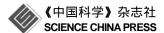
SCIENTIA SINICA Phys, Mech & Astron

www.scichina.com phys.scichina.com



论 文

纯音信号双耳响度叠加与双耳声级差及频率的 关系

张洁, 毛东兴*

同济大学声学研究所,上海 200092 * 联系人, E-mail: dxmao@tongji.edu.cn

收稿日期: 2009-10-13;接受日期: 2010-01-21 国家自然科学基金资助项目(批准号: 10674104)

摘要 现有关于响度的模型多基于双耳等响的假设之上,但实际中,人耳常处于双耳异响的听觉环境中.在这种情况下,双耳响度的算术平均值常用作总体响度感知的估计值,即认为总体响度感知不受双耳间响度差异的影响.我们通过主观评价实验,对双耳异响条件下纯音信号的总体响度感知进行了初步探索.实验结果显示,总体响度感知在低频范围波动并不明显,而在高频范围波动逐渐趋于显著;当双耳声级差增大时,总体响度感知大于双耳间响度的算术平均值.基于实验结果提出了双耳异响条件下总体响度感知的修正模型.修正模型与实验结果具有很高的一致性.

关键词 双耳异响, 主观评价, 双耳声级差, 总体响度感知, 响度模型

PACS: 43.66.Cb, 43.66.Rq, 43.66.Pn, 43.66.Ba

响度是人耳对声音强度感知最直接、敏感的参量之一,也是声品质参量模型中最基础的参量. 随着对响度研究的不断深入,实验条件和信号特征也逐渐接近实际听力环境. 最初对于响度的测试是在单耳听力条件下进行的^[1], 其实验方法和结果相对于双耳听力条件存在一定局限性,因而随后的研究者们采用双耳等响听力条件对响度感知进行了一系列的研究^[2-4], 基于实验结果制定了等响曲线国际标准,并于 2003 年进行了最近一次修正^[5]. 在双耳响度的叠加模型的研究中,双耳间异音情况逐渐引起了实验者的重视. 异音,即双耳所接收到的声信号在声压级、频率、相位等特征中的一个或几个方面存在差异. 异音情况是人耳听觉最普遍的情况,在实际听觉环境下,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. 双耳异响,即双耳信号间仅存在强度差异,是双耳异音中最简单和基础的情况. 早期关于双耳异响条件下总体响度感知的研究多数得出结论^[6-8], 认为双耳间的响度差异对总体响度感知没有影响,左右耳响度的算术平均值可以作为总体响度感知的估计值. 但后来的实验结果逐渐发现在一些频率范围内^[9]或者双耳响度差的范围内^[10,11], 总体响度感知高于双耳响度的算术平均值. 近年来,关于异响情况的研究陆续得到了一些新的实验结果. Chouard^[12]使用汽车车厢实际产生的噪声对双耳异响的听觉感知进行了研究,结论为: 在双耳异响条件下人耳听觉的总体响度感知等于左右耳响度级的算术平均值:

引用格式: 张洁, 毛东兴. 纯音信号双耳响度叠加与双耳声级差及频率的关系. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40: 387~394

$$N_{EO} = N_M = (N_L + N_R)/2$$
 (sone), (1)

式中 N_L 和 N_R 分别为左耳和右耳的响度. Ih 等人^[13]的 实验结果则完全相反, 其结果表明, 当双耳间声级差 增大时, 总体响度感知将大于双耳间响度的算术平均值. Sivonen 等人^[14]在对方向性入射声源响度感知的研究中和 Moore^[15]对响度模型的修正中, 均涉及到了双耳间响度差异对总体响度感知的影响, 并且肯定了双耳声级差对总体响度感知存在一定的影响.

国际上关于双耳异响条件下总体响度感知与双耳间声级差关系尚未形成定论,本文采用七级参考语义细分法,通过主观评价实验,研究了双耳异响条件下纯音信号的响度叠加特征.对包含有 30 名样本的主观评价实验结果进行分析,总结总体响度感知与双耳间声级差、频率的关系,并提出双耳异响条件下总体响度感知的修正模型.

1 主观评价实验

1.1 实验步骤

在声信号的主观评价试验中,语义细分法是最为广泛采纳和有效的实验步骤之一. Mao 和 Zhang^[16]在系统地研究了主观评价方法的性能之后,提出了采用参考激励信号的参考语义细分法评价程序. 与传统语义细分法相比,参考语义细分法简化了评价人员的实验任务并能够更加准确得到相应指标的实验结果,显著改善了评价实验性能. 本实验所采用的参考语义细分法共分为七个等级: 很响、比较响、有点响、一样、有点轻、比较轻、很轻. 对某一测试信号,将其分别与不同响度级的参考信号进行成对播放,要求评价人员对所播放的两个信号响度的相似性进行判断. 评价人员逐一成对听音并将比较结果填在相应的选项上,得到评价数据. 播放次序随机生成以减小之前播放信号对实验结果的影响.

进行数据统计时,分别以数字 1~7 代表这 7 个响度等级,对每个测试信号计算评价人员数据的整体几何平均值,并计算每个评价人员的数据与几何平均值的相关系数. 剔除 10%左右相关性较低的数据后,对剩余数据重新计算几何平均值,并与对应的响度级进行线性拟合,即可得到初步的等响点.

1.2 实验装置

为了保证不受外界影响, 实验选择在听音室中

进行, 其本底噪声为 25.5 dB(A). 实验所采用的纯音信号由声品质分析软件 Artemis 3.0 直接生成, 其可通过输入数值以直接生成所需声压级的双耳信号. 所得到的信号通过 SQLab II 多通道声振测试系统、HPS IV 耳机回放系统和 Sennheiser HD600 耳机进行回放.

在实验开始前,为了保证回放系统的准确性和稳定性,分别对回放系统的频率响应和双通道差异进行了校准. 校准信号采用 1/3 倍频程中心频率 60 phon 对应声压级的等响纯音信号,回放系统输出信号由人工头 HMS III 进行采样并通过 Artemis 3.0 进行分析计算. 校准结果如图 1 所示.

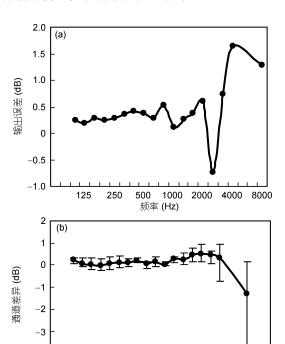


图 1 回放系统校准结果

频率 (Hz)

125

250

500 1000 2000 4000 8000

(a) 回放系统频率响应; (b) 回放系统双通道差异

从图 1(a)中可以看出,在 2 kHz 以下,回放系统 具有较为平直的频率响应,其输出声压级与系统设 定值的误差多在 0.5 dB 以内,然而在 2 kHz 以上,随 着频率的升高,回放系统的输出误差逐渐增大.去除 偏移误差,回放系统可满足 2 kHz 以下±0.5 dB, 2 kHz 以上±1.5 dB 的声压级精度.图 1(b)给了双通道差异 的校准结果与频率的关系,误差范围由重复校准结 果计算得出. 在 2 kHz 以下, 双通道差异均在 0.3 dB 以下(在多数频率下低于 0.1 dB), 在 2 kHz 以上, 双通道的差值及其波动性(如误差范围所示)显著增加.

Mills^[17]及 Yost 等人^[18]分别对双耳信号强度差异的听阈(Just-noticeable Level Difference, JNDL)进行过讨论, 其结果如图 2 所示. 从图上可以看出, 在 2 kHz 以下, 双耳差异的听阈均在 0.7 dB 以上, 而该频率范围内回放系统双通道的差异远小于其阈值, 难以被评价人员所觉察, 因而不会对实验结果产生影响. 在 2 kHz 以上的频率范围内, 测试系统的精度较低, 但仍能保证±1.5 dB 的误差. 因此整体上, 回放系统可以满足主观评价实验的要求, 得到具有统计性意义的实验结果.

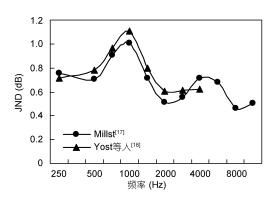


图 2 双耳信号强度差异听阈与频率关系

1.3 评价人员

30 名评价人员(包括第一作者)参与了主观评价 实验. 评价人员年龄在 20~23 岁之间,包括 14 名女 性、16 名男性,均为同济大学在读本科生. 所有受试 者均自述无听力障碍

在评价实验开始前,测试人员会向评价人员介绍评价对象、评价方法和要求,在确定受试者能够充分理解响度这一概念和参考语义细分法后开始测试.

1.4 测试信号

实验所采用的测试音为 100 Hz~4 kHz 之间 1/3 倍频程中心频率纯音信号以及 8 kHz 纯音信号. 测试

信号双通道声压级的算术平均值为 60 phon 对应声压级,参照 ISO226 计算得到. 以此为基础, 左右通道分别加减一定声压级, 以生成双耳间声级差 (Interaural Level Difference, ILD). 以 8 kHz 测试信号为例, 响度级为 60 phon 的 8 kHz 纯音所对应的声压级为 71.66 dB, 左通道信号加 1 dB, 右通道信号减 1 dB, 从而生成双耳声级差 2 dB 的异响信号. 依此类推,逐一生成测试信号.

测试信号的双耳间声级差 2, 4, 6, 8, 10 和 12 dB. 在整个实验过程中,始终保持左通道声压级高于右通道.

1.5 参考信号

参考信号的选择对保证实验的可操作性和准确性有着重要的影响为选取合适的参考信号,就参考信号的选择进行了两次对比实验.实验中,测试信号为250 Hz~8 kHz 范围内 1/3 倍频程中心频率纯音.实验一依据等响曲线的测量方法,选择 1 kHz 等响信号为参考音;实验二选择与测试音频率相同的等响信号为参考音.参考音的响度级在55 phon至65 phon范围内以1 phon为步距确定.两次实验分别有8名评价人员参加.

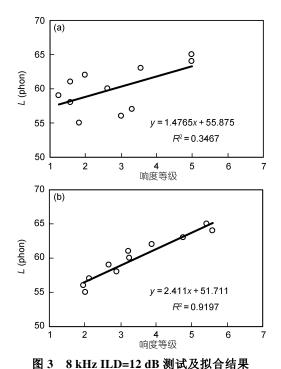
以 8 kHz 声级差为 12 dB 的测试信号为例,两次实验中各评价人员结果与几何平均值的相关系数如表 1 所示,测试结果及拟合曲线如图 3 所示.

对于使用1kHz纯音作为参考音的实验一,各评价人员的评价结果与几何平均值之间的相关系数非常低,有5名评价人员的相关系数在0.35以下,说明各评价人员数据一致性较差,实验结果较为离散.其几何平均值与对应响度级线性拟合的回归系数仅为0.34,则采用线性拟合计算等响点的方法不再适用.总体上,评价人员的相关系数以及拟合曲线的回归系数都随频率或声级差的增大而减小.而对使用与测试音相同频率参考音的实验二,8名评价人员的相关系数均在0.88以上,线性拟合的回归系数达到了0.91,相对于实验一有明显的提高.

在实验一中,随着测试信号频率的增加,评价人员普遍认为评价任务难度增大,2名女性评价人员表

表 1 8 kHz ILD=12 dB 各评价人员结果与几何平均值的相关系数

• •									
	评价人员	1	2	3	4	5	6	7	8
	实验一	0.05	0.87	<u>-0.13</u>	0.33	0.15	0.95	0.32	0.95
	实验二	0.93	0.88	0.86	0.93	0.91	0.96	0.88	0.95



(a) 参考音为 1 kHz 等响信号; (b) 参考音为 8 kHz 等响信号

示在对 4 kHz 以上测试信号进行评价时,参考信号响度始终低于测试信号,即在高频时参考音的响度级范围没有覆盖评价人员的响度感知范围. 这种现象可能是由中国人群等响曲线与国际标准在高频的差异所导致的. Xu 和 Mao^[19]对中国人群等响曲线的研究显示中国人耳在高频时等响数据要明显低于 ISO 226 国际标准,即中国人群对高频声音比较敏感. 因而,参照 ISO 226 等响曲线使用 1kHz 的纯音作为参考音可能是引起实验误差的主要原因. 而在实验二中没有出现类似的问题,并且评价人员普遍反映实验难度和疲劳度有明显的降低.

通过两组实验的对比及实验结果的分析,可以看出,相对于采用 1 kHz 等响信号作为参考信号,采用与测试信号同频率的等响信号作为参考信号更加合理和准确,因而在正式测试中,均采用与测试信号同频率的等响信号作为参考信号.

2 结果与分析

2.1 实验可重复性

为了验证实验的可重复性,相隔3个月对同一组评价人员采用同样的实验方法进行了两次相互独立

的重复性实验.两次实验的部分测试结果如图 4 所示.测试信号对应编号以及不同频率下两次测试结果的相关系数如表 2 所示.

从图 4 和表 2 中可以看出,无论对于整体和个体测试结果,4 和 8 kHz 的重复性相对于其余测试频率偏低.评价整体测试结果的可重复性明显高于评价个体,特别是对于高频测试信号,整体测试结果的可重复性大大高于个体可重复性,说明所包含样本数量可以排除个体评价中的随机因素,获取更加稳定和真实的实验结果.

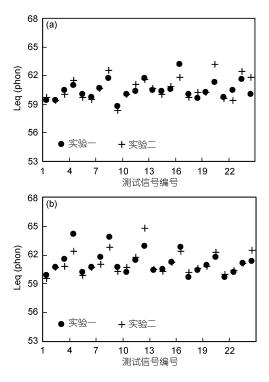


图 4 重复性实验测试结果

(a) 评价个体测试结果; (b) 评价整体测试结果

2.2 总体响度感知与频率关系

分别以双耳声级差为 2 和 8 dB 的测试结果为例, 在相同双耳声级差条件下总体响度感知随频率的变 化关系如图 5 所示. 尽管两种声级差条件下的曲线没 有明显的相似之处, 并未呈现随频率变化的一致规 律, 但值得注意的是, 以各频率结果的平均值为中心 (图中虚线所示), 其上下波动在 1 phon 以内. 为了更 明显看出不同声级差条件下频率对总体响度感知的 影响, 分别计算各声级差条件下不同频率的测试结

表 2	重复性实验相关系数	b
1X 4	里及 压大巡扣入水文	х

<u> </u>									
频率	ILD	测试	评价个体	评价整体					
(Hz)	(dB)	信号	相关系数	相关系数					
	2	1							
250	4	2	0.914	0.973					
230	8	3	0.914						
	12	4							
	2	5		0.984					
500	4	6	0.996						
300	8	7	0.990						
	12	8							
	2	9		0.959					
1000	4	10	0.045						
1000	8	11	0.945						
	12	12							
	2	13		0.983					
2000	4	14	0.911						
2000	8	15	0.911						
	12	16							
	2	17		0.949					
4000	4	18	0.924						
4000	8	19	0.924						
	12	20							
	2	21		0.914					
8000	4	22	0.614						
8000	8	23	0.014						
	12	24							

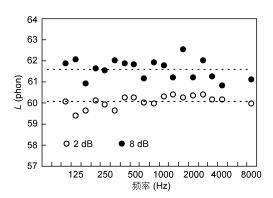


图 5 ILD=2 dB, 8 dB 总体响度感知随频率变化关系

果与该声级差条件下各频率结果平均值之间的差值,如图 6 所示,其中 91.7%的数据在 1 phon 以内, 98.2%的数据在 1.5 phon 以内,频率对总体响度感知的影响并不明显. 所以双耳异响条件下总体响度感知受频率影响的特征并不显著.

计算各频率下不同声级差测试结果的平均值如图 7 所示,在低频范围内,曲线非常平坦,随着频率的增高,曲线的波动逐渐趋于明显,但其波动范围仍在 1phon 以内,可以认为,频率对总体响度感知的没

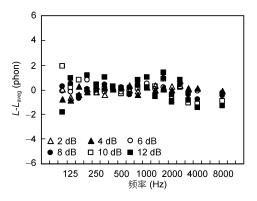


图 6 各声级差条件下测试结果与平均结果差值随频率 变化关系

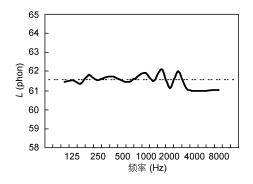


图 7 各声级差测试结果平均值随频率变化关系

有显著影响. 对于 2 kHz 以上存在的相对明显波动, 其原因可能有两种: (1) 这种波动可能是在高频范围内频率对总体响度感知影响的体现, 即仅在高频范围内, 总体响度感知受频率影响出现了较为明显的波动; (2) 结合上文中关于回放系统校准结果的论证, 这种波动可能是由于回放系统在高频范围内的不稳定, 从而导致的系统误差.

2.3 总体响度感知与双耳间声级差(ILD)关系

图 8 给出了各频率条件下总体响度感知随 ILD 的变化关系. 在双耳异响条件下,除部分低频数据略低外,总体响度感知高于双耳声压级算术平均值所对应的响度级(所有的异响信号其响度级平均值均保持 60 phon 不变),且随着 ILD 的增大,两者间差值增大. 在不同频率条件下,总体响度感知随 ILD 的变化趋势具有非常高的一致性,在声级差较小时各频率的数据都相互重合,在声级差较大时出现较为明显的差异. 由上文中图 8(a)和(b)可以看出,当频率升高时,总体响度感知随 ILD 增大的趋势逐渐变缓.同样

的趋势可由图 8(c)中得到:在ILD大于 8dB的条件下,4 kHz 和 8 kHz 的测试结果明显低于 1.6 kHz 的测试结果. 这种趋势在中低频范围内并不明显.

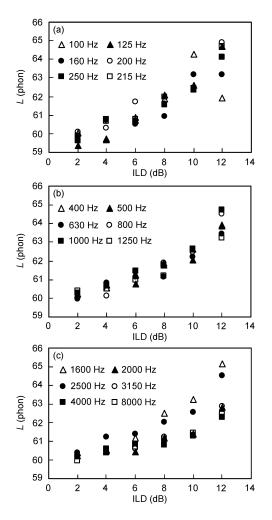


图 8 各频率总体响度感知随双耳声级差(ILD)变化关系 (a) 100~250 Hz; (b) 400~1250 Hz; (c) 1600~8000 Hz

以往相关研究大多认为与双耳异响信号总体响度感知相同的等响信号响度级,可通过异响信号双耳响度级的算术平均值进行估算. 因此,按照 ISO $532^{[20]}$ 计算测试信号双耳响度级的算术平均值 $N_{\rm M}$ 及主观评价实验结果对应响度级 $N_{\rm EQ}$,实验结果与算术平均值的差值如表 3 所示. 除部分低频和低声级差的实验结果低于双耳响度级的算术平均值外,随着双耳声级差的增加,总体响度级高于算术平均值的数值增大,在双耳声级差较大的情况下,使用双耳响度级的算术平均值作为总体响度感知的估算不再适用.

表 3 总体响度级与双耳响度级算术平均值差异 $(N_{\rm EQ}-N_{\rm M},$ 单位: sone)

频率	ILD (dB)					
(Hz)	2	4	6	8	10	12
100	-0.01	-0.17	0.05	0.21	0.86	-0.19
125	-0.19	-0.17	0.04	0.31	0.29	0.85
160	-0.13	0.14	-0.02	-0.01	0.55	0.36
200	0.00	0.01	0.36	0.22	0.32	1.05
250	-0.05	0.15	0.06	0.22	0.35	0.82
315	-0.12	0.14	0.10	0.38	0.41	1.07
400	0.04	0.10	0.24	0.36	0.51	0.82
500	0.05	0.14	0.11	0.34	0.32	0.82
630	-0.02	0.18	0.23	0.16	0.39	0.69
800	-0.03	-0.02	0.31	0.39	0.49	1.09
1000	0.06	0.15	0.34	0.36	0.53	1.19
1250	0.09	0.09	0.19	0.19	0.56	0.65
1600	0.05	0.10	0.24	0.60	0.78	1.37
2000	0.08	0.09	0.03	0.19	0.17	0.53
2500	0.10	0.31	0.31	0.44	0.55	1.14
3150	0.02	0.11	0.07	0.21	0.15	0.55
4000	0.02	0.12	0.16	0.08	0.13	0.35
8000	-0.03	0.05	0.10	0.15	0.16	0.37

3 响度修正模型

3.1 双耳异响条件下总体响度感知的修正模型

由上文的分析可以看出,在双耳信号强度存在 较大差异的情况下,使用双耳响度级的算术平均值 作为总体响度感知的估算与实际测试结果差异增大, 需要对其进行修正.修正模型为

$$N_{\rm EO} = N_{\rm M} + 0.04 \times (e^{\frac{\rm ILD}{4}} - 1) \text{ (sone)}$$
 (2)

式中 $N_{\rm M}$ 为双耳响度级的算术平均值(单位: sone), ILD 为双耳间声压级差(单位: dB).

3.2 修正模型与实验结果比较

修正模型对对倍频程中心频率信号的计算结果与主观评价实验结果比较如图9所示. 在不同的频率下, 修正模型都能很好地描述总体响度级随双耳声级差的变化趋势, 其结果与实验结果相关系数均在0.9以上. 然而在2kHz以上, 修正模型对高声级差信号的计算结果略高于实验结果.

各频率下修正模型与实验结果相关系数如表 4 所示. 除 100 Hz 外, 其余频率下的模型计算结果与实验结果相关系数均在 0.92 以上, 说明修正后的模型能够很好的计算双耳异响条件下的总体响度感知.

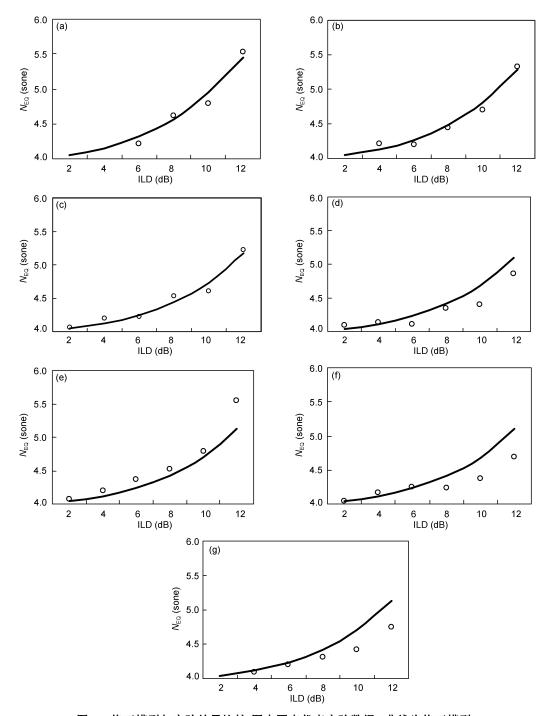


图 9 修正模型与实验结果比较(图中圆点代表实验数据, 曲线为修正模型)

 $(a)\ 125\ Hz, R=0.988; (b)\ 250\ Hz, R=0.988; (c)\ 500\ Hz, R=0.981; (d)\ 1\ kHz, R=0.990; (e)\ 2\ kHz, R=0.972; (f)\ 4\ kHz, R=0.970; (g)\ 8\ kHz, R=0.990; (e)\ 2\ kHz, R=0.972; (f)\ 4\ kHz, R=0.970; (g)\ 8\ kHz, R=0.990; (g)\ 8\ kHz, R=0.$

表 4 修正模型与实验结果相关系数

频率	(Hz) 1	00 125	160	200	250	315	400	500	630	
相关	系数 <u>0.</u>	<u>662</u> 0.98	3 0.923	0.964	0.988	0.983	0.997	0.981	0.980	
频率	(Hz) 8	00 1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	8000	
相关	系数 0.	984 0.99	0.979	0.995	0.972	0.983	0.971	0.970	0.990	

4 结论

本文通过主观评价实验对双耳异响纯音信号的 总体响度感知的特征进行了系统地研究,基于实验 数据分析了总体响度感知与频率和 ILD 的关系. 所 采用的主观评价实验方法具有很高的准确性及可重 复性,从而可以得到具有统计学意义的可靠数据. 实 验结果表明,信号的频率在低频对总体响度感知没 有明显的影响,实验结果仅在高频出现了一定波动,但波动产生的原因仍需要进一步的实验验证.除 100 Hz 外,总体响度感知随双耳间声级差的增大而增大,且高于双耳响度级的算术平均值.根据实验结果所修正的总体响度模型可以很好地预测双耳异响条件下总体响度的感知,其计算结果与实验数据具有较高的一致性.

致谢 对参与主观评价实验的所有评价人员,作者一并表示由衷感谢.

参考文献 -

- 1 Kingsbury B A. A direct comparison of the loudness of pure tones. Phys Rev, 1927, 29: 588—600
- 2 Fletcher H, Munson W A. Loudness, its definition, measurement and calculation. J Acoust Soc Am, 1933, 5: 82—108
- 3 Robinson D W, Dadson R S. A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones. Br J Appl Phys, 1956, 7: 166—181
- 4 Suzuki Y, Takeshima H. Equal-loudness-level contours for pure tones. J Acoust Soc Am, 2004, 116(2): 918—933
- 5 ISO 226. Acoustics-Normal equal loudness level contours. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1987, 2003
- 6 Keen K. Preservation of constant loudness with interaural amplitude asymmetry. J Acoust Soc Am, 1972, 52: 1193—1196
- 7 Levelt W J M, Riemersma J B, Bunt A A. Binaural additivity of loudness. Br J Math Stat Phychol, 25: 51—68
- 8 Zwicker E, Zwicker U T. Dependence of binaural loudness summation on interaural level, frequencies, spectral distribution and temporal distribution. J Acoust Soc Am, 1991, 89(2): 756—764
- 9 Marks L E. Binaural summation of loudness: Noise and two-tones complexes. Percept Psychophys, 1980, 27: 289—298
- 10 Gigerenzer G, Strube G. Are there limits of binaural additivity of loudness? J Exp Psychol-Hum Percept Perform, 1983, 9: 126—136
- 11 Irwin R J. Binaural summation of thermal noise of equal and unequal power in each ear. Am J Psychol, 1965 78: 57-65
- 12 Chouard N. Loudness and unpleasantness perception in dichotic conditions. Dissertation for Doctoral Degree. Oldenburg: University of Oldenburg, 1997
- 13 Ih J G, Cha J H. A loudness model in dichotic conditions. J Acoust Soc Am, 2003, 114(4): 2352
- 14 Sivonen V P, Ellermeier W. Binaural loudness for artificial-head measurements in directional sound fields. J Audio Eng Soc, 2008, 56(6): 452—461
- 15 Moore B C J. Modeling binaural loudness. J Acoust Soc Am, 2007, 121(3): 1604—1612
- Mao D X, Zhang B L. Performance of semantic differential method with and anchor stimulus in subjective sound quality evaluation. Tech Acoust, 2006, 25(6): 560—567
- 17 Mills A W. Lateralization of high-frequency tones. J Acoust Soc Am, 1960, 32(1): 132—134
- 18 Yost W A, Dye R H. Discrimination of interaural differences of level as a function of frequency. J Acoust Soc. Am, 1988, 83(5): 1846—1851
- 19 Xu J J, Mao D X. Equal loudness level contours of Chinese people measured by a free level adjusting procedure. In: The 37th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Shanghai, China, Oct, 2008
- 20 ISO 532. Acoustics-Method for calculating loudness level. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1975