

冰箱管路振动噪声优化设计研究

Research on Vibration and Noise Optimization of Refrigerator Pipeline

马 坚

(青岛海尔股份有限公司 青岛 266101)

摘要：管路振动是冰箱主要噪声源之一，因此消减管路振动对冰箱噪声改善有重要意义。本文通过测试获得压缩机工作工况下的主要激励频率。基于有限元仿真软件 Hyperworks 对冰箱管路进行了仿真优化设计，模态仿真和实验结果表明，优化管路走向会改变其固有频率，进而避开压机共振区，可有效改善冰箱声品质。

关键词：管路振动；冰箱；模态分析；固有频率

Abstract : Pipeline vibration is one of the main noise sources of refrigerator, therefore, reducing pipeline vibration is significant for noise control. The main excitation frequency of the compressor was obtained through experimental test. Based on finite element analysis software Hyperworks, the refrigerator pipeline design was optimized, and the modal simulation computation and test data showed that the pipe natural frequency could be changed and get far away from the resonance zone by optimizing design, the sound quality of refrigerator can be improved effectively by this way.

Key words : pipeline vibration; refrigerator; modal analysis; natural frequency

随着人们生活水平的不断提高，声品质逐渐成为衡量家电产品用户体验的重要部分，并最终影响用户的购买意愿。冰箱作为使用频率最高的家用电器之一，室内使用而且具有 24 h 不断电的特性。因此，降低冰箱的噪声水平，就显得尤其重要。

机械噪声是冰箱主要噪声源之一^[1]。其主要是由动力源压缩机引起，并通过管路，底板等部件传递辐射出去^[2]。对于冰箱厂商来讲，管路的减振优化设计是降低机械噪声的关键。现阶段冰箱管路的设计很大程度仍旧粗放的依靠经验，对振动大的管路一般采用添加质量块、胶泥等弥补性措施^[3]。CAE 仿真相比传统的经验设计，在科学性、可靠性以及效率上都有显著优势，值得应用到冰箱管路设计上。

本文首先通过实验分析了压缩机的激励特性，然后基于模态理论通过有限元仿真软件 hyperworks 重新设计了压缩机管路，最后通过实验对比了仿真优化前后管路

的振动值，验证了仿真设计的准确性。

1 管路系统动力学模型

模态分析属于结构动力学领域范畴，冰箱管路系统的动力学平衡方程为^[4]：

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中：

M —质量矩阵；

C —阻尼矩阵；

K —刚度矩阵；

x —位移矢量；

$F(t)$ —力矢量。

管路结构做简谐自由振动，且不考虑阻尼情况下，动力学方程可以简化为：

$$([K] - \omega^2[M])\{x\} = \{0\} \quad (2)$$

无阻尼自振圆频率 ω_0 ：

$$\omega_0 = \sqrt{K/M} \quad (3)$$

无阻尼自振频率 f_i :

$$f_i = \omega_i / 2\pi \quad (4)$$

2 压缩机激励以及管路振动测试

某型号冰箱在环温 18 °C 时, 触发变频压机在特定转速段工作 (3 400 rpm), 此时冰箱的回气管路表现出异常振动, 该振动产生压迫人耳的共振声。

2.1 压缩机激励测试

为了使后期的管路仿真设计有明确的频率设计目标, 首先需要对冰箱压缩机的激励进行测试, 在压缩机的壳体上布置加速度传感器, 采集压缩机的振动加速度信号。

对压缩机激励信号做频谱分析, 得知激励信号的主要能量来自压缩机旋转频率的基频 (56.66 Hz)。

2.2 回气管振动响应测试

如图 3 所示, 通过对回气管布置 4 个测点进行振动数据测试, 得出管路的振动水平。

对测得的振动数据进行频谱分析, 四个测点的频谱分布相似。以测点 2 为例, 得到如图 4 所示回气管振动响应频谱。

由图 4 可以看出, 回气管振动的峰值频率为 56.66 Hz, 该频率为压机基频频率, 说明回气管固有频率和压机工作频率重叠, 产生共振。



图 1 冰箱压缩机激励测试

3 冰箱管路模态仿真设计

3.1 回气管模态仿真

按照实际压缩机-管路系统, 建立有限元仿真模型。根据实际脚垫的属性对压机脚垫采用三个方向不同刚度

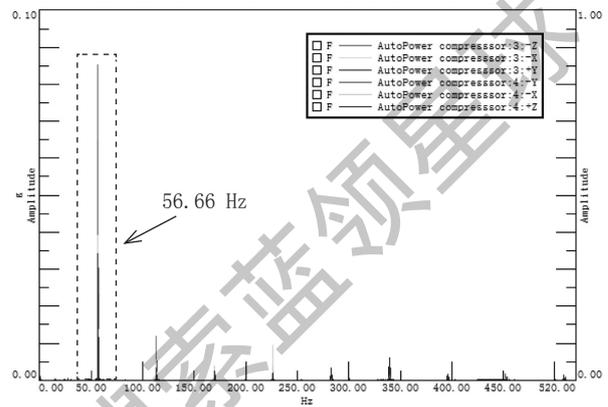


图 2 压机激励信号频谱



图 3 回气管振动测点布置

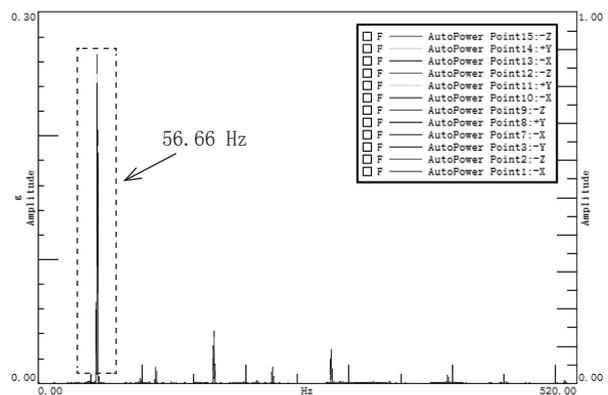


图 4 回气管振动信号频谱

的弹簧进行等效模拟；压机和压机支撑架刚性连接；管路之间通过焊接连接。

管路仿真中，忽略压机内部结构，将压机实际质量等效作用在压机有限元模型的重心；对管路末端和压机弹簧设置节点约束边界条件。

通过管路模态仿真发现，回气管第二阶左右摇摆模态（见图 6(b)）频率为 56.4 Hz，和压机激励频率重叠。

3.2 管路仿真优化设计

根据仿真 & 测试结果，重新设计回气管管路，使其模态避开压缩机激励频率，如图 7(b) 所示。

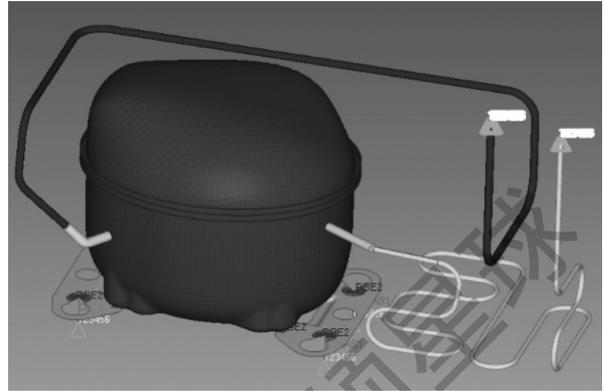


图 5 冰箱压缩机-管路系统有限元模型

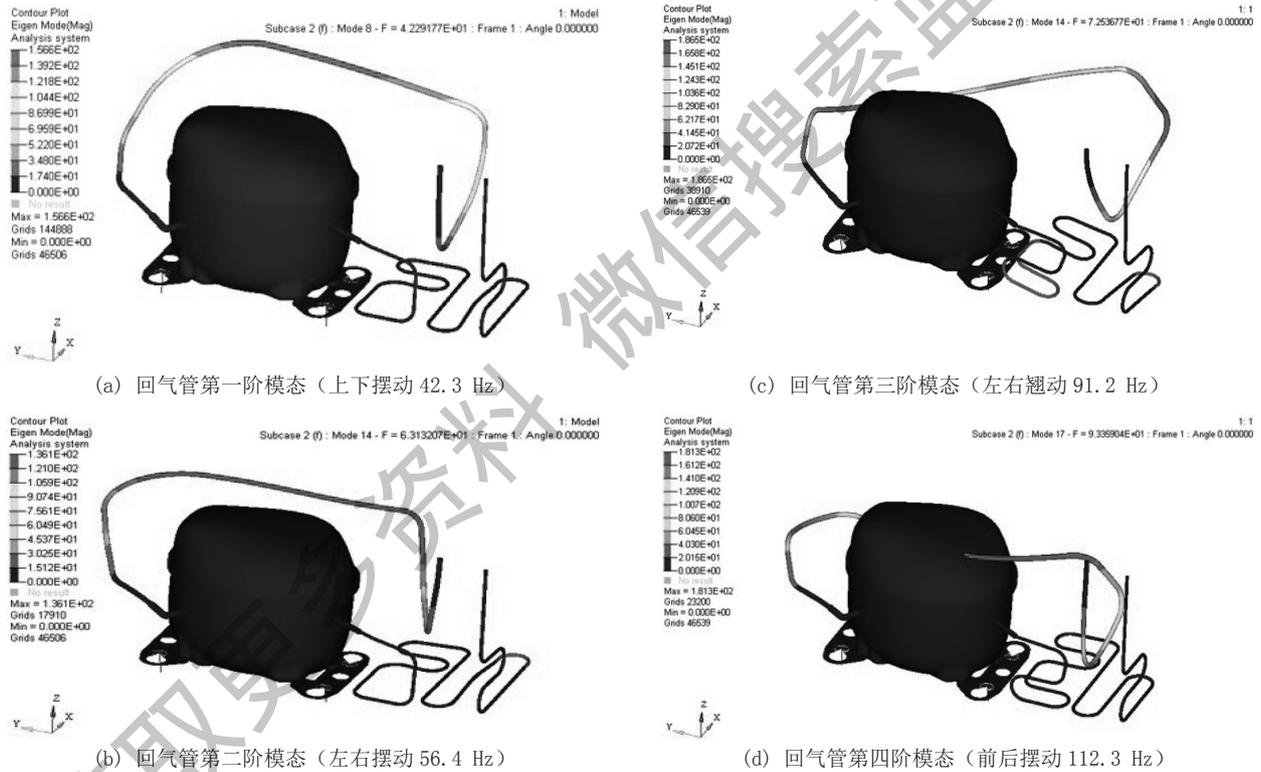


图 6 冰箱回气管前四阶振型图

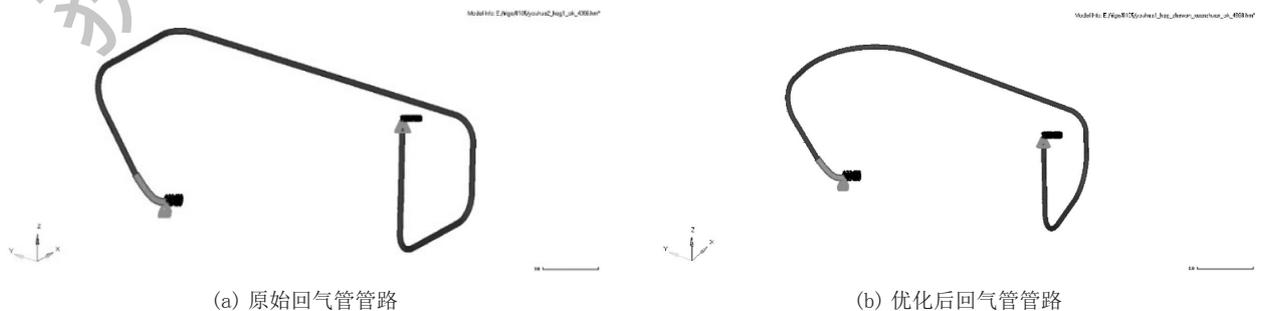


图 7 回气管优化前后对比图

对优化后回气管进行模式仿真如图 8 所示。

从仿真结果可以看到，优化后回气管管路避开了压缩机的激励频率，理论上可以改善共振现象。

4 仿真和实验对标

根据优化后的回气管 3D 模型，加工实际管路，对比测试管路振动响应，结果如表 2。

从测试结果来看，仿真优化设计后的管路，在 X/Y 方向的振动加速度改善一半左右，其对应改善的模式应为第二阶左右摆动模式（X/Y 平面）。优化后管路错开了压机激励频率，避免了管路共振。

主观感受，优化后管路相比原管路，压迫人耳的“嗡嗡”声消失，声品质改善。



(a) 优化后回气管第一阶模态（上下摆动 45 Hz）

(b) 优化后回气管第二阶模态（左右摆动 68 Hz）

图 8 回气管优化后振型图

表 1 优化前后管路固有频率对比

	原始管路	优化管路
第一阶 /Hz	42.3	45
第二阶 /Hz	56.4	68

表 2 优化前后管路振动响应测试

	振动方向	原始管路	优化管路
测点 1	X/g	0.16	0.08
	Y/g	0.12	0.12
	Z/g	0.13	0.05
测点 2	X/g	0.16	0.09
	Y/g	0.19	0.09
	Z/g	0.16	0.14
测点 3	X/g	0.34	0.04
	Y/g	0.16	0.09
	Z/g	0.08	0.10
测点 4	X/g	0.22	0.09
	Y/g	0.23	0.08
	Z/g	0.08	0.06

5 结论

1) 本文从冰箱实际管路噪声问题出发，首先对压缩机激励以及管路振动响应进行了摸底测试，得到了明确的目标优化频率。

2) 基于模态理论，通过有限元仿真的方法对冰箱回气管进行了仿真分析，仿真结果表明压缩机回气管和压机激励存在共振频率。根据仿真结果，输出了一套优化后回气管管路。

3) 加工优化后管路样件，搭载冰箱进行振动响应测试，测试结果表明，优化后管路相比原始管路，在 X/Y 方向振动改善一半左右，证明了仿真结果的合理性。

参考文献：

- [1] 艾平生, 龙珍珠. 电冰箱三个噪声源的研究 [J]. 南昌高专学报, 2006, (02): 92-93.
- [2] 何少勇, 马迪, 谢碧云. 风冷冰箱噪音分析与优化 [J]. 日用电器, 2017, (05): 51-55.
- [3] 徐建文, 李艳春, 方清胜, 等. 电冰箱中频匹配噪声分析与研究 [J]. 家电科技, 2008, (15): 35-37.
- [4] 倪振华. 振动力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2011.

作者简介：

马坚 (1968.07-), 男, 汉族, 博士学历, 高级工程师, 主要研究方向: 冰箱、冷柜的噪音、节能、保鲜、智能研究。