



# 测深法：基于液压传感器的越浪量测量方法<sup>\*</sup>

李晓亮

(江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003)

**摘要：**针对目前越浪量测量方法中存在的实际问题，提出了一种以液压传感器为测量工具、基于水箱内水深变化来计算越浪量的新方法——测深法。全面描述测深法的基本原理和从液压传感器提供的波动压力数据得到平均越浪量、单波越浪量和越浪比例所需的操作步骤和数据处理方法，并通过试验评估了该方法的试验精度。结果表明：测深法能够可靠地被应用于各种以越浪量测量为主要目的模型试验，其中，平均越浪量的测量精度与传统方法相当，单波越浪量的相对误差普遍可控制在5%以内；相比于现有越浪量测量方法，测深法具有对单波越浪的信号识别能力强、适用范围广、试验操作简单、维护成本低、设备通用性好等优点。

**关键词：**液压传感器；入水时间；入水水深；越浪时间；越浪水深；单波越浪量

**中图分类号：**U 656.3；TV 139.2

**文献标志码：**A

**文章编号：**1002-4972(2017)02-0123-07

## Sounding method: a technique of wave overtopping measurement based on the hydraulic pressure sensors

LI Xiao-liang

(School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Jiangsu University of Technology, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** Aiming at the defect in the existing methods for wave overtopping measurement, a new technique named as sounding method was presented based on water depth variation measured by hydraulic pressure sensors in tank. A comprehensive description was provided on the basic principle of sounding method as well as the operation steps and data processing techniques to obtain the mean wave overtopping discharge, single wave overtopping volume and wave overtopping rate from the fluctuated data of hydraulic pressure sensors, meanwhile the method's accuracy was evaluated through tests. The result shows that sounding method can be reliably applied in all kinds of tests with the main purpose of overtopping measurement. For mean wave overtopping discharge, a similar precision of the traditional methods can be reached, while the relative error of single wave overtopping volume generally can be controlled within 5%. Compared to the existing ones, sounding method has the advantages of more sensitive recognition, wider range of application, simpler operation, lower maintenance cost and more easily shard application.

**Keywords:** hydraulic pressure sensor; water penetration time; water penetration depth; overtopping time; overtopping depth; single wave overtopping volume

越浪量是海堤、护岸、防波堤等海岸建筑物的重要设计参数。为获得相对于某种特定设计堤型和波要素的越浪量，往往需进行物理模型试验。

平均越浪量和单波越浪量通常是这类试验中考察的主要对象，有关越浪量的定义和作为设计参数的意义可参考文献[1-2]。

**收稿日期：**2016-07-08

**\*基金项目：**国家自然科学基金青年基金项目(51309122)；省拔高校优势学科工程第二期专项基金项目(1014801401-1)；江苏科技大学博士启动基金(635011302)

**作者简介：**李晓亮(1979—)，男，博士，讲师，从事随机波浪与海岸结构物相互作用机理研究。

已有的相关研究中,测量越浪量的方法可归结为两类:称质法和图像法。

称质法是基于测量越浪水体累积质量随时间的变化过程来计算越浪量。所采用的方法通常是在模型堤后侧安装能连续纪录、发送质量数据的专用电子秤<sup>[2-3]</sup>(早期研究也采用过只能测量平均越浪量的普通秤<sup>[4]</sup>或配合吊机使用的弹簧秤<sup>[5]</sup>等),并在其上放置用于收集越浪水体的盛水箱。所测得的数据可同时用于测量平均越浪量和单波越浪量。称质法的工作原理和数据分析过程相对简单,且受越浪水体的形态影响较小,所以一直是相关研究所采用的主要方法。但称质法存在以下缺点:1)设备维护成本较高。电子秤遇水通常会损坏或失效,在四周环水的试验环境下必须设置围墙等隔离设施。但在水槽等横向空间有限的条件下(国内水槽多不具备主动消波功能,试验段只有约一半的可用宽度),修砌围墙会进一步占用横向空间。2)设备通用性较低。越浪量试验中使用的专用电子秤很少在其它试验中使用,一般需要以较高价格专门订做。3)设备敏感度较低。由于电子秤的量程和精度之间存在正比关系,且量程需大于整箱水的质量,所以单波越浪产生的较小质量增加可能无法被察觉。4)试验操作不便。专用电子秤体积和质量较大,搬运、挪位费力耗时。

图像法的基本原理是通过浪高仪等传感器<sup>[6]</sup>或激光扫描仪等光学设备<sup>[7]</sup>,得到越浪水体经过堤顶过程的水面位置图像,然后通过相关的图像分析技术得到水体的厚度、速度等信息,从而达到测量越浪量的目的。

图像法相比于称质法的优点是:单波越浪的过程可直接被观测到,无需称质法测量单波越浪量所必需的时间匹配环节,因此在确定单波越浪量的时间范围方面比较精确;此外,浪高仪、激光扫描仪等设备的通用性较高。图像法的缺点是:不能应用于具有冲击模式特征的越浪量试验<sup>[8]</sup>。图像法要求越浪产生的水体经过堤顶时必须具有近似连续的单一液面结构,否则无法得到正确的

图像和越浪量。但具有冲击模式特征的越浪水体在经过堤顶的过程中完全脱离了近似连续单一表面的限制,此时图像法将产生严重误差。

由于现有越浪量测量方法在适用范围、单波越浪量的识别能力、设备维护成本、设备通用性、试验操作简单性等方面均存在不同程度的问题,因此本文介绍一种基于液压传感器(简称传感器)测量越浪量的新方法。由于该方法是通过记录水箱内深度的变化计算越浪量,因此可称为测深法。它所测量的对象与称质法类似,都是越浪水体的累积变化而不是图像,所以不受越浪水体形态的限制。

液压传感器是水力、海洋工程等领域实验室常见的试验设备,在水流脉动压力、波压力量测和压力检测控制等方面被广泛应用,具有良好的试验通用性。由于工作环境的需要,这种传感器通常具有防水设计,在充水环境下可长期稳定工作,因此设备维护成本较低。并且由于设备的体积和质量都很小,试验过程中放置和改变位置等操作都非常简便。本文采用的液压传感器由成都某公司生产(图1),其采样频率为1~100 Hz,量程为2 m 水压,精度为0.5 mm 水压。传感器通过数据线与集线器相连,每个集线器可实时同步接收10支传感器的采集电信号;集线器将接收的电信号转化为数字信号后传输到电脑进行保存,并可通过软件将测得的压力时间曲线即时显示。



a) 液压传感器



b) 集线器

图1 试验设备

## 1 测深法的试验布置

本节以水槽直立堤断面越浪量试验为例介绍测深法的试验布置,具有其他断面形式和环境的试验可作类似布置。

测深法的试验布置相对简单,见图2,在模型堤后侧将一个等截面积、上表面开敞、其余部分密闭的铁质集水箱通过膨胀螺丝水平固定在水槽混凝土底床上,以避免其上浮,并可使其内静止水面面积始终等于箱口的设计面积。将传感器A在水箱底部平放,具体放置位置对测量结果没有影响。为避免传感器A可能的移动,可将其先固定在一块质量稍大的薄板上再放入水箱。每次试验之前水箱内须预留不少于10 cm深度的水,保证传感器A始终在波动的水面以下。每组试验过后,须将抽水泵吸管放入水箱抽水,将水位降到合适的位置。

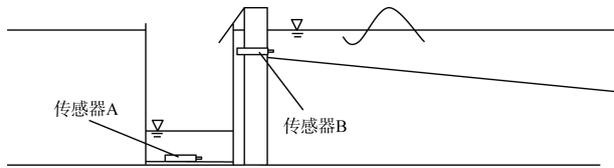


图2 测深法试验布置

将传感器B嵌入并固定在直立堤墙体内,头部突出于堤面并朝向造波机侧,位置靠近堤体与堤前底坡的交线,以保证传感器的头部始终在波动的水面以下。

传感器A负责测量和记录水箱内底部位置的水压变化过程。经过分析,该数据可提供水箱每次入水的时间和每次入水后水箱内相对于传感器位置的静水深度两方面信息。传感器B负责测量和记录直立堤表面靠近底部位置的水压变化过程。由于波压力与波面位置具有一致的相位关系,所以从传感器B提供的数据可以得到入射波浪个数、波峰和波谷到达堤面的时间位置等信息。

由于传感器A、B开始采集的时间由同一设备控制,提供的数据具有精确的同步性,所以两者之间时间匹配的结果具有很高的可靠性,从而为正确设定单波越浪量的时间范围提供了保证。传统称质法一般采用浪高仪来完成传感器B的工作,

由于浪高仪和电子秤分属不同的控制系统,多由人工方法尽量同步采集,不仅操作不便而且其结果可靠性在试验组数较多的情况下难以保证。

传感器A、B可分别在相应的位置各设置两支,以保证试验在某支传感器偶然出现故障时仍可继续进行。

## 2 数据分析的基本原理、步骤和方法

### 2.1 基本原理

#### 1) 单波越浪量 $V$ 。

对于水平截面为矩形且截面积为常数  $S$  的水箱,第  $i$  次越浪对应的水深为第  $i+1$  次越浪产生的水体进入水箱之前的静水深(用水深代表水箱内静水深,用入水代表水箱内入水),记为  $H_i$ ,则单波越浪量可如下计算:

$$V_i = \frac{\Delta H_i S}{B} = (H_i - H_{i-1}) L \quad (1)$$

式中:  $B$  和  $L$  分别为矩形水箱的宽度和长度;  $\Delta H_i = H_i - H_{i-1}$  为第  $i$  次越浪引起的水深变化;  $H_0$  为第一次越浪之前的初始水深。可见,得到与每次越浪相对应的水深是计算单波越浪量的前提条件。

从传感器A的角度看,箱内水深表现为间歇性持续增加,即入水会引起水深增加,而在相邻两次入水之间水深保持不变。由此可得到两类信息:入水的时间  $T'$  和该次入水对应的水深  $H'$ ,即间歇期内的水深。可以发现,  $T'$  和  $H'$  出现的次数大于越浪的次数,即入水次数大于越浪次数。原因在于一次越浪产生的水体往往会分成两个以上的部分先后进入水箱(这种现象在冲击模式越浪情况下很常见,由越浪水体不同部分的运动速度不同所致)。如果用某次越浪最先进入水箱的时间代表该次越浪的时间  $T$ ,可知  $T'$  中包含  $T$ ,并且如果已知上一次越浪所持续时间的下限,则该下限之后出现的第一个  $T'$ ,即为该次越浪的时间  $T$ 。特别地,每组试验的第一个  $T'$  即为第一次越浪的时间。显然,传感器A(或电子秤)只能为单波越浪量的计算提供可能的深度变化依据  $H'$  和可能的时间依据  $T'$ ,而准确的时间依据  $T$  和水深  $H$  则

必须结合传感器 *B* 来提供。

根据试验观察, 如果第 *i*-1 次越浪由堤前入射波列中第 *j*-1 个波产生, 则该次越浪的水体完全进入水箱的时间一般不会晚于第 *j* 个人射波的波峰到达堤面的时间 *t<sub>j</sub>*; 再假设水体从越浪到开始进入水箱的时间不小于 *τ*, 就得到了第 *i*-1 次越浪完全进入水箱的时间下限为 *t<sub>j</sub>+τ*, 那么第 *i* 次越浪时间 *T<sub>i</sub>* 就等于其后出现的第一个入水时间 *T'*, 即:

$$T_i = \min(T'), \text{ 如果 } i > 1, T' > t_j + \tau \quad (2)$$

并且可以得到:

$$H_i = \sum H', T_i \leq t < t_{j+1} + \tau, i \geq 1 \quad (3)$$

一旦由式(2)、(3)得到了一组试验中每次越浪的 *H*, 即可代入式(1)计算单波越浪量 *V*。

### 2) 平均越浪量 *q*。

为获得稳定结果, 计算平均越浪量的时间范围应尽量取大些, 同时需把数据首尾受试验操作影响较大的部分排除。假设某组试验共有 *n* 次 (*T* 的个数) 越浪, 这里简单地取第一次越浪之后和最后一次越浪之前的时间作为计算时间范围, 即 *T<sub>n</sub>-T<sub>1</sub>*; 在此期间, 水深变化幅度  $\Delta H = H_{n-1} - H_1$ 。根据平均越浪量的定义, 可得:

$$q = \frac{S}{B} \cdot \frac{(H_{n-1} - H_1)}{T_n - T_1} = L \cdot \frac{(H_{n-1} - H_1)}{T_n - T_1} \quad (4)$$

### 3) 越浪比例 *r*。

越浪比例的定义式为

$$r = \frac{m}{n} \quad (5)$$

式中: *m* 为一组试验中入射波个数; *n* 为越浪个数。入射波个数 *m* 可由对传感器 *B* 提供的数据分析, 越浪个数 *n* 则为 *T* 的个数, 可由式(2)得到。

## 2.2 分析步骤

测深法的数据分析环节的主要任务是求得每次越浪的时间和对应的箱内水深。根据以上的基本原理描述, 分析步骤可按如下顺序进行: 确定每次水箱入水的时间 *T'*; 确定每次水箱入水的深度 *H'*; 确定每次越浪的时间 *T* 和深度 *H*。

## 2.3 分析方法

### 2.3.1 确定水箱入水的时间 *T'*

由于箱内水面一直处于波动状态, 所以液压传感器提供的压力数据也具有波动特性, 见图 3。这种信号具有如下两个特征: 1) 水箱入水的瞬间, 压力值及其波动幅度较之前陡然升高, 且周期极短。该特征为水箱入水提供了一个可供识别的信号, 而且由于入水时具有一定速度, 使得量值很小的水体进入也能被察觉。2) 入水引起的短周期大幅值波动很快会转化为周期较大振幅较小相对稳定的波动, 波动的中心位置较入水前的稳定位置出现一定的升高, 反映出入水后箱内水深的变化。

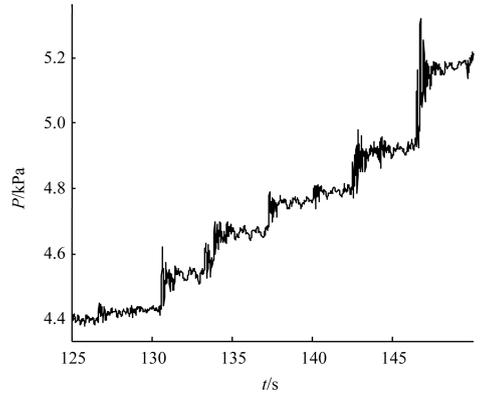


图 3 水箱内压力变化

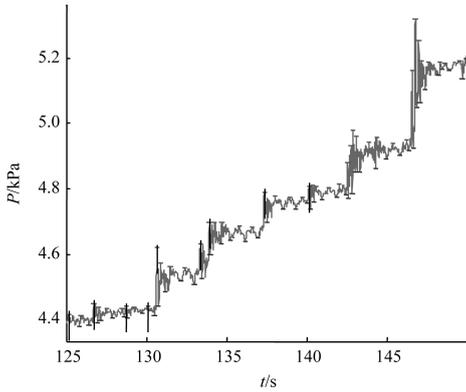
利用以上特征, 可识别和确定入水发生的时间 *T'*, 方法如下: 采用某种极值算法 (本文采用了移动时间窗算法) 由计算机自动识别数据中每个主要波动的最高点 *P<sub>j,top</sub>* 和最低点 *P<sub>j,bot</sub>*, 然后依次将相邻波动进行比较, 当同时满足以下两个条件时, 即可确认水箱入水, 并确定其发生的时间:

$$\begin{cases} P_{j,top} - P_{j-1,top} \geq \varepsilon \\ \frac{P_{j,top} - P_{j-1,top}}{P_{j-1,top} - P_{j-1,bot}} \geq \lambda \end{cases} \quad (6)$$

$$T'_k = t_{P_{j,top}} \quad (7)$$

式中: *T'<sub>k</sub>* 为一组试验中第 *k* 次入水时间; *t<sub>P<sub>j,top</sub></sub>* 为 *P<sub>j,top</sub>* 对应的时间。式(6)、(7)分别为入水信号的绝对和相对升高依据。试验表明, 取  $\varepsilon = 0.005$  kPa (对应 0.51 mm 水位升高)、 $\lambda = 0.1$  即可获得与视觉判断及堤前波高变化相当一致的识别效果。图 4 为采用上述方法识别和确定入水时间的示例 (采用与图 3 相同的数据)。可以看出: 除了直观上十分

明显的那些压力位置,突变特征都被准确地自动识别到以外,期间还有一些升高幅度较小的变化也被灵敏地识别出来,它们或者由量值较小的越浪引起,或者由同一次越浪的较小部分所引起。



注:水平短线代表有效压力波动的极值,竖直长线代表入水的时间位置。

图4 根据压力数据自动识别入水时间的结果

### 2.3.2 确定水箱入水的深度 $H'$

在确定入水时间之后,可通过分析其后间歇期的压力数据得到该次入水的深度。通过对间歇期的观察(图4),可以得到如下经验判断:波动压力的中心位置在静水压力附近做幅值较小的波动,该幅值随着间歇期的延长而逐渐减小(速度较慢)。据该判断,可考虑将间歇期内所有稳定波动中心位置的均值作为静水深度  $H'$ :

$$H'_{k+1} = \frac{1}{\rho g(E - B + 1)} \sum_{j=B}^E \frac{1}{2} (P_{j,\text{top}} + P_{j,\text{bot}}) \quad (8)$$

式中:  $H'_{k+1}$  为与  $T'_k$  相对应的水深;  $B$  和  $E$  分别为间歇期内稳定波动开始和结束的编号。式(8)假定波动围绕中心位置做对称运动。试验表明当间歇期大于 1 s 时,式(8)一般可给出精度较高的结果,而对于时间很短的间歇期(图4中 143 s 附近的间歇期),建议采用如下方法计算:

$$H'_{k+1} = \frac{1}{\rho g(e - b + 1)} \sum_{j=b}^e P_j \quad (9)$$

式中:  $P$  为压力序列值;  $b$  和  $e$  分别为间歇期内压力开始和结束的编号。在实际应用以上方法时,应根据间歇期的长度在程序中自动切换所宜采用的方法。同时,考虑到由于计算结果的误差(由设备测量误差和计算方法引起)可能引起的误

判,需设置一个最小识别高度  $\Delta h$ ,规定如果不满足以下条件:

$$H'_{k+1} - H'_k > \Delta h \quad (10)$$

则视第  $k$  次入水的判断无效。

图5为根据式(8)~(10)得到的静水深度(压力代表水深)变化过程,可以看到:代表静水深度的水平线都从每个间歇期的波动平均位置穿过,阶梯状升高过程合理形象地反映出试验过程中随着越浪的发生箱内水位的变化过程;此外,分析结果显示,图4中根据小量值波动变化识别出的入水信号确实产生了相应的水位升高变化,由此可见,该方法在识别小量值越浪方面具有较高的灵敏性。

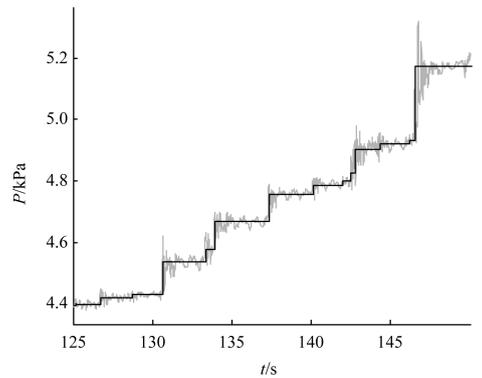
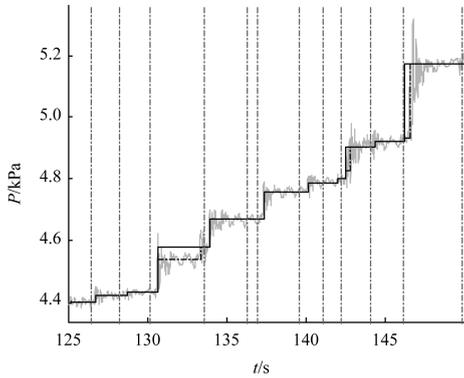


图5 水箱入水时间和以压力代表的水深识别结果

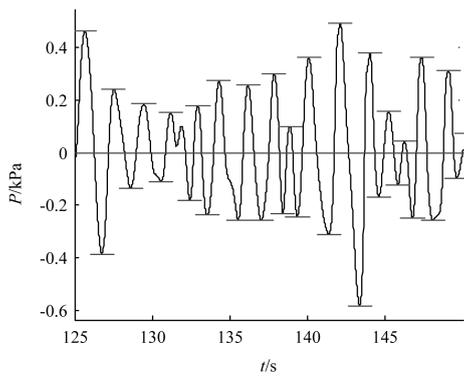
### 2.3.3 确定单波越浪的时间 $T$ 和深度 $H$

由式(6)~(7)和式(8)~(10)得到的  $T'$  和  $H'$  只是入水的时间和水深,为得到每次越浪的时间和水深还需要结合传感器  $B$  提供的堤前入射波的时间信息。根据式(2)为每个波可能发生的越浪在水箱中所持续的时间设置下限,由式(2)、(3)计算每次越浪的时间  $T$  和深度  $H$ 。据试验观察,式(2)中的  $\tau$  可取为 0.1 s。依据该方法,位于相邻时间下限之间区域内的水深升高将被合并,即合并为同一次越浪产生的升高,见图6。可以看出:位于长竖线之间的  $\Delta H'$  被合并成一个  $\Delta H$ ,且  $T$  的位置与区间内第一个  $T'$  相同;越浪从接触堤面到进入水箱的耗时,不同波浪之间变化范围约在 0.3~1 s。图7为堤前波压力变化过程,图8则是某组试验水箱内水深变化的完整分析结果。



注：水平实线代表  $H$ ，水平点划线代表  $H'$ 。

图6 单波越浪的时间和以压力代表的水深识别结果



注：长水平线表示平均压力位置，短横线表示每个波动的极值位置。

图7 堤前波压力时间过程

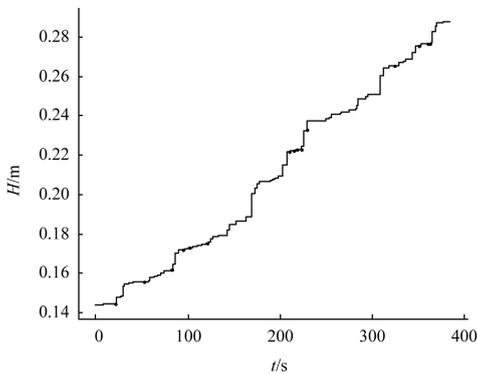


图8 某组试验水深变化的完整分析结果

### 3 测深法误差情况的试验评估

为评估测深法的误差情况，特别是采用式(8)~(10)计算水深的准确性，本文设计了如下试验：借助量筒准备不同体积的水，试验时将水倒入水箱，由于水的体积和水箱水平截面积已知，所以可得到水深的实际增加值。另一方面，应用测深法根据传感器 A 提供的数据计算水深增加值，

并与实际增加值进行对比，从而得出测量分析值的误差。水箱为矩形截面，截面的长和宽分别为 50、50.4 mm。

试验分为 2 组：1 次倒入和 2 次倒入。1 次倒入用于考察在水面平静的情况下，测深法计算深度变化的准确性；2 次倒入则重点考察在水面已经波动的情况下（模拟试验过程中的实际情况）算法的可靠性。

2 次倒入的时间间隔约为 1~3 s。表 1 给出了两组试验的水量安排和误差分析结果，从中可看出：测深法的误差情况总体上完全能够满足海岸工程试验的精度要求。水深增加值的绝对误差在 0.003~0.217 mm，绝大部分小于 0.1 mm，相对误差普遍在 0.1%~6.8%，绝大部分小于 5%；误差值与倒入的水量之间没有明显的相关性，呈现出一定的随机特征。这表明该方法即使对较小的越浪也能给出相对准确的测量结果；1 次倒入和 2 次倒入的测量误差没有表现出明显的区别，即水箱内原有水体是否波动对分析结果没有影响。这表明对于越浪量试验过程中水箱连续入水的情况采用测深法可以得到准确合理的水深结果。图 9 为该试验部分组次的分析结果。

表 1 两组试验的预置水量安排和分析结果

试验类型	注水体积/mL	水位增加值/mm		绝对误差/mm	相对误差/%
		准确值	测量值		
1 次倒入	100	0.397	0.377	-0.020	-5.0
	300	1.190	1.146	-0.044	-3.7
	500	1.984	1.994	0.010	0.5
	800	3.175	3.053	-0.122	-3.8
	1 000	3.968	4.051	0.082	2.1
2 次倒入	100,500	0.397,1.984	0.385,2.015	-0.012,0.031	-3.0,3.1
	500,100	1.984,0.397	1.892,0.418	-0.092,0.022	-4.6,5.4
	300,500	1.190,1.984	1.188,1.931	-0.003,0.054	-0.2,-2.7
	500,300	1.984,1.190	2.092,1.261	0.108,0.070	5.4,5.9
	500,800	1.984,3.175	1.894,3.291	-0.09,0.217	-4.5,6.8
	800,500	3.175,1.984	3.200,1.888	0.025,-0.096	0.8,-4.9
	500,1 000	1.984,3.968	1.993,3.965	0.009,-0.003	0.5,-0.1
	1 000,500	3.968,1.984	3.873,2.002	-0.095,0.018	-2.4,0.9

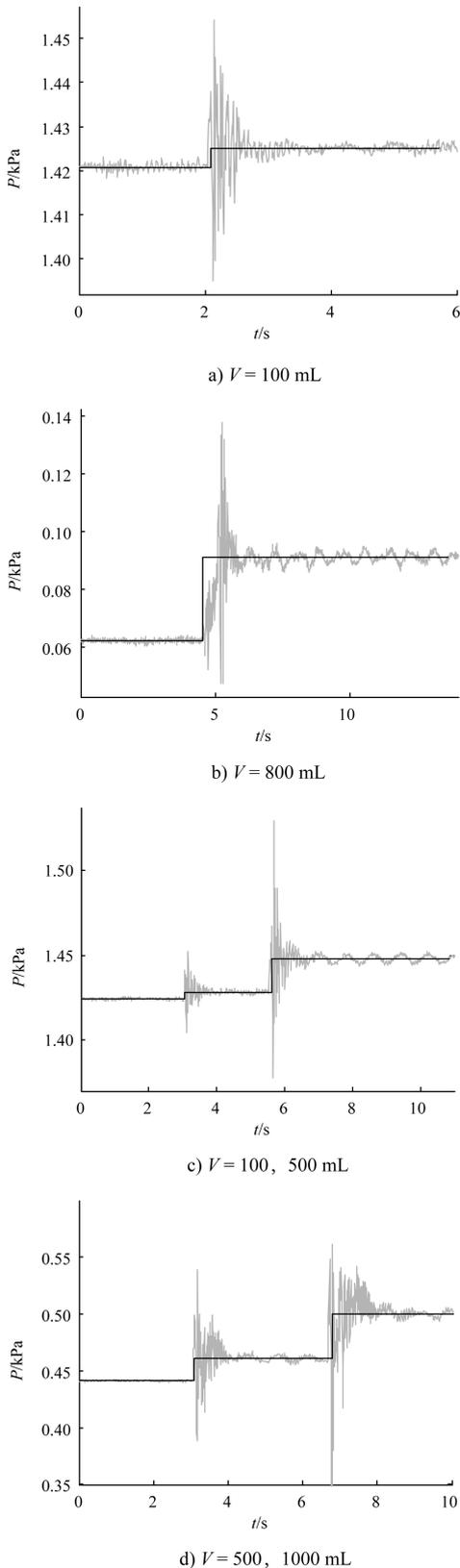


图9 测深法误差评估试验水深分析结果

#### 4 结论

1) 测深法与称质法相比具有灵敏度高、操作简单和设备通用性好等优点,与图像法相比具有

准确度高和适用范围广等优点。

2) 后置传感器提供的波动数据可提供足够正确识别水箱入水时间,以及确定两次入水之间箱内水深的信息。

3) 可通过比较波动压力极值的方法来确定水箱入水时间,而箱内水深可由间歇期内稳定波动的平均位置的均值来近似。试验表明,这两种分析方法可以得到满足试验精度要求的结果。

4) 属于同一次越浪的多次水深增加可通过前置传感器提供的时间依据进行合并,从而得到单波越浪引起的水深变化。

5) 本文所介绍的分析方法须借助计算机编程实现,目前普通配置的计算机完全可胜任相关的计算量。经验表明,一约300 s的试验,计算耗时在1 s以内。

#### 参考文献:

- [1] 李晓亮,俞聿修.斜向和多向不规则波在斜坡堤上的平均越浪量的试验研究[J].海洋学报,2007,29(1):139-149.
- [2] 李晓亮,俞聿修.斜向和多向不规则波在斜坡堤上的单波越浪量的试验研究[J].海洋学报,2007,29(6):126-133.
- [3] NAPP N, BRUCE T, PEARSON J, et al. Violent overtopping of vertical seawalls under oblique wave conditions[J].Coastal structures,2004:528-541.
- [4] HERBERT D M.Wave overtopping of vertical walls[R].UK:HR Wallingford Ltd,1993.
- [5] FRANCO C,FRANCO L.Overtopping formulas for caisson breakwater with nonbreaking 3D waves [J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering,1999,125(2):98-108.
- [6] 罗兴远,金红山.一种越浪量测量的新方法[J].中国水运,2011,11(8):100-102.
- [7] HOFLAND B,DIAMANTIDOU E,STEEG P, et al.Wave runup and wave overtopping measurements using a laser scanner[J].Coastal engineering,2015,106(9):20-29.
- [8] BESLEY P. Wave overtopping of seawalls: Design and assessment manual[R].UK:HR Wallingford Ltd,1999.