

多物理场分析 助力地下给水管道的泄漏检测

地下给水管道的声速的估算对于准确定位泄漏点来说十分重要。Echologics 工程公司创建了一个有限元仿真框架, 用于模拟管道中的声学行为, 以及计算声速的变化。

作者 **VALERIO MARRA**

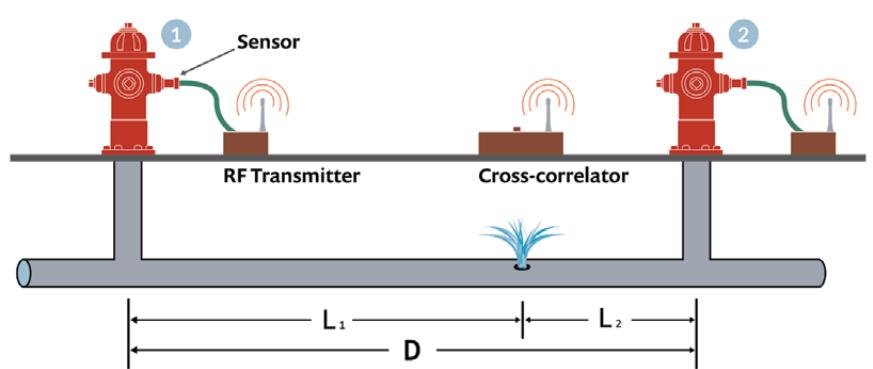


图 1. 左图: 检测中的泄漏管道; 右图: 泄漏检测设置示意图。泄漏点位于两个传感器之间, 传感器距离为 D 。泄漏噪声沿两个方向传播, 相关仪测量了声音到达每个传感器所需的时间。根据管道中的声速, 即可推算出确切的泄漏位置。图注: Sensor - 传感器; RF Transmitter - 射频发射器; Cross-correlator - 互相关仪

新鲜、洁净的水源是十分宝贵的资源, 地下输水管道一旦发生泄漏, 就会造成巨大的损失, 因此对管道进行泄漏检测十分重要。然而, 随着管道基础设施的逐渐老化, 对管道泄漏点的定位将变得极其困难。

为了解决这一问题, 位于加拿大多伦多的 Echologics 工程公司 (隶属于 Mueller 加拿大有限公司) 利用其独一无二的声学检测技术, 研发出了一种无需开挖, 便可对深埋地下的管道进行泄漏检测的方法。“泄漏会产生噪声,” Echologics 公司声学领域的研发科学家 Sebastien Perrier 解释道, “管道是会说话的, 如果你仔细听, 他就会告诉你哪里发生了泄漏。” Perrier 是一名机械工程师, 专长于

声学 and 振动、结构耦合, 以及信号处理等领域。

借助相关函数和安装在管道或消防栓上的声学传感器, Echologics 公司对声波的传播时间进行了测量。如果管道的泄漏点位于某两个传感器之间, 传感器就会检测到由泄漏所发出的噪声, 然后便可根据相关函数的计算结果来确定同一泄漏噪声传播到两个传感器所产生的时间差。当确定了管道中的声速后, 就能轻而易举地测算出泄漏点的具体位置 (图 1)。

作为水利基础设施声学检测系统的创新领导者, Echologics 利用上述相关函数研发出了可准确定位管道泄漏点并对管道泄漏进行长期监测的技术。Echologics 公司的主要产品包括 LeakFind-

erST™ 泄漏噪声相关仪 (图 2) 和 Echo-Shore®-DX 管道监测系统 (图 3)。在 Echologics 相关仪的帮助下, 现场检测人员可利用发射器、传感器和笔记本电脑上的操作界面对各类管道的泄漏情况进行检查。更为重要的是, 利用这种声学技术, 工作人员在管道泄漏初期便能检测到极其微小的泄漏点, 从而及时地防止管道的进一步损坏, 这将大幅减少维修费用的支出。

Echologics 产品的正常工作依赖于对不同类型管道内声速的精确测算。声速主要取决于材料类型, 与管道刚度成正比, 并受管道几何结构的影响。

“此项技术的核心在于研发出灵敏度高的 PVC 管泄漏点检测方法。” Perrier 解



图 2. LeakFinderST™ 相关仪是一款简单易用、体积小巧的泄漏噪声相关仪。



仿真显示，当传感器的距离发生变化时会出现信号噪声，仿真结果还表明，实际上已经用塑料修补过的管道并未被包含在测试中。此外，Perrier 的仿真还能预测在声波传播到传感器的过程中管网内的压力，以及采用不同材料的区段中的机械阻尼，这就为上述问题提供了一种可视化的方法（图 4）。

⇒ 将仿真 App 纳入日常工作

Perrier 在计算模型的日常使用中看到了定制化仿真 App 的优势。他以 COMSOL Multiphysics® 分析为基础，利用软件内置的工具开发出了仿真 App。这个 App 包含了声-结构相互作用、管道声学，以及瞬态和频域研究（图 5），并支持用户在运行中修改几何参数和材料属性，深入分析单段管道或整个管网。

用户可在 App 中通过输入管道区段的长度、段数和管道特性，对输水管网进行定义。从预定义列表中选择铸铁或塑料等材料，App 即可自动计算出相应材料中的声速。随后，使用者只需将基于实地测量得到的相关性分析结果输入仿真 App，便能预测泄漏发生的位置。

把多物理场模型转化为仿真 App，这种方式极大地方便了研究团队与企业

“通过开发仿真 App，我可以将复杂的模型分享给同事们，而且还能随时随地访问它们。”

— Sebastien Perrier, Echologics
公司声学领域的研发科学家

内其他工作人员的合作交流。Perrier 表示：“通过开发仿真 App，我可以将复杂的模型分享给同事们，而且还能随时随地访问它们。”仿真 App 支持密码保护，可通过本地安装的 COMSOL Server™ 产品进行部署，这一方式不仅可以即时地



图 3. EchoShore®-DX 系统将路边常见的消防栓变成了智能泄漏检测装置。

释道。这是因为与金属相比，塑料具有高衰减、高阻尼的特性。更棘手的是，原先的供水系统由铸铁管制成，然而现在却要在部分区段用塑料来进行修补。

Perrier 的职责之一是保证复杂的声学相关性算法的准确并持续对其更新。他必须深入理解基础层面的物理原理，才能针对地下管道设施进行优化以及开发新一代的泄漏解决方案。为了加快设计进程，并与其他部门的同事分享研究成果，Perrier 创建了计算声学模型，并基于模型开发了仿真 App。

⇒ 在发生故障前找到泄漏点

数值仿真是如何帮助我们预测管道中的声波传播的呢？管网分析通常既复杂又耗时。研究人员有时需要了解单一

管道内的声音传播和振动响应情况，有时则希望纵观整个管道系统的情况。因此在确保精度的前提下，模型的复杂程度和运行分析所需的时间，会因模型涉及的物理场细节的不同而存在巨大差异。

在设计初期，Perrier 面临的核心问题是如何确保管道中每个区段的声音传播速度均准确无误。为了达到这一目的，他在后续的研究工作中采用了多物理场仿真在管网分析中，需要对声学、流体和结构力学等多个物理场进行耦合分析，仿真分析帮助他快速获取了所需的数据。

仿真在 Perrier 的工作中用途广泛。比如他能够通过仿真了解微小的误差幅度，并据此对现有技术进行改进。他通过声学仿真深入探索了管网的材料和几何参数，获得了不同情景的预测结果。声学

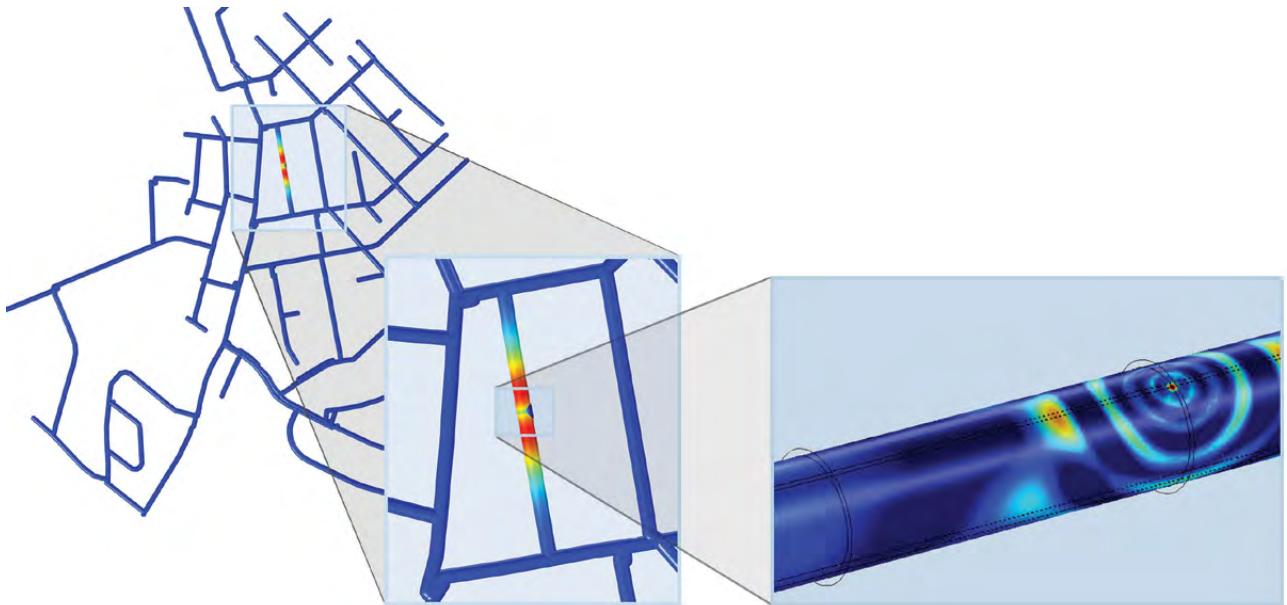


图 4. 管网中泄漏噪声的声音传播分析。绘图显示了泄漏点周围区域的声压。

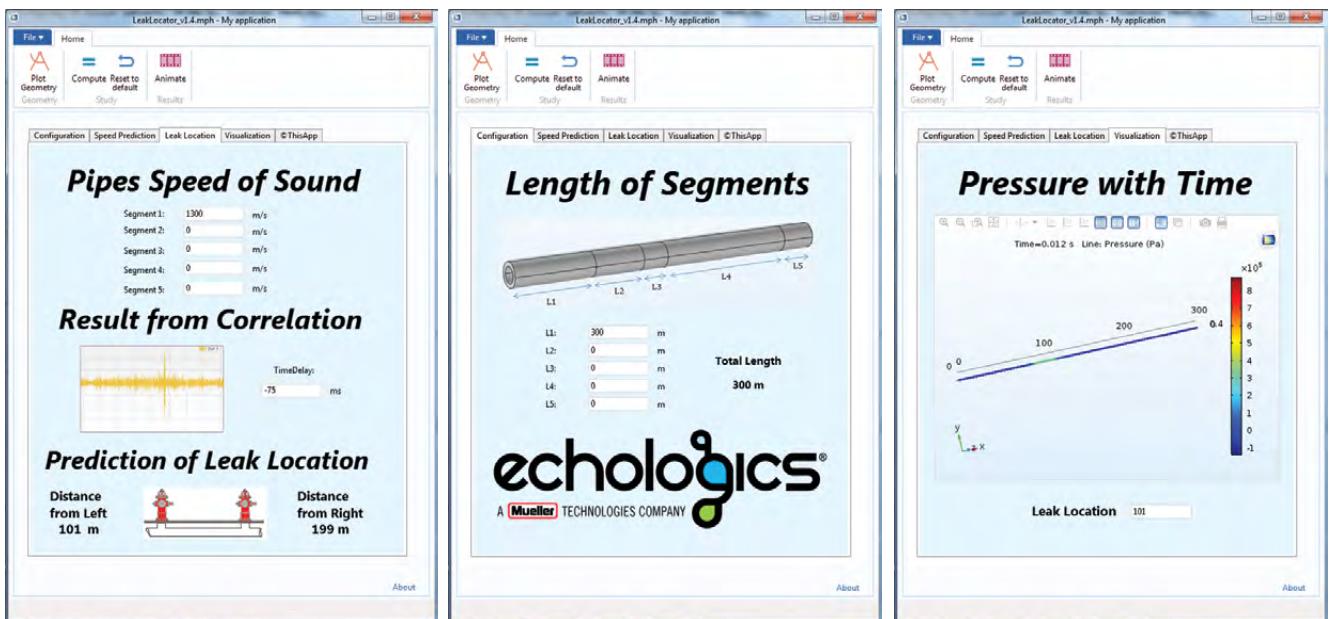


图 5. 用户可通过简洁易用的操作界面可对几何结构和管道特性进行定义,从而推测准确的泄漏位置。此 App 可用于计算管道中的声速,还可以将泄漏位置的声音传播制作成动画,同时无需将声-结构相互作用和位置预测涉及的复杂计算呈现给用户。

对 App 进行更新,同时还兼顾了保密性。由于 Perrier 的大部分工作内容都需要保密,因此保密性对他来说十分重要。此外,仿真 App 还使得现场的工程师可以实地运行测试分析。

Perrier 期望仿真 App 未来能在 Echologics 公司得到更加广泛的应用。对

于 Echologics 的现场工程师而言,App 的关键优势在于,无需详细了解仿真背后的力学或数学知识,就能够快速准确地发现泄漏点。在 Perrier 的眼里,这一强大的仿真工具可以直观呈现声音的传播过程,让使用者看到当几何结构和材料属性发生变化时,声速是在减小还是在增加。❖



Sebastien Perrier, Echologics 公司声学领域的研发科学家。