

响度特征量化的改进算法

柳革命¹, 吴姚振²

(1. 空军工程大学理学院, 陕西 西安 710051; 2. 西北工业大学声学工程研究所, 陕西 西安 710077)

摘要 为提取噪声信号的响度特征, 研究 Zwicker 响度计算模型中安静状况下听阈对应的激励、被计算声音对应的激励和参考声强对应的激励 3 个参数参与运算的方式, 引入等响曲线上 24 个临界频带中心频率对应的听阈声强级, 提出了通过求取噪声信号的能量, 计算噪声信号各临界频带的特性响度值的响度计算改进算法。利用这一算法可方便地计算噪声信号不同临界频带的响度值, 这些特性响度值可组成一个 24 维响度特征矢量, 以应用于信号分析、模式识别等。通过水声目标的模式识别实验, 验证了这一信号响度特征量化改进算法的有效性和实用性。

关键词 响度函数; Zwicker 模型; 特征提取

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.04.020

中图分类号 TN911.7 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)04-0091-04

在声学目标识别中, 特征提取主要是利用信号处理和变换技术提取目标噪声信号中的有效特征, 是自动模式识别的关键环节^[1-2]。由于目标噪声信号的复杂性以及环境因素的影响, 利用传统的特征提取方法提取的目标特征对目标进行自动识别的效果往往不够理想。但是人耳听觉系统依靠自身的频率、强度、时间延迟等分辨感觉能力, 其识别效果优于传统的自动识别技术^[2]。因此, 近年来, 研究听觉特征成为研究目标噪声信号特征的一个很好的方向。

在人耳的声域范围内, 声音听觉心理的主观感受主要有响度、音调、音色等特征和掩蔽效应、高频定位等特性。其中响度、音调、音色可以在主观上用来描述具有振幅、频率和相位 3 个物理量的任何复杂的声音。要提取这类听觉特征, 就必须研究他们的量化模型。本文主要研究听觉响度的计算方法。

对于响度的计算, Fletcher 和 Munson^[3]、Stevens^[4]、Zwicker^[5] 分别提出了各自的计算模型, 其中 Zwicker 提出了一种基于激励模型的响度算法^[5], 该模型反映人耳耳蜗工作机制, 使用和理解这一算法的同时也是对入耳听觉原理的深入认识。1996 年, Moore 对 Zwicker 模型进行改进, 得到新的响度计算模型^[6-7], 并应用于等响曲线和听阈的预测^[8]。随后, 听阈标准数据的修订和对 Moore 计算模型中某些参数的质疑, 有学者对其进行改进^[9]。这些计算模型普遍基于图、表、解析式等方式, 计算复杂, 适于纯理论数值计算, 不能直接给出目标噪声信号不同频率的响度, 本文从提取目标噪声信号响度特征的角度出发, 对 Zwicker 响度计算模型进行改进, 计算出描述目标噪声信号的响度特征矢量, 用于对声学目标噪声信号进行分析、模式识别等。

1 Zwicker 响度计算模型

1.1 响度及等响曲线

响度表示的是声音能量的强弱程度, 是主观上判断声音大小强弱的一种标度, 定义 1 000 Hz、40 dB 的纯音的响度为 1 sone。此单位可以直接加减。响度主要取决于声强的大小, 同时与声音的频率、持续时间、衰变情况等有关。响度是用客观量表示人耳对某种声音信号的主观感受, 是声音信号的主要特征之一, 表现了发声体振动的幅度方面的特性。

* 收稿日期: 2010-09-14

作者简介: 柳革命(1968-), 男, 山西夏县人, 讲师, 博士, 主要从事信号处理及模式识别研究。

E-mail: liugm97@nwpu.edu.cn

响度的相对量为响度级,它表示的是某响度与基准响度比值的对数值,单位为 phon。定义 1 000 Hz、40 dB 的纯音的声压级为其响度级即 40 phon。许多的测试表明^[5]: 1 000 Hz 的平面声波,声压级每增加 10 dB,其响度值变为原来的 2 倍,见图 1。

根据此结果和响度的定义,可以得到响度 N 和响度级 L 之间满足如下的转换关系:

$$N = 0.063 \times 10^{0.03L} \quad (1)$$

因为声压级(Sound Pressure Level, SPL)表示为:

$$\text{SPL} = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

式中: I 为 1 000 Hz 声音的声强, I_0 为参考声强,可以推导出 1 000 Hz 声音信号的响度函数:

$$N = \frac{1}{16} \left(\frac{I}{I_0} \right)^{\log 2} \approx \frac{1}{16} \left(\frac{I}{I_0} \right)^{0.3} \quad (3)$$

不同频率的纯音跟 1 000 Hz 的这个声级纯音等响时的声级是不同的,这些不同声级作为频率函数所形成的曲线,称为等响度曲线^[5]。利用等响曲线,结合式(3),可得出不同频率的响度函数。

1.2 Zwicker 响度计算模型

Zwicker 计算模型在计算响度时要考虑声音的掩蔽效应,分析频域掩蔽效应的一个重要物理量是临界频带,其单位为 bark,1 bark 等于一个临界频带宽度。通常把 20 Hz 到 16 kHz 的频率范围划分为 24 个临界频带,频率小于 500 Hz 时,临界频带 1 Bark 带宽约等于 100 Hz;频率大于 500 Hz 时,1 bark 带宽为该临界频带中心频率的 20%。其准确的转换公式为:

$$z = 13 \arctan(0.00076f) + 3.5 \arctan\left(\frac{f}{7500}\right)^2 \quad (4)$$

特性响度是基于指数定律得到的,反映声音能量的变化。24 段临界频带内的特性响度模拟了人耳听觉的非线性分辨特性,Zwicker 根据这些特性推导出特性响度值(sones/bark)的计算公式如下:

$$N'(z) = 0.08 \left(\frac{E_{TQ}}{E_0} \right)^{0.23} \left[\left(0.5 + 0.5 \frac{E}{E_{TQ}} \right)^{0.23} - 1 \right] \quad (5)$$

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 $I_0 = 10^{-12} \left(\frac{w}{m} \right)$ 对应的激励。

总响度是 24 段临界频带内的特性响度的总和,忽略了声音能量的变化趋势,仅是一段时间声音主观感受的能量幅值,在 0-24 bark 上对 $N'(z)$ 积分得总响度,特性响度曲线围成的面积即响度,计算公式如下:

$$N = \int_0^{24} N'(z) dz \quad (6)$$

2 听觉特征响度的计算模型的改进算法

式(5)计算目标噪声信号的特征响度,有 3 个重要参数, 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 $I_0 = 10^{-12} \left(\frac{w}{m} \right)$ 对应的激励。这 3 个参数按照 $\frac{E_{TQ}}{E_0}$ 、 $\frac{E}{E_{TQ}}$ 2 个比值参与运算。激励在声振动中是一个能量的概念,为计算方便,我们设一个常数 A ,令:

$$A = \frac{E_{TQ}}{E_0} \quad (7)$$

对不同的噪声信号人的内耳基底膜是不变的,因此能量与声强成线性关系,有:

$$A = \frac{E_{TQ}}{E_0} = \frac{I_{TQ}}{I_0} \quad (8)$$

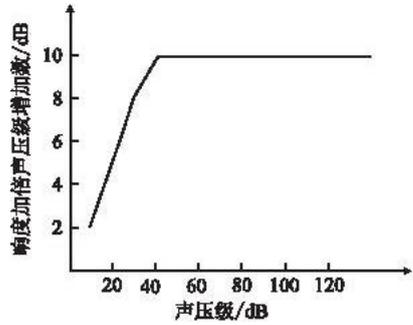


图 1 1 kHz 平面声波响度加倍声压级变化规律

Fig. 1 Level increment necessary to produce a doubling of the loudness of a 1 kHz tone

式中 I_{TQ} 为安静状况下听阈对应声音信号的声强。在等响曲线中,可以通过插值等方法估算出不同临界频带的 I_{TQ} 所对应的声强级, 设为 Y , 则:

$$A = \frac{E_{TQ}}{E_0} = \frac{I_{TQ}}{I_0} = 10^{\frac{Y}{10}} \quad (9)$$

进一步可得:

$$E_{TQ} = 10^{\frac{Y}{10}} E_0 \quad (10)$$

将式(9)、(10)代入式(5)得到改进后的计算目标噪声信号的特征响度的公式:

$$N'(z) = 0.08 \left(10^{\frac{Y}{10}} \right)^{0.23} \left[\left(0.5 + 0.5 \frac{E}{E_0 10^{\frac{Y}{10}}} \right)^{0.23} - 1 \right] \quad (11)$$

考虑 40 dB 的 1 000 Hz 纯音信号的响度定义为 1 sone, 等响曲线上听阈对应的声压级为 5 dB, 计算中心频率为 1 000 Hz 的临界频带内信号的能量, 代入上式, 即可求出常数: $E_0 = 1.8703 \times 10^{-5}$ 。

同时, 根据等响曲线, 可以得到 24 个临界频带中心频率对应的听阈声强级 Y (近似值)。最后通过对噪声信号求 FFT, 可以得到每个临界频带中信号的能量, 即各临界频带的 E , 这样就可计算出各临界频带的特性响度值。这些特性响度值就可组成一个 24 维响度特征矢量。

3 应用实验

水声目标识别是利用水中目标的噪声信号对目标进行分类识别。为了验证上述响度计算的改进算法, 将舰艇声纳员训练的水声目标噪声数据库部分数据进行分类处理, 共包含 I、II、III 类模式, 按照上述算法提取噪声信号的响度特征, 对样本进行分类实验。

考虑人耳对频率为 5 000 Hz 以上声音不敏感以及频率为 100 Hz 以下声音信号听阈对应的声压级远高于其它频率^[10], 因此只计算第 2 - 19 个临界频带的特性响度值, 其为 18 维响度特征矢量。

分类器采用 BP 神经网络分类器, 结构为 $18 \times 5 \times 3$, 其中输入层节点数等于输入样本特征维数 18, 隐含层节点数为 5, 输出层节点数为类型数 3, 期望输出矢量与该类型对应的输出节点的输出值为 1, 而其它输出节点的输出值为 0, 即 3 类的期望输出矢量分别为 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$, 如果输出矢量中 1 的数目大于 1 个或全为 0, 则认为对应的输入矢量不能识别。

对样本数据分别进行响度特征提取, 形成了代表 360 个样本的 360 组响度特征矢量, 用 60 组 (每个类别 20 组) 特征矢量数据训练设计的分类器, 训练的目标误差设 0.001, 特征矢量训练到 180 次时, 训练完成, 正确的分类概率为 100%, 训练过程见图 2。从此图可以看出, 响度特征矢量的收敛性非常好。

利用剩余的 300 组特征矢量进行测试, 分类结果为 I、II、III 类和不能识别 (指分类器输出为 $[000]$ 、或 $[110]$ 、或 $[011]$ 、或 $[111]$, 根据判断准则, 不能判断其为 3 类中任何一类) 4 种, 其实验结果见表 1。

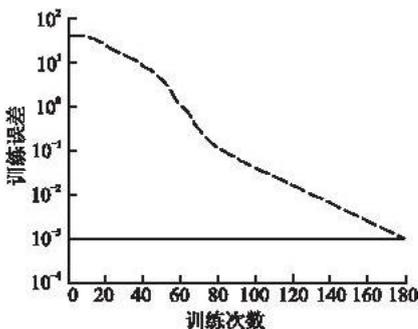


图 2 响度特征分类器的训练过程

Fig. 2 The training of the loudness classifier

表 1 响度特征矢量实验数据分类结果

Fig. 1 The result of classification experiment with loudness features

目标类别	测试样本数	响度特征识别结果				识别率 (%)	总识别率 (%)
		I	II	III	不能判别		
I	100	86	1	3	10	86.0	
II	100	4	91	5	0	91.0	86.3
III	100	3	4	82	9	82.0	

从这一实验结果看出, 应用改进的响度特征计算模型提取目标的响度特征矢量对水声目标进行分类, 效果良好, 表明这一计算模型具有很好的有效性和实用性。

4 结束语

在 Zwicker 响度计算模型的基础上,引入等响曲线上 24 个临界频带中心频率对应的听阈声强级,提出了通过求取噪声信号的能量,计算噪声信号各临界频带的特性响度值的响度计算改进算法。利用这一改进算法计算连续频谱的噪声信号的响度时,避免了计算信号激励等复杂的运算过程,可以方便地得出信号沿频率分布的响度特征矢量,据此特征矢量可以分析噪声信号的节奏变化、声学效果以及对目标进行分类识别等,也为后续研究听觉特征提供了有效的计算工具。

参考文献:

- [1] 丁玉薇. 被动声纳目标识别技术的现状与发展[J]. 声学技术, 2004, 23(4):253-257.
DING Yuwei. Review on passive sonar target recognition [J]. Technical acoustics, 2004, 23(4):253-257. (in Chinese)
- [2] Collier C L. A comparison of novices and experts in the identification of sonar signals[J]. Speech communication, 2004, 43: 297-310.
- [3] Fletcher H, Munson W A. Loudness, its definition, measurement and calculation [J]. Acoust soc am, 1933, 5(2): 82-108.
- [4] Stevens S S. Calculation of the loudness of complex noise [J]. Acoust soc am, 1951, 28(5): 807-832.
- [5] Zwicker E, Fastl H. Psychoacoustics facts and models[M]. Berlin:Spring-verlag, 1999:204-237.
- [6] Moore B C J, Glasberg B R. A Revision of zwicker's loudness model [J]. Acoustic, 1996, 82(2): 335-345.
- [7] Moore B C J, Glasberg B R, Thomas Baer. A model for the prediction of thresholds, loudness, and partial loudness [J]. Acoust soc am, 1997, 45(4): 224-239.
- [8] Glasberg B R, Moore B C J. Prediction of absolute thresholds and equal-loudness contours using a modified loudness model [J]. Acoust soc am, 2006, 120(2): 585-588.
- [9] 马元峰,陈克安. Moore 响度计算模型的改进[J]. 应用声学, 2009, 28(1):59-65.
MA Yuanfeng, CHEN Kean. A revision of Moore's loudness model [J]. Applied acoustics, 2009, 28(1):59-65. (in Chinese)
- [10] 卢官明,宗昉. 数字音频技术原理及应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
LU Guanming, ZONG Fang. Principles and applications of digital audio[M]. Beijing:China machine press, 2005. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

Improved Algorithm of Quantificational Loudness Feature

LIU Ge-ming¹, WU Yao-zhen²

(1. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Three parameters of Zwicker's loudness model, the excitation at threshold in quiet, the excitation that corresponds to the test signal and the reference intensity are researched in order to extract the loudness feature of signals. The sound intensity level at threshold in quiet state is introduced, corresponding to the centre frequency of the 24 critical-bands in equal-loudness contours. Then, an improved algorithm based on Zwicker's loudness model is put forward, with which the specific loudness values can be calculated quantitatively by using the energy of signals. Then a 24-D loudness characteristic vector is composed of the specific loudness values of the critical-bands, which can be used for signal analysis, mode classification and so on. The mode classification experiment of underwater targets is performed. The result shows that the improved algorithm based on Zwicker's loudness model is effective and practicable.

Key words: loudness function; Zwicker's model; feature extraction