

三维同振球型矢量水听器的特性及其结构设计

贾志富

(哈尔滨工程大学水声研究所 哈尔滨 150001)

2000年5月29日收到

摘要 本文介绍一种新型水声接收换能器——三维同振球型矢量水听器。这种水听器可以用来获取水下声场的矢量信息。文中概括地描述了矢量水听器的结构类型及其特性的表征；详细叙述了同振型三维矢量水听器的设计方法；给出了作者所研制的三维同振球型矢量水听器样器的声学特性测试结果。

关键词 矢量水听器，振速水听器，声压梯度水听器

Design and characteristics of a resonant-sphere type three-dimensional vector hydrophone

Jia Zhifu

(Underwater Acoustic Institute, HEU, Harbin 150001)

Abstract A new kind of underwater acoustic receiving transducers—three dimensional vector hydroplane is introduced in this paper. The vector hydroplane is used for obtaining vector information of underwater sound field. Constructional classes of the vector hydroplane and its characteristics are briefly described. Detailed design method and measurement results of the three dimensional vector hydroplane are given.

Key words Vector hydroplanes, Particle velocity hydroplones, Pressure gradient hydroplanes

1 引言

众所周知，迄今在水声技术领域，普遍使用声压型接收换能器（水听器）。它把声场中的声压信号转换成与之成比例的电信号。理论和实践都证明，要完整地描述声场并充分利用声场信息，不仅需要知道声场的标量（例如声压）信息，还需要知道声场中的矢量信息，例如声压梯度、质点振速、质点加速度、位移等。矢量水听器即是用来测量这些矢量的水下接收换

能器。它是水声换能器家族中的新成员。由于其具有独特的优点和广泛的应用前景，它的问世已经引起人们的普遍关注。当今在水声领域形成了以矢量水听器为核心的“矢量-相位”技术。美国、俄罗斯等国已开展了广泛而深入的研究工作^[1,2]。

矢量水听器根据具体使用要求，可以做成一维、二维或三维的形式，用以测量直角坐标系中一个或多个矢量分量，例如质点振速等。如果将矢量水听器与声压水听器在结构上组合

为一体,同时矢量与标量信号分别有各自的输出通道,便可实现用一只组合式水听器同时得到矢量与标量信息。

2 矢量水听器的结构类型

根据水听器与声场的相互作用方式,矢量水听器可以分为三大类:双声压水听器型、外壳静止型和同振型^[1]。

双声压水听器型矢量水听器,如图1(a),是仿照空气声学中的“双传声器”而构成的。它由两个复数灵敏度(幅值及相位的频率响应)已知且相同的声压水听器组成。水听器声中心之间的距离远小于相应最高测量频率的声波波长。利用有限差分近似,由两个水听器输出电压的差值信号,可计算出水听器声中心连线中点处的声压梯度或质点振速值。由于这种矢量水听器工作原理及其构成特点,决定了它的工作频带较窄,声压梯度或振速灵敏度较低,特别是在低频和弱声场情况下,输出信噪比不会很高。所有这些使“双水听器”型矢量水听器的应用受到了限制。

外壳静止型矢量水听器(图1(b)),是在大质量金属外壳或框架上安装敏感元件(例如压电陶瓷片),当水听器置于声场中时,外壳对声波呈现高的声阻抗,即在声场作用下外壳或框架“巍然不动”,可以近似看作是静止状态,而敏感元件直接受到声场的作用,使其发生形变,实现声-电转换。本文作者曾研制出一种弯曲圆板型压电式声压梯度水听器,可谓这种矢量水听器的典型代表^[3]。由于它本身具有大质量的外壳或框架(通常用高密度合金材料制成),因此,这种水听器的外壳或框架可通过某种方式与其它构件(例如船壳体)刚性连接。

与静止外壳型不同,对于同振型矢量水听器(图1(c)),声波不直接作用于敏感元件上。敏感元件置于球(或圆柱)形壳体内。而球(或圆柱)体作振荡运动。如果使敏感元件在惯性力的作用下发生形变,便可实现声-电转换。

这种水听器在设计上要使球(或圆柱)体的平均密度近似等于水介质密度,这样,球(或圆柱)体则以水介质质点相同的幅度和相位作振荡运动。因而得名为“同振型”。本文作者曾研制出工作上限频率可到5kHz、球直径为63mm的一维同振球型矢量水听器^[4]。

3 表征矢量水听器性能的电声参数

矢量水听器如同一般声压型水听器那样,要用一系列的电声参数来表征。与声压水听器相比,矢量水听器在指向性、灵敏度和通道相位的特性方面有些特殊,因而对矢量水听器的这些特性的表征方法也有别于声压水听器^[1]。

(1) 指向性

声压水听器和矢量水听器在其波尺寸(几何尺寸与波长之比)很小的条件下,理论上两者的指向性图可以用函数 $\cos^n \theta$ 来描写。当 $n=0$ 时,即表示声压水听器的无指向性;当 $n=1$ 时,则表示矢量水听器的指向性。矢量水听器的指向性用函数 $\cos \theta$ 来描述,即它的指向性图呈“8”字形。一般将具有无指向性的声压水听器称作零阶水听器,而把具有“8”字形指向性的矢量水听器称作一阶水听器。目前,不仅有一阶矢量水听器,而且还有二阶矢量水听器^[1]。本文只涉及一阶矢量水听器。

在波尺寸很小的条件下,对于矢量水听器,其指向性可以近似地看作与频率无关。

图2示出理想情况下(即波尺寸很小时)声压水听器和矢量水听器的指向性图。

由图可见,矢量水听器的指向性图是两个相切的球面。穿过两个球心的线与其最大灵敏度轴重合。而穿过球相切点并与最大灵敏度轴垂直的平面称为不敏感平面,从理论上说,对来自在这个平面上传播的声波,水听器表现非常“不灵敏”,而无输出信号。

实际的矢量水听器指向性图总会在某种程度上偏离于理想值。为评价指向性图的优劣,通常采用以下一些表征参数^[1](见图2):

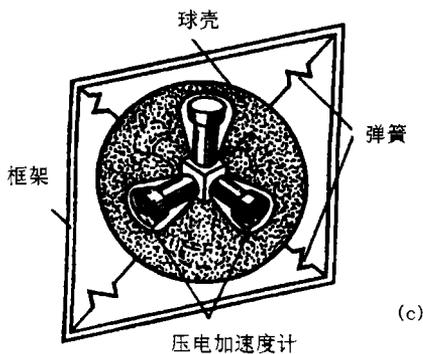
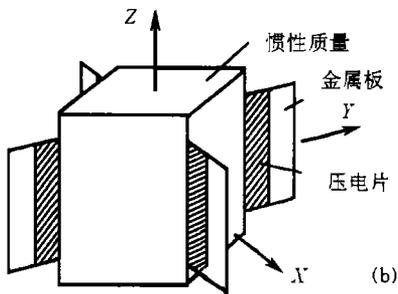
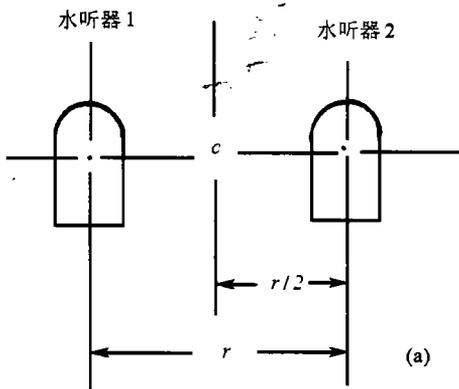


图 1 矢量水听器的类型

(a) 双声压水听器型 (b) 外壳型静止 (c) 同振型

(a) 分辨力 (k_d)

定义为轴向 (0° 或 180° 方向) 灵敏度 (灵敏度最大值) G_0 与 $\pm 90^\circ$ 方向上灵敏度最小值之比。用分贝数表示时则为

$$k_d = 20 \log \frac{G_0}{G_{\pm 90}} \text{ (dB)}$$

(b) 指向性图与余弦指向性图的偏差

应用声学

定义为

$$\Delta = 20 \log \frac{\sqrt{2}G_{\pm 45}}{G_0}$$

其中, $G_{\pm 45}$ 为在偏离最大灵敏度轴左右 45° 方向上的响应值。

(c) 轴向灵敏度的不对称性亦称前 - 后灵敏度差值 ($k_{\Delta \max}$)

定义为在 0° 方向的灵敏度值 G_0 与 180° 方向上的灵敏度值 G_{180} 的差值:

$$k_{\Delta \max} = 20 \log \frac{G_0}{G_{180}} \text{ (dB)}$$

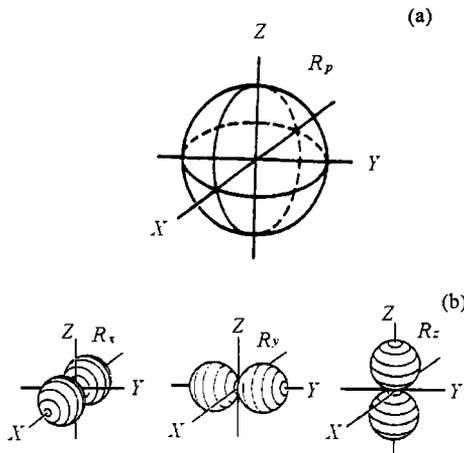


图 2 理想情况下的指向性图

(a) 声压水听器的指向性图 (R_p)

(b) 矢量水听器的指向性图 (R_x, R_y, R_z)

(d) 灵敏度最小值的不对称性 (k_{\min})

定义为在 $+90^\circ$ 和 -90° 方向上灵敏度的差值:

$$k_{\Delta \min} = 20 \log \frac{G_{+90}}{G_{-90}}$$

(2) 接收灵敏度

矢量水听器的接收灵敏度有几种表示方法: 声压灵敏度、声压梯度灵敏度、振速灵敏度和加速度灵敏度等。由于在水声计量中至今只有标准声压水听器, 普遍使用“声压”作为计量基准。因此, 矢量水听器的灵敏度特性仍然用声压灵敏度来表征。在必要时, 可借助声压与声压梯度或振速之间的理论关系式, 从声

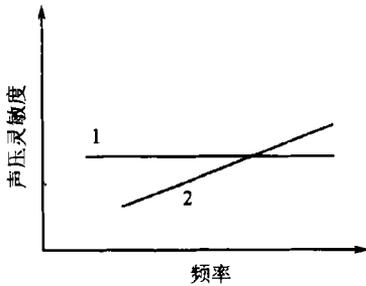


图3 声压灵敏度幅频特性
 动圈式矢量水听器 (1)
 压电式矢量水听器 (2)

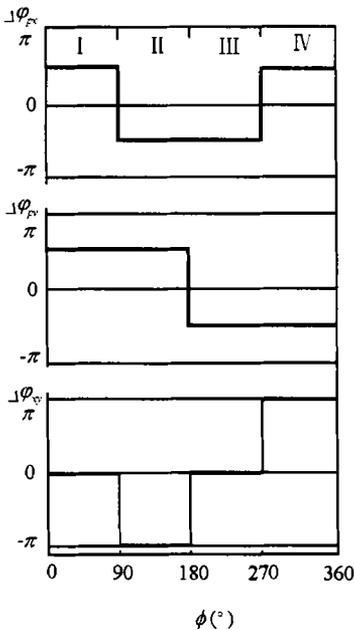


图4 理想情况下, 在XY平面上声压通道与矢量通道间, 矢量通道X与矢量通道Y间的相位差 $\Delta\varphi$ 随方位角 ϕ 的变化

压灵敏度值换算成声压梯度灵敏度或振速灵敏度值^[1,4,5]。

矢量水听器的声压灵敏度与频率的关系取决于水听器所使用的机-电转换原理。对于实际中常用的动圈式和压电式矢量水听器, 其声压灵敏度的幅频特性例如图3所示。

对于压电式矢量水听器, 其声压灵敏度频响曲线相对横轴的斜率是每倍频程 6dB, 即频率升高(降低)一个倍频程, 灵敏度值提高(降低)一倍。或者说频率每升高(降低)1/3 倍

频程, 灵敏度提高(降低)2dB。在实际中, 为了描述这种矢量水听器的灵敏度, 通常只给出在 1000Hz 频率上的灵敏度值, 例如写作: 185dB(测试频率 1000Hz); 或者, 将此灵敏度值以伏每帕每千赫为单位, 直接写作 $562\mu\text{V}/(\text{Pa}\cdot\text{kHz})$ 。利用 1000Hz 频率的灵敏度值可以方便地推算出其它工作频率上的灵敏度。

(3) 通道之间的相位特性

矢量水听器各通道之间、矢量通道与标量(声压)通道之间的相位差特性是矢量水听器实际应用中的重要性能参数, 而这些相位差特性只能而且必须依靠合理的结构设计和严格的制造工艺加以保证。

(a) 矢量通道之间的相位差 ($\Delta\varphi_{ij}$)

这里 $i, j = x, y, z$ 。此参数用于二维或三维矢量水听器。

(b) 矢量通道与声压通道之间的相位差 ($\Delta\varphi_{pi}$)

这里 p 表示声压通道, $i = x, y, z$ 表示矢量通道。此特征参数用于矢量水听器与声压水听器复合为一体的组合式水听器。

图4示出理想情况下在XY平面上声压通道与矢量通道、X矢量通道与Y矢量通道间的相位差随方位角 ϕ 的变化。从此图可见到通道间的相位差具有跃变性。

4 三维同振球型矢量水听器的结构设计

如前所述, 同振球型矢量水听器的基本结构是在刚性球壳内放置振动传感器件, 用弹性元件将球体悬置于框架上。可以看出, 这种矢量水听器由两个“质量-弹簧”振动系统组成的: “球体-悬置弹性元件”振动系统和振动传感器本身的振动系统。前一振动系统的谐振频率一般很低(例如几 Hz 甚至 1Hz 以下), 而后一振动系统的谐振频率较高(例如几百 Hz、几千 Hz 或更高)。由于两个振动系统的谐振频率相离甚远, 可以把这两个振动系统看作是相互

独立、互不影响的。因此，就水听器的结构设计而言，可以对这两个振动系统分别予以考虑。

本文作者在 [4] 中对一维同振球型矢量水听的结构设计问题作了阐述。那里给出的关于设计中应考虑的基本要点不仅适用于“一维”情况，也完全适用于“三维”情况。然而，正如图 1(c) 所示，三维同振球型矢量水听器在三个正交轴上均放置振动传感器。因此，不论是球壳还是振动传感器本身，在结构与制作方面，比起“一维”水听器来说难度都要大。为了保证水听器有良好的电声性能，不仅要求振动传感器（作者采用压电加速度计）具有足够的灵敏度和带宽，而且还要求在水听器的设计与制作中力争做到：①三个通道轴严格保持正交几何关系；②球体本身的平均密度接近于水的密度且质量分布均匀；③球体的几何中心与其重心严格重合；④三个通道具有相同的声相位中心。

同振球型矢量水听器的“同振”特性是以其波尺寸很小以及球体平均密度近似等于水的密度为先决条件的。本文作者研制的三维同振球型矢量水听器，其球体外径为 0.1m，用铝合金制作球壳。球体的平均密度约为 1100kg/m^3 。根据 [4] 中引用的公式，对该球体在水中振动速度的频率响应进行了数值计算和分析。结果表明，如果允许球体的振动速度与水介质质点振动速度幅值偏差 1dB、相位偏差 1° （在工程上，这种偏差是允许的），则上限频率可达到 4kHz。因此可将此频率值作为该矢量水听器工作频率的上限。但必须指出的是，水听器上限工作频率不仅取决于球体自身的频响特性，也直接制约于压电加速度计的频响特性，因此，在设计和制作压电加速度计时应当考虑到这一点 [4]。

5 矢量水听器特性测试及结果

作者研制的直径 0.1m 同振球型矢量水听器，其指向性图和灵敏度频响曲线分别示于

图 5、图 6。水听器装备有增益 20dB 前放。测试是在非消声水池采用脉冲法进行的。由于发射源信号强度所限，测试频率最低限于 500Hz。在 1000Hz 以下频段内，实测的灵敏度值引入了近场修正 [4]。结果表明，灵敏度和指向性指标达到预期要求。声压灵敏度： $-176\text{dB}(0\text{dB}=1\text{V}/\mu\text{Pa})$ ，测试频率 1000Hz；指向性图： $k_d > 20\text{dB}$ ， $k_{\Delta\text{max}} \leq 1.5\text{dB}$ ， $k_{\Delta\text{min}} \leq 3\text{dB}$ 。

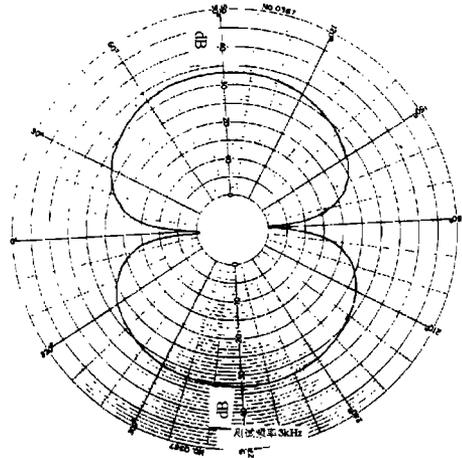


图 5 三维同振球型矢量水听器指向性图

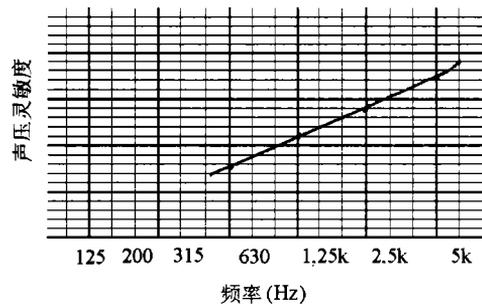


图 6 三维同振球型矢量水听器声压灵敏度曲线

6 结语

采用本文所给出的方法，可以设计和制作其它尺寸的同振球型矢量水听器。作者另外还研制出了同振圆柱型二维矢量水听器，并且将这种水听器与声压水听器在结构上组合为一体，得到了令人满意的组合式水听器。

当今,材料科学和微传感器技术的发展,为矢量水听器的设计与制作技术开辟了广阔的途径。可以期待,结构更新颖、性能更优良的矢量水听器将会不断展现于世人面前。

参 考 文 献

1 Gordienko V A, Ilichev V I, Zaharov L N. Vector-phase Methods in Acoustics (in Russian), Moscow, Nauka, 1989.

2 Berliner M J, Lindberg J F (editors). Acoustic Particle Velocity Sensors: design, performance and applications. AIP Press, N.Y., 1996.
3 贾志富. 传感器技术, 1997, 16(1): 22.
4 贾志富. 应用声学, 1997, 16(3): 20.
5 Bobber R J. Underwater Electroacoustic Measurements, NRL, Washington, D.C. 1970.

(上接第 30 页)

生 $f_1 \pm f_2$ 声信号,而且还产生了 $2f_1$ 、 $2f_2$ 、 $3f_1$ 、 $3f_2$ 、 $3f_1 + f_2$ (或 $2f_2 + f_1$) 信号,这就证实了在本文条件下是可以产生声散射声效应的。因此用本文设计的复频聚焦换能器产生的声场来激活叶啉及其衍生物,很可能会增加声空化效应,提高激活效率,为推动声动力学疗法向临床应用迈进是具有现实意义的。

致谢 本文中声功率的测量得到了声学所闵一建老师的热情帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

1 Umemura S, Kawabata K, Sasaki K. *J. Acoust. Soc. Am*, 1997, 101(1): 569-577.
2 朱昌平, 冯若, 陈兆华. 南京大学学报(自然科学), 1998, 34(1): 93-96.
3 钱祖文. 非线性声学. 北京: 科学出版社, 1992. 138-163.
4 石焕文, 尚志远. 压电与声光, 2000, 22(2): 98-100.

(上接第 34 页)

6 结 论

通过对以上室内实验结果的研究分析,可以得出以下结论:

(1) 声波处理可以有效降低含蜡原油的粘度。

室内实验结果及现场使用情况均证明,采用适当的声波处理方法,可以降低原油粘度,这就为高粘原油的开采和运输开辟了一条新路,我们已经此类产品投入油井生产中。

(2) 声波处理可以改变含蜡油的微观结构,降低其凝固点。

凝固点的降低,在高含蜡油井生产中具有重要意义。现场实验证明,在高含蜡油井中,只要采用合适的声波发生器,使其有效地工作,

就可减缓油井结蜡,从而延长修井周期,节省生产费用,达到增产降耗的目的。

7 结 束 语

目前,我国不少老油田的开发已进入中、后期,高粘、高含水、低渗透成为石油生产中的突出矛盾,运用声波理论和技术解决这些问题,是一个较为有效的途径。除利用声波防蜡、降粘之外,采用声波技术进行防垢、脱气、增注及解堵等方面也均具有广阔的应用前景,需要我们进一步深入研究和开发。

参 考 文 献

1 应崇福. 超声学. 科学出版社, 1990. 502-508.
2 黄序韬编译. 超声波在采油生产中的应用研究与实验. 油气田开发工程译丛, 1984, (4): 10-12.