

海洋内孤立波斜相互作用的 Mach 效应特性实验

王欣隆^{①②}, 魏岗^{①*}, 杜辉^①, 谷梦梦^①, 王彩霞^②

① 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101;

② 中国海洋大学海洋环境学院, 青岛 266100

* 联系人, E-mail: weigangweigang12@163.com

2015-07-01 收稿, 2015-10-11 修回, 2015-10-13 接受, 2016-01-04 网络版发表

国家自然科学基金(11472307)和国防基础科学研究计划(QX2015043104A12002)资助

摘要 当海洋工程结构物或水下航行器在海洋中遭遇异常大振幅内波时可造成损害甚至失事, 海洋内孤立波斜相互作用的Mach效应是一种特殊海洋现象, 也是异常大振幅内孤立波的重要成因. 为了在实验室模拟具有海洋跃层环境中的内孤立波斜相互作用并控制Mach效应的产生, 首先将两只直立无底圆柱筒放置在淡/盐水分布的两层流体环境中, 淡/盐水混合区模拟海洋密度跃层, 保持筒底与筒外水体的交换, 以方便形成筒内外混合区的高度差; 再将两柱筒平稳迅速移出, 利用柱筒内外淡/盐水混合区高度差的重力塌陷扰动形成两列内孤立波, 其在交汇区发生斜相互作用, 并借助高清图像处理技术结合几何射线方法完成测量. 实验结果表明: 两列内孤立波斜相互作用性质取决于分层环境、两柱筒之间距离以及两列内孤立波的波幅和相位, 上述方法可有效控制分层流实验水槽中Mach效应的产生. 进一步分析表明: 两列内孤立波相互作用的Mach效应将导致波幅显著增强, 传播速度明显增大, 且传播方向受两者振幅大小的控制, 振幅相差越大所产生Mach效应的临界夹角越大. 此外, 通过内孤立波斜相互作用的Mach效应实验结果与KdV, BO和MCC三种理论模型比较, 实验验证了Mach效应对非线性理论模型的适应性.

关键词 分层流, 内孤立波, 斜相互作用, Mach 效应, 水槽实验

在内孤立波频发海域, 由于潮流与海底地形作用、正压潮通过斜压涡场、海水混合区重力塌陷等过程会诱发层化海洋中产生内孤立波, 两列或多列内孤立波经常相遇并发生相互作用, 其在作用区域的振幅、波速和相位等会发生改变. 当两列内孤立波传播方向夹角和振幅限制在一定范围时, 它们在发生斜相互作用后会衍生出新的一系列内孤立波, 这一现象称为海洋内孤立波斜相互作用的Mach效应.

两孤立子非线性相互作用后不改变原来的振幅和波形、彼此分离独立传播是孤立子传播的基本特性, 然而, 海洋中Mach效应使得新产生的内孤立波振幅显著增大、传播速度明显加快, 实际海洋观测表

明, 在Mach效应发生的海域, 内孤立波波幅可达到作用前波幅的4倍^[1]. 可见, 内孤立波的Mach效应不仅对温盐场分布、水声电磁传播路径以及海洋动力学结构等海洋环境特征产生重要影响, 而且极大地增强了对海洋工程结构物的破坏力以及对水下航行器安全性的威胁^[2], 它已成为近年来非线性科学、船舶与海洋工程以及军事海洋环境等领域关注的前沿课题.

水波问题中Mach效应是20世纪70年代Miles^[3,4]在浅水表面孤立波斜相互作用的理论中提出, 大量实验和数值研究支持并改进了Miles关于Mach效应的理论模型^[5-7]. Grimshaw和Zhu^[8]指出: 无论是深水内

引用格式: 王欣隆, 魏岗, 杜辉, 等. 海洋内孤立波斜相互作用的 Mach 效应特性实验. 科学通报, 2016, 61: 529-535

Wang X L, Wei G, Du H, et al. Characteristics of Mach effect induced by oblique wave-wave interactions of internal solitary waves in ocean (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 529-535, doi: 10.1360/N972015-00720

孤立波之间还是浅水表面孤立波之间的相互作用,其影响主要是改变波动传播的相位,研究表明两种相互作用尽管存在差异但总体特性与KdV型波-波作用相类似^[8-10]. Maxworthy^[11]曾通过小型静止水槽中的实验方法观察了异重流激发内孤立波及其相互作用的过程,证实当两列内孤立波斜相互作用产生共振时会激发更大振幅的内孤立波现象. 戴世强^[12]和朱勇^[13]利用约化摄动方法对上凸/下凹型界面孤立波迎/追撞问题进行研究,获得了碰撞时的最大波幅值和碰撞后产生非均匀相位偏移的解析解. Tsuji和Oikawa^[14]数值模拟了两层深流体大振幅界面内孤立波的Mach效应,给出的临界角远小于Miles理论值,且预测波幅超过浅水波理论值. 李群和孙丽^[15]结合中国南海内孤立波观测资料计算了两列内孤立波交汇处波幅显著增大的强非线性特征,为实际海洋中内孤立波斜相互作用的Mach效应特征提供了重要依据. 最近, Wang和Pawlowicz^[1]通过系统研究将内孤立波相互作用分为7类,如图1所示,并结合Georgia海峡内孤立波相互作用的Mach效应观测数据,检验了相关非线性理论模型^[16],图1中 (η_1, η_2) 和 ψ 分别为两列内孤立波振幅和传播方向夹角.

由于海洋内孤立波相互作用的Mach效应非线性特征显著、随机性强,且具有非稳定和三维演化结构特征,常规观测和理论研究难以揭示其内部结构及其变化,也难以建立有效的模型求解,使得这类波-波作用成为海洋科学的前沿性课题和长期关注的难

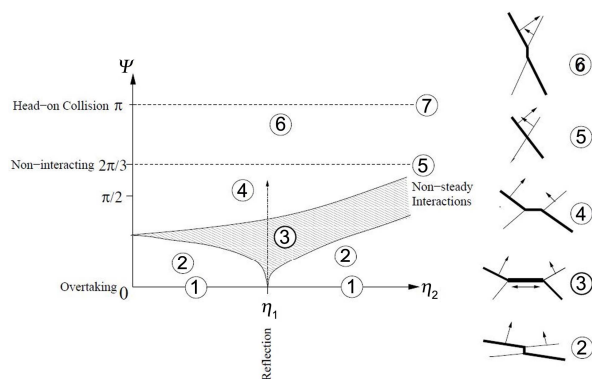


图1 两孤立波斜相互作用类型^[1]. ① 追赶; ② 斜向追赶; ③ 发生Mach效应; ④ 一般相互作用; ⑤ 无相互作用; ⑥ 斜向碰撞; ⑦ 对撞
Figure 1 Types of interactions between two obliquely crossing solitons^[1]. ① Overtaking; ② obliquely overtaking; ③ non-steady Mach interaction; ④ regular interaction; ⑤ non-interaction; ⑥ obliquely colliding; ⑦ head-on colliding

点问题. 实验室物理模型实验具有条件可控和方便测量的优点,尤其是近年来水槽中分层流实验与测量技术得到迅速发展^[17,18],为此,本文尝试借助分层流水槽开展内孤立波斜相互作用Mach效应的实验研究,实现对Mach效应的有效控制和定量化研究,揭示其发生、传播和结构特征,为真实海洋中非线性大振幅内波的认识提供重要科学依据.

1 实验装置与测量方法

实验在分层流水槽系统中进行,如图2所示,该系统主要包括:主尺度为350 cm×100 cm×50 cm分层

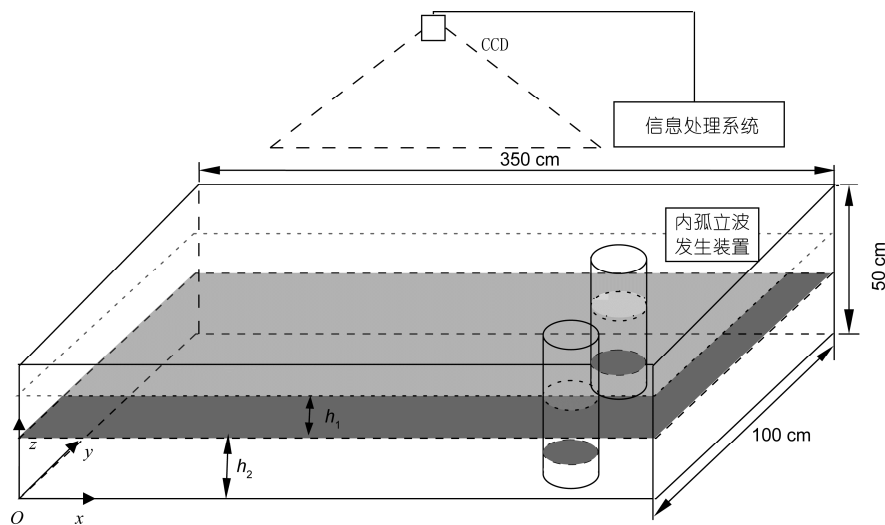


图2 分层流水槽中内孤立波斜相互作用实验示意图

Figure 2 Schematic diagram of Mach interaction experiments in a stratified fluid tank

流水槽、两只无底直立圆柱筒组成的内孤立波发生装置、高分辨率CCD相机、以及配有专业图像采集与处理软件和Dell T3500计算工作站的信息处理系统。

实验中制取两层流体结构的方法如下：首先在分流水槽中配置厚度和密度分别为 h_2 和 ρ_2 的盐水，再将事先经染色、密度为 ρ_1 的淡水通过细橡胶管从盐水表面缓慢注入，直到上层淡水达到设定的厚度 h_1 后停止。此外，为降低淡/盐水的混合，可在盐水表面铺设浮性薄膜纸，所注入的淡水通过浮性薄膜纸缓慢扩散，同时注意控制注水的流量尽量小。

内孤立波发生装置采用重力塌陷式原理，其方法如下：将两只直径为15 cm、高为20 cm的无底柱状圆筒垂直置于两层流体中，圆筒底部不与水槽接触以保持与筒外水体的交换；在筒内液面上方缓慢注入淡水，使淡/盐水混合区下移以形成低于筒外的混合区高度差 Δh_i ($i=1, 2$ 分别代表两只圆筒)；待水体稳定后，将两只圆筒竖直平稳快速地移出水槽，由于筒内外混合区高度差而产生的重力塌陷运动，使得在淡/盐水密度混合层形成扰动，该扰动经演化逐渐形成两列下凹型内孤立波，并在传播交汇区域发生相互作用，相互作用性质取决于分层环境、两圆筒之间距离以及两内孤立波的波幅和相位。

内孤立波斜相互作用测量由高清图像处理结合几何射线方法完成，具体过程如下：利用高分辨率CCD相机从水槽顶部或侧壁连续记录两列内孤立波演化及其作用过程，借助水槽内侧设置的长直尺标定像素点对应的坐标，利用图像处理功能获得清晰的相互作用过程，经几何射线法作图，可测量两列内孤立波传播射线及其相互作用夹角 ψ ，如图3(a)所示。若发生Mach效应，即在相互作用过程中除原始两列内孤立波外还将衍生出现第三列内孤立波，其波峰长度称为Mach峰(Mach stem)，并随时间演化不断增长，其增长率由步角(step angle) ψ_* 描述，如图3(b)，而非Mach效应的步角通常为零。

内孤立波传播速度和波幅值由实验测量结合模型反演计算获得，具体方法如下：按时间序列选取若干时间间隔的图像以获得内孤立波的位置变化，将其换算为距离，再根据图像帧率求出各位置对应的时间间隔，然后利用拟合方法计算内孤立波传播速度；进一步，根据内孤立波理论模型的波速表达式，反演计算波幅值，本文对3种内孤立波理论模型的波幅计算结果进行了比较，它们的波速表达式分别为

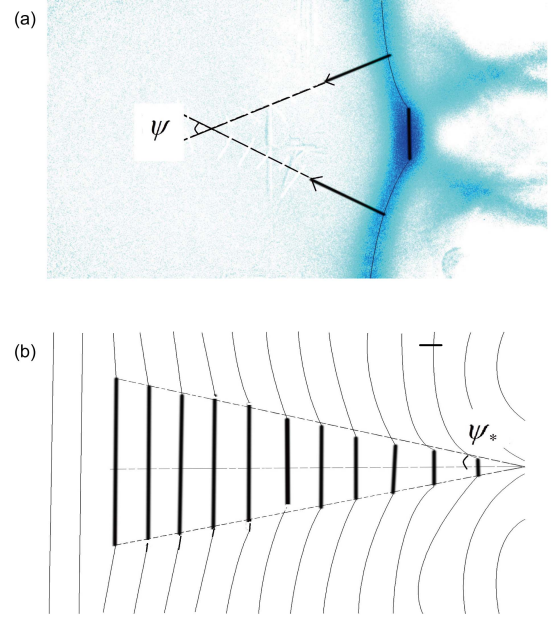


图3 (网络版彩色)内孤立波斜相互作用与Mach效应测量. (a) 斜相互作用夹角测量; (b) Mach效应步角测量

Figure 3 (Color online) Measurements for Mach interaction. (a) Interaction angle; (b) step angle

KdV模型^[19]:

$$c = c_0 - \frac{1}{3}\alpha\eta_0, \quad L = \sqrt{-12\frac{\gamma}{\eta_0\alpha}}, \quad (1)$$

BO模型^[20,21]:

$$c = c_0 - \frac{1}{4}\alpha\eta_0, \quad L = \frac{4\gamma}{\eta_0\alpha}, \quad (2)$$

MCC模型^[22]:

$$c = c_0 \sqrt{\frac{(h_1 + \eta_0)(h_2 - \eta_0)}{h_1 h_2 + (c_0^2 / g)\eta_0}}, \quad L = \sqrt{-12\frac{\gamma}{\eta_0\alpha}}, \quad (3)$$

式中， c_0 为线性波传播速度， α 为非线性参数， γ 为频散参数， L 为半波宽度。另一方面，也可以通过水槽中内孤立波波幅的实测值，再由上述公式计算传播速度。实际测量时，既可由水槽侧壁面染色内孤立波图像定量获得内孤立波波幅大小，也可由水面图像灰度变化定性测量。后者基本原理是：在内孤立波经过的水下区域会引起水面聚焦辐散的扰动，其散射将导致所拍摄图像灰度的变化，灰度值随波幅增大而增加，最大灰度值即对应内孤立波波谷位置，进一步可换算为波幅值^[17]。

2 Mach效应的测量与分析

根据Miles模型理论^[3]，浅水孤立波相互作用发

生Mach效应的临界角满足

$$\psi_- < \sin^2 \frac{\psi}{2} < \psi_+, \quad (4)$$

式中, $\psi_{\pm} = \frac{3}{4}(\sqrt{\eta'_1} \pm \sqrt{\eta'_2})^2$, $\eta'_i = \frac{\eta_i}{h_1 + h_2}$ ($i=1, 2, 3$), 其

中 η_1 和 η_2 代表作用前两内孤立波波幅, η_3 代表作用后Mach峰波幅, 撇号“'”为无量纲值. 公式(4)表明: 当一列内孤立波波幅很大时, 产生Mach效应的夹角范围也会增大, 但存在一个最大作用夹角 $\psi_{\max} = 127^\circ$ [23], 此时出现非定态特征, 即图1中 η_2 增大时的情形③. 对于两列波幅相差很小的内孤立波相互作用, 其发生Mach效应的夹角满足 [3,1]

$$\psi < 2\sqrt{3\eta'_1}. \quad (5)$$

若取 $\varepsilon = \psi / 2\sqrt{3\eta'_1}$, 则 $\varepsilon < 1$ 定义为发生Mach效应, 而 $\varepsilon > 1$ 为非Mach效应. 有关“对称”与“不对称”型相互作用的判别依据是无量纲化振幅差与相互作用夹角的相对值 [3], 对于符合 $|\eta'_2 - \eta'_1| < \psi^2$ 条件的定义为“对称”型, 反之为“不对称”型. 综合以上条件, 实验中设计了波幅相同和波幅不同的内孤立波发生斜相互作用的两种情况.

2.1 波幅相同的两列内孤立波斜相互作用

取分层环境为 $(h_1, h_2) = (1, 10)$ cm 和 $(\rho_1, \rho_2) = (1.00, 1.05)$ g/cm³, 两圆筒相距50 cm, 两圆筒内外初始混合区高度差相同, 即 $\Delta h_1 = \Delta h_2$, 分别为3, 5, 7 cm.

图4为初始混合区高度差为5 cm的两列相同内孤立波的演化及其斜相互作用, 由几何射线法测量得到两内孤立波相互作用的夹角为 $\psi \approx 1.082$ (单位: 弧度, 下同), 由实际测量得到的波速7.43 cm/s和波幅 $\eta'_1 = \eta'_2 = 0.11$, 经公式(5)简单计算可知 $\varepsilon = 0.988 < 1$, 由几何法确定的非零步角 $\psi_* \approx 0.152 \neq 0$, 表明上述两列内孤立波斜相互作用后产生Mach效应. 进一步, 根据对Mach峰(即第三组衍生波)的测量, 其相速度为9.45 cm/s和波幅为 $\eta'_3 = 0.13$, 分别比作用前增加27%和36%, 表明两内孤立波斜相互作用的Mach效应具有波幅增强和波速增大的典型特征.

表1为相同波幅内孤立波斜相互作用的测量结果, 实验表明, 当两列波的相互作用夹角尚未达到临界角之前, 其相互作用为非Mach效应, 此时的波幅及传播速度均无明显变化. 随着两列内孤立波波幅增加, Mach效应的临界夹角 ψ 逐渐增大, 非零步角 ψ_*

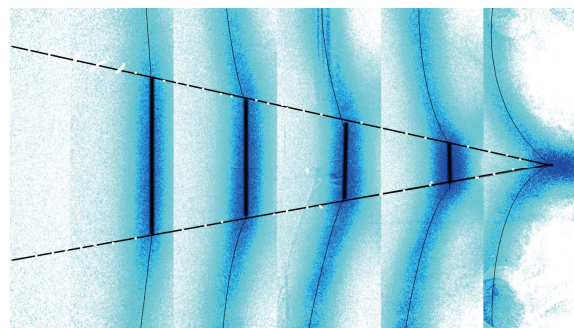


图4 (网络版彩色)相同波幅内孤立波斜相互作用的Mach效应 ($\Delta h_1 = 5$ cm, $\Delta h_2 = 5$ cm)

Figure 4 (Color online) Mach interaction of two internal solitary waves with same amplitude under the condition of height differences $\Delta h_1 = 5$ cm and $\Delta h_2 = 5$ cm

表1 相同波幅内孤立波斜相互作用测量

Table 1 Measurements for the oblique interaction of two internal solitary waves with same amplitudes

序列	η'_1, η'_2	ψ	ψ_*	η'_3	c (cm s ⁻¹)	作用类型
1	0.09	62.7°	10°	0.10	8.92	Mach 作用
2	0.11	68.2°	9°	0.13	9.45	Mach 作用
3	0.14	70.8°	10°	0.24	10.60	Mach 作用

基本保持不变, Mach峰的波幅 η_3 以及传播速度 c 也随之增大, 但波幅 η_3 并非线性增长, 而是当两初始波幅达到一定程度, 相互作用后的波幅 η_3 存在着突然增大的趋势, 如表中第3组实验的波幅是第2组实验的近2.0倍, 而第2组仅是第1组的1.2倍.

在实验中改变两柱筒之间的距离, 由于内孤立波的产生装置相当于两个点源, 所产生的内孤立波呈柱状向外扩散, 且相互作用角变化一致, 所产生的Mach效应具有类似特征. 当 $\varepsilon > 1$ 时, 两列波的斜相互作用为非Mach效应, 作用后不会产生新的内孤立波.

2.2 波幅不同的两列内孤立波斜相互作用

取与前述相同的实验环境, 所不同的是两只圆筒内外混合区高度差不同, 即 $\Delta h_1 \neq \Delta h_2$, 以此观察所产生的两列波幅不同的内孤立波演化及其斜相互作用的过程.

图5为两圆筒内外混合区高度差分别为 $\Delta h_1 = 2$ cm 和 $\Delta h_2 = 5$ cm 时, 两列内孤立波传播及其斜相互作用的实验记录. 图中两列内孤立波初始相遇时相互作用夹角约为90°, 随着内孤立波的扩散,

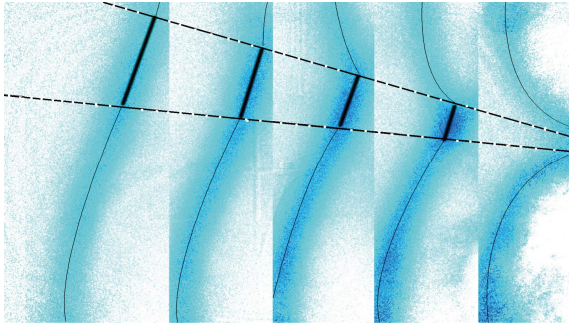


图 5 (网络版彩色)具有不同波幅的两列内孤立波发生非对称Mach效应 ($\Delta h_1 = 2 \text{ cm}$, $\Delta h_2 = 5 \text{ cm}$)

Figure 5 (Color online) Asymmetric Mach interaction of two internal solitary waves with different amplitudes under the condition of height differences ($\Delta h_1 = 2 \text{ cm}$, $\Delta h_2 = 5 \text{ cm}$)

夹角逐渐变小, 在相互作用区域逐渐衍生出一列相对稳定的内孤立波, 测量得夹角为 $\psi \approx 85^\circ = 1.483$, 此时振幅分别为 $\eta'_1 = 0.08$ 和 $\eta'_2 = 0.11$, 根据计算: $|\eta'_2 - \eta'_1| = 0.03 < \psi^2$ 且 $\varepsilon = 0.385 < 1$, 表明上述两列内孤立波发生的Mach效应是非对称的, 根据Mach峰不断增长, 可测量得到非零步角为 $\psi_* \approx 6^\circ = 0.104$.

图6进一步给出两柱筒内外混合区高度差改变时, 两列内孤立波传播及其相互作用的时间序列记录, 表2为对应的理论与测量值比较. 实验分析表明: 内孤立波相互作用的Mach效应传播特征取决于作用前两列内孤立波的结构特征, 两者振幅越大, Mach效应的峰值越大, 传播速度也越快; 两者振幅大小对Mach效应的步角影响不大, 但两者振幅差越大, 发生Mach效应的临界角就越大, 同时会改变Mach效应的传播方向, 使之向初始小振幅波一侧偏转, 即更接近较大振幅波的传播方向.

利用上述实验中Mach峰振幅和传播速度的测量结果, 可以检验前述KdV模型、BO模型和MCC模型的适用情况, 图7为由Mach峰振幅测量值反演计算波速的理论值与实际测量的比较, 图中3种理论模

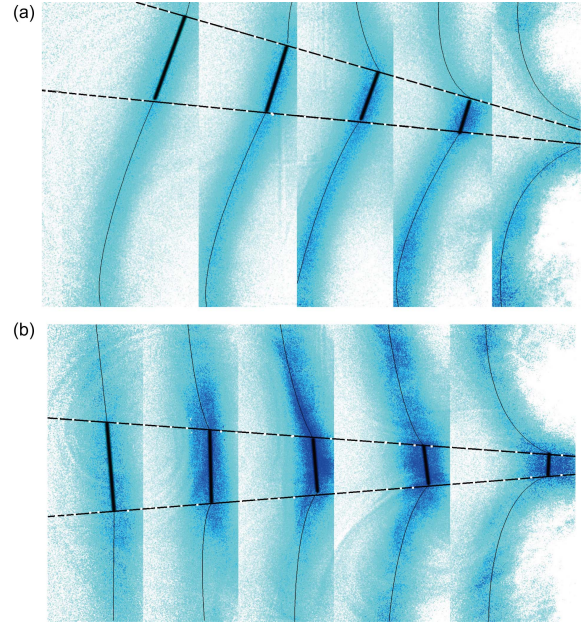


图 6 (网络版彩色)两列波幅不同的内孤立波斜相互作用. (a) $\Delta h_1 = 4 \text{ cm}$, $\Delta h_2 = 5 \text{ cm}$; (b) $\Delta h_1 = 8 \text{ cm}$, $\Delta h_2 = 5 \text{ cm}$

Figure 6 (Color online) Mach interaction of two internal solitary waves with different amplitudes for different initial conditions: (a) $\Delta h_1 = 4 \text{ cm}$ and $\Delta h_2 = 5 \text{ cm}$; (b) $\Delta h_1 = 8 \text{ cm}$ and $\Delta h_2 = 5 \text{ cm}$

型与实验结果具有一致的变化趋势, KdV模型和MCC模型反演的波速值分别大于和小于实测值, 并随振幅增大由KdV模型逐渐向MCC模型靠近, 这与MCC模型的强非线性假设相一致; 而深水小振幅的BO模型更接近实测曲线, 这与实验设定条件是一致的. 除考虑建立模型所限定的条件, 误差主要源于本文实验方法所生成的三维内孤立波结构以及实验过

表 2 不同波幅内孤立波斜相互作用测量

Table 2 Measurements for the oblique interaction of two internal solitary waves with different amplitudes

序列	η'_1, η'_2	ψ	ψ_*	η'_3	$c \text{ (cms}^{-1}\text{)}$	作用类型
1	0.08, 0.12	85°	6°	0.10	8.57	Mach, 不对称
2	0.11, 0.12	62°	5°	0.11	9.07	Mach, 对称
3	0.14, 0.12	71°	5°	0.12	9.41	Mach, 对称

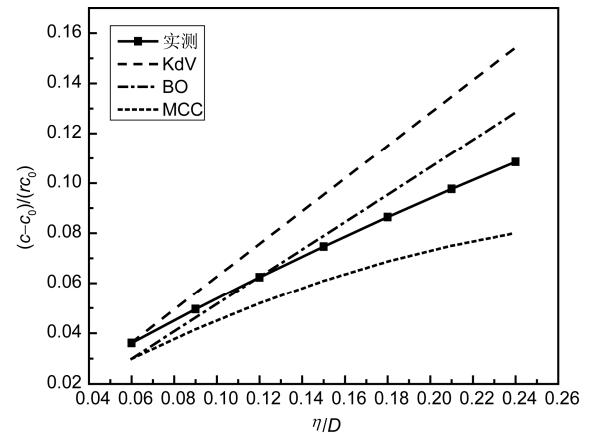


图 7 Mach峰振幅与波速相关性的理论与实验比较

Figure 7 Comparison between theoretical and experimental results of Mach stem's amplitude and propagation speed in dimensionless

程中的测量误差.

3 结论

本文对两列内孤立波的斜相互作用进行了实验研究, 获得的主要结论如下.

(1) 在分层流水槽中利用两只柱筒内外混合区高度差的重力塌陷运动产生内孤立波, 实现了实验室对内孤立波斜相互作用Mach效应的有效控制和定量化研究, 实验构思巧妙、原理简洁、操作方便, 也易于推广至内孤立波相互作用其他特性的定量研究.

(2) 在分层流水槽中不仅获得了两列内孤立波斜相互作用Mach效应的实验证据, 而且定量地描述了其主要特征: 内孤立波Mach效应取决于作用前两列内孤立波结构特征, Mach效应的波幅显著增大、波速明显加快, 其传播方向受两内孤立波振幅差控制, 且振幅差异越大, 所导致的Mach效应的临界夹角越大.

(3) 通过内孤立波斜相互作用的Mach效应实验结果与KdV, BO和MCC三种理论模型的比较, 实验验证了Mach效应对非线性理论模型的适应性.

参考文献

- 1 Wang C, Pawlowicz R. Oblique wave-wave interactions of nonlinear near-surface internal waves in the Strait of Georgia. *J Geophys Res*, 2012, 117: 1–17
- 2 Fang X H, Du T. Fundamentals of Oceanic Internal Waves and Internal Waves in the China Seas (in Chinese). Qingdao: China Ocean University Press, 2005. 1–5 [方欣华, 杜涛. 海洋内波基础和中国海内波. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005. 1–5]
- 3 Miles J W. Obliquely interacting solitary waves. *J Fluid Mech*, 1977, 79: 157–169
- 4 Miles J W. Resonantly interacting solitary waves. *J Fluid Mech*, 1977, 79: 171–179
- 5 Melville W K. On the Mach reflexion of a solitary wave. *J Fluid Mech*, 1980, 98: 285–297
- 6 Funakoshi M. On the time evolution of a solitary wave reflected by an oblique wall. *Rep Res Inst Appl Mech Kyushu Univ*, 1981, 29: 79–93
- 7 Tanaka M. Mach reflection of a large-amplitude solitary wave. *J Fluid Mech*, 1993, 248: 637–661
- 8 Grimshaw R, Zhu Y. Oblique interactions between internal solitary waves. *Stud Appl Math*, 1994, 92: 247–270
- 9 Matsuno Y. Oblique interaction of interfacial solitary waves in a two-layer deep fluid. *Proc R Soc London A*, 1998, 454: 835–865
- 10 Oikawa M. On the weak interactions of the Benjamin-One solitons. *Bull Res Inst Appl Mech Kyushu Univ*, 1984, 60: 467–472
- 11 Maxworthy T. On the formation of nonlinear internal waves from the gravitational collapse of mixed regions in two and three dimensions. *J Fluid Mech*, 1980, 96: 47–64
- 12 Dai S Q. The head-on colliding between two interfacial solitary waves (in Chinese). *Acta Mech Sin*, 1983, 6: 623–632 [戴世强. 两个界面孤立波之间的迎撞. 力学学报, 1983, 6: 623–632]
- 13 Zhu Y. Interaction of internal solitary waves in deep stratified fluid—1. Weak interaction (in Chinese). *Sci China Ser A*, 1996, 6: 550–562 [朱勇. 深分层流体中内孤立波的相互作用—I. 弱相互作用. 中国科学A辑, 1996, 6: 550–562]
- 14 Tsuji H, Oikawa M. Oblique interaction of internal solitary waves in a two-layer fluid of infinite depth. *Fluid Dyn Res*, 2001, 29: 251–267
- 15 Li Q, Sun L. Numerical simulation of wave-wave interaction of internal solitary wave (in Chinese). *Peri Ocean Univ China*, 2007, 37: 6–16 [李群, 孙丽. 内孤立波波-波相互作用的数值模拟. 中国海洋大学学报, 2007, 37: 6–16]
- 16 Wang C, Pawlowicz R. Propagation speeds of strongly nonlinear near-surface internal waves in the Strait of Georgia. *J Geophys Res*, 2011, 116: 1–15
- 17 Wei G, Du H, Zeng W H, et al. Experimental investigation of the generation of large-amplitude internal solitary wave and its interaction with a submerged slender body. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2014, 57: 301–310
- 18 Wang J, You Y X, Hu T Q, et al. The characteristics of internal waves excited by towed bodies with different aspect ratios in a stratified fluid (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 606–617 [王进, 尤云祥, 胡天群, 等. 密度分层流体中不同长径比拖曳潜体激发内波特性实验. 科学通报, 2012, 57: 606–617]
- 19 Djordjevic V D, Redekopp L G. The fission and disintegration of internal solitary waves moving over two-dimensional topography. *J Phys Oceanography*, 1978, 8: 1016–1024
- 20 Benjamin T B. Internal waves of finite amplitude and permanent form. *J Fluid Mech*, 1966, 25: 241–270
- 21 Ono H. Algebraic solitary waves in stratified fluids. *J Phys Soc Jap*, 1975, 39: 1082–1091
- 22 Choi W, Camassa R. Fully nonlinear internal waves in a two-fluid system. *J Fluid Mech*, 1999, 396: 1–36
- 23 Johnson R S. On the oblique interaction of a large and a small solitary wave. *J Fluid Mech*, 1982, 120: 49–70

Characteristics of Mach effect induced by oblique wave-wave interactions of internal solitary waves in ocean

WANG XinLong^{1,2}, WEI Gang¹, DU Hui¹, GU MengMeng¹ & WANG CaiXia²

¹ College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;

² College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

The Mach effect induced by the oblique wave-wave interactions of internal solitary waves is a special phenomenon of the ocean and is also the main reason of generating a large amplitude internal solitary wave, while they can cause it damage and even crash as the ocean engineering structures or underwater vehicles encounter the internal solitary wave with a large amplitude in the ocean. In order to simulate the oblique interaction of internal solitary waves in the thermocline marine environment and control the Mach effect in the laboratory, two vertical bottomless barrels are placed in the fresh/saline water's two-layer fluid. So the mixed fresh/saline water region is called the density thermocline of the marine. Keeping exchange of water under the barrel's bottoms is to facilitate the formation of the mixed region height difference in the inner and outer parts of barrels. And then remove the two barrels smoothly and quickly, so that the mixed fresh/saline water region's gravitational collapse motion can be made use of to generate two rows of internal solitary waves. They will occur the oblique wave-wave interaction in their propagating intersection area. The experimental results showed that two rows of solitary wave oblique interaction depends on the stratification environment, the distance between the two barrels and the amplitude and phase of two solitary waves. It has been verified that the above method can effectively control the generation of Mach effect in the stratified fluid tank. Further analysis showed that the Mach effect induced by the oblique interaction of internal solitary waves will lead to remarkably increasing amplitude in correspondence with its raising propagation velocity, whose direction is controlled by the amplitude difference between two internal solitary waves, and the greater amplitude difference will bring on the larger Mach effect's critical angle. Through testing the theoretical models including KdV', BO' and MCC's equations to compare with the experimental results, the adaptability of the Mach effect to the nonlinear theoretical models is verified by experiments.

stratified fluid, internal solitary wave, oblique wave-wave interaction, Mach effect, experiment in tank

doi: 10.1360/N972015-00720