

有限大圆盘对声功率测量的影响

姓名: 钟 家 鑫

导师: 陶 建 成

邱 小 军

学院: 物理学院

专业: 声 学



2015 级硕士学位论文答辩

2018 年 5 月 24 日

答辩提纲

- 1 研究背景
- 2 理论模型
- 3 数值仿真
- 4 实验研究
- 5 总结和展望

声功率测量

● 测量原理

- 声压法、声强法、其他间接法

● 测量环境

- 全消声室、半消声室、混响场

● 实际测量的需求

- 声源需障板支撑
- 全消中铺设障板 $\xrightarrow{\text{模拟}}$ 半消

● 实际测量的问题

- 测点处 **声压改变**
- 体积源自身辐射 **声功率改变**

● 研究内容

- **有限大圆盘** 对声功率测量的影响及 **定量修正**

ISO 的声功率级计算式 (论文 1.1 式)

$$L_W = \bar{L}_p + 10 \lg S + C \quad (1)$$

- \bar{L}_p : 测量面表面平均声压级

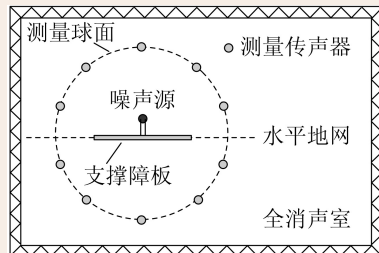


图 1. 消声室中进行声压法声功率测量示意图

声功率测量综述

- 测量标准
 - ISO 3745 (GB/T 6882): 全消、半消(精密法)
 - ISO 3744 (GB/T 3767): 半消(工程法)
 - ISO 3746 (GB/T 3768): 户外(简易法)
 - ISO 3741 (GB/T 6882.1): 混响室(精密法)
- 1958年, Waterhouse 使用 镜像源法 分析无限大反射面对单、偶极子的辐射声功率影响
- 1982年, Lim 等基于 镜像源法, 在理论与实验上研究了半自由场中单极子的辐射声功率
 - 主要结论: 当 $kh \rightarrow 0$, 声功率 \nearrow 3 dB
- 2007年, Suzuki 等基于 镜像源法 与统计分析, 提出误差更小的测点布放方案
 - 结论: 传声器布点的对称性越强, 误差越大
 - 方案被 ISO 3745 采纳

有限大圆盘的点源散射模型综述

模型的解析解

- 1897 年, Rayleigh 勋爵提出圆盘的声散射模型
- 1933 年, Kotani 将圆盘边界看作退化的扁球面边界
- 1957 年, Flammer 给出 Green 函数的扁球面硬边界的解析解
 - 角波动函数 → 类 Legendre 函数
 - 径波动函数 → 类 Bessel 函数

函数的数值计算

- 1961 年, Silbiger 给出 ka 极小、大的渐近解
- 1996 年, Zhang 给出近场、 ka, m, n 较小的数值计算方法 (Fortran)
- 2014 年, Adelman 引入 MPFR 库的高精度计算 (MATLAB & C)
- 2017 年, Van Buren 改进数值计算理论, 无需高精度 (Fortran)

有限大圆盘的点源散射模型综述

模型研究的发展

- 1979 年, Lauchle 研究了圆盘中心放置点源的声场指向性
- 2014 年, Adelman 仿真了点源、平面波入射的近场声场分布
- 2017 年, Zhong 仿真了声功率测量中测点处的声压变化量

● 研究历程

- 远场 → 近场
- 低频 → 中高频
- 小尺寸 → 大尺寸

● 待解决的问题

- 理论: 引入圆盘后恒体积源声辐射功率
- 实际: 有限大圆盘对声功率测量的影响

圆盘对声功率测量影响的修正项

3 种实际测量情况 (论文 2.16 式)

- 情况 1: 消声室中 **全空间** 声压可测 $\Rightarrow L_W = L_{W,m} - C_1$
- 情况 2: 消声室中 **仅上半空间** 声压可测 $\Rightarrow L_W = L_{W,m} - C_1 - C_2$
- 情况 3: 消声室中铺设圆盘 **模拟半消声室** $\Rightarrow L_W = L_{W,m} - C_1 - C_2 - C_3$

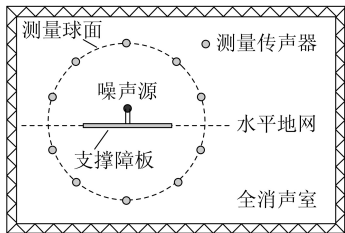


图 2. 消声室中进行声压法声功率测量示意图

定义修正项 (论文 2.10 ~ 2.12 式)

$$C_1 = 10 \lg (W_{\text{disk}} / W_{\text{free}})$$

$$C_2 = 10 \lg (W_{\text{disk,above}} / W_{\text{disk}})$$

$$C_3 = 10 \lg (W_{\text{free}} / W_{\text{inf}})$$

扁球面坐标系

Cartesian 坐标 (x, y, z) 与扁球面坐标 (η, ξ, φ) 的转换 (论文 2.1 式)

$$\begin{cases} x = a\sqrt{(1-\eta^2)(1+\xi^2)}\cos\varphi \\ y = a\sqrt{(1-\eta^2)(1+\xi^2)}\sin\varphi \\ z = a\eta\xi \end{cases} \xrightarrow{\xi=0} \begin{cases} x = a\sqrt{1-\eta^2}\cos\varphi \\ y = a\sqrt{1-\eta^2}\sin\varphi \\ z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

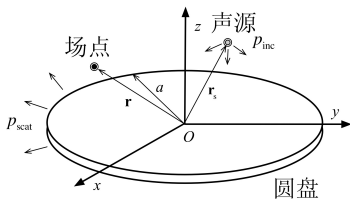


图 3. 有限大圆盘的点源声散射模型

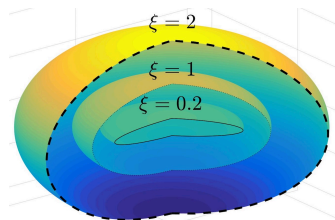


图 4. 扁球面坐标系的径坐标 ξ 曲线

声压场

波动方程与边界条件 [Flammer 1957] (论文 2.2, 2.4 式)

- 波动方程: $(\nabla^2 + k^2) p_{\text{disk}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s) = j\rho\omega Q\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s)$
- 边界条件: $\left. \frac{\partial p_{\text{disk}}}{\partial \xi} \right|_{\xi=\xi_b} = 0$

点源 $(\eta_s, \xi_s, \varphi_s)$ 在场点 (η, ξ, φ) 处产生的声压 [Flammer 1957] (论文 2.5 式)

$$p_{\text{disk}}(\eta, \xi, \varphi) = \frac{\rho\omega k Q}{4\pi} \sum_{m,n} \frac{2\varepsilon_m}{N_{mn}(-jka)} S_{mn}(-jka, \eta) S_{mn}(-jka, \eta_s) \cos[m(\varphi - \varphi_s)]$$

$$\times \left[\begin{array}{l} R_{mn}^{(1)}(-jka, j\xi_{<}) R_{mn}^{(3)}(-jka, j\xi_{>}) \\ - \frac{R_{mn}^{(1)' }(-jka, j\xi_b)}{R_{mn}^{(3)' }(-jka, j\xi_b)} R_{mn}^{(3)}(-jka, j\xi) R_{mn}^{(3)}(-jka, j\xi_s) \end{array} \right]$$

辐射声功率

点源在自由场中的辐射声功率 [Waterhouse, 1958] (论文 2.6 式)

$$W_{\text{free}} = \frac{\rho\omega k Q^2}{8\pi} \quad (3)$$

点源在半自由场中的辐射声功率 [Waterhouse, 1958] (论文 2.13 式)

$$W_{\text{inf}} = \frac{\rho\omega k Q^2}{8\pi} \left[1 + \frac{\sin(2kh)}{2kh} \right] \quad (4)$$

点源在自由场引入圆盘后的辐射声功率 (应用声功率的辐射阻表示, 论文 2.7 式)

$$W_{\text{disk}} = \frac{\rho\omega k Q^2}{8\pi} \sum_{n,m} \frac{2\varepsilon_m}{N_{mn}(-jka)} [S_{mn}(-jka, \eta_s)]^2 \times \left| R_{mn}^{(1)}(-jka, j\xi_s) - \frac{R_{mn}^{(1)' }(-jka, j\xi_b)}{R_{mn}^{(3)' }(-jka, j\xi_b)} R_{mn}^{(3)}(-jka, j\xi_s) \right|^2 \quad (5)$$

辐射声功率

点源在自由场引入圆盘后的上半空间的辐射声功率 (远场半球面离散化, 论文 2.14 式)

$$W_{\text{disk,above}} = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\pi R^2}{\rho c L} \sum_{l=1}^L \left| p_{\text{disk,far}}(R, \theta_l, \varphi_l) \right|^2 \quad (6)$$

- L : 离散点数目
- (R, θ_l, φ_l) : 远场半球面, 第 l 个面元中心点球坐标
 - 扁球面坐标的渐近近似: $\xi \rightarrow \infty$ 时, $a\xi \rightarrow r$ 且 $\eta \rightarrow \cos \theta$
- $p_{\text{disk,far}}(R, \theta_l, \varphi_l)$: 第 l 个面元中心处的声压

边界元仿真验证

仿真参数

- 圆盘半径 $a = 0.5\text{m}$ 、声压幅度 $\rho\omega Q/(j4\pi) = 1\text{kg/s}^2$
- 网格最大尺寸 17 mm (1000Hz 对应 0.05λ)

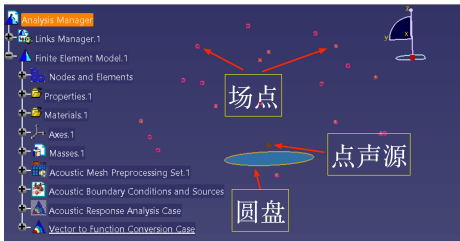


图 5. Virtual.Lab 的边界元仿真模型

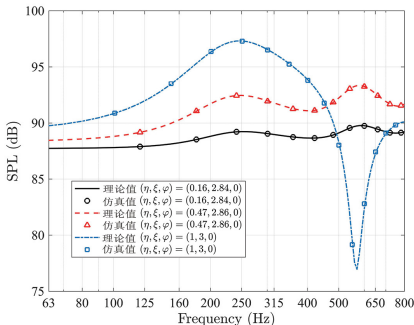


图 6. 边界元仿真与理论计算对比, 其中 $h = 0.1\text{m}$

测量情况 1 的仿真:消声室中全空间声压可测配置

- 修正项: $C_1 = 10 \lg(W_{\text{disk}}/W_{\text{free}})$
 - $h = 0$ 时, $a \rightarrow \infty \implies C_1 \rightarrow 3\text{dB}$: 圆盘 \rightarrow 半消
 - 当 $h = 0, a \approx 0.35\lambda$ 时, C_1 取最大值 4.0dB

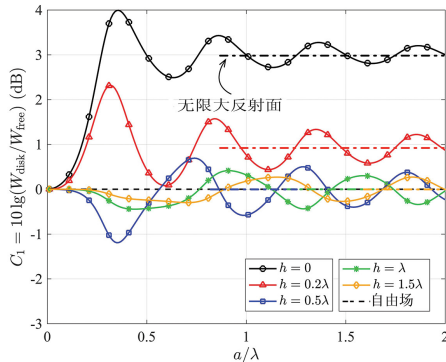


图 7. 固定高度 h , 情况 1 的修正项随圆盘半径 a 的变化

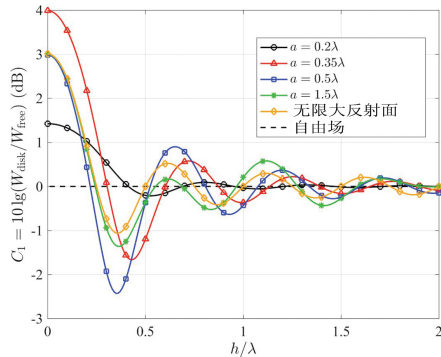


图 8. 固定圆盘半径 a , 情况 1 的修正项随高度 h 的变化

测量情况 2 的仿真: 消声室中仅上半空间声压可测配置

- 修正项: $C_1 + C_2 = 10 \lg (W_{\text{disk,above}}/W_{\text{free}})$
 - 与情况 1 的趋势基本一致
 - 当 $h \approx 0.41\lambda, a \approx 0.35\lambda$ 时, $C_1 + C_2$ 取最大值 -7.0dB

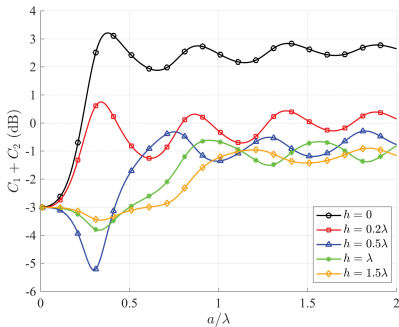


图 9. 固定高度 h , 情况 2 的修正项随圆盘半径 a 的变化

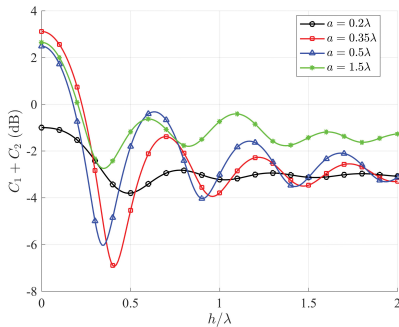


图 10. 固定圆盘半径 a , 情况 2 的修正项随高度 h 的变化

测量情况 3 的仿真: 消声室中铺设圆盘模拟半消声室

- 修正项: $C_1 + C_2 + C_3 = 10 \lg (W_{\text{disk,above}}/W_{\text{inf}})$
 - 修正项通常小于 0 dB, 表明测得的声功率级偏小
 - 当 $h \approx 0.41\lambda, a \approx 0.35\lambda$ 时, $C_1 + C_2 + C_3$ 取最大值 -6.0dB

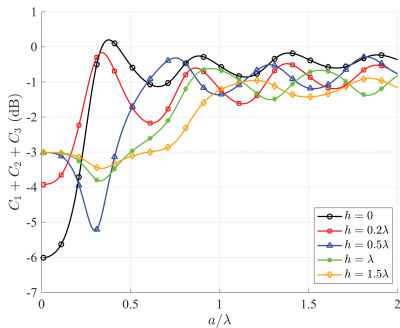


图 11. 固定高度 h , 情况 3 的修正项随圆盘半径 a 的变化

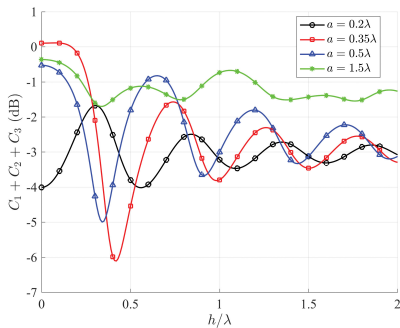


图 12. 固定圆盘半径 a , 情况 3 的修正项随高度 h 的变化

实验配置

- 南京大学声学所消声室: 11.4 m × 7.8 m × 6.7 m
 - 测量面支架半径: 1.5 m
 - 体积声源: 中国声望科技公司 VSS 058 低频体积源
 - 圆盘半径: 0.5 m、厚度: 1.8 cm、面密度: 15.30 kg/s²

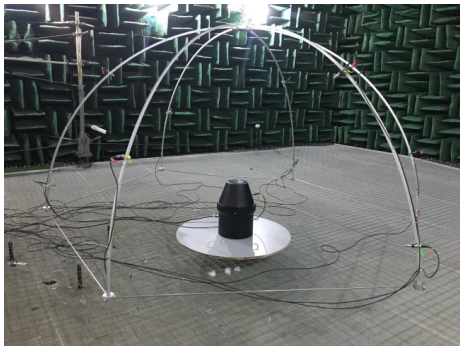


图 13. 消声室中声源顺置的实验装置图

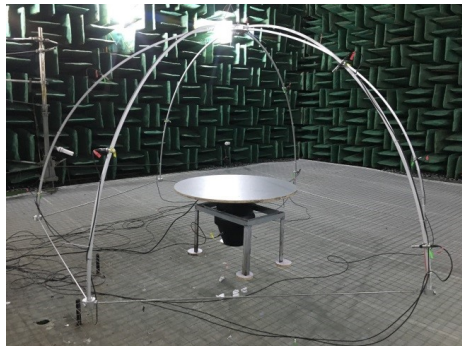


图 14. 消声室中声源倒置的实验装置图

实验配置

- 中国计量科学研究院半消声室:13.2 m× 10.0 m×7.2m
 - 测量面支架半径:2 m

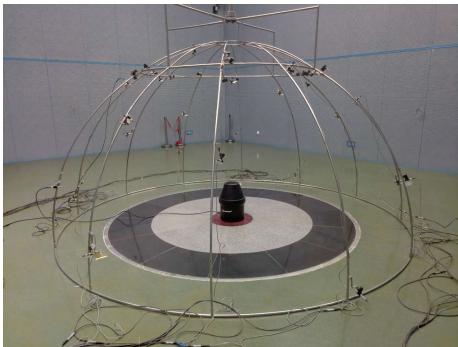
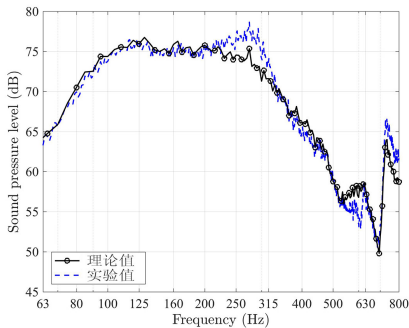
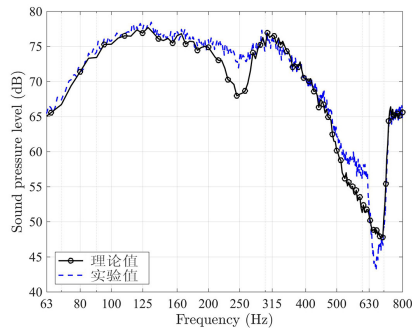


图 15. 半消声室中的实验装置图

测点声压级

● 误差较大的频段与原因

- ① 63 ~ 100 Hz: 实际圆盘表面不完全是刚性
- ② 240 ~ 270 Hz: 测量误差
- ③ 500 ~ 800 Hz: 声源的指向性不均匀

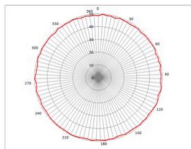
图 16. 坐标 $(\eta, \xi, \varphi) = (0.47, 2.85, 0)$ 处的声压级图 17. 坐标 $(\eta, \xi, \varphi) = (0.66, 2.93, 0)$ 处的声压级

体积源的指向性

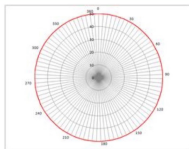
● 误差较大的频段与原因

① 500 ~ 800 Hz: 声源的指向性不均匀

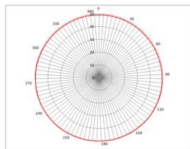
水平方向指向性



50Hz

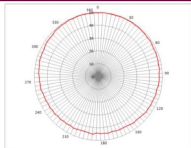


250Hz

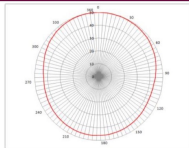


800Hz

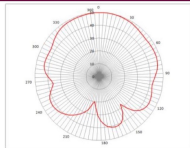
竖直方向指向性



50Hz



250Hz



800Hz

图 18. 体积源 VSS 058 的指向性

声功率修正项

● 修正项最大值

- 理论: -7.0 dB; 实验: -5.3 dB

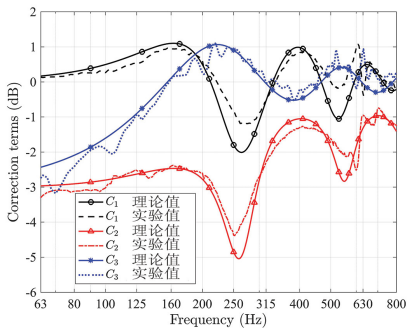


图 19. 3 种修正项的理论实验对比

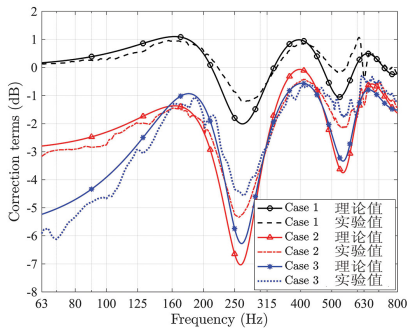


图 20. Virtual.Lab 的边界元仿真模型

全文总结

主要结论

- ① 有限大圆盘会对声功率测量结果造成显著影响
 - 测点处声压级改变, 可达 15 dB 以上
 - 恒体积源的辐射声功率改变, 可达 7.0 dB
- ② 对消声室中全空间声压可测配置, 采用圆盘作为支撑障板
 - $h = 0, a \approx 0.35\lambda$ 时, 修正项达最大值 4.0 dB
- ③ 对消声室中仅上半空间声压可测配置, 采用圆盘作为支撑障板
 - $h = 0, a \approx 0.35\lambda$ 时, 修正项达最大值 -7.0 dB
- ④ 消声室中铺设圆盘模拟半消声室, 采用圆盘作为反射面
 - 修正项通常小于 0 dB, 即测得的声功率通常偏小
 - $a \rightarrow 0$, 修正项达最大值 -6.0 dB

全文贡献与今后工作

全文贡献

- 提出有限大圆盘声散射的辐射声功率解析解
- 对三种实际的声功率测量, 定量给出有限大圆盘影响的修正项
- 设计实验, 验证修正项

今后工作

- 声源: (1) 指向性; (2) 声中心偏离圆盘中心
- 测点: 圆盘引入后, 测量误差较小的测点布放
- 算法: 特殊函数数值计算的优化, 计算效率的提升, 高频拓展

硕士阶段发表论文及主要成果

发表论文

- 1 ZHONG J (钟家鑫), TAO J, QIU X. Effects of a finite size reflecting disk in sound power measurements[J]. Applied Acoustics, 2018, Accepted.
- 2 ZHONG J (钟家鑫), TAO J, QIU X. Effects of the finite circular baffle size on the sound power measurement[C]//Proceedings of Inter-Noise 17, 2017, Hong Kong, China.
- 3 TAO J, ZHONG J (钟家鑫), QIU X. Noise radiation from an AC filter capacitor[C]//Proceedings of Inter-Noise17, 2017, Hong Kong, China.

发表专利

- 1 钟家鑫, 陶建成, 邱小军. 2018. 一种恒体积速度声源低频声功率的估算方法. 中国, 201810269068.8[P].

承担项目

- 1 南京大学与无锡日新公司 合作项目, 2016
“电容器噪声振动特性的研究”(主要承担者)
- 2 南京大学与美的公司 合作项目, 2016
“吸尘器有源噪声控制的研究”(主要承担者)

谢谢!