

封闭空间内结构噪声预测研究及诊断分析

王盛震 吴志 王振龙 杨海波 苏小东

北方民族大学 土木工程学院，宁夏银川，750030；

摘要：本文主要研究封闭空间边界和结构边界产生的声辐射和声散射效应，并结合格林函数方法在封闭空间边界和结构边界增设刚性边界和阻抗边界两种情形，主要研究封闭空间内结构和空间边界诱发的声散射现象。考虑到结构的大小尺寸和空间位置，数值预测结果表明随着波数的增大，声场分布复杂度显著加强，阻抗边界能够有效降低整体噪声，对于低波数情形噪声更加显著。本文开展的封闭空间内部结构噪声研究能够为实际人居环境中降噪优化问题提供参考数据。

关键词：噪声预测；结构；室内环境；降噪

DOI：10.69979/3029-2727.25.08.061

引言

随着城市化进程的加快，住宅室内噪音问题日益突出，严重影响了居民的生活质量和身心健康。建筑结构内部噪声涉及较广，如外部环境噪声、机械系统噪声、结构噪声等。封闭空间内噪声的量化和有效控制能够提升环境质量、优化结构设计和施工、改善人居生存环境等，因此对住宅室内噪音进行预测和降噪诊断显得尤为重要。近年来，关于建筑结构噪声的研究主要集中于噪声传播机理、噪声源识别和控制、新材料应用、噪声预测和降噪研究等方面。本文旨在探讨住宅室内噪音的产生、传播规律，以及有效的降噪措施。本研究通过对室内噪音源、传播途径和受影响区域的分析，为住宅室内噪音治理提供理论依据和实践指导。

本文结合二维封闭空间模型，在空间内部布置单圆柱结构开展详细的数值预测研究和诊断分析。首先介绍了噪声预测的模型方程和研究方法；其次，数值预测部分针对自由空间和封闭空间内的噪声强度大小和分布情况开展了详细的分析；最后，结合封闭空间内结构位置分析诱发噪声的原因，对比刚性边界和阻抗边界声场的云图分布，进一步总结封闭空间内噪声传播特点及降噪优化效果。

1 模型方程

已知给定边界条件下，线性声波在任意空间内传播时可用下述方程描述

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} g(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t, \tau) - \nabla^2 g(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t, \tau) = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{y}) \delta(t - \tau) \\ \left(\alpha + \beta \frac{\partial}{\partial n} \right) g(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t, \tau) \Big|_S = 0 \quad (1)$$

其中 c 表示声波在空气中的传播速度，常温状态下 $c = 340 \text{ m/s}$ ， \mathbf{x} 和 \mathbf{y} 分别表示观察点和声源点的空间位置， $g(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t, \tau)$ 表示 τ 时刻位于 \mathbf{y} 的单位点源发出的声波传播到达 t 时刻 \mathbf{x} 的声波信号强度。

为求解声波传播，结合点源传播解析解 $g(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t, \tau)$ 和积分方法可以获得积分方程：

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{z}, t, t') = g_0(\mathbf{x}, \mathbf{z}, t, t') - \int_{-\infty}^{\infty} \int_S \left[g(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t, \tau) \frac{\partial g_0(\mathbf{z}, \mathbf{y}, t', \tau)}{\partial n} g_0(\mathbf{z}, \mathbf{y}, t', \tau) \frac{\partial g(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t, \tau)}{\partial n} \right] ds_y dt' \quad (2)$$

其中， $g(\mathbf{x}, \mathbf{z}, t, t')$ 表示自由空间内格林函数。

对上述方程两端实施 FFT 变换，可以得到频域空间的模型方程

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega) = G_0(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega) + \int_S \left[G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) \frac{\partial G_0(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial n} - G_0(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \omega) \frac{\partial G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial n} \right] ds_y \quad (3)$$

对于方程(1)，在频域空间内满足边界条件，可进一步简化为如下方程

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega) = G_0(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega) + \int_S G(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) \left[\frac{\partial G_0(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \omega)}{\partial n} + \beta G_0(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \omega) \right] ds_y \quad (4)$$

其中， $G(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega)$ 表示频域空间内的自由空间格林函数，其具体表达式为

$$G_0(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega) = \frac{j}{4} H_0^{(1)}(k |\mathbf{x} - \mathbf{z}|)$$

方程(4)即为阻抗边界情形下点源噪声计算的模型方程。

本文采用 Fortran 程序语言开展数值模拟, 将圆柱表面划分为多个单元

方程(4)可以等价转化为

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega) = G_0(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \omega) + \sum_{i=1}^N \int_{S_i} G(\mathbf{x}, \mathbf{y}_i, \omega) \left[\frac{\partial G_0(\mathbf{z}, \mathbf{y}_i, \omega)}{\partial \mathbf{n}} + \beta G_0(\mathbf{z}, \mathbf{y}_i, \omega) \right] dS_y$$

噪声传播过程中涉及散射噪声和辐射噪声, 采用上述方程进行数值研究时具体步骤如下:

(1) 散射声源计算: 在圆柱附近布置点声源, 计算圆柱表面上的散射声源;

(2) 远场噪声计算: 散射声源的噪声、点源噪声的噪声和阻抗边界的噪声。

在数值预测研究中, 重点涉及边界散射噪声的预测分析, 主要结合两类边界条件进行, 第一类边界条件为刚性边界条件, 第二类边界条件为阻抗边界条件, 方程(4)中对应于两类边界条件的参数 β 不同:

- (1) 刚性边界条件, $\alpha = 0, \beta = 1$;
- (2) 阻抗边界条件, $\alpha = 1, \beta = i\rho\omega/Z(\omega)$,

$$Z(\omega) = R_z + i(X_{-1}/\omega + X_1\omega),$$

$$R_z = 0.2\rho c$$

$$X_1 = 0.0739\rho c$$

$$X_{-1} = -13.48\rho c$$

其中, $Z(\omega)$ 表示阻抗因子, X_1 和 X_{-1} 分别表示声质量、刚度系数。 ρ 表示传播介质的密度, ρc 表示传播介质的阻抗, 本文中传播介质为空气。

2 数值预测

2.1 自由空间内圆柱诱发的结构噪声

首先以自由空间内结构边界引起的声散射问题验证程序算法的正确性, 在无边界限制的二维自由空间平面内 $(0, 0)$ 放置半径 $R=0.5$ 的圆柱, 圆柱表面为刚性边界, 将圆柱表面均匀划分为 180 个网格单元。单位点源位于 $y=(2R, 0)$, 图 1 显示了低波数和高波数情形下结合方程(5)获得的数值解与精确解的比较图示。其中, Exact 代表精确解, Numerical 代表数值解。由图可知, 在不同波数下, 数值解与精确解相当吻合。随着波数的增大, 声波频率逐渐增大, 声压指向性呈现由圆形向漏斗状不断过渡。 $[0, 180^\circ]$ 区间内的观察点声压幅值显著大于 $[181^\circ, 360^\circ]$ 内观察点的声压幅值, 且所有观察点的声压幅值随着波数增大呈现逐渐减小的趋势。

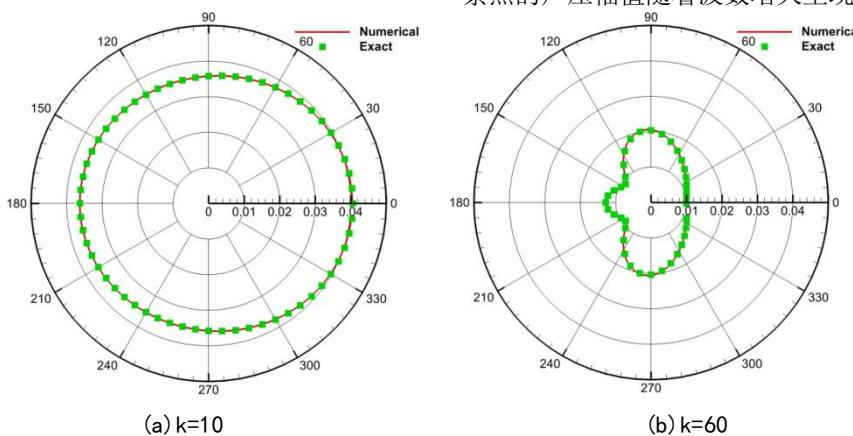


图 1 二维自由空间内圆柱噪声的远场声压指向性分布

上述数值预测结果显示, 采用模型方程(5)所编写的程序算法能精确的捕捉存在精确解的自由空间内二维圆柱远场噪声分布, 且噪声的分布规律符合实际, 能够较好的反映圆柱右侧单位点源所诱发噪声的声场分布。由于声源的不对称性, 远场噪声分布在高波数情形下也出现了显著的差异。

2.2 封闭空间内圆柱诱发的结构噪声

实际生活中广泛的存在封闭空间内结构边界和空间边界诱发的散射噪声现象, 且散射噪声带来的影响往往大于辐射噪声。此处结合自由空间内噪声进行分析, 同时与封闭空间内刚性边界和阻抗边界情形下的噪声进行数值比较。图 3 显示了所选定的二维空间预测模型, 在平面空间内放置一个圆柱 $D=0.5\text{m}$, 圆柱中心位于坐标原点 $(0, 0)$, 圆柱中心与左边界和右边界距离分别为 $1D$ 、 $20D$, 与上边界和下边界距离均为 $10D$ 。由图可知,

x点接收到的噪声信号主要来源于两部分：

- (1) 辐射噪声： $y \rightarrow x$ ，
- (2) 散射噪声： $y \rightarrow S_i \rightarrow x$, $y \rightarrow S_i \rightarrow x$ ($i=1, 2, 3$,

4)

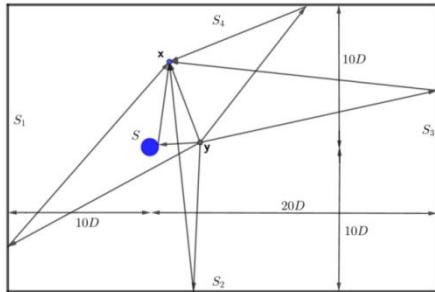


图2 二维封闭空间内声传播示意图

图3给出了自由空间和封闭空间相同观察点声压幅值指向性分布比较，与图1相似，此处选取的观察点位于半径 $R=5D$ 的圆周上。其中，Free space 表示自由空

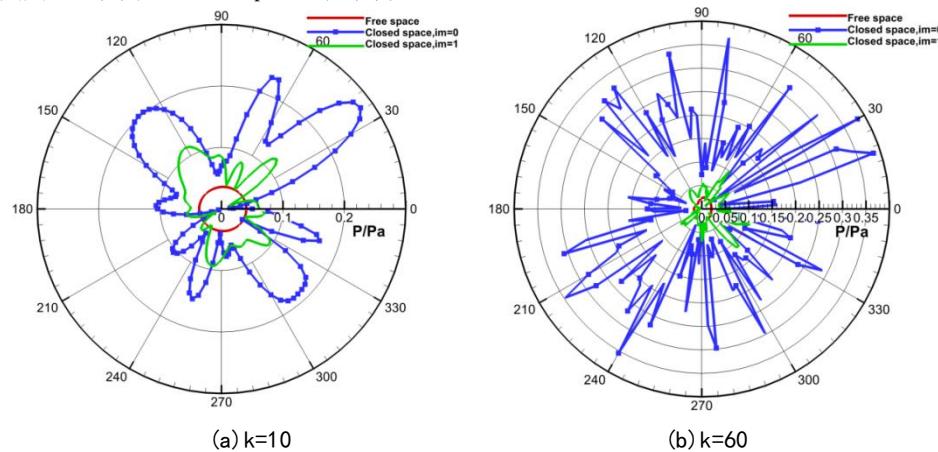


图3 自由空间和封闭空间相同观察点声压幅值指向性分布比较

为了详尽考察封闭空间内不同位置处噪声的空间分布、强声源分布及阻抗边界对于局部区域观察点的降噪效果，在图2所示的二维封闭空间内布置1760个观察点，如图4所示。图4中的蓝色边界线上均添加了阻抗，观察点位于网格线的交点上，包括区域内部网格线和边界。

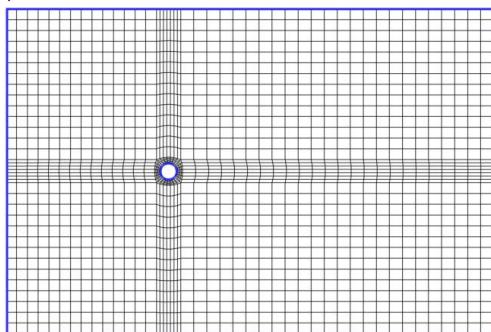


图4 二维封闭空间内观察点分布示意图

间无阻抗，Closed space 表示封闭空间， $im=0$ 表示空间边界和结构边界无阻抗， $im=1$ 表示空间边界和结构边界有阻抗。由图可知，封闭空间内点源噪声信号强度显著大于自由空间内的声波信号强度。封闭空间内噪声信号在 $k=10$ 时观察点处已经呈现出多花瓣状结构，随着波数的增大，波数 $k=40$ 情形下的声场分布花瓣数目不断增加。自由空间内噪声声压幅值随着波数的增加呈现不断减小的趋势，封闭空间内噪声分布并不呈现这一规律，阻抗边界情形下声压幅值明显小于封闭空间内刚性边界情形下的声压幅值，然而还是大于自由空间气动噪声分布，这也是符合物理事实的，阻抗边界只能有效的降低噪声，并不能完全消除封闭边界引起的散射噪声。同时，上述预测结果也说明封闭空间内四条边界引起的散射噪声显著大于辐射噪声。

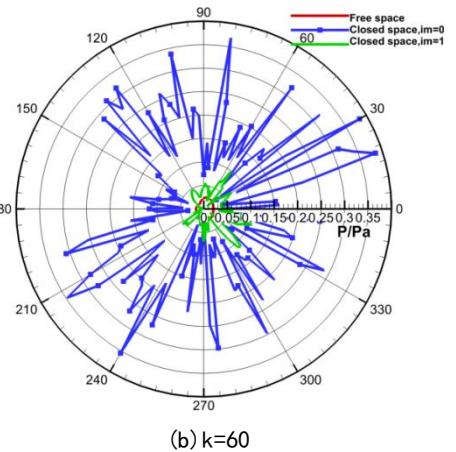


图5显示了不同波数下封闭空间内结构边界和空间边界上刚性边界和阻抗边界两种情形的声压云图分布，为与自由空间内噪声结果进行对照，给定波数为 $k=10$ 和 $k=60$ 。由图可知，随着波数的增大，声压云图呈现出与图3所示声压指向性分布相同的变化规律，刚性边界情形下的声场比阻抗边界下的声场更加剧烈，声压幅值更高，说明阻抗边界的添加能够降低整体噪声。然而，所有观察点处的声压幅值并不会呈现一致下降的趋势。不同频率下，强噪声信号分布的空间位置也不同。在低波数情形下，如图5(a)，强声波信号主要集中于圆柱上方和圆柱下方，且以上边界和下边界为准；随着波数的增大，高频声波信号重点集中于圆柱四周，封闭边界上的噪声信号强度也呈现减小的趋势。

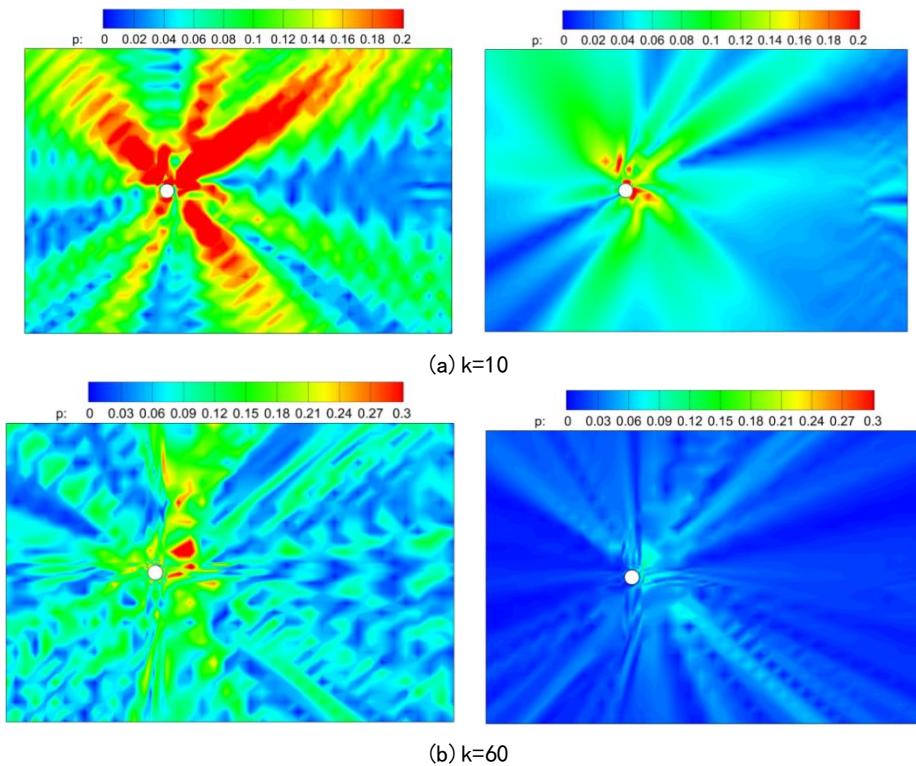


图5 封闭空间内声压云图随波数的变化图示，左侧：刚性边界，右侧阻抗边界

3 结论

本文结合Fortran程序语言开展了二维封闭空间内结构及空间边界的散射噪声预测研究，对比分析了刚性边界和阻抗边界下的声场分布。基于上述研究工作，得到如下结论：

(1) 与自由空间声传播一致，封闭空间内噪声信号随着波数的增大声压幅值不断减小，说明声学信号主要集中于中频率和低频率。不同之处在于，受结构边界和空间四条边界的影响，封闭空间内声压指向性呈现复杂的多花瓣状。阻抗边界情形下声压幅值明显小于封闭空间内刚性边界情形下的声压幅值，然而还是大于自由空间气动噪声分布，这也是符合物理事实的，阻抗边界只能有效的降低噪声，并不能完全消除封闭边界引起的散射噪声。

(2) 刚性边界情形下的声场比阻抗边界下的声场更加剧烈，声压幅值更高，说明阻抗边界的添加能够降低整体噪声。然而，所有观察点处的声压幅值并不会呈现一致下降的趋势。不同频率下，强噪声信号分布的空间位置也不同。强声波信号主要集中于圆柱上方和圆柱下方，且以上边界和下边界为准；随着波数的增大，高频声波信号重点集中于圆柱四周，封闭边界上的噪声信

号强度也呈现减小的趋势。

参考文献

- [1] 吴静. 高层建筑噪声垂直分布及控制[J]. 重庆建筑, 2006, 12: 3.
- [2] 吕玉恒, 杨捷胜. 民用建筑噪声控制设计[J]. 声学技术, 2002, 21(1): 4.
- [3] 李雪菲. 基于 Cadna/A 软件的城市交通复杂声场高层建筑噪声影响预测分析[J]. 环境与发展, 2019, 31(6): 2.
- [4] 余慧娜. 浅谈在建筑设计中综合考虑建筑节能与建筑噪声控制[J]. 江西化工, 2010, 3: 145–146.
- [5] 刘长卿. 结构参数对地铁引起建筑结构噪声影响分析[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(3): 223–227.
- [6] 曾钦娥, 宋瑞祥, 吴丹等. 地铁沿线高层住宅建筑室内振动与结构噪声的相关性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(8): 15–16.

本项目由北方民族大学校级大学生创新创业项目“住宅室内噪声预测及降噪诊断研究”（编号：2024-TD-03）资助完成。