

分层流水槽箱内垂荡板式内波造波模拟研究

徐鑫哲¹, 王海波²

(1. 盘锦职业技术学院, 辽宁 盘锦 124010; 2. 盘锦宁泰能源科技有限公司, 辽宁 盘锦 124010)

摘要 提出了一种新型内波造波方法——箱内垂荡板式造波。应用 FLUENT 软件的有限体积法, 采用 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型封闭 RANS 方程作为求解控制方程, 建立二维数值内波水槽。通过模仿物理造波机运动的数值模拟结果比较表明: 箱内垂荡板式造波机生成的内波与理论解十分吻合, 与双板联动式造波和平板拍击式造波相比, 控制简单, 对自由水面的扰动小, 对水槽水深的变化和分层界面位置的改变适应性好, 不会造成分层水体的掺混。

关键词 内波; 造波方法; 双板联动式造波; 平板拍击式造波; 箱内垂荡板式造波

中图分类号 P731.24 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2021)02-0123-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.02.008

Simulation Research on Internal Wave Generation of Heave Plate in Stratified Fluid Flume

XU Xinzhe¹, WANG Haibo²

(1. Panjin Vocational and Technology College, Panjin 124010, China;
2. Panjin Ningtai Energy Technology Co., Ltd., Panjin 124010, China)

Abstract A type of new internal wave generation method——in-box heaving method is put forward. Through the application of finite volume method (FVM) of FLUENT software, and by using the $k-\varepsilon$ two equation turbulence model to close the RANS equation as the governing equation, a two-dimensional numerical internal wave flume is established. By numerical simulation in imitation of physical wave generation method, the result shows that the internal wave profile obtained by the in-box heaving wave generation method conforms to the theoretical value well. Compared to double-piston wave generation method and flat slapping piston wave generation method, this wave generation method is easier to control, and the disturbance on the surface caused by the motion of wave generation is smaller and more stable. In addition, the wave generation system has a strong adaptability to the depth variation and position change of stratified interface in the box, which will not cause mixing of stratified water bodies.

Key words internal wave; wave generation method; double-piston wave generation method; flat slapping piston wave generation method; in-box heaving method

0 引言

目前, 海洋工程规模日益向大型化发展, 在诸多的环境影响因素中, 海洋内波的影响逐渐显现。比如, 随着水下无人系统的发展, 对于采用了浮力

调节装置的无人潜航器, 当其遭遇内波时, 所处液体密度将发生变化, 其浮力调节应能作出应对, 避免意外跌入压力极限外的水深。因此, 海洋内波的研究已成为该领域的关注重点和热点。内波的实验室研究, 是内波研究的重要手段^[1], 内波水槽的建

设成为重点发展对象。内波水槽技术除了分层水体的制造以外,内波的制造方法也是内波水槽的核心技术。国内外有关内波的造波方法主要有重力塌崩式造波、活塞式造波、双板联动式造波、推(摇)板式造波、平板拍击式造波等^[1]。

目前,在内波实验方面大多采用双板联动式和平板拍击式^[2],并且主要针对小型分层流水槽设计,在密度分层水槽中已能够较好地模拟出各种尺度的规则线性内波和非线性内波^[3-5]。通常所见的内波造波机大多只适用于分层流体各层流体深度固定的情况,并不适用不同流体深度的情况^[6]。本研究以此为切入点,在分析双板联动式和平板拍击式造波方法的基础上,提出了一种新型的内波造波方法——箱内垂荡板式造波,通过 CFD 方法模拟后,与其他造波方法产生的波形进行比较,获得了更好的效果。

1 箱内垂荡板式造波方法工作原理

以双板联动式造波的质量平衡原理^[7-8]为基础,吸取平板拍击式造波控制简单的优点,提出了箱内垂荡板式造波方法,如图 1 所示。该方法是将上下运动的拍击式平板封闭在上下挡板和右侧隔板组成的箱内,在隔板和挡板之间设计水流出入口。上下运动的平板相当于活塞做往复运动,其造波板的运动函数与平板拍击式相同,挡板的存在阻碍了流体向上的运动,避免造波板运动对自由表面的影响。隔板的存在使得流体只能通过上、下挡板与隔板之间的开口流入或流出箱体形成内波,从而有效地避免分层流体的掺混和对自由水面的扰动,很大程度地改进了内波的质量。当水深和分层流体的厚度比改变时,只需调整造波机整体的垂向位置

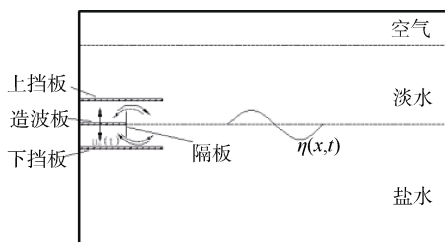


图 1 箱内垂荡板式造波系统详图

Fig. 1 Details of in-box heaving plate wave generation system

即可,克服了双板联动式造波上下推板尺度和安装位置不易改变的缺点。造波板以淡、盐水的交界面为平衡位置做上下振动,从而强迫流体质点的垂向速度,实现内波的模拟。

考虑到自由表面无起伏,根据体积守恒^[8],造波板移动所排开的淡(盐)水体积应等于淡、盐水分界面波面的水位从造波板处到下游无穷远处的积分^[9-10],可得造波板的运动速度

$$u_m(t) = c\eta(D,t)/D \quad (1)$$

式中: c 为内波相速度; $\eta(D,t)$ 为造波板右侧边缘处波面; D 为造波板长度。

对线性波^[10-11]:

$$\eta(D,t) = 0.5H \cos[k(D-ct)] \quad (2)$$

对内孤立波^[10-11]:

$$\eta(D,t) = \pm H \operatorname{sech}^2[(D-ct)/l] \quad (3)$$

需要指出的是,上、下挡板、造波板以及隔板的尺寸选取直接影响到造波系统的造波质量,这在造波过程中是需重点考虑的^[11]。

为了验证箱内垂荡板式造波方法的可行性和优越性,文章将采用 CFD^[12]方法同时对双板联动式、平板拍击式以及箱内垂荡板式这 3 种内波制造方法进行数值模拟。

2 箱内垂荡板式造波方法的数值实现

2.1 模型建立及初始条件的设定

以 N-S 方程作为流体控制方程,并采用标准的 $k-\varepsilon$ 两模型来封闭雷诺方程,内波波面的获取采用 FLUENT 的 VOF 模型,标准的 $k-\varepsilon$ 压力速度耦合的 PISO 算法,建立了具有自由表面的淡水与盐水组成的两层成层流体数值内波水槽^[11]。数值内波水槽尺寸以实际内波水槽为参考^[11],选为 $20 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 。数值水槽中包含 3 种介质——空气、淡水和盐水:下层盐水密度 $\rho_2=1\ 040 \text{ kg/m}^3$,厚度 $h_2=0.40 \text{ m}$;上层淡水密度 $\rho_1=1\ 000 \text{ kg/m}^3$,厚度 $h_1=0.35 \text{ m}$ 。

模型网格采用矩形结构化网格,最大单元格面积 0.2 m^2 ,最小单元格面积 0.005 m^2 ,共 57 000 个单元格。在消波区域,为了更好地减小波浪的反射,采用渐变网格,逐渐增大网格尺寸,应用了人工阻

尼动量源项与粗网格数值耗散相结合的技术^[13]。

当采用平板拍击式造波模型与箱内垂荡板式造波模型时, 取造波板长度 0.4 m, 水槽左、右边界, 造波区上、下挡板及隔板均为固壁边界, 造波板处采用动壁面边界条件; 当采用双板联动式造波模型时, 主要通过分别位于两层流体中的两块推板的往复水平运动实现内波的模拟, 上推板高度 0.75 m, 下推板高度 0.25 m。左侧边界为实现造波板运动的动壁面边界, 右边界为固壁边界。底部均采用固壁边界条件, 上边界采用压力入口边界条件。数值内波水槽左侧边界定为 $x=0$ 。造波模型示意图见图 2。

箱内垂荡板式造波模型中, 为了避免上下两层分层流体会相互掺混, 隔板长度需大于所生成内波的波高, 并且考虑到模型水槽尺寸对生成内波波高尺度的限制, 取竖直隔板长度 0.30 m。上、下挡板间距长度相对于竖直隔板的长度取 1.47 m, 造波板长度相对于竖直隔板的长度取 1.33 m, 造波板右侧挡板长度相对于竖直隔板的长度取 3.00 m^[14]。

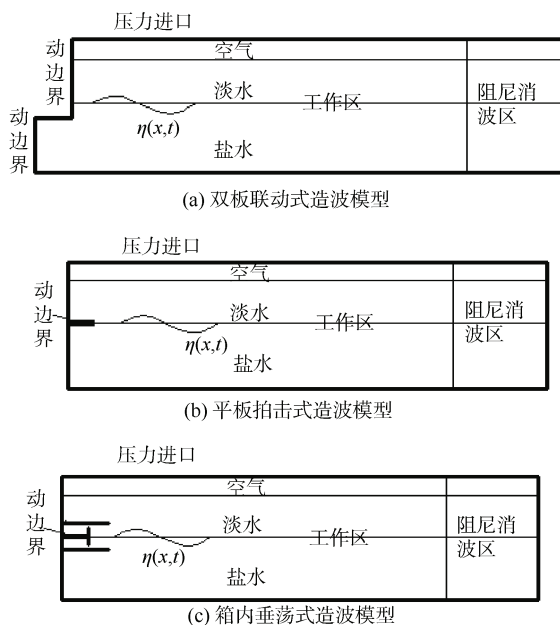


图 2 造波模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wave generation model

根据两层流内波理论给出的周期内波波面解析解, 利用 FLUENT 的二次开发功能使用 UDF 宏

DEFINE_CG_MOTION (name, dt, vel, omega, time, dtime)^[11] 编制造波模块程序来实现造波板的运动^[13]。对两相流内界面用 VOF 方法进行追踪, 进而确定不同流体间分界面的精确位置及形状等流场特征。

2.2 周期内波波面分析与验证

分别采用以上 3 种造波方法, 并对 3 种方法模拟得到的内波流场进行分析比较。

由于线性波波速为^[11, 14]

$$c = \frac{\omega}{k} = \left[\frac{g(\rho_1 - \rho_2)}{k(\rho_1 \coth kh_1 + \rho_2 \coth kh_2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数。因此, 只要分层流体的水深和密度已知, 给定生成内波的波长, 就可以计算得出内波的周期。

取内波理论波长 $L=2.576$ m, 理论波高 $H=0.0217$ m, 双板联动式造波系统中上推板振幅取 0.084 m, 平板拍击式及箱内垂荡式造波系统中造波板振幅取 0.049 m。

当时间为 10 倍内波周期, 即 $t=10T$ 时, 内波波面如图 3 所示。可以看出, 内波在传播过程中有很大的衰减。这主要是由于内波处于水下, 在分层流体中密度分界面处的两种流体的相互作用力相对于自由表面水气作用力要大得多, 这种粘性耗散作用使得内波比表面波浪衰减要快得多^[15]。对于平板拍击式造波, 从图中可以看出, 在造波区内分层流体出现了一定程度的掺混, 且波浪的沿程衰减较其他两种方法更明显。

图 4 给出了距造波板 2 倍波长处, 波面历时曲线数值解与理论解的比较。其中, 理论解根据式(2)确定。为便于比较, 将波面变化以下层盐水厚度为特征长度, 对其进行无量纲化。

可以看出, 采用双板联动式和箱内垂荡板式造波所形成的内波数值解与理论解吻合得很好, 内波形态较为理想。而平板拍击式造波产生的内波波形, 较其他两种方法稍差。另外, 对于平板拍击式造波和箱内垂荡板式造波, 图中结果表明, 造波板输入能量相同的情况下, 平板拍击式造波所生成的内波波高相对于另一种造波方法更小。



图 3 某时刻周期内波波面形态 ($h_2=0.40\text{ m}$, $h_1=0.35\text{ m}$)

Fig. 3 Shape of periodic internal wave surface at a certain time ($h_2=0.40\text{ m}$, $h_1=0.35\text{ m}$)

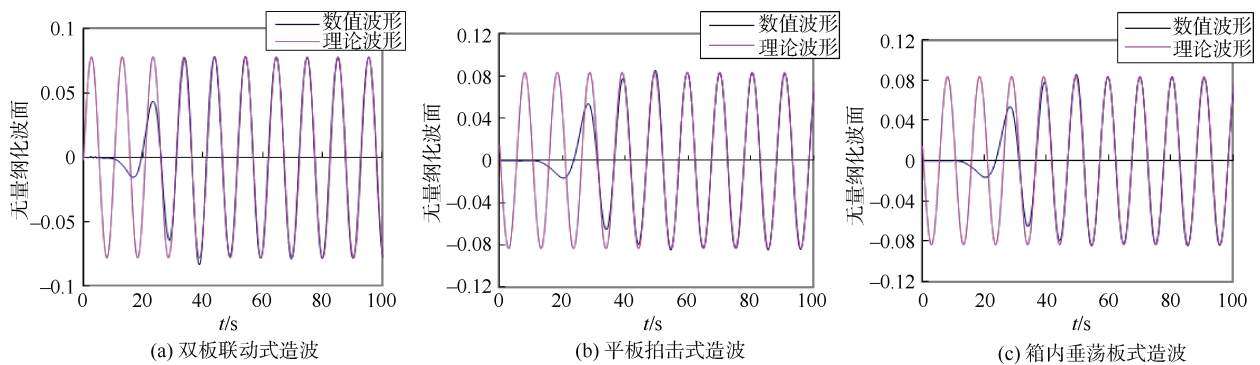


图 4 距造波板 2 倍波长处波面历时曲线数值解与理论解的比较 ($h_2=0.40\text{ m}$, $h_1=0.35\text{ m}$)

Fig. 4 Comparison of numerical and theoretical solutions of wave surface duration curves 2 times the wavelengths from the wave-making plate ($h_2=0.40\text{ m}$, $h_1=0.35\text{ m}$)

3 箱内垂荡板式造波方法造波特性分析

在内波物理实验过程中,造波板的运动使分层流体中分界面上产生内波,同时会对自由表面产生一定的干扰,即很可能会同时出现表面波和内波,两种波形相互干扰,这对内波的研究是很不利的,因此最大限度地减小对自由表面的扰动是内波造波的一个重要方面。图 5 为 3 种不同造波方法下,距造波板 1 倍波长处自由表面的波动情况。

显而易见,平板拍击式造波板运动对自由表面的扰动较大,且不稳定。双板联动式造波与箱内垂荡板式造波对自由表面的扰动差不多,但双板联动式造波在造波的初始阶段自由表面波动较大。所以,就对自由表面的扰动情况来看,箱内垂荡板式造波方法最佳。

进一步结合上节中对内波波形的分析比较,可以得出结论。

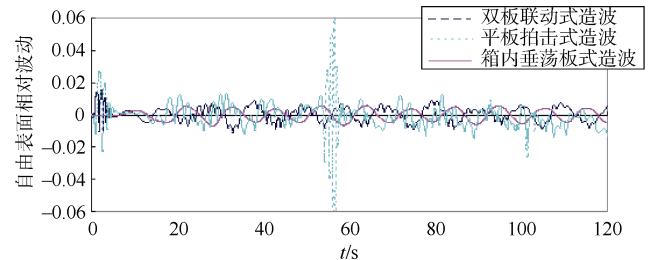


图 5 不同造波方法下相对于内波波高自由表面的波动曲线 ($h_2=0.40\text{ m}$, $h_1=0.35\text{ m}$)

Fig. 5 Wave curve of free surface relative to wave height of internal wave under different wave generation methods ($h_2=0.40\text{ m}$, $h_1=0.35\text{ m}$)

1) 3 种造波方法所生成的周期性内波与理论解都有很好的吻合。

2) 平板拍击式造波对自由表面造成的扰动比较大,且在造波板运动能量输入相同的情况下,平板拍击式造波生成的内波波高相对于其它两种方法更小,造波板附近会产生一定的掺混现象,见图 6。

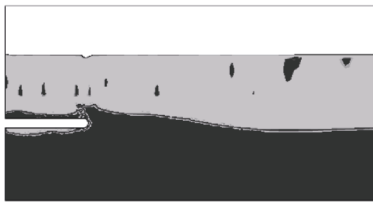


图6 平板拍击式造波板运动造成的流体掺混现象
Fig. 6 Fluid mixing phenomenon caused by motion of flat plate flapping wave generation

3) 双板联动式造波方法在造波的初始阶段自由表面波动较大, 箱内垂荡板式造波方法由于设置了上下挡板, 对自由表面的扰动最小。

4) 双板联动式造波生成内波时, 要同时控制上下两推板的运动, 而且上下推板的高度不容易改变, 对分层流体水深及分层位置的改变适应性差; 平板拍击式和箱内垂荡板式造波只需调整造波板运动的平衡位置便可以实现不同流体深度情况下的内波模拟, 并能够保证很好的造波效果。

5) 箱内垂荡板式造波在造波质量、稳定性和适应性上都优于双板联动式和平板拍击式造波方法, 并能造出质量优良的周期性内波。

4 结束语

文章提出的箱内垂荡板式造波方法, 吸取了双板联动式及平板拍击式造波方法的优点, 所生成的内波与理论解吻合良好, 波形稳定, 造波效率高。与双板联动式造波相比, 箱内垂荡板式造波对自由水面的扰动更小, 对水深的变化和分层界面位置的改变, 只需调整造波板运动平衡位置即可, 具有很强的适应性, 可以用于制造单层水体或多层水体自由表面波, 不会造成两层水体的掺混。

文章对箱内垂荡板式造波系统特性的研究成果, 可供设计和进一步研究借鉴参考。

参考文献

[1] 周根水, 高德宝, 张军, 等. 分层流体中运动回转体激发内波数值模拟[C]// 第十一届全国流体力学学术会议论文摘要集. 北京: 中国力学学会流体力学专业

委员会, 2020.

- [2] 段姗宏, 詹杰民, 罗莹莹, 余炜光. 抽板式内波水槽流体分层系统的构建方法与实验[C]// 第十一届全国流体力学学术会议论文摘要集. 北京: 中国力学学会流体力学专业委员会, 2020.
- [3] 唐勇, 徐剑, 茅宝章. 船舶与海洋工程试验水池工艺设计[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(S1): 143-148.
- [4] 袁方正. 内孤立波与潜体相互作用的数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [5] 付东明. 内孤立波与潜体相互作用的数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [6] 赵艳, 朱仁庆, 刘珍. 三维数值波浪水池的构建和粘性影响研究[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(5): 42-48.
- [7] 宋志军. 内孤立波对海洋平台作用及其运动响应[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [8] 徐肇廷. 海洋内波动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [9] 陈震远, 许荣中, 陈震武. 分层密度流体的边界波动在不透水刚性底床的运动行为——I 造波条件对波型演化的关系[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 570-574.
- [10] 程永舟. 波浪与多孔介质相互作用的水动力特征研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [11] 徐鑫哲. 内波生成机理及二维内波数值水槽模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [12] 付东明, 尤云祥, 李巍. 两层流体中内孤立波与潜体相互作用数值模拟[J]. 海洋工程, 2009, 27(3): 38-44.
- [13] WALKER S A, MARTIN A J, EASSON W J, et al. Comparison of laboratory and theoretical internal solitary wave kinematics[J], Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2003, 129(5): 210-218.
- [14] 陈小刚. N层密度分层流体界面波的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [15] 张齐焰. 非线性波浪冲击透空结构物数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

(责任编辑: 曹晓霖)