

光特性等正在被越来越广泛地研究和应用。目前国内有一些高等学校和研究单位已开展了这方面的研究工作,所用的方法主要有射频(RF)磁控溅射,多离子束溅射,sol-gel,MOCVD等。主要研究的材料有PT,PZT,PLZT, Bi,Ti₃O₁₂以及一些压电材料如 ZnO, AlN 等。四川大学发展了多离子束反应共溅射技术(MIBRES)并用以制备了PLT系列薄膜,西安交通大学用sol-gel和RF磁控溅射技术制作了钛酸铅和其他铁电薄膜,中国科学院上海硅酸盐研究所采用RF磁控溅射技术制作了PLZT铁电薄膜,华中理工大学和湖北大学则采用sol-gel方法制备了BaTiO₃和PZT等铁电薄膜,南京大学和山东大学正在发展利用MOCVD方法制备铁电薄膜的技术,四川压电与声光研究所正在研究利用改进的RF磁控溅射方法制备PZT薄膜等。可以预期,我国铁电薄膜的制

备、表征和应用研究将取得较大进展。

- [1] R. A. Roy et al., *Ferroelectric Thin Films*, Materials Research Society Symposium Proceedings, Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania, USA Vol. 200, (1990), 141.
- [2] W. J. Takei et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, 7(1969), 442.
- [3] Xiao Dingquan and Yao Xi, *Ferroelectrics*, 108(1990), 53.
- [4] M. S. Ameen et al., *Ferroelectric Thin Films*, Materials Research Society Symposium Proceedings, Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, Vol. 200, (1990), 65.
- [5] K. Sreenivas and M. Sayer, *J. Appl. Phys.*, 64(1988), 1484.
- [6] A. Mansingh, *Ferroelectrics*, 102(1990), 69.
- [7] K. Wasa et al., *J. Lightwave Technol.*, LT-2(1984), 710.
- [8] T. Kawaguchi et al., *Appl. Opt.*, 23(1984), 2187.
- [9] H. Adachi et al., *Jpn. J. Appl. Phys., Suppl.*, 24-1 (1985), 121.
- [10] U. Takayama et al., *J. Appl. Phys.*, 61(1987), 411; 68(1988), 5868.
- [11] S. Baker, *VLSI Design*, No. 5(1988), 116.
- [12] D. Bondurant and F. Gnadinger, *IEEE Spectrum*, No. 7(1989), 30.

水声学中的信号处理

李启虎

(中国科学院声学研究所,北京 100080)

综述了水声学及水声信号处理的历史发展概况及它们在军事及民用方面的重要作用,介绍了与水声信号处理有关的换能器、布阵理论、波束成形理论、卡尔曼滤波、自适应滤波、目标识别、专家系统等课题,同时介绍水声信号处理中的一些现代技术,如FFT,Zoom FFT,LOFAR,DEMON及高分辨力谱分析的基本知识。

在我们人类居住的地球上,海洋的面积占70%,利用和开发海洋,长期以来就是人类社会活动的重要内容。

在人们所熟知的各种辐射形式中,以声波在海水中的传播为最佳。因为海水是电的良导体,无论是光波或电磁波在海水中传播时衰减很大,由于声波相对地来说容易传播,因此在利用和开发海洋的事业中,人们广泛地利用水声。

最早提到声音不仅存在于空气之中,而且也存在于海水之中的文献是意大利文艺复兴时期多才多艺的大师达·芬奇的一本笔记。达·

芬奇不仅留下了《最后的晚餐》、《蒙娜利沙》等不朽的传世之作,同时还是一位造船工程师。在1490年,也就是在哥伦布发现美洲大陆的前二年,他写道:“如果使船停航,将长管的一端插入水中,而将管的另一开口放在耳朵旁,则能听到远处的航船。”这实在是现代被动声呐的雏型。

水声的第一次定量测量,大约是在1827年进行的。由瑞士物理学家D. Collaton和法国数学家C. Sturmi合作在日内瓦湖测量声音在淡水中的传播速度,他们通过测定闪光和水下

钟响之间的时间间隔,相当精确地测出了声速。但是直到 19 世纪末之前,人们除了用机械方法在水中产生声音之外,还找不到其他途径。同时,也没有办法把水中的声音以某种方式加以提取。

1880 年,雅克和居里发现了电声之间的换能效应,也就是压电晶体。他们发现,有些晶体在受到压缩时会在晶体表面出现电荷,反之,在晶体表面加以交变电流会使晶体发生有规律的收缩和扩展。这就为水中声音的产生及接收提供了直接的工具。

1912 年在巨型客轮“铁坦尼克”号与冰山相撞后的一个月,英国人 L. F. Richardson 向专利局提出了用回声定位测定冰山位置的申请。遗憾的是,他的这一想法未能实现。

水声学的真正的快速发展是由于第一次世界大战和第二次世界大战的推动。为了对付潜艇,参战各方都投入了巨大的人力和物力研究水中的回声定位技术。其中,奠基性的工作应是法国著名物理学家朗之万的研究结果。使用一种石英-钢的夹心换能器同时又利用真空管放大器,这是电子学在水声中的第一次应用。我国水声界元老,中国科学院学部委员汪德昭先生就是第二次大战前到法国与朗之万博士共事的。

海洋作为声传播的介质具有非常复杂的特性,早在本世纪 20 年代,德国科学家们就已发现,声波的传播距离在夏季要比冬季短。这是因为夏季的声线向下折射而冬季的声线向上折射的缘故。1937 年美国科学家 R. L. Steinberger 观测到了神秘的“午后效应”,他指出了海水中的温度随深度的变化会影响传播结果。当时发现,在无风和太阳的下午,回声测距所观测到的距离有规律地减少。最初,认为是生物的原因,怀疑是由于光合作用产生气泡或声呐员午饭后懒散所致。R. L. Steinberger 的研究揭开了这个谜。他使科学家们真正了解到要把水声学作为一门实验科学和理论科学加以探讨的必要性。实际上,随着军事上应用的进展和民用海洋开发方面的推动,水声学已是一门

和水声物理、水声工程、换能器、计算机科学、人机工程、信号处理及微电子学有关的边缘学科。而水声信号处理正是一门处于理论与应用结合的边缘学科。

如前所述,水声学作为一门科学的发展史是与军事应用密切相关的。而水声信号处理更是与声呐的研制与发展分不开的。早期的声呐几乎没有什么信号处理的结构,随着声呐技术的发展,信号处理的技术有了长足的进步。同时由于信号处理理论(包括信息论、控制论、人机工程等学科)的发展,又反过来对声呐技术起着推动作用。特别是数字信号处理技术的发展,已使声呐的面貌发生了根本性的变化。一般认为,水声信号处理作为水声学的一个分支,是在 50 年代初期确立其地位的。在此之前,声呐设计者还没有意识到主动利用信号处理技术的重要意义。美国著名水声学专家 V. C. Anderson 在 1972 年总结水声信号处理 20 年的发展史时指出,由于相关技术,快速傅里叶变换技术,波形设计,匹配滤波,信道匹配等课题的研究,使声呐性能提高到空前的水平。

当然,随着水声学的发展,水声信号处理技术的应用已不只限于军事方面。海上石油勘探、捕鱼、导航、通信,海上救助等方面也越来越多地借助于水声学的知识。

图 1 概括了水声学应用的各个领域。当声源在水下发声时(这种声源可以是海洋生物的噪声、舰艇的辐射噪声等),我们可以用水听器把声音接收到,在简单的情况下,把发射体看作是一个点源,把多个水听器放在水下就可以根据它们接收到的声波的延时差来确定发声体(或称为目标)的距离及方位。在一般情况下,频率较低的声信号可以传输得比较远。但是由于低频信号的波长较长,所以用低频信号来定位也较困难。

现代的各种声呐,包括军用的和民用的,几乎都是利用在水下的水听器阵列再加以信号处理来探测目标的。例如,美国的岸用反潜预警体系,就是在沿美国东西海岸布放上千个水听器来接收信号的。所有的信号被传送至反潜数

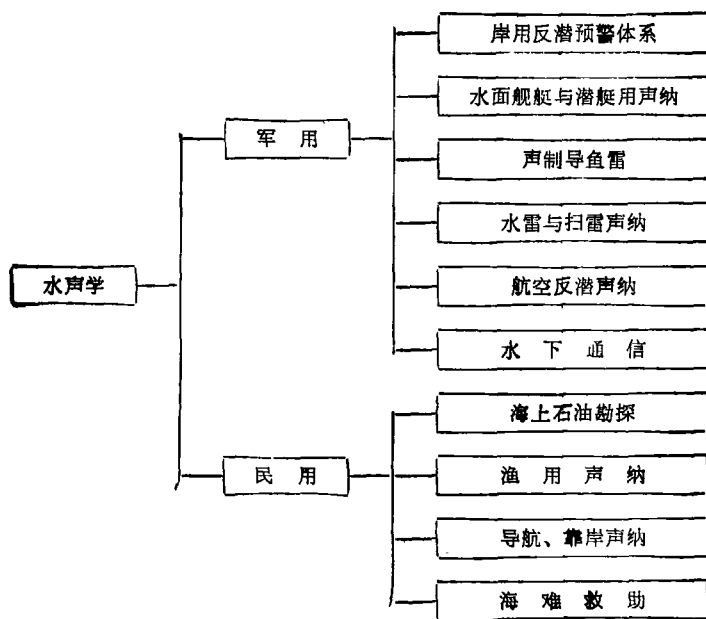


图1 水声学的应用领域

据处理中心,提取有关目标的信息。

舰艇或鱼雷上用的水听器阵列在体积上要小得多,因而所用的频率也相对较高。但是有的攻击型核潜艇上面使用一种舷侧阵,就是把水听器沿着艇壳排列。这样使有效的阵列尺寸加大,提高了检测能力。

在舰艇上使用的声纳,由于本舰噪声的干扰会使声纳的检测能力受到影响。自60年代末以来,人们研制了一种拖曳式线列阵声纳。在

舰艇上使用绞车把一个相当长的拖缆拖在舰船的后边,这样使声纳的接收换能器远离本舰螺旋桨噪声。同时,接收线列阵可以使用较大的尺寸,从而提高了检测能力。这种拖曳线列阵声纳目前广泛地使用于水面舰艇及潜艇,同时又在海上石油勘探中得到广泛应用(见图2)。

军事上应用的拖曳线列阵声纳与海上石油地质勘探声纳从原理上说是一样的。但也有一些重要的差别。从使用频率范围上来讲,军事

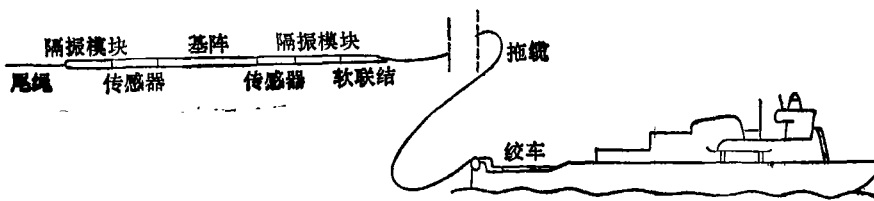


图2 军用与民用拖曳式线列阵声纳示意图

用的在100Hz以上,民用的一般在120Hz以下;从功能上讲,军用的通常是被动监听声纳,而民用的还要有水下空气枪,造成人为地震,然后由回波来判读。

我国已建立了自己的海上石油勘探队伍。用拖曳式线列阵在渤海、北海、东海及南海开展寻找近海油气田的工作。

靠岸声纳是民用声纳的另一种代表。主要用于大型油轮进港时的机动及靠岸,具有精度高的特点。由中科院声学研究所研制的靠岸声纳是我国十大专利金奖产品之一,受到广泛好评。

海难救助是水声的另一个重要应用领域。其中最重要的是所谓声发(SOFAR)声道。在深

海中存在最小声速的深度（大约在 1000m），进入这一深度的声线由于折射连续不断地反转，很少进入水面及海底，从而损失很小，可以传播到很远的地方。美国曾在百幕大附近的亚速尔群岛投掷 1—2 磅炸药，利用 SOFAR 声道，可以在几千哩之外的新西兰收到爆炸声。这种现象的最早应用是用于测定落海飞行员的位置，引导救援飞机营救。现在已成为美国发射洲际弹道导弹时弹着点测定装置（MILS）的一部分了。

水声学的应用领域是多种多样的，除了上

面简单介绍的以外，还有水下机器人、水下自动应答器等。1986 年美国航天飞机挑战者号遇难时，其残骸就是由 Perry 公司的水下机器人从大西洋底打捞上来的。随着海洋开发的进展，水声学的应用领域将进一步扩大。

作为水声学的一个核心部分的水声信号处理技术，正在起着越来越大的作用。因为它是信息获取、储存、加工和显示的综合利用。各种大规模数字信号处理芯片的使用，使得信号处理的结构发生了重大变化。目前正在研究具有人工智能的第五代数字信号处理机。

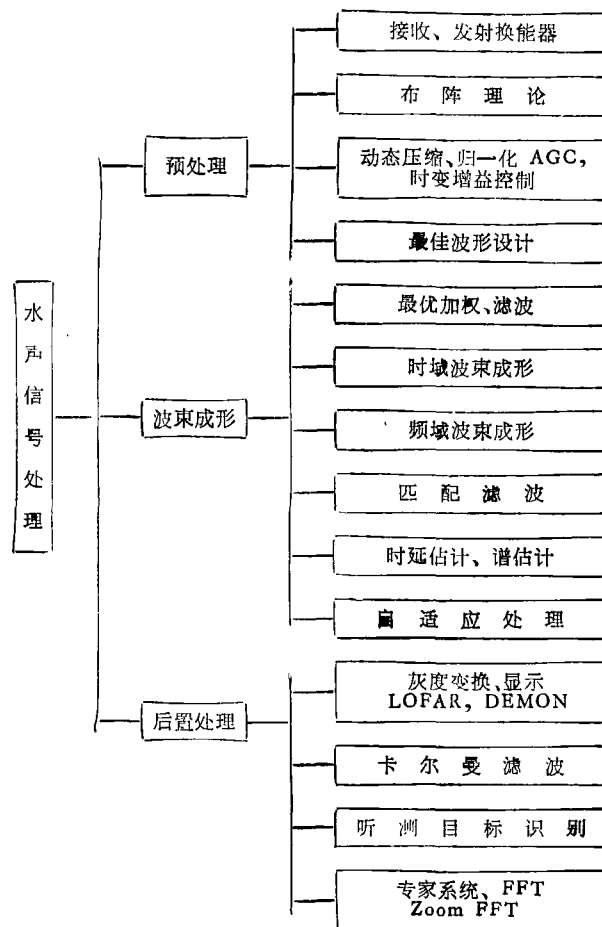


图 3 与水声信号处理有关的技术

图 3 给出了与水声信号处理相关的技术。

在这个图上，我们把水声信号处理按它的功能分为三个部分：预处理、波束成形和后置处理。

和预处理有关的是接收换能器及发射换能器

设计及工艺学。对于发射换能器通常要求设计频带宽、功率大、电声转换效率高和体积小的发射换能器。至于接收换能器（亦叫作水听器）通常是多个使用，希望灵敏度高、频响一致及无相位差。这些要求之间往往是互相矛盾的，这

就必须进行折衷。布阵理论着重于研究在海洋环境场中的基阵安排,使得在噪声背景下最大限度地提取信号。由于声信号的动态一般非常大(例如 80dB),所以必须进行动态压缩或自动增益控制,这也是预处理的一个重要任务。此外,波形设计主要用于主动声呐,选择最佳波形,使得在同样发射功率下能发现较远处的目标。

波束成形把水听器阵信号进行处理,使声呐在水平面或垂直面上进行扫描,从而达到 360° 全景观察的目的。为了使检测增益尽量大,必须使波束非常窄的旁瓣电平又非常低,为了作到这一点,目前使用的有两种波束成形技术,一种是时间域的波束成形技术,一种是频率域的波束成形技术。前者对时空采样样本进行延时补偿形成定向波束,后者对各通道的时空采样进行快速傅里叶变换(FFT),在空间形成多个波束。为改善波束性能还必须对信号进行滤波加权或升采样率的运算。

近年来,又发展了一种自适应信号处理技术。它可以根据环境噪声的缓慢变化自动抵消强干扰,使得对弱信号的检测更加容易一些。这实际上是一种自学习系统,目前已在若干声呐中得到应用。

延时估计与谱估计主要用于对目标的精确定向或被动测距。由于水声信号在传播过程中受到水面和水底的多次反射,特别是在浅海,存在着严重的所谓“多途效应”,使得目标的定位和测距变得十分复杂。在对水声信道进行深入研究之后已经提出若干种信道匹配技术可以部

分消除多途效应,从而使测向和测距变得容易一些。

后置处理是把已经获得的信息最大限度地利用起来,提供给人类的视角和听觉。为了适应人眼的观测,普遍采用一种灰度变换技术,使得对小信噪比的信号也能较容易地检测到。现代计算机用的高分辨力彩色显示器,可以移植到声呐中获得很好的效果。

声呐系统的一个重要功能是目标的自动跟踪。现在常用的方法是卡尔曼滤波方法。这是一种根据量测信号进行反馈调整的技术,可以在一定背景噪声下保证对目标的跟踪。老式声呐对目标的判别都是依赖于声呐员的,随着数字信号处理技术的发展,人们已开始研究机助识别与简易专家系统。把专家的知识及声呐员的经验结合起来,按一定的推理规则作出判别,这种结论具有专家的水平。

我们已简单地介绍了水声信号处理技术的各主要领域以及与其有关的军用和民用部门。水声学的发展虽然一开始是从为战争服务为目的的,但是随着海洋开发事业的进展,越来越多地在民用方面得到重视并发挥效应。在今后,虽然军事的需求仍是水声学发展的强大动力,但不可否认,海上石油勘探、海上考古、海洋资源开发和海洋环境监测、海难救助等事业也会越来越多地依赖水声学。随着现代电子技术,特别是微电子技术的发展,水声信号处理技术必将取得更大的成就,从而对军事应用和海洋开发起到更大的作用。

(上接第 704 页)

的误动作率降低到最低限度。

在功能方面,主要是考虑照明自动控制的应用。现有的红外报警器无法对照明进行不间断控制,即不具备人在灯亮并且不产生间断的所谓记忆判别功能。我们综合考虑了热释电传感器的探测灵敏度,人体移动的频率范围等情况,设计了一个重复触发记忆电路,使控制器具备了一定的记忆功能,保证了人在灯亮连续照明不产生间断。

在控制器的输出控制部分,采用了光电耦合的驱动形式来直接控制双向可控硅的开关,并且应用了双

向可控硅零电压触发与零电压关闭的技术,克服了通常可控硅任意触发或关闭对网络产生的谐波干扰。另外由于输入与输出为光电隔离,负载与控制器相互间不会造成干扰,控制器部分还具有无触点、开关无火花及控制电流大的特点。该装置体积小便于安装。

此外,本仪器用于防盗报警,除了要求对电路的抗干扰外,由于整机工作在低频微弱信号状态下,对于工作的电源也要求有较小的纹波,以及对外界的干扰有良好滤波。

综上所述,本控制器具有抗干扰能力强、控制灵敏、使用方便等特点。(上海长虹灯具厂 熊建国)