

测量超声场声强用组合式水听器的设计方案

贾志富

(哈尔滨工程大学水声研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 介绍 1 种可用于测量超声波声场强度的新型水听器。它是由声压型水听器与振速水听器在结构上组合为一体而构成。文中描述了这种水听器的基本结构型式、工作原理及特性。

关键词: 超声波场; 声强; 矢量水听器; 组合式水听器

中图分类号: TB552 文献标识码: A

Design schemes of combined hydrophones used for acoustic intensity measurements of ultrasonic field

JIA Zhi-fu

(Institute of Underwater Acoustics, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: A kind of new type hydrophone, used to measuring intensity of ultrasonic field, was introduced in this paper. The hydrophone is constructed with a pressure hydrophone and particle velocity hydrophone, and is called combined hydrophone. Its principle and characters were described in this paper.

Key words: ultrasound wave field; sound intensity; vector hydrophones; combined hydrophones

1 引言

在超声技术领域, 声强或声功率的测量, 由于理论研究和应用上的需要, 一直是人们十分关注的课题。例如, 在超声处理工艺中, 往往需要测量声场中声强大小及其空间分布。尤其是在空化场中研究声强与换能器工作状态的关系以及超声波对被处理物体作用的机理等具有重要的理论和实际价值。

在平面波情况下, 声强与声压之间存在确定关系, 若已知声媒质的特性阻抗(ρc), 利用已知灵敏度 M 的声压水听器测量声压 p , 根据下式即可算出声强 I :

$$I = \frac{U^2}{M^2 \rho c} \quad (1)$$

其中 U 为水听器的开路输出电压。

为了测定声功率 W_a , 应对通过声能的面积 S 上的声强取积分:

$$W_a = \int_s I ds \quad (2)$$

这个表达式只在平面波条件下(即测点离开声源足够远)才成立。

在复杂声场, 例如驻波场、有空化产生的声场, 瞬时声强由瞬时声压和瞬时质点振速确定, 而平均

声强则由下式计算:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p v dt \quad (3)$$

其中 v 是在测点处的质点振速法向分量。利用测点处的声压值和振速矢量可以计算出该点声能流的大小及方向。

在水声技术中, 近年来国内外出现 1 种称为矢量水听器(亦称振速水听器或声压梯度水听器)的新型接收换能器^[1,2]。这种水听器用于测量水声声场中媒质(水)的质点振速或声压梯度。因为振速或声压梯度是“矢量”, 所以称这种水听器为矢量水听器。根据需要它可以做成一维、二维或三维结构。对于三维矢量水听器可同时得到直角坐标系 3 个正交方向上的振速或声压梯度值。矢量水听器与声压水听器组合使用, 即可获得声能流密度(声强)等更为丰富的声场信息。

本文作者已研制出一维、二维和三维矢量水听器^[2-4], 可用于对 5kHz 以下频段的水下声信号进行检测。将这种水听器在结构上进一步小型化, 即可用于超声频段。

2 超声频矢量水听器的工作原理

在超声频段使用的矢量水听器其工作原理与声频或次声频的完全相同。由于超声频矢量水听器工作频率的要求, 决定了其几何尺寸要足够小, 在结构

收稿日期: 2000-03-27; 修回日期: 2000-06-19

作者简介: 贾志富(1942), 男, 黑龙江省肇东县人, 研究员, 目前主要研究方向: 矢量水听器的结构设计及其校准技术。

设计和敏感元件的选择上需要作些特别考虑。

为了说明矢量水听器的工作原理, 我们先来考察悬置于水下声场中的刚性球的运动特性。理论分析已经证明^[1], 当球的波尺寸 ka (k 为波数, a 为球半径) 很小时球在水声场中的振荡速度 v 与水质点振荡 v_0 存在如下关系:

$$\left. \begin{aligned} v &= \frac{3\bar{\rho}}{2\bar{\rho} + \rho} v_0 \\ \varphi &\rightarrow 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 ρ 为水的密度; $\bar{\rho}$ 为刚性球体的平均密度; φ 为 v_0 与 v 之间的相位差。再假定使 $\bar{\rho} = \rho$, 从式(4) 可以看到, 球就会以水质点相同的振荡速度 v_0 和相同的相位运动。这就意味着, 假如我们制作一个在声学上

刚硬的球, 并在球内放置传感器件, 将球的运动转换为与球振速 v 成比例的电信号, 当保证球体的平均密度 $\bar{\rho}$ 等于水的密度 ρ 且球的半径满足 $ka \ll 1$, 则就可实现水质点振速的测量。

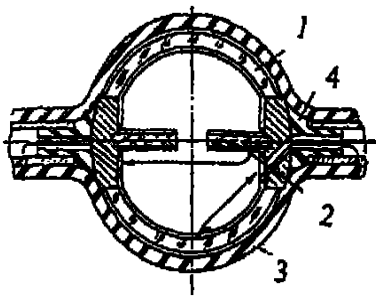
作者计算了不同直径的球在 $\bar{\rho}/\rho = 0.8, 0.9, 1.0, 1.1$ 和 1.2 时, v/v_0 及 φ 随频率的变化情况。作为例子, 将 $2a = 10\text{mm}$ 时的计算结果列于表 1。由表可见, 对直径 $2a = 10\text{mm}$ 的球, 在 $\bar{\rho}/\rho = 1$ 时, v/v_0 不大于 1dB 的频率可达到 30kHz , 这时 φ 不大于 0.5° 。若允许 v/v_0 不大于 2dB , φ 不大于 1.5° , 则频率可到 50kHz 。计算中所使用的公式参见文献[2]。

表 1 对于 $a = 0.005\text{m}$ 的球, $\frac{v}{v_0}/\text{dB}$, φ 与频率的关系 $\frac{v}{v_0}/\text{dB} = 20\log \frac{v}{v_0}$

振速 相位 差 频率 f/Hz	$\bar{\rho}/\rho = 0.8$		$\bar{\rho}/\rho = 0.9$		$\bar{\rho}/\rho = 1.0$		$\bar{\rho}/\rho = 1.1$		$\bar{\rho}/\rho = 1.2$	
	$\frac{v}{v_0}/\text{dB}$	$\varphi/^\circ$	$\frac{v}{v_0}/\text{dB}$	$\varphi/^\circ$	$\frac{v}{v_0}/\text{dB}$	$\varphi/^\circ$	$\frac{v}{v_0}/\text{dB}$	$\varphi/^\circ$	$\frac{v}{v_0}/\text{dB}$	$\varphi/^\circ$
1000	1.2422	0.0000	0.5985	0.0000	-0.0007	0.0000	-0.5612	0.0000	-1.0878	0.0000
2000	1.2398	-0.0001	0.5964	-0.0001	-0.0027	0.0000	-0.5631	0.0000	-1.0896	0.0001
3000	1.2359	-0.0004	0.5927	-0.0002	-0.0061	0.0000	-0.5663	0.0002	-1.0926	0.0003
4000	1.2304	-0.0010	0.5876	-0.0004	-0.0109	0.0000	-0.5708	0.0004	-1.0968	0.0007
5000	1.2233	-0.0019	0.5810	-0.0009	-0.0170	0.0000	-0.5765	0.0007	-1.1022	0.0014
6000	1.2147	-0.0033	0.5730	-0.0015	-0.0245	0.0000	-0.5836	0.0013	-1.1088	0.0024
7000	1.2045	-0.0052	0.5635	-0.0025	-0.0334	-0.0001	-0.5919	0.0020	-1.1167	0.0038
8000	1.1927	-0.0078	0.5525	-0.0037	-0.0437	-0.0002	-0.6016	0.0029	-1.1258	0.0056
9000	1.1793	-0.0111	0.5400	-0.0053	-0.0554	-0.0004	-0.6126	0.0040	-1.1362	0.0079
10000	1.1644	-0.0153	0.5261	-0.0074	-0.0685	-0.0006	-0.6249	0.0054	-1.1479	0.0107
20000	0.9266	-0.1302	0.3026	-0.0705	-0.2796	-0.0186	-0.8253	0.0270	-1.3386	0.0674
30000	0.5264	-0.4778	-0.0801	-0.2938	-0.6470	-0.1330	-1.1793	0.0086	-1.6809	0.1344
40000	-0.0355	-1.2350	-0.6279	-0.8511	-1.1828	-0.5147	-1.7046	-0.2175	-2.1970	0.0469
50000	-0.7484	-2.5999	-1.3359	-1.9632	-1.8871	-1.4048	-2.4060	-0.9111	-2.8962	-0.4715
60000	-1.5908	-4.7498	-2.1851	-3.8443	-2.7430	-3.0513	-3.2687	-2.3513	-3.7654	-1.7290
70000	-2.5330	-7.8038	-3.1448	-6.6486	-3.7191	-5.6408	-4.2601	-4.7545	-4.7711	-3.9694
80000	-3.5427	-11.8078	-4.1779	-10.4450	-4.7774	-9.2629	-5.3396	-8.2286	-5.8699	-7.3165
90000	-4.5904	-16.7432	-5.2572	-15.2240	-5.8814	-13.9146	-6.4674	-12.7756	-7.0192	-11.7764
100000	-5.6516	-22.5472	-6.3496	-20.9208	-7.0011	-19.5285	-7.6113	-18.3245	-8.1846	-17.2738

3 组合式水听器的设计方案

为便于使用,在声强测量中用的矢量水听器可以与声压水听器在结构上一体化,而且在声压通道和振速通道中的敏感元件都使用相同换能原理的材料(例如压电陶瓷)。从前面的讨论我们已知道,设计组合式水听器要着重考虑以下几个方面:①在结构上,除了敏感元件和密封包覆材料外,还应包括将水听器悬置于水中的弹性悬置元件。悬置元件要使球体自由悬置于水中,不能妨碍球体的运动。弹性悬置与球体组成的弹性-质量振动系统,其固有谐振频率要远远小于水听器工作频率的下限;②组合水听器的形状应是球状,且在声学上可以认为是“刚性”的;③球的几何中心应与其重心重合,使球在水中悬置时不因重心的偏离而发生任何滚动;④球体的平均密度应尽量接近水的密度;⑤球的波尺寸 ka 要足够小,以尽可能减少振速测量误差;⑥保证水听器有足够良好的水密性。



1: 压电球壳 2: 压电加速度计
3: 密封橡胶层 4: 软电导线

图 1 使用压电片加速度计制作的组合式水听器

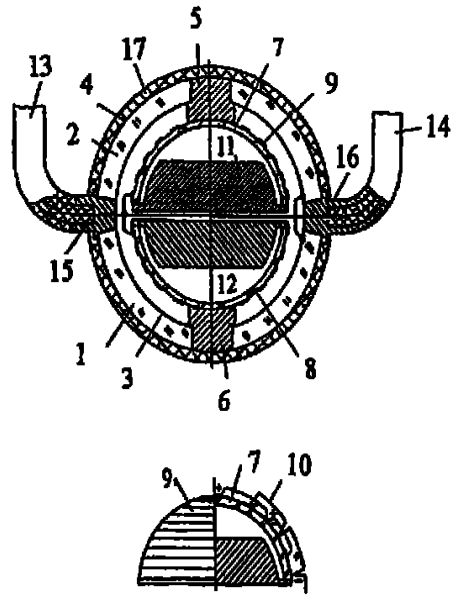
下面介绍采用压电陶瓷作为敏感器件的组合式水听器的两种可能结构设计方案。在这些方案中都使用球壳形压电陶瓷元件制作声压水听器,而在压电球壳内放置压电加速度计作为振速敏感元件(加速度的输出信号经积分电路后得到速度信号)。

第 1 方案:采用压电片制作加速度计^[6]。在此方案中,速度传感器由两只并联的压电加速度计构成。每个加速度计中使用双迭片压电元件。两个加速度计的灵敏度相同但它们中的压电片极化极性相反,以补偿由于压电球壳作脉动运动时在压电加速度计中产生的输出信号。双压电片不附加惯性质量块,可提高加速度计的上限工作频率,但以牺牲灵敏度为代价。

声压水听器使用压电球壳元件。软电导线兼作水听器的柔性悬置元件。从图 1 可见,该水听器可测量与压电片表面垂直方向的振动速度。据报导,

外径 3.2mm 的水听器工作频率在 10kHz~80kHz。外径 10mm 的工作频率在 20kHz 左右。

第 2 方案,使用压电半球壳制作加速度计^[6]。图 1 所示的结构,由于不加质量块致使灵敏度较低。为克服此缺点可采用半球型壳压电元件制作加速度计,如图 2 所示。这里,半球形压电元件的外表面电极不是涂满的,而是若干同心的条带,条带极性交替分布,采用切向极化(见图 2),使极化方向与加速度计振动方向一致。由于利用了压电模量 d_{33} ,再加上半球壳壁可以做得很薄,因而在负载质量块作用下,有利于加速度计灵敏度的提高。据称^[5],加速度计灵敏度较图 1 所示的那种提高 0.7~0.8 倍,从而使水听器能用于测量弱声场强度。



1, 2: 半球壳形压电陶瓷; 3, 4: 声压水听器压电球壳内、外电极; 5, 6: 金属底座; 7, 8: 加速度计所用的压电半球壳; 9: 半球壳上的条形电极; 10: 连接导线; 11, 12: 惯性质量块; 13, 14: 柔软的带屏蔽电缆; 15, 16: 封密头; 17: 水密层

图 2 利用半球壳压电元件制作加速度计的组合水听器

参考文献:

- [1] Gordienko V. A., et al. Vector phase methods in acoustics [M]. Moscow, nauka, 1989. 55-58.
- [2] 贾志富. 同振球型声压梯度水听器的研究[J]. 应用声学, 1997, 16(3): 20-25.
- [3] 贾志富. 采用双迭片压电敏感元件声压梯度水听器[J]. 传感器技术, 1997, 16(1): 22-24, 29.
- [4] 贾志富. 声压梯度水听器[J]. 中国船舶科技报告[R]. 哈尔滨工程大学, 1995.
- [5] Л. А. Давиденко и. т. д. Характеристики широкополосного акустического ваттметра [J]. Акустика и Ультразвуковая Техника, 1974, 9: 37-43.
- [6] Авторское Свидетельство СССР No. 772609[S].