

文章编号: 1005-9865(2004)04-0115-04

基于波谱密度特性的海浪仿真研究

李维嘉¹, 陈浩牧¹, 解贵新²

(1. 华中科技大学 交通科学与工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 海军潜艇学院 战术指挥系, 山东 青岛 266071)

摘 要: 基于密闭液体的体积变化导致压力变化的特性, 研制出了一种高响应、高精度的海浪仿真器, 能够模拟海浪对任意水深的影响作用。在保持微小频率段内总能量相等的条件下, 通过规则波的合成, 获得了描述已知波谱密度的海浪, 并由海浪仿真器模拟出了任意水深处所受到的海浪作用, 频谱分析表明模拟海浪具有与真实海浪相一致的波谱密度特性。

关键词: 波谱; 深度; 模拟; 仿真器**中图分类号:** P731.2; O353.2 **文献标识码:** A

Study on wave simulator and realization based on properties of wave spectrum

LI Wei-jia¹, CHEN Hao-mu¹, XIE Gui-xin²

(1. College of Traffic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Department of Tactical Command, Navy Submarine Academy, Qingdao 266071, China)

Abstract: A wave simulator with high response and precision has been developed based on the relationship between volume and pressure of contained liquid to simulate the influence of waves at any depth. The desired wave is obtained by synthesis of a series of regular waves basing the constant of total energy in a tiny spectrum section, and then inputted into the simulator to simulate the action of wave. Analysis of the simulated wave spectrum shows that the spectrum has the same properties as real wave.

Key words: wave spectrum; depth; simulation; simulator

海浪是一种属于狭带谱的平稳随机过程。对于水下运动体(如潜艇、载人潜器等)的操纵系统来讲, 它是一个影响深度测量的主要干扰信号。当水下运动体的机动性能低于海浪的狭带谱区间时, 深度测量信号可以通过低通滤波器, 减弱海浪干扰的影响程度, 例如一些较早期的潜艇深度测量系统。随着水下运动体机动性能的不提高, 水下运动体操纵系统的频宽已接近甚至涵盖海浪的狭带谱^[1]。海浪对水下运动体操纵系统的影响已是一个不得不考虑的问题。造波机虽然可以模拟出满足一定海浪谱要求的不规则波, 但仅适用于水面船只的设计与研究, 无法用于水下运动体操纵系统的试验研究。本文基于密闭液体体积变化而导致压力变化的特性, 研制出了高响应、高精度的海浪仿真器。该模拟器不仅能够模拟任意水深处的压力变化, 还能够模拟海浪的影响作用, 满足水下运动体操纵系统的研究需要。

1 海浪仿真器介绍

1.1 工作原理

在一个密闭的容积内, 当液体的体积 V 发生变化时, 容积内的压力 p 也将随之变化。压力的变化量 Δp 与体积的变化量 ΔV 之间存在着下列关系:

$$\Delta p = \beta_e \cdot \Delta V / V \quad (1)$$

收稿日期: 2003-08-11

作者简介: 李维嘉(1964-), 男, 河南郑州人, 博士, 教授, 主要从事仿真技术及机器人研究。

其中： β_e 为液体的弹性模量，对于液压油来讲一般为 1 000 MPa 左右。由此关系，通过强制改变液体体积，可以获得所需要的压力，即所需要的水深及其深度的变化。

1.2 系统组成

海浪仿真器由机电系统、驱动系统和计算机控制系统三部分组成。机电系统主要由承压筒、活塞杆、滚珠丝杆、伺服马达、减速器、导向杆等组成，见图 1。受压液体盛放于承压筒内，当高响应的伺服马达转动时，通过高速比的谐波齿轮减速器带动滚珠丝杆转动，与滚珠丝杆匹配的滚珠螺母驱动活塞杆进行往复运动，迫使受压液体的体积发生改变，达到控制受压液体内部压力的目的。

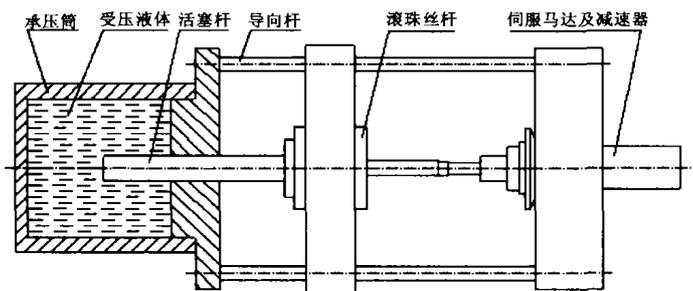


图 1 海浪仿真器机电系统示意图

Fig. 1 Sketch of the mechatronic system of the wave simulator

海浪仿真器的计算机控制系统由控制计算机、D/A 转换板、伺服马达控制器、高精度压力传感器、A/D 转换板等控制单元组成。控制计算机通过检测承压筒内受压液体的压力变化情况，调节伺服马达的转速大小和方向，实现压力的实时控制。控制系统的功能框图见图 2。

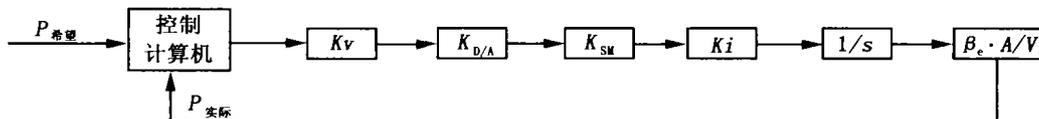


图 2 海浪仿真器控制系统的组成框图

Fig. 2 Sketch of the control system of the wave simulator

其中： K_V 为控制系统的增益系数； $K_{D/A}$ 为 D/A 卡的比例系数； K_{SM} 为伺服电机控制器的转速/电压比例系数； K_i 为机械系统的总传动比（包含谐波齿轮减速器和滚珠丝杆-螺母）； $\beta_e \cdot A/V$ 为承压筒内的压力增益系数， A 是活塞杆的面积； $1/s$ 为积分环节（ s 为拉普拉斯算子），将活塞杆的速度变化变换为位移变化。

1.3 仿真器的控制特性

由图 2 可以看到海浪仿真器的闭环控制系统是一个一阶环节，如下式表示：

$$\frac{P_{actual}}{P_{expected}} = \frac{1}{1 + \frac{s}{K_i}} \quad (2)$$

式中： K_i 是系统的总增益。通过调节各控制单元的系数，可以调整控制系统的幅、相频特性。图 3 显示的是本仿真器的动态特性。从图中可以看到，在系统的幅值衰减到 -3 dB 时，系统的频宽仍有 10 rad/s (约 1.6 Hz) 以上。由于海浪的窄带谱一般集中在 0.1 Hz 附近，仿真器的动态特性能够满足海浪仿真需要。图 4 是水深 20 m 时，理论海浪实时变化造成的压力值，以及由仿真器给出的仿真值，两者具有良好的一致性。

2 海浪的仿真

2.1 满足海浪谱的理论海浪

描述海浪谱的方法有多种，1978 年的第 15 届 ITTC 建议采用 JONSWAP 的平均波谱作为有限风区的波谱，是应用比较多的一种^[2]，其表达式如式(3)所示。

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{1}{1.52} \cdot \frac{173 H_{1/3}^2}{T_1^4 \omega^5} \cdot e^{-\frac{691}{T_1^4 \omega^4}} \cdot 3.3 \exp \left\{ - \left(\frac{0.206 \omega T_1 - 1}{\sqrt{2} \sigma} \right)^2 \right\}, \quad \sigma = \begin{cases} 0.07, & \omega \leq \frac{4.85}{T_1} \\ 0.09, & \omega > \frac{4.85}{T_1} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $H_{1/3}$ 为有义波高， T_1 为目测的平均周期。波谱密度曲线的位置及形状主要由海浪的有义波高和观测周期两个参数决定。例如在有义波高为 6 m，观测周期为 8 s 时，海浪谱密度如图 5(a) 所示；有义波高为 8 m，观测周期为 9 s 时，海浪谱密度则如图 5(b) 所示。

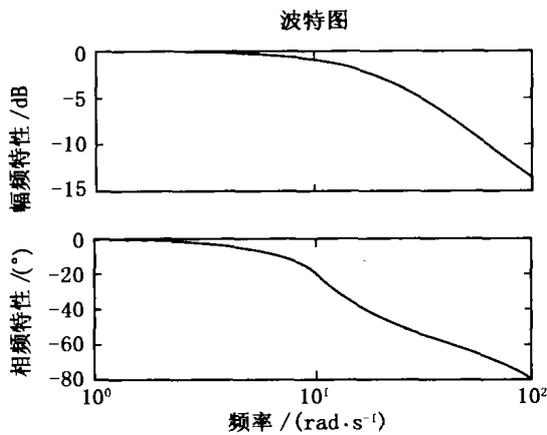


图 3 海浪仿真器的动态特性

Fig. 3 Dynamic properties of the wave simulator

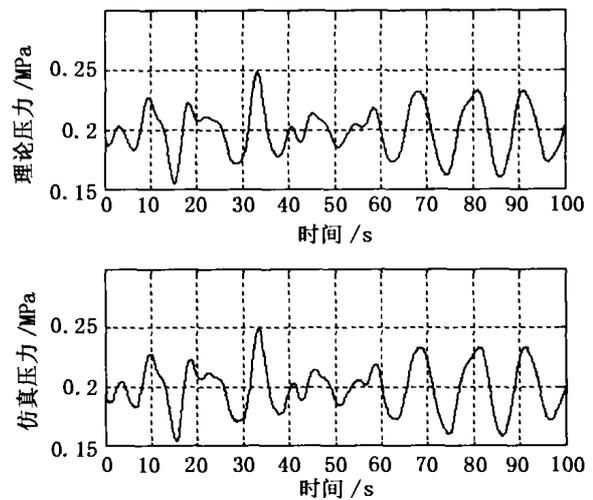


图 4 海浪导致的理论压力值和仿真器给出的压力值

Fig. 4 Theoretic pressure made by wave and pressure by the simulator

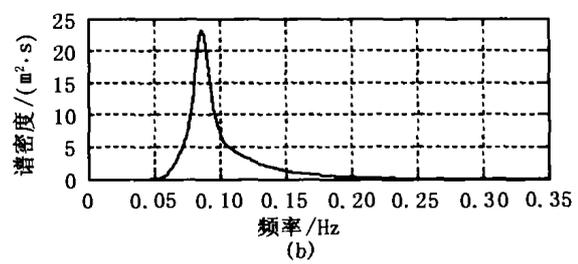
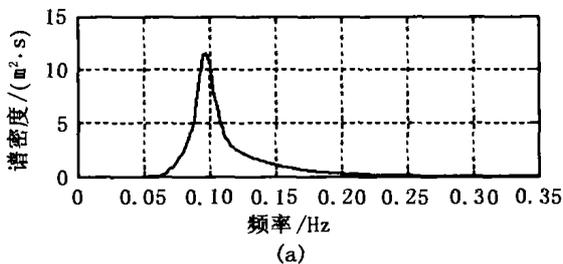


图 5 不同有义波高和观测周期下的波谱曲线

Fig. 5 Wave spectrums of different wave heights and wave cycles

为了模拟海浪的变化,可以用一系列频率间隔为 $\Delta\omega$ 的规则波合成,来模拟满足特定的海浪谱密度 $S_{\zeta}(\omega)$ 的海浪变化。根据 ω 至 $\omega + \Delta\omega$ 频率段内保持总能量相等的原理,各个规则波的幅值 $A_i(\omega)$ 由下式得出:

$$A_i(\omega) = \sqrt{2S_{\zeta}(\omega) \cdot \Delta\omega} \quad (4)$$

海浪 $\zeta(t)$ 的实时变化可以用式(5)所表示的规则波的合成近似描述:

$$\zeta(t) = \sum_{i=m}^n A_i(\omega) \cdot \cos(\omega_i \cdot t + \epsilon_i) \quad (5)$$

式中: $\omega_i = i \cdot \Delta\omega$, m 是使 $A_i(\omega)$ 大于最小有效阈值的起始值, n 是使 $A_i(\omega)$ 大于最小有效阈值的终止值, ϵ_i 是随机起始相位。

由式(5)可以生成有义波高为 6 m、观测周期为 8 s 时的理论海浪对水深 10 m 处的压力作用变化曲线,如图 6(a)所示。为便于对比,可以将压力值转换为深度值,进行谱密度分析。它的谱密度如图 6(b)所示。图 6 表明,上述方法生成的理论海浪,具有与标准海浪谱密度相一致的特性。

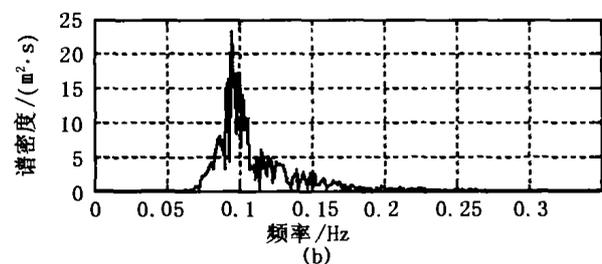
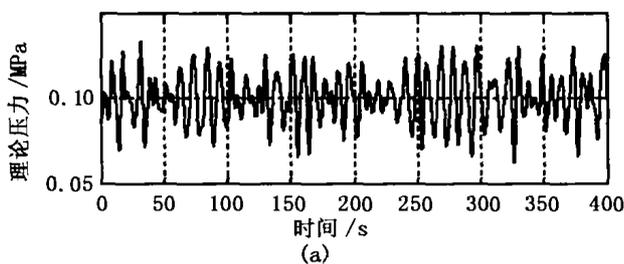


图 6 10 m 水深处海浪导致的压力变化及谱密度

Fig. 6 Pressure produced by wave at 10 m depth and its wave spectrum

2.2 海浪的仿真及谱密度特性

将生成的理论海浪作为海浪仿真器控制系统的控制指令,可以得出不同海浪的仿真曲线。图7(a)是有义波高为6 m、目测平均周期为8 s、水深10 m处的仿真海浪导致的压力变化和谱密度;图7(b)是有义波高为8 m、目测平均周期为9 s、水深20 m处的仿真海浪导致的压力变化和谱密度。

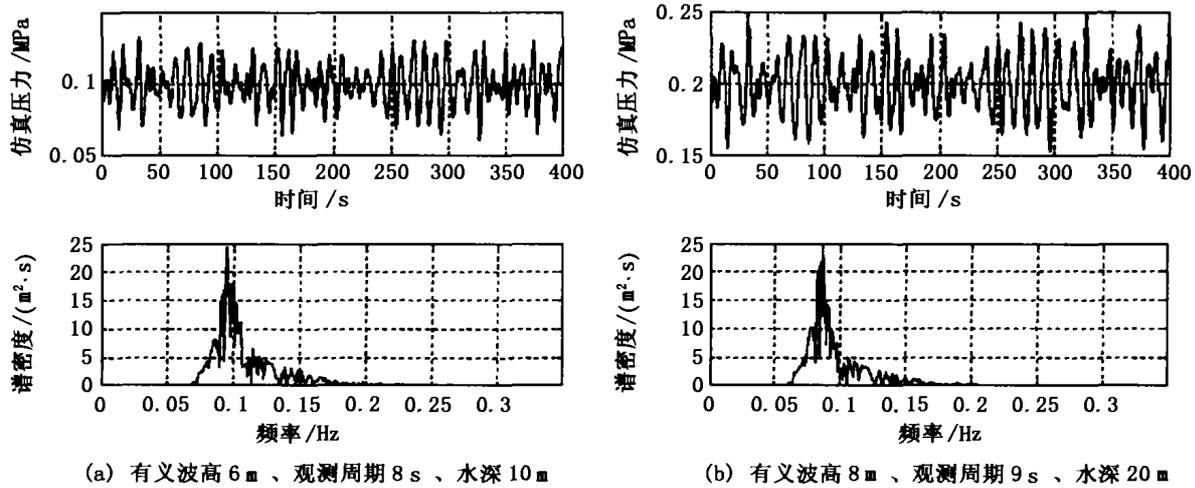


图7 仿真海浪及其谱密度

Fig. 7 Simulated waves and their spectrums

图7与图5相比,可以看到本仿真器给出的仿真海浪与波谱公式描述的海浪具有一致的波谱密度特性。

3 结 语

本文根据密闭液体的体积与压力之间的相互关系,研制出高响应、高精度的海浪仿真器,能够根据海浪的谱密度曲线,模拟出具有相似谱密度特性的海浪对任意水深处的影响,为水下运动体操纵系统的测量装置提供比较逼真的物理环境。影响水下运动体操纵系统深度测量的因素除了静压力以外,还有其它一些影响因素,如水下运动体的姿态、运动速度、周围流场的作用等等。其中,运动体的姿态在某些系统中(如潜艇)虽然是比较明显的影响因素,但可以通过测量系统的补偿予以消除^[1]。因而,相比较而言,静压力的影响是最为主要的。本文的海浪仿真器所模拟的深度环境,将有助于水下运动体操纵系统的测量装置在实验室内完成以往需要在水下进行的调试工作,同时还能够提供一种可控的水下物理环境,为水下装置的试验提供便利。

参考文献:

- [1] Michael Glass, Jacob A M Ter Horst. Combining pressure and inertial measurement for submarine depth determination[J]. Naval Engineers, 1986, 62 - 68.
- [2] 陶尧森. 船舶耐波性[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1985.