第 35 卷 第 5 期
2016 年 9 月

应用声学
Journal of Applied Acoustics

Vol. 35, No.5
September, 2016

◇ 研究报告 ◇

空调压缩机噪声测试及其声品质客观参量分析*

曹青松† 陈 刚

(华东交通大学机电工程学院 南昌 330013)

摘要 针对空调压缩机辐射声场的不同场点噪声声品质的差异，采用心理学声品质参量即响度、尖锐度、总感觉噪度，对压缩机辐射声场的不同场点噪声进行声品质客观参量分析，研究压缩机场点噪声声品质客观参量值变化规律。通过特征响度研究各场点噪声响度在频域的分布，并得出压缩机各场点噪声特征响度峰值所在噪声频带。实验结果表明，对于处在压缩机不同方向上的场点，其噪声声品质客观参量值存在明显差异，但其噪声特征响度峰值却处在相同的噪声频带。研究工作为压缩机全方向降噪提供参考依据也为研究压缩机的噪声声品质探索了一种新思路。

关键词 压缩机，噪声测试，声品质，客观参量

中图分类号: TB5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2016)05-0464-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2016.05.012

Noise test and objective parameters analysis of sound quality for air conditioning compressor

CAO Qingsong CHEN Gang

(*School of Mechanical and Electrical Engineering of East China Jiao Tong University, Nanchang* 330013, *China*)

Abstract Aiming at the difference of sound quality of different field point noise radiated by the compressor of the air conditioner, the objective parameters of sound quality of different field point were analyzed based on the psycho-acoustical parameters that include the sound quality of loudness, sharpness and the total perceived noisiness. The distribution regularity of the objective parameters of sound quality of different field point was researched. Then the distribution of loudness of different field point noise in the frequency domain was investigated through the specific loudness. And the peak frequency band of the specific loudness of different field point was obtained. Experimental results reveal that the objective parameters of sound quality of field point in different directions have significant differences, but the peak frequency band of the specific loudness of different field point was the same. The study provides some reference basis for the noise reduction of all direction of the compressor. Also, this paper explores a new way of researching the sound quality of the compressor.

Key words Compressor, Noise test, Sound quality, Objective parameters

2015-12-24 收稿; 2016-04-25 定稿

*国家自然科学基金 (51265009)

作者简介: 曹青松 (1978-), 男, 安徽无为人, 博士, 副教授, 研究方向: 振动控制, 无损检测及机电一体化。

†通讯作者 E-mail: 2000cqs@163.com

1 引言

随着生活水平的不断提高，人们对机电设备噪声声品质有了更高的要求[1−2]。为了定量地反映机电设备噪声的听觉感受，目前常采用心理学声品质客观参量即响度、尖锐度、总感觉噪度、粗糙度和抖动强度，对噪声声品质进行客观描述[3−4]。

空调压缩机是一种辐射高响度噪声的设备，压缩机内部的各种噪声源均通过压缩机结构的外表向周围辐射出空气噪声。压缩机所辐射空气噪声的声品质是评价压缩机产品性能的一项重要指标。杨诚等[5]运用斯蒂文斯稳态宽频带噪声响度计算方法及Fastl总感觉噪度计算方法，对压缩机噪声声品质客观参量进行分析，研究了压缩机改装前后的性能。张金圈等[6]采用A声级、响度、粗糙度和尖锐度等声品质客观参量，对噪声异常转子压缩机试验样机噪声进行了分析。尤晋闽等[7]基于心理声学的基本理论，综合考虑压缩机整体噪声的响度、尖锐度指标，对空调变频压缩机噪声进行分析。在现有的关于压缩机噪声声品质客观参量值的分析研究中，大多关注的是压缩机整体的噪声声品质客观参量值[5−7]。而文献[8–9]等均指出，压缩机表面不同部位，声场分布是不同的，所以对压缩机进行噪声监测时，不同场点的噪声声品质客观参量值必然存在差异。研究压缩机噪声声品质客观参量值，确定压缩机场点噪声声品质客观参量值分布规律，能为提高空调压缩机噪声声品质以改善压缩机产品性能指明方向。

鉴于上述分析，本文采用心理学声品质客观参量即响度、尖锐度、总感觉噪度，对某型滚动转子式空调压缩机噪声进行分析，研究压缩机场点噪声声品质客观参量值的分布规律及压缩机场点噪声响度在频域的分布规律。

2 声品质客观参量

2.1 响度

响度是反映人耳对声音强弱感受程度的声学参数，考虑了人耳对声音频谱的掩蔽特性，能够比A声级更准确地反映声音信号的响亮程度。对于自由声场和混响声场，采用Zwicker[10]响度模型算法求解噪声响度：

$$N=\int_0^{24} N^*(z)\mathrm{d}z, \tag{1}$$

其中，z为临界频带率，$N^*(z)$为特征响度。

与频率尺度f相比，临界频带率能更准确反映人对声音的主观感觉。临界频带率z和中心频率f的对应关系为

$$z=13\arctan\left(\frac{0.76f}{1000}\right)+3.5\arctan\left(\frac{f}{7500}\right)^2, \tag{2}$$

(2)式中，z的单位为Bark；f的单位为Hz。

特征响度$N^*(z)$又称为响度密度谱、响度谱或比响度，表示一个临界频带内噪声响度的大小，反映响度在频域内的分布，单位是song/Bark。Zwicker特征响度计算公式为

$$N^*=0.08\Big(\frac{E_{\mathrm{TQ}}}{E_0}\Big)^{0.23}\Big[\Big(0.5+0.5\frac{E}{E_{\mathrm{TQ}}}\Big)^{0.23}-1\Big], \tag{3}$$

其中，E_{TQ}是安静情况下听阈对应的激励；E_0为参考声强$I_0=10^{-12}$ (W/m^2)时对应的激励。

直接采用Zwicker特征响度计算公式进行特征响度的计算非常复杂。为此，本文采用特征响度的简化计算公式[11]：

$$N^*=0.08\Big(10^{\frac{L_{\mathrm{PTQ}}}{10}}\Big)^{0.23}\Big[\Big(0.5+0.5\times10^{\frac{L_{\mathrm{P}}-L_{\mathrm{PTQ}}}{10}}\Big)^{0.23}-1\Big], \tag{4}$$

(4)式中，L_{P}为被测噪声对应的声压级；L_{PTQ}为安静状况下听阈对应的声压级即等响曲线上各临界中心频率对应的听阈声压级。

2.2 尖锐度

尖锐度是描述高频成分在声音频谱中所占比例的声学参量，反映了声音信号的刺耳程度。人耳对高频声音比较敏感，声音的尖锐度值越高，给人的感觉就越刺耳。Zwicker尖锐度计算模型为

$$S=0.1043\times\frac{\displaystyle\int_0^{24}N^*(z)\,g(z)\,\mathrm{d}z}{\displaystyle\int_0^{24}N^*(z)\,\mathrm{d}z}, \tag{5}$$

(5)式中，$g(z)$为Widmann修正后的加权系数，具体为

$$g(z)=\begin{cases}1, & z\leqslant 15.8,\\ 0.15\mathrm{e}^{0.42(z-15.8)}+0.85, & z>15.8.\end{cases} \tag{6}$$

2.3 总感觉噪度

总感觉噪度用来评价声音的吵闹程度。总感觉噪度的单位是呐(noy),计算总感觉噪度的公式为

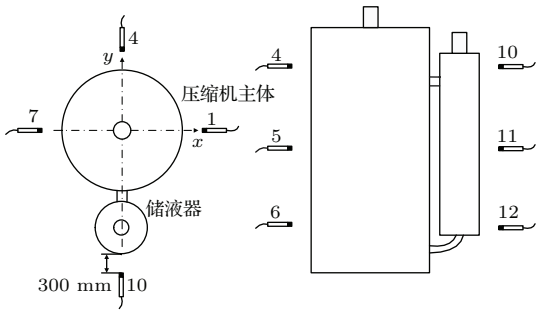
$$N_t = N_m(1-F) + F\sum_{j=1}^{n} N_j, \tag{7}$$

(7)式中,N_t为总感觉噪度;N_j为各频带感觉噪度;N_m为各频带感觉噪度的最大值;F为计权因子,$F=0.3$ (倍频程),$F=0.15$ (1/3倍频程)。其中,感觉噪度N_j不能直接测量,可根据噪声1/3倍频程中心频率及所对应的声压级,通过感觉噪度表查得。

3 压缩机噪声测试

为了避免声音反射干扰测量,以及避免外界噪声的影响,采用某公司的全消声室对某型滚动转子式空调压缩机进行噪声测试。该全消声室六个表面都敷设了吸声系数特别高的吸声尖劈,其安装吸声尖劈后的净空间尺寸为4700 mm×4000 mm×3500 mm,截止频率 ⩽ 100 Hz。本实验采用与全消声室配套的丹麦B&K公司PULSE Labshop声学测量系统平台进行噪声测试。该声学测量系统平台主要由B&K的4189型声传感器,噪声振动分析仪以及计算机组成。实验中,声传感器采集压缩机各场点噪声信号,经2671型前置放大器放大后,由同轴电缆将压缩机场点噪声信号输入至噪声振动分析仪进行噪声信号的分析与处理。通过网线,将噪声振动分析仪处理后的噪声信号输入至计算机中进行进一步的分析和显示。

在滚动转子式空调压缩机噪声实验中,选取压缩机周围的 12 个场点进行噪声测试。各场点分布如图1所示,分别分布在压缩机下部的气缸处,压缩机中部的电机处,压缩机上部接近上壳盖处。上述三个位置都对应着四个方向,如图1(a)所示,这四个方向分别定义为0°、90°、180°和270°方向。其中,声传感器1、2、3位于0°方向,4、5、6位于90°方向,7、8、9位于180°方向,10、11、12位于270°方向。在压缩机噪声测试中,各场点处的声传感器距压缩机机体的水平距离均为300 mm。



(a) 俯视图 (b) 左视图

图1 空调压缩机被测场点分布示意图

Fig. 1 Distribution diagram of the field point measured around the air conditioning compressor

4 压缩机噪声声品质客观参量分析

4.1 响度

滚动转子式空调压缩机各场点噪声响度如图2所示。由图2可知,压缩机90° 方向和270°方向的场点噪声响度比0°和180° 方向的场点噪声响度都要小。其中,储液器所在的270° 方向场点噪声响度最小。而且,压缩机中部场点噪声响度与压缩机上部及下部场点噪声响度相比,值稍偏大。

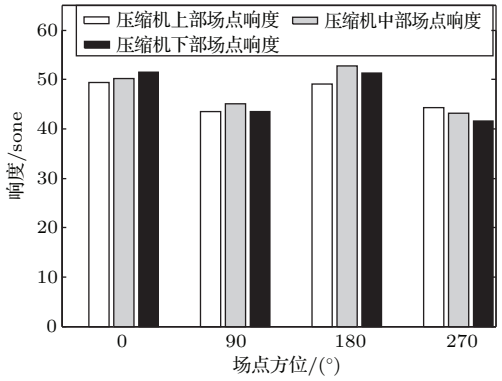


图2 压缩机各场点噪声响度

Fig. 2 The loudness of different field point noise radiated by the compressor

为降低压缩机向外辐射的空气噪声响度,应主要降低压缩机0°和180° 方向的噪声响度。在对空调压缩机进行隔声处理时一般使用隔声棉或隔声罩,上述得出的压缩机各场点噪声响度分布规律,为压缩机隔声罩的设计提供了指导。

4.2 尖锐度

滚动转子式空调压缩机各场点噪声尖锐度如图3所示。在压缩机270° 方向即压缩机储液器所在方向,场点噪声尖锐度最小;场点噪声尖锐度相对较大的方向为压缩机的90°和180°方向。

尖锐度反应了高频成分在声音频谱中所占的比例,由图3可知,压缩机90°和180° 方向场点高频

噪声所占比重相对更大，声音更刺耳，压缩机 270° 方向场点高频噪声所占比重最小。所以在对压缩机实施降噪处理时，应特别降低压缩机 90° 和 180° 方向的高频噪声。

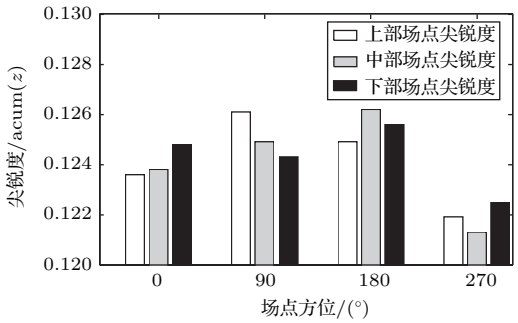


图 3　压缩机各场点噪声尖锐度

Fig. 3　The sharpness of different field point noise radiated by the compressor

4.3　总感觉噪度

滚动转子式空调压缩机各场点噪声总感觉噪度如图 4 所示。其中，压缩机 0° 方向场点噪声总感觉噪度最大；对于压缩机中部和下部，压缩机 270° 方向即储液器方向场点噪声总感觉噪度最小；对于压缩机上部，压缩机 90° 方向场点噪声总感觉噪度最小。总感觉噪度反映了压缩机噪声的吵闹程度，由图 4 可知，压缩机 0° 方向场点噪声吵闹程度最大，压缩机 270° 方向即储液器方向场点噪声吵闹程度最小。为降低压缩机噪声吵闹程度，应特别降低压缩机 0° 方向噪声吵闹程度。

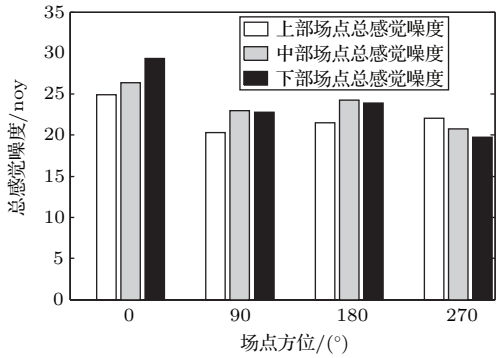


图 4　压缩机各场点噪声总感觉噪度

Fig. 4　The total perceived noisiness of different field point noise radiated by the compressor

5　压缩机噪声特征响度分析

噪声特征响度反映了噪声响度在频域的分布规律，表示在一个临界频带内噪声响度的大小。压缩机噪声特征响度值越大，所对应临界频带上的激励越大，人耳感觉就越响亮。为得到压缩机场点噪声特征响度，通过压缩机各方向场点被测噪声得到对应的声压级，如图 5、图 6 所示。根据获取的各方向场点噪声对应的声压级并结合 (4) 式，得到压缩机各方向场点噪声特征响度曲线如图 7 所示。

由图 7 可知，在频带 0~5 Bark，压缩机各场点噪声特征响度值均小于 1 sone/Bark，压缩机受到的对应临界频带上激励较小；在频带 12.33~20 Bark，压缩机各场点噪声特征响度均出现两个峰值，压缩机受到的对应临界频带上的激励较大。

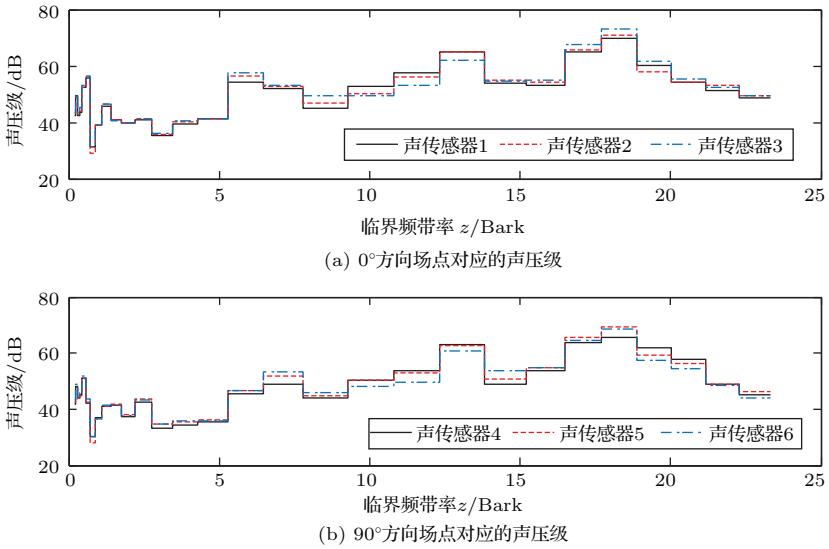
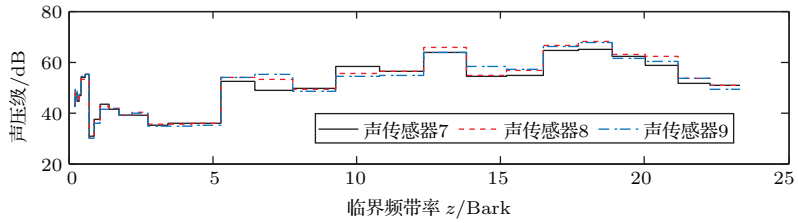
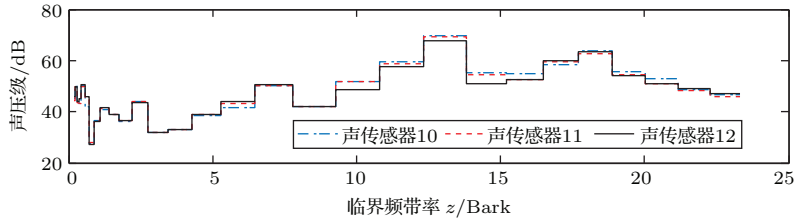


图 5　压缩机 0° 及 90° 方向各场点对应的声压级

Fig. 5　Sound pressure levels of field point noise in the compressor's 0° and 90° direction



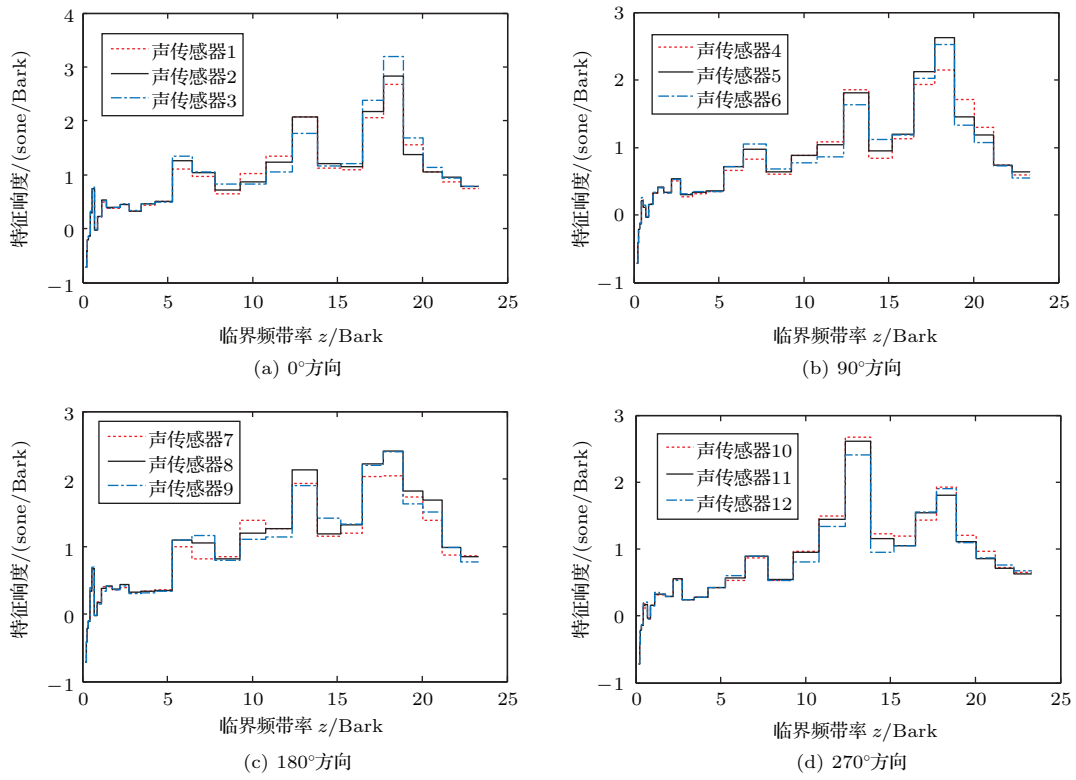
(a) 180°方向场点对应的声压级



(b) 270°方向场点对应的声压级

图 6 压缩机 180° 及 270° 方向各场点对应的声压级

Fig. 6 Sound pressure levels of field point noise in the compressor's 180° and 270° direction



(a) 0°方向 (b) 90°方向

(c) 180°方向 (d) 270°方向

图 7 压缩机各场点噪声特征响度曲线

Fig. 7 The specific loudness curve of different field point noise radiated by the compressor

根据上述图 7 噪声特征响度曲线，可以得到压缩机各方向场点噪声特征响度峰值所在噪声频带及对应噪声特征响度值，如表 1 所示。

表 1 中，对于频带 1780~2240 Hz，压缩机 270° 方向即储液器方向场点噪声特征响度值最大，压缩机 180° 及 0° 方向场点噪声特征响度值相对减小，压缩机 90° 方向即背离储液器方向，压缩机场点噪声特征响度值最小。此外，滚动转子式空调压缩机在 500~2000 Hz 范围内噪声以流体噪声为主 [12]，因而，在频带 1780~2240 Hz，压缩机场点噪声主要为流体噪声，而且在压缩机 270° 方向即储液器方向场点流体噪声响度最大，压缩机 90° 方向场点流

体噪声响度最小。对于频带3550~5620 Hz，压缩机0° 方向场点噪声特征响度值最大，压缩机90°、180° 方向场点噪声特征响度值相对减小，在压缩机270° 方向场点特征响度值最小。而且，压缩机噪声在2000 Hz以上以机械噪声为主[12]，因而在频带3550~5620 Hz，压缩机场点噪声主要为机械噪声，其中压缩机0° 方向场点机械噪声响度最大，储液器方向场点机械噪声响度最小。

表1　场点噪声特征响度峰值及其所在频带

Table 1　The peak value and its corresponding frequency band of field point noise's specific loudness

场点方向	峰值所在频带 (Hz)	特征响度峰值 (sone/Bark)
0°	1780~2240 (12.33~13.81 Bark)	2.073
	3550~5620 (16.49~18.88 Bark)	3.195
90°	1780~2240 (12.33~13.81 Bark)	1.856
	3550~5620 (16.49~18.88 Bark)	2.623
180°	1780~2240 (12.33~13.81 Bark)	2.136
	3550~5620 (16.49~18.88 Bark)	2.404
270°	1780~2240 (12.33~13.81 Bark)	2.672
	3550~5620 (16.49~18.88 Bark)	1.906

根据上述分析，在1780~2240 Hz及3550~5620 Hz，压缩机受到的激励较大，是影响场点噪声响度的主要频段。其中，1780~2240 Hz以流体噪声为主，3550~5620 Hz以机械噪声为主。而且，压缩机270° 方向即储液器方向场点流体噪声响度最大，压缩机0° 方向场点机械噪声响度最大。为提高空调压缩机噪声声品质，应主要考虑降低1780~2240 Hz频带内的流体噪声响度和3550~5620 Hz频带内的机械噪声响度，特别降低是储液器方向场点流体噪声响度和压缩机0° 方向场点机械噪声响度。

6　结论

本文针对某型滚动转子式空调压缩机进行实验研究，分析了压缩机场点噪声声品质客观参量值的分布规律，研究了压缩机各方向场点噪声特征响度。实验研究结果表明：压缩机场点噪声响度最大的方向为0° 和180° 方向，尖锐度最大的方向为90° 和180° 方向，总感觉噪度最大的方向为0° 方向。压缩机270° 方向即压缩机储液器所在方向，场点噪声总感觉噪度及尖锐度均最小，90° 和270° 方向场点噪声响度最小。压缩机场点噪声在频带1780~2240 Hz以流体噪声为主，3550~5620 Hz以机械噪声为主。流体噪声最大场点方向为压缩机储液器方向，机械噪声最大场点方向为压缩机0° 方向。在对压缩机实施降噪处理以提高其噪声声品质过程中，应根据压缩机场点噪声声品质客观参量值的分布规律及压缩各场点噪声特征响度分布特点采取合理的降噪措施。

致谢　感谢某空调压缩机公司为本研究提供所需的某型滚动转子式空调压缩机、全消声室及PULSE Labshop声学测量系统平台等设备，同时感谢工程师们的帮助和支持。

参　考　文　献

[1] 钟秤平, 陈剑, 汪念平. 工业产品声品质的评价与分析方法研究 [J]. 噪声与振动控制, 2008, 28(1): 129–131.
ZHONG Chengping, CHEN Jian, WANG Nianping. The research on evaluation and analysis methods of industrial product sound quality[J]. Noise and Vibration Control, 2008, 28(1): 129–131.

[2] 尤晋闽, 陈天宁, 和丽梅. 空调压缩机噪声声品质主客观评价及其相关性研究 [J]. 流体机械, 2007, 35(11): 1–4.
YOU Jinmin, CHEN Tianning, HE Limei. Subjective and objective evaluation of compressor sound quality and correlation research[J]. Fluid Machinery, 2007, 35(11): 1–4.

[3] SHIN T J, PARK D C, LEE S K. Objective evaluation of door-closing sound quality based on physiological acoustics[J]. International Journal of Automotive Technology, 2013, 14(1): 133–141.

[4] LEE S M, LEE S K. Objective evaluation of human perception of automotive sound based on physiological signal of human brain[J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(2): 273–282.

[5] 杨诚, 吴行让, 卢喜, 等. 压缩机的声品质分析 [J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2007, 30(8): 17–20.
YANG Cheng, WU Xingrang, LU Xi, et al. Analyse of compressor sound quality[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science, 2007, 30(8): 17–20.

[6] 张金圈, 张荣婷, 胡余生. 噪声异常压缩机的声诊断分析 [J]. 制冷, 2013, 32(3): 17–22.
ZHANG Jinquan, ZHANG Rongting, HU Yusheng, et al. Analysis of noise abnormal compressor using acoustic diagnosis techniques[J]. Refrigeration, 2013, 32(3): 17–22.

[7] 尤晋闽, 陈天宁, 和丽梅. 空调变频压缩机声品质评价方法研究 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(1): 13–16.
YOU Jinmin, CHEN Tianning, HE Limei. Method for

sound quality evaluation of frequency conversion compressor[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2008, 42(1): 13–16.

[8] 张海滨, 蒋伟康, 万泉. 压缩机噪声的跟踪采样近场声全息实验研究 [J]. 振动与冲击, 2010, 29(11): 51–54.
ZHANG Haibin, JIANG Weikang, WAN Quan. Acoustic field test of a rolling-piston compressor using nearfield acoustic holography combined with track-sampling[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(11): 51–54.

[9] 刘成武, 江吉彬, 黄键. 压缩机机体声辐射与噪声预测 [J]. 机械设计, 2009, 26(7): 61–64.
LIU Chengwu, J1ANG Jibin, HUANG Jian. Sound radiation and noise prediction of compressor bady[J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(7): 61–64.

[10] ZWICKER E, FASTL H. Psychoacoustics: Facts and Models [M]. 2nd Edited. Berlin: Springer-verlag, 1999.

[11] 柳革命, 杨益新. 目标噪声响度特征提取技术研究 [J]. 声学技术, 2011, 30(4): 336–339.
LIU Geming, YANG Yixin. Loudness feature extraction of underwater passive sonar targets[J]. Technical Acoustics, 2011, 30(4): 336-339.

[12] 杨伟明, 屈宗长. 滚动转子式压缩机的噪声控制分析及降噪措施 [J]. 压缩机技术, 2004, (2): 13–14.
YANG Weiming, QU Zongzhang. Noise analysis and reduction method for rotary compressors[J]. Compressor Technology, 2004, (2): 13–14.