

数值波浪水槽消波器的改进与检验^{*}

高 山

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

数值波浪水槽技术是一种新兴的水波动力学数值模拟技术, 它能够实现水波现象的精确模拟。作为数值波浪水槽的一个重要功能, 消波技术被用于消除传入波浪在水槽末端的反射效应, 以防止反射波对有效实验区域的污染, 从而保证特定要求的水波实验的精确性。目前被广泛采用的消波技术可分为阻尼消波区和主动消波器两类。

阻尼消波区的原理是通过设定特定计算区域的阻尼项来达到削弱传入该区域波动的目的。作为被动式消波技术, 阻尼消波易于实现, 且具有较好的消波效果, 它能够很好地吸收波长小于阻尼区长度的波动, 但是对于波长大于阻尼区长度的波动则不能完全吸收, 且波长越长消波效果越差。理论上要想使阻尼消波能够消除所有波动, 必须把阻尼区长度设为大于最大入射波的波长, 这无疑会使模式的计算量成倍增长。而主动消波器则能够弥补阻尼消波的这一缺点, 它的原理是运用传入波动信号的反馈原理, 通过安装在水槽末端的消波板(活塞或摇板)运动抵消传来的各种波动, 它不会增加多余的计算区域, 尤其适合于长波实验。科学家在主动消波器方面做了许多研究工作, Milgram (1970)首次设想出一种将消波板前的水位高度作为控制消波板运动的反馈信号进行主动消波的方法, 并按此原理在真实实验水槽中安装了一个摇板式的消波器, 得到了较好的效果; Cément(1988)在其数值水槽模式中应用了这种消波方法; Jagannathan(1992)、Majsondieu等(1993)分别以消波板所受波浪力作为反馈信号, 制造了活塞式消波器并应用于二维波浪水槽中, 其后 Clemen(1996)又对其活塞式消波器进行改进, 测试实验表明使用这种改进后, 对浅水波的吸收率达到 97%, 有限深度波的吸收率为 60%, 而深水波的吸收率只有 20%。Grilli(1997)对此方法作了改进, 减小了多余的数值振动。为了弥补短波吸收能力的不足, Clemen也使用了与阻尼消波相结合的方法, 得到了理想的效果; 而目前较先进的主动消波器是一种被称为“主动消波控制系统”(Active Wave Absorption Control System)的技术, 简称 AWACS(Schaffer et al., 1994; Skourup 1996)。它使用“Finite Impulse Response”(FIR)滤波器以消波板的水位作为反馈信号进行消波。总之, 主动消波器的消波能力越来越强, 但同时其工作原理则变得异常复杂。对于一般的数值波浪水槽研究者来说, AWACS的计算量大, 数值实现较困难, 因此宁愿选择保守但原理简单的阻尼消波技术。希望能有一种原理相对简单, 而依然具有较好的宽谱消

^{*}国家自然科学基金课题(批准号: 40506010)项目资助。

通信作者: 高山, 男, 博士, 现从事海洋物理数值波浪方面的研究; E-mail: gaoshan@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2006 年 6 月 23 日。

波效果的主动消波器。

有一种实现方法似乎是可行的：目前的主动式消波器都是使用原始入射波的某一特性作为反馈信号，如果能够将入射的各种组成波的某一特性在到达消波板之前同一化，那么以这一特性作为反馈信号的消波器就可使用固定的消波参数进行精确消波了，由此可避免使用复杂的信号反馈技术。

水波具有浅水波速恒定的特性，即无论何种波长的波动，当其传至浅水区域时其波速将只与水深有关，因此波速能够满足同一化要求，仅需设置一个浅水地形。根据以上思路，我们在原有活塞式消波器的基础上，设计出一种以波速作为同一化特性的主动消波器。对其进行的消波测试实验表明，该消波器对于各种波长的波动都具有较好消波效果，而且对非线性波也具有良好的消波特性。

一、变浅地形消波器的工作原理

1. 理论依据

图 1 是一个以水位高度为控制信号的活塞式消波器示意图。其运行原理是：当活塞上的水位高于平均水位时，活塞向后退使水位降低；当活塞上的水位低于平均水位时，活塞向前进使水位上升，力求保证活塞上的水位与平均水位相同，从而达到消波的目的。显然，活塞随水位的反应速度是消波的关键，如果活塞的反应速度慢，活塞来不及退回相应的位置，则会导致水在活塞处的堆积，波浪会在活塞上反射，而反应过于迅速，会导致活塞处水位不断地交替升降，消波器就成了造波机，因此必须选择合理的活塞运动速度，这需要借用熟悉的 Sommerfeld 辐射边界条件。

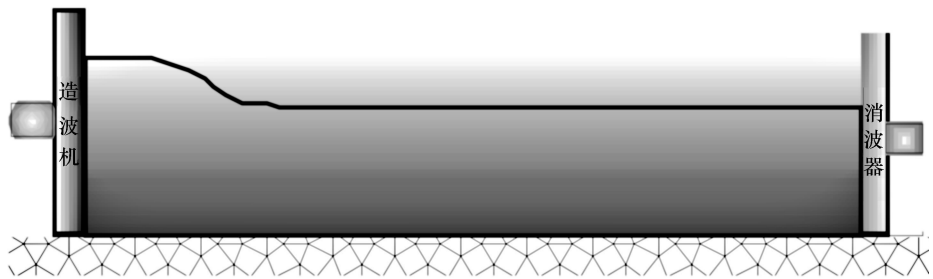


图 1 活塞式消波器示意

假设有一列单波沿正 x 轴方向传播，则 Sommerfeld 辐射边界条件 (Orlanski 1976) 的形式为

$$\frac{\phi}{\partial t} + c \frac{\phi}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

其中： ϕ 为水体势函数； c 为波速； t 为时间。

在时域模拟中，由于波场比较复杂，必须要处理即时出现的不规则波动现象，因此上式中的波速 c 是不定常的。若将水波自由面的动力学边界条件，即伯努利方程 (式中

忽略自由面的定常气压场)

$$\frac{\phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi + g\eta = 0 \quad (2)$$

代入式(1)可得自由面任意位置的即时波速的计算公式

$$c = \left[\frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi + g\eta \right] / \frac{\phi}{\partial x} \quad (3)$$

其中: g 为重力加速度; η 为水位高度。该处流体的水平速度可表示为

$$\frac{\phi}{\partial x} = \left[\frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi + g\eta \right] / c \quad (4)$$

若将活塞的运动速度设定为该处流体的水平速度, 其作用就相当于在活塞的背后产生一个虚拟波场, 其效果恰似传来的波动穿透活塞继续向外传播, 因此在活塞上将不会有反射, 从而达到最佳的消波效果。

由于非线性项 $\frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi$ 相对于 $g\eta$ 为高阶小量, 所以可以被略去, 将式(4)简化为

$$\frac{\phi}{\partial x} = g\eta / c \quad (5)$$

此公式即为消波器的活塞运动控制方程, 它所使用的反馈信号为波速和水位, 只要我们知道入射波的波速和活塞处的水位, 即可用式(5)控制活塞运动状态达到极好的消波目的。水位是容易得到的, 但波速则无法简单分辨。对于已知波速的规则波实验来说, 上式可以直接使用, 而对于不规则波动则必须使用相应的信号探测反馈系统得到入射波的波速, 但如果所要消除的是浅水波, 则公式(5)依然可以简化。已知水波波速公式

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kd} \quad (6)$$

式中 k 为波数; d 为底地形深度。通常认为当波长与水深之比 $\lambda/d > 12$ 即 $kd = \frac{2\pi}{\lambda}d < 0.52$ 时的水波可算作浅水波, 此时有 $\sqrt{\frac{\tanh kd}{kd}} > 95\%$, 因此浅水波的波速仅与水深有关, 即

$$c \approx \sqrt{gd} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)可得消除浅水波时的活塞运动水平速度控制方程

$$u_p = \frac{\phi}{\partial x} = \sqrt{\frac{g}{d}} \eta \quad (8)$$

由此可见由于波速的同一性, 对浅水波的消波参数是固定不变的。

2. 变浅地形主动消波器的设计方案

利用浅水波速恒定这一特性可以设想这样一种消波器, 如图2所示。

在原消波器的活塞前端设定一个渐变的浅水地形, 地形前端从深水区平滑过渡至浅

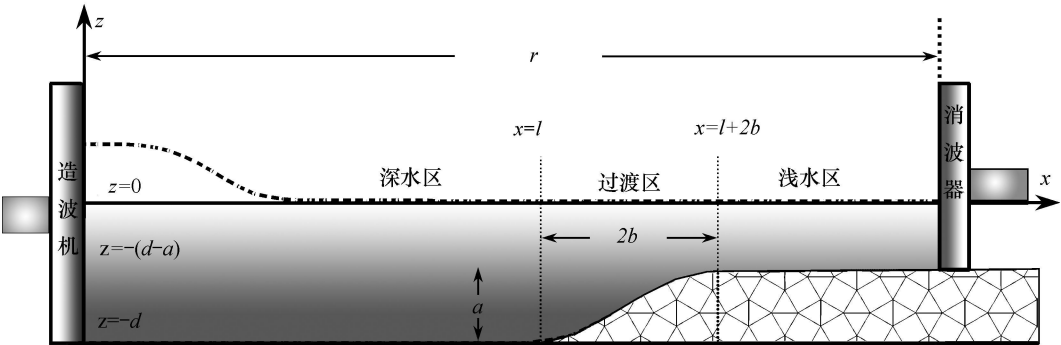


图 2 新型消波器示意图

水区，后端为等深的浅水区，地形函数的具体形式为

$$\begin{cases} z = -\left\{ d - a \exp\left[-\left(\frac{x-l-2b}{b}\right)^{\frac{1}{3}}\right] \right\} \approx -d & x \in [0, l] \text{ 深水区} \\ z = -\left\{ d - a \exp\left[-\left(\frac{x-l-2b}{b}\right)^{\frac{1}{3}}\right] \right\} & x \in [l, l+2b] \text{ 过渡区} \\ z = -(d-a) & x \in [l+2b, \dots] \text{ 浅水区} \end{cases} \quad (9)$$

式中 d 为深水区水深； r 为水槽总长度； a 为地形高度参数； b 为地形宽度参数； l 为深水区长度。过渡区地形使用指数形式的形状函数，它具有无限阶连续导数，通过合理设置地形参数 a 、 b 可有效避免入射波在地形上的反射。

由于水深变化，此时活塞运动控制方程变为

$$u_p = \sqrt{\frac{g}{d-a}} \eta \quad (10)$$

按照上述设想，该消波器被设计应用于一个二维边界元数值波浪水槽模式中。该模式使用二次边界元法与混合欧拉-拉格朗日界面追踪方法相结合的架构方式，具有完全的非线性模拟能力，同时具有很好的质量守恒和体积守恒性（高山，2003）。

3. 配合使用的阻尼消波区

由于地形的变化，新型消波器存在一个问题：当水波进入浅水地形时会产生变浅效应，其波高会增大，波长会缩小，波动能量会在浅地形上发生阻塞，此时水波一方面会在地形上产生一定程度的反射；另一方面则会发生波面变形和破碎，这将导致数值模式的不稳定。

为防止地形反射和波面破碎的发生，除了前述的设置缓变地形外，使用阻尼消波区是很有效的办法。设置于变浅地形上的阻尼消波区能够发挥变浅效应的反作用，不仅能有效抑制波高的增大，迟滞的波动能量也会被吸收，使波能通道保持畅通，从而解决地形反射和波面破碎问题。

因此模式中应用了一种阻尼消波区技术与变浅地形消波器配合使用。Clement (1996) 将该技术应用于其二维数值水槽中，其原理是在自由面的运动边界条件和动力

边界条件上同时加入耗散项。

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2} \nabla\phi \cdot \nabla\phi - g\eta - \nu\phi \tag{11}$$

$$\frac{d\eta}{dt} = \nabla\phi - \nu\eta \tag{12}$$

其阻尼参数 ν 的表达式为

$$\nu = \nu(s) = \begin{cases} \nu_{\max} \cdot (s-1)^2 (2s+1) & \text{if } 0 \leq s \leq 1 \\ 0 & \text{if } s > 1 \end{cases} \tag{13}$$

其中 $\nu_{\max}$ 为消波参数; $s = |x - x_{wall}| / l_{\text{ponge}}$, l_{ponge} 表示阻尼区的长度; x_{wall} 为阻尼消波区的外边界, 处于水槽末端。

二、消波器的 ISOPE 基准性能测试

下面使用 1999 年国际海岸与极地工程学会 (ISOPE) 设计的四个基准测试实验 (Clement et al., 1999 b) 来检验作者设计的消波器的消波性能 (图 3)。

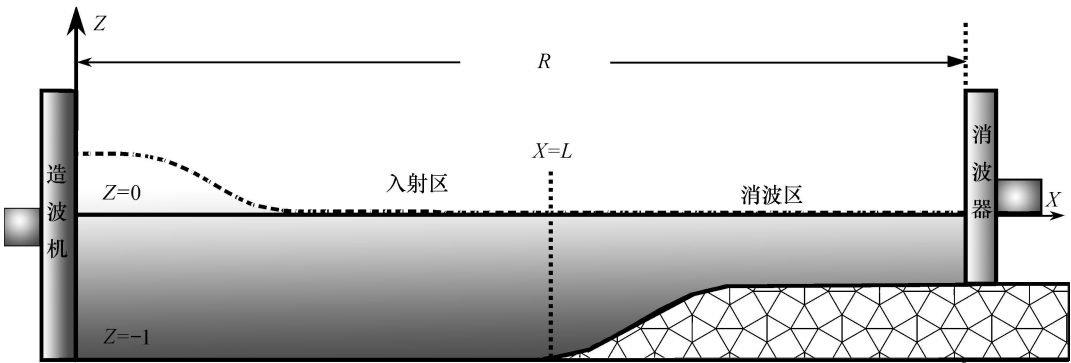


图 3 ISOPE 实验的数值波浪水槽示意图

用水槽深度 d 作长度变量的无量纲化, 则

$$(X, Z, H) = \frac{(x, z, \eta)}{d} \tag{14}$$

其中 (X, Z, H) 分别为无量纲横坐标、纵坐标和自由面高度。同时定义无量纲化时间为

$$T = t \sqrt{g/D} \tag{15}$$

水槽左端的侧边界为活塞式造波机。在水槽右侧 $X=1$ 处为开边界, 也即消波区的入射边界, 其后延伸的水槽的属性可由测试者根据所用消波器的原理不同自行设定, 如设置为阻尼区或主动消波器的固体边界等。 $X=R$ 为水槽的右边界。

将其与上述浅水消波器的设置相比较后得到如下对应关系: 消波活塞的无量纲化运动速度控制方程为

$$U_p = \frac{U_b}{\sqrt{g_d}} = \frac{\eta}{d} = H \tag{16}$$

地形函数的无量纲化形式为

$$\begin{cases} Z = - \left(1 - A \exp \left\{ - \left[\frac{(X-L)}{B} \right]^2 \right\} \right) \approx -1 & x \in [0, L] \\ Z = - \left(1 - A \exp \left\{ - \left[\frac{(X-L)}{B} \right]^2 \right\} \right) & x \in [L, L+2B] \\ Z = - (1-A) & x \in [L+2B, R] \end{cases} \tag{17}$$

其中 $(A, B) = \left(\frac{a, b}{d} \right)$ 为无量纲地形参数。而阻尼消波区的无量纲化阻尼系数为

$$V = \nu \cdot \sqrt{g/d}$$

1. 浅水波消波实验

首先进行浅水波的消波实验。在这一测试实验中，要求左侧活塞式造波机的位移按如下规律变化

$$X = a_w \tanh(\eta) \sin(\omega \eta) \tanh \left[n \frac{2\pi}{\omega} - \right] t \tag{18}$$

由此产生一系列圆频率为 ω 、振幅为 a_w 、组成波个数为 n 的单频波包。

设定式 (18) 中的圆频率 $\omega \sqrt{d/g} = 0.4$ ，振幅 $a_w/d = 0.4$ ，波包内单波个数 $n = 8$ 能够产生一系列浅水波， $\lambda/d = 15.29$ 。水槽开边界位置 $L = 175$ 。

由于吸收浅水波是主动消波器的特点，因此无需进行地形设置。设主动消波器的参数为： $R = 175$ ， $A = 0$ ，不使用阻尼区。其结果见无量纲势能变化示意图 (图 4) 中的虚线及其波面随时间变化图 (图 5)。图 4 中，浅水波包在稳定传播阶段的势能 $E_p \approx 0.85$ ，经过消波作用后仅余约 0.005，消波器对波包总能量的吸收率大于 99%。图 5 也显示在右侧边界仅有极小的反射波。

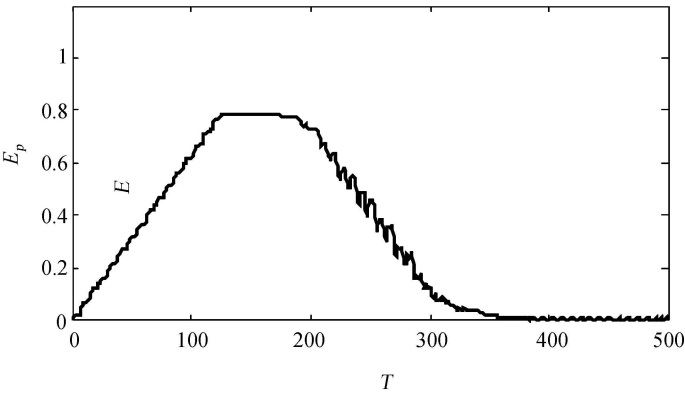


图 4 无量纲势能变化示意图——浅水波

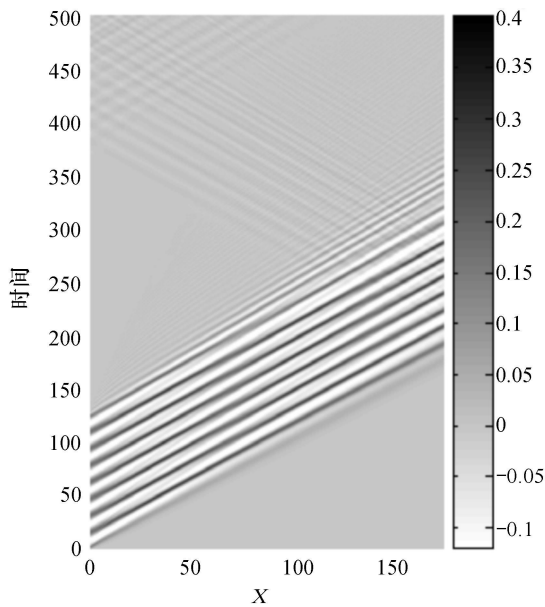


图 5 波面高度随时间变化图——浅水波

实验证明，主动消波器本身对浅水波具有极好的消波能力。

2. 深水波消波实验——变浅地形消波器 VS平底地形消波器

设定式 (18)中的 $\omega \sqrt{d/g}=3$ $a_w/d=0.012$ $n=8$ 能够产生一系列高频率、波长短的深水波， $\lambda/d=0.698$ 水槽开边界位置 $L=6$

作者先采用变浅地形的主动消波器进行测试。设定消波器的参数为 $R=10$ $A=0.9$ $B=3$ $L=6$ (图 6)。

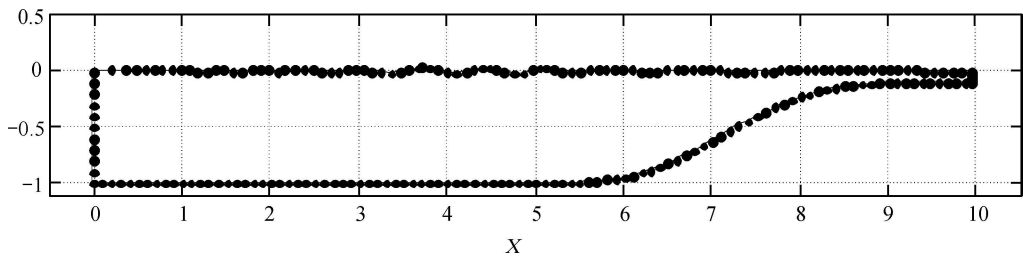


图 6 水槽地形设置示意图

为了对比检验变浅地形带来消波效果的变化，在其他参数不变的情况下，再使用平底进行消波测试，即取底地形高度 $A=0$ 两次实验结果无量纲势能变化和波面 时间变化均有所不同(图 7、图 8)。其中图 7的实线和图 8(a)为变地形的结果。从图 8(a)中可以看到在 $X \in [6, 10]$ 区间内的线条向上弯曲，表明波速在地形作用下不断减慢，深水波在逐渐过渡为浅水波；从势能变化结果看到，波包在稳定传播阶段的势能 $E_p \approx 3.3 \times 10^{-4}$ ，而经过消波器的作用后剩余约 1.5×10^{-5} ，可知消波器对波包总能量的吸收

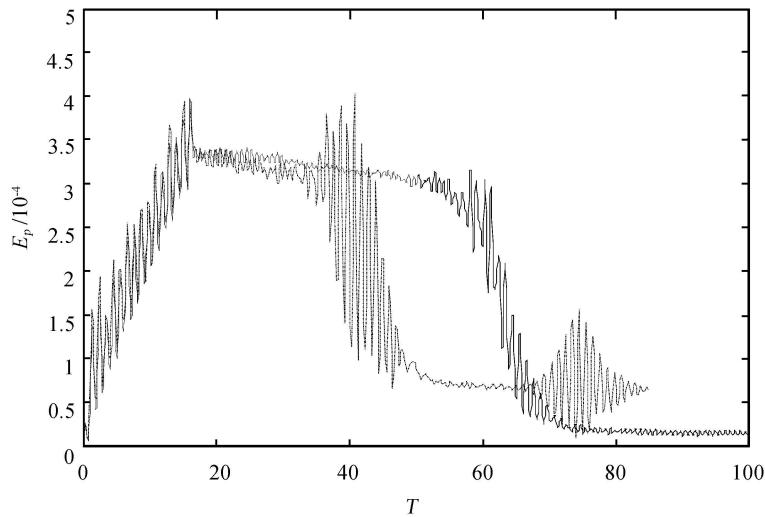


图 7 无量纲势能变化示意图——深水波情况

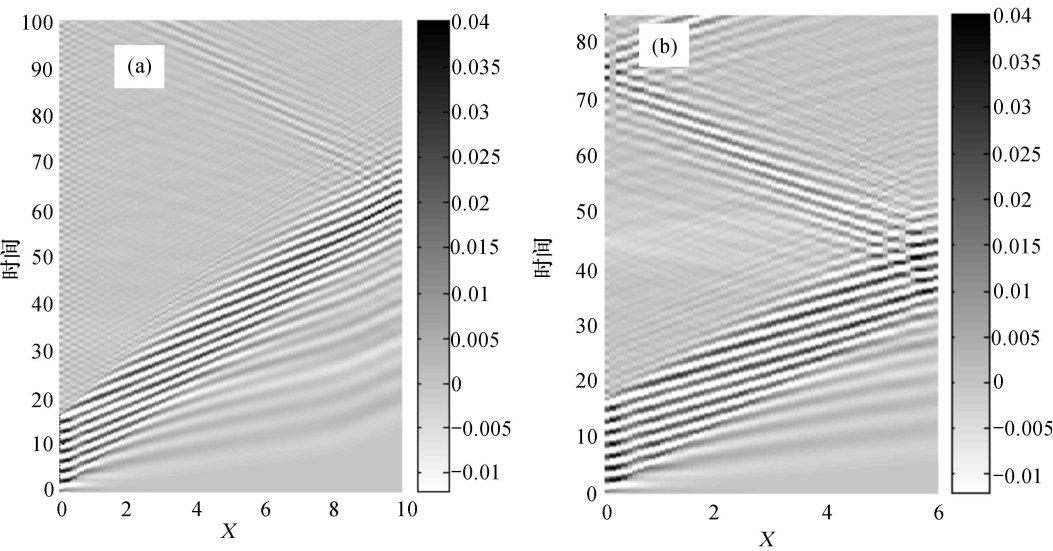


图 8 波面高度随时间变化图——深水波情况

率约为 95%。

图 7 中的点画线和图 8 (b) 为平底的实验结果。显然，在没有地形变化的情况下，主动消波器的消波性能差很多。从势能变化结果看到，经过消波器的作用后 E_p 剩余约 7×10^{-5} ，消波器对波包总能量的吸收率只有 80%。从图 8 (b) 也可明显看到水波的反射。

上述实验充分证明，通过变浅地形的设置，主动消波器对高频波也可以具有较强的吸收能力。

3. 有限水深波情况——变浅地形消波器 VS 阻尼消波器

设定式 (18) 中的 $\omega \sqrt{d/g}=1.5$ 振幅 $a_w/d=0.04$ 波包内单波个数 $n=8$ 能够产生一列有限水深波, $\lambda/d=2.737$ 。水槽开边界位置 $L=22$ 。

1) 消波方案

为对比检验变浅地形消波器消波作用, 首先尝试使用阻尼区进行消波, 实验中使用最佳阻尼参数, 由于阻尼消波能够消掉波长小于阻尼区长度的波动, 所以我们设定阻尼消波区的长度比水波的波长要短。这样阻尼消波将无法完全消除这些有限水深波。阻尼区具体参数设置为: 阻尼区位置: $[L, R] = [22, 23]$; 阻尼参数: $V_{max}=0.2$ 使用变浅地形消波器消波使用与阻尼区长度相同的地形长度进行相同的实验, 将结果与阻尼区的消波结果进行对比。消波器参数设置如下: 消波器位置: $R=23$, 底地形高度: $A=0.7$ 底地形宽度: $B=0.5$ 。水槽的地形设置如图 9 所示。

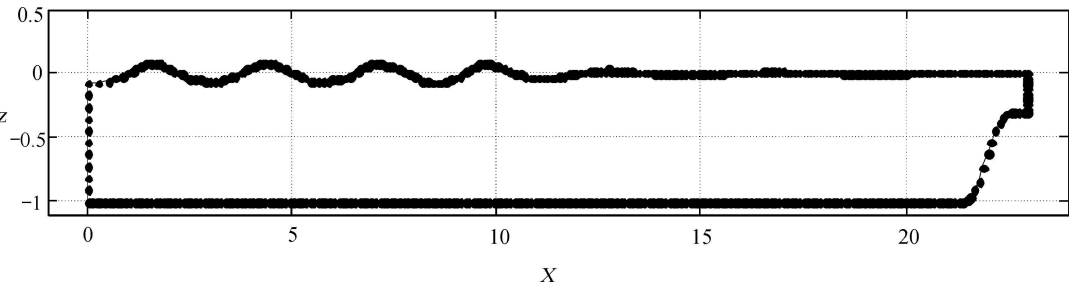


图 9 水槽地形设置示意图

2) 实验结果分析

图 10 中的虚线为阻尼区的消波无量纲势能变化结果。图 11 (b) 是波面随时间变化曲线。由图 11 (b) 可见, 由于阻尼区长度仅有波长的 $1/3$ 因此被入射波穿透并在右边界产生明显的反射。由图 10 可知, 反射波的剩余势能约为 1×10^{-3} , 对波包总能量的吸收率约为 95%, 未能完全吸收。

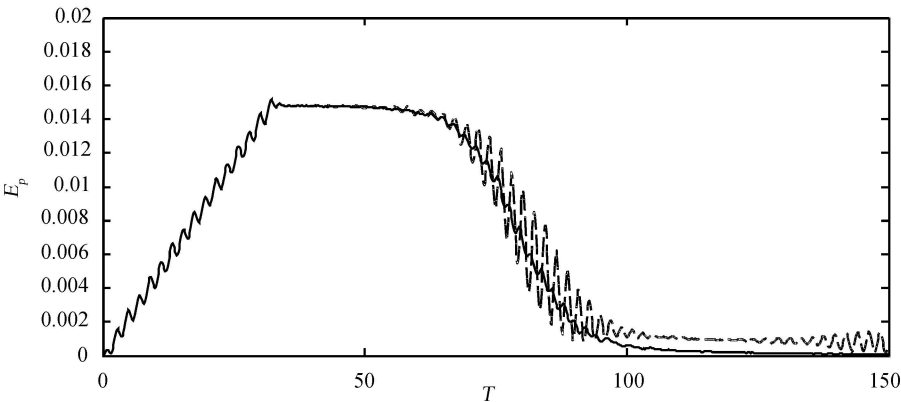


图 10 无量纲势能变化示意图——有限水深波

图 10中的实线是变浅地形实验势能变化结果。图 11 (a)是波面随时间变化。由图 10可见，波包在稳定传播阶段的 $E_p \approx 1.5 \times 10^{-2}$ ，经过消波作用后剩余约 1.0×10^{-4} ，经计算得出变浅地形组合消波器对波包总能量的吸收率大于 99%。

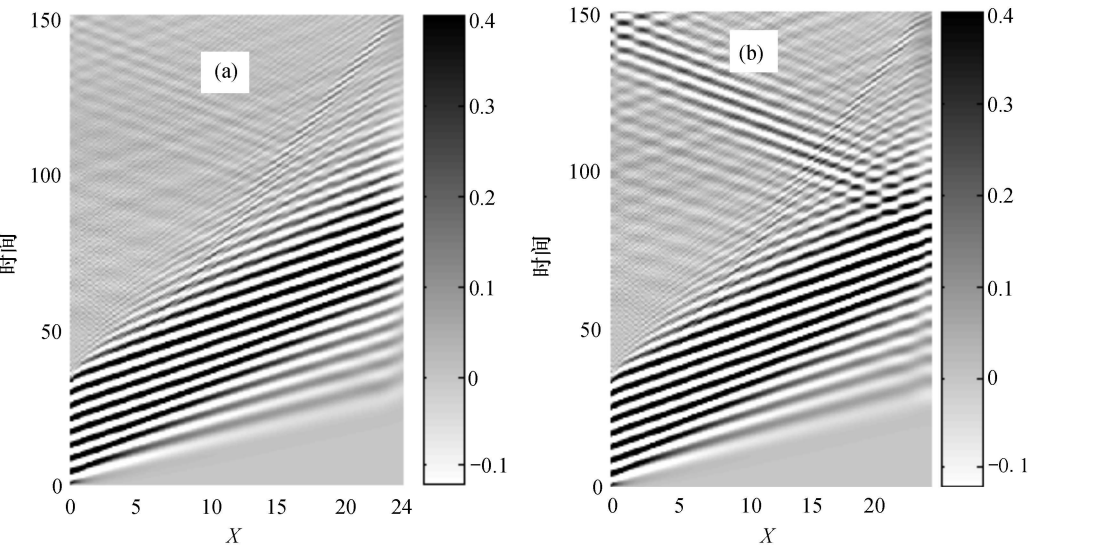


图 11 波面高度随时间变化图——有限水深波

实验证明，使用变浅地形主动消波器进行有限水深波的消波能够获得比阻尼区更好的消波效果，可有效缩短消波区长度，节省计算时间。

4. 宽谱非线性波实验——Cauchy/Poisson问题

前面的实验均为单频波包实验，最后一个测试将能够测试消波器的综合消波性能。在该测试实验中，初始状态时自由面在左侧边界处存在一个水包（图 12），其自由面形状表达式为

$$H=0.4 \exp(-X^4) \tag{19}$$

从图 13中可知，波动的总能量为其初始势能 $E_p=0.0609752475$ 。左侧造波机保持静止，消波条件从 $X=10$ 以后允许使用。选择这种初始水位状态的原因是，它具有很宽的波谱，能够在波源处连续不断地产生各种频率的组合波动，组成波中既有浅水波也有深水波，在组成波的传播过程中波面会产生显著形变，体现出较强的非线性。此实验是检验消波器综合消波性能的极好方法。消波方案如下。

首先使用经典的阻尼消波进行实验，由于组成波中具有较强的浅水波，因此将阻尼区的长度适当加长，阻尼区具体参数设置为：阻尼区位置：[10 16]；阻尼参数： $V_{max}=0.1$ 。然后将变浅地形消波器与阻尼消波配合使用，为便于对比，设置了与阻尼区长度相同的地形。消波器位置： $R=16$ 底地形高度： $A=0.5$ 阻尼区位置：[10 16]；阻尼参数： $V_{max}=0.1$ 。

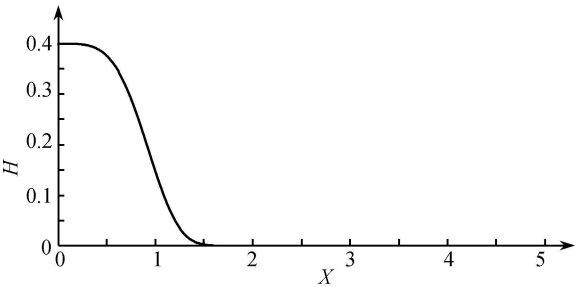


图 12 自由面的初始场

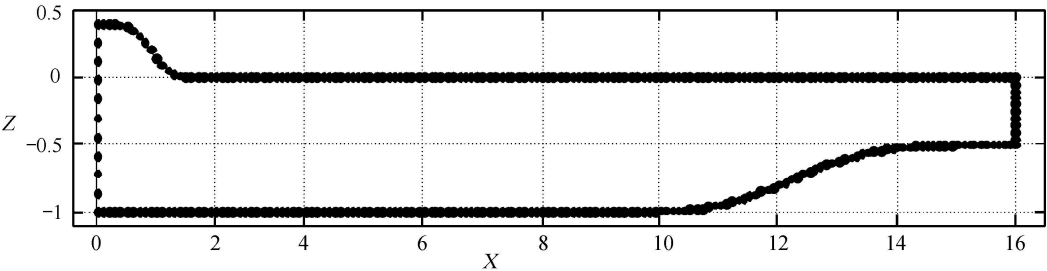


图 13 $T=0$ 时的自由面状态示意图

图 14中的虚线是阻尼消波势能变化的结果。图 15(a)是波面随时间变化。从势能变化结果可以看到组成波的能量并未被完全吸收，出现了明显的能量反射，残余能量在水槽中反复振荡，且削减缓慢，从图 15(a)也可看到有长波从水槽末端反射回来。产生这种结果的原因是组成波中浅水波的波长超过了阻尼区的长度，因此阻尼消波无法及时吸收浅水波的能量。这一结果暴露了阻尼消波无法吸收长波的弱点。

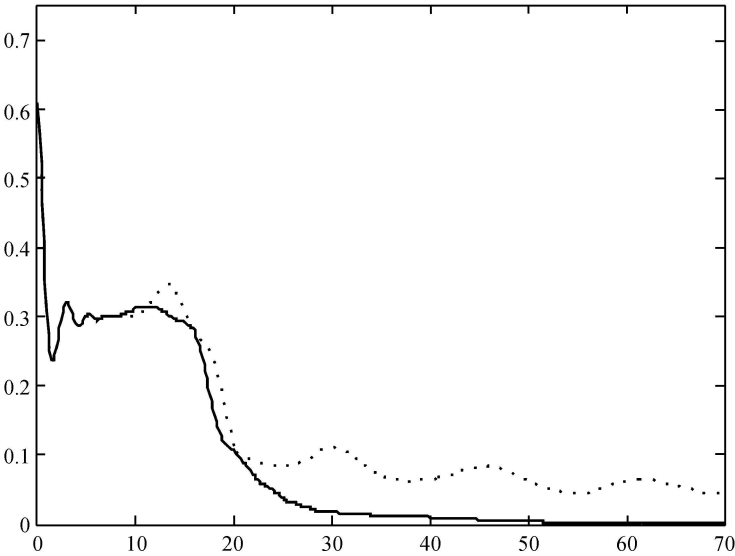


图 14 无量纲势能变化示意图——Cauchy/Poisson问题

通过对比变浅地形消波器与阻尼区配合消波的结果，看出势能曲线在传播过程中一直平稳下降，呈单调递减，最终能量被充分吸收，消波效果明显好于前述阻尼消波。从图 15 (b)可见，在变浅地形消波器的作用下，未出现明显的长波反射，最终的波面很平静，不再有明显的波动。

该消波试验表明，将变浅地形主动消波器与阻尼消波相结合，能够有效地处理宽谱非线性随机波动的消波问题。

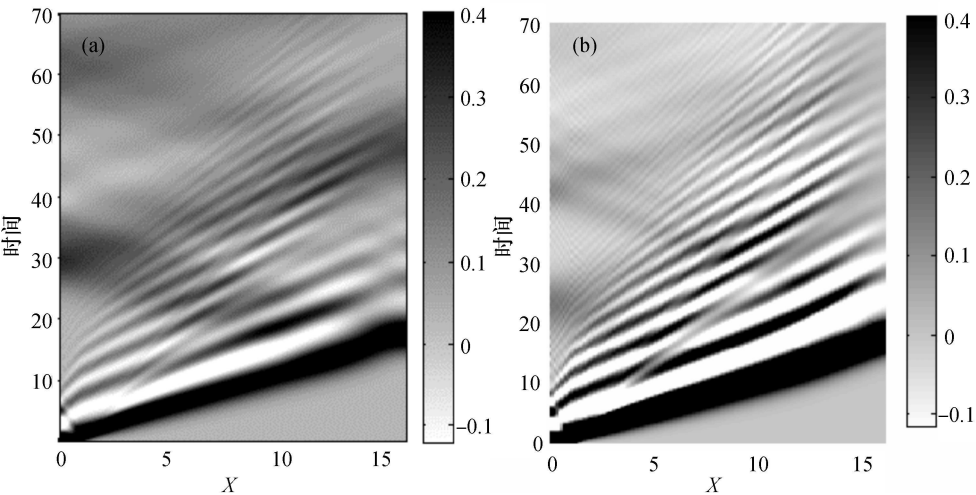


图 15 波面高度随时间变化图——Cauchy/Poisson问题

三、结 论

消波技术是数值波浪水槽模式的一个重要功能。高性能的消波器能够保证实验区域不受反射波的影响，从而保证数值试验的精度。本文作者根据浅水波波速恒定的特点，利用地形的变浅作用使深水波过渡为浅水波的原理，设计了一种变浅地形主动消波器。该消波器以波速作为消波参数，因此消波参数固定不变，从而使消波器的原理变得简单，易于实现。将其与阻尼消波方法相配合可以得到理想的消波效果。

通过设置不同的地形参数和阻尼区参数，使用变浅地形主动消波器与阻尼消波区相配合的方法进行了 SOPE 的消波测试实验，取得了理想的消波效果。实验结果表明，通过设置变浅地形可以使主动消波器对深水波具有较好的吸收能力，对有限水深波的消波能够获得比阻尼区更好的消波效果，可有效缩短消波区长度，节省计算时间。将该方法与阻尼消波相结合能够有效地处理宽谱非线性随机波动的消波问题。

由于这一消波方法完全使用物理的消波手段，在实际机械设计中非常容易实现，所以它不仅可以应用于数值波浪水槽模式中，对于实际的实验波浪水槽消波器的设计也有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- 高山. 2003. 二维数值波浪水槽模式的建立和应用及浪流相互作用研究. 中国海洋大学博士学位论文
- Clement A. 1988. Dynamic absorption of outgoing waves in the computation of 2D unsteady hydrodynamics. *Computer Modeling in Ocean Engineering* 127 ~ 134
- Clement A. 1996. Coupling of two absorbing boundary conditions for 2D time domain simulations of free surface gravity waves. *Journal of Computational Physics* 126(1): 139 ~ 151
- Clement A H. 1999. Benchmark test cases for numerical wave absorption. *Proc. 9th ISOPE Conf.* 3: 266 ~ 289
- Grilli S and Horikawa J. 1997. Numerical generation and absorption of fully nonlinear periodic waves. *J. Eng. Mech., ASCE* 123: 1060 ~ 1069
- Jagannathan S. 1992. Energy flux equalization: An open boundary condition for non-linear free surface flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 14(7): 793 ~ 815
- Majsondieu C and Clement A. 1993. A realizable force feedback feedforward control loop for a piston wave absorber. *Proceedings of the 8th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*. St. John's, Newfoundland, Canada: 79 ~ 82
- Milgram J S. 1970. Active water wave absorbers. *Journal of Fluid Mechanics* 43(4): 845 ~ 859
- Orlanski J. 1976. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. *J. of Comput. Phys.* (21): 251 ~ 269
- Schaffer H, A. Solberg, T. and Hylleberg P. 1994. Simultaneous generation and active absorption of waves in flumes. *Proceedings of the International Symposium: WAVES: Physical and Numerical Modeling*. University of British Columbia, Vancouver, Canada: 90 ~ 99
- Skourup J. 1996. Active absorption in a numerical wave tank. *Proceedings of the 6th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Los Angeles, USA. (3): 31 ~ 38

THE SETUP OF A NEW ACTIVE WAVE ABSORBER FOR NUMERICAL WAVE TANK AND ITS VERIFICATION

GAO Shan

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071)

ABSTRACT

Based on the velocity invariability of the shallow water wave and using the shoaling effect, a unique active wave absorber for numerical wave tank is set up. This absorber's absorption parameter is constant, thereby making its mechanism very simple. When coupled with damping zone, it can achieve a perfect wave absorption effect. By setting different absorption parameters and coupling with a damping zone, 4 ISOPE wave absorption benchmark experiments are performed using this absorber. The results indicate that, by setting shoaling bottom, this absorber has excellent absorptency on deep water waves and limit depth waves, and when coupled with damping zone, it not only can absorb the wide spectrum nonlinear random waves but also shorten the length of the damping zone effectively.