

文章编号:1005-0329(2017)07-0081-03

# 冰箱毛细管用串联式抗性消声器的结构设计和性能研究

黄志刚,丁国忠,王朋,姚兰

(华中科技大学,湖北武汉 430074)

**摘要:** 提出一种在毛细管上添加串联式抗性消声器的降噪方案,给出了该消声器的设计方法和结构参数。通过理论计算和声学仿真对消声器进行了消声性能的理论分析,结果表明消声器能有针对性的消除冰箱毛细管中产生的特定频率噪声,有利于降低冰箱整体噪声。

**关键词:** 毛细管;降噪;抗性消声器;串联式

**中图分类号:** TH137;TB535

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1005-0329.2017.07.016

## Structural Design and Performance Study of A Serial Reactive Muffler for Refrigerator Capillary

HUANG Zhi-gang, DING Guo-zhong, WANG Peng, YAO Lan

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A noise reduction scheme of adding serial reactive muffler in capillary is proposed. And the design method and structure parameters are given. Through theoretical calculation and simulation, the performance of the muffler is analyzed. The muffler can be targeted to eliminate the specific frequency noise generated in the capillary, which helps to reduce the overall noise of the refrigerator.

**Key words:** capillary; noise reduction; reactive muffler; tandem type

## 1 前言

现阶段,空调冰箱等产品的降噪研究越来越受到关注,随之产生了很多的降噪方法和思路,冰箱的噪声水平已得到大幅度下降<sup>[1,2]</sup>。由于其他冰箱部件的噪声水平下降使得冰箱内的冷媒噪声影响突显出来,而毛细管内的冷媒噪声是冰箱冷媒噪声的主要组成部分,因此,对毛细管内冷媒噪声的处理是降低冰箱整体噪声主要任务之一。由于扩张室消声器结构简单,能够在毛细管的制作过程中由压缩空气吹制而成,这样的结构相比共振腔式、微穿孔板式、干涉式消声器的加工和制作,减少了焊点和成本,且更为安全可靠。因此,在不影响毛细管正常节流功能的基础上,本文提出在毛细管上增加两扩张室串联的抗性消声器来降低冷媒流动噪声。

## 2 串联式抗性消声器的结构设计

根据文献[3],制冷剂压力在毛细管全长的90%处骤降,制冷剂的流速突增而导致冷媒噪声随之增大。根据冰箱毛细管流动压力分布情况,设计的消声器放置距离起始位置为90%长度处,长度符合压力降的要求即可。

为扩大消声频率范围,采用将两节长度不等的扩张室消声器串联使用,使其能够错开相应的通过频率。设计过程和步骤如下:

- (1) 根据冰箱毛细管尺寸和噪声频率进行消声器初始尺寸设计;
- (2) 计算该结构通过频率和截止频率;
- (3) 根据目标消除频率对结构尺寸进行修改;
- (4) 重复上述(2)、(3)过程,直到满足要求为止。

收稿日期: 2016-10-12 修稿日期: 2016-12-01

经计算得到毛细管串联式抗性消声器相应的结构参数(如表1所示)和结构图(如图1所示)。

表1 毛细管串联式抗性消声器相应的结构参数 mm

结构参数	数值
扩张室直径	15.0
进出口直径	3.6
壁厚	0.7
扩张室2长度	15.0
扩张室1长度	40.0

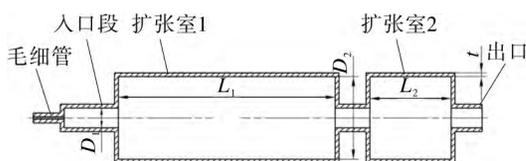


图1 毛细管串联式抗性消声器结构示意图

### 3 毛细管消声器的降噪性能研究与仿真对比

采用串联2个扩张室式的毛细管消声器,该消声器的单节扩张室消声量一般可用下式计算<sup>[4]</sup>:

$$\Delta L = 10 \lg \left[ 1 + \frac{1}{4} \left( m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 kL \right] \quad (1)$$

其中

$$m = S_2/S_1$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{\omega}{c}$$

式中  $\Delta L$ ——消声量, dB

$m$ ——扩张比

$k$ ——波数

$L$ ——扩张室消声器的长度, m

$S_1$ ——管道截面面积,  $m^2$

$S_2$ ——扩张室截面面积,  $m^2$

$f$ ——频率, Hz

$c$ ——当地声速, m/s

从式(1)中可以看出,消声量主要与扩张比和扩张室的长度有关,同时,单节扩张室式消声器对某些特定频率的声音可以达到最大的消声量,而对其他的频率则效果较差。根据实测,毛细管出口喷射产生了450~1500 Hz, 2300~3700 Hz和4500~5000 Hz 3个连续的谱频率段成分,其中以500~1800 Hz段频率为主要成分,2300~3700 Hz段渐弱,4500~5000 Hz段成分最为微弱。而在500~1800 Hz中,噪声的脉动峰值主要在:500, 800, 1200, 1250, 1600 Hz这几个频率上,每一个

峰值代表噪声信号中该频率的能量所占比重较大。又根据制冷剂在两相区的声速<sup>[5]</sup>,取  $c=65$  m/s,将结构中的扩张比  $m=S_2/S_1$  和消声器扩张室长度  $L$  代入式(1)得到单节扩张式消声器的消声量(图2)。

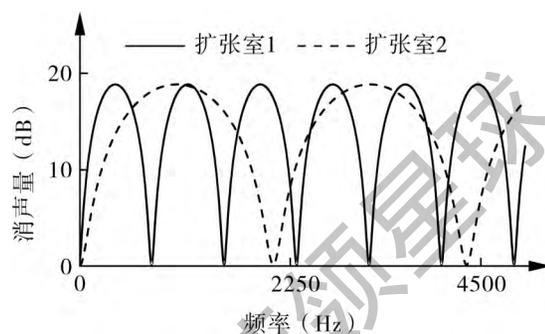


图2 单节扩张室消声量随频率变化曲线

从图2中可以看出,第一扩张室对频率为400, 1200, 2000 Hz处,消声量达到最大,而在800, 1600, 2400 Hz处,消声量为零;第二扩张室在频率为800, 1600 Hz处有较大消声量。串联的扩张室消声器总的消声量可以用将单节扩张室的消声量相加来估算,由此得到扩张室串联后总的消声量如图3所示。从图3可以看出:消声器在频率为500, 800, 1200, 1250, 1600 Hz处都能得到较大消声量,且在400~2000 Hz、2300~3700 Hz、4500~5000 Hz这3个频段都有较大的消声量,很好的符合了设计预期。在500, 1200 Hz处附近更是达到了相应的峰值消声量。与单节扩张室中( $L=40$  mm)在800, 1600 Hz处的零消声量(见图2)相比,串联一个  $L=15$  mm的扩张室消声器后2处的消声量有了很大的提高。这从理论分析说明了多节串联式扩张室消声器能解决单节扩张室消声器存在许多通过频率的问题,能拓宽整体消声器的消声频带,能够有针对性的消除冰箱毛细管中产生的特定频率噪声。

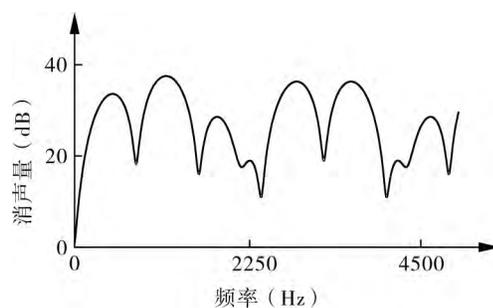


图3 双节扩张室串联后总消声量的变化

本文利用 Virtual.Lab Acoustic 软件的声学仿真 Harmonic FEM 模块对提出的结构进行了模拟仿真。根据毛细管内部流动的情况,选定流体的密度  $\rho$  为  $13.8 \text{ kg/m}^3$ ,流体的声速  $v$  为  $65 \text{ m/s}$ 。设定入口边界条件为速度边界条件,值为  $-1 \text{ m/s}$  出口边界条件定义为完全吸声的特性阻抗。计算频率范围为  $0\sim 4500 \text{ Hz}$ ,载荷步值为  $10 \text{ Hz}$ 。其传递损失可由管道入口辐射声压  $p_1$  和管道出口辐射声压  $p_2$  求出<sup>[6]</sup>:

$$TL = 10 \lg\left(\frac{W_1}{W_2}\right) = 10 \lg\left(\frac{p_1^2 A_{in}}{p_2^2 A_{out}}\right) \quad (2)$$

式中  $TL$ ——传递损失, dB

$W_1, W_2$ ——进、出口声功率, W

$p_1, p_2$ ——进、出口辐射声压, Pa

$A_{in}, A_{out}$ ——管道进、出口面积,  $\text{m}^2$

将仿真得到的串联式抗性消声器传递损失与理论公式计算结果进行对比,结果如图 4 所示。

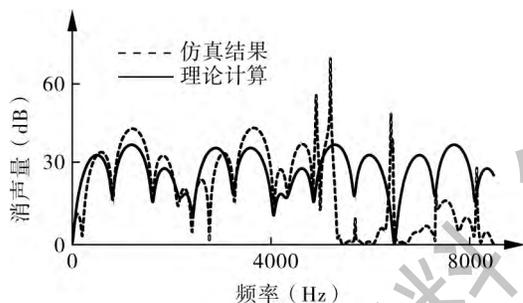


图 4 仿真与理论公式计算结果对比

从图可见,在  $0\sim 5300 \text{ Hz}$  区间,模拟仿真和理论公式计算结果无论是在整体趋势和局部趋势,二者几乎保持一致,误差都在可接受的范围内,其中传递损失平均误差仅为  $6.0\%$ 。细致分析,在中低频  $2400 \text{ Hz}$  以下,模拟与理论计算非常一致,表明两种计算方法都能比较精确得出串联式抗性消声器的消声效果。在  $2400\sim 5300 \text{ Hz}$  模拟与理论计算开始有差距,但整体趋势还是比较吻合的,只有在  $2800 \text{ Hz}$  左右有较大的差距。

在串联式抗性消声器中存在上下限失效频率,根据失效频率计算公式<sup>[4]</sup>:

$$f_{\pm} = 1.22 c/D \quad (3)$$

式中  $f_{\pm}$ ——消声器上限失效频率, Hz

$D$ ——消声器扩张室当量直径, m

所计算消声器扩张室的当量直径  $D$  为  $0.015 \text{ m}$ ,气液两相区的声速  $c$  为  $65 \text{ m/s}$ ,计算得上限失效频率为  $5287 \text{ Hz}$ 。当声音频率超过失效频率后,

消声量会明显下降,在超过  $5300 \text{ Hz}$  后,仿真计算消声器的消声效果呈现出大幅度衰减趋势,而理论公式计算显示还有较大消声效果,仿真结果很好地验证了这一点,而理论公式则不能。这表明串联式抗性消声器在中高频的消声更复杂,在超过其失效频率后,理论公式计算将不再适用,而仿真计算更符合实际。在消声器的有效消声范围内,经验公式计算具有简单易行的优点,计算精度也可以满足要求,因此,在设计毛细管消声器时,可以先用理论计算公式进行设计,而后可利用仿真模拟进行验证和进行更为细致的分析。

#### 4 结语

本文提出的串联式抗性消声器可以在毛细管的制作过程中由压缩空气整体拉制而成,并未增加焊点,结构简单,运行可靠且成本较低。由经验公式计算和声学仿真分析可得,抗性消声器的串联式组合能拓宽毛细管消声器的消声频带,能有针对性的消除毛细管内的特定频率,有利于降低冰箱整体噪声。由理论公式和仿真模拟的结果对比得到经验公式在其有效消声频率范围内表现良好,能够作为初始设计的计算依据,而仿真模拟可以作为其验证方法和进行更深入的分析。

#### 参考文献

- [1] 张奎,潘光亮,王胜飞,等. 冰箱喷发噪声的试验研究[C]. 2015年中国家用电器技术大会论文集,中国家用电器协会,2015.
- [2] 张荣婷,黄辉,胡余生,等. 变频压缩机低频周期性噪声的分析[J]. 流体机械,2016,44(6):51-55.
- [3] 张佳崢,郑天轶,王鹏,等. 冰箱毛细管的结构仿真研究[C]. 2015年中国家用电器技术大会论文集,中国家用电器协会,2015.
- [4] 周新祥. 噪声控制技术及其新进展[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.
- [5] 王艳庭,张华. 制冷剂汽液两相区音速的计算与分析[J]. 制冷学报,2011(5):59-63.
- [6] 许自顺,张强,咸凯,等. 基于 LMS virtual lab 的抗性消声器声学性能研究及优化[J]. 内燃机与动力装置,2016(1):72-77.

作者简介:黄志刚(1992-),男,硕士研究生,研究方向为小型制冷装置设计与优化,通讯地址:430074 湖北武汉市洪山区珞瑜路 1037 号华中科技大学西四楼,E-mail:huangzg@hust.edu.cn.