

综 述

被动声纳目标识别技术的现状与发展

丁 玉 薇

(中国科学院东海研究, 上海 200032)

摘要: 在现代被动声纳系统中, 水下目标的自动识别是关键技术之一。文章对被动声纳目标识别的特征提取、特征选择和分类器设计方面进行了回顾。对 LOFAR, DEMON 和小波变换等特征提取技术进行了讨论, 分析了特征优化的重要性和专家系统和神经网络等分类器的优缺点, 并简要分析了该领域的过去、现在和未来。

关键词: 自动目标识别; 特征提取; 水下目标; 分类; 声纳信号处理

中图分类号: TB559 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3630(2004)04-0253-05

Review on passive sonar target recognition

DING Yu-wei

(Shanghai Acoustic Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

Abstract: Automatic recognition of underwater targets is one of the key techniques in modern passive sonar systems. The techniques of feature extraction, feature selection and design of classifier for passive sonar target recognition are reviewed. The feature extraction techniques such as LOFAR, DEMON, wavelet transform and so on are discussed. The importance of feature fusion and the advantages and disadvantages of classifiers such as expert systems, neural networks are analyzed. The past, present and future of this field are also briefly discussed.

Key words: automatic target recognition; feature extraction; underwater target; classification; sonar signal processing

1 引 言

在海战中, 能否对声纳目标实现正确的检测和分类, 对于海军舰艇的作战能力和生存能力至关重要。在传统的被动声纳中, 目标识别是依靠声纳兵根据接收的目标辐射噪声的音色、节拍、起伏等, 结合观看谱图来判断目标的性质。但训练一个熟练的声纳员需要很长时间, 且其分类的准确率受人的精神状态和心理素质等因素的影响较大; 在现代海战中, 又要求同时对多个目标进行检测、定位和分类识别, 因此迫切需要声纳能够自动检测和识别目标。美国从 20 世纪 50 年代末就着手声纳目标自动识别技术的研究。但因目标识别问题本身的复杂性和相

关条件的限制, 在相当长的一段时间内进展缓慢, 几十年来声纳目标识别一直是国内外水声界的研究热点和难点问题。近十多年来, 各种信号处理方法和数据融合技术等相关领域的发展大大推动了被动声纳目标识别技术的发展, 并已在声纳设备中获得了一定应用。本文从特征提取、特征选择和分类决策等方面论述了被动声纳目标识别技术的现状, 并展望了该领域的发展趋势。

2 特征提取

被动声纳目标识别主要是根据目标辐射噪声的不同来实现的。如何从目标辐射噪声中提取有效的识别特征是被动声纳目标识别的关键环节。

2.1 功率谱估计及 LOFAR 分析

功率谱估计是获取随机信号二阶统计特征的基本手段。通过时域到频域的变换, 可使时间域上的

复杂波形转换成频域上比较简单的各频率分量的分布,功率谱中的低频线谱特征及宽频带谱形特征等是水声目标分类的主要根据之一。功率谱估计一般以 FFT 为基础,运算速度快,实现简单。为了克服谱估计的随机起伏,可采用部分重叠的韦尔奇(Welch)分段平均周期图谱估计等方法,以增加特征的稳定性和一致性。陈敬军^[1]等已经对如何进行线谱检测进行了综述。曾庆军^[2]等利用非线性多项式拟合提出了一种新的连续谱特征提取方法。

2.2 DEMON 谱分析

众所周知,螺旋桨噪声是水面舰船、潜艇、鱼雷等水声目标的主要噪声源。螺旋桨空化噪声常常会产生幅度调制,通过解调处理的调制谱中存在着许多离散线谱,其位置对应螺旋桨的轴频、叶频及其谐波。因而利用这些离散线谱,可估计螺旋桨的轴频和叶片数,为被动声纳目标检测和分类提供了有力的工作。为了让机构能够自动提取出螺旋桨轴频等信息,采用了几种不同的方法^[3-5]。如 Kummert 利用了模糊专家系统, Lourens 和 Preez 提出了舰船螺旋桨转速的被动最大似然估计等。

2.3 小波变换特征提取

传统的傅里叶变换有时间积分作用,平滑了非平稳随机信号中的时变信息,因而其频谱只能代表信号中各频率分量的总强度。采用短时傅里叶变换(STFT)对时变信号逐段进行分析,虽具有时频局部化性质,但其时间分辨率和频率分辨率是互相矛盾的,不能兼顾。而小波变换通过对原小波的平移和伸缩,能使基函数长度可变,因而可获得不同的分辨率。小波变换可根据信号特点,对于大尺度小波分解,可利用其高的频域分辨率,从频域提取能量分布特征;对于小尺度小波分解,可利用其高的时域分辨率,从时域提取波长分布及幅值分布特征。由于小波变换具有恒 Q 值滤波器组特性,不仅可以取代普通滤波器组,提取多尺度解调谱特征,而且可减少滤波器组的设计量和计算量。因小波变换具有时频局部化特点,故可将一维的水声信号映射到二维时频平面上,构成信息丰富的时频图,提取时频图像特征。同时,对于小波变换的离散形式,存在高效算法,实现也比较方便。理论和实践证明,用小波变换提取特征是一种十分有潜力的方法,便于构成对目标特性的全面认识。张艳宁、章新华等^[6-12]在对舰船辐射噪声进行小波变换、提取目标特征方面做了许多工作。

2.4 高阶统计量

功率谱和相关函数是二阶统计特性,在随机过程是正态分布时,它们能完全代表过程的特性。但实际的水声信号或噪声往往不是理想的高斯分布,用二阶统计特性不能全面描述信号特性,只有高阶统计特性(HOS)才能更全面地反映非高斯信号的特性。高阶统计量一般有高阶累积量、高阶矩和高阶谱,都具有抑制加性噪声的能力,并保留了相位信息。基于二次累积量的双谱具有比功率谱更引人关注的优点:对非最小相位系统中两类信号的功率谱可能是相同的,难以区分,但双谱的相位保持特性可以辨别^[13];幅度谱中基频 δ 线的频率对应螺旋桨的转速,这对被动目标识别具有重要作用。樊养余等^[14]利用高阶谱及有关方法提取了一个 39 维特征矢量,对海上实测的舰船辐射噪声进行分类识别。

2.5 非线性动力学模型^[15-19]

除了利用经典的功率谱、线谱、调制谱特征的同时,人们更进一步研究利用分形、极限环、混沌等新方法提取分类特征。章新华等人提取舰船辐射噪声的 Lyapunov 指数特征^[15];宋爱国等人提取了舰船辐射噪声的分维数、极限环在相平面的分布密度,并和功率谱特征以及 AR 模型特征作了比较^[16]。陈向东等人则提取了舰船辐射噪声的重复度特征^[17]。高翔等人利用分形特征曲线构成目标的特征参数模型提取了分形维信息的特征矢量^[18]。

2.6 模型分析等其它特征提取方法^[15-19]

除了以付里叶变换为基础提取特征外,用其他分析方法同样可以提取舰船辐射噪声的分类特征。模型分析就是较为常用的一种特征提取方法,如自回归参量模型分析和谐波分析。自回归参量模型是有理分式传递函数模型描述接收信号,将估计的 AR 系数作为目标识别特征。这种方法特征维数低,实现简单,对线谱分量少、平稳性好的信号有较好的识别效果。谐波分析技术则是用谐波分解模型表示信号,将信号看成是由若干个有一定幅度、初相位和频率的正弦信号构成的。基于这种模型估计的参数特征更适用于线谱分量丰富的信号。

另外,信号过零点分布、幅值分布、能量分布、波长分布及波形复杂度等也可作为水声目标分类识别的主要特征或辅助特征。

3 特征选择

识别系统的性能本质上由所用模式特征决定,

而模式特征空间的维数决定了识别系统的结构复杂性。若增加特征向量的维数,而训练集样本数不变,类别间的可分离性会明显下降;而当维数增加时,要保持识别性能,必须成倍增加样本数^[20];

既然从舰船辐射噪声信号获取多种识别特征,特征优化和选择便具有重要的现实意义。一方面,特征优化的效果对分类器性能影响较大,必须获取少数有效的独立特征,冗余特征的存在将降低分类器性能;另一方面,为了有效地压制干扰,需利用多种变换算法。特定的变换算法通过原始信号到特定空间的投影可以实现对某些干扰的压制和分离,综合利用多种变换算法就能更为准确和简单地描述期望信号。这给特征优化提出了很高的要求。特征优化主要分为两个部分,一是通过线性或非线性映射缩减维数,获取具有较好的类内紧致性和类间可分性的线性独立特征,二是特征选择,包括一维和多维选择,一维特征选择并不困难,但是却无法处理特征的相关性,导致低劣的分类性能。其原因有三个^[21]:识别特征中不可避免地出现大量相关特征,二是现有的分类器在设计时往往不考虑特征的相关性,三是受样本容量的限制只能选用有限的特征。现有特征优化方法可概括成两种:在一定分类算法约束下,寻求不使性能指数明显下降的最小特征子集^[22];规定待选的特征数目,寻求使性能指数更好的特征子集^[23]。这些方法不同程度地存在一些不足,特征选择属于 NP 难题^[24],即最优的特征子集是找不到的,期望的是寻找一定条件下的满意解。信息熵模型表明^[25],特征概率空间与类别概率空间的互信息与提高系统的识别性能、减少误识率是等价的。据此结论,利用遗传算法的快速搜索能力和解的全局优化性能进行特征选择具有明显的优势。这种方法无需事先确定所选维数,且得到的特征矢量具有很好的整体有效性^[26]。

4 分类判决

对水声目标进行分类识别是水声研究领域中的一个热点。目前,水下目标自动识别主要有统计分类、神经网络和专家系统三种方法。统计分类识别主要利用特征的统计分布,依赖于对已有大量范例的统计分析和基于距离度量的模式匹配。传感器数据经过特征提取得到样本向量,使用一些算法与参考模式进行比较,结果得到此样本向量被判定为各个参

考模式一组概率。优点是分类速度快,但得到的匹配模板是固定的,难以适应场景的变化,泛化率低。

神经网络是由大量非线性处理单元广泛互联而成的网络,它具有大规模并行处理、分布式信息存储、非线性动力学和网络全局作用等特性,具有很强的自适应和学习能力,运行的鲁棒性和容错能力。神经网络方法则是通过网络本身的学习获取知识,构成权系数,进行运算判决。输入神经网络进行训练和识别的参数是压缩后的特征数据,用这些数据训练过的神经网络能构成训练样本空间的较好划分。这类系统在样本空间较完备时有较好的识别效果,但对未经训练的新样本分类能力较差,泛化率低。章新华^[27]给出了神经网络在声纳目标识别中的研究进展。

由于水声目标本身种类繁多,型号多样,且目标辐射噪声随海情、航速、工况的不同而变化,即使同一目标辐射噪声差异也很大,并且水声样本是各个国家的机密,因此拥有完备的信号集非常困难且代价很高。为了降低目标识别性能对样本数量的依赖,水声目标识别还利用了专家系统识别方法。专家系统识别方法是基于领域专家的经验知识建立的推理识别系统,构建的知识库具有一定的普遍性和代表性,因此具有对样本依赖性小的优点。在这种识别系统中,传感器数据经过特征提取得到的目标特征送入推理机中,推理机按照人的思维进行分析并与知识库中的条件进行对比从而得出识别结果。

5 国内外研究现状

1975 年,美国 Stanford 大学的 H. P. Nii 和 E. A. Feigenbaum 等人研制了水下预警专家系统 HASP,并经不断改进,先后经过 SIAP、CLAIMS、THESEUS,到 1988 年已经研制出第四代声纳专家系统 SES^[28,29]。HASP 在实现过程中作了许多简化处理,数据也是由手工产生的,只能完成一个非常简单的分类问题。但它从概念上有力地证明了人工智能技术可以用与常规信号处理技术不同的方式处理声信号。1980 年提出的改进型 SIAP 试图消除 HASP 中的部分简化,并用实际数据进行了测试。1984 年的 CLAIMS 把该技术改进成用于舰载声纳,增加了一些特征和模型,使该系统更加真实和细致。1985 年的 THESEUS 系统只是对 CLAIMS 作了很小的改动,然后应用到对海底多传感器监视问题。经

过十余年的不断改进研制出来的能够用于拖曳阵声纳的实时专家系统 SES, 已经具备较好的识别性能。

1983 年, 加拿大的 J. N. Maksym 等人也开发了分析舰船辐射噪声的信号分析专家系统 INTERSENSOR^[30]。该系统中有知识的表示、推理机制及线谱的检测和提取方面都进行了深入细致的研究, 目前仍有很高的参考价值。

80 年代末, 印度的 R. Rajagopal 和 B. Sankaranarama 等人研制了 RETSENSOR 水下被动目标识别专家系统^[31]。该系统从接收到的噪声中提取九个特征: 螺旋桨叶片数、螺旋桨转速、动力装置类型、目标壳体辐射低频噪声、活塞松动产生的谐音基频、喷嘴噪声、最大速度、槽极噪声和传动装置类型, 并对这些特征各赋予一个精度因子, 然后利用简化的 Dempster-Shafer 理论组合不同证据, 利用专家系统方法识别四类目标。90 年代, R. Rajagopal 等人又把专家系统方法和统计模式识别、神经网络方法结合起来, 进一步提高目标识别概率, 取得了比较理想的效果^[32]。

英国的 Sheppard 和 Gent 利用神经网络技术开发的被动声纳分类系统^[33], 不仅采用窄带分析, 还采用了宽带分析、DEMON(解调制谱)分析和瞬态分析方法, 而由于采用了神经网络方法提高了系统的容错能力, 使得这个系统在训练样本不平衡时仍有很好的性能。

由于海洋工程的发展和国防需求的有力推动, 我国学者也在被动声纳目标识别方面也做了大量工作。陶笃纯^[34-38]研究了螺旋桨的空化噪声和噪声节奏的物理机理, 舰船辐射噪声线谱的幅度起伏模型以及信号和背景噪声的起伏对线谱检测器性能的影响等, 为舰船辐射噪声的线谱和连续谱的分析和提取提供了依据, 并给出了一种线谱的提取方法。进入 90 年代, 陈庚、吴国清、魏学环等人^[39-41]将舰船辐射噪声的平均功率谱和相关函数结合起来, 提取谱线的位置、谱的强度、谱密度和相关函数的极值四个参数作为识别特征向量, 利用聚类分析法进行识别。吴国清等人^[42-45]对舰船辐射噪声进行了多方面的研究, 提取了舰船辐射噪声的线谱特征、双重谱特征和平均功率谱特征, 并利用模糊神经网络和统计模式识别组合方式对舰船目标进行分类。李启虎等人^[46]研制了“EXPLORE”水声目标识别专家系统。该系统利用线谱数、相邻线谱的平均周期、幅值最大的线谱的位置、线谱平均值、连续谱的最大值位

置及从最大值开始的斜率六个特征参数, 应用聚类分析和模糊逻辑, 对水面舰、潜艇、炮艇、货船、渔船和环境噪声进行分类, 在信噪比高于 3dB 时, 在大多数情况下, 识别概率超过了 75%。

6 发展趋势

在声纳目标自动识别取得重大进展的同时, 也应该充分认识到, 由于声纳目标识别本身的复杂性, 目前取得的进展还只能说是初步的。一些处理结果是在样本数量有限的情况下获得的, 由于样本的不完备性, 尤其是新型目标样本的缺乏, 往往会导致一些分类方法或识别系统在样本增加时性能下降。随着各国舰船减噪技术的大量运用, 尤其是安静型水下目标的出现, 研究低信噪比条件下性能良好的目标识别技术非常重要; 同时各种远距离攻击武器的出现, 对声纳的探测、识别的要求也越来越高, 因此对目标识别技术的准确性、兼容性要求也越来越高。目前的声纳目标自动识别系统, 还只能是声纳的辅助决策系统, 离问题的真正解决尚有很长的路要走。

未来的声纳目标识别技术毫无疑问将要求进一步拓展现有的方法, 继续对相关的许多问题进行讨论, 并且向不同的方向和领域延伸。

(1) 探讨目标辐射噪声的机理分析和辐射噪声在不同声场环境下的变化规律是一项长期的、无止境的工作, 且极具挑战性。特征提取方法必将在改进经典的特征提取方法的同时进行新的特征提取方法的研究。

(2) 为了提高分类系统的学习、识别能力、对环境的适应能力, 以及系统的可靠性、容错性, 依然需要把分类技术作为研究的重点, 要从几个方面入手, 提高分类技术的性能: 利用新理论、新方法分别提高统计分类技术、神经网络、专家系统的性能; 统计分类技术、神经网络、专家系统的组合、结合研究。如将信息论、遗传算法、模糊理论与神经网络方法结合, 模糊理论与专家系统结合等。

(3) 对于水声目标识别系统, 从信息源的角度, 不但要利用声纳本身提取的目标噪声信息, 而且还要利用水声系统、雷达系统等信息, 在未来的水声目标识别系统中, 很可能要利用整个作战网络的信息。对被动声纳而言, 目标检测、跟踪、定位和识别是声纳的主要功能。为了加快声纳系统的反应时间, 提高处理增益, 需要声纳将其主要功能统一考虑, 进行

目标检测、跟踪、定位和分类识别一体化设计。信息融合为这种多源、多层次数据的综合处理提供了有效的手段,是提高系统可靠性和容错性的有效途径,将在声纳目标识别中发挥越来越重要的作用。

参 考 文 献

- [1] 陈敬军,陆佑人. 被动声纳线谱检测技术综述[J]. 声学技术, 2004, 23(1): 57-60.
- [2] 曾庆军,王菲,黄国建. 基于连续谱特征提取的被动声纳目标识别技术[J]. 船舶工程, 2002, 36(3): 382-386.
- [3] Richard O Nielsen. Sonar signal processing[C]. USA. Artech House, Inc. 1991.
- [4] Kummert A. Fuzzy technology implemented in sonar systems[J]. IEEE J. of Oceanic Eng., 1993, 18(4): 483-490.
- [5] Lourens J G, du Preez J A. Passive sonar ML estimator for ship proceller speed[J]. IEEE J. of Oceanic Eng., 1998, 23(4): 448-453.
- [6] 章新华. 基于小波变换的舰船辐射噪声信号特征提取[J]. 声学学报, 1997, 22(2): 139-144.
- [7] 张艳宁. 自适应于子波、高斯神经网络及其在水中目标被动识别中的应用(西北工业大学博士学位论文)[D]. 西安:西北工业大学, 1996.
- [8] 洪健,陆佑人. 小波变换及径向基函数网络综合水声信号识别[J]. 东南大学学报, 1994, 24(6): 112-118.
- [9] 丁庆海,庄志洪,祝龙石,张清泰. 混沌、分形和小波理论在被动声信号特征提取中的应用[J]. 声学学报, 1998, 24(2): 197-203.
- [10] 朱安珏. 水中目标辐射噪声特性仿真[J]. 声学技术, 2004, 23(2): 128-131.
- [11] 高翔,陈向东,陆佑人. 基于小波分析的被动声纳信号宽带噪声包络调制分析[J]. 东南大学学报, 1998, 28(6): 24-27.
- [12] 吴国清,任锐,陈耀明. 舰船辐射噪声的子波分析[J]. 声学学报, 1996, 21(4): 700-708.
- [13] Nikias C, Raghuveer M. Bispectrum estimation: A digital signal processing framework[J]. Proc. of IEEE, 1987, 75(7): 869-891.
- [14] 樊养余. 舰船噪声的高阶统计量特征提取及其应用(西北工业大学博士学位论文)[D]. 西安:西北工业大学, 1999.
- [15] 章新华,张晓明. 舰船辐射噪声的混沌现象研究[J]. 声学学报, 1998, 23(2): 134-140.
- [16] 宋爱国,陆佑人. 基于极限环的舰船噪声信号非线性特征分析及提取[J]. 声学学报, 1992, 24(4): 407-415.
- [17] 陈向东,高翔,陆佑人. 基于相似序列重复度的舰船辐射噪声时域特征的研究[J]. 东南大学学报, 1998, 28(6): 18-23.
- [18] 高翔,陆佑人,陈向东. 舰船辐射噪声的分形布朗运动模型[J]. 声学学报, 1999, 24(1): 19-28.
- [19] 丁庆海,庄志洪,祝龙石,张清泰. 混沌、分形和小波理论在被动声信号特征提取中的应用[J]. 声学学报, 1998, 24(2): 197-203.
- [20] Elshaikl T S, Wacker A G. Effect of dimensionality and estimation on the performance of Gaussian classifiers[J]. IEEE Trans PAMI, 1980, 2(12): 187-198.
- [21] 侯平魁,史习智,林良骥. 水下目标识别的特征融合分类器设计[J]. 电子学报, 2001, 29(4): 443-446.
- [22] Foroutan I, Sklansky J. Feature selection for automatic classification of non Gaussian data[J]. IEEE Trans. SMC, 1987, 17(2): 187-198.
- [23] Pudil N, Novovicova J. An analysis of the Max-Min approach to feature selection and ordering[J]. Pattern Recognition Letters, 1993, 14(3): 841-847.
- [24] 陈彬,洪家荣,王亚东. 最优特征子集选择问题[J]. 计算机学报, 1997, 20(2): 133-138.
- [25] 丁晓青,吴佑寿. 模式识别统一熵理论[J]. 电子学报, 1993, 21(8): 1-8.
- [26] 章新华. 遗传算法及其应用[J]. 火力与指挥控制, 1997, 22(4): 49-53.
- [27] 章新华. 神经网络在声纳目标识别中的研究进展[J]. 火力与指挥控制, 1998, 23(1): 1-6.
- [28] Nii H P, Feigenbaum E A, Anton J J, Rockmore A J. Signal-to-symbol transformation: the HASP/SIAP case study[A]. Artificial Intelligence Magazine[C], 1982, 23-35.
- [29] Greg D G bbons, Jill V Josselyn, John R Russel, Joyce A. Musselman, Expert System: They Ain't What They Used to Be! [J]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1988, 1180-1187.
- [30] Maksym J N, Bonner A J, Dent C A, Hemphill G L. Machine analysis of acoustical signals[J]. Pattern Recognition, 1983, 16(6): 615-625.
- [31] Rajagopal R. Target classification in passive sonar-an expert system approach[A]. Proc. of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C], 1990. 2911-2914.
- [32] Rajagopal R, Kumar K A, Ramakrish Rao P. An integrated passive yarget classification[A]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C], 1994. 313-316.
- [33] Sheppard C P, Gent C R. A neural network based sonar classification system[A]. Undersea Defence Technology: conference and EX-hibition[C], 1992. 628-633.

- 译作《音乐厅和歌剧院》获全国优秀科技图书三等奖 《声学技术》编辑部 (04.1.48)
- 上海市声学学会发展首批高级会员 阎玉舜 (04.1.封3)
- 浙江省第四届噪声与振动控制技术交流会在嘉兴召开 吕玉恒 (04.2.78)
- 第18届国际声学会议在日本召开 胡长青 (04.2.83)
- 《声学技术》入编《中文核心期刊要目总览》 丁玉薇 (04.2.92)
- 致谢 丁玉薇 (04.2.105)
- 《现代声学理论基础》出版了 王季卿 (04.2.131)
- 充实调整《声学技术》编委会成员的决定 (04.2.封3)
- 中国声学学会水声分会第五届二次委员会暨2004年全国水声学术会议纪要
..... 中国声学学会水声分会 (04.2.封3)
- 新型装饰吸声材料产品性能和应用技术交流会在上海召开 钟祥璋 (04.3.137)
- 《超声提取及其应用》一书出版发行 林书玉 (04.3.172)
- 上海市声学学会建声与噪声控制分会召开新型吸声材料技术交流会 ... 上海市声学学会 (04.3.177)
- 携手共进 再接再厉——写在《声学技术》入选中文核心期刊之际 丁玉薇 李秀红 (04.3.封3)
- George Wong 博士作声学标准研究报告 毛东兴 (04.4.204)
- 上海市声学学会被评为上海市科协星级学会 阎玉舜 (04.4.209)
- 《现代扩声系统优化设计研讨会》在上海召开 梁 华 (04.4.213)
- IEC/TC87:超声及其工作组2004年度工作会议在杭州召开 陈 毅 (04.4.228)
- 2004年上海超声医学论坛在上海华东医院召开 朱家安 (04.4.236)
- 上海市声学学会工业超声专业委员会2004年学术报告会在上海交通大学召开
..... 寿文德 (04.4.249)

+++++

(上接第257页)

- [34] 陶笃纯. 舰船噪声节奏的研究(I)—数学模型及功率谱密度[J]. 声学学报, 1983, 8(2): 65-76.
- [35] 陶笃纯. 舰船噪声节奏的研究(II)—自相关函数及其节奏信息的提取[J]. 声学学报, 1983, 8(5): 280-289.
- [36] 陶笃纯. 噪声和振动谱中线谱的提取和连续谱平滑[J]. 声学学报, 1984, 9(6): 337-344.
- [37] 陶笃纯. 信号和背景噪声的起伏对线谱检测器性能的影响[J]. 声学学报, 1983, 8(6): 352-363.
- [38] 陈耀明, 陶笃纯, 杨怡青. 舰船辐射噪声线谱的幅度起伏模型[J]. 声学学报, 1996, 21(4): 580-586.
- [39] 吴国清, 魏学环, 周钢. 提取螺旋桨识别特征的三种途径[J]. 声学学报, 1993, 18(3): 210-216.
- [40] 陈庚. 试用聚类分析对船只噪声和脑电图分类[J]. 声学学报, 1987, 12(4):
- [41] 刘健民, 向敬林. 船舶辐射噪声模式识别[J]. 水中兵器, 1990, 9(1): 15-19.
- [42] 吴国清, 李靖, 陈耀明, 袁毅, 陈岳. 舰船噪声识别(I)—总体框架、线谱分析和提取[J]. 声学学报, 1998, 23(5): 394-400.
- [43] 吴国清, 李靖, 陈耀明, 袁毅. 舰船噪声识别(II)—线谱稳定性和唯一性[J]. 声学学报, 1999, 24(1): 5-11.
- [44] 吴国清, 李靖, 李训浩, 陈耀明, 袁毅. 舰船噪声识别(III)—双重谱和平均功率谱的特征提取和模板图[J]. 声学学报, 1999, 24(1): 191-196.
- [45] 吴国清, 李靖, 李训浩, 陈耀明, 袁毅. 舰船噪声识别(IV)—模糊神经网络[J]. 声学学报, 1999, 24(1): 191-196.
- [46] LI Qihu, WANG Jinlin, WEI Wei. An application of expert system in recognition of radiated noise of underwater target[C]. Beijing: Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, 1989. 404-408.