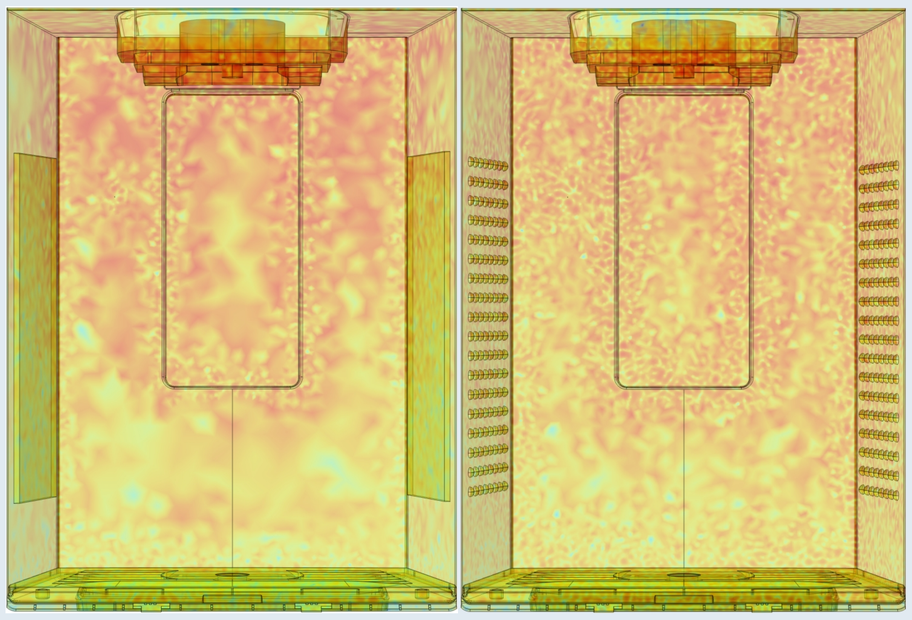


超声检测系统零部件优化仿真分析

- 基于 COMSOL Multiphysics
  智能冰箱冰水系统声场仿真与优化
- 压电-力学-声学多物理场耦合建模与实验验证

解龙翔[1], 王瑾[2], 鲁强兵[3], 钱幸方[4]

1 苏州工学院，2 南京华秦光声科技有限责任公司

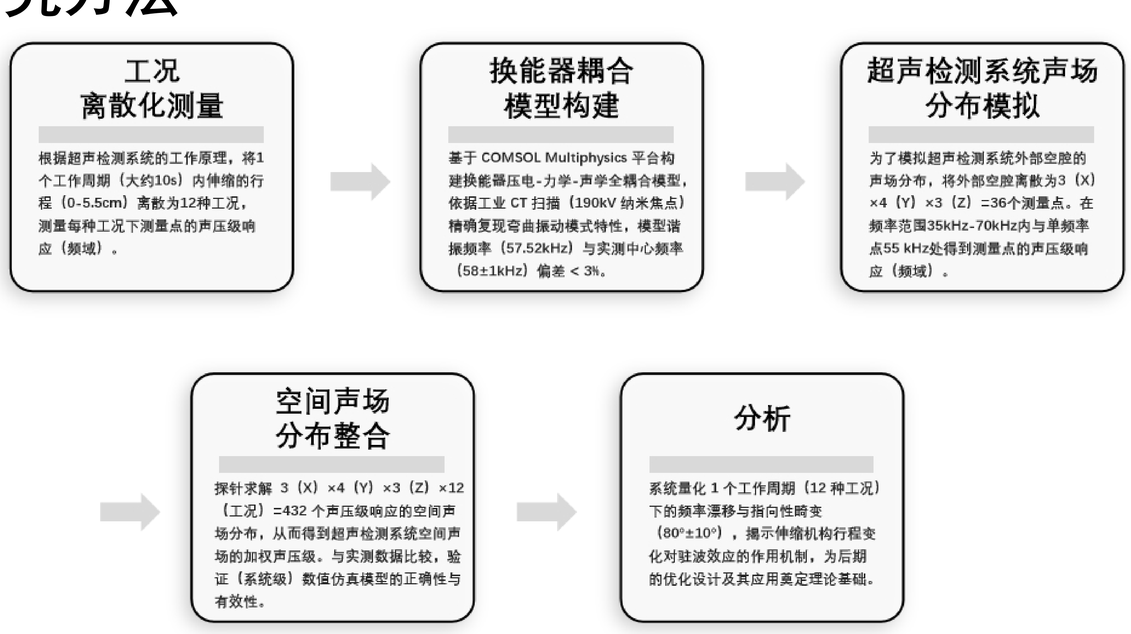
3 苏州声学产业技术研究院有限公司，4 苏州工学院

简介

随着智能家电技术的快速演进，智能冰箱正由传统的冷藏保鲜设备向具备高度自动化与精细化管理能力的终端演进，冰水系统内外部物体的精准定位、自动伸缩及出水控制成为提升用户体验的核心环节。超声波测距技术凭借非接触式、高灵敏度、成本适中等优势，尤其适应低温、弱光、潮湿等复杂环境，是智能冰箱距离感知的有力方案。但冰箱腔体结构复杂、材料多样，温湿度波动会引起声速、反射、多径干扰与衰减的变化，仅凭经验式设计难以兼顾精度、抗干扰能力与成本约束。

本研究聚焦超声检测系统关键零部件的优化设计与仿真评估，借助有限元方法（FEM）模拟超声波在复杂介质结构中的传播行为：建立包含压电换能器、匹配层、阻尼背衬层的精确模型，在不同几何形状与边界条件下进行时域/频域仿真，预测传播路径、时延响应、波形失真与能量衰减特性；并结合实测数据对数值模型进行迭代修正，为零部件形状优化、结构参数调优与布局设计提供定量依据，不断提升系统在真实冰箱环境中的测距精度、稳定性与适应能力。

研究方法



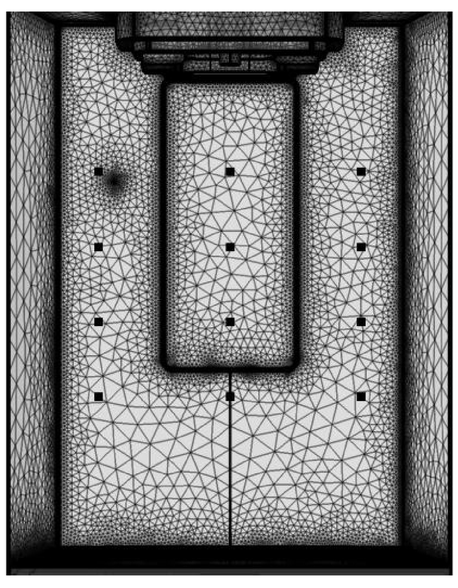


图1 数值仿真模型（网格化）

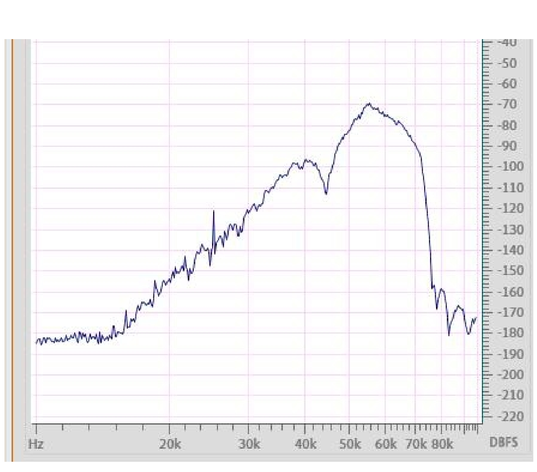


图2 超声检测系统频谱图（峰值 55 kHz）

结果

工况分析：换能器指向性（80°±10°）使声场集中于空腔内侧；弯曲振动脉冲工作模式与壁面反射在传播轴线方向产生驻波效应；伸缩机构与内壁面之间形成能量集中，三者共同导致系统本底噪声大于 100 dB。

仿真验证：55 kHz 下三个剖面（距内壁 7/4/10cm）的声场分布与实测规律一致，最大声压级分别为 105.20、115.37、107.24 dB，仿真与实测最大相对误差 6.5%。

优化方案：腔体侧壁增设食品级硅胶吸声体吸声或者周期性半球散射体阵列通过声波扩散抑制反射。

优化效果：吸声方案各剖面声压级下降 4.6–6.8 dB，散射方案下降 4.0–6.9 dB；系统本底噪声稳定控制在 95 dB 以下，声场均匀性提升超过 20%，换能器频率特性误差 < 3%，声传播综合误差 < 10%；系统本底噪声降低 4.6 – 6.9 dB；建立的复杂声传播理论及优化设计方法，为智能冰箱超声测距系统提供了可控、可靠的技术支撑。

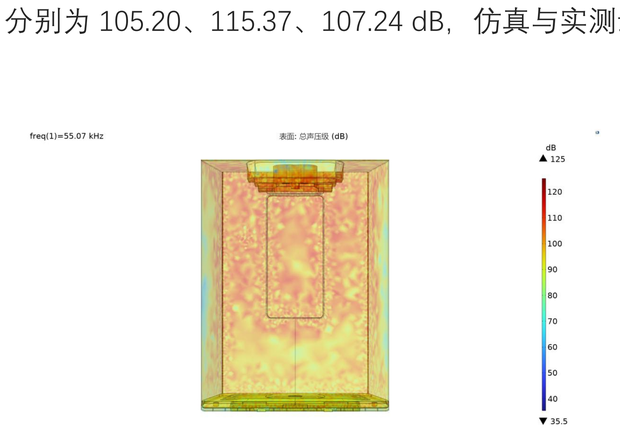


图3 优化前空间声场分布（D=0cm）

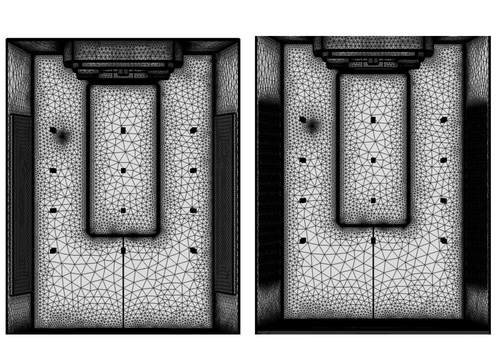


图4 优化方案（左：吸声体，右：散射体）

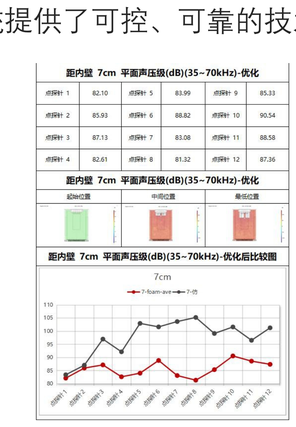


图5 吸声方案优化前后对比



图6 散射方案优化前后对比

参考文献

1.A. D. Pierce, “Wave equation for sound in fluids with unsteady inhomogeneous flow,” The Journal of the Acoustical Society of America. 87, pp. 2292 (1990)

2.Y. Kagawa and T. Yamabuchi, "Finite Element Simulation of a Composite PiezoelectricUltrasonic Transducer," IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, vol. SU-26, no. 2,pp. 81-88,1979.

3.C. Fang et al., "A Novel Cementing Quality Evaluation Method Based on Convolutional Neural Network," Appl. Sci., October 2022