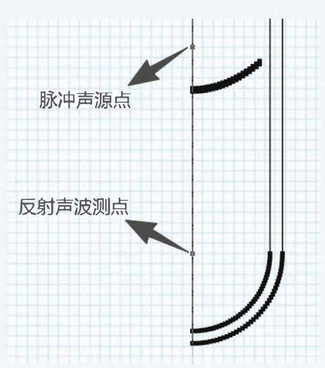
电缆排管内瞬态声压传播及局部介质阻抗效应

杨成轩[1]，邹爽[2]，陈阳[3]
1,2,3 电气工程学部，上海电力大学，上海市，中国

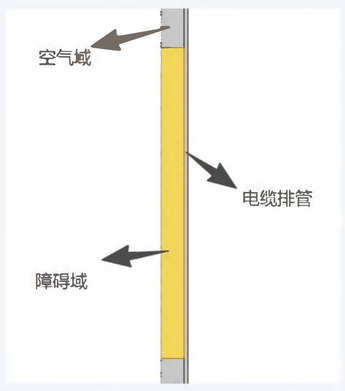
核心结论 **完整高阻抗介质封闭横截面时， 0.149 s 界面返回显著增强。介质半径减半后，外围空气环带保留长距离通道， 0.298 s 全长返回重新增强。**

01 研究设计

50 m 电缆排管中部设置 1 m 可变介质区，三处测点同步记录声压时程。



声源与测点



中部测试介质

五种对比工况

01 **全空气** 空气导波与上端返回

02 **中部全水** 完整高阻抗界面

03 **中部全固体** 更高等效声阻抗

04 **50% 水域** 中心 25% 面积水域

05 **50% 固体** 中心 25% 面积等效固体

关键参数
L_pipe = 50 m　R_in = 75 mm　f_src = 500 Hz
z_src = -5 m　dt_out = 1×10^{-4} s

02 COMSOL 建模与求解

COMSOL Multiphysics 6.3　Acoustics Module

全局参数
管道尺寸、介质编号、测试区宽度和时间窗统一参数化

二维轴对称几何
管壁、空气域、测试介质、声源点与底部反射结构

材料与选择集
空气、管壁材料和由 material_case 切换的测试介质

瞬态压力声学
Pressure Acoustics, Transient 与 Gaussian pulse 单极子点声源

网格与研究
自由三角形网格， Time Dependent ，统一输出时间步

结果后处理
二维声压场和三测点声压时程

控制关系

$$Z = \rho c$$
$$R_p = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$$

水域 $Z \approx 1.48\times10^{6}$ Pa·s/m
等效固体 $Z \approx 6.57\times10^{6}$ Pa·s/m

传播时序校核

0.079 s 直接波至中部

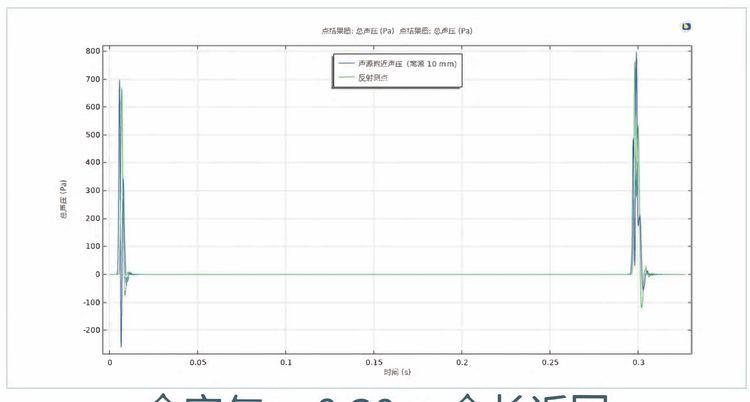
0.149 s 中部界面返回

0.225 s 上端返回再过中部

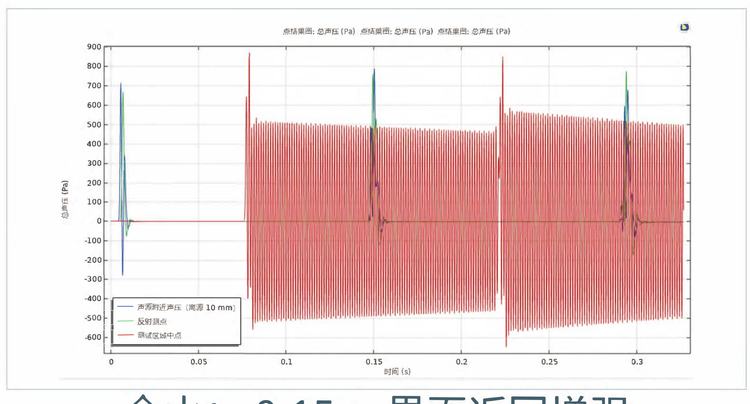
0.298 s 50 m 全长往返

03 结果与判读

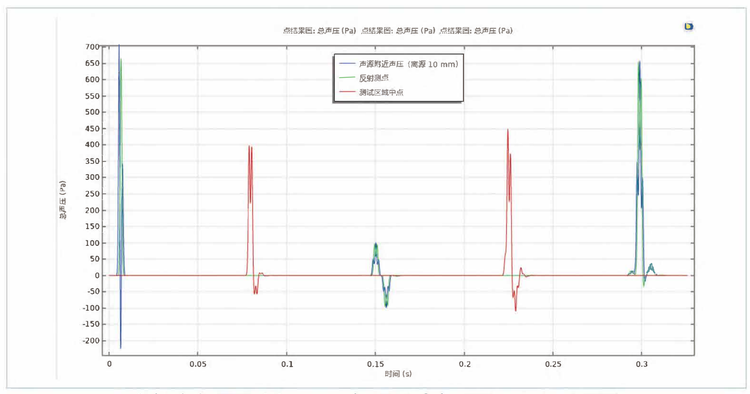
三种代表性时程对应空气贯通、完整水域和完整等效固体，峰值位置与声程估算相互验证。



全空气： 0.30 s 全长返回



全水： 0.15 s 界面返回增强



等效固体：高阻抗界面返回

空气贯通

中部无强阻抗界面。 0.30 s 主导返回表明声波到达 50 m 管顶后返回。

完整高阻抗界面

全水与等效固体均在 0.15 s 形成明显返回。水域密集振荡来自 1 m 介质段内多次往返。

部分障碍与旁路

介质半径为 0.5R_in 时，中心区占 25% 横截面积。外围空气环带保留 0.30 s 全长返回。

工程判读

0.08 s 确认直接波到达
0.15 s 识别中部阻抗突变
0.30 s 判断远端返回是否保留

联合判据

远端返回不能单独证明管道完全畅通。应联合早期返回强度、测试区中点响应和三测点到达时间。

模型边界

等效固体未求解剪切波与结构振动。半充水、偏心障碍等情况需要三维或非轴对称模型。

可复现设置 Pressure Acoustics, Transient　2D Axisymmetric　Gaussian pulse monopole source　Free Triangular mesh　Time Dependent study

后续量化方向：在测试区上下截面积分轴向声强与声功率，并为实体障碍增加 Acoustic-Structure Boundary 。

软件：COMSOL Multiphysics 6.3 / Acoustics Module

COMSOL 6.3 Acoustics Module User's Guide　Pressure Acoustics, Transient Interface

Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2026 Shenzhen