

空调变频压缩机声品质评价方法研究

尤晋闽¹, 陈天宁¹, 和丽梅²

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 长安大学道路施工技术与装备教育部
重点实验室, 710064, 西安)

摘要: 基于心理声学的基本理论, 在现场测试变频压缩机噪声的基础上, 综合考虑响度、尖锐度指标, 提出了心理声学烦躁度的经验公式. 采用成对比较法进行主观评价, 对实验结果作了线性相关性分析, 并得到压缩机声品质主观评价值的预估模型. 研究结果表明: 采用烦躁度刻画声品质要比 A 声级更灵敏, 心理声学烦躁度与主观评价的相关性较好, 可达到 0.917 3, 但采用 A 声级则较差, 只有 0.711 9. 因此, 将烦躁度作为变频压缩机声品质评价的综合性能指标, 能够比 A 声级更好地反映压缩机在不同工况下的噪声对人的实际影响.

关键词: 声品质; 变频压缩机; 心理声学; 烦躁度; 声级; 品质评价

中图分类号: TH45 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)01-0013-04

Method for Sound Quality Evaluation of Frequency Conversion Compressor

YOU Jinmin¹, CHEN Tianning¹, HE Limei²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory for Technology and Equipment of Highway Construction, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: A-weighted sound pressure level does not fully satisfy the requirements of sound quality evaluation of electro-mechanical products. According to the noise analysis of frequency conversion compressor, an experiential formula of psychoacoustics annoyance is established considering loudness and sharpness synthetically, a pair-wise comparison method is proposed for subjective evaluation, and a pre-estimated model of sound quality subjective evaluation is obtained based on the linear correlation analysis. The research results indicate that the annoyance is more sensitive than dB(A) in sound quality evaluation, the correlation between psychoacoustics annoyance and subjective evaluation approaches to 0.917 3, exceeding remarkably 0.711 9 of dB(A). The psychoacoustics annoyance is reasonable to serve as a comprehensive index of sound quality evaluation for reflecting the real influence of noise on a person.

Keywords: sound quality; frequency conversion compressor; psychoacoustics; annoyance; weighted sound pressure level; quality evaluation.

在大部分机电产品噪声的测量和控制中, 目前普遍采用 A 声级(A 计权声压级)作为评价指标. A 声级是根据对人进行纯音响度反应实验得出的, 而实际噪声往往是频率成分复杂的复合音, 各频率成分之间存在相互掩蔽效应, 以及人们对不同强度的声音主观感觉的频响特性不同. 因此, A 声级作为评价量不能很好地解释许多噪声现象, 也不能很好地描述不同噪声的特征及其对人心理产生的影响^[1-4].

例如: 对于频谱形状不同的噪声, 完全可能具有相同的 A 声级, 但对于 A 声级相等而频谱形状不同的噪声, 人们的主观感觉是不一样的. 对于以低频为主的噪声, 有时虽然其 A 声级并不高, 但感觉还是很响; 对有突出纯音成分的机电噪声, 以 A 声级评价其性能指标状况, 有时即使并未超过规定的限值, 但还是令人烦躁而认为其不达标.

近年来, 随着生活水平的提高, 机电产品的声品

质愈来愈得到人们的关注.声品质可定义为听觉事件对个人各方面需求的满足程度,其影响因素包括物理(声场)、生理学(听觉感知)和心理学(听觉评价).声品质实际是一个客观评价与主观评价相结合的评价指标,客观评价是指用仪器实际可以测得的评价量,而主观评价则是与人的心理相关.这样,不同类型的机电产品,其声品质的评价方法应该是不同的.目前,有关这方面的研究还不够深入,还有许多工作要做,本文从心理声学角度,对某类空调变频压缩机的声品质问题进行了实验研究和分析.

1 心理声学基本理论

1.1 掩蔽效应

掩蔽效应是心理声学中最基本的效应之一,简单地说就是对一种声音(被掩蔽声)的听觉感受被另一种声音(掩蔽声)所影响的现象^[1].通常频域中的一个强声会掩蔽附近与之同时发出的弱声,弱声离强声越近,越容易被掩蔽.反之,离强声较远的弱声不容易被掩蔽,这类掩蔽称为频域掩蔽.此外,还有时域掩蔽,它是一种弱掩蔽效应.

1.2 临界频带和心理声学参数

假定声音在听觉系统中是通过一组滤波器来分析的,每一个滤波器所处理的频带称为一个临界频带,每个临界频带的带宽称为临界带宽,所有的临界频带连在一起就组成了人耳的听觉区域^[1-5],人耳的听觉频率范围划分为0~24 B.

心理声学参数是描述人对声音的主观感受差别程度的客观物理量,可以定量地反映听觉感受的差别,消除个体的影响.常用的心理声学参数有响度、尖锐度和心理声学烦躁度等^[5-7].

1.2.1 响度 考虑人耳对声音频谱的掩蔽特性,响度是反映人耳对声音强弱主观感受程度的参数,单位是 sone.响度的计算步骤如下^[7-8].

(1)首先获得单边功率谱密度函数,并将以 Hz 线性频率单位为自变量的功率谱密度函数转换成以 B 为单位的函数

$$z = 13 \arctan(0.00076f) + 3.5 \arctan(f/7500)^2 \quad (1)$$

(2)考虑频域的掩蔽效应,以 B 为单位计算激励级曲线.

(3)计算特性响度值

$$N'(z) = 0.08 \left(\frac{E_{TQ}}{E_0} \right)^{0.23} \left[\left(0.5 + 0.5 \frac{E}{E_{TQ}} \right)^{0.23} - 1 \right] \quad (2)$$

式中: E_{TQ} 为安静状况下听阈对应的激励; E 为被计算声音对应的激励; E_0 为参考声强 $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 所对应的激励.

(4)在 0 到 24 B 上对 $N'(z)$ 积分得总响度

$$N = \int_0^{24} N'(z) dz \quad (3)$$

1.2.2 尖锐度 尖锐度是描述高频成分在声音频谱中所占比例的参数,反映声音信号的刺耳程度.其单位是尖(acum),计算公式为^[7-8]

$$S = 0.11 \int_0^{24} N'(z) g(z) dz / \int_0^{24} N'(z) dz \quad (4)$$

$$g(z) = \begin{cases} 1, & z \leq 16 \\ 0.06e^{0.17z}, & z > 16 \end{cases}$$

式中: $g(z)$ 为加权因数.

1.2.3 心理声学烦躁度 对声品质进行研究时,可以将响度、尖锐度指标进行综合考虑,综合结果称为心理声学烦躁度,是人对声音总体感觉(不舒服程度)的定量描述,它是量纲为 1 的量,值越大越令人烦躁.结合前人的心理声学实验研究结果和变频压缩机的稳态噪声特点^[1,9],当 S 小于 1.75 acum 时,本文提出的经验公式为

$$P = N \left(1 + \frac{S}{1.75} 0.25 \lg(N+10) \right) \quad (5)$$

式中: P 、 N 、 S 分别表示烦躁度、响度和尖锐度.

2 主观评价方法

客观评价的合理性需通过主观评价实验来检验,本文测试采用成对比较法进行主观判断^[10].实验时要求评价主体(主观评价实验中的听者)在听完由计算机随机回放的、两两编组的声音之后,做出一个相对的、量化的判断.例如,每个主体在听完一组声音之后都需要回答类似这样一个问题:“哪个声音听起来更令人烦躁,是 A 还是 B?”计算评价成员对某一样本的判断“它更令人烦躁”的次数,进而统计得到该样本的最后评价得分,以此来评价其声品质的优劣^[11].

主观评分结果需通过 Kendall's W 协和系数来验证是否具有—致性,协和系数的计算公式为^[10]

$$W = S_R / (1/12 K^2 (n^3 - n)) \quad (6)$$

式中: K 为评价主体个数; n 为噪声样本个数; S_R 为评价样本 j 在 K 个评价人对所有样本进行评价的秩 R_j 和 R_j 与其平均值之差的平方和,即

$$S_R = \sum_{j=1}^n \left[R_j - \left(\sum_{j=1}^n R_j \right) / n \right]^2; \quad R_j = \sum_{i=1}^K R_{ij} \quad (7)$$

式中: R_{ij} 为噪声样本 j 在第 i 个人评价中的秩。

对 W 的检验是假设 K 个评价主体所得的秩评不具有一致性。当 $n>7$ 时,检验统计量 $\chi^2=K(n-1)W$,近似服从自由度为 $n-1$ 的 χ^2 分布,当 $\chi^2\geq\chi_{\alpha}^2$ (α 为置信水平)时拒绝原假设,认为 K 个评价主体所得的秩评具有一致性,否则需要针对不一致性采取相应的处理措施。

3 主客观评价实验及结果分析

本文以不同厂家的5种变频压缩机为研究对象,按照不同工况排列组合形成不同的实验样本,在半消声室里进行噪声水平测试。测试中,采用B&K公司的前端数据采集仪、声品质测量人体躯干模拟器与PULSE系统软件平台采集处理噪声样本,待压缩机进排气口压力平衡,温度稳定后,采集信号,截取信号长度为5 s,共选取有效噪声样本20个。主观实验中选择主体均为高校研究人员,共10名,男6名,女4名,平均年龄28岁。将20个样本成对分为190组,每个主体成员对190组分别进行独立评价(见表1)。

表1 噪声样本的实验结果

样本编号	A声级/ dB	响度/ sone	尖锐度/ acum	烦躁度	主观评价分
1	51.12	5.27	1.72	6.803	1
2	54.08	7.17	1.38	8.915	8
3	53.97	7.08	1.34	8.750	9
4	49.6	5.87	1.10	6.977	5
5	53.57	6.94	1.27	8.487	7
6	61.23	10.23	1.41	13.314	14
7	56.63	8.21	1.47	10.383	5
8	61.02	10.10	1.45	12.826	11
9	61.77	11.23	1.32	14.029	15
10	49.37	5.68	1.03	6.679	3
11	55.17	7.87	1.21	11.573	13
12	61.73	11.47	1.28	14.263	15
13	47.57	4.93	1.01	5.765	2
14	52.78	7.78	1.25	9.516	10
15	58.18	9.78	1.29	12.116	11
16	55.85	6.96	1.68	9.014	6
17	59.88	10.03	1.40	12.641	17
18	61.75	11.23	1.27	13.934	19
19	46.28	4.22	1.09	4.978	0
20	60.57	10.36	1.18	12.646	18

计算出的Kendall'sW协和系数为0.713 6, $\chi^2=64.224\geq\chi_{0.005}^2$ 。由此可知,在置信概率为99.5%的情况下,实验中评价主体相互间的一致程

度较高,说明本次主观评价实验是有效、合理的。

从表1中发现:有的在样本A声级虽然大,但烦躁度反而小;有的A声级上虽没什么差别,但反映在烦躁度上则相差较大,给人的主观感觉也很不一样。例如,样本16在A声级上比样本14大了3 dB,但烦躁度却比它小0.5,样本11和样本16在A声级上基本相等,但在烦躁度上却相差了28%。对3个样本进行1/3倍频程谱的分析结果如图1所示。

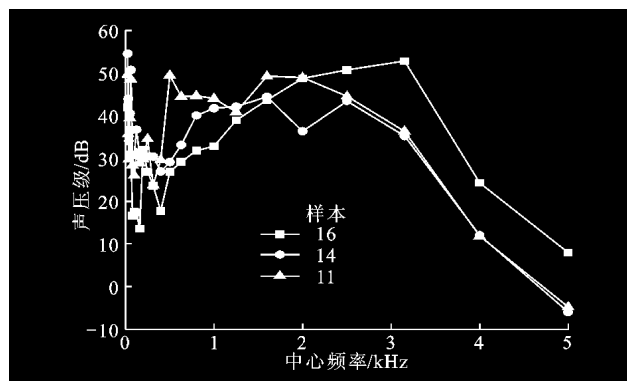


图1 样本1/3倍频程谱的分析对比

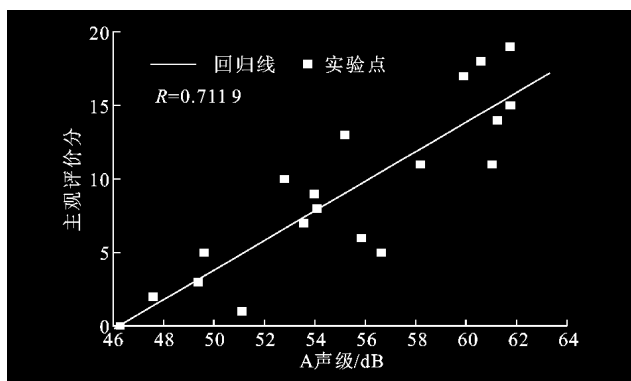
图1中显示样本11在低频段(500 Hz~2 000 Hz)上的幅值要明显大于样本16的幅值,用A声级评价时往往对低频进行滤波,导致其在评价含有较大低频成分的宽带噪声时,会低估人们的主观感觉。相反地,采用烦躁度刻画声品质时要比A声级更灵敏,更能体现人的主观感受变化。从图1中亦可发现,样本16在低频幅值上较小,在高频幅值上却最大,体现在心理声学参数上为响度值最小,尖锐度值最大,这正符合了心理声学的基本理论。

4 主客观相关性分析

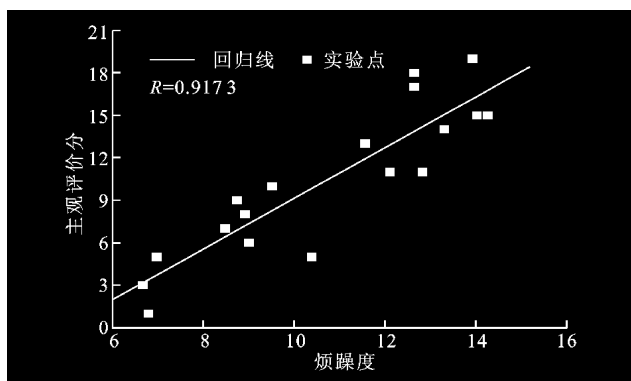
将得到的A声级、烦躁度与主观结果进行线性相关性分析,分析结果如图2所示。主观评价结果与烦躁度的相关系数 R 为0.917 3,而与A声级的相关系数只有0.711 9,由此可见,烦躁度与主观评价的相关性较好,从而验证了选择心理声学烦躁度作为变频压缩机的声品质客观评价指标是科学合理的。以烦躁度为自变量、声品质主观评价得分为因变量建立一元线性回归模型,得到声品质主观评价得分为

$$Q=-8.565\ 2+1.775\ 4\ P \quad (8)$$

经计算,图2中 $R=0.917\ 3$,具有较高的拟合度,说明可采用该模型作为压缩机声品质主观评价值的预估模型。



(a) A声级与主观结果相关性



(b) 烦躁度与主观结果相关性

图2 客观评价量与主观结果相关性

5 结束语

根据本文的研究可得到如下结论:

(1)心理声学参数计算结果和1/3倍频程谱分析结果均表明,烦躁度在刻画声品质方面要比A声级更灵敏,更符合人的主观感受;

(2)对测试数据进行主观听音实验,发现A声级在评价以低频噪声为主的压缩机时,与烦躁度相比,往往会低估人的主观感受;

(3)采用成对比较法作为压缩机声品质主观评价方法,具有较好的一致性和可靠性;

(4)对主、客观实验结果相关性的分析表明,烦躁度与主观评价的相关性较好,可达0.9173, A声级则较差,只有0.7119,因此验证了选择心理声学烦躁度作为变频压缩机声品质客观评价指标的科学合理性;

(5)本文采用的线性回归模型具有较高的拟合度,可作为压缩机声品质主观评价值的预估模型。

参考文献:

[1] 石岩,毕凤荣,林漫群,等. 心理声学基本理论及其在声音品质主观评价中的应用[J]. 小型内燃机与摩托车, 2006, 35(1): 57-60.

SHI Yan, BI Fengrong, LIN Manqun, et al. Basic psychoacoustics theoretics and its application in sound-quality evaluation [J]. Small Internal Combustion Engine Motorcycle, 2006, 35(1): 57-60.

[2] 王登峰,刘宗巍,梁杰,等. 车内噪声品质的主观评价试验与客观量化描述[J]. 吉林大学学报(工学版), 2006, 36(2): 41-45.

WANG Dengfeng, LIU Zongwei, LIANG Jie, et al. Subjective evaluation test and objective quantificational description of vehicle interior noise quality [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, 36(2): 41-45.

[3] JIN Yong Jeon. Sound radiation and sound quality characteristics of refrigerator noise in real living environments [J]. Applied Acoustics, 2007, 68(10): 41-45.

[4] 张明铎. A计权声级在噪声测量与评价中的不足[J]. 声学技术, 1995, 14(1): 41-42.

ZHANG Mingduo. Deficiency of A-weighted sound pressure level in measurement and evaluation of noise [J]. Acoustics Technology, 1995, 14(1): 41-42.

[5] FASTL H. The psychoacoustics of sound quality evaluation [J]. Acta Acoustica, 1997, 83(5): 754-764.

[6] LIM T C. Correlations between deficiencies in power window systems influencing sound quality and some psychoacoustic metrics [J]. Applied Acoustics, 2001, 62(9): 1025-1047.

[7] 张伟,蒋伟康. 基于心理声学分析的车内异常噪声辨识[J]. 汽车工程, 2003, 25(6): 603-605.

ZHANG Wei, JIANG Weikang. Identification of abnormal in-car noise based on psychoacoustics analysis [J]. Automotive Engineering, 2003, 25(6): 603-605.

[8] ZWICKER E, FASTL H. Psychoacoustics: facts and models [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1999: 324-325.

[9] SUSINI P, McADAMS S, WINSBERG S. Characterizing the sound quality of air-conditioning noise [J]. Applied Acoustics, 2004, 65(8): 763-790.

[10] 王星. 非参数统计[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2005: 123-127.

[11] 毛东兴,高亚丽,俞悟周,等. 声品质主观评价的分组成对比较法研究[J]. 声学学报, 2005, 30(6): 515-520.

MAO Dongxing, GAO Yali, YU Wuzhou, et al. Grouped pair-wise comparison for subjective sound quality evaluation [J]. Acta Acoustica, 2005, 30(6): 515-520.

(编辑 管咏梅)