

# 数值波浪水槽的造波及消波方法

李 晖<sup>1,2,3</sup>, 何宏舟<sup>1,2,3</sup>, 杨绍辉<sup>1,2,3</sup>

(1. 集美大学机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省能源清洁利用与开发重点实验室, 福建 厦门 361021; 3. 福建省清洁燃烧与能源高效利用工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 为了提高海洋工程相关问题的研究效率, 并为物理造波机的设计提供参考, 应用 FLUENT 软件模拟了数值波浪水槽的造波及消波过程. 在模拟中, 利用用户自定义函数 UDF 设置摇板造波机的运动条件, 利用动网格技术实现流体运动; 通过设置多孔介质区域和添加粘性阻力动量源项的方法消除水槽末端壁面对波浪的反射; 采用 VOF 方法模拟自由表面位置. 模拟结果表明: 摇板式造波法可以在数值水槽中制造出稳定的线性波, 其周期误差较小, 可以满足模拟实验的要求; 多孔介质加粘性阻力动量源项的消波方法效果较好, 基本可以消除水槽末端壁面反射波的影响.

**[关键词]** 数值波浪水槽; 造波; 消波; FLUENT

**[中图分类号]** O 352

**[文献标志码]** A

## Study on Methods of Wave Generation and Absorption in a Numerical Wave Tank

LI Hui<sup>1,2,3</sup>, HE Hong-zhou<sup>1,2,3</sup>, YANG Shao-hui<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Province Key Laboratory of Cleaning Energy Utilization and Development, Xiamen 361021, China;

3. Cleaning Combustion and Energy Utilization Research Center of Fujian Province, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of solving marine engineering related problems, and to provide reference for the design of the physical wave generator, the FLUENT software was used to simulate the process of wave generation and absorption in a wave tank. In the simulation, the motion conditions of the swinging-plate wave generator were defined by the user defined function UDF and the fluid motion was realized by employing dynamic mesh technology. The reflection of the wave was eliminated by the method of setting porous media area and adding momentum source term of viscous drag force. The VOF method was utilized to simulate the free surface. The simulation results show that the swinging-plate wave generator proposed in this paper can be used to produce a stable linear wave in the numerical flume. The periodic error is small enough to meet the requirements of the simulation experiments. The wave absorption method of momentum source term with a viscous drag force in a porous media area is effective enough to eliminate the reflected wave from the end wall of the tank.

**Key words:** numerical wave tank; wave generation; wave absorption; FLUENT

**[收稿日期]** 2015-08-26

**[修回日期]** 2015-10-07

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目(51409118); 福建省自然科学基金项目(2014J05062); 福建省教育厅面上项目(JA13184)

**[作者简介]** 李晖(1974—), 女, 副教授, 博士, 从事海洋可再生能源开发与利用及工程热物理研究, E-mail: judy.lh@163.com.

0 引言

波浪水槽是船舶与海洋工程领域一种重要的试验设备，可以通过在水槽中人为制造各种波浪，来模拟自然界的海浪，用以研究海洋工程问题。随着计算机技术的不断进步，近年来利用相关软件进行波浪水槽的数值模拟已经成为趋势，数值波浪水槽不仅可以减少实验的经济、时间和人工成本，而且可为实际实验提供数据支持。

建立数值波浪水槽最关键的两个问题是制造数值波浪（即造波）和消除数值水槽边界产生的反射波（即消波）。齐鹏等<sup>[1]</sup>通过模拟物理推板造波机的运动，在国内较早地建立了三维数值波浪水池，成功模拟了正向入射波浪和 30°浪向角的斜射波浪。其后，周勤俊等<sup>[2]</sup>将入射波场引入动量方程，创造了消除波浪二次反射的源造波－消波技术。吴乘胜等<sup>[3]</sup>在入口边界模拟柔性造波板运动产生入射波，使用位于波浪水池尾部的人工阻尼区消波，对非线性规则波和不规则波进行了模拟。董志等<sup>[4]</sup>利用商业软件 FLUENT 建立了可有效模拟弱非线性波的数值波浪水槽。近年来，梁修锋等<sup>[5]</sup>采用 CFD 方法成功模拟出了既定的极大波，其方法的关键在于确定造波板的运动规律。唐耀等<sup>[6]</sup>基于 OpenFOAM 中的 interFoam 程序包，应用解析松弛法开发了一个二维数值波浪水池。廉静静等<sup>[7]</sup>采用 FLUENT 软件建立了三维规则波数值波浪水池模型，发现摇板造波的质量高且稳定性好。

本文基于 FLUENT 软件，采用摇板造波法制造线性波浪，使用设置多孔介质区域和添加动量源项的方法进行消波，模拟出接近实际状态的线性波浪水槽。

1 模型建立

1.1 控制方程

一般流体问题的求解需要考虑动量方程、能量方程和连续性方程，在数值波浪水槽的模拟问题中，由于热量变化的影响很小，因此可以不考虑能量方程，只要求解连续性方程和动量方程即可，连续性方程： $\partial u/\partial x + \partial v/\partial y = 0$ 。动量方程： $\partial u/\partial t + u\partial u/\partial x + v\partial u/\partial y = f_x - (1/\rho)\partial p/\partial x + \mu/\rho(\partial^2 u/\partial x^2 + \partial^2 u/\partial y^2)$ ； $\partial v/\partial t + u\partial v/\partial x + v\partial v/\partial y = f_y - (1/\rho)\partial p/\partial y + \mu/\rho(\partial^2 v/\partial x^2 + \partial^2 v/\partial y^2)$ 。其中： $u, v$  分别是  $x, y$  方向上的分速度； $f_x, f_y$  分别是单位质量力在  $x, y$  方向上的分量； $\rho, \mu$  分别是流体的密度和粘度； $p$  为流体压强。

在模拟中，为观察粘性流体数值造波的效果，需要实时追踪自由液面的各项物理参数。本文采用 VOF (Volume of Fluid) 方法跟踪自由表面的波动，从而获取液体（水）和气体（空气）两相流交界面的参数。VOF 方法的求解原理是将流体区域划分为许多单元格，利用单元格内流体体积分数的不同，对每个单元格内每相的动量方程进行单独求解<sup>[8]</sup>。

1.2 几何模型、网格划分及边界条件

本文所模拟的实际水槽的几何参数为长 10 m，高 1.2 m，水深 0.6 m，消波区长度设为 2 m。由于水槽是几何规则的矩形形状，故采用规则网格进行网格划分，如图 1 所示。其中在自由液面附近进行了网格加密，长为 2 m 的消波区域置于水槽的右侧。

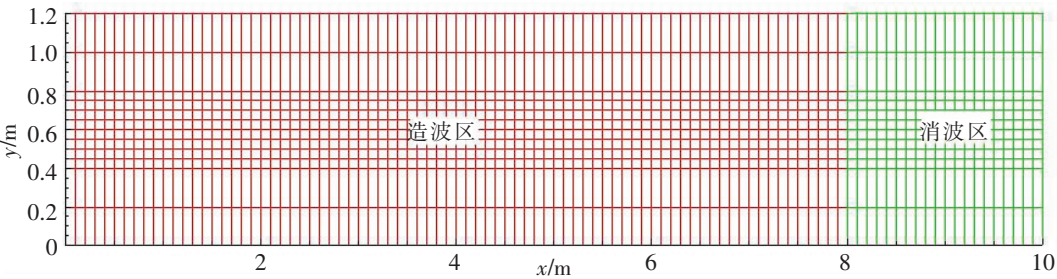


图 1 数值波浪水槽的网格划分

Fig.1 Grid generation of the numerical wave tank

边界条件设置如下：左边界为动壁面，通过该边界的物理运动制造波浪；上边界为压力出口，与外部

大气压相通;下边界及右边界为固定壁面.造波区和消波区的交界面设为内部边界.

## 2 造波及消波方法

### 2.1 摇板造波

摇板造波是在水槽中设置一绕固定轴旋转的摇板,通过摇板的往复摇动挤压周围流体,形成流体周期性类波浪运动.在数值模拟中,通过将水槽一端壁面(如图1中的水槽左壁面)设置为动边界,以该壁面的底部为原点(如图2中的XY坐标系原点),使壁面绕原点做摇摆运动,来实现摇板造波.动边界的摇摆运动可通过FLUENT中的用户自定义函数(User Defined Function,UDF)来实现;流体的流动采用动网格技术来实现.

本文采用的摇板运动方程为: $U(t) = a \tan(E/l)\omega\cos(\omega t)$ .

式中: $U$ 为摇板运动速度; $l$ 为水槽高度(如前所述取值1.2 m); $E$ 为摇板在 $l$ 高度下运动的 $X$ 方向最远距离,本文取值0.2322 m; $\omega$ 为角频率,本文取2.7757 rad/s; $t$ 为时间.

### 2.2 多孔介质区和动量源项消波

在实际生活中,多孔介质结构由于具有耗能效果好、造价低廉等优点,因此被广泛地应用于港口消浪、海岸防护等领域.利用FLUENT软件进行消波模拟时,可在水槽中设置一多孔介质消波区域,并在消波区域的动量方程中增加一个可以造成动量衰减的源项,该源项表达式为: $S_i = -(\mu v_i/\alpha + C_2\rho|v|v_i/2)$ .其中:第一项为粘性阻力项,第二项为惯性阻力项, $|v|$ 为速度大小; $1/\alpha$ 和 $C_2$ 为常数.由于利用粘性阻力便可以取得良好的消波效果<sup>[4]</sup>,因此只需要设置一个与波浪的运动方向相反的粘性阻力项,该动量源便可以起到消除波浪的作用.然而,如果该项太大,波浪会在很短的消波区域内产生反射;如果该项太小,则在消波区域长度内无法完全消去波浪,因此粘性阻力系数 $1/\alpha$ 必须取得合适的数值,才能起到良好的消波作用.本文使用一次函数对该系数进行随 $x$ 坐标的线性递增处理,以一次函数的形式沿程逐渐增加阻力系数,消波段中 $x = x_i$ 处 $1/\alpha$ 的值由式(1)确定:

$$(1/\alpha)_i = 1e^n[(x_j - x_0)/(x_e - x_0)], x_0 < x_i < x_e.$$

(1)

其中: $x_0$ 和 $x_e$ 分别为消波段前端和末端的 $x$ 坐标值; $1e^n$ 为消波阻力放大系数; $n$ 为消波阻力放大指数,可取任意整数.本文将使 $n$ 分别取值1,2,3,4,5,6,从而改变粘性阻力系数 $1/\alpha$ 的值,比较消波效果,获得最优粘性阻力系数所在区间.在本文的模拟中,采用UDF来定义消波段中的动量源项.

## 3 模拟结果与分析

### 3.1 无反射波影响的“理想波浪”的造波

为了获得没有反射波影响的理想波浪,以供后文消波效果的比较,设置一个长度远大于10 m的数值水池,观察所造数值波浪的状况.图2是利用摇板造波方法,在一长100 m,水深0.6 m的水槽中所模拟得到的 $t = 50$  s时刻的液面波形图,其中 $x$ 轴为水槽长度方向, $y$ 轴为垂直于水面的浪高方向( $y$ 方向的刻度进行了适当放大).从图2中可以看到:1)波形整体呈现衰减趋势,波浪的振幅沿程逐渐减小.这是因为在本模型中考虑了实际流体的粘性,在波浪行进过程中,受粘性力作用,流体动能转化为热能耗散了,这与实际情况相吻合.2)距离水槽左边界约80 m处( $x = 80$  m),波浪曲线出现不规则的波动,这可能是由于在

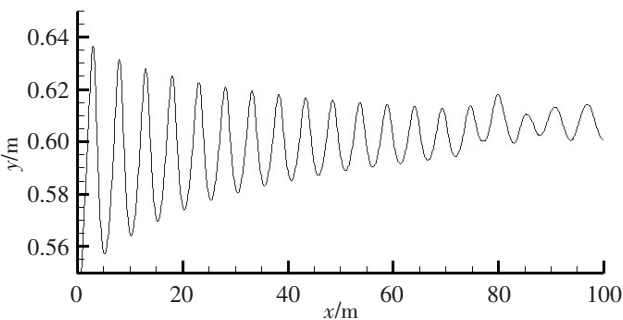


图2  $t=50$  s时100 m水槽中的液面波形图  
Fig.2 Wave pattern of free surface for the 100-meter-long wave tank at  $t=50$  s



50 s 的时间里,波浪的传播距离超过水槽长度 100 m,在尾端壁面产生反射所致. 由于本文所模拟的实际水槽长度为 10 m,因此应该重点关注距离水槽左边界 10 m 范围内的波浪状况,由图 1 可以看出,在  $t=50$  s 时刻,反射波尚未影响到该区段,因此,本文所模拟的长度为 100 m 水槽中  $x=0 \sim 10$  m 区段的波浪可以视为实际波浪水槽的理想波浪状态. 为方便起见,下文将全长 100 m 的水槽称为“100 m 水槽”,将全长 10 m 的水槽称为“10 m 水槽”.

为观察理想波浪中特定点的浪高变化,在  $x=2,4,6,8,10$  m 处设置浪高仪,观察液面高度随时间的变化规律. 图 3 所示为摇板造波理想状态下在  $t=30 \sim 40$  s 时间段内上述 5 个浪高仪所在位置处的浪高曲线. 可以看出,随着  $x$  值的增大,浪高振幅逐渐减小,如前所述这是由于流体粘性的作用. 分别测量 5 条曲线相邻波峰距离,并取平均数,可以得到波浪周期  $T$  为 2.28 s. 用于造波的摇板的运动周期可由  $T'=2\pi/\omega$  ( $\omega$  为角频率) 计算而得,根据 2.1 节  $\omega$  的取值,可计算得摇板运动周期  $T'$  为 2.26 s. 两者误差不到 1%,一定程度上验证了模拟的有效性.

由图 2 可知,波浪推进过程中,波峰之间的距离约为 5.5 m,也即波长  $\lambda=5.5$  m;又由图 3 可知,波浪周期  $T=2.28$  s,故波的传播速度  $v=\lambda/T=2.41$  m/s. 因此,50 s 内波浪行进距离为  $2.41 \times 50=120.5$  m,因此,波浪在 50 s 时间内将会抵达 100 m 水槽的右壁面并进行反射,反射波干扰入射波,于是形成图 2 所示约  $x=80$  m 处开始的不规则波动.

图 4 所示为  $t=50$  s 时数值水槽中约两个周期的理想波浪速度矢量分布图和流线图,所考虑区段无反射波作用. 由图 4(a) 可以看出,在自由表面的波峰与波谷附近会出现漩涡,并且漩涡中心速度值最小,平衡位置附近出现最大速度;由图 4(b) 可以推断,水质点沿着一个类似椭圆形的闭合曲线做往复运动,这与微幅波理论的研究结果相符.

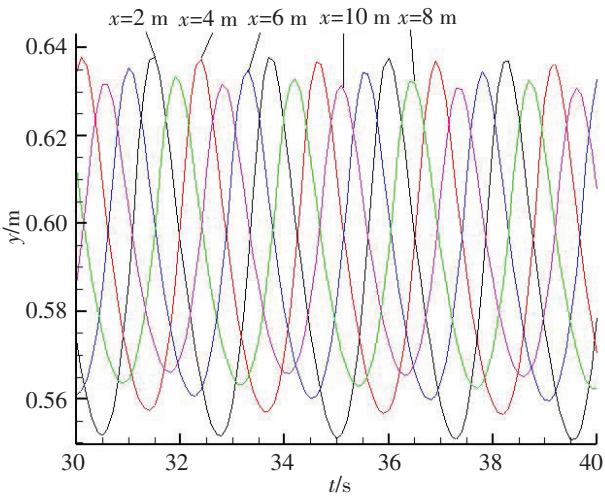


图 3 100 m 水槽内  $x=2,4,6,8,10$  m 处的浪高时历曲线  
Fig.3 Time history curves of wave height at  $x=2,4,6,8,10$  m for the 100-meter-long water tank

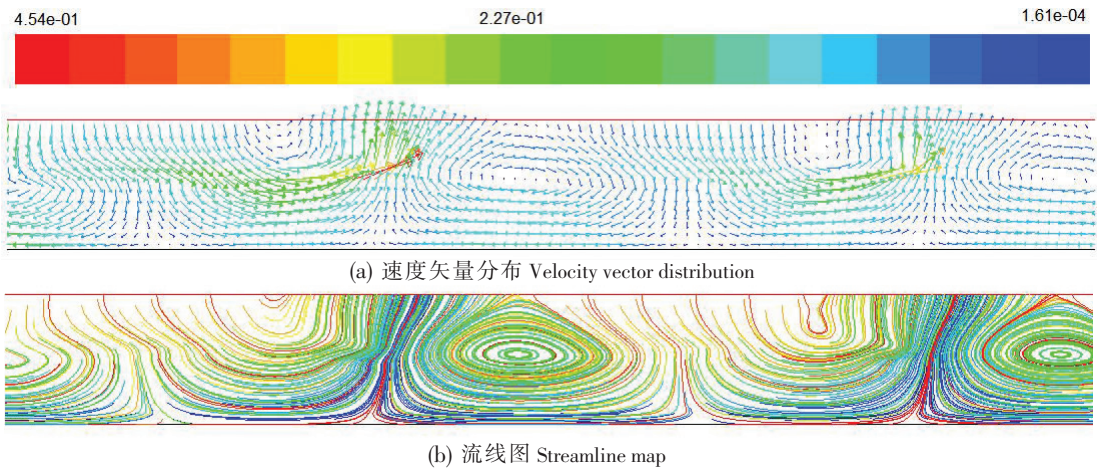


图 4  $t=50$  s 时理想波浪的速度矢量分布与流线图

Fig.4 Velocity vector distribution and streamline map of ideal wave at  $t=50$  s

3.2 有反射波影响的“实际波浪”的消波

由于动量源的消波效果取决于粘性阻力系数  $1/\alpha$ , 因此改变式 (1) 中消波阻力放大指数  $n$  的取值,便可以比较消波效果. 为方便起见,取无消波的 100 m 水槽内的前 10 m 段作为理想波浪,与全

长 10 m 的水槽的无消波和有消波时波浪情况相对比. 图 5 为无反射波 (理想波浪)、有反射波但无消波以及  $n$  分别取 1~6 不同整数消波时, 在  $t=50\text{ s}$  时刻的液面波形图. 由图 5 可以看出, 由于没有反射波影响, 理想状态下波浪的振幅最小; 而考虑反射波但未采取消波措施时, 波浪振幅要明显高于理想状态, 这是由于波浪撞击在水槽壁面上产生反射波, 反射波与波浪相互干涉形成驻波的结果. 另外, 当  $n$  取不同数值时, 波浪振幅出现不同的变化, 有些使振幅减小, 接近理想波形, 另外一些却使振幅增大. 仔细观察图 5 可以发现, 当  $n=3$  或  $n=4$  时, 波浪振幅比无消波时减小, 说明添加多孔介质和动量源项的消波措施起到了一定作用. 而当  $n=1, 2, 5, 6$  时, 波浪振幅要大于无消波时的状态, 这是因为: 当  $n$  取值过小时, 动量源不足以消去波浪能, 使得波浪通过消波区域后仍在右端壁面上形成反射, 反射波与入射波在水槽中可能形成驻波; 当  $n$  取值过大时, 导致波浪在消波区域起点 (即  $x=8\text{ m}$  处) 后很短的距离内就消去了动能, 该距离可能小于网格的大小, 于是模拟时无法连续地将这一过程表现出来. 而消波距离过短, 就使得波浪就像是撞击在一面墙壁一样将波浪能反射回前端波浪区域, 也产生了入射波与反射波互相干涉的现象, 使波浪振幅变大. 本研究  $n=3$  时的波形曲线最接近理想状态, 消波效果最好.

图 6 和图 7 分别为  $t=50\text{ s}$  时, 无消波及消波阻力放大指数  $n=3$  时 10 m 水槽中的流体速度分布云图, 两图均显示, 由于流体粘性的作用, 波浪动能沿程减小. 此外, 在图 7 中, 水槽右端消波区域的流速速度衰减明显, 且图 7 所显示的速度量级明显小于图 6. 这说明, 消波阻力放大指数  $n=3$  时, 消波区域的粘性阻力动量源可以起到很好的消波效果.

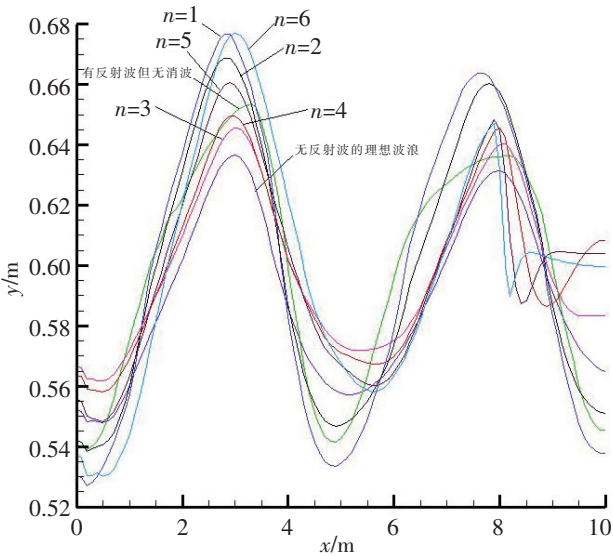


图 5 无反射波 (理想波浪)、有反射波但无消波以及  $n$  分别取不同整数消波时,  $t=50\text{ s}$  时刻的液面波形图

Fig.5 Wave pattern of free surface for wave without absorption and wave with absorption by different  $n$  at  $t=50\text{ s}$

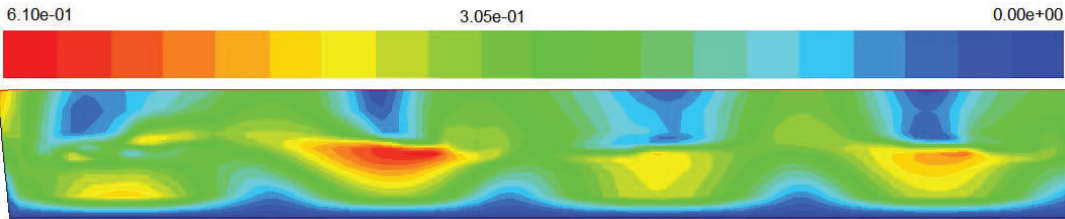


图 6 无消波时 10 m 水槽中的流体速度分布云图 (单位: m/s)

Fig.6 Velocity distribution for the flow without absorption in the 10-meter-long water tank (unit: m/s)

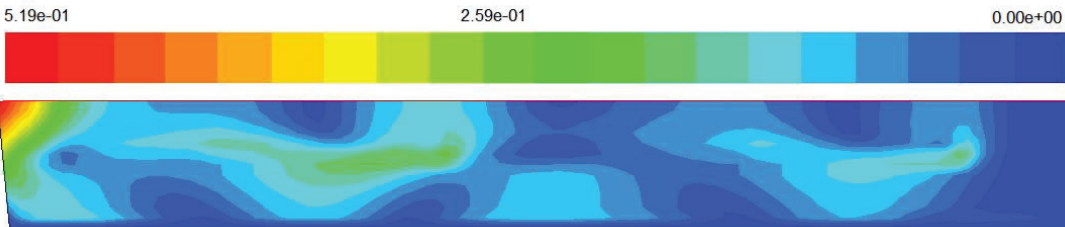


图 7  $n=3$  时 10 m 水槽中的流体速度分布云图 (单位: m/s)

Fig.7 Velocity distribution for the flow in the 10-meter-long water tank when  $n=3$  (unit: m/s)

图 8 所示为  $t = 30 \sim 40$  s 时间段内, 无消波及消波阻力放大指数  $n = 3$  时 10 m 水槽中  $x = 6$  m 处的浪高时历曲线. 由图 8 可见, 无消波时的曲线有一个明显的“次波峰”, 这是反射波作用的结果; 而经过消波阻力放大指数  $n = 3$  的粘性动力源项消波后, 浪高曲线的“次波峰”现象已完全消失. 另外,  $n = 3$  时的波幅高于无消波时的波幅, 这是由于同一时刻两种情况下波面波峰出现的位置不同所致, 这一点由图 5 可以佐证.

## 4 结论

本文以 FLUENT 软件为计算平台, 采用摇板造波方法和多孔介质区域加动量源消波方法实现了数值波浪水槽的构建. 在模拟中利用用户自定义函数 UDF 分别实现了造波摇板的摇摆和消波区中源项的添加, 并基于 VOF 方法模拟了波浪的自由表面. 数值计算的结果表明, 采用摇板式造波机可以在数值水槽中造出稳定的线性波, 其周期误差较小, 可以满足模拟实验的要求; 多孔介质加粘性阻力动量源项的消波方法消波效果较好, 基本可以消除水槽末端壁面反射波的影响.

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 齐鹏, 王永学. 三维数值波浪水池技术与应用 [J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(6): 825-830.
- [2] 周勤俊, 王本龙, 兰雅梅, 等. 海堤越浪的数值模拟 [J]. 力学, 2005, 26(4): 629-633.
- [3] 吴乘胜, 朱德祥, 顾民. 数值波浪水池及顶浪中船舶水动力计算 [J]. 船舶力学, 2008, 12(2): 168-179.
- [4] 董志, 詹杰民. 基于 VOF 方法的数值波浪水池以及造波、消波方法研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2009, 24(1): 15-21.
- [5] 梁修锋, 杨建民, 李俊, 等. 面向海洋工程应用的数值波浪水池 [J]. 中国科学: 物理学力学 天文学, 2011, 41(2): 112-122.
- [6] 唐耀, 邹早建. 二维黏性流数值波浪水池的开发与验证 [J]. 水动力学研究与进展, 2013, 28(5): 538-544.
- [7] 廉静静, 尹勇, 杨晓, 等. 基于粘性流船舶数值波浪水池造波和消波方法研究 [J]. 船舶力学, 2013, 17(1/2): 56-62.
- [8] 管陈, 董国祥, 金允龙. 三维数值波浪水池造波技术研究 [J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2013, 36(2): 11-15.

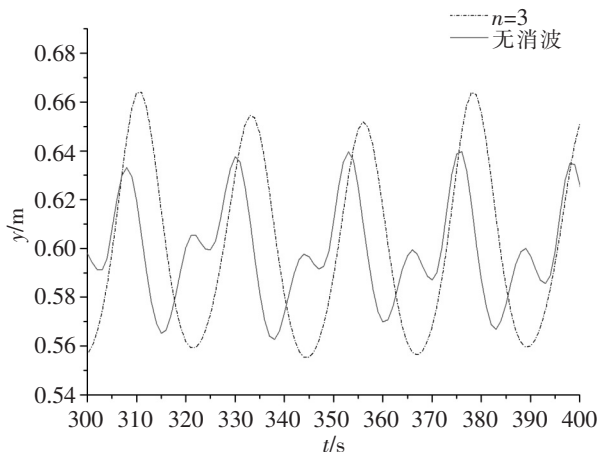


图 8  $n=3$  时 10 m 水槽中  $x=6$  m 处的浪高时历曲线  
Fig.8 Time history curve of wave height at  $x=6$  m for the 10-meter-long water tank when  $n=3$

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)