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

摘要

为识别电缆排管内积水或高声阻抗障碍对瞬态声波传播的影响，本文在 COMSOL Multiphysics 6.3 中建立二维轴对称压力声学模型。模型以 50 m 长、75 mm 内半径排管为对象，采用 500 Hz 高斯单极子体积流量脉冲作为激励，在声源附近、底部反射测点和中部测试区三类位置提取总声压时程。计算中保持声源、边界、网格、求解步长和后处理方式一致，仅改变中部 1 m 测试区的材料属性及径向占据范围，形成全空气、中部全水、中部等效固体、50% 径向水域和 50% 径向等效固体五种工况。结果表明，0.079 s 的中部直接波、0.149 s 的中部界面返回波和 0.298 s 的 50 m 全长往返波均与声程估算一致。完整高阻抗介质封闭横截面时，早期界面返回显著增强；当介质半径减小为管内半径的 50% 后，轴对称旋转形成的中心介质仅占横截面积 25%，外围连续空气环带使全长返回波重新增强。研究说明，排管声压时程不能只按峰值大小解释，而应联合材料声阻抗、横截面封闭程度、旁路连通性和多测点到达时间进行判读。

关键词：电缆排管；COMSOL Multiphysics；瞬态压力声学；界面反射；旁路传播

1 简介

城市电缆排管具有长径比大、管壁约束明显、端部反射强和内部状态不易直接观察等特点。对于已经敷设或预埋的排管，内部积水、沉积物、碎块或局部封堵会改变管内声波的传播路径，也会改变传感器接收到的早期反射与远端返回特征。工程检测中常采用瞬态敲击、脉冲声源或压缩空气激励产生的响应进行状态判别，但实际波形通常包含源附近脉冲、管壁导向传播、局部界面反射、末端反射及多次往返叠加。已有研究表明，堵塞尺度、截面占据和介质状态会显著改变管内瞬态波的反射、散射与频谱特征[4-6]。

本文采用同一参数化模型切换五种介质分布，研究重点不是追求某一工况下的绝对声压数值，而是比较在相同几何、激励和求解条件下，不同介质阻抗与不同覆盖范围如何改变特征波包的到达时间和相对幅值。文中把传播时间校核作为结果解释的第一约束，再结合声阻抗失配和轴对称截面面积关系分析波形变化。对于等效固体域，模型只采用密度和纵波声速描述其等效压力声学效应，不把计算结果外推为真实砖块的剪切波传播或结构振动响应。

从检测应用角度看，中部完整积水与中部局部积水具有本质差别。前者会在空气-水界面形成明显阻抗突变，容易产生较强早期返回；后者虽然同样包含高阻抗介质，但若外围空气仍连续贯通，声波可以绕过中心区域继续向上端传播。本文把这类现象称为旁路传播，并在后续结果中用 0.15 s 附近的界面返回和 0.30 s 附近的全长返回共同验证。

本文通过传播时序校核、参数化工况对比和轴对称截面面积换算组织分析。传播时序用于确定主要波包的声程来源；统一模型中的参数与材料切换用于降低网格、测点和时间步差异带来的影响；截面面积换算用于区分“50%径向宽度”和实际三维通流面积，避免对部分径向障碍的覆盖程度产生误判。

2 理论基础与数值模型

2.1 控制方程

压力声学瞬态接口以总声压 p_t 为因变量。忽略偶极域源以外的体积力和背景流动后，非均匀流体中的标量波动方程写为式（1），其中 ρ 和 c 分别为介质密度与声速，Q_m 为单极域源项。模型采用静止背景介质、小扰动声学和线性传播假设，管壁与底部反射结构采用硬声场边界，初始声压及其时间导数均设为零[1-2]。该设定适合分析脉冲声波在排管内的传播、反射和局部透射，不直接描述管壁弹性变形对声场的反馈。

$$\frac{1}{\rho c^2}\frac{\partial^2 p_t}{\partial t^2}-\nabla\cdot\left(\frac{1}{\rho},\nabla,p_t\right)=Q_m \qquad (1)$$

2.2 声阻抗与界面反射

平面波特征声阻抗和近似法向入射声压反射系数分别见式（2）与式（3）。虽然实际排管内声场存在轴向导向、径向约束和界面边缘绕射，

局部波形并不等同于无限平面波，但声阻抗仍可用于判断空气-水和空气-等效固体界面的反射强弱。水和等效固体的阻抗远高于空气，完整覆盖横截面时会明显抑制声波继续沿空气通道传播；当介质只占据中心区域时，剩余空气域则为声波提供绕行路径。圆管内堵塞引起的声学散射与截面占据比例密切相关[5]。

$$Z = \rho c \tag{2}$$

$$R_p = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{3}$$

介质	密度 ρ	声速 c	声阻抗 Z
空气	模型内置	343 m/s	约 4.1×10² Pa·s/m
水	998 kg/m³	1480 m/s	1.48×10⁶ Pa·s/m
等效固体	1800 kg/m³	3650 m/s	6.57×10⁶ Pa·s/m

2.3 几何与对比工况

二维轴对称 r-z 模型表示圆柱排管。管长 L_pipe=50 m，内半径 R_in=75 mm，外半径 R_out=87 mm；声源位于 z_src=-5 m，中部测试区中心位于 z=20 m，轴向长度 L_zone=1 m。声源下方设置以声源附近区域为焦点的轴对称反射结构，监测点包括声源附近测点、底部反射测点和测试区中点。测试介质从轴线 r=0 向外展开，zone_width_ratio=1 时覆盖完整内半径，zone_width_ratio=0.5 时半径为 37.5 mm。

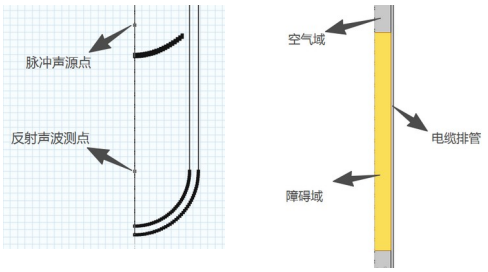


图 1 二维轴对称模型中的声源、测点与中部测试介质

五种工况的划分遵循“只改变中部测试区域”的原则。全空气工况用于提供基准传播时序；全水和全固体工况用于考察完整高阻抗界面对空气通道的截断作用；50% 水域和 50% 固体域用于考察外围空气通道存在时的旁路效应由于轴对称模型旋转后面积与半径平方成正比 50% 径向宽度对应的中心区域面积比例为 25%，这一点是解释部分介质工况的关键。

模型采用的水参数为 20 ℃水的密度 998 kg/m³、声速 1480 m/s；等效固体参数为密度 1800 kg/m³、纵波声速 3650 m/s。两类高阻抗介质均远高于空气声阻抗，但二者在测试区内部的传播速度和多次反射时间不同，因此水域更容易表现出密集振荡，而等效固体域的响应更接近脉冲化。

工况	径向范围	主要传播机制
全空气	无测试介质	空气导波与上端返回
全水	0≤r≤R_in	完整高阻抗界面反射
全固体	0≤r≤R_in	完整且更高阻抗的界面反射
50% 水	0≤r≤0.5R_in	中心水域与外围空气旁路
50% 固体	0≤r≤0.5R_in	中心等效固体与外围空气旁路

2.4 模型假设与适用范围

本模型定位于传播机理分析。硬声场边界、轴对称几何和等效固体介质便于隔离介质阻抗与覆盖范围的影响，但不包含偏心障碍、粗糙沉积物、真实管壁振动和声固耦合损耗。若用于定量反演积水长度或障碍体积，还需通过更多测点、频谱特征和声功率积分结果进行校准。

3 COMSOL Multiphysics 建模与操作流程

3.1 参数化几何与选择集

全局参数用于统一控制几何尺寸、测点位置、测试区宽度、材料编号、声源脉冲和求解时间窗。L_pipe、R_in、R_out、z_src、L_zone 和 zone_center_ratio 决定排管及测试区位置；zone_width_ratio 决定测试介质的径向覆盖范围；material_case 在水、等效固体和自定义介质之间切换；dt_out 和 t_end 控制结果保存间隔与终止时间。所有工况共用同一参数表，修改工况时不移动声源与测点，从而保证波形差异主要来自介质属性和几何占据范围。

几何序列在二维轴对称组件中依次建立管壁、下部空气域、中部测试介质、外围空气域上部空气域、声源点、反射测点和底部反射结构。形成联合体后，使用显式选择集分别管理声学流体域、管壁边界、测试介质域和测点位置。这样做的好处是，后续材料、物理场、网格和结果节点都引用选择集，而不是直接引用容易随几何变化而改变的域编号。

五种工况共用几何逻辑。将 zone_width_ratio 设为 1 或 0.5 可切换完整横截面与部分径向占据；material_case 控制测试区为水或等效固体。每完成一次参数切换后，重新生成几何、网格和研究解，再导出相同测点的总声压曲线。该流程保证了声源幅值、激励频带

时间步长和测点定义的一致性，避免将操作差异误认为物理差异。

3.2 材料与物理场

材料节点包括空气、管壁材料和可变测试介质。空气采用模型中的常规声学参数，测试介质的密度和声速由 rho_zone 与 c_zone 根据 material_case 自动取值。物理场选择 Acoustics Module 中的 Pressure Acoustics, Transient 接口，轴线采用轴对称条件，管壁和底部反射结构采用 Sound Hard Boundary，内部材料界面保持声压与法向速度连续，声源采用 Gaussian pulse 类型的 Monopole Point Source[2-3]。

等效固体区仍按压力声学介质处理，只描述纵向压力波在高阻抗介质中的传播和界面反射，不求解固体位移、剪切波、弯曲振动或管壁-障碍物接触效应。因此本文在表述中使用“等效固体”而不是直接称为真实砖块障碍重点讨论其作为高声阻抗区域对管内空气声场的影响。

3.3 网格、求解与后处理

声学域采用自由三角形网格，网格尺度围绕 500 Hz 主频以及可能出现的高频成分进行控制，使声源附近、测试区边界和底部反射结构处具有足够离散精度。研究类型选择 Time Dependent，输出时间步 dt_out=1×10⁻⁴ s，在 500 Hz 主频下每个周期约保存 20 个结果点；终止时间按空气声速下 50 m 管段往返时间留有余量，确保能够观察中部界面返回、上端返回及其再次经过中部的过程。

后处理包含两类结果。一类是二维轴对称截面上的总声压分布，用于检查波前在声源、底部反射结构和测试介质附近的空间形态；另一类是点探针时程曲线，用于比较声源附近、反射测点和测试区中点的压力响应。为了便于横向比较，五种工况均采用同一时间范围、同一纵坐标物理量和同一测点名称，导出的曲线只保留与声学判读相关的信息。

为保证工况切换的一致性，本模型采用参数控制和选择集引用。几何变化后，材料、物理场、网格和结果节点仍指向预定义选择集，可降低域编号变化导致的误指派风险；同一框架也可扩展至测试区长度、介质密度、声速和声源频率的参数扫描。

COMSOL 节点	本模型设置
Global Definitions	L_pipe、R_in、z_src、zone_width_ratio、material_case 等参数
Geometry	2D Axisymmetric；管壁、空气域、测试区、声源点与反射结构
Materials	Air；管壁材料；由 material_case 切换的测试介质
Pressure Acoustics, Transient	轴对称、硬声场、零初始值、连续性、高斯单极子点声源
Mesh and Study	Free Triangular；Time Dependent；dt_out=1×10⁻⁴ s
Results	声压云图与三测点压力时程

3.4 工况运行与结果导出

五种工况的点探针曲线统一采用相同时间轴和物理量尺度。结果解释先依据声程估算确定 0.08 s、0.15 s、0.22-0.23 s 和 0.30 s 四个时间窗，再比较各窗口内的响应幅值与持续振荡特征，以降低不同图像自动缩放对判读的影响。

4 传播时序校核

设空气声速 c_air=343 m/s，脉冲峰值时刻 t_0=0.006 s。声源至测试区中心约 25 m，至测试区下边界约 24.5 m。直接波到达中部、由中部界面返回声源附近以及由 50 m 管道上端返回的预计时刻分别由式（4）、式（5）和式（6）计算，式中 c 取 c_air。由于中部测试区长度仅为 1 m，其内部水域或等效固体的传播时延相对 50 m 空气路径较小，因此主要波包的全局时序仍主要由空气段声程决定。

$$t_d = t_0 + \frac{d}{c} \tag{4}$$

$$t_r = t_0 + \frac{2d}{c} \tag{5}$$

$$t_L = t_0 + \frac{2L}{c} \tag{6}$$

特征波包	声程	预计时刻	曲特征
直接波至中部	25 m	0.079 s	约 0.08 s
中部下界返回	2×24.5 m	0.149 s	约 0.15 s
上端返回再过中部	75 m	0.225 s	约 0.22-0.23 s
全长往返	2×50 m	0.298 s	约 0.30 s

5 仿真结果与讨论

5.1 全空气基准

全空气工况在 0.006 s 附近首先出现源脉冲，随后声源附近和底部反射测点的压力迅速回落

在 0.15 s 时间窗内没有出现同量级的早期返回，说明中部不存在能够截断空气通道的强阻抗界面。约 0.30 s 处出现显著返回波，与 50 m 管道上端往返估算一致。该工况反映了管道几何本身的导波特征：径向扩散受到管壁约束，能量能够沿轴向传播较长距离后再返回底部区域。

全空气工况作为无中部阻抗突变的基准。若其他工况在 0.15 s 附近出现新增峰值，且与声源至测试区下边界往返声程相符，可归因于中部介质界面反射；若 0.30 s 全长返回仍较强，则表明管道上下段之间仍存在连续的空气传播路径。

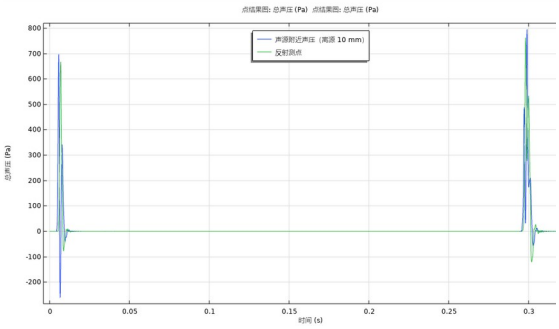


图 2 全空气工况的声源附近与底部反射测点声压

5.2 中部全水域声压传播特性

中部全水工况在约 0.08 s 接收到直接波，测试区中点随即出现持续时间较长的压力振荡；声源附近与底部反射测点在约 0.15 s 出现明显返回峰，表明空气-水界面对入射波形成强反射。水域声阻抗约为 1.48×10^{6} Pa·s/m，远高于空气声阻抗，近似法向入射下声压反射系数接近 1。进入 1 m 水域的部分声波在水-空气上下界面之间多次往返，其单次往返时间约为 1.35 ms，因此在 0.1-0.3 s 的整体时间尺度上表现为密集振荡。

水域中的较高局部声压不等同于较高透射声功率。空气向高阻抗介质传播时，界面处声压可因反射叠加而升高，而粒子速度和实际透射能流仍可能受到抑制。因此，测试区中点声压应与声源附近的提前返回以及远端返回的变化联合分析。

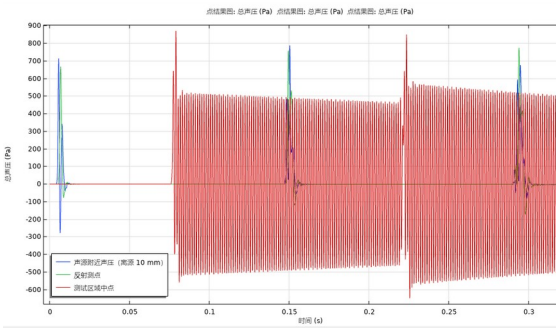


图 3 中部全水工况的界面返回与测试区振荡

5.3 中部等效固体域声压传播特性

中部全固体域的主要到达时序与全水域相近：测试区中点在约 0.08 s 首次响应，声源附近和反射测点在约 0.15 s 出现由中部界面引起的返回波，0.29-0.30 s 附近仍可观察到来自上端的返回成分。由于等效固体密度为 1800 kg/m³、纵波声速为 3650 m/s，其等效声阻抗约为 6.57×10^{6} Pa·s/m，高于水域声阻抗，因而界面对空气声场的反射作用更强。

与全水域相比，等效固体测试点的时域响应更接近短时脉冲，持续振荡不如水域明显。这与介质内部传播速度较高、1 m 测试区内往返时间更短以及多次反射波相位叠加方式不同有关。由于本模型未启用 Solid Mechanics，计算结果应理解为高声阻抗等效介质对压力波的影响而不是实体障碍物的完整弹性波响应。

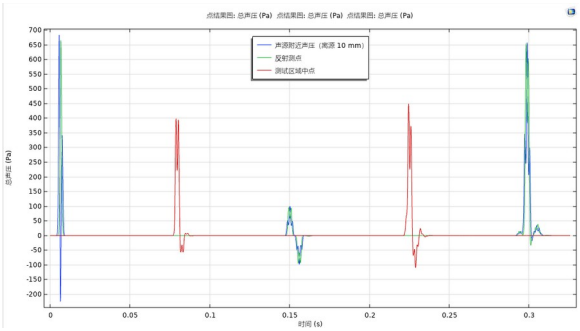


图 4 中部等效固体工况的高阻抗界面返回

5.4 中部 50%水域声压传播特性及旁路效应

当水域半径为 0.5R_in 时，轴对称旋转后的中心水域只占圆形横截面积的 25%，外围空气环带占 75%。声波到达中部后形成两类路径：中心区域的声场在空气-水界面处反射、透射并发生局部干涉，外围区域的声场则沿连续空气环带继续向上端传播。因此，50% 水域工况在 0.15 s 附近的早期返回明显弱于全水域，而 0.22-0.23 s 的测试区二次响应和 0.30 s 的全长返回重新增强。

这一结果说明，径向宽度比例不能直接等同于阻断能力。对于圆形截面，半径减半只对应中心面积的四分之一，外围四分之三截面仍为空气。即使水域声阻抗远高于空气，只要低阻抗空气通道保持连续，声波仍可绕过中心区域完成长距离传播。

5.5 中部 50%等效固体域声压传播特性

50% 等效固体域与 50% 水域具有相似的整体时序。测试区在约 0.08 s 首次响应，0.15 s 附近只有较弱局部返回，0.22-0.23 s 附近出现上端返回波再次经过测试区的响应，0.30 s 附近全长

返回仍然占据主导。与 50% 水域相比，中心等效固体的声阻抗更高，对局部声场的扰动和边缘散射更强，但外围空气环带仍决定了管道整体传播路径没有被完全切断。

部分障碍工况表明，底部测得 0.30 s 左右的强返回并不足以排除中部障碍。若 0.15 s 附近同时存在较弱但可辨识的早期返回，且中部测点响应发生变化，则更符合中心障碍与外围旁路并存的传播特征。

5.6 综合讨论、诊断判据与解释边界

综合五种工况，时域判读可分为三个主要窗口：0.08 s 附近用于确认直接波到达中部测试区，0.15 s 附近用于定位中部强阻抗界面，0.30 s 附近用于识别管道上端返回是否保留。0.30 s 返回波存在并不能单独证明管道完全畅通，因为部分障碍下的外围空气旁路同样会保留该信号 0.15 s 返回波强也不能单独代表封堵体积，因为界面形状、材料阻抗和测点位置都会影响局部声压。更稳妥的判据应联合早期返回强度、测试区中点响应、三测点到达时间和不同频率激励下的重复性。

本研究主要比较声压时程，尚未直接计算透射声强、声功率和频域传递函数。若需要定量评价阻断能力，应在测试区上下截面增加轴向声强积分，比较入射声功率、反射声功率和透射声功率；若研究真实固体障碍，应启用 Solid Mechanics 与 Acoustic-Structure Boundary，并给出实体材料弹性模量、泊松比和阻尼参数对于底部半充水、偏心障碍、不规则沉积和多段积水，还需改用三维或非轴对称模型。

从本模型的结果看，声阻抗决定界面是否容易反射，覆盖面积决定空气通道是否被切断传播声程决定峰值出现的时间。三者共同决定了最终时程曲线。把这三项分开讨论，可以避免把“高阻抗导致强反射”和“高阻抗必然导致全管道阻断”混为一谈，也能解释为什么 50% 水域与 50% 固体域在整体远距离传播上比全水域和全固体域更接近全空气工况。

工程应用时，可先利用已知状态排管建立基准曲线，再在相同激励条件下比较可疑管段。峰值时刻用于约束反射位置，相对幅值用于表征界面反射强弱，多测点一致性用于降低局部安装与传感器响应差异的影响。现场应用仍需通过试验对材料损耗、管壁连接和端部边界条件进行修正[4,6]。

传播时间与工况对比提供了两类相互独立的证据：主要峰值与声程估算一致；完整高阻抗介质增强 0.15 s 界面返回，而部分径向介质保留 0.30 s 全长返回。两类证据共同表明，介质阻抗与横截面连通性对排管内声波传播具有耦合作用。

时间离散方面，$dt_{out}=1\times10^{-4}$ s 对 500 Hz 主频具有足够的曲线采样密度，可以分辨源脉冲、早期返回和全长返回的时序差异。若提高声源频率，应同步缩小最大网格尺寸和输出时间步，避免将数值离散不足误判为物理衰减或波形展宽。不同工况的结果图应保持相同时间轴，必要时可增加局部放大图。

材料域连续性方面，全水和全固体工况必须覆盖 $0\le r\le R_{in}$ 的完整声学流体截面，否则残留空气缝隙会人为引入旁路传播；50% 水域和 50% 固体域则必须保留外围空气环带，以体现部分径向障碍与完整障碍之间的差别。二维声压场用于检查测试区上下界面及边缘处的波前形态，点探针曲线用于进一步读取时域响应。

五种工况的可比性要求声源点位置、底部反射测点位置、测试区中心位置和管道上端边界保持不变。上述位置发生偏移后，0.079 s、0.149 s 和 0.298 s 等特征时刻会随声程改变。模型将这些位置写入全局参数，并通过选择集引用测点和域，以降低手工选择造成的误差。

6 结论

基于 COMSOL Multiphysics 的二维轴对称瞬态压力声学模型，本文重现了电缆排管内直接波、局部界面返回、测试区内部多次反射、外围绕行和全长往返等传播过程。0.079 s、0.149 s、0.225 s 和 0.298 s 等主要响应与声程估算相互吻合，说明模型的几何尺寸、介质声速、声源时刻和求解时间窗在传播时序上具有一致性。

完整水域或高阻抗等效固体封闭横截面时中部界面返回成为主导响应，尤其在 0.15 s 附近形成明显早期返回；当介质半径减半后，中心区域只占圆形截面积 25%，外围 75% 截面积的连续空气环带保留了远距离传播通道，使 0.30 s 全长返回波重新增强。因此，排管声学检测应同时考虑材料阻抗、封堵面积和空气通道连续性，并采用多测点、多时间窗联合判读，而不宜只根据单一峰值作结论。

后续工作可在现有模型基础上增加频率扫描、声功率积分和参数灵敏度分析，用于建立更接近现场检测的定量指标；对于真实固体障碍和非轴对称积水，还应引入声固耦合或三维

模型，以评估剪切波、结构振动和非均匀界面对判读结果的影响。

完整截面阻断与部分径向障碍呈现出不同的时域特征。完整水域或完整等效固体使 0.15 s 早期界面返回更加突出；部分水域或部分等效固体虽然引起局部反射和散射，但外围空气环带保持连通，0.30 s 远端返回仍可保留。该差异与模型几何、截面面积比例和声程计算相互对应。

参考文献

[1] COMSOL AB. Acoustics Module User's Guide, Version 6.3. Stockholm: COMSOL AB, 2024.

[2] COMSOL AB. The Pressure Acoustics, Transient Interface. COMSOL Multiphysics 6.3 Documentation, 2024.

[3] COMSOL AB. Monopole Point Source. COMSOL Multiphysics 6.3 Documentation, 2024.

[4] Nasraoui S, Louati M, Ghidaoui M S. Blockage detection in pressurized water-filled pipe using high frequency acoustic waves[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 185: 109817.

致谢

感谢 COMSOL Multiphysics 6.3 及 Acoustics Module 为本文的参数化建模、时间依赖求解与结果后处理提供计算平台。