

# 精益求精: 对完美测量的追求

在仿真的帮助下，Brüel & Kjær 的研究人员正在为他们的工业级和测量级麦克风和换能器打造一个全新的精度和准确度水平。

作者: ALEXANDRA FOLEY

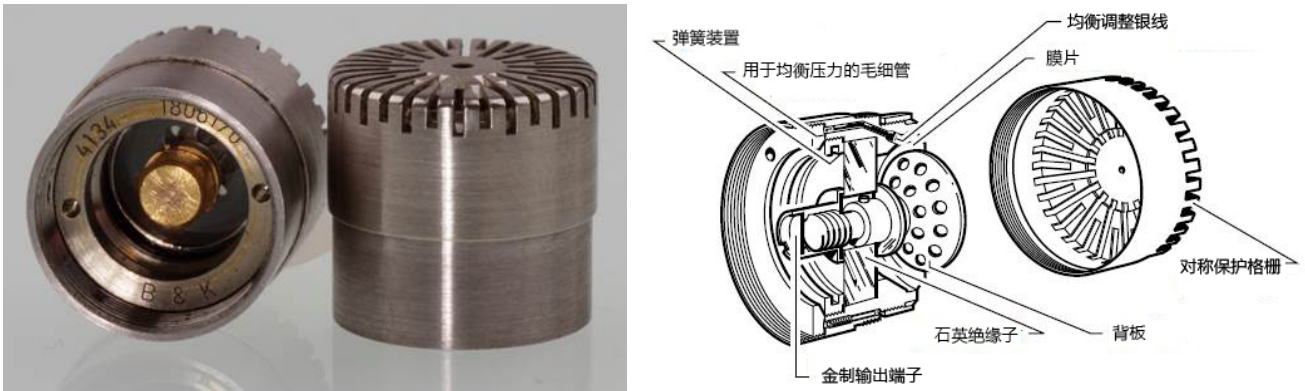


图 1. 左: 4134 麦克风图片, 包含振膜上方安装的保护格栅。右: 典型麦克风音头的截面图, 显示了其中的主要零件。

完美测量或永不失效的仪器都不存在。虽然我们能够默认相信得到的测量结果, 但所有的测量都不可能十全十美, 因为仪器本身并没有定义它们将测量什么; 相反, 它们会对周围现象作出反应, 并会参照绝对标准的不完美表征来解读测量值。

因此, 所有仪器都有一定程度的可接受容差范围, 即在不影响其可用性的前提下允许存在的测量差值。要在存在误差范围的情形下进行仪器设计, 这一众所周知的难题始终都在困扰我们, 而且还将继续下去。

40 多年来, Brüel & Kjær A/S 一直是声音与振动测量及分析行业的领导者。他们拥有众多的客户, 例如空中客车、波音、法拉利、博世、霍尼韦尔、卡特彼勒、福特、丰田、沃尔沃、罗尔

斯·罗伊斯、洛克希德马丁和美国国家航空航天局等。

工业级声音及振动分析会面临多种多样的挑战, 从交通和机场噪声, 到汽车发动机振动, 再到风力涡轮机噪声, 以及产品质量控制, Brüel & Kjær 必须能够设计出可满足一系列不同测量标准的麦克风和加速度计。为了能够满足这些要求, 公司在研发流程中加入了仿真来作为一种验证其设备精度和准确度, 以及测试新型创新设计的方法。

## → 设计和制造高精度麦克风

Brüel & Kjær 开发和制造各种电容式麦克风, 其中产品频段包含次声道超声频段, 声压级涵盖从低于听力阈值的声压级一直到正常大气压条件下的最高声压。产品范围包括通用标准和实验室标

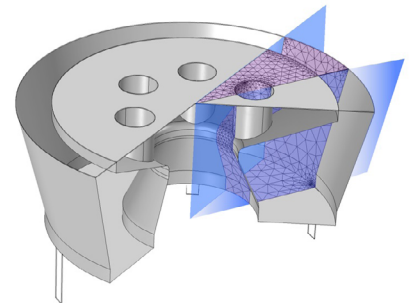


图 2. 4134 型电容式麦克风的几何绘图。图片显示了代表整体几何 1/12 的简化扇形几何中所用的网格。

准麦克风, 以及针对特殊应用的专用麦克风。在 Brüel & Kjær 所有麦克风的开发中, 一致性和可靠性都是非常关键的参数。

“我们利用仿真分析开发电容式麦克风, 并确保产品能满足国际电工委员会 (ICE) 和国际标准化组织 (ISO)

的相关标准。” Brüel & Kjær 麦克风研发部门的开发工程师 Erling Olsen 说道。“我们的研发流程中加入了仿真和其他一些工具，这使我们能够确保我们的麦克风可以在各类条件下具有可靠的性能。例如，我们精确地了解静压、温度和湿度、以及其他因素会给我们所有麦克风带来的影响，如果没有仿真，我们将很难测量这些参数。”

图 1 所示的 Brüel & Kjær 4134 型电容式麦克风是一款老式麦克风，自诞生以来已经接受过了众多理论和实践方面的考察，因此 Brüel & Kjær 电容式麦克风多物理场模型的开发中使用了 4134 型麦克风作为原型机。为了分析麦克风的性能，Olsen 的仿真中涉及了膜片的移动、膜变形与电信号产生之间的机电相互作用、谐振频率、以及在麦克风内部空腔中发生的粘性和热声损耗。

## → 麦克风模拟

当声音进入麦克风时，声波会引发膜片变形，并产生电信号来测量。这些电信号随后被转换为声音的分贝形式。“对麦克风的模拟涉及求解移动网格和强耦合的力学、电气和声学问题，没有多物理场耦合仿真的话，我们将无法实现这一点。” Olsen 说：“模型应该具有丰富的细节，因为在大多数情况下，由于麦克风音头形状具有较大纵横比和较小的尺寸，它们带来的热损耗和粘性损耗会极大地影响麦克风的性能。”

模型还可以预测背板和膜片之间的相互作用。与其他各方面一起，这将影响麦克风的指向性。“我们使用仿真来分析膜片的弯曲模式。” Olsen 说道。在热应力和谐振频率仿真中，使用了模型的对称性来减少计算时间（见图 2）。简化模型也被用于分析正入射到麦克风膜片上的声音的声压级（见图 3）。但是，当声音沿非法线方向进入麦克风时，膜片将面临一个非对称的边界

条件。这时就需要针对整个几何进行仿真，以精确捕捉膜的弯曲（见图 4）。

仿真也被用于确定麦克风中的通气孔对低频声音测量的影响。“我们模拟了带通气孔的麦克风暴露于外部声场和在声场外（未暴露），以及不含通气孔的麦克风的情况。” Olsen 说道：“虽然无法在现实中实现，但却帮我们确定了不同低频行为下通气孔配置和输入电阻结果之间的相互作用。这就是仿真最重要的作用之一：在更改模型参数时，我们可以不受当前已制造的设备参数的限制，这使我们能够测试其他设计并找出具体设备的极限（见图 5）。”

当仿真成为研发流程的一部分后，Olsen 和他的同事不仅能够对 Brüel & Kjær 的核心产品进行设计和测试，还可以基于客户的具体要求开发设备。

“利用仿真，我们可以基于客户需求指出具体的改进方法。虽然麦克风声场难以只通过测试进行测量，但在利用针对具体配置的物理模型验证了仿真之后，我们将能够使用仿真来逐个分析其他配置和环境。”

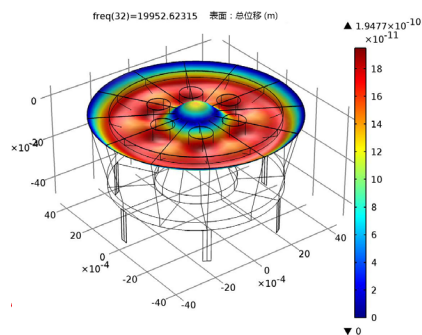


图 3. 正入射时膜片下的声压级表征，使用扇形几何计算。显示了  $f = 20 \text{ kHz}$  时计算得到的膜片变形。

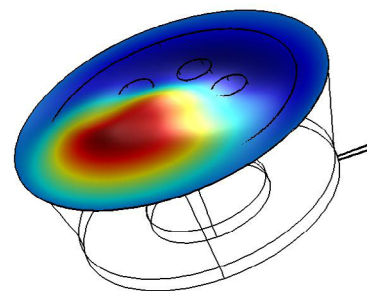


图 4. 仿真结果显示了  $25 \text{ kHz}$  下非法线方向入射时的膜片变形。由于变形不对称，需要使用完整三维模型计算。

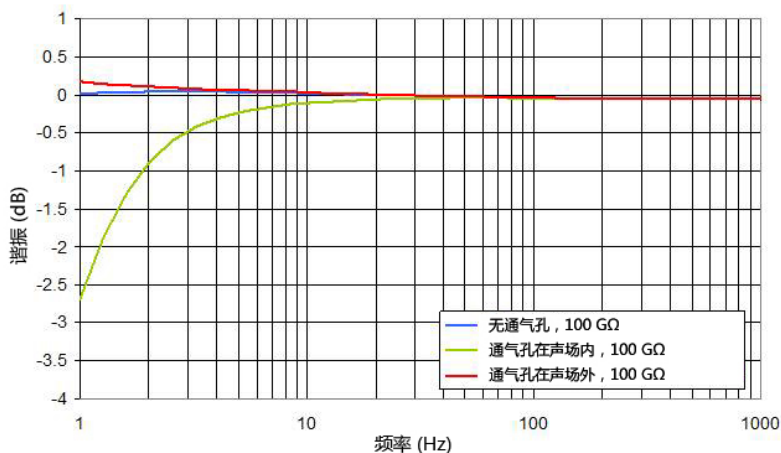


图 5. 在无通气孔配置中，极低频率下麦克风内的声场为纯等温，灵敏度由此得到提升。当通气孔位于声场内时，曲线最初与无通气孔配置相同，但由于通气孔在膜片背后释放压力，灵敏度得到了进一步提升。

## → 振动换能器模拟

Brüel & Kjær 的开发工程师 Søren Andresen 也在使用仿真来设计和测试振动换能器。

“在设计用于振动分析的换能器时，我们面临的一个难题是这些设备需要能够承受各种严苛环境的考验。” Andresen 说道：“我们的目标是设计一种具有很高内电阻，因而可以承受各种极端环境考验的设备。”

大部分机械系统的谐振频率都被限制在一个相对较窄的范围内，通常在 10 到 1,000 Hz 之间。换能器设计中最重要的一点是，设备的谐振频率应当不同于待测振动的频率，因为这会干扰测量结果。图 6 显示了悬浮式振动换能器中的机械位移，以及该设备的谐振频率绘图。

“我们希望换能器能有一个平坦的响应，且谐振频率不在待测量的振动范围内。” Andresen 说道：“我们使用 COMSOL 对不同设计进行了测试，以确定特定设计的材料和几何组合能带来一条平坦曲线（无谐振）。这就是换能器可工作的频率区域。”

设计换能器时，可以使用低通滤波器或机械滤波器，来移除可能存在的因换能器谐振造成的多余信号。这些滤波器固定在换能器和安装表面之间，其中包含一个粘合在两个安装盘之间的介质，该介质通常为橡胶材质。

“从经验法则来看，我们会将频率

上限设定为换能器谐振频率的 1/3，因此，我们知道在频率上限中测量的振动分量误差将不会超过 10% 到 12%。” Andresen 说道。

## → 尽可能精准

虽然我们无法设计出一款完美的换能器，或进行绝对可靠的测量，但仿真使研究和设计团队比以往更接近完美，因为

他们现在能够快速高效地针对不同工作场景测试新的设计解决方案。

“为了能够在竞争中保持领先，我们需要一些相当独特的知识。” Andresen 说道：“仿真帮我们实现了这一点，对于那些无法通过实验确定的地方，我们可以先作出调整然后进行虚拟测量，这使我们能够测试和优化各种新型创新设计。” ❖

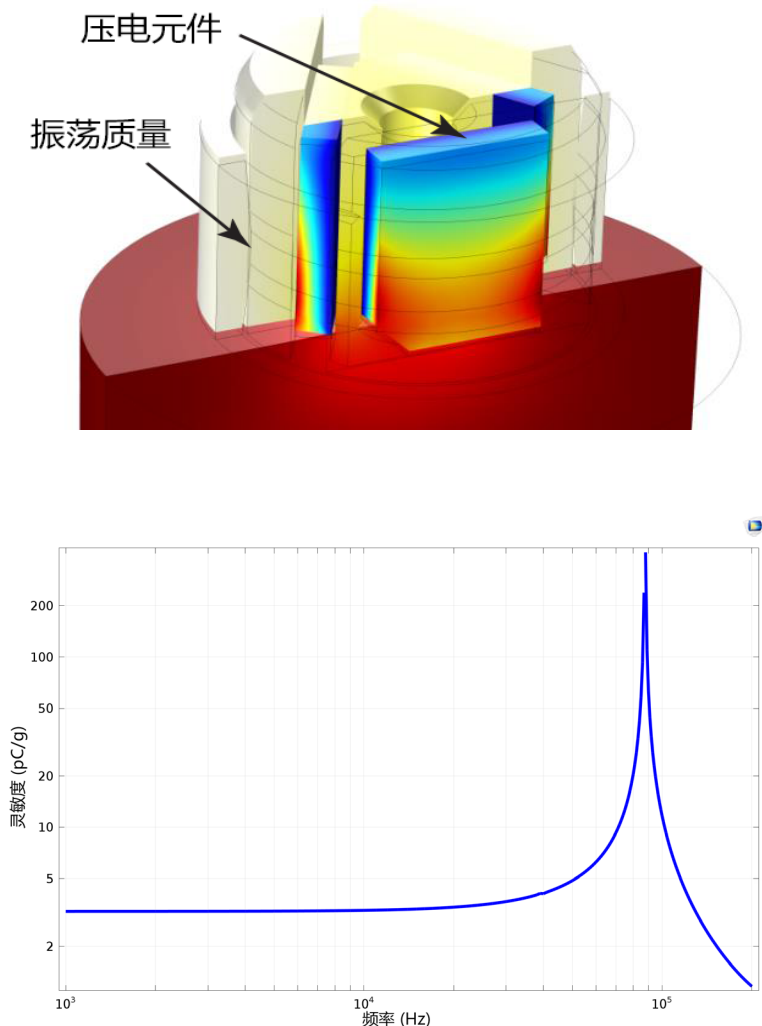


图 6. 悬浮式压电振动换能器的仿真结果。上：压电敏感元件和振荡质量中的机械变形和电场。下：频率响应绘图，显示了换能器在 90 kHz 附近的一阶谐振。本设备只可用于测量频率远低于 90 kHz 的对象。

“利用仿真，我们可以确定基于客户需求的具体改进方法。”

— ERLING OLSEN, BRÜEL & KJÆR  
开发工程师