

王季卿教授八秩寿庆学术报告会——

响度感知特征研究进展

毛东兴

(同济大学声学研究所, 上海 200092)

摘要: 响度是反映人耳对声音强弱感知的最基本参量, 它是分析计算很多其它心理声学参量的基础。响度特征的研究不仅在噪声评价、心理学及声品质方面有重要的应用, 还广泛应用于语音信号处理等方面。在此从等响曲线、双耳异响条件下的响度感知特征以及纯音和复音时变信号响度感知特征等三个方面介绍了近年来的研究结果。

关键词: 响度; 等响曲线; 双耳异响; 时变信号

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-06-0693-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.06.002

Recent progress in hearing perception of loudness

MAO Dong-xing

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Loudness is an important metric describing aural perception to sound intensity, and it is also the essential quantity from which many other psychoacoustic metrics derived. The study of loudness perception has important practical meaning in noise evaluation, psychoacoustics and sound quality research, and in speech signal processing as well. Recent research works on equal loudness level contours, overall perceived loudness in dichotic hearing condition and loudness of time varying pure / complex tones are reviewed and discussed.

Key words: loudness; equal loudness level contour; binaural hearing; time-varying signals

1 引言

听觉响度特征是长期以来心理声学基础研究的一个重要方面, 作为心理声学的一个基本参量, 它是分析计算其它心理声学参量的基础。近年来, 随着生活环境的改善和品质的提高, 人们对生活质量的要求越来越高, 由此引出了人们对噪声的主观感受的关注。国内外研究人员发现, 传统意义上的 A 计权声级评价标准已经不能满足现下对声信号特征的评价目的, 人们越来越关注居住环境及产品的声品质, 而作为分析声品质的一个重要参量, 响度自然也受到各国声学工作者的关注。响度特征的研究不仅在噪声评价、心理学及声品质方面有重要的应用, 除此之外还广泛应用于语音信号处理、声频工程、电声器件等众多领域, 甚至是军事上的心理对抗和干扰方面^[1], 例如很多助听器的信号处理部分就应用了响度的相关理论。

对于响度的研究, 国外起步较早。从 1927 年 Kingsbury^[2]最早对等响曲线进行研究至今, 已有大量关于响度方面的文献发表, 特别是近些年来, 随着声品质成为众多行业(交通、汽车、电器等)的关注焦点^[3,4], 心理声学已成为国外热门的研究领域, 很多高校都有专门研究心理声学的系科或实验室, 这也推动了响度研究的进一步发展。几十年来国外对于响度的研究一直在不断地深入, 从最早的对纯音等响曲线的研究到近些年来日益受到关注的时变信号响度特征和双耳异响的研究, 国外研究者积累了丰富的经验, 获得了大量的数据, 并取得了很多研究成果。

本文从三个方面对听觉响度特征的研究进展进行了总结介绍。在等响曲线研究方面, 介绍了 ISO226-2003 修订激发的一系列研究结果, 以及针对中国人群等响曲线的研究进展; 在双耳听音响度存在声级差条件下的总体感知响度特征研究方面, 从国际上不同研究结果出发, 介绍了国内关于总体响度特征与双耳声级差存在指数变化关系的研究结果; 在时变响度研究方面, 介绍了纯音时变信号的响度感知以及双音时变信号响度感知特征近期的研究工作。

收稿日期: 2009-07-30; 修回日期: 2009-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10374071,10674104)

作者简介: 毛东兴(1966-), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, 研究方向为心理声学、噪声的效应和控制、环境声学。

通讯作者: 毛东兴, E-mail: dxmao@tongji.edu.cn

2 纯音等响曲线的研究

等响曲线的最早研究(1927年)是对单耳听音条件下的等响曲线的测量^[1], 双耳听音和相对自由场条件下完整的等响曲线最先由 Fletcher 和 Munson^[5]于 1933 年获得, 他们的研究成果构成了后来的 A 计权评价曲线的基础。此后, Churcher 和 King^[6]、Zwicker 和 Feldtkler^[7]及 Robinson 和 Dadson^[8]都对等响曲线进行了研究。Robinson 和 Dadson 的研究成果更是被国际标准化组织(ISO)所采纳, 并于 1961 年被制定成国际标准(ISO/R 266^[9]), 此后, 国际标准化组织(ISO)于 1975 年针对响度的计算方法制定了相应的标准(ISO 532^[10])。

自从 ISO/R 226 于 1961 年制定后, 其得到了广泛的认可, 直到 1987 年 ISO/R 226 被确定为正式标准 ISO/226-1987 后, Fastl 和 Zwicker^[11]发现, 他们所得到的等响曲线与 Robinson 和 Dadson 在 1956 年获得的等响曲线在 400Hz 附近处存在显著差异。Fastl 和 Zwicker 所发现的差异被后来的很多研究成果所证实^[12], 特别是这些研究者所获得的新数据都显示, 他们所得到的等响曲线声级在 800Hz 以下都要高于 Robinson 和 Dadson 的等响曲线。考虑到新数据与 Robinson 和 Dadson 获得的数据的差异性, 有些研究人员尝试着制订新的等响曲线。2003 年, Suzuki 和 Takeshima^[12]根据上述研究人员所获得的新数据对标准等响曲线进行了重新修订。修订后的 ISO 226-2003 中公布的等响曲线与根据 Robinson 和 Dadson^[8]的研究结果制订的 1987 版标准相比, 两者出现了惊人的差异^[13](见图 1)。在 1kHz 以下的较宽频带范围内, 出现了高达 15dB 的差异。对于如此大的差异, 由美国、德国、丹麦、英国和日本等机构参与的这项研究提交给 ISO 的技术报告中并没有对引起这种差异的原因做出解释。

对我国人群等响曲线的初步研究发现所获得的数据与 1961 年制定的 ISO 标准存在较大差异^[14], 即便是与最新修订的 ISO 标准相比, 仍然存在明显的差异, 只不过两者之间的差异有所缩小。实验所获得的我国人群的等响曲线与日本人群的数据比较接近, 只是在一些频率上存在差异。在耳机测试条件下对中国人群双耳听觉感知的 30~100phon 等响曲线以及单耳听音下的 50~70phon 等响曲线的测量结果, 进一步证实了我国人群等响曲线与 ISO226 标准曲线之间存在差异, 并发现中国人群在多数频段内较西方人更为敏感^[15,16]。

对自由场条件下中国人群的双耳等响曲线细致

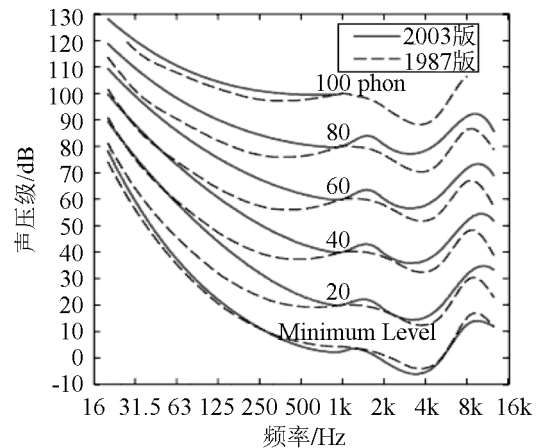


图 1 新旧版本 ISO226 中规定的等响曲线的对比^[13]

Fig.1 Comparison of equal loudness level contours between ISO 226-1987 and ISO226-2003^[13]

测试和分析研究得到了中国人群的完整的等响曲线^[17,18]。研究发现, 中国人群的等响曲线与 ISO 226 标准等响曲线存在明显的差异, 特别是在 400Hz 和 800Hz 处, 实验所获得的中国人群的等响曲线都出现了峰值, 而在高频段内, 实验所获得的中国人群等响曲线明显低于国外研究者所给出的等响曲线(见图 2), 并且随着频率的增加, 两者之间的差值越大。这些研究结果证实了我们早前提出的等响曲线存在区域性差异的推测^[14]。研究得到了适合中国人群的等响曲线簇, 并通过修正 ISO 标准中的模型参数给出了中国人群的等响曲线模型^[17]。

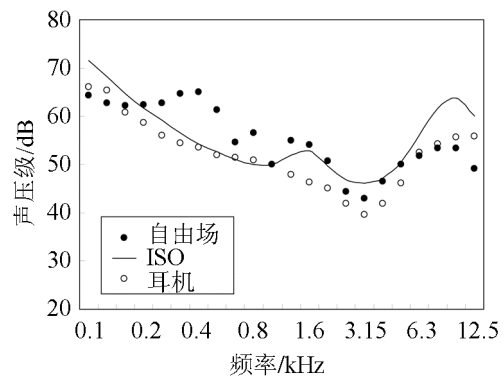


图 2 中国人群自由场以及耳机测量条件下的 50phon 等响曲线与 ISO 曲线的对比

Fig.2 Comparison of equal loudness level contour at 50phon between ISO and Chinese people measured in free field and headphone condition respectively

3 双耳异响条件下的总体响度感知

迄今为止的多数关于响度感知方面的研究是建立在双耳所感知的响度是相等的假设基础上的, 即双耳等响条件(diocotic hearing)。但实际听音情况下, 双耳接收到的声信号存在频率差和双耳声级差(ILD), 即人耳常处于双耳异响(dichotic hearing)的

听觉环境中。由于声源的非正向入射、声场分布的不均匀以及人头部几何形状非严格左右对称等,都会造成双耳所接收到的声信号存在差异。

关于双耳异响条件下总体响度感知的多数早期研究结论认为 ILD 对总体响度感知没有影响,左右耳响度的算术平均值可作为总体响度感知的估计值^[19-21]。其后的一些实验结果发现,在一些频率范围内或者双耳响度差的范围内,总体响度感知高于双耳响度的算术平均值^[22-24]。Chouard^[25]针对车内实际噪声对双耳异响的听觉响度感知研究结果得出了总体响度等于双耳响度算术平均值的结论,而 Sivonen^[26]在对方向性入射声源响度感知的研究中又肯定了双耳声级差对总体响度感知存在的影响。

在国内,采用参考语义细分法对存在双耳声级差的异响条件下的实验研究发现^[27],在双耳异响条件下,对于固定的双耳声级差,总体响度感知在 1kHz 以下的频率范围内受频率影响非常小,而在 1kHz 以上,总体响度感知曲线随频率的升高出现了无规律性的波动。对不同的信号频率,总体响度感受都随 ILD 的变化呈指数变化趋势(见图 3)。

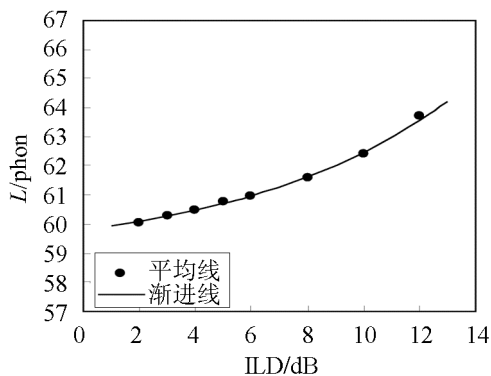


图3 总体响度感知平均值与 ILD 之间的关系及其修正响度模型
Fig.3 Relation between the averaged perceived loudness and the ILD together with the revised model.

根据总体响度与 ILD 的指数变化关系,双耳异响条件下的响度感知可用以下修正模型描述^[27]:

$$L_N = L_t + (e^{\frac{1.3 \times \text{ILD}}{10}} - 1) \quad (1)$$

式中 L_N 为总体响度感知值, L_t 为双耳响度的算术平均值, ILD 为双耳间声压级差。

由式(1)可见,对于双耳响度存在差异的异响条件下的总体响度感知出现超叠加现象,总体响度感知在双耳响度的算术平均值的基础上增加了与双耳间声级差有关的指数修正量。

4 时变信号响度研究

目前,所有关于响度的计算模型都是基于稳态

信号建立起来的,很少能够适用于时变信号。与双耳异响条件下的响度感知一样,关于时变信号的响度的观点和结论也是众说纷纭。

Canévet 等^[28,29]对声压级连续变化的 1kHz 纯音信号研究后发现,对声压级连续升高的 1kHz 纯音信号,人耳所感知的响度变化要比同样声级处单独放音(两次放音之间间隔一段时间)的响度变化略大,Canévet 称这种现象为过重振(Up-cruitment);而对于声压级连续降低的 1kHz 纯音信号,人耳所感知的响度变化要比在同样声级处单独放音(两次放音之间间隔一段时间)的响度变化大得多,Canévet 称这种现象为反重振(Decruitment)。Neuhoff^[30,31]研究发现,对于合成的元音和 1kHz 信号,声压级渐增信号的响度变化要大于声压级渐降信号的响度变化,但是对于宽带噪声信号,两者之间则没有显著差异。

Susini 等^[32]的研究还发现,幅值连续变化的纯音信号的总体响度感知与声压级变化的速率、持续时间以及信号结束时的声压级有关,对于末端声压级较高的信号,其总体响度感知也较高,对于声压级连续增加的信号,其总体响度要高于声压级连续减小的信号的响度。

针对中国人群的声压级连续变化的纯音信号的研究后发现^[33],当声压级连续增大时,对信号的响度感知会存在过重振现象;而当声压级连续减小时,对信号的响度感知会存在反重振现象。两种现象出现的起始声级都与幅值估计时间间隔和声级变化斜率有关,其中,反重振现象的起始声级随着幅值估计时间间隔的增加和声级斜率的增大而降低,过重振现象则刚好相反。

无论是声级连续降低还是连续增加的纯音信号,当信号的连续两次幅值估计之间声级差相同时,其响度的主观评价结果相同(图 4 和 5)。由此可知,幅值估计声级差是时变响度感知的关键影响参量。声级递增与声级递减时变信号响度感知存在明显的不对称性。

对复音信号的响度感知特性研究结果显示^[33],对于几何中心频率为 1kHz 的双音复音信号、载频为 1kHz 的调频信号以及载频为 1kHz 的调幅信号,信号的响度感知随频率间隔或调制频率的变化特征都以临界带宽为界。当双音的频率间隔或信号带宽小于临界带宽时,信号的响度感知都与频率间隔或调制频率无关,而当频率间隔或信号带宽大于临界带宽时,信号的响度感知都随频率间隔或调制频率的增大而增大。

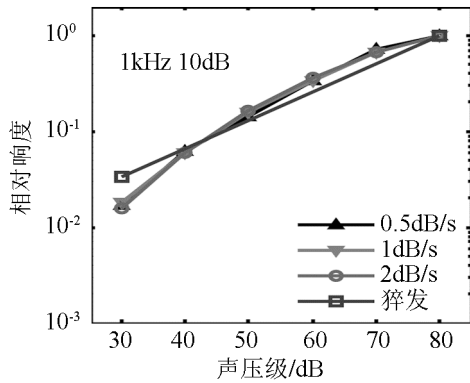


图4 连续两次幅值估计之间声级差为10dB的声级递减的1kHz信号的响度幅值估计结果

Fig.4 Estimated loudness of 1kHz decreasing pure tone with 10dB signal level difference between two consecutive estimation

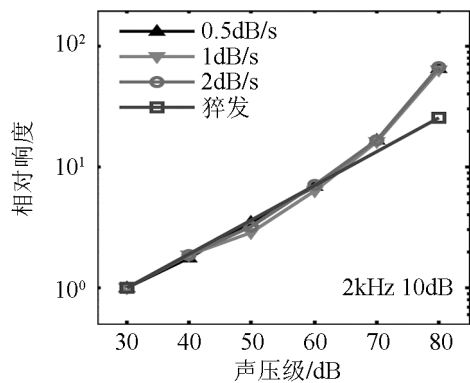


图5 连续两次幅值估计之间声级差为10dB的声级递增的2kHz信号的响度幅值估计结果

Fig.5 Estimated loudness of 2kHz increasing pure tone with 10dB signal level difference between two consecutive estimation

参 考 文 献

[1] 李兆利. 声频声学在军事上的应用研究[A]. 2009 声频工程学术会议论文集[C]. 太原, 2009.

[2] Kingsbury B A. A direct comparison of the loudness of pure tones[J]. Physical Review, 1927, **29**(5): 588-600.

[3] Walter B. Kleeman Jr. Interior design of the electronic offices: the comfort and productivity payoff[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

[4] Bisping R. Car interior sound quality: experimental analysis by synthesis[J]. Acta Acustica united with Acustica, 1997, **83**: 813-818.

[5] Fletcher H, Munson W A. Loudness, its definition, measurement and calculation[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1933, **5**(2): 82-108.

[6] Churcher B G, King A J. The performance of noise meters in terms of the primary standard[J]. Journal of the Institute of Electrical Engineers, 1937, **81**: 57-90.

[7] Zwicker E, Feldtkeller R. On the loudness of stationary noises[J]. Acustica, 1955, **5**: 303-316.

[8] Robinson D W, Dadson R. A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones[J]. British Journal of Applied Physics, 1956, **7**: 166-181.

[9] International standard organization. ISO 226: Acoustics - Normal equal-loudness level contours[S]. 1961, 1987, 2003.

[10] International Standard Organization. ISO532: Acoustics - Method

for calculating loudness level[S]. 1975.

[11] Fastl H, Zwicker E. Lautstärkepegel bei 400 Hz: psychoakustische messung und berechnung nach ISO532B[A]. Fortschritte der Akustik[C]. DAGA '87, 1987, 189-193.

[12] Yôiti Suzuki, Hisashi Takeshima. Equal-loudness-level contours for pure tones[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2004, **116**(2): 918-933.

[13] Full revision of international standards for equal-loudness level contours (ISO 226). http://www.aist.go.jp/aist_e/latest_research/2003/20031114/20031114.html

[14] 王勇, 毛东兴. 中国人群纯音等响曲线的初步研究[J]. 声学技术, 2007, **26**(2): 299-302.

[15] 吕小柳, 许晶晶, 毛东兴. 1kHz 以下频率我国人群纯音等响曲线的变化趋势[A]. 中国声学学会 2006 年全国声学学术会议论文集[C]. 声学技术, 2006, **25**(4)(增刊): 417-418.

[16] 许晶晶, 吕小柳, 毛东兴. 中国人群 1k~4kHz 纯音等响曲线与 ISO 标准的显著差异[A]. 中国声学学会 2006 年全国声学学术会议论文集[C]. 声学技术, 2006, **25**(4)(增刊): 421-422.

[17] 许晶晶. 中国人群等响曲线的研究[D]. 同济大学硕士学位论文, 上海, 2008.

[18] XÛ Jingjing, MAO Dongxing. Equal loudness level contours of Chinese people measured by a free level adjusting procedure[A]. The 37th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering Internoise 2008[C]. Shanghai, China.

[19] Keen K. Preservation of constant loudness with interaural amplitude asymmetry[J]. J. Acoust. Soc. Am. 1972, **52**: 1193-1196.

[20] Levelt W J M, Riemersma J B, et al. Binaural additivity of loudness[J]. Br. J. Math. Stat. Psychol, **25**: 51-68.

[21] Zwicker E, Zwicker U T. Dependence of binaural loudness summation on interaural level, frequencies, spectral distribution and temporal distribution[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1991, **89**(2): 756-764.

[22] Marks L E. Binaural summation of loudness: Noise and two-tones complexes[J]. Perception and psychophysics, 1980, **27**: 289-298.

[23] Gigerenzer G, Strube G. Are there limits of binaural additivity of loudness? [J]. Journal of experimental psychology: Human Perception and Performance, 1983, **9**: 126-136.

[24] Irwin R J. Binaural summation of thermal noise of equal and unequal power in each ear[J]. American Journal of Psychology, 1965, **78**: 57-65.

[25] Chouard N. Loudness and unpleasantness perception in dichotic conditions[D]. Doctoral dissertation. University of Oldenburg, 1997.

[26] Sivonen V P, Ellermeier W. Binaural loudness for artificial-head measurements in directional sound fields[J]. J. Audio. Eng. Soc. 2008, **56**(6): 452-461.

[27] ZHANG Jie, MAO Dongxing. A revised model for overall perceived loudness in dichotic listening conditions[A]. The 37th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering Internoise 2008[C]. Shanghai, China.

[28] Canévet G. Estimation de sonie pour des sons purs à variation monotone de niveau[J]. Acustica, 1986, **61**: 256-264.

[29] Canévet G, Scharf B. The loudness of sounds that increase and decrease continuously in level[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1990, **88**(5): 2136.

[30] Neuhoff J G. Perceptual bias for rising tones[J]. Nature, 1998, **395**(6698): 123-124.

[31] Neuhoff J G. Perception of changes in loudness: Reply to Canévet et al[J]. Nature, 1999, **398**(6729): 673-674.

[32] Susini P, Mcadams S, Smith B K. Loudness asymmetries for tones with increasing and decreasing levels using continuous and global ratings[J]. Acta Acustica united with Acustica, 2007, **93**: 623.

[33] 汪宏. 时变信号双耳响度感知特性的研究[D]. 同济大学硕士学位论文, 上海, 2009.