

水下噪声听觉属性的主观评价与分析^{*}

王 娜[†] 陈克安 黄 凰

(西北工业大学航海学院环境工程系, 西安 710072)

(2008 年 12 月 24 日收到, 2009 年 1 月 14 日收到修改稿)

为探求人耳感知水下目标类型的声学因素, 研究了水下噪声听觉属性空间的维度数及其各维度的物理解释. 首先通过词汇聚类分析和问卷调查确定评价水下噪声听觉属性的汉语描述词, 然后完成基于成对比较法和语义细分法的主观评价实验, 获得听觉属性的不相似性矩阵及各样本在不同听觉属性下的主观评价分值. 最后, 利用多维尺度分析确定水下噪声听觉属性空间由五个维度组成, 再利用主成分分析得到独立的五个主成分, 进而利用相关系数和压力值确定五个主成分分别表示听觉属性空间的五个维度. 根据各个主成分对应的汉语描述词所反映的听觉属性对其进行物理解释. 结果表明, 对于等响度、等时长的水下噪声, 其听觉属性空间是五维空间, 各维度分别表示声音的沉杂性、起伏性、快变性、尖锐性和规律性.

关键词: 听觉属性, 多维尺度分析, 主成分分析

PACC: 8734, 4330

1. 引 言

利用被动声纳接收噪声对水下目标进行准确识别, 是现代海战夺取战场主动权的关键环节. 虽然机器自动识别方法已有了很大的发展, 但实战中对水下目标的最终判断在很大程度上还是要依赖声纳员耳听判断的结果. 人对声音的主观感觉可以用响度、音调、音色和持续时间来表述, 其中响度、音调和持续时间是一维感知属性, 主要取决于声音的幅度、频率和时长, 研究较为成熟, 已有计算模型可以定量描述^[1,2], 而音色是多维感知属性, 是“具有相同响度和音调的两种声音在听觉属性上显示出来的差异”^[3]. 因此, 音色的定量描述要复杂得多, 研究也相对滞后, 至今没有适合不同声音类型的公认的计算模型或者是一个标准尺度去衡量声音的音色. 利用被动声纳获取的水下噪声信号中, 响度的大小受目标远近距离、航行工况等条件影响, 而音调和音色则反映目标的本质差别, 是听觉判断目标差异的主要依据^[4,5]. 因此, 本文在水下噪声等响度、等时长条件下, 研究由音调和音色听觉属性影响的听觉感知空间的维度数及其物理解释, 有助于了解人耳听觉系统辨别水下目标机理, 建立准确的听觉属性空间数

学模型, 这在军事和民用领域都有重要的应用价值.

最初, 听觉属性的研究主要针对音乐声和语音声, 用于厅堂音质评价、合成声评价、虚拟声合成和乐器自动识别等领域^[6-8]. 随着社会的进步, 人们对噪声控制和声品质评价的要求不断提高, 对环境声听觉属性的研究也逐步受到重视. 虽然环境声中以噪声居多, 不具备乐音的谐音特性和语音的元音特性, 但人耳对于环境声同样存在一个潜在的感知空间, 能够依据声学特性区分环境声的类别^[9,10], 所以环境声听觉属性的研究对噪声控制、声品质评价、声景观设计和模仿听觉系统的目标识别等方面都很重要.

研究者主要利用主观评价实验和多元统计方法对不同声音的听觉属性构成的感知空间进行深入挖掘, 将听觉属性与描述词或物理参数建立联系^[11-16]. Moravec 等^[12]对乐音进行主观评价实验, 利用多元统计的分析方法确定听觉属性空间的维度数和描述各个维度含义的描述词. Lavandier 等^[13]则对扩音器进行了主观评价, 找到了辨别扩音器差异的听觉属性及其相应的物理参数. Barbot 等^[14]用同样的方法确定了决定飞机声音差异的 4 种听觉属性, 并用物理参数对其进行解释. 此外, 针对车辆噪声感知空间的听觉属性研究已取得了一定进展, 用“粗糙”、“刺耳”和“起伏”汉语词汇可以描述构成车辆噪

^{*} 国家自然科学基金(批准号:30574104)和西北工业大学基础研究基金(批准号:W018104)资助的课题.

[†] E-mail: nawang@mail.nwpu.edu.cn

声听觉属性空间的 3 个维度^[15]。

阳雄等^[16]提出水下噪声的节拍规律是舰船噪声的识别特征,而 Geoffrey^[17]指出“起伏性”和“像动物声”可以用来区分水下噪声源,但国内外对判断水下噪声差异的听觉属性始终没有系统性的结论,缺乏一致性和完整性,而且在基于听觉特性的识别研究中,也缺乏听觉属性空间的构成作为特征选择和特征组合的依据^[18,19]。这里听觉属性空间是由声音不同声学特性导致的主观感受所构成的多维“概念空间”,主观感受即是空间中相互垂直的各个维度。因此,本文利用主观评价实验和统计分析方法,针对等响度、等时长的水下噪声,研究人耳辨别目标差异的听觉属性空间的构成,力求分析得到的感知空间具有准确性和完整性。首先通过多维尺度分析成对比较实验数据,确定听觉属性空间的维度数,然后采用问卷调查方式和聚类分析获得无人因素干扰的、具有代表性的水下噪声听觉属性描述词,进行语义细分法实验后,利用主成分分析方法得到描述词反映的听觉属性空间的构成,进而对水下噪声听觉属性空间的各个维度进行物理解释,为建立听觉属性的数学模型奠定基础。本文的结果对声纳员的训练、可听化技术、声品质评价和目标识别等具有借鉴作用。

2. 实验准备

研究水下噪声听觉属性空间的构成,有必要得到人耳对不同水下噪声的分类信息,通过统计分析方法确定主观感知空间的构成。首先需要通过人耳辨别声目标差异程度的距离信息确定空间的维度数,再通过人耳在某一属性下对声目标的排序信息对各维度进行具体物理解释。因此,本文进行两部分主观评价实验,一是成对比较法实验,目的是获得水下噪声听觉属性综合主观感受不相似程度的评价结果;二是语义细分法实验,是对水下噪声单项听觉属性的主观感受程度进行评价。两次实验的声样本、环境、仪器和评价人员均保持一致。

声样本是 30 个双声道的稳态水下噪声,包括不同工况的潜艇噪声、军舰噪声、民用船噪声、鱼雷噪

声和水流噪声(样本说明见附录 A 表 A1),采样频率为 44100 Hz。经反复实验发现,声音时长大于 5 s 的情况即可判别声音类别,因此,实验中的声样本时长均为 5 s,且为保证声音在时段内保持平稳状态,声样本时域幅值的峰度均小于 5,标准差小于 0.25。为研究由音调和音色听觉属性构成的感知空间,利用 Zwicker 响度模型进行等响度处理^[1],调节样本响度值为 15 sone 的水平。

利用计算机对声样本编组后由音频播放软件通过声卡输出至耳机放大器(Brüel&Kjær ZE0769),再由监听耳机(SENNEISER HD250)重放,评价者在有效隔绝外界噪声干扰的情况下,聆听声音后依据主观感受填写问卷。

Tuliis 和 Wood^[20]提出 20—30 个评价者与 168 个评价者的评价结果的平均相关系数为 0.95。因此,本文评价主体选择无听力障碍的在校大学生和研究生 27 人,其中一部分具有文学背景和音乐背景,平均年龄 25 岁,男女比例为 11:16。实验前,为降低评价者所给数据的离散性,评价主体先听一遍所有声样本,对样本总体具有一定的感知,便于把握实验中评价样本的评分尺度。

3. 水下噪声听觉属性空间维度数的确定

利用成对比较法可以获得被评价对象的相对心理尺度,因此本文通过声音成对播放,根据主观感受的差异评价两个声音的不相似程度,得到主观评判的不相似性矩阵,利用多维尺度分析(multidimensional scaling,简称 MDS)用较少的变量对声音之间的差异做出解释,进而确定水下噪声听觉属性感知空间的维度数。

评价过程需要规定评价尺度,便于评价者把握评价分值的高低范围。通常使用的评价尺度分为 5 级和 7 级,一般来讲 7 级评价尺度优越于 5 级评价尺度^[21],因此实验中采用 7 级不相似评价尺度,如表 1 所示。播放两个声样本的间隔时间为 2 s,评价时间为 5 s,为避免评价者疲劳对实验结果可靠性的影响,每次实验的时间控制在 50 min 以内,每评价 10 min 休息一次。

表 1 7 级不相似评价尺度的语言描述及赋值

评价分值	1	2	3	4	5	6	7
语言描述	完全相同	有点不相似	有些不相似	很不相似	非常不相似	极度不相似	根本不同

实验获得 27 份 30×30 的不相似性矩阵数据, 在 MDS 前有必要对实验数据的可靠性进行检验. 步骤如下:

1) 检验数据是否符合评价尺度, 原始数据中的分值 X 必须满足 $1 \leq X \leq 7$, 其中有 1 份数据不合格.

2) 重复信度检验是计算同一个人评价不同重放顺序声样本对($i-j/j-i$ 型)两次的分值序列的相关性. 相关系数小于 0.3 即表示评价者重复评价数据波动较大^[22], 本文认为大于 0.4 的数据为可信数据, 具有一致性.

3) 可靠性检验是统计相同声样本对比较($i-i$ 型)的误判率和不同重放顺序声样本对($i-j/j-i$ 型)的误判率, $i-i$ 型评价分值必须为 1, $i-j/j-i$ 型两次评价分值差的绝对值必须在 1 以内, 由于评价结果中有 10% 人员的数据应予以剔除^[23], 本文认为误判率小于 30% 的即为可靠数据, 评价者的评价数据具有可靠性.

根据步骤 2) 和步骤 3) 的方法, 得到评价主体平均误判率为 18% 和平均相关系数为 0.5, 具体见图 1 和图 2, 其中 22 人评价结果具有一致性和可靠性, 评价者之间评价结果的平均相关系数为 0.7.

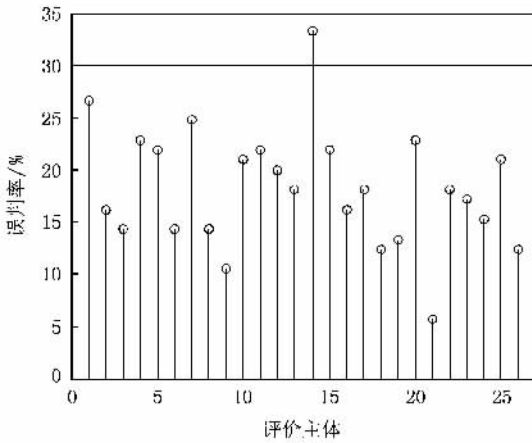


图 1 各评价主体的误判率图

对有效数据进行平均, 得到 30×30 的声样本不相似性矩阵. MDS 将不相似性矩阵转换成目标距离, 再通过降维处理, 用低维空间中点与点的距离来表示声音的差异程度, 最大程度地拟合目标距离.

不考虑评价者个体差异, 采用实际距离的非计量多维尺度分析(non-metric MDS, 简称 NMDS), 利用标准化压力函数衡量某个拟合的模型距离偏离完善匹配模型的程度, 标准化压力函数(normalized

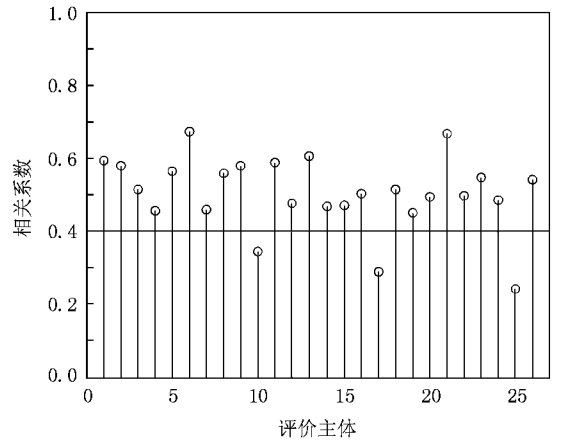


图 2 各评价主体的相关系数图

stress, 简称 NS) 计算公式如下:

$$f_{NS} = \frac{\sum_{i < j} (d_{ij} - \hat{d}_{ij})^2}{\sum_{i < j} d_{ij}^2}, \quad (1)$$

式中 d_{ij} 表示原始空间点之间的距离; \hat{d}_{ij} 表示拟合模型的低维空间中空间点之间的距离. MDS 的基本思想是通过迭代使标准化压力函数尽可能的小, 表明计算结果与观察数据拟合得越好, 模型越合适.

在 SPSS 软件的 MDS 模块 Proxscal 分析中, 分析维度数范围为 1—9 维, 压力值随维度变化情况见图 3 显示的的压力值碎石图. 可以看出, 随着拟合模型维度数升高压力值逐渐收敛, 4 维模型已经可以解释水下噪声听觉属性构成的感知空间, 但为建立精准的听觉属性模型, 要求在维度尽可能低的情况下更好地解释空间构成, 而 5 到 6 维模型时压力值曲线变化已经不明显, 即表明 5 维的拟合模型能够较好地解释原始空间点之间的关系.

为确定出适当的拟合模型, 利用 MDS 中的 Alscal 设定维数分析不相似性矩阵, 得到 3—6 维不同模型下压力(stress) 值和 RSQ 数值的具体变化情

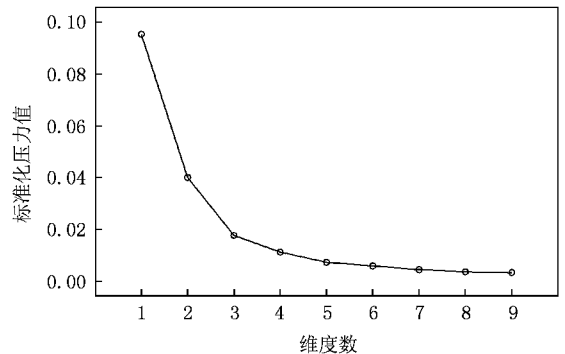


图 3 标准化压力值随维度数变化的碎石图

况,见表 2.其中 RSQ 表示拟合模型能够解释原始模型的比例,数值越大表示模型拟合得越好.

表 2 不同模型下压力值和 RSQ 数值

维度数	3	4	5	6
压力值	0.14719	0.10936	0.08284	0.06951
RSQ	0.89391	0.92193	0.94247	0.95102

比较表 2 中不同维度下压力值和 RSQ 值的变化,发现在 4—6 维时,模型的拟合情况比较好,考虑后期建立数学模型准确性的要求,5 和 6 维模型的压力值小于 0.1 较为合适,同时受模型维度数不宜高的限制,参考图 3,认为 5 维模型最为合适,即确定判断等响度、等时长水下噪声差异的听觉属性感知空间是 5 维的.

考虑样本对确定听觉属性空间维度数的影响,为保证水下噪声听觉属性是 5 维空间的可靠性和准确性,本文对水下噪声类型的不同组合分别进行相同的 MDS 分析,比较分析结果的差异.分别去掉声纳样本、鱼雷样本和潜艇样本进行 MDS 分析,得到不同组合下压力值随维度数的变化,如图 4 所示.

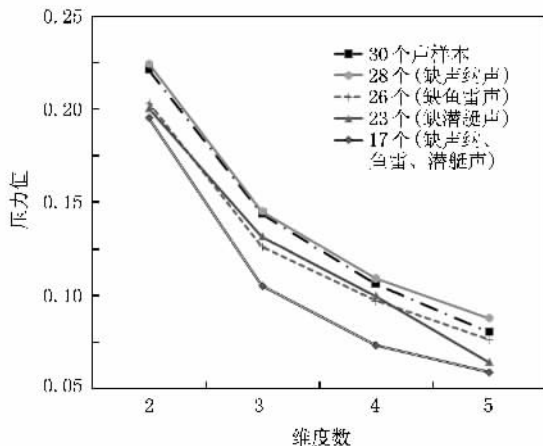


图 4 样本不同组合下的压力值随维度数变化的折线图

分析图 4 中的折线变化,发现样本不同组合下的压力值随维度数的变化趋势基本一致,随着维度数的升高压力值逐渐收敛减小,即少数几个听觉属性共同决定了所有水下噪声的差异;样本个数和类型增多导致同一维度模型的压力值增大,但随着个数和类型增多曲线之间的距离减小,即样本类型和种类越多,感知空间的维度数变化越小.具体来看,30 个样本与 17 个样本的同等维数的压力值的差小于 0.03,也就是说虽然样本对分析感知空间的维度

数具有直接影响,但即使样本个数和类型增多,5 维感知空间模型的压力值不会发生较大的变化,本文根据 30 个样本的不相似性确定的 5 维感知空间具有一定的可靠性和准确性,可以较好地解释水下噪声的听觉属性差异.

4. 水下噪声听觉属性空间的维度解释

为进一步理解听觉属性空间组成,本节通过语义细分法主观评价实验,探求感知水下噪声的主要听觉属性.

4.1. 听觉属性评价词的确定

语义细分实验前,先要通过问卷调查和聚类分析手段确定有代表性的、全面的、适当的水下噪声听觉属性评价术语.依据评价术语进行实验,与成对比较实验结合,分析听觉属性空间的构成.

本文在已有声音主观评价词的基础上,通过问卷调查建立了 206 个噪声描述词汇体系,依据描述词的差异确定 97 个词适合描述噪声的听觉属性.然后对 97 个词的汉语含义进行成对比较实验调查,利用聚类分析手段依据反映听觉主观感受的差异将词汇定量分成相互独立的 10 类,避免了研究者人为分类词汇的不确定性,为确定不同类型噪声听觉属性全面的、独立的评价术语提供了有力保证.最后通过耳机重放水下噪声,进行 60 份听音选词的问卷调查,从分类词汇中选择适合描述水下噪声听觉属性的词,以选择概率最高原则确定描述水下噪声全面的、有代表性的评价术语.本文针对等响度、等时长的稳态声样本进行研究,因此忽略描述响度大小和时间长短的评价词,确定 15 个评价词进行语义细分实验,评价词分别是:“震颤的”、“不平缓的”、“刺耳的”、“嘈杂的”、“沉闷的”、“急促的”、“有节奏的”、“紧凑的”、“变化的”、“粗糙的”、“不柔和的”、“不单调的”、“低沉的”、“短促的”和“重复的”.

4.2. 听觉属性空间的构成

利用以上提到的 15 个评价词进行语义细分实验.随机重复播放 2 遍声音样本,评价时间为 5 s.根据评价词的主观感受程度,以 7 级评价尺度评价声音,以“震颤的”为例,分值 1 表示“极度震颤”,2 表示“非常震颤”,3 表示“有些震颤”,4 表示“震颤和不震颤的主观感受相同”,5 表示“有些不震颤”,6 表示

“非常不震颤”,7表示“极度不震颤”。再利用主成分分析(principal component analysis,简称PCA)15个评价词之间的关联,得到水下噪声听觉属性空间的主成分对应的汉语描述词,分析各成分中描述词的具体含义和相应的声音特性的物理解释,确定水下噪声的听觉属性空间的组成。

对评价数据分别进行信度检验(与成对比较实验数据检验步骤相同)利用相关系数和误判率去除不可靠数据后,每个评价词的可信数据有20份以上。计算评价词下评价者对样本评分值的标准偏差的平均值,15个评价词的离散程度在0.11—0.15之间,这反映评价者对每个评价词的理解程度基本一致。

由于15个评价词是从已分类的词汇中选择出的具有代表性的描述词,为保证PCA方法适用于15个词的主观评价数据,先进行KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)和Bartlett检验,检验词汇在听觉属性感知上是否存在共享信息。检验结果显示,检验变量间偏相关性的KMO统计量值为0.644,而Bartlett检验的概率 P 值为0,可见球形假设被拒绝,也就是说评价词在听觉属性感知上并不是完全相互独立的,存在一

定相关性,适用于PCA方法。

PCA方法是将多指标化为少数几个综合指标的一种统计分析方法。观测变量分类后,将相关性较高即联系紧密的变量分在同一类中,而不同类的变量之间的相关性则较低,每一类的变量代表一个成分^[24]。

本文首先对 30×15 的主观评价得分矩阵 $X = [X_1, X_2, \dots, X_{30}]$ 计算相关矩阵 R ,其中 X_i 是第 i 个样本在第15个评价词下的评价得分向量 $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i15})^T$,然后计算相关矩阵的特征值 λ 和单位正交特征向量 p ,获得相应的15个主成分 $F = pX$,进而得到成分的贡献率和累积贡献率。按照特征值大于1和累积贡献率大于85%的原则,确定主成分个数。

为了充分解释15个评价词与主成分之间的关系,分析中采用四次方最大正交旋转法旋转坐标轴,使因子负荷在新的坐标系中按列向0或1两极分化。PCA获得旋转前和旋转后的各主成分可解释的总方差列表如表3所示,表中列出旋转前后特征值大于1的前5个成分的特征值、贡献率和累积贡献率。

表3 前5个成分的可解释的总方差列表

成分	初始值			旋转后		
	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	5.780	38.535	38.535	3.487	23.243	23.243
2	3.420	22.797	61.332	3.185	21.234	44.477
3	2.572	17.146	78.478	3.162	21.082	65.559
4	1.313	8.754	87.232	2.254	15.027	80.586
5	1.110	7.399	94.631	2.107	14.045	94.631

表3显示前5个成分的累积贡献率达到94.631%,即前5个成分能够解释总变异的94.631%,能够很好地解释水下噪声听觉属性的感知空间。

为解释MDS确定的5维空间各维度的物理含义,有必要将5维空间与主成分之间建立联系。本文两部分主观评价实验中,虽然样本、评价主体等一致,但统计分析方法完全不同,其中MDS方法确定的感知空间最为可靠和全面,而PCA方法确定的空间的准确性依赖于评价词的可分性和全面性,可以说MDS分析与PCA分析的感知空间是等价或包含的关系。

MDS分析得到30个样本在5维空间中的坐标矩阵 M 是正交矩阵,而在PCA分析中,根据单位正

交向量 p 可以得到30个样本5个主成分矩阵 F ,其协方差矩阵是 5×5 的单位矩阵,也就是说 F 是各成分相互独立的正交矩阵。根据欧式距离公式分别计算 M 和 F 在各自空间下样本的距离矩阵,两个不同空间下的距离矩阵相关性为0.85,然后用(1)式衡量 F 矩阵构成的空间模型对 M 矩阵空间模型的拟合程度,此时两空间的压力值为0.03,这说明两个不同空间下的距离矩阵可以认为是一致的,即PCA提取的5个成分可以充分解释MDS确定的5维感知空间,同时也说明语义细分实验的评价词具备全面性和代表性,能够完整反映水下噪声的听觉属性。所以,认为本文MDS和PCA分析的两个听觉属性空间是相互对应的,可以用5个主成分分别解释5个维度的物理含义。

解释 5 个主成分必须定量研究评价词与主成分的密切程度,需要计算第 i 个评价词的主观评价分值 X_i 与第 j 个成分 F_j 的协方差,获得负荷矩阵 A 。负荷矩阵能够反映各成分的意义,其中行向量说明评价词所反映的听觉属性依赖于各成分的程度,列向量则说明成分与各评价词所反映的听觉属性的联系程度,其中绝对值较大的负荷对应的评价词就可以说明对应成分的意义。表 4 为旋转后 5 个主成分的负荷矩阵,其中加粗的数据是为该主成分贡献较大的评价词的相关系数。

表 4 旋转后 5 个主成分的负荷矩阵

评价词	成分				
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
震颤的	0.490	0.655	0.353	0.149	0.309
不平缓的	-0.178	0.771	0.295	0.098	0.465
刺耳的	-0.214	-0.049	0.025	0.956	0.042
嘈杂的	0.634	-0.441	0.268	0.411	-0.274
沉闷的	0.938	-0.037	-0.277	-0.029	-0.075
急促的	-0.068	0.156	0.951	0.148	0.148
有节奏的	-0.336	0.283	0.360	0.023	0.787
紧凑的	-0.055	0.159	0.949	-0.040	0.143
变化的	-0.140	0.926	0.216	-0.061	-0.189
粗糙的	0.790	-0.349	0.198	0.187	-0.233
不柔和的	0.339	-0.121	0.176	0.904	0.039
不单调的	-0.191	0.791	0.060	-0.466	-0.179
低沉的	0.925	0.047	-0.282	-0.150	-0.075
短促的	-0.282	0.418	0.732	0.123	0.401
重复的	-0.192	-0.190	0.361	0.058	0.872

表 4 明确了 15 个评价词与 5 个主成分之间具体的线性关系,忽略相关系数较小的描述词的影响,根据单位正交向量组成的得分系数矩阵,可以获得各主成分与主要描述词之间的关系表达式。此外,为更好地分析主成分的物理含义,有必要分析 15 个评价词之间的主观评价分值的相关系数,具体了解评价词之间的定量关系(见附录 A 表 A2)。

“沉闷的”、“低沉的”、“粗糙的”、“嘈杂的”与成分 1 的相关系数大于 0.6,成分 1 主要反映了这四个词的听觉感受,其中“沉闷的”和“低沉的”的相关系数为 0.979,这说明两个词反映的听觉感受是一致的,都反映了水下噪声的能量主要集中在低频范围,符合水下噪声能量集中在低频的特点;“粗糙的”和“嘈杂的”的相关系数为 0.914,可以说二者的听觉感受基本一致,反映水下噪声的幅值差大的频率成分较多,符合噪声的非谐音的特点。附录 A 表 A2 中显示上述两类描述词之间的相关系数的平均值为 0.55,即相关性一般,说明成分 1 中两类听觉感受是

有差别的。因此,综合四个词语反映的两类听觉感受的物理解释,理解成分 1 为声音的沉杂性,反映水下噪声幅值差大的频率成分多少的程度以及低频成分幅值的大小程度,计算该成分的主观感受分值 F_1 的数学表达式为

$$F_1 = 0.31 \times V_{\text{沉闷的}} + 0.32 \times V_{\text{低沉的}} + 0.21 \times V_{\text{粗糙的}} + 0.13 \times V_{\text{嘈杂的}},$$

式中以 $V_{\text{沉闷的}}$ 为例,该变量表示声样本在“沉闷的”属性下的主观评价分值。

“变化的”、“不单调的”、“不平缓的”、“震颤的”与成分 2 的相关系数大于 0.65,附录 A 表 A2 四个词的相关系数中,除了“不单调的”与“变化的”的相关系数为 0.859 外,词语之间并没有较强的相关性,这说明四个词所反映的听觉感受各有差别,但根据四个词语的汉语含义可以理解成分 2 为声音的起伏性,这与文献 [16] 提出的区分水下噪声源的“起伏性”相同,该成分主要反映声音频域能量和时域振幅变化的大小程度, F_2 的表达式为

$$F_2 = 0.35 \times V_{\text{变化的}} + 0.25 \times V_{\text{不单调的}} + 0.26 \times V_{\text{不平缓的}} + 0.25 \times V_{\text{震颤的}}.$$

“急促的”、“紧凑的”、“短促的”与成分 3 的相关系数大于 0.7,三个词之间的相关系数均大于 0.83,认为反映的听觉感受较为相似,主要反映声音在同样时长下变化快的听觉感受,认为成分 3 代表声音的快变性,反映声音振幅变化快慢的程度,其 F_3 表达式为

$$F_3 = 0.39 \times V_{\text{急促的}} + 0.42 \times V_{\text{紧凑的}} + 0.19 \times V_{\text{短促的}}.$$

“刺耳的”、“不柔和的”与成分 4 的相关系数大于 0.9,两个词的相关系数为 0.786,反映的听觉感受虽然存在差别,但可以理解为声音的高频成分占主要地位所产生的主观感受,因此成分 4 认为是声音的尖锐性,反映声音主频率的高低程度, F_4 表达式为

$$F_4 = 0.53 \times V_{\text{刺耳的}} + 0.42 \times V_{\text{不柔和的}}.$$

“重复的”、“有节奏的”与成分 5 的相关系数大于 0.75,两个词的相关系数为 0.848,主要反映声音在时间上的变化特性,这与舰船的节拍规律特性相一致,成分 5 理解为声音的规律性, F_5 表达式为

$$F_5 = 0.51 \times V_{\text{重复的}} + 0.41 \times V_{\text{有节奏的}}.$$

为研究声样本数据量对分析结论的影响,从 30 个声样本中多次随机抽取 25 个样本进行相同的主

成分分析,发现分析结果同上述 5 个主成分一致,其中对各成分贡献大的评价词没有变化,仅是上述表达式中各评价词的系数发生在[0.01, 0.09]范围内的变化,这说明 30 个样本数据量分析得到的表达式已具有一定的可靠性.对剩余的 5 个样本再进行主成分分析,发现分析结果是 4 个主成分,第一个成分是声音沉闷性和规律性,第二个成分是声音的粗糙性和快变性,第三个成分是声音的起伏性,第四个成分是尖锐性.与 30 个样本的分析结果比较,发现随着数据样本量增大,分析的结论更为细致和准确.因此,本文 30 个样本分析得到的结论具有很大程度的可靠性和准确性,可以用于后期建立水下噪声听觉属性数学模型的研究中.

总体来说,上述 5 个主成分就是水下噪声听觉属性空间的 5 个维度,这与其他研究结论有相似之处,其中不仅包含车辆噪声听觉属性的“粗糙”、“刺耳”和“起伏”,同时也包含研究者提出的水下噪声的节拍规律特性、起伏性和能量集中低频的特性,可以说本文的研究结论具备一定的准确性和完整性.也就是说等响度、等时长水下噪声听觉属性的感知空间可以用声音的沉杂性、起伏性、快变性、尖锐性和规律性所组成的 5 维空间来表征,且相互独立的听觉属性与汉语描述词之间具有定量的线性关系,可以用于判断水下噪声在音调和音色上的差异.

5. 结 论

针对等响度、等时长的水下噪声,采用问卷调查

和聚类分析定量地确定无人因素干扰的、全面的、适当的 15 个评价词,完成基于成对比较法和语义细分法的主观评价实验,利用 NMMDS 分析和 PCA 方法确定其听觉属性构成的感知空间为 5 维空间和 5 个独立的主成分;并对样本 5 维空间的距离矩阵和 5 个主成分的距离矩阵进行相关分析和模型匹配分析,发现 PCA 分析得到的主成分与 MDS 分析确定的感知空间是相互对应的,依据 PCA 的负荷矩阵确定各成分对应的评价词,对水下噪声听觉属性空间进行物理解释.实验结果表明,等响度、等时长的水下噪声听觉属性的感知空间是一个 5 维空间,是由声音的沉杂性、起伏性、快变性、尖锐性和规律性组成的,这为后期建立听觉感知空间的数学模型提供了坚实的理论基础.同时,以水下噪声听觉属性作为指导,可以提取和选择有效听觉特征,实现高准确率的目标自动识别,或者对训练样本进行分类排序,可以有针对性的训练声纳员,提高耳听辨识目标的准确性.

为进一步完善本文工作,还需要将本文中评价词所反应的听觉感受与客观指标(物理声学参数和心理声学参数)建立简单的线性关系,通过数学手段简化主成分的表达式,进而建立水下噪声听觉属性的线性数学模型,再通过选取更多类型的水下声音样本进行主观评价实验,修正数学模型的权系数,使之具有通用性,能够准确地、定量地计算水下噪声的听觉属性.

感谢参与问卷调查和参加主观评价实验的西北工业大学航海学院的本科生和研究生.

附录 A

表 A1 实验样本说明

序号	样本说明	时域振幅峰度	时域振幅标准差
1	中国军舰平稳航行的声音	3.0	0.06
2	水下环境声音,包括气泡运动声和海水波动声	3.9	0.08
3	军舰平稳航行的声音	3.2	0.06
4	军舰平稳航行的声音	3.0	0.04
5	军舰平稳航行的声音	2.8	0.05
6	水下厚冰层破裂的声音	3.1	0.11
7	军舰平稳航行的声音	3.7	0.03
8	潜水员跳入水下的声音和水中呼吸器的声音	4.1	0.20
9	军舰平稳航行的声音	3.0	0.03
10	海军护卫舰的机械噪声	2.9	0.04
11	海军护卫舰的机械舱内的声音	2.8	0.03

续表

序号	样本说明	时域振幅峰度	时域振幅标准差
12	军舰沉没的声音	2.9	0.10
13	海军护卫舰低速行驶到高速行驶的声音	2.8	0.04
14	海军护卫舰平稳航行的声音	4.2	0.02
15	潜艇声纳的声音	3.6	0.10
16	潜艇声纳的声音	4.4	0.15
17	满负荷下潜艇攻击的声音	4.4	0.24
18	潜艇潜水航行的声音	4.2	0.16
19	核潜艇控制室周围的声音	3.1	0.11
20	潜艇在巨大水压下排水的声音	3.6	0.11
21	潜艇启动和潜水的声音	3.3	0.12
22	潜艇水中沉没的声音	3.0	0.08
23	潜艇水下航行和出水的声音	3.1	0.03
24	鱼雷在水下经过目标的声音	3.3	0.08
25	鱼雷发射的声音	3.3	0.03
26	鱼雷沉没的声音	3.0	0.19
27	鱼雷水下航行的声音	4.3	0.04
28	湖水波浪的声音	4.7	0.03
29	25 马力民用小型船慢速航行的声音	4.4	0.03
30	小型民用渡船慢速行驶的声音	3.1	0.03

表 A2 语义细分实验评价词的相关系数

	震颤	不平缓	刺耳	嘈杂	沉闷	急促	有节奏	紧凑	变化	粗糙	不柔和	不单调	低沉	短促	重复
震颤	1.000	0.659	0.015	0.032	0.302	0.479	0.347	0.477	0.508	0.142	0.297	0.258	0.332	0.547	0.148
不平缓	0.659	1.000	0.099	-0.434	-0.342	0.484	0.771	0.458	0.706	-0.390	0.007	0.543	-0.283	0.761	0.402
刺耳	0.015	0.099	1.000	0.271	-0.206	0.192	0.119	0.014	-0.074	-0.012	0.786	-0.443	-0.332	0.195	0.158
嘈杂	0.032	-0.434	0.271	1.000	0.529	0.139	-0.389	0.047	-0.373	0.914	0.665	-0.532	0.428	-0.242	-0.118
沉闷	0.302	-0.342	-0.206	0.529	1.000	-0.331	-0.500	-0.308	-0.211	0.664	0.234	-0.201	0.979	-0.507	-0.336
急促	0.479	0.484	0.192	0.139	-0.331	1.000	0.512	0.965	0.313	0.035	0.264	0.083	-0.338	0.856	0.458
有节奏	0.347	0.771	0.119	-0.389	-0.500	0.512	1.000	0.482	0.265	-0.411	-0.037	0.209	-0.478	0.780	0.848
紧凑	0.477	0.458	0.014	0.047	-0.308	0.965	0.482	1.000	0.318	-0.016	0.094	0.142	-0.289	0.829	0.425
变化	0.508	0.706	-0.074	-0.373	-0.211	0.313	0.265	0.318	1.000	-0.339	-0.186	0.859	-0.121	0.498	-0.214
粗糙	0.142	-0.390	-0.012	0.914	0.664	0.035	-0.411	-0.016	-0.339	1.000	0.512	-0.396	0.597	-0.308	-0.187
不柔和	0.297	0.007	0.786	0.665	0.234	0.264	-0.037	0.094	-0.186	0.512	1.000	-0.578	0.116	0.112	0.108
不单调	0.258	0.543	-0.443	-0.532	-0.201	0.083	0.209	0.142	0.859	-0.396	-0.578	1.000	-0.091	0.293	-0.233
低沉	0.332	-0.283	-0.332	0.428	0.979	-0.338	-0.478	-0.289	-0.121	0.597	0.116	-0.091	1.000	-0.491	-0.362
短促	0.547	0.761	0.195	-0.242	-0.507	0.856	0.780	0.829	0.498	-0.308	0.112	0.293	-0.491	1.000	0.594
重复	0.148	0.402	0.158	-0.118	-0.336	0.458	0.848	0.425	-0.214	-0.187	0.108	-0.233	-0.362	0.594	1.000

- [1] Zwicker H E , Fastl H 1999 *Psychoacoustics : Facts and Models* (Berlin Heidelberg : Springer-Verlag Press)
- [2] Moore B C J 1995 *Hearing* (San Diego : Academic Press) p425
- [3] ANSI 1973 *Psychoacoustical Terminology* S3. 20 (New York : American National Standards Institute)
- [4] Houtsma A J M 1997 *J. New Music Res.* **26** 104
- [5] Stepanek J 2004 *Proceedings of Acústica 2004 Guimarães , Portugal , September 14—17 , 2004* pID077
- [6] Chen K A , Wang N , Wang J C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5075 (in Chinese) [陈克安、王 娜、王金昌 2009 物理学报 **58** 5075]
- [7] Caclin A , McAdams S , Smith B K , Winsberg S 2005 *J. Acoust. Soc. Am.* **118** 471
- [8] McAdams S , Winsberg S , Donnadieu S , Soete G D , Krimphoff J 1995 *Psychol. Res.* **58** 177
- [9] Gaver W W 1993 *Ecol. Psychol.* **5** 1
- [10] Collier G L 2004 *Speech Commun.* **43** 297
- [11] Susini P , McAdams S , Winsberg S 1999 *Acustica* **85** 650
- [12] Moravec O , Štěpánek J 2004 *Proceedings of CFA/DAGA '04* Strasbourg , France , March 22—25 , 2004 p881
- [13] Lavandier M , Meunier S , Herzog P 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **123** 4186
- [14] Barbot B , Lavandier C , Chemine'e P 2008 *Appl. Acoust.* **69** 1003
- [15] Chen K A , Ma M , Zhang Y N , Wang N , Yan L 2008 *Acta Acustica* **33** 348 (in Chinese) [陈克安、马 苗、张燕妮、王 娜、闫 靛 2008 声学学报 **33** 348]
- [16] Yang X , Cheng Y S 2004 *Technical Acoustics* **23** 11 (in Chinese) [阳 雄、程玉胜 2004 声学技术 **23** 11]
- [17] Geoffrey L C 2004 *Speech Commun.* **43** 297
- [18] Wang N 2006 (MS Thesis) (Xi ' an : Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [王 娜 2006 (硕士学位论文) (西安 : 西北工业大学)]
- [19] Tucker S , Brown G J 2005 *IEEE J. Ocean Eng.* **30** 588
- [20] Tullis T T , Wood L 2004 *Proceedings of the UPA ' 2004* Minneapolis , Minnesota , June 7—11 , 2004 p1
- [21] Meng Z H 2008 *Experimental Psychology Methods of Timbre Subjective Assessment* (Beijing : National Defense Industry Press) (in Chinese) [孟子厚 2008 音质主观评价的实验心理学方法 (北京 : 国防工业出版社)]
- [22] Xue W 2006 *Data Analysis Using SPSS* (Beijing : China Renmin University Press) p261 (in Chinese) [薛 薇 2006 基于 SPSS 的数据分析 (北京 : 中国人民大学出版社) 第 261 页]
- [23] Mao D X 2003 (Ph. D. Dissertation) (Shanghai : Tongji University) (in Chinese) [毛东兴 2003 (博士学位论文) (上海 : 同济大学)]
- [24] Gao H X 2005 *Applied Multivariate Statistical Analysis* (Beijing : Peking University Press) p265 (in Chinese) [高惠璇 2005 应用多元统计分析 (北京 : 北京大学出版社) 第 265 页]

Subjective evaluation and analysis of auditory attributes for underwater noise *

Wang Na[†] Chen Ke-An Huang Huang

(Department of Environmental Engineering , School of Marine Engineering , Northwestern Polytechnical University , Xi ' an 710072 , China)

(Received 24 December 2008 ; revised manuscript received 14 January 2009)

Abstract

Dimensionality and the corresponding physical characteristics of auditory attribute space for equal-loudness underwater noise are investigated. Firstly , cluster analysis and questionnaire surveys are performed to obtain a number of auditory attribute descriptors in Chinese language , and then based on paired comparison and semantic differential approach , a dissimilarity matrix and a subjective evaluation value of each descriptor are obtained. Finally , by use of multidimensional scaling and principal component analysis , auditory attribute space of underwater noise with equal-loudness and equal-duration is determined and then the five-dimensional space is composed by dark-roughness , fluctuation , fast-variety , sharpness and regularity.

Keywords : auditory attributes , multidimensional scaling analysis , principal component analysis

PACC : 8734 , 4330

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10574104) and the Northwestern Polytechnical University Foundation for Fundamental Research , China (Grant No. W018104).

† E-mail : nawang@mail.nwpu.edu.cn