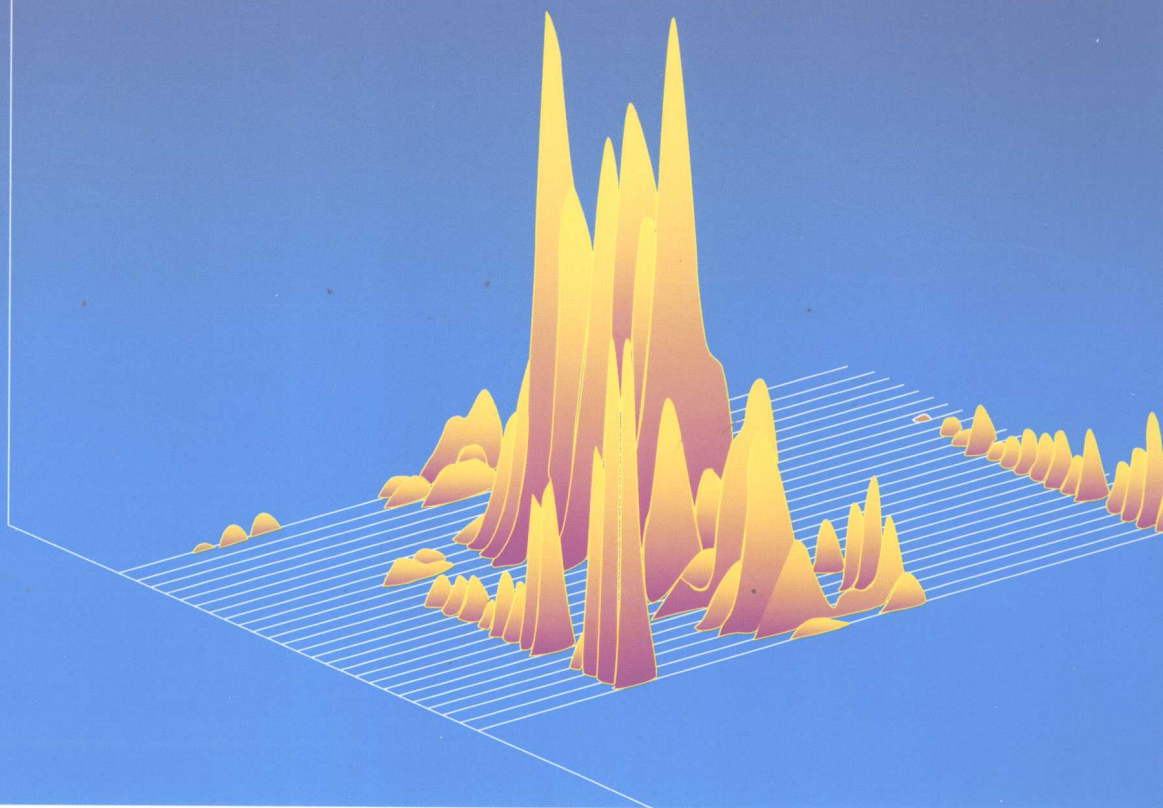


矢量声信号处理基础

惠俊英 惠娟 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

哈尔滨工程大学“十五”研究生教材建设专项资金资助出版

矢量声信号处理基础

惠俊英 惠娟 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

传统的声纳或水声设备均采用水听器,水听器仅响应声压,因而它们是声压信息处理系统。声场有声压场,也有振速场,联合处理声压和振速的称为矢量声信号处理,相应的设备为矢量水声设备或矢量声纳。矢量声纳必能开辟新天地。本书介绍矢量声学及矢量声信号处理的基础知识,包括:矢量声学基础概念,矢量声信号处理基础,矢量阵信号处理及浅海波导中的矢量声场分析及其应用。

本书力求行文简明、严谨,并有丰富的试验资料支持立论,通俗易懂。

本书可作为水声专业的本科生或研究生教材,也可作为从事本专业研究的工程技术人员或研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

矢量声信号处理基础/惠俊英,惠娟著.—北京:国防工业出版社,2009.4
ISBN 978-7-118-06142-0

I. 矢... II. ①惠...②惠... III. 矢量—信号处理
IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 003434 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 7 $\frac{1}{4}$ 字数 106 千字

2009 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 15.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

传统的水声学,甚至流体中的声学只关注声压场,论及振速,只是浮光掠影,稍涉即过,不见深入。声场兼有标量场——声压和矢量场——振速。声压和振速都携带了声源和环境的信息,尽管二者是由波动方程相联系的,但是它们以不同的方式提供了声场的信息,必须同时研究它们。既研究声压场又研究振速场的声学称为“矢量声学”。

传统的水声信号处理技术仅仅是声压信号处理技术,基于水听器阵的声纳系统是声压信号处理系统,联合处理声压和振速信息的信号处理技术称为“矢量声信号处理”技术,相应的声纳可称为“矢量声纳”。

本书论述矢量声学和矢量声信号处理的基础知识。

近百年来,水声信号处理仅讨论声压场信号处理,声纳只是声压信号处理系统。由于声矢量传感器技术的飞速发展,近 20 年来矢量声信号处理方法受到国内水声界的关注,哈尔滨工程大学是推动国内声矢量传感器技术及矢量声信号处理技术发展的先驱者。矢量传感器及相应的矢量声信号处理技术正逐步得到推广应用,其优越性已逐步得到揭示,基于矢量信号处理的声纳正得到应用。

作者意识到编著《矢量声信号处理基础》一书恰值其时,可谓之“应运而生”。本书可作为水声专业的教材,亦可作为水声领域工作者的参考书。

本书建立在作者所在的研究团队 20 年研究的基础上,作为教材或入门参考书,特别选择了矢量声信号处理领域的基础性知识作为主要内容。叙述力求准确、深入浅出、图文并茂、试验数据丰富。

尽管声压与振速由尤拉方程相联系(见式 1-1),但声压或振速均不能单独决定声场的全部特性,只有在非复杂的声场中声压才能单独提供声场的全部信息。例如,在各向同性噪声场中,总声压及其标量声强 $I(I = \bar{p}^2/\rho c)$ 是四面八方到达的独立噪声的强度的叠加。从矢量声学的观点看来,总声场的振速是四面八方到达的噪声振速的矢量叠加。若噪声声场是各向同性的,则振速的矢量和期望必为零,或者说四面八方到达的声强流矢量和在零附近抖动,因而平均声强流估计有良好的抗各向同性干扰的能力。

非但在各向同性噪声场中声压与振速是相互独立的,声压不能唯一地决定振速的特性,在任何复杂的散射场中也是如此。例如,体积或界面混响的声压与振速也是互相独立的。

即使在确定性的复杂散射场或驻波场中,尽管此时声压与振速二者有确定的关系,但声压与振速仍可能分别反映了声场特性的不同方面。矢量声学融合了声压与振速提供的声场信息,可以更深刻地揭示环境及声源的信息。本书的第 4 章提供了浅海波导中简正波声强流分析的例子。

即使在简单的声场中(平面波、球面波等),声压是标量,所以单个小尺度水听器是无指向性的,单个声压接收器不能提供目标和环境的方位信息。声波是纵波,振速是矢量,单个振速传感器测定振速的方向就能提供声场的源方位信息。

振速传感器响应振速在它轴上的投影分量,因而具有偶极子指向性,并且该指向性与频率无关,这意味着在次声频时它也有指向性。

声压信号处理仅在物理量声压 $p(t)$ 及其变换域作信号处理,而矢量声信号处理可在 p 、 v 、 p^2 、 v^2 、 pv 及其变换域处理相关信息,因而矢量声信号处理有更丰富的途径来实现达到特定的应用目标。

声压和振速均携带了环境和目标的信息,矢量声信号处理技术将联合处理它们的信息,以展现水声信号处理令人兴奋的前景。

本书适度考虑在数学上的严密性,尽可能减少复杂的数学表述以适合工程专业学生或工程师们的习惯,力求简明、易懂。本书并不追求全面论述国内外在矢量声信号处理领域的最新发展,这也许是一个不足,但这也是本书的宗旨。选择本领域的基础性的知识加以介绍正是本书的特色,以适合入门学习者的需要。

俗话说：“入门靠师傅，修行靠个人”，在掌握了基础知识后发挥个人的创新性，方能在本领域做出有价值的研究成果。

本书成稿时，与弟子们合作研究的峥嵘岁月历历在目，他们勤奋、严谨的研究工作的成果是本书的精髓，在此对他们表示衷心感谢。特要感谢蔡平教授和孙国仓博士对本书的贡献。

本书如有不当之处，欢迎指正。

著者

目 录

第 1 章 矢量声学基础	1
1.1 声压与振速	1
1.2 平面波欧姆定律	3
1.3 振速的方向矢量	6
1.4 声强及声强流	9
1.5 平均声强器	10
1.6 复声强器	15
1.7 矢量传感器概述	18
参考文献	23
第 2 章 矢量声信号处理基础	24
2.1 单矢量传感器组合指向性	24
2.1.1 单边指向性($p + v_c$)	25
2.1.2 单边指向性($p + v_c$) v_c	25
2.1.3 矢量测向原理及其精度	25
2.2 矢量直线阵指向性	29
2.3 声压、振速多途信道系统函数	34
2.4 声压时间反转镜	40
2.5 球面波声场中水平直线阵 TRM 聚焦	45

2.6	多途信道中单水听器 TRM	48
2.7	单矢量传感器 TRM	50
	参考文献	55
第 3 章	矢量阵信号处理	57
3.1	声压、振速互谱直方图估计方位	57
3.2	矢量阵常规波束形成	61
3.3	声压阵 MVDR 方位谱估计	63
3.4	矢量阵 MVDR 方位谱估计	67
3.5	声压自适应旁瓣抵消方位谱估计	70
	3.5.1 多目标旁瓣干扰	70
	3.5.2 指向性 e_+ 和 e_-	71
	3.5.3 自适应抵消器	72
	3.5.4 自适应旁瓣抵消仿真结果	73
3.6	矢量自适应旁瓣抵消器	78
	参考文献	80
第 4 章	浅海波导中简正波声强流及其信号处理	81
4.1	Pekeris 波导中的声压场	81
4.2	简正波声强流	83
4.3	低频简正波声强流特性	85
4.4	互谱处理器	89
4.5	分层介质中的格林函数	90
4.6	快速场程序	91
4.7	简正波与侧面波	92
4.8	矢量声场的数值计算原理	96
4.9	优化的接收深度	99
4.10	跃变层水文浅海垂直声强流	102
4.11	有吸收海底均匀水层中的垂直声强流	105
	参考文献	108

第 1 章 矢量声学基础

1.1 声压与振速

振动在介质中传播称为声波,声波激发介质产生超压(与静压力的差压)称作声压 p 。

考察声场中的一个微分单元,根据牛顿第二定律,有

$$-\nabla p = \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} \quad (1-1)$$

式(1-1)也称为尤拉方程。式中 $p(x, y, z, t)$ 是声压; $\mathbf{V}(x, y, z, t)$ 是振速; ρ 为介质密度; ∇ 表示梯度运算。等式的左边为声压的负梯度,它即作用在微分单元上的力; $d\mathbf{V}/dt$ 为微分单元因力作用而产生的加速度。

对式(1-1)两边作积分运算,得

$$\mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \int \nabla p dt \quad (1-2)$$

上述两式是声压与振速相互联系的关系式。声压是标量,振速是矢量。

仅讨论声压的不妨称为“标量声学”,融合讨论声压和振速的声学称为矢量声学^[1]。

为了表述简明,在声学中引进了速度势函数 $\phi(x, y, z, t)$, 其定义为

$$\mathbf{V} = -\nabla \phi \quad (1-3)$$

将式(1-1)代入式(1-3),有

$$p = \rho \frac{d\phi}{dt} \quad (1-4)$$

速度势函数 ϕ 满足波动方程^[2]:

$$\nabla^2 \phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \quad (1-5)$$

式中: c 为介质声速; ∇^2 为拉普拉斯算符, 在直角坐标系中有 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 。

振速是矢量, 由式(1-3)给出它的 3 个正交的振速分量, 如表 1-1 所列。

表 1-1 3 个正交的振速分量表达式

坐标系名称	3 个正交分量表达式
直角坐标系 (x, y, z)	$v_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x}, v_y = -\frac{\partial \phi}{\partial y}, v_z = -\frac{\partial \phi}{\partial z}$
球坐标系 (r, θ, φ)	$v_r = -\frac{\partial \phi}{\partial r}, v_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta}, v_\varphi = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \phi}{\partial \varphi}$
柱坐标系 (r, θ, z)	$v_r = -\frac{\partial \phi}{\partial r}, v_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta}, v_z = -\frac{\partial \phi}{\partial z}$

式(1-3)表明振速场是有势、无旋的, 这与电磁场不同。文献[1]认为在特殊复杂的声场中, 可能是有旋的。本书将不涉及于此, 全书将声场看做是无旋的。

水听器测量声压, 振速传感器响应质点振速。声压的单位为

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

$$1\mu\text{Pa} = 1 \times 10^{-6} (\text{Pa})$$

水声学中以分贝 (dB) 表示声压级, 其基准参考声压为 $1\mu\text{Pa}$ 。声压级 PL 为

$$PL = 20 \lg \left(\frac{|p|}{1\mu\text{Pa}} \right) \quad (1-6)$$

向某一方向传播的波是行波, 行波是纵波, 振速方向与波到达方向一致, 振

速提供了声源方位的信息,这是振速传感器的长处,因而受水声定位、跟踪技术的青睐。

1.2 平面波欧姆定律

加在一个电阻 R 上的电压 $V(t)$ 和通过它的电流 $i(t)$ 的比值为常数,有

$$\frac{V(t)}{i(t)} = R \quad (1-7)$$

称为欧姆定律。

电阻 R 为实数,所以电压 $V(t)$ 和电流 $i(t)$ 的波形相同,二者是完全相关的;对于连续正谐电信号(CW 信号),二者是同相位的。

若电路中有电抗,则

$$\frac{V(t)}{i(t)} = Z(\omega) \quad (1-8)$$

$Z(\omega)$ 为复数阻抗。此时电流与电压有相位差。对于宽带信号,电压和电流的波形不同。类似的声学问题简述于下。

考察谐和声波,即声波的时间函数为 $\exp(j\omega t)$,代入式(1-1),得到

$$\nabla p = -j\omega\rho V \quad (1-9)$$

式中: ω 为角频率。

沿 x 轴方向传播的平面波为

$$p(x, t) = P e^{j(\omega t - kx)} \quad (1-10)$$

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

将式(1-10)代入式(1-9),就得到声学欧姆定律,即

$$\frac{p(t)}{v(t)} = \rho c \quad (1-11)$$

式中: ρc 为平面波声阻抗,是实数。

平面波的声压和振速波形相同,二者是完全相关的,是同相位的。

谐和球面波声压为

$$p(r, t) = \frac{P}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (1-12)$$

式中: P 为 1m 处的声压幅值; r 为距离。

将式(1-12)代入式(1-9), 对 r 求导数后得

$$\frac{p(r, t)}{v(r, t)} = Z(\omega) = \frac{\rho c}{1 - j \frac{\lambda}{2\pi r}} \quad (1-13)$$

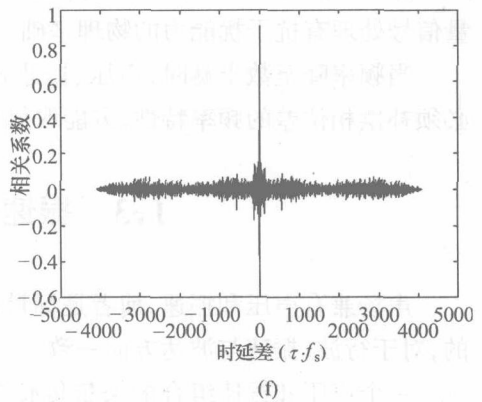
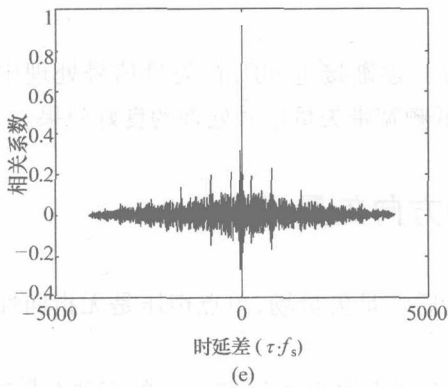
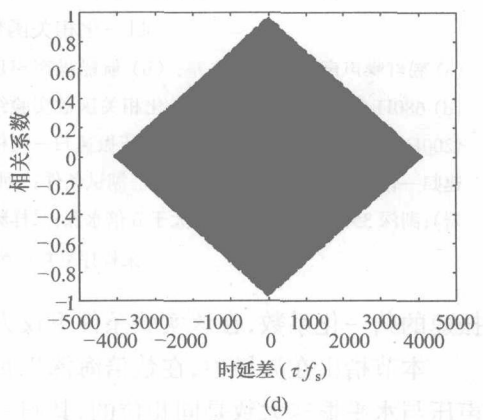
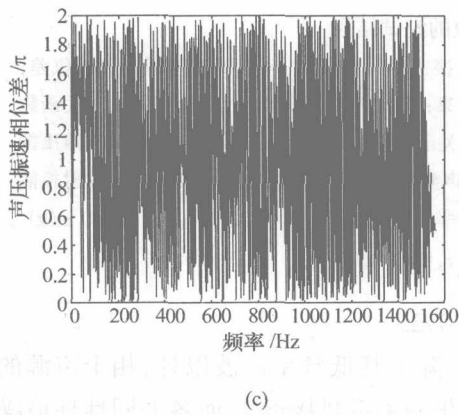
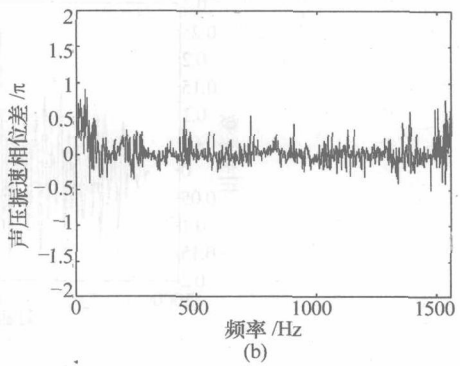
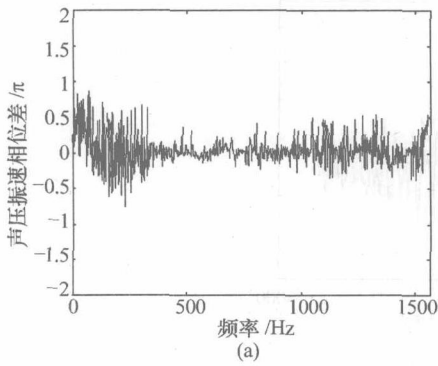
式中: λ 为波长。 $\lambda/r \ll 1$ 时, 上式的虚数部分可忽略, 其声阻抗接近平面波阻抗 ρc , 为实数, 声压与振速波形的归一化相关系数接近 1。 $r < \lambda$ 时, 球面波阻抗为复数, 宽带信号声压与振速的波形会不同。

柱面波声场的情形与球面波类似。只要距离较远, 声阻抗就接近 ρc , 声压与振速是同相位的。

任何复杂的行波, 在远场都可近似看做平面波, 它们的声阻抗均近似为实数。

海洋中点源声场尽管很复杂, 但在若干倍海深以外, 谐和声波的声压与水平振速大致是同相的, 二者的宽带信号波形几乎是相同的。图 1-1(b) 是在湖深 6 倍远处测得的航船噪声的声压与振速的相位差。图 1-1(a) 是同一次湖试中, 用敲击式机电声源辐射粉红色噪声, 矢量传感器测得的声压与振速的相位差频率特性。由图可见, 除了少数频点以外, 声压与振速的相位差在 200Hz 以上大致在 0° 附近, 计算了二者的归一化相关系数, 均超过 0.9(图 1-1(e)和(f))。在 100Hz 以下, 声压与振速的相位差有明显的频率特性, 随频率的降低, 相位差接近 90° (图 1-1(a)和(b))。此时, 声阻抗为复数。因而, 100Hz 以下的宽带信号, 其声压与振速的波形不同, 若不补偿相位差的频率特性, 二者的归一化相关系数仅为 0.3。在此需特别说明, 此时声压与振速仍是相干的, 只需补偿相位差, 经补偿后的声压与振速仍是相关的。实验所用矢量传感器的最高有效工作频率为 1300Hz, 因而 1500Hz 附近的测量数据是没有价值的。实验中还发射了 680Hz 的连续正弦波(CW)信号, 实验表明其声压与振速是同相位的, 二者的归一化相关系数达到 0.99 图 1-1(d)。

作为与相干源声场的对比, 实验测量了环境噪声的声压与振速相位, 图 1-1(c) 指出它的相位差频率特性是杂乱无章的, 在 $0 \sim 2\pi$ 之间无规则跳动, 声压与



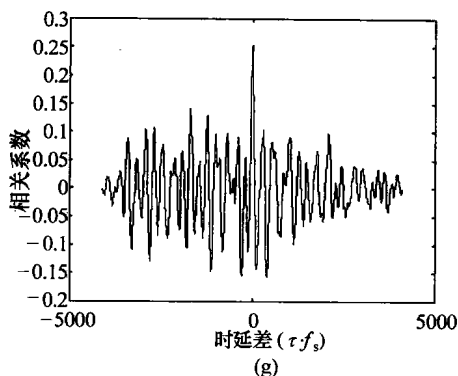


图 1-1 多种声源及环境噪声声压与水平振速相位差及相应的归一化相关函数的测试结果

(a) 粉红噪声声压振速相位差; (b) 航船噪声声压振速相位差; (c) 环境噪声声压振速相位差; (d) 680HzCW信号声压振速归一化相关函数实验结果; (e) 粉红色噪声声压振速归一化相关函数(200Hz~1420Hz); (f) 航船噪声声压振速归一化相关函数(200Hz~1420Hz); (g) 环境噪声声压振速归一化相关函数(1Hz~1420Hz)。测试条件:3种声源(敲击式机电声源、航船噪声、CW发射换能器);湖深35m左右,测量距离大于6倍水深;采样频率 $f_s=3124\text{Hz}$,样本长度 $T=1.3\text{s}$;图(d)~(g)采样序号单位为 $\tau_s=0.32\text{ms}$ 。

振速的归一化系数,在该实验条件下仅为0.25。

本节指出在波导中,在数倍海深以远,除了甚低频率声波以外,相干声源的声压与水平振速大致是同相位的,其归一化相关系数接近1,而各向同性环境噪声,例如海洋动力噪声,其声压与振速是不相关的(归一化相关系数小)。这是矢量信号处理有抗干扰能力的物理基础。

当频率降至数十赫时,声压、振速相位差逐渐接近 90° ,在矢量信号处理中必须补偿相位差的频率特性,方能取得甚低频宽带矢量信号处理的良好效果。

1.3 振速的方向矢量

声场兼有声压和振速,前者是标量场,后者是矢量场,单点声压是无指向性的,对于行波,振速与波达方向一致。

一个声压和振速组合的矢量传感器,它同点输出声压和正交的三维(或二

维)振速分量。

振速 \mathbf{V} 的 3 个正交分量为

$$\begin{cases} v_x = v(t)\cos\theta\cos\alpha \\ v_y = v(t)\sin\theta\cos\alpha \\ v_z = v(t)\sin\alpha \end{cases} \quad (1-14)$$

式中: $v(t)$ 为振速波形。

图 1-2 说明了投影的几何关系。 θ 为水平方位角, x 轴正方向为 0° ; α 为仰角, 以水平面(xOy 平面)为 0° 。

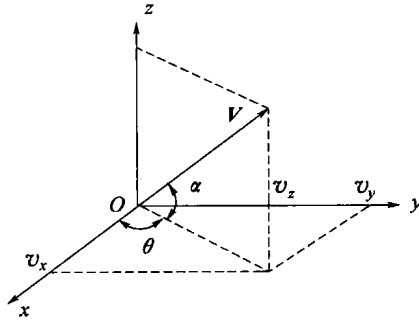


图 1-2 振速 \mathbf{V} 及其 3 个正交分量 v_x, v_y, v_z 的投影图

声压是无指向性的, 若

$$p(t) = x(t) \quad (1-15)$$

设声场满足欧姆定律式(1-11), 则

$$v(t) = \frac{1}{\rho c} x(t)$$

由式(1-14), 得

$$\begin{cases} v_x(t) = \frac{1}{\rho c} x(t)\cos\theta\cos\alpha \\ v_y(t) = \frac{1}{\rho c} x(t)\sin\theta\cos\alpha \\ v_z(t) = \frac{1}{\rho c} x(t)\sin\alpha \end{cases} \quad (1-16)$$

在讨论信号处理问题时,为叙述简明,不失一般性,省略了上式中的声阻抗 ρc ,令其为 1(在讨论声学问题,涉及物理量纲的场合是不能省略的),于是有

$$\begin{cases} p(t) = x(t) \\ v_x(t) = x(t)\cos\theta\cos\alpha \\ v_y(t) = x(t)\sin\theta\cos\alpha \\ v_z(t) = x(t)\sin\alpha \end{cases} \quad (1-17)$$

式(1-17)说明了声压是无指向性的,它是标量,小尺寸的声压水听器是无指向性的;振速是矢量,各分量具有偶极子(即 $\cos\theta, \sin\theta$ 或 $\cos\alpha, \sin\alpha$)指向性。

振速矢量 \mathbf{V} 表示为

$$\mathbf{V} = v(t)\mathbf{n} \quad (1-18)$$

$$\mathbf{n}^T = [\cos\theta\cos\alpha, \sin\theta\cos\alpha, \sin\alpha] \quad (1-19)$$

式中: T 表示转置; \mathbf{n} 为单位矢量,它描述振速方向,所以叫做振速的方向矢量。

图 1-3 所示为矢量传感器的指向性。

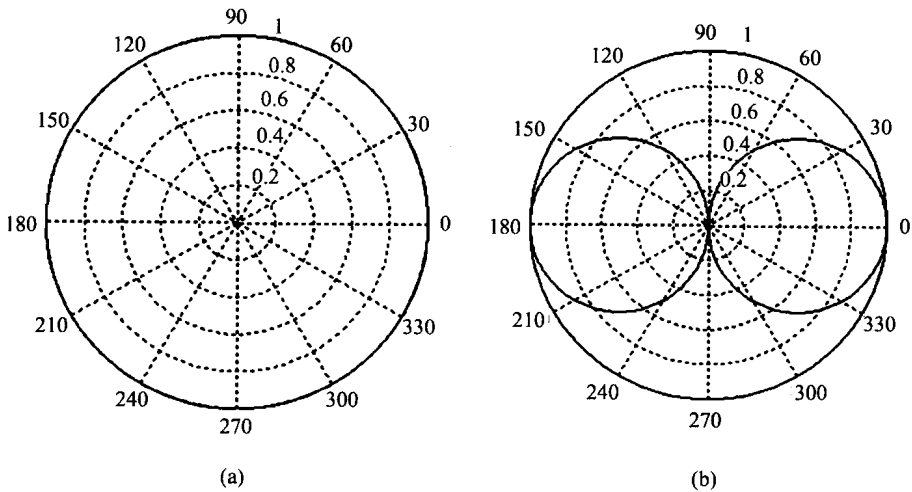


图 1-3 矢量传感器的指向性(振速的方向特性决定了矢量水听器的自然指向性)

(a) 声压指向性图; (b) 振速指向性图。

振速方向特性与频率无关,所以振速传感器指向性亦与频率无关。即使对于数赫兹的次声频声波,一个小尺寸的振速传感器,它也有偶极子指向性。单矢

量传感器即可测定波达方向,甚至对次声频声波也是这样,这是矢量信号处理的优势之一。

1.4 声强及声强流

声波激发介质质点振动,介质的密度也随振动而变化。因而声波携带着变化的动能和位能,在无损耗介质中动能和位能互相转化,平均动能和平均位能是相等的。

声能密度 $E(t)$ 是指声场某点单位体积在声波作用下所获得的能量,包括动能和位能,对于有势场,平均动能和平均位能相等,总能量为二者之和。

瞬时声能密度为^[1,2]

$$E(t) = \frac{E_k + E_p}{d_0} = \frac{1}{2} \rho v^2(t) + \frac{1}{2} \frac{p^2(t)}{\rho c^2} \quad (1-20)$$

式中: $E(t)$ 为瞬时声能流密度; d_0 为体积; $E_k(t)$ 为动能; $E_p(t)$ 为位能; ρ 为介质密度; c 为声速。

满足声学欧姆定律的条件时,利用式(1-11),可将式(1-20)改写为

$$E(t) = \rho v^2(t) = \frac{p^2(t)}{\rho c^2} \quad (1-21)$$

谐和平面波为

$$p(t) = P_0 \cos(\omega t - kx - \varphi_p) \quad (1-22)$$

$$v(t) = V_0 \cos(\omega t - kx - \varphi_p) \quad (1-23)$$

式(1-23)代入式(1-21),得

$$E(t) = \rho V_0^2 \cos^2(\omega t - kx - \varphi_p) = \frac{P_0^2}{\rho c^2} \cos^2(\omega t - kx - \varphi_p) \quad (1-24)$$

对上式作时间平均,平均声能量密度为

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho V_0^2 = \frac{1}{2} \frac{P_0^2}{\rho c^2} \quad (1-25)$$

式中: V_0 、 P_0 分别为振速和声压的幅度; ρ 为密度; c 为声速。字符上的横杠表