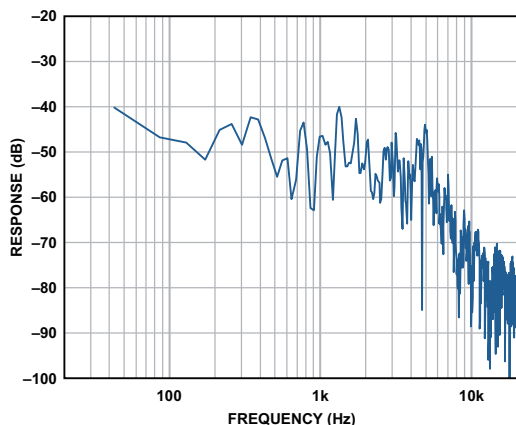


图11(b). Y轴上的频谱。

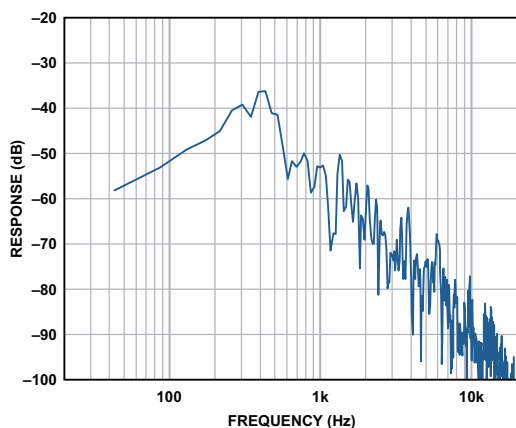


图11(c). Z轴上的频谱。

如果将X、Y和Z轴混合到一起,即可实现乐声的较好重现,具有一定的明晰度。通过对混音环节进行调节,可以实现音调平衡变化,达到自然的乐声重现。由于目前加速度计的带宽限制,更大范围的高频谐波丢失了,但声音重现仍然惊人地逼真。

结束语

低 g 值MEMS加速度计没有传统的声音反馈问题,可以作为乐器所用的高质量拾音器,具有明显的应用潜力。上面的实验结果表明,贴装到Fender Stratacoustic吉他上的一个3轴加速度计能实现良好的乐声重现。由于乐器本体不同方向上的振动模式不一样,故与之相关的加速度计3个轴上的声音特性也不一样,对三个通道输出进行混音可以再现原来的音效。此外,用不同的方式对这些通道的声音进行混音处理可以产生富有创造性的音效。

在本实验中,虽然从加速度计的性能看应用前景不错,但也存在一些缺点,例如能够听得到传感器的基底噪声,不过可以通过利用噪声门控或者其他技术将这个影响降到最小,而且理想传感器的噪声基底将与传统麦克风差不多。传感器的高频响应需要进行扩展,理想的是能达到20kHz,这样方可覆盖乐器的整个音频范围。

MEMS加速度计技术在乐器的拾音应用方面具有明显的潜在优势,特别是那些为声音反馈问题困扰的现场应用。一个体积非常小、低功耗的MEMS器件可以贴装到乐器中任何不显眼的位置上,而且不会影响乐器的自然振动特性。实际上,可以在乐器的不同位置上贴装数个传感器,为声学工程师重现乐器的自然特质提供额外的灵活

度,还无需担心现场应用的声音反馈,因此可以说,距离“理想的音乐”只差一步之遥!

参考文献

- 1 www.analog.com/cn/mems-and-sensors/products/index.html.
- 2 www.analog.com/cn/mems-and-sensors/imems-accelerometers/products/index.html.
- 3 www.analog.com/cn/mems-and-sensors/imems-microphone/products/index.html.
- 4 Goodenough, F. "Airbags Boom When IC Accelerometer Sees 50 G." *Electronic Design*. August 8 (1991).
- 5 Rai-Choudhury, P. "MEMS and MOEMS Technology and Applications." SPIE Press (2000).
- 6 Hopkin, B. "Getting a Bigger Sound: Pickups and Microphones for Your Musical Instrument." Sharp Press (2002).
- 7 www.analog.com/cn/products/mems/accelerometers/adxl001.html.
- 8 www.analog.com/cn/products/mems/accelerometers/adxl330.html.
- 9 Olsen, H. "A History of High Quality Studio Microphones." *J. of Audio Engineering Society*, 24. December 1976.
- 10 Fontenot, R. "I Feel Fine: The History of this Classic Beatles Song." About.com.
- 11 Freed, A. and O. Isvan. "Musical Applications of New, Multi-Axis Guitar String Sensors." International Computer Music Conference, pp 543-546 (2000).
- 12 Olsen, H. "Acoustical Engineering." Professional Audio Journals Inc. (1991).

作者简介

Rob O'Reilly [rob.oreilly@analog.com], 于1993年在ADI公司开始了他的职业生涯。他负责微机电产品事业部未来业务和产品的研发。之前, Rob曾负责领导高级测试、测试、调试/检测以及特性描述小组。在过去15年中, 他在iMEMS®加速度计的研发、以及陀螺仪测试、可靠性和特性描述过程中发挥了关键作用。



Alex Khenkin [alex.khenkin@analog.com]为ADI公司的高级声学工程师。在Earthworks公司具有十年以上从事麦克风研究和设计方面的经验, 他具有广泛的工作经历, 包括扩展麦克风的频率响应和动态范围, 并特别关注于它们的时域特性。Alex Khenkin拥有莫斯科国立无线电工程、电子和自动化学院(MIREA)的应用声学硕士学位。业余时间, 他喜欢演奏古典吉他。



Kieran Harney [kieran.harney@analog.com], 为ADI公司微机电事业部的产品线经理, 专注于MEMS技术的开发。他作为半导体封装工程师, 于22年前在爱尔兰的Limerick加入ADI公司; 1994-1997年, 他在菲律宾担任装配和测试经理; 1997年, 他在麻省的剑桥负责装配、测试以及先进封装的开发。Kieran Harney于1983获得爱尔兰Limerick大学的制造工程学位, 并于1993年获取该校的工商管理硕士学位。

