



国防特色教材·船舶与海洋工程

水下声信道

Marine Navigation Systems

惠俊英 生雪莉 编著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社
哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社
西北工业大学出版社



国防特色教材·船舶与海洋工程

水下声信道

惠俊英 生雪莉 编著

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书在水声物理和声呐工程设计之间架起“桥梁”,从通信论的观点出发,以工程技术人员易懂的数学方法,深入、系统地论述了水下声信道的描述方法、特性及其对水声系统的影响。全书共9章,主要内容有:海洋声学基本回顾与声呐方程,矢量声学基础概念,平均能量信道,相干多途信道,随机时变空变信道理论基础,缓慢时变的相干多途信道特性,混响信道等,本书还针对主动声呐目标识别问题,深入研究了主动声呐目标信道特性。为了使读者深入理解本书的知识,在本书的最后给出了与当今声呐应用密切结合的典型例子。本书收集了大量的海上试验资料以说明水下声信道传输特性的物理图像。

本书是关于水下声信道的一部专著,可供水声定位导航、基阵与传感器设计、水下目标特性、水声图像与通信、水下噪声测量与控制及矢量声学等领域的广大技术人员学习与参考,也可作为高等院校和科研院所水声专业高年级本科生、研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水下声信道/惠俊英,生雪莉编著. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社,2011.2

ISBN 978 - 7 - 5661 - 0010 - 8

I. ①水… II. ①惠… ②生… III. ①水声通信 - 通信信道 - 研究 IV. ①TN929.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 013740 号

惠俊英 生雪莉 编著
张林峰 责任编辑

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街 124 号 发行部电话:0451 - 82519328 传真:0451 - 82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

黑龙江省教育厅印刷厂印刷 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:11.75 字数:249 千字

2011 年 3 月第 1 版 2011 年 3 月第 1 次印刷 印数:1000 册

ISBN 978 - 7 - 5661 - 0010 - 8 定价:26.00 元

前 言

海洋是人类的资源宝库,也是兵戎相见的战场。随着科学技术的不断进步,信息化、现代化的海洋研究及海洋资源的合理开发日益受到注目。由于声波在海洋中较任何其他物理场都传得远,具有独特的优点,因而它就成为探测和研究海洋的有力工具,水声技术因而得到发展。随着海洋能源与矿产资源勘探开发事业的发展,也由于军事需求的牵引,水声技术今天已成为一门重要的声学应用学科,我国的水声技术近年来也取得了长足的进步。

水声设备必须和环境相匹配才能达到优化设计的目标。但是,一般来说,电子工程师们不甚了解海洋环境对声呐系统的影响,而水声物理工作者尽管有广博的水声信道知识,却并不深切了解工程设计的需要。本书将在他们之间架起“桥梁”,尝试以工程师们易懂的数学和语言来讨论海洋声信道对声呐系统的限制和影响,尤其是从声呐信号处理的角度来研究海洋,因而海洋被看作水下的“声信道”。

从通信论的观点来看,将声源和接收水听器之间的海洋看作一个线性滤波器,它是一个时变、空变的复杂的随机滤波器。“水下声信道”就是研究该滤波器的结构、特性及其对声呐信号处理的影响,以便有可能使声呐信号处理器与海洋环境相匹配。人们若对水下声信道的复杂性认识不足,则必使之不能达到设计目标;若对其复杂性估计过分,则必使之设计代价过高。尽管不同应用场合的水声设备的环境条件千差万别,但是对于大多数应用场合来说,水下声信道可以看作“缓慢时变、空变的相干多途信道”,这是本书的基本观点。

全书由9章组成,第1章简要回顾了声学基础知识以及声呐方程;第2章讨论了仅存在传播损失的海洋信道的特性;第3章至第6章围绕水下声信道的时变、空变性展开讨论,阐述了将水下声信道视为“缓慢时变、空变的相干多途信道”这一观点;第7章针对主动声呐目标识别问题,深入研究了主动声呐目标信道特性;为更好地起到“在声学和水声工程之间架起桥梁”的作用,在本书的最后一章给出了与当今声呐应用密切结合的典型例子,让读者在实例中深化声信道的概念。

本书是关于水下声信道的一部专著,可供水声定位导航、基阵与传感器设计、水下目标特性、水声图像与通信、水下噪声测量与控制及矢量声学等领域的广大技术人员学习与参考,也可作为高等院校和科研院所水声专业高年级本科生、研

究生的教材或参考书。书中内容力求精简,数学力求简单,收集试验资料力求充实,以便使读者易于理解本书的基本观点。希望本书能对读者的工作和学习有所裨益。

本书由哈尔滨工程大学惠俊英、生雪莉合作编著,惠俊英教授主编,并对本书统稿。书中声压反转镜和矢量反转镜等章节由生雪莉副教授编著。

本书的部分初稿得到哈尔滨工程大学杨士莪院士和已故的海军工程学院郑兆宁教授的指导。殷敬伟、梅继丹讲师,杨娟、姚直象博士等同志为本书审稿工作付出了辛勤的劳动,在此深表感谢。

限于水平和经验,本书的不足之处敬请读者指正。

本书的编写与出版工作得到了哈尔滨工程大学“十五”研究生教材建设专项基金的资助,在此特表感谢。

编著者

2011.2

于哈尔滨工程大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 机械振动	2
1.3 声波的基本概念	4
1.4 声学欧姆定律	7
1.5 矢量声学基础概念	8
1.6 声呐系统及声信道模型	11
1.7 声呐方程	13
习题	16
第 2 章 平均能量信道	18
2.1 海水中的声速度	18
2.2 海水中的声吸收	20
2.3 海洋环境噪声	22
2.4 海底反射损失	24
2.5 分层介质射线声学	26
2.6 等梯度水层中的声线和声场	29
2.7 深海声传播方式与扩展损失	33
2.8 浅海的 Pekeris 模型	35
习题	40
第 3 章 相干多途信道	41
3.1 相干多途信道的系统函数	41
3.2 相关器和匹配滤波器	45
3.3 信号模糊度函数	47
3.4 拷贝相关器在相干多途信道中的响应	51
3.5 自适应相关器	53
3.6 自适应相关器在相干多途信道中的响应	56
3.7 相干多途信道中的互相关	59

3.8 简正波垂直过滤抗近场干扰 ^[9]	63
3.9 低频近程声场的干涉结构	69
3.10 声压时间反转镜	72
3.11 矢量时间反转镜	75
习题	78
第4章 随机时变空变信道理论基础	79
4.1 随机声场的一般概念和描述	79
4.2 声信号起伏	81
4.3 时变信道的系统函数	83
4.4 随机时变信道的系统函数	86
4.5 广义平稳信道(WSS信道)、非相关散射信道(US信道) ^[23]	88
4.6 广义平稳非相关散射信道(WSSUS信道)	89
4.7 散射函数	90
4.8 相干函数	94
4.9 基阵的指向性函数	95
4.10 随机空变信道	96
4.11 被动声呐的物理模型	99
4.12 直线阵在随机空变信道中的响应	102
习题	104
第5章 缓慢时变的相干多途信道	105
5.1 散射函数的实验结果	105
5.2 信道相干性的测量方法——脉间相关法	108
5.3 缓慢时变的浅海相干多途信道的修正匹配	111
5.4 深海相干信道的修正相关匹配	115
5.5 缓慢时变相干多途信道中自适应相关器的响应	117
5.6 相干信道中运动声源的系统函数	121
5.7 目标运动时互相关的损失	124
习题	127
第6章 混响信道	128
6.1 混响的平均特性	128
6.2 混响的散射函数	133
6.3 混响谱的多普勒扩展	135

6.4 混响的其他统计特性	138
6.5 抗混响	139
习题	140
第7章 声呐目标信道	141
7.1 点目标	142
7.2 相干点目标信道	144
7.3 多亮点目标模型	144
7.4 潜艇的目标强度的一般特征	147
7.5 运动平台辐射噪声概述	147
7.6 舰船辐射噪声亮点模型及声图	151
第8章 浅海声场相干结构	154
8.1 浅海近程声场相干结构	154
8.2 浅海波导中简正波声场的干涉结构	158
8.3 波导不变量 β	165
第9章 应用实例	168
9.1 询问应答器最佳工作频率	168
9.2 被动声呐作用距离估算	169
9.3 三元阵被动测距声呐基础	171
9.4 单矢量传感器被动探测原理	172
9.5 动目标检测器	174
参考文献	178

第1章 绪 论

1.1 引 言

海洋是地球上蓝色的宝石。21 世纪的人类将更多地依靠海洋资源,将更多地从海洋中获取食物、能源和矿产,并从海洋中探索地球的奥秘。

自从人们认识到声波是海洋中能传播最远的物理场时,声波就成为研究和探索海洋的主要工具。现在,随着海洋开发事业的发展和军事上的需要,水声技术已造就成一支不可忽视的产业大军并成为高技术领域中的一枝新秀。水声技术已经广泛应用到导航、水下观察、水下通信、渔业、海洋开发、海底资源调查和海洋物理研究等方面,尤其是应用在军事方面,水声技术是潜艇作战和反潜作战、水雷战和反水雷战中的关键技术。目前,世界各大国竞相发展水声技术。

尽管声学有悠久的源流,但水声学却是年轻的近代科学。自 18 世纪初, D. Colladon 和 C. Sturm 在 Genfer 湖首次巧妙地测量了水中声波的传播速度,开始了水声技术的研究。起初,水声技术受到人们注意是由于军事上的需要。第一次世界大战(1914—1918)中德国潜艇使协约国损失了舰船总吨位的 1/3,人们才开始关注研究利用声波来探测潜艇。1916 年—1918 年,著名的法国物理学家 Langevin 和俄国工程师 Chilosky 研制成功了主动式声呐装置,成功地接收到 1 500 m 以外水下潜艇的回声。但是,声呐在第一次世界大战中并未得到应用。尔后,由于电子技术和电声换能器的发展,声呐技术才步入应用阶段。第二次世界大战期间,水声设备已趋完善,在潜艇作战和反潜作战中起了重大作用。然而,水声技术的飞速发展却是在第二次世界大战以后,低频、大功率、大基阵成为当时声呐技术发展的趋势,特别是对表面声道、海底反射声道、深海声道和声会聚区效应等传播方式的成熟的研究,更使得声呐的作用距离在 20 世纪 60 年代初提高了一个数量级。20 世纪 50 年代初,雷达技术中成功地使用了匹配滤波技术,从而使它的作用距离得到了飞跃,刺激了人们在此后的 20 年中在声呐技术上研究匹配滤波技术。然而却没有收到雷达技术领域中的相应的好效果。这使人们进一步意识到水声信道是远较雷达信道更为复杂的信道,因而声信道理论在 20 世纪 70 年代初开始受到关注。低频、大基阵和以高速计算机为中心的实时获得海洋声信道的信息并实时进行自适应处理的声呐系统,已成为当今声呐技术发展的新潮流。

声呐发射换能器基阵或发声源发出携带信息的声波,通过海洋到达声呐接收水听器基阵,声呐系统对所接收的信号进行处理,从而作出判决,确定是否存在目标及目标的状态参数、目标的种类,或者恢复目标发出的源信息,这就是声呐系统工作的全过程。从通信论的观点来看,海洋就是声信道。理想的信道能无畸变地传递信息,但海洋不是理想的,而是复杂多变的。只有充分

认识海洋声信道对声呐系统的限制,人们才能逐步使声呐系统与海洋环境相适配,以便获得较好的检测效果和识别能力。海洋声信道不但对目标辐射信号进行能量变换,而且进行信息变换。相干多途到达的信号将使接收信号波形产生畸变而显著区别于源辐射波形。海洋声信道是随机时变、空变的,因而更为复杂,在传输过程中,信息不但受到变换而且造成损失。声信道理论将研究信道对信息进行的各种变换以及声呐系统如何与声信道相适配的问题。

作者注意到下列问题:一方面大多数水声技术工程师尽管对信号处理和系统设计有足够的知识,但是他们并不十分理解复杂的海洋环境对声呐设备的影响;另一方面海洋物理学者和水声物理工作者虽然对海洋环境及其研究有广博的知识,但是他们也不十分认识这些知识与声呐系统工作的关系。于是,本书力图在这两者之间架设“桥梁”和沟通渠道。作者将本书奉献给声呐工程师和水声专业的高年级本科生和研究生,用工程技术工作者容易接受的语言和数学来介绍海洋环境对声呐系统性能的限制以及探讨二者的适配。本书对在雷达和通信领域中从事研究的技术人员也有参考价值。

1.2 机械振动

常言“振动发声”,其意为声波源于振动,声波是振动在介质中的传播。

所谓振动,是指质点围绕着平衡点的往复运动。

一个实际的振动系统往往是很复杂的,如何来研究它呢?物理学家认为,没有模型就没有科学,研究任何实际的物理问题都需要抽象成物理模型。任何有价值的物理模型都必须具有两个特点:一是要尽可能简单,以便能用尽可能简便的数学工具来分析;二是它必须是真实物理问题的拷贝,即它必须包括实际问题的主要矛盾。模型的正确性必须用实验来验证,模型也只有在一定条件下才是正确的、有价值的。任何振动系统在足够窄的频带内都可以抽象成简单“单自由度质点振动系统”的振动模型来研究。本节研究这一简单的振动模型的目的在于阐明振动的基本概念。

图 1.1(a)是单自由度振动系统的示意图。弹簧 D 下面挂了一个钢球 m ,弹簧为弹性元件,钢球为质量元件。取钢球的平衡位置为坐标轴 x 的原点。若由于某种原因,钢球有一个初始的位移,则就激发振动,即钢球将围绕平衡位置作往复运动。图 1.1(b)是水声换能器的结构示意图,它可以抽象成单自由度振动系统模型来研究,图中相应的字符表示相应作用的等效元件。

钢球偏离平衡位置有位移 x 时,弹簧被压缩或拉伸。弹簧所产生并作用于钢球的弹性力为 f ,它的大小与位移大小成正比,方向与位移方向相反。即

$$f = -kx \quad (1.1)$$

式中,比例常数 k 为弹性系数,它的倒数称为柔顺系数 C_M ,即

$$C_M = \frac{1}{k}$$

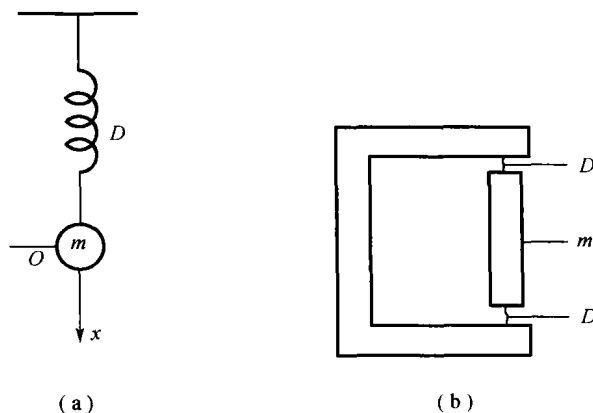


图 1.1 单自由度振动系统

(a)单自由度振动系统;(b)水声换能器结构

忽略弹簧的质量和重力的影响,根据牛顿第二定律,可以得到钢球的运动方程为

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0 \quad (1.2)$$

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}$$

式中 m ——钢球的质量;

ω_0 ——振动系统的角谐振频率。

式(1.2)的解为

$$x(t) = C_1 \cos \omega_0 t + C_2 \sin \omega_0 t = C \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (1.3)$$

$$C = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}, \quad \varphi = -\arctan\left(\frac{C_2}{C_1}\right)$$

可见,钢球作谐和振动时,钢球围绕着平衡位置按正弦或余弦的规律作往复运动。 C 称为振幅, φ 称为初相位。

对于熟悉电振荡理论的读者来说,引进机电类比的概念是十分有用的。单自由度振动系统和单谐振回路具有相同形式的微分方程,因此尽管他们的物理性质不同,但是表征机械振动和电振荡的特征量具有相同的函数形式,它们遵循的数学关系式是相同的,因而它们是可以类比的。下面给出了机电类比的某些关系,如图 1.2 所示。

$x(t)$ 为位移;

$$v(t) = \frac{dx}{dt} (\text{振速}) \leftrightarrow i(t) (\text{电流});$$

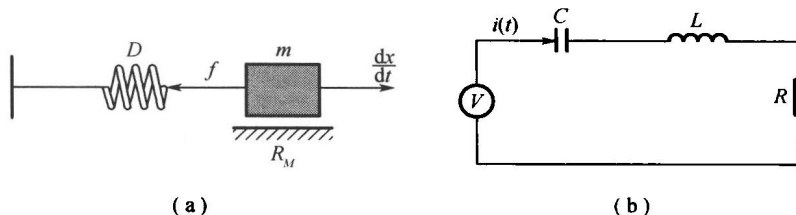


图 1.2 机电类比关系图

(a)单自由度振动系统;(b)单振荡回路

$$f(t)(\text{力}) \leftrightarrow V(t)(\text{电压});$$

$$m(\text{质量}) \leftrightarrow L(\text{电感});$$

$$C_M(\text{柔顺系数}) \leftrightarrow C(\text{电容});$$

$$f(t) = F e^{j\omega t} \leftrightarrow V(t) = V e^{j\omega t};$$

$$\frac{dx}{dt} = V_M e^{j\omega t} \leftrightarrow i(t) = I e^{j\omega t};$$

$$Z_M = F/V_M(\text{机械阻抗}) \leftrightarrow Z = V/I(\text{电阻抗});$$

$$Z_M = R_M + j\left(m\omega - \frac{1}{\omega C_M}\right) \leftrightarrow Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right);$$

$$P_M = \frac{1}{2} |F| |V_M| \cos \varphi_M(\text{机械功率}) \leftrightarrow P = \frac{1}{2} |I| |V| \cos \varphi(\text{电功率});$$

$$\varphi_M(\text{力和振速的相位差}) \leftrightarrow \varphi(\text{电压和电流的相位差})$$

$$Q_M = \frac{\omega_0 m}{R_M}(\text{机械品质因数}) \leftrightarrow Q = \frac{\omega_0 L}{R}(\text{电品质因数}).$$

1.3 声波的基本概念

本节非常浅近地讨论声波的基本概念,是奉献给非声专业的读者或初学者的,叙述不求雅致而求通俗。

振动在介质中传播叫做声波,振动源就是声源。最简单的声源是均匀脉动球,该球面上各点作谐和振动,各点振速大小相同,相位一致,振速的方向指向辐射方向,即振速方向与球面相垂直。介质受到声源振动的扰动,介质中各点也必然作谐和振动,各点处的介质被压缩或拉伸(稀疏)。介质受压产生超压,叫做声压。振动状态在介质中的传播速度称为声速。对于谐和声波来说,可用相位来表征振动的状态,即若设无限小的均匀脉动球面上的振速为

$$v(t) = V_M e^{j\omega t}$$

考虑到声源和介质都是球对称的,不难理解声波也应该是球对称的。距离声源 r 处的介质质点将滞后时间 r/c 重复声源在 t 时刻的振动状态, c 为声波在介质中的传播速度,因而距离声源 r 处的振速可写为

$$v(r, t) = V_M(r) e^{j\omega[t - (r/c)]} \quad (1.4)$$

式中, $V_M(r)$ 表征声波的振幅随着距离 r 的变化规律; 因子 $\omega\left(t - \frac{r}{c}\right)$ 表征介质质点振动的相位。等相位面称为波阵面。式(1.4)表示的波阵面是球面。对于给定 r 的球面上各点具有相同的振动相位, 即具有相同的振动状态。波阵面的传播速度即为声波的相速度, 简称为声速度。

众所周知, 在讨论光的传播现象时, 有光的射线说和光的波动说两种。光的射线理论认为光的能量是沿着光线传播的, 在均匀介质中光线是直线。下面简要的叙述声传播的射线理论。声的射线理论认为: 声能沿着声线传播, 声线与波阵面相垂直, 一系列的声线组成声线束管, 从声源发出的声能, 在无损耗介质中沿着声束管传播, 其总能量保持不变, 因而声强度与声束管截面积成反比。

下面用射线理论来考察脉动球的声场。前面已说明了脉动球声场的波阵面是一系列的同心球面。声线即为一系列由声源发出的辐射线, 它们与波阵面相垂直, 如图 1.3 所示。因而声线束管的截面积随距离 r 增加按其平方规律增加, 声强度按其平方规律减小。由于波阵面的扩展而导致的声强度减小被称为“几何损失”, 上述规律称为球面波衰减规律。由于声强度和距离平方成反比, 故振速和距离成反比, 于是式(1.4)可以改写为

$$v(r, t) = \frac{A}{r} e^{j\omega\left(t - \frac{r}{c}\right)} \quad (1.5)$$

式中 A 为常数, 它取决于声源的功率。

描写谐和声场中某一点声振动的物理量有声压、振速和声功率, 描写声振动的参数有频率、振幅和相位。

波阵面为平面的声波称为平面波, 波阵面为球面的声波称为球面波。表 1.1 列出它们基本物理量的关系式。

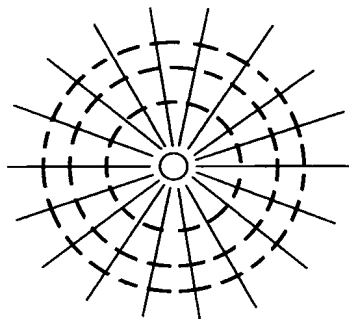


图 1.3 脉动球声场的声线和波阵面

表 1.1 球面波和平面波的基本物理量

物理量	球面波	平面波
振速	$v(r, t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} = V(r) e^{j(\omega t - kr)}$	$v(x, t) = A e^{j(\omega t - kx)} = V e^{j(\omega t - kx)}$
声压	$p(r, t) = \frac{B}{r} e^{j(\omega t - kr)} = P(r) e^{j(\omega t - kr)}$	$p(x, t) = B e^{j(\omega t - kx)} = P e^{j(\omega t - kx)}$
声强	$I(r) = \frac{1}{2} V(r) P(r) = \frac{ P(r) ^2}{2\rho c}$ $= \frac{1}{2} \rho c V(r) ^2 \propto \frac{1}{r^2}$	$I = \frac{1}{2} V P = \frac{ P ^2}{2\rho c}$ $= \frac{1}{2} \rho c V ^2$

表 1.1 中 A, B 为常数, 取决于声源的功率。 ρ, c 分别为介质密度和声速度。

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

式中, k 称为波数; λ 为波长; f 为声波的频率。

声压的单位如下:

$$1 \text{ 帕 (Pa)} = 1 \text{ 牛顿/米}^2 (\text{N/m}^2)$$

$$1 \text{ 微巴 } (\mu\text{bar}) = 10^{-5} \text{ 牛顿/厘米}^2 (\text{N/cm}^2)$$

$$1 \text{ Pa} = 10 \mu\text{bar}$$

$$1 \mu\text{bar} = 10^5 \mu\text{Pa}$$

声强的单位: 焦耳/米² (J/m^2)

在空气中, 人们对 1 000 Hz 纯音的闻阈(可听级)约为 2×10^{-5} Pa, 通常在室内高声谈话时的声压约为 0.1 Pa 左右。在水中, 水声设备接收的弱信号其声压约在 0.1 Pa 左右。一磅(约 0.45 kg)的 TNT 炸药, 在水下爆炸时, 100 m 处的声压峰值约为 2×10^5 Pa。在空气中, 1 Pa 的声压对应的振速约为 2.4×10^{-3} m/s, 在水中对应的振速约为 7×10^{-7} m/s。

对于空气, $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$, $c = 331 \text{ m/s}$, 声波阻抗 $\rho c = 430 \text{ kg/(s} \cdot \text{m}^2)$; 对于水, $\rho = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $c = 1500 \text{ m/s}$, 声波阻抗 $\rho c = 1.5 \times 10^6 \text{ kg/(s} \cdot \text{m}^2)$ 。

在声学中常用声级表示声强或声压的大小, 其定义为

$$IL = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 20 \lg \frac{P}{P_0} \text{ (dB)}$$

式中, P_0, I_0 分别为参考声压和声强。

在空气声学中 p_0 为闻级, 即 $p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa; 在水声学中, 按目前的国际标准取 $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$ 。因此, 在水中 0.1 Pa 的声压, 可称之为该点的声强级为 10 dB。历史上, 曾取 $p_0 = 1 \mu\text{bar}$, 许多文献的资料均取此参考声压, 读者应特别予以注意。本书中一律以当今国际标准为准, 否则将特别予以说明。

1.4 声学欧姆定律

众所周知,加在一个电阻上的电压和通过它的电流的比值为常数,其比例系数即为电阻值,有

$$\frac{V(t)}{i(t)} = R \quad (1.6)$$

称为欧姆定律。

若电路中含有电感和电容,则式(1.6)推广为

$$\frac{V(t)}{i(t)} = Z(\omega) \quad (1.7)$$

式中, $Z(\omega)$ 称为复数阻抗。

例如,对于图 1.2(b)中所示的单振荡电路,有

$$Z(\omega) = R + jX = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (1.8)$$

式(1.6)表明,若阻抗为实数,电压的波形是电流波形乘以一常数,两者具有相同的波形;对于正弦振荡,电压和电流是同相位的。若阻抗是复数,电压和电流有相位差,或者,对于宽带信号,二者的波形将不相同。

下面来讨论声学问题。

考察谐和声波,即声波的时间函数为 $e^{j\omega t}$, 加速度 $\mathbf{a}$ 是振速 $\mathbf{v}$ 的时间导数,有

$$\mathbf{a} = j\omega \mathbf{v} \quad (1.9)$$

根据牛顿定律有

$$\begin{aligned} -\nabla p &= j\omega \rho \mathbf{v} \\ \nabla p &= -j\omega \rho \mathbf{v} \end{aligned} \quad (1.10)$$

式中,左边声压梯度 $-\nabla p$ 即力; ρ 为介质密度; ω 为角频率。

若声波为谐和平面波,1.3 节的表 1.1 中列出的平面波声压 $p(x, t)$ 为

$$p(x, t) = P e^{j(\omega t - kx)} \quad (1.11)$$

式中, P 为声压幅度;波数 $k = \frac{\omega}{c}$, c 为介质声速。

将式(1.11)代入式(1.10)就得到

$$\frac{p(t)}{v(t)} = \rho c \quad (1.12)$$

式(1.12)称为平面声波的“欧姆定律”。平面声波的声压与振速的波形是相同的,两者是完全相关的。

对于球面声波,由表 1.1 中得到

$$p(r, t) = \frac{P}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (1.13)$$

式中, P 为 1 m 处的声压幅值。

将式(1.13)代入式(1.10), 对 r 求导数, 得到

$$\frac{p(r, t)}{v(r, t)} = Z(\omega) = \frac{\rho c}{1 - j \frac{\lambda}{2\pi r}} \quad (1.14)$$

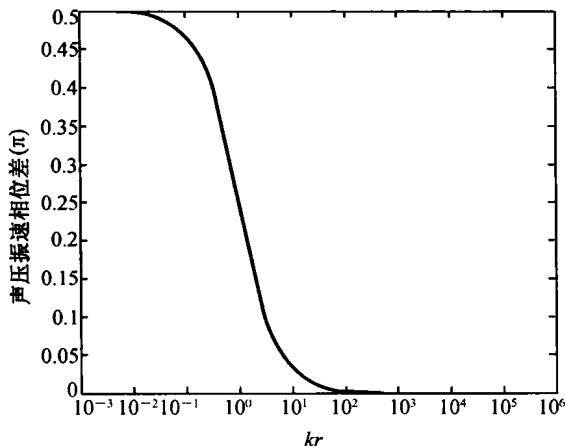


图 1.4 球面波声场声压与振速的相位差

由上可知, 在近距离处球面波的阻抗是复数, 声压与振速有相位差, 对于宽带信号, 声压与振速的波形会不同。但实际上, 只要 $r > \lambda$, 式(1.14)的虚数部分是可忽略的(图 1.4), 其阻抗近似等于平面波的声阻抗 ρc , 声压与振速的归一化相关系数接近等于 1。

任何复杂的行波声场, 在远场都可以近似为平面波, 所以它们的声阻抗为实数。海洋中点源的声场尽管很复杂, 但在若干倍海深处, 声压与振速几乎是同位相的, 两者大致是完全相关的。

1.5 矢量声学基础概念

声场兼有声压和振速, 前者是标量场, 后者是矢量场。百余年来, 拾取水中声场信息的传感器是水听器, 它是声压传感器, 因而与地震声学不同, 在水声学中几乎只关注标量场——声压, 而冷落了振速场近百年。

最早的流体中的振速测量装置是瑞利盘。1942 年美国贝尔电话实验室研制了第一个动圈式振速传感器。1958 年, G. L. Boyer 成功研制了声压梯度振速传感器。只是到了 20 年前, 振

速传感器技术得到了飞速发展,才出现工程应用的定型产品,矢量声学 and 矢量声信号处理技术随之兴起。

联合讨论声压和振速行为的声学称为“矢量声学”。

一个声压和振速的组合传感器,它同点输出声压 p 和三维振速分量 V_x , V_y 和 V_z 。有

$$\begin{cases} V_x = V \cos \theta \cos \alpha \\ V_y = V \sin \theta \cos \alpha \\ V_z = V \sin \alpha \end{cases} \quad (1.15)$$

式中,振速的模为 V ;水平方位角 θ 以 x 轴正向为 0° ;仰角 α 以水平面为 0° 。

对于平面声波,若声压 $p(t)$ 为

$$p(t) = x(t)$$

根据声学欧姆定律,有

$$\begin{cases} V_x(t) = \frac{1}{\rho c} x(t) \cos \theta \cos \alpha \\ V_y(t) = \frac{1}{\rho c} x(t) \sin \theta \cos \alpha \\ V_z(t) = \frac{1}{\rho c} x(t) \sin \alpha \end{cases} \quad (1.16)$$

在讨论信号处理问题时,为书写简便,不失一般性,省略了等式右边的声阻抗,令(1.16)式右边的常系数为 1。于是在平面波条件下有

$$\begin{cases} p(t) = x(t) \\ V_x(t) = x(t) \cos \theta \cos \alpha \\ V_y(t) = x(t) \sin \theta \cos \alpha \\ V_z(t) = x(t) \sin \alpha \end{cases} \quad (1.17)$$

因为声压是标量,所以一个小尺寸的声压传感器是无指向性的;振速是矢量,由式(1.17)可知,一个振速传感器具有偶极子指向性,如图 1.5 所示。振速指向性与频率无关,因而即使对于数赫兹的甚低频声波,一个小尺寸的矢量传感器也有指向性。在低频段,利用矢量传感器测定声源方向是矢量信号处理的优势之一。

利用三个振速分量的加权线性组合可以使指向性在三维空间旋转。以水平方向旋转指向性为例,有

$$\begin{cases} V_c(t) = V_x(t) \cos \psi + V_y(t) \sin \psi \\ V_s(t) = -V_x(t) \sin \psi + V_y(t) \cos \psi \end{cases} \quad (1.18)$$

式中, ψ 称为引导方位, ψ 是 V_c 的主极大方向,也是 V_s 的指向性零点方向。

在(1.17)式中取 $\alpha = 0$,代入(1.18)式,整理后得到