冰箱压缩机声品质研究

Sound quality research of refrigerator compression

王松[1] 靳海水[2] 邓志强[2] 吴小凌[1] 陈会平[1] 吴肖斌[1]
WANG Song[1] JIN Haishui[2] DENG Zhiqiang[2] WU Xiaoling[1] CHEN Huiping[1] WU Xiaobin[1]

1.广州万宝集团压缩机有限公司 广东广州 510470;
2.上海朴渡信息科技有限公司 上海 201203
1. WanBao Group Compressor Co., Ltd. Guangzhou 510470;
2. Shanghai Pudu Information Technology Co., Ltd. Shanghai 201203

摘 要: 随着消费者对冰箱声品质的关注，作为冰箱主要噪声源之一的压缩机声品质就越来越被压缩机制造商重视。以某款冰箱压缩机为研究对象，运用声品质分析方法，对客户最关心的“嗡嗡声”和“尖锐声”进行主观听感评价和客观声品质测试，并建立了两者的关系。研究表明，某些主观感受是可以通过客观声品质指标表征的，为未来声品质快速测评以及改善提高建立了基础。

关键词: 声品质；压缩机噪声；相关分析；主观声评价；客观声品质指标

Abstract: With consumers concerning about the sound quality of a refrigerator, the refrigerator compression sound quality, one of the main noise sources is more and more taken seriously by the compressor manufacturer. In this paper, a refrigerator compressor is chosen as the research object, the sound quality analysis method is used, and the customer’s most concerned sound "buzz" and "shrill" is subjectively evaluation and objectively tested. And the relationship is established between the subjective and objective results. The research has shown that certain subjective feeling can be characterized through objective acoustic quality index, this result lays foundation for the rapid assessment and improve of the sound quality in the future.

Keywords: Sound quality; Compressor noise; Correlation analysis; Subjective acoustic evaluation; Objective quality indicators

中图分类号：TB5 DOI:10.19784/j.cnki.issn1672-0172.2021.02.005

1 引言

随着人民生活水平的提高，消费者对家电声品质要求越来越高。电冰箱或冰柜都放置在室内，当夜深人静的时候，房间内环境噪声很低，冰箱的噪声则被凸显。压缩机作为冰箱的主要噪声源之一，对冰箱的声品质起着重要作用。因此研究压缩机声品质就显得非常重要。

目前大多数压缩机制造商监控声品质的方法是依赖有经验的噪声工程师的听觉系统，并进行主观评价，此方法的缺点是难以将听感和改进方向挂钩，且效率较低。因此本文尝试分析主观听感和噪声产生的物理过程的内在联系，将听感和客观声品质联系起来，以期通过客观声品质指标来反映主观听感，改善声品质测评效率。

2 家电产品声品质研究现状

文献[1]对冰箱的声品质进行了研究。当前的声品质测评以主观测评为主。主观测评虽然可以直接反应用户对声信号的实际心理感受，但在冰箱的日常分析研究中有较大局限性。故对声品质的客观测评一直是研究的重点方向。目前得到认可的声品质主要客观指标有响度、尖锐度、粗糙度、抖动度、调制性等。其中，响度计算模型得到广泛认可，并已制订ISO标准的声品质参量。响度是指人耳感受到的声音强度，即声音的响亮程度。响度是对声品质影响最大的参数。在多数情况下，对响度的测评分析可解释80%以上的声品质差异，测试表明相比传统的A声压级，冰箱噪声的响度更适合测评。

随着对冰箱声品质研究的深入，我们发现响度以外的其他声品质指标和主观听感有更好的相关性，比如本文中的波动度，因此有必要对其他声品质指标也做深入研究。

关于家电产品的声品质研究目前还没有相关的标准[2]，许多制造商还处于摸索阶段。汽车声品质研究时间较早[3]，在很多方面已经有

作者简介：王松（1970-），男，硕士，研究方向：家用电器技术的研究及产业化。
通讯作者：靳海水，E-mail：jhs@pudut.com。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

相对成熟的经验可供借鉴。然而，产品的声品质是非常个性化的指标，很难将一类产品的方法照搬到另一类产品，对每类产品的声品质都应有专门研究。对声品质的研究应用的最终目的还是通过改进设计、材料或工艺来提升声品质，因此必须将声品质和结构以及声音产生的物理过程建立起关系，在这点上就要求声学工程师对特定产品的噪声产生的激励有深入认识，不能简单照搬其他行业的经验。

为了方便后续分析，现将常用的声品质指标介绍如下[3]：

响度（Loudness）：人对声音强弱的主观感觉用响度来描述，响度的大小代表了声音的响亮程度。

波动度（Fluctuation Strength）：描述调制频率为0.5 Hz～20 Hz的声音变化带给人的听觉感受。声音波动的典型例子就是音叉，当两个音叉的频率接近时，人听到的就是两个纯音的叠加，声音时高时低，形成波浪起伏的状况。这种波动的强弱用波动度表示。

粗糙度（Roughness）：描述声音信号快速调制带给人的听觉感受，粗糙度的调制频率范围从20 Hz～300 Hz，单位为asper。

尖锐度（Sharpness）：描述衡量声音中高频成分的心理学指标，可以理解为高频成分与总噪声的比值，其单位是为acum。

语音清晰度（Articulation index）：主要应用于噪声环境下说话的清晰程度。

3 冰箱压缩机噪声特点和主观评价维度选择

我们选择某款量产的压缩机作为研究对象。在半消声室内测试压缩机单机噪声和冰箱噪声，测试场景见图1，压缩机噪声的典型频谱如图2。可以看到单体噪声，从频段上看100 Hz、160 Hz、630 Hz、1600 Hz处的噪声峰值较高。通常情况下听感和这些峰值有关系。图3显示了200 Hz内的噪声线谱，从中可以看出在100 Hz附近有两个相近的峰值，这通常会引起拍频声，影响听感。

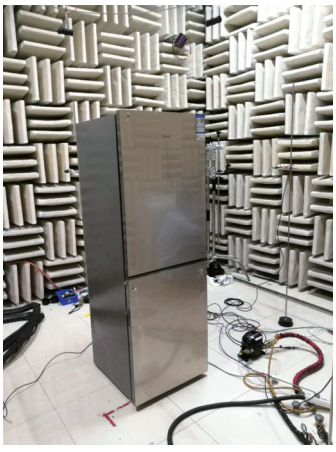


图1 噪声测试场景

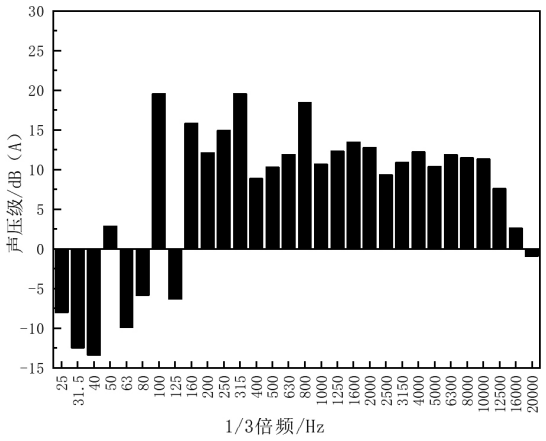


图2 标准工况下1 m处的单体噪声1/3倍频

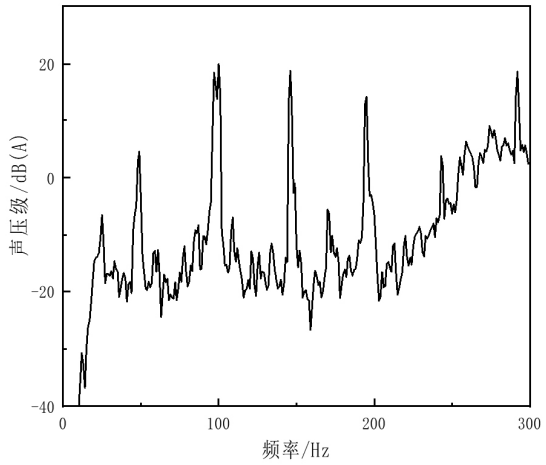


图3 压缩机低频噪声频谱

根据客户的反馈以及我们的经验，对本系列压缩机最关心的异常音有两个，我们称之为“嗡嗡声”和“尖锐声”。为此进行了主观声品质测试，测试条件是将压缩机装在冰箱上，由10个参与主观评价的工程师对测到的声音进行打分，评价压缩机的声音。为了数据的完整性，同时也对声音总评价进行打分。多台样机统计数据表明，客户听到的“嗡嗡声”和“尖锐声”并不能和图2的尖峰值简单对应，因此期望通过引进声品质客观指标来对应这种关系。

对压缩机而言，由于冰箱启动和正常运行时声音有很大的差异，因此两种情况下的声品质都要考虑，同时还要考虑冰箱工况：冷冻和冷藏，综合起来设计的主观评分表如表1所示。

对同一机型的12台样机进行了打分，参见表2。

4 主观和客观指标之间关系的建立

建立主观和客观评价指标关系的目的是通过客观指标预测主观

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1 主观评价记录表

噪声主观评价记录表（等级评分法）															
压缩机型号（编号）：			箱体型号（编号）：			评价编号：				评价地点：					
										评价日期：					
评价对象	冰箱状态		评价指标												
			声音舒适性 1=愉快，2=较愉快，3=可接受， 4=有点烦躁，5=非常烦躁					嗡嗡声 0=听不见，1=较小，2=普通， 3=较大，4=非常大				尖锐声（其他声） 0=听不见，1=较小，2=普通， 3=较大，4=非常大			
			1分	2分	3分	4分	5分	0分	1分	2分	3分	4分	0分	1分	2分	3分	4分
噪声源	非稳态	压缩机启动音															
		压缩机运行音															
		系统（冷冻）															
		系统（冷藏）															
	稳态	压缩机运行音															
		系统（冷冻）															
		系统（冷藏）															

表2 主观评价和客观评价

	客观测试结果 （归一化后的结果）			主观评价 （打分）		
样机号	响度	尖锐度	波动度	总评价	尖锐声	嗡嗡声
1	0.88	0.90	0.71	1.90	0.10	0.70
2	0.79	1.14	0.07	2.00	0.00	0.00
3	1.15	1.02	2.03	3.10	2.00	2.50
4	0.99	1.31	0.14	2.50	2.00	1.50
5	1.19	0.87	0.06	1.50	0.00	0.00
6	0.61	0.87	0.53	2.90	2.00	1.70
7	0.94	0.61	2.12	3.50	2.00	3.50
8	0.96	1.20	0.75	4.00	2.50	1.50
9	1.36	0.96	2.32	4.00	3.50	3.00
10	0.78	0.70	1.27	2.50	0.00	1.50
11	0.81	1.30	0.21	2.50	1.00	1.00
12	1.53	1.12	1.81	3.00	2.00	3.00

感觉，快速测评声品质，为改善声品质提出方向。

将主观评价指标尖锐声、嗡嗡声和总体评价分别用J、W和Z表示，将声品质指标响度（Loudness），尖锐度（Sharpness），波动度（Fluctuation Strength），粗糙度（Roughness），语音清晰度（Articulation index）分别用l、f、s、r、a表示，则主观和客观指标之间关系就是求取两个函数关系：

$$J=f_1(l,f,s,r,a) \quad (1)$$

$$W=f_2(l,f,s,r,a) \quad (2)$$

$$Z=f_3(l,f,s,r,a) \quad (3)$$

本案中，主要关心尖锐声、嗡嗡声，而经过筛选粗糙度和语音清晰度与上述两个主观感觉关系不大，限于文章篇幅，这里只讨论响度、锐度、波动度和尖锐声、嗡嗡声的关系。上述函数关系变为如下两个：

$$J=f_1(l,f,s) \quad (4)$$

$$W=f_2(l,f,s) \quad (5)$$

4.1 嗡嗡声和客观评价参数的相关性分析

将公式（5）用三元多项式表示：

$$W=\sum_{i,j,k=0}^{n} a_{i,j,k} l^i s^j f^k \quad (6)$$

其中n为多项式的阶数。

采用最小二乘法，分别对1阶和2阶的情况进行拟合：

当n=1时，相关系数为0.822，表达式为：

$$W=-0.34-0.77l+0.72s+0.93f \quad (7)$$

当n=2时，相关系数为0.946，表达式为：

$$W=4.15-22.71l+2.00s+3.76f+1.56ls-0.44sf-3.70lf+15.24l^2-0.29s^2+0.28f^2 \quad (8)$$

用最小二乘法进行多项式拟合嗡嗡声和客观评价的相关性时，发现采用二阶多项式来拟合相关系数为0.946，已达到精度的要求。

为进一步研究嗡嗡声与响度、尖锐度、波动度的关系，将式（8）中，取n=2，分别考虑一个、两个和三个客观因素时，拟合结果如表3。

表3 嗡嗡声非线性拟合的相关系数

方案	响度	尖锐度	波动度	相关系数
1	√	—	—	0.314
2	—	√	—	0.100
3	—	—	√	0.794
4	√	√	—	0.624
5	√	—	√	0.825
6	—	√	√	0.888
7	√	√	√	0.946

由表3可以看出，用响度、尖锐度和波动度组合来拟合嗡嗡声是效果最好的，相关系数达到0.946。从单因素的对比可见，波动度对嗡

（下转57页）

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献

[1] 鲁建国. 提高家电抗菌、除菌能力推进健康中国建设[J]. 家电科技, 2018 (07): 2.
[2] 曲依萌, 杨陈伊, 董成林, 等. 不同存放条件的保鲜膜预防冰箱冷藏食物细菌污染的效果比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(24): 201-204.
[3] Nath S, Shyanti R K, Pathak B. Plant-Mediated Synthesis of Silver and Gold Nanoparticles for Antibacterial and Anticancer Applications[M]. Green Nanoparticles, 2020.
[4] Chen Q Y, Xiao S L, Shi S Q, et al. A One-Pot Synthesis and Characterization of Antibacterial Silver Nanoparticle-Cellulose Film[J]. Polymers, 2020, 12(02).
[5] Sun S, Yin F, Liu Y, et al. Deformation-induced dissolution of copper precipitation in 1.5wt% Cu-bearing antibacterial Fe-17wt%Cr alloy during plastic deformation process[J]. Materials & Design, 2018, 157(11): 469-477.
[6] Ramirez D, Jaramillo F. Improved mechanical and antibacterial properties of thermoplastic polyurethanes by efficient double functionalization of silver nanoparticles[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018: 46180.
[7] 孙振玲, 刘俊龙. Research Progress on Preparation and Application of Antibacterial Plastic%抗菌塑料的制备及应用研究进展[J]. 塑料科技, 2007, 35(10): 102-107.
[8] 郭洋洋, 唐晓宁, 张彬, 等. 抗菌塑料的研究进展[J]. 塑料工业, 2018(08): 8-13.
[9] 曹军, 吴建东, 沈锋明. 洗衣机用抗菌聚丙烯专用料的研制[J]. 石油化工技术与经济, 2009(01): 52-55.
[10] Wang Y, Yang Y, Shi Y, et al. Antibiotic‐Free Antibacterial Strategies Enabled by Nanomaterials: Progress and Perspectives[J]. Advanced Materials, 2020, 32.
[11] Yamamoto, Minehide, Nakamura, et al. Theoretical Explanation of the Lotus Effect: Superhydrophobic Property Changes by Removal of Nanostructures from the Surface of a Lotus Leaf[J]. Langmuir the Acs Journal of Surfaces & Colloids, 2015.
[12] Haiyan Yu, Junqi Liu, Xiaowei Fan, et al. Bionic micro-nano-bump-structures with a good self-cleaning property: The growth of ZnO nanoarrays modified by polystyrene spheres[J]. Materials Chemistry and Physics, 2015, 170: 52-61.
[13] Watson G S , Green D W, Schwarzkopf L, et al. A gecko skin micro/nano structure - A low adhesion, superhydrophobic, anti-wetting, self-cleaning, biocompatible, antibacterial surface[J]. Acta Biomaterialia, 2015, 21: 109-122.
[14] 童慧芬. 锐铁矿型二氧化钛的晶面调控及其复合材料光催化性能研究[D]. 湖北: 湖北大学, 2018.
[15] Foster H A, Ditta I B, Varghese S, et al. Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: spectrum and mechanism of antimicrobial activity[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 90(6): 1847-1868.
[16] Liou J W, Chang H H. Bactericidal Effects and Mechanisms of Visible Light-Responsive Titanium Dioxide Photocatalysts on Pathogenic Bacteria[J]. Archivum Immunologiae et Therapiae Experimentalis, 2012, 60(04): 267-275.
[17] 王昱征. Zn、Zn/Ce、Zn/Y及B掺杂TiO_2纳米材料的抗菌性能及抗菌陶瓷的制备[D]. 东北: 东北大学, 2015.
[18] Sabetrasekh R, Tiainen H, Lyngstadaas S P, et al. A Novel Ultra-porous Titanium Dioxide Ceramic with Excellent Biocompatibility[J]. Journal of Biomaterials Applications, 2011, 25(6): 559-580.
[19] Sun H, Wu H, Jin Y, et al. Photocatalytic titanium dioxide immobilized on an ultraviolet emitting ceramic substrate for water purification[J]. Materials Letters, 2019, 240(APR.1): 100-102.

（上接54页）

嗡声的影响最大，相关系数达到0.794，明显高于响度和尖锐的单因素影响。

4.2 尖锐声和客观评价参数的相关性分析

同4.1节，采用最小二乘法，分别对1阶和2阶的情况进行拟合：

当n=1时，相关系数为0.561，表达式为：

$$W=-2.30-0.89l+1.95s+0.82f \quad (9)$$

当n=2时，相关系数为0.610，表达式为：

$$W=1.46-17.16l+4.00s+1.34f+2.93ls+0.03sf-2.34lf+8.40l^2-1.10s^2+0.44f^2 \quad (10)$$

考虑一个、两个和三个客观因素的影响，采用2阶多项式进行拟合，得到表4。

表4 尖锐声非性拟合的相关系数

方案	响度	尖锐度	波动度	相关系数
1	√	—	—	0.245
2	—	√	—	0.030
3	—	—	√	0.363
4	√	√	—	0.293
5	√	—	√	0.443
6	—	√	√	0.564
7	√	√	√	0.610

由表4可以看出，用响度、尖锐度和波动度组合来拟合尖锐声是效果最好的，但是相关系数仍然比较低，只有0.610。

经过分析，导致相关性差的原因可能来自于以下几个：

（1）主观评价时参与测试的工程师对尖锐声的评价相差较大，有参与测试的工程师对该声音不敏感，该项评分方法需要改进。

（2）数据样本不够，需要逐步积累数据。

（3）需要应用更多的声品质客观指标来拟合，比如增加纯音度指标。

5 结论

通过分析主观听感和噪声产生的物理过程的内在联系，将听感和客观声品质联系起来，得到了以下结论：

（1）根据冰箱压缩机的特点制定了主观噪声评价方法；

（2）通过多项式拟合的方法建立了主观听感和客观声品质参数的关系；

（3）针对主观和客观指标相关性不好的情况，提出了改进方向。

参考文献

[1] 6款三门冰箱噪声声品质测评[J]. 电器, 2015(12): 72-73.
[2] 杨晓玲, 杨伟成, 廖玮, 赵霞. 家电噪声声品质发展现状探究[J]. 家电科技, 2018(06): 54-55+59.
[3] 庞剑. 汽车车身噪声与振动控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 331-352.
[4] 房振安, 姜雅丽. 家电产品声音设计与评价研究[J]. 家电科技, 2020(05): 62-65.
[5] 李加威, 张建润, 陆冬, 周易达. 结合声强测试的风冷式电冰箱声品质评价[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(01): 187-190+203.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net