

晃动、震颤 和摇摆

挪威研究人员正在追踪低频声波在建筑内的传播，希望能据此给出调整设计的建议，减少各种令人烦躁的振动。

作者 JENNIFER HAND

曾在机场旁留宿的人一定能体会这种感受：早班飞机把人从睡梦中惊醒，除了引擎噪声，似乎身边所有的东西都在晃动。另外，住在风力发电机、军事基地和设有直升机起降场的酒店旁的住户也经常抱怨，当有外部噪声时，窗户会震颤，各种日常物品都会发出嗡嗡声。更让人费解的是，即使没听到任何声音，也还是能看到这类恼人的振动。

如果声音的振动不超过 20 次每秒 (20 Hz)，被称为次声波，人耳无法听到这种声波。然而，我们还是能轻易察觉到它的影响。当声波遇到窗户、传到地板上，并影响内墙时，会引起明显的室内振动。由于低频声波会带来各种令人烦躁的干扰，所以一直饱受诟病。

⇒ 建筑内的低频声波

噪声是现代生活的一部分，在正式标准中通过声压级来测量高频噪声的敏感度、干扰水平以及对人体的危害。根据挪威岩土工程研究院 (Norwegian Geotechnical Institute, NGI) Finn Løvholt 的说法，人们目前尚未深入研究建筑在次声波影响下产生的振动。因此，多年来，作为一家国际性的地球科学研究及咨询中心，NGI 一直在为挪威国防资产管理局 (Norwegian Defence Estate Agency) 进行各种调查项目。

“与高频的声音相比，低频声音在空气中传播时被吸收

“我们之前从未得到与实际测试如此高度的契合，这一切都得益于我们能够在 COMSOL Multiphysics 中模拟不同的结构单元。”

— FINN LØVHOLT, NGI

的更少，因此传得更远。从建筑物外传到建筑内的声音数量要更多。我们希望了解在听力阈值内将发生什么。” Løvholt 解释说，“我们希望了解来自外部声源的声音如何与建筑发生相互作用，并产生能被人体捕捉到的振动。之后我们将能提出各种对策来阻止振动，也许还能对这些‘恼人’的因素给出一些标准的指标。”

⇒ 模拟声波的传播

Løvholt 和他的同事决定开发一个计算模型，找出低频声波撞击及穿透建筑的原理。他们使用 COMSOL Multiphysics® 软件模拟了一个木制结构，内部的两个房间由墙壁隔开（见图 1 上），模型精确复制了实验室内的实验装置。他们在模型中的一个房间内安装了扬声器，在另一个房间安装了麦克风，并在

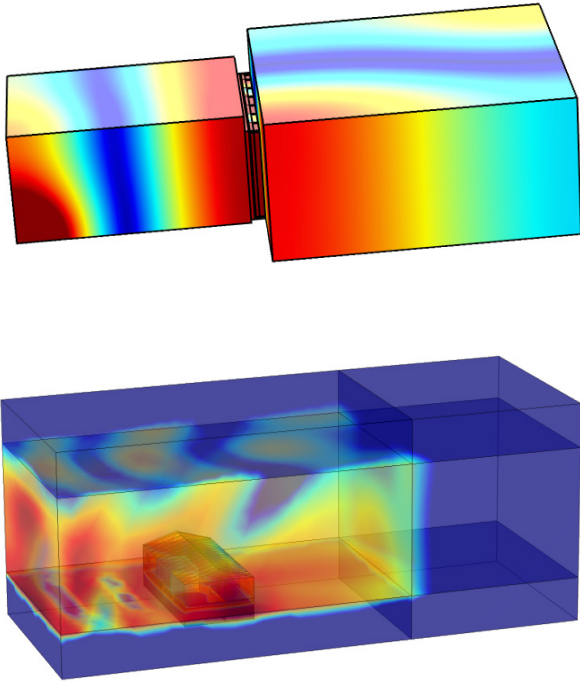


图 1. 上：在模拟实验室内被墙隔开的两个房间中的声压。在左侧房间中安装一个扬声器；仿真显示每个房间内的声共振都将影响声绝缘。下：模拟来自建筑外部、周围及内部的低频声音。二者都通过用颜色来区分室内及墙体空腔中的声压变化。

结构周围安装了各种探头，以便监控声压级和振动。他们模拟了屋子的每个组件，包括钢架、墙内的气腔和立柱、窗户、胶合板以及石膏板。“每个部分的共振都依赖于声波的波长和压力分布。例如，扬声器房间的压力较高，麦克风房间的压力较低，墙体的共振与它的长度、厚度和刚度有关。” Løvholt 解释说。

团队还必须考虑两个部分结合在一起时产生的复合共振，比如拧在一起的两块木料。“COMSOL Multiphysics 的优势在于我们能够输入需要监控的所有参数，而它支持耦合多个物理场这一特点尤为重要。因此，我们能查看例如空气域内外声音与室内结构动力学的相互作用。这是一个双向耦合过程，所以我们可以找出反馈。在我们的分析中，耦合非常重要，因为声波会在一个很大的范围内产生多种共振。模型帮助我们真正实现了此类分析。”

NGI 的团队随后在实验室中对穿过木屋（含两个房间）的低频声音进行了测试，用来验证仿真结果。Løvholt 解释说，

他们的主要测量参数是墙体的运动和声压级。所得结果与 COMSOL Multiphysics 模型具有高度的相关性（见图 2）。“真实墙壁的响应非常清晰，而模型几乎完美地复现了真实的响应，这也是令人感到惊叹的地方。”

模拟结果显示，声音在建筑内的传播会受低频声波与以下因素间相互作用的影响：建筑组件的基本模态、房间尺寸、空气在建筑围护结构中泄露的方式等。天花板和墙壁的振动似乎是室内低频声音的主要来源，而地板的振动则是由室内声压驱动的。

⇒ 比物理测试更快捷、更经济

“这个工具使我们能够预测低频声音和振动。” Løvholt 说，“我们可以用它设计及测试各种应对措施，例如使用多层窗户、加硬墙壁等，因为，如果墙壁或窗户的移动变小了，传播的声音也会减弱。此外，模型还向我们说明了小细节对系统的影响；例如，立柱与石膏板间的螺纹连接会如何减弱某个应对措施的效果，因为它们其实会降低结构的整体刚度。”

下一步，团队计划对挪威境内一座正受飞机噪声困扰的真实房屋进行全尺度现场测试。同时，团队将继续使用并进一步开发该模型。“我们之前从未得到与实际测试如此高度的契合，这一切都得益于我们能够在 COMSOL Multiphysics 中模拟不同的结构单元。” Løvholt 总结道，“我们可以依据模型做出决策，并能据此采取应对措施。与物理测试相比，它的成本更低，耗时更短。之后，我们将进一步拓展模型，用于模拟整栋建筑中的声传播与振动。”（见图 1，下）。❖

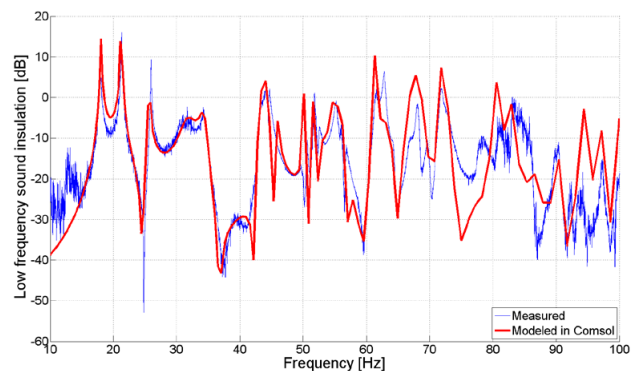


图 2. 模型精确计算了共振位置以及声压级（精度在几分贝内）。随着频率增加，将激励越来越小结构中的更多模式，导致测量值与模拟结果之间差异的扩大。