

基于听觉感知的不同航速稳态舰船噪声合成

王金昌, 陈克安

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 声纳人员培训和人耳辨识舰船声实验中常需要完备的敌我舰船辐射噪声样本, 但实录各国舰船噪声几乎是不可能的。因此, 合成与真实水下声样本听觉感知相同的舰船辐射噪声十分必要。研究了舰船航速对其辐射噪声的影响及人耳听音的临界带通特性, 通过已知的零散舰船噪声样本合成目标舰船在其它未知状态下的辐射噪声。采用临界带通滤波和线谱迭加方法, 分别合成了目标舰船在低、中、高三种不同航速下的稳态辐射噪声。为了验证合成声的有效性, 进行了主观评价实验, 采用成对比较法验证了 15 组不同航速状态下的合成舰船噪声样本。结果表明, 合成舰船噪声样本能够被人耳有效识别, 准确率达 93%。

关键词: 听觉感知; 不同航速; 稳态; 舰船噪声; 合成

中图分类号: O423

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-05-0453-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.05.001

Auditory perception based steady ship noise synthesis at different speeds

WANG Jin-chang, CHEN Ke-an

(School of Marine Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The actual ship noise is extremely required in sonar operator training, however, it is almost impossible to obtain such noise samples, hence the synthesis of the ship noise based on timbre is necessary. This paper first summarizes the influence of ship's speed on its radiated noise and the critical bandpass property of human hearing, and further presents a method to synthesize the ship noise at different speeds from some segments of sound in hand. The critical bandpass filtering and the line spectra summation are introduced. Finally, the paired comparison (PC) is carried out in a subjective evaluation test with 10 subjects participated in, to validate the synthesized noise's availability. The result shows that human auditory can effectively identify the synthesized ship noise with a mean accurate rate of 93%.

Key words: auditory perception; different speed; steady; ship noise; synthesis

0 引言

在海军训练与作战中, 敌我舰船噪声的利用是一个必不可少的环节。然而, 对各国海军来说, 舰船噪声特性是其最高机密, 要想获得实录的各类舰船噪声样本几乎是不可能的。因此, 通过零散的真实舰船声样本合成目标舰船在其它未知状态下的辐射声音是解决上述问题的重要方法。

当前人工合成声音的研究大多是针对于乐声和语声, 环境声合成的研究相对较少, 针对水下噪声的合成研究更少。环境声合成中, 对于瞬态声合成的研究较多, 如拍手声^[1]、脚步声^[2,3]、破碎声^[3]等, 而对稳态环境噪声的合成研究较少。由于水下

舰船噪声的极端重要性, 各国研究人员对舰船辐射噪声特性做了大量研究, 建立了不同状态下舰船噪声的数学模型。早在 1976 年, Ross^[4]通过对二战期间舰船辐射噪声测量数据的研究, 发现了宽带频谱舰船噪声中具有强烈的轴频和叶片频调制, 且在上述调制频率的各阶谐波上, 存在低频的单频分量辐射。他认为舰船的辐射噪声声源谱同它的基线谱成比例, 这种比例由船速和船长幂指数关系所决定, 这就是著名的 Ross 经验模式。Scrimger 和 Heitmeyer^[5]通过在意大利 Genova 附近测量的各类商船的 50 个声源级谱的研究验证了 Ross 经验模型的可行性。Wales 和 Heitmeyer^[6]收集了 1986~1992 年间 272 例舰船辐射噪声测量结果, 细化了 Ross 经验模型。

舰船辐射噪声模型应用于水下环境声合成的研究才刚刚起步。邢国强等人^[7,8]假设声源谱级分布为高斯分布, 改进了 Ross 经验模型, 提出了合理谱(Rational Spectrum, RS)模型, 并使白噪声通过具

收稿日期: 2011-09-28; 修回日期: 2011-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助(11074202)

作者简介: 王金昌(1986—), 男, 河南延津人, 硕士研究生, 研究方向为水下噪声合成。

通讯作者: 王金昌, E-mail: wang_jinchang@sina.com

有特定响应的 FIR 滤波器来模拟舰船辐射噪声中的连续谱成分, 实现了舰船辐射噪声的模拟仿真。但是, 该方法在验证中仅采用了频谱的简单对比, 能否满足声纳人员培训和主观实验对听觉感知效果的要求尚不得而知。人耳感知声音主要通过响度、音调和音色来实现, 响度可通过声信号幅值进行调节, 音调和音色相对较为复杂。本文把除去响度后的音调和音色因素统称为听觉感知信息。

水下目标识别是现代海战中的重要环节, 主要通过两种方法实现: 一是声纳员听声辨识, 二是机器自动识别。传统的自动识别技术主要是通过特征提取和分类来实现, 在复杂条件下识别率无法保证。由于大多数情况下人耳听觉系统的识别能力优于现有的自动识别技术, 于是利用人耳感知特性以改善自动识别技术引起了研究人员的兴趣^[9,10], 研究中常需要大量用于主观评价实验的合成舰船声样本。如上述用于声纳员培训和主观实验的合成声样本的时频谱结构无需与真实舰船声严格相同, 只要具有与真实声相同的听觉感知信息, 以达到在听觉感知上两者相似就可以了。

为了合成与真实声相同的舰船辐射噪声, 本文结合心理声学中的临界带通特性, 通过临界带通滤波和线谱迭加的方法合成了目标舰船在低、中和高速三种状态下的辐射噪声。最后, 本文参考 D. Berckmans 等人^[11]的研究方法, 采用主观实验方法验证合成声音的有效性。主观评价实验中, 采用成对比较法验证了 15 组合成声音能够被人耳有效地识别, 准确率为 93.09%。实验结果表明, 本文合成的舰船噪声能够有效适应人耳的听觉系统, 使其听觉感知效果与真实舰船辐射噪声非常相似, 可有效应用于声纳员培训和主观评价实验。

1 舰船辐射噪声的合成

1.1 模型

舰船辐射噪声是众多噪声源辐射声叠加的结果, 这些噪声源包括推进器、转动和往复式机械、各种泵等, 它们产生噪声的机理各不相同。但总体上可以分为三大类: 机械噪声、螺旋桨噪声和水动力噪声^[12]。

机械噪声来源差异很大, 其频谱组成为线谱和连续谱两部分, 前者的主要成份为旋转及往复式机械的基频及其谐波分量。机械噪声与舰船上安装的各种机械属性有直接关系。对特定的舰船来说, 机械噪声相对较为固定。本文研究简化了舰船机械

噪声, 假设其中只包含主机和辅机的基频及谐波分量, 主机基频为 50Hz, 辅机基频为 30Hz。

螺旋桨噪声是旋转的螺旋桨辐射的噪声, 包括螺旋桨空化噪声和“唱音”。空化噪声只在舰船达到一定航速(称为临界航速)时才产生, 具有连续谱。空化噪声在低频段随着频率的增高而增高, 在高频段它的谱级随频率的增高大约以 6 dB/倍频程的斜率下降。峰值通常在 100~1000 Hz 十倍频程内, 且随航速和深度而变化。“唱音”是一种线谱噪声分量, 其频谱与叶片数及螺旋桨转速有关, 满足如下关系:

$$f_m = mns \quad (1)$$

其中: n 是螺旋桨叶片数; s 是螺旋桨转速; m 是谐波次数; f_m 是相应的频率。螺旋桨噪声通常是舰船辐射噪声高频段的主要部分, 也是本文合成不同航速舰船辐射噪声的主要理论基础。螺旋桨噪声与舰船航速的关系最密切, 也是合成不同航速舰船辐射噪声中所关注的重点。

“唱音”与螺旋桨转速有直接关系, 而转速可通过如下经验与航速联系起来, 即

$$v = \xi \times s \times DT \times 10^{-4} \quad (2)$$

$$1/\xi^{1.5} = 6.485936 \times 10^{-3} + 2.479736 \times 10^{-5} \times DT + 5.046719 \times 10^{-11} \times DT^2 \quad (3)$$

式中: v 表示舰船航速(单位: kn); s 表示螺旋桨轴转速(轴频)(单位: r/s); DT 表示排水量(单位: t); ξ 是一个与 DT 有关的系数, 其值由式(3)给出。

水动力噪声是水流作用于舰船的结果, 是一种无规则的噪声。一般情况下, 当速度不是很高时, 舰船水动力噪声在强度方面往往被机械噪声和螺旋桨噪声所掩盖。本文忽略了水动力噪声的影响。

1.2 临界带通滤波

心理声学研究中, 为了解释听觉系统的反应, Fletcher 提出: 外部听觉系统表现为类似具有交叠通频带的一组带通滤波器。这些滤波器被称为“听觉滤波器”。那些通过了滤波器的噪声成分可以对信号产生掩蔽效应, 提高了信号的阈值, 降低了信号的可辨性细节。之后的多个实验表明: 听者对于复杂声的反应会随声音带宽是大于或者小于滤波器通频带而不同。

临界带的概念在掩蔽效应研究中很重要。人们在掩蔽实验中发现存在一个频率带, 其中心频率与纯音频率和窄带噪声中心频率相同。若噪声在此频带内带宽变化, 感觉到的噪声和纯音响度皆不变。若噪声带宽超越此频带, 噪声就会掩蔽纯音, 使感觉到的纯音响度减小。Fletcher 把这个带称作临界带,

单位为 Bark。1Bark 对应一个临界带的宽度。

1.3 合成

依据航速和螺旋桨空化噪声间的关系, 低、中、高三个速度分别被设置为 3 kn(1.543 m/s)、5 kn (2.570m/s)和 7 kn(3.598m/s), 低速和高速分别对应螺旋桨未空化和完全空化两种状态, 中速介于两者之间。设定 $DT=1000t$, 根据公式(2)、(3), 低、中、高速对应的螺旋桨转速分别为 3 r/s、5 r/s 和 7 r/s, 如表 1 所示。

通过计算和设定得到三个航速条件下的“唱音”参数如表 2 所示。

表 1 不同航速舰船的基本参数
Table 1 Basic parameters of ships at different speeds

状态	低速	中速	高速
速度/kn	3	5	7
载重/t	1000	1000	1000
轴频/(r/s)	3	5	7
空化谱峰位置/Hz	100	300	1000
空化谱峰值/dB	140	120	100

表 2 不同航速的四叶舰船“唱音”参数表
Table 2 Propeller “singing” parameters of 4-blade ships at different speeds

状态	低速		中速		高速	
“唱音”	频率	幅值	频率	幅值	频率	幅值
线谱	/Hz	/dB	/Hz	/dB	/Hz	/dB
轴频	3	100	5	120	7	140
f_1	12	130	20	140	28	160
f_2	24	125	40	135	56	155
f_3	36	120	60	130	84	150
f_4	48	115	80	125	112	140
f_5	60	110	100	120	--	--
f_6	72	105	120	117	--	--
f_7	84	100	--	--	--	--
f_8	96	95	--	--	--	--
f_9	108	90	--	--	--	--

机械噪声在三个航速状态下变化不大, 主要是主机和辅机的基频及谐频线谱, 参数设定见表 3。

根据上述的计算结果和设定值, 通过对某舰船

表 3 不同航速四叶舰船机械噪声参数表

Table 3 Mechanism noise's parameters of 4-blade ships at different speeds

频率/Hz	幅值/dB	频率/Hz	幅值/dB
主机		辅机	
50	130	30	120
100	125	60	115
150	120	90	112
200	115	120	110
300	112	180	108
400	110	240	107
600	108	360	106
800	107	--	--

辐射噪声声样本进行修改, 得到目标舰船在低、中、高三个航速状态下的理论谱图如图 1 所示。目标舰船辐射噪声理论谱图中包含连续谱和线谱两部分。连续谱是采用临界带滤波的方式得到, 而线谱采用谐波叠加法加到连续谱上, 形成完整的舰船辐射噪声, 流程如图 2。

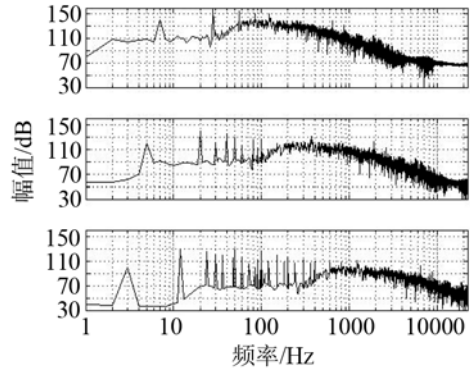


图 1 舰船噪声的理论谱图(从上到下依次为高、中和低速)
Fig.1 Typical spectral of ship noise (upper to lower responding to high, middle and low speeds)

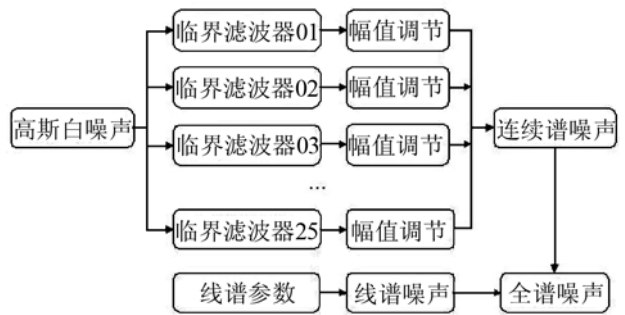


图 2 稳态舰船噪声合成示意图
Fig.2 Diagram of steady ship noise synthesis

临界带通滤波通过 Matlab 中的数字 IIR 滤波器实现, 第一个和最后一个临界带分别采用低通和高通滤波器实现, 中间各临界带采用带通滤波器实现。各临界带通滤波器的参数如表 4 所示。

高斯白噪声分别通过各临界带通滤波器, 分别得到各临界带的窄带噪声。图 3 为高斯白噪声的谱

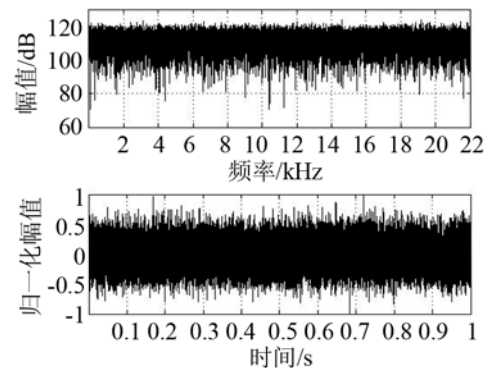


图 3 高斯白噪声的谱时图
Fig.3 Spectral and time domain diagrams of white Gaussian noise

表 4 各临界带通滤波器的参数设置
Table 4 Parameters of critical bandpass filters

序号	W_{s1}/Hz	W_{p1}/Hz	W_{p2}/Hz	W_{s2}/Hz	R_p/dB	R_s/dB	序号	W_{s1}/Hz	W_{p1}/Hz	W_{p2}/Hz	W_{s2}/Hz	R_p/dB	R_s/dB
1	--	--	98	101	0.1	40	14	1995	2005	2315	2335	0.1	40
2	85	110	190	215	0.1	40	15	2315	2325	2695	2705	0.1	40
3	195	215	295	305	0.1	40	16	2695	2710	3140	3155	0.1	40
4	295	305	395	405	0.1	40	17	3145	3155	3695	3705	0.1	40
5	395	405	505	515	0.1	40	18	3695	3705	4395	4405	0.2	40
6	505	515	625	635	0.1	40	19	4395	4405	5295	5305	0.1	40
7	625	635	765	775	0.1	40	20	5295	5305	6395	6405	0.1	40
8	765	775	915	925	0.1	40	21	6395	6405	7685	7705	0.1	40
9	915	925	1075	1085	0.1	40	22	7690	7710	9490	9510	0.1	40
10	1075	1085	1265	1275	0.1	40	23	9495	9505	11995	12005	0.1	40
11	1265	1275	1475	1485	0.1	40	24	11950	12050	15450	15550	0.1	40
12	1475	1485	1715	1725	0.1	40	25	15495	15505	--	--	0.1	40
13	1715	1725	1995	2005	0.1	40							

备注： W_p 表示通带截止频率， W_s 表示阻带截止频率，单位为 Hz； R_p 表示通带最大衰减， R_s 表示阻带最小衰减，单位为 dB。

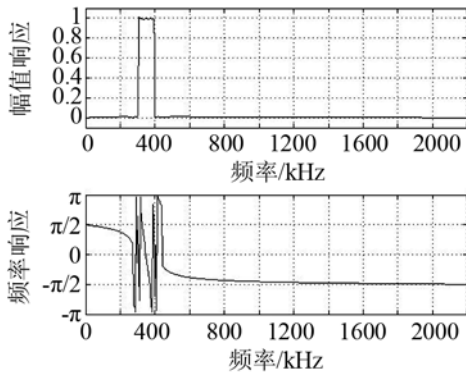


图 4 第四临界带通滤波器的幅频响应曲线
Fig.4 Amplitude and phase response curves of the 4th critical bandpass filter

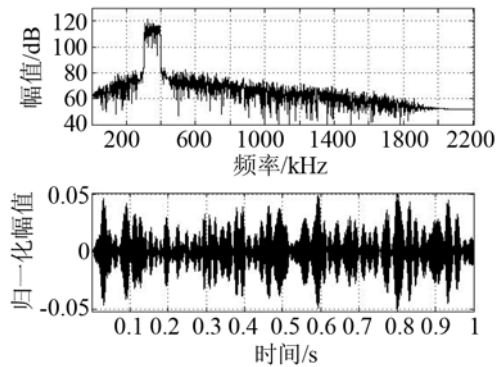


图 5 高斯白噪声通过第四临界带通滤波后的谱时图
Fig.5 Spectral and time domain diagrams of white Gaussian noise filtered by the 4th critical bandpass filter

时图，图 4 为第 4 临界带的带通滤波器幅值相位响应图，图 5 为高斯白噪声通过第 4 临界带通滤波后的谱时图。

依据舰船辐射噪声理论谱图中的数据计算出目标声音在各临界频带中的平均幅值，对滤波后得到的窄带噪声进行幅值调节求和，得连续谱噪声。

通过公式(4)加入线谱，得到完整的舰船辐射噪声。

$$Line = \sum_{i=1}^n A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (4)$$

式(4)中： $Line$ 表示线谱； A_i 为第 i 阶线谱的幅值； f_i 为第 i 阶线谱的频率； φ_i 为第 i 阶线谱的初始相位。因为 Galemba 等人^[13]在钢琴低音的研究中发现非谐音的相位关系对其音调和音色的影响甚微，因此在舰船辐射噪声合成中可以采用随机初相位，此处 φ_i 取 $[-\pi, \pi]$ 中的随机值。

某舰船辐射噪声合成声音的完整谱图见图 6。

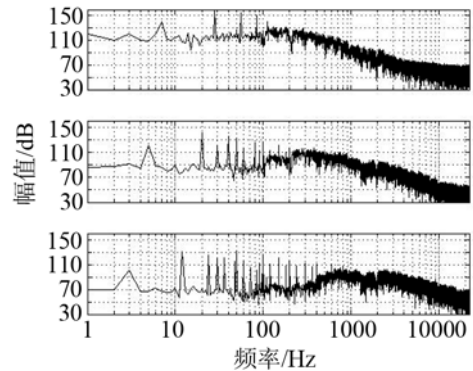


图 6 合成的舰船噪声谱图(从上到下依次为高、中和低速)
Fig.6 Spectrogram of synthesized ship noise (upper to lower responding to high, middle and low speeds)

2 实验验证

2.1 方案

为了验证上文合成舰船辐射噪声的有效性，本文设置了主观评价实验。刺激为上文方法合成的低、中和高速舰船辐射噪声。实验对不同航速舰船的合成噪声进行两两组合，采用成对比较法比较不

同刺激对应的舰船航速。如果被试的选择与合成声参数一致,认为选择正确,反之认为错误。实验验证了合成舰船噪声中是否包含真实声音中航速对应的听觉感知信息。

从 Sound Ideas 6000 和 UWT 样本库中选择 15 个水下舰船辐射噪声样本,要求选取的声样本听起来具有稳定的音色,中间不包含音色突变和幅值波动。分别以这些声样本为模板合成 15 个目标舰船在低、中和高速三种状态下的辐射噪声,时长皆为 5s。刺激共分为 15 组,合计 45 个合成噪声样本,对其进行等响处理。把每组中的 3 个样本进行成对组合,即“低速-中速”、“中速-高速”和“低速-高速”,各组合中的两个声样本间隔为 3s。当然,每个组合中的两个不同航速声样本的顺序是随机的。

实验分为训练和测试两部分。训练采用的声音样本来源于 Sound ideas 6000 和 UWT 样本库,训练样本分为低、中和高速三组。在测试开始前分别把训练样本播放给被试,并告知他们声音对应为低、中或高速舰船,循环播放,直到被试要求停止;测试样本共分为 15 组,每组包含 3 个组合声样本,共 45 次测试。为了减少记忆力对实验的影响,45 次测试是随机排列的,实验完毕后由工作人员对数据进行重新分组。被试试听每个组合声音 A-B,被要求从中选择出自认为速度较高的舰船辐射声样本,并在实验表格的对应位置打钩。

实验中刺激播放设备为笔记本电脑,采用 SENNHEISER HD280 耳机播放给被试。该耳机频率响应特性宽,能有效避免声音播放中的失真。被试共有 10 人,包含 5 名女性和 5 名男性,听力正常,年龄分布于 15~28 岁,其中 7 名为在读大学生,1 名高中生,2 名在职人员。

2.2 实验结果

对实验结果进行分析,得出了 10 名被试的辨识正确率和平均识别率,如图 7 所示。从图中可以发现,第三名被试的辨识正确率为 48.9%,由于实验采用“二选一”方式,近似 50%的正确率表明被试在实验中完全没有觉察出舰船速度对其辐射噪声的影响。无论是由于理解偏差还是态度消极,因而决定剔除本组数据。剔除第三名被试的数据后,其他九名被试的平均辨识率为 93.09%。这表明利用临界带通滤波合成的不同航速舰船辐射噪声能有效地被人耳辨识,也就是说合成声中包含人耳分辨不同航速舰船噪声所需的大部分有效信息。即采用听觉感知特性能够有效地合成舰船辐射噪声,尤其是用于人耳感知的声音,如声纳员训练声样本。

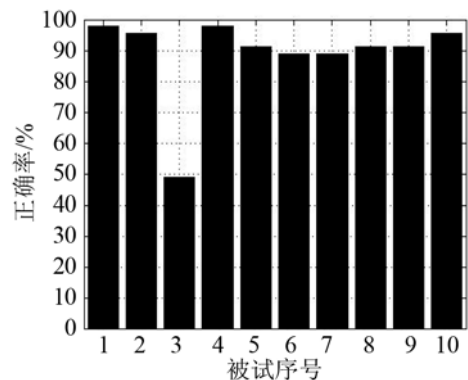


图7 不同被试的识别正确率

Fig.7 Recognition accurate rate of different subjects

依据实验刺激中包含的不同航速组合,把实验数据分为三组:“高速-低速”、“高速-中速”和“中速-低速”。各组的平均识别正确率分别为 98.5%、94.8%和 85.9%。从中可以发现“高速-低速”组中的分辨率最高,明显高于其它两组。这完全符合我们生活中的常识,即目标对象相差越大,分辨率就越高,这也印证了本文合成方法的合理性。

实验中共采用了 15 个舰船声音作为模板,分别合成目标舰船在低、中和高速三种状态下的辐射噪声。不同模板对应合成声的辨识率如图 8 所示,从中可以发现以不同声样本为模板合成的声音的识别率是不同的,且相差较大。因为不同模板声音的目标舰船的航行状态是不同的,可以认为人耳对不同状态下舰船航速的感知能力是不同的。

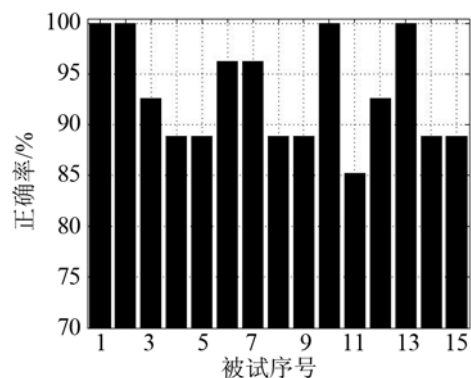


图8 不同声样本的识别正确率

Fig.8 Recognition accurate rate based on different sound samples

2.3 结论

本文结合人耳的听觉感知特性和舰船噪声模型,采用临界带通滤波和线谱迭加的方法实现了目标舰船在低、中和高速不同状态下的辐射噪声合成。最后进行主观评价实验对合成舰船噪声进行识别,通过对实验结果的分析,得出结论如下:

(1) 合成的水下稳态舰船辐射噪声中包含了人耳辨识舰船航速所需的大部分听觉感知信息,人耳

可以通过合成声有效分辨出不同刺激对应的舰船航速;

(2) 不同合成声中航速参数相差越大, 辨识度越高, 人耳可以有效分辨出刺激中航速参数变化的幅度, 表明了航速参数设置的合理性;

(3) 人耳对于不同状态下舰船航速的感知能力不同, 表明舰船噪声听觉感知信息非常复杂, 受到各种因素的影响, 实现更逼真的声音合成需要愈加细化的舰船模型。

综上所述, 通过本文方法合成的舰船辐射噪声包含了大部分航速的听觉感知信息, 人耳可以对其进行有效识别, 应用于声纳员培训和主观实验研究更为合理。

参 考 文 献

- [1] Peltola L, Erkut C, Cook P R, Valimaki V. Synthesis of hand clapping sounds[J]. IEEE Trans on Audio, Speech, and Language Processing, 2007, 15(3): 1021-1029.
- [2] Cook P R. Modeling Bill's gait: Analysis and parametric synthesis of walking sounds[C]// Audio Eng. Soc. 22nd Conf. Virtual, Synthetic, and Entertainment Audio, Helsinki, Finland, 2002, 73-78.
- [3] Fontana F, Bresin R. Physics-based sound synthesis and control: Crushing, walking and running by crumpling sounds[Z]. XIV Colloquium Musical Informatics, Firenze, Italy, 2003.
- [4] Ross D. Mechanics of underwater noise[M]. Oxford: Pergamon, 1976.
- [5] Scrimger P, Heitmeyer R M. Acoustic source-level measurements for a variety of merchant ships[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1990, 89(2): 691-699.
- [6] Wales S C, Hertmeyer R M. An ensemble source spectra model for merchant ship-radiated noise[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2002, 111(3): 1211-1230.
- [7] 邢国强. 典型舰船辐射噪声建模与仿真[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
XING Guoqiang. Modeling and simulation of typical ship-radiating noise[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.
- [8] 邢国强, 孙超, 唐建生, 等. 典型舰船辐射噪声的时域模拟[J]. 鱼雷技术, 2005, 13(4): 41-43.
XING Guoqiang, SUN Chao, TANG Jiansheng, et al. Simulation of Typical Vessel's Radiated Noise in Time Domain[J]. Torpedo Technology, 2005, 13(4): 41-43.
- [9] 王娜, 陈克安, 黄凰. 水下噪声听觉属性的主观评价与分析[J]. 物理学报, 2009, 58(10): 7330-7338.
WANG Na, CHEN Kean, HUANG Huang. Subjective evaluation and analysis of auditory attributes for underwater noise[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(10): 7330-7338.
- [10] 王娜. 基于人耳主观反应的听觉特征量及其在目标识别中的应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2009.
WANG Na. Auditory property and it's application in target Recognition based on Human Ear's Subjective Response [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.
- [11] Berckmans D, Janssens K, Van der Auweraer H, et.al. Model-based synthesis of aircraft noise to quantify human perception of sound quality and annoyance[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007.
- [12] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1993.
LIU Bosheng, LEI Jiayu. Underwater acoustics theory[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1993.
- [13] Galemmo A, Askenfelt A, Cuddy L L, Russo F A. Effects of relative phases on pitch and timbre in the piano bass range[J]. J. Acoustic. Soc. Am, 2001, 110(3): 1649-1666.