

同振式矢量传感器设计方法的研究

陈洪娟, 杨士莪, 王智元, 洪连进

(哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 对同振式矢量传感器的工作原理进行了分析, 并在此基础上对同振式矢量传感器的结构设计进行了优化。分析了同振式矢量传感器整体平均密度 $\bar{\rho}$ 和波尺寸 ka 与被测水质点振动速度 v_0 之间的关系, 得出了同振式矢量传感器的优化设计准则和声散射对同振式矢量传感器设计的影响, 为同振式高频矢量传感器的研制提供了可参考依据。

关键词: 矢量传感器; 设计方法; 同振

中图分类号: TB565+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2005)02-0080-04

Design of co-vibrating vector transducer

CHEN Hong-juan, YANG Shi-e, WANG Zhi-yuan, HONG Lian-jin

(Underwater Acoustic Engineering College, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Theoretical analysis of co-vibrating vector transducer is carried out, and optimization of its design studied. The relationship between average density $\bar{\rho}$ and wave number ka , and the measured particle velocity v_0 is derived. The principle of optimal design of the co-vibrating vector transducer and the influence of scattered sound field on the design are obtained. The results can be used as references in manufacturing co-vibrating vector transducers.

Key words: vector transducer; design methodology; co-vibration

1 引 言

矢量传感器的研制是目前国内外水声换能器研究领域的重要课题之一。目前, 国内已经有两种类型的矢量传感器投入工程应用研究: 一是同振式矢量传感器, 二是压差式矢量传感器, 其中同振式矢量传感器由于具有体积小、重量轻、低频灵敏度高、指向性好等优点, 已被广泛用于声纳浮标系统、拖曳阵、低噪声测量等领域。

作者在近 5 年研制同振式矢量传感器的基础

上, 结合工程实际需要, 对球形和柱形同振式矢量传感器的设计原理进行了理论研究, 并对同振式矢量传感器的整体平均密度 $\bar{\rho}$ 和波尺寸 ka 与被测水质点的振动速度 v_0 之间的关系进行了理论分析, 从而得出了同振式矢量传感器的优化设计准则。

2 设计基本原理

根据声学理论, 在平面声波作用下接收器表面产生的实际振动速度 v 与作用在接收器表面的作用力 F_x (假设入射波沿 X 轴方向入射) 之间存在以下关系^[1]:

$$v = \frac{F_x}{Z_m + Z_s} \quad (1)$$

其中: F_x 是平面波场中刚性运动的球型接收器表面所受 X 轴方向的总压力,

收稿日期: 2004-08-05; 修回日期: 2004-10-29

基金项目: 水声技术国家重点实验室基金项目资助(5144505104CB0103)

作者简介: 陈洪娟(1969-), 女, 河北省人, 在职博士, 副教授, 从事声传感器、水声换能器研究工作。

$$F_X = 2\pi a^2 \int_0^\pi p(a, \theta) \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (1)$$

这里 $p(a, \theta)$ 是球上任一点 (a, θ) 处的声压, a 是运动球的半径; Z_m 是接收系统的机械阻抗; Z_s 是二次辐射的辐射阻抗。

由于刚性运动球体的二次辐射可以看作是摆动球的辐射问题, 因此根据摆动球的辐射阻抗^[1]可求得 Z_s 为:

$$Z_s = \frac{\rho c S}{3} \frac{jka(1+ka)}{(2-(ka)^2) + j2ka} \quad (2)$$

其中, $S=4\pi a^2$ 为球的表面积; k 为波数; ρ 、 c 分别为水介质的密度和水中声波的传播速度。

因此,

$$v = \frac{F_X}{Z_m + Z_s} = \frac{4\pi a^2 p_0 (-j) \left[j_1(ka) - h_1^{(2)}(ka) \frac{\frac{dj_1(ka)}{d(ka)}}{\frac{dh_1^{(2)}(ka)}{d(ka)}} \right]}{j\omega\rho \frac{4\pi a^3}{3} + \frac{\rho c S}{3} \left[\frac{(ka)^4}{4+(ka)^4} - jka \frac{2+(ka)^2}{4+(ka)^4} \right]} \quad (3)$$

由于球贝塞耳函数及其导数之间存在如下关系^[2]:

$$j_m(x) \frac{dh_m^{(2)}(x)}{dx} - \frac{dj_m(x)}{dx} h_m^{(2)}(x) = -\frac{j}{x^2};$$

$$\frac{dh_m^{(2)}(x)}{dx} = \left[\frac{2}{x^2} + j \frac{1}{x} \left(1 - \frac{1}{x^2} \right) \right] e^{-jx}$$

则式(3)可化为:

$$\frac{v}{v_0} = \frac{3e \left[j \left[-\frac{\pi}{2} + ka - tg^{-1} \left[\frac{[(ka)^2 - 2] \frac{\bar{\rho}}{\rho} - 1}{ka \left(2 \frac{\bar{\rho}}{\rho} + 1 \right)} \right] \right]}{\sqrt{\left(2 \frac{\bar{\rho}}{\rho} + 1 \right)^2 + \left(2 \frac{\bar{\rho}}{\rho} + 1 \right) (ka)^2 + \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho} \right) (ka)^4}} \quad (4)$$

其中, $v_0 = p_0 / \rho c$ 是水中质点的振速。

同理, 在平面波场中, 刚性运动无限长圆柱型接收器的振速 v 与水质点振速 v_0 之间存在如下关系式:

$$\frac{v}{v_0} = \frac{4}{j(ka)^2 \pi \frac{\bar{\rho}}{\rho} \frac{dH_1^{(2)}(ka)}{d(ka)} + \pi(ka) H_1^{(2)}(ka)} \quad (5)$$

如果声学刚性运动球(或柱)体的几何尺寸远远小于波长即 $ka \ll 1$, k 是波数, a 是刚性运动球(或柱)体半径, 则它在水中声波作用下作自由运动时, 刚性球(或柱)体的振速幅值 V 与声场中球心(或柱体几何中心)处水质点的振速幅值 v_0 及其相位差 ϕ 之间存在以下关系:

对于球体

$$\frac{V}{V_0} = \frac{3\rho_0}{2\bar{\rho} + \rho_0}, \phi \rightarrow 0 \quad (6)$$

对于柱体

$$\frac{V}{V_0} = \frac{2\rho_0}{\bar{\rho} + \rho_0}, \phi \rightarrow 0 \quad (7)$$

其中 ρ_0 为水介质密度; $\bar{\rho}$ 为刚性球(或柱)体的平均密度。

由公式(6)、(7)可知, 如果满足 $ka \ll 1$, 则当刚性球(或柱)体的平均密度 $\bar{\rho}$ 等于水介质密度 ρ_0 时, 其振速幅值 V 与声场中球体(或柱体)几何中心处水质点的振速幅值 V_0 相同, 而相位差趋于零, 这样只要刚性球(或柱)体内部有可以拾取该振动速度的传感器件即可获得声场中球心(或柱体几何中心)处水质点的振动速度, 所以公式(6)、(7)是同振型矢量传感器结构设计中的主要依据。

3 同振式矢量传感器的波尺寸 ka 、平均密度 $\bar{\rho}$ 与水质点振动速度 v_0 之间的关系

根据公式(6)、(7)设计同振式矢量传感器原理简单、计算方便, 但是需要满足 $ka \ll 1$ 的条件, 即 $a \ll \lambda/6$, 而这一条件采用传统工艺根本无法实现, 为此我们对同振式矢量传感器的波尺寸 ka 、平均密度 $\bar{\rho}$ 与水质点的振动速度 v_0 之间的关系进行了研究(见图1、图2), 为高频同振式矢量传感器的研制提供理论设计依据。

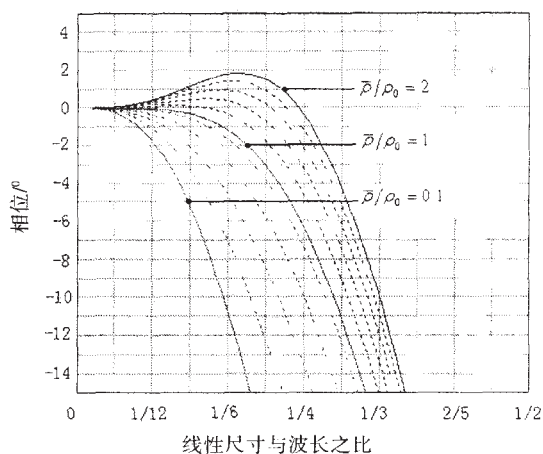
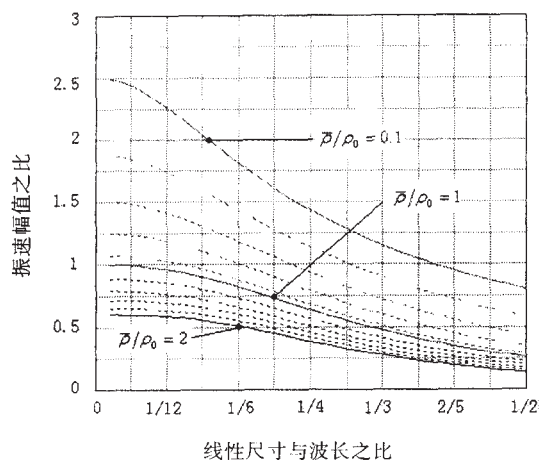


图1 球型同振式矢量传感器的振速 v 与被测水质点的振速 v_0 之比的幅值与相位特性曲线

Fig.1 Magnitude and phase of the ratio between the vibrating speed, v , of a spherical co-vibrating vector hydrophone, and v_0 , the vibrating speed of water particle

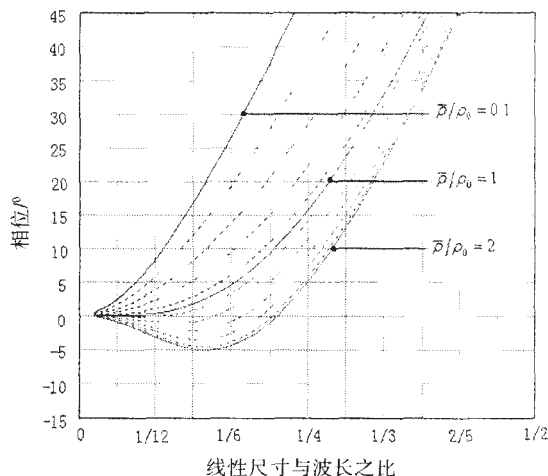
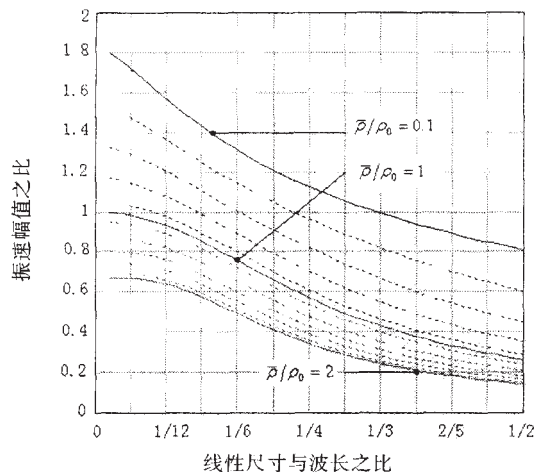


图2 柱型同振式矢量传感器的振速 v 与被测水质点的振速 v_0 之比的幅值与相位特性曲线

Fig.2 Magnitude and phase of the ratio between the vibrating speed, v , of a cylindrical co-vibrating vector hydrophone, and v_0 , the vibrating speed of water particle

由图1、图2可以看出:(1)球或柱型同振式矢量传感器的振速幅值 $|v|$ 随着传感器平均密度 $\bar{\rho}$ 的增加逐渐减小,但下降的速率逐渐减缓,而相位差 ϕ 亦随 $\bar{\rho}$ 的变化逐渐变化;(2)随着 a/λ 比值的增加,球或柱型同振式矢量传感器的振速幅值 $|v|$ 减小,而相位差 ϕ 的变化较大。因此,在同振式矢量传感器的设计中,由于振速幅值变化相对缓慢,所以应首先考虑相位指标,如果能够确定矢量传感器相位差 ϕ 的变动范围,则可由图中给出该矢量传感器的平均密度 $\bar{\rho}$ 和 a/λ 的取值范围。

另外,由图1、图2可以发现,当传感器的波尺寸 $ka \geq 1$,即 $a \geq \lambda/6$ 时,如果适当增加传感器的平均

密度 $\bar{\rho}$, 则仍可将传感器的相位差 ϕ 的变动范围控制在较小的度数内,不过此时传感器的灵敏度会有所下降,但对于矢量传感器的制作有利,特别是使高频同振式矢量传感器的研制成为可能。对于球型同振式矢量传感器,设计中 a 可以取到 $\lambda/4$, $\bar{\rho} \approx 1.8$, 在这种情况下,相位差 ϕ 在 -1° 左右, $|v| \approx 0.4|v_0|$, 而对于柱型同振式矢量传感器,设计中欲使相位差 ϕ 在 -1° 左右,则 a 必须小于 $\lambda/5$, $\bar{\rho} \approx 1.8$, 而 $|v| \approx 0.4|v_0|$ 。因此,在同振式矢量传感器的设计要兼顾中传感器的相位特性与灵敏度特性,从而确定一个合理的传感器平均密度 $\bar{\rho}$ 和 a/λ 比值。

4 声散射对同振式矢量传感器设计的影响

根据同振式矢量传感器的工作原理知道,在平面波场中应将同振式矢量传感器看作是刚硬摆动球的声散射,因此其散射波声压表达式为^[3]:

$$P_s = P_s^0 + P_s^v \quad (8)$$

其中:为刚硬不动球散射场声压

$$P_s^0 = -P_0 a \frac{e^{j(\alpha x - kr)}}{r} R(\theta) \quad (9)$$

这里, $R(\theta)$ 是刚硬不动球散射场的方向性函数。 P_s^v 为运动球作用于介质产生的声场声压

$$P_s^v = -jP_0 \frac{3\rho c}{\omega} \frac{j_1(ka) - h_1 \frac{j_1'(ka)}{h_1'(ka)}}{ka \frac{h_1'(ka)}{h_1(ka)} \bar{\rho} - \rho} \cos\theta \quad (10)$$

从式(9)、式(10)可以看出,在平面波场中同振式矢量传感器的散射场方向性函数应是余弦函数 $\cos\theta$ 与 $R(\theta)$ 的叠加,而 ka 变化主要影响 $R(\theta)$ 的方向性,变化规律与刚硬不动球散射场类似。另外,散射波强度亦随 ka 而变, ka 越小,散射声功率越小。

因此,在矢量传感器设计中适当放大波尺寸

$ka \geq 1$ 的条件时,还需要考虑传感器的声场散射问题,特别是高频情况。

5 结 论

同振式矢量传感器设计中根据其不同使用条件,在其灵敏度和相位一致性要求允许的情况下,可以适当放宽传感器的波尺寸 ka 的范围,但要考虑声场散射影响,这一结论可供今后同振式高频矢量水听器的研制提供参考。

参 考 文 献

- [1] 何祚庸,赵玉芳. 声学理论基础 [M]. 北京:国防工业出版社,1981.315-328
HE Zuoyong, ZHAO Yufang. Acoustics theoretics [M]. Beijing: National defence industry publishing company, 1981: 315-328
- [2] 郭敦仁. 数学物理方法 [M]. 北京:人民教育出版社,1977. 256-319
GUO Dunren. Mathematics - physics Method [M]. Beijing: People-education publishing company, 1977. 256-319
- [3] Ржевкин С. Н. О колебаниях тел погруженных в жидкость под действием звуковой волны [R]. Россия: Вестник московского университета, 1971.52-62

(上接第79页)

测距及对快速目标的跟踪。并且在近程时缩小了潜艇的尾部测距盲区。在3km时,能对20°~160°的目标测距,在300m时,能对10°~170°的目标测距。测距相对误差低于5%。

参 考 文 献

- [1] 朱光文. 我国海洋探测技术五十年发展的回顾与展望 (二) [J]. 海洋技术, 1999, 18(3): 1-13.
ZHU Guangwen. Ocean detection and measurement: review of the past 50 years and the prospect (2) [J]. Ocean Technology, 1999, 18(3): 1-13
- [2] 田坦, 刘国枝, 孙大军. 声纳技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2000: 1-18
TIAN Tang, LIU Guozhi, SUN Dajun. Sonar Technology [M]. Harbin Engineering University Press, 2000: 1-18
- [3] Carter G. C. Time delay estimation for passive sonar signal

processing [J]. IEEE Trans ASSP. 1981, 29 (3): 181-189

- [4] 邱天爽,王宏禹. 几种基本时间延迟估计方法及其相互关系 [J]. 大连理工大学学报, 1996, 36(4): 493-498
QIU Tianshuang, WANG Hongyu. Some basic methods for time delay estimation and their relationship [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1996, 36(4): 493-498
- [5] 吴国清. 水下被动测距的后置处理 [J]. 声学学报, 1995, 20(2): 88-100
WU Guoqing. Post-processing of underwater acoustic passive ranging [J]. ACTA ACUSTICA, 1995, 20(2): 88-100
- [6] 李启虎. 被动测距声呐中后置处理置信级的设定 [J]. 声学学报, 1988, 8: 200-207
LI Qihu. Enactment of confidence level on passive ranging sonar post-processing [J]. Chinese Journal of Acoustics, 1988, 8: 200-207