

文章编号: 1001-1455(2004)04-0324-06

# 水中冲击波与弹性薄板耦合作用的研究<sup>\*</sup>

刘德新, 冯洪庆, 佟景伟, 李鸿琦

(天津大学机械工程学院, 天津 300072)

摘要: 对水中冲击波与弹性薄板的流固耦合作用进行了研究, 建立了实验装置。利用全息干涉法定量测量了水中动态流场, 并测出受水中冲击波作用的弹性薄板在不同时刻的变形, 得出相应的全息干涉条纹图。同时利用有限元法对水中冲击波与弹性薄板的流固耦合问题进行了数值计算。研究结果表明, 用实验方法能够较好地模拟水中冲击波与弹性结构的耦合作用, 用有限元法计算水中冲击波传播问题是可行的。

关键词: 爆炸力学; 流固耦合; 全息干涉法; 水中冲击波; 弹性薄板

中图分类号: O347 国标学科代码: 130°3520 文献标志码: A

## 1 引言

工程领域中, 经常会遇到处于流场中的结构物与流体的相互作用问题, 即流固耦合问题。对流固耦合问题的研究具有广泛的实际意义。流固耦合问题是 20 世纪 30 年代由 H. M. Westergaard<sup>[1]</sup> 首先提出的。郑哲敏研究员在 20 世纪 50 年代对平板及悬臂梁与水的耦合振动进行了研究<sup>[2~3]</sup>。在 20 世纪 60~70 年代, 国外对流固耦合问题的研究比较活跃, 研究对象主要是水工结构及船舶等在波浪力的作用下与水的耦合振动<sup>[4]</sup>, 英国学者 R. E. D. Bishop 等创立了水弹性理论<sup>[5]</sup>。近十年来, 国内外学者对流固耦合问题进行了较多研究<sup>[6~7]</sup>。

纵观几十年来对流固耦合问题的研究过程可知, 人们的研究侧重于数值方法的研究<sup>[8]</sup>, 将流固耦合问题按耦合振动问题处理。显然, 这种处理方法仅适用于载荷频率较低、作用时间较长, 而结构尺寸相对较小的情况。对冲击波与结构耦合作用这类典型的波传播问题, 由于应力波在结构中的传播过程非常重要, 用耦合振动方法处理不能反映实际情况, 因而必须按波动问题处理。

用数值方法模拟波传播问题目前仍处于发展阶段。目前用于波传播问题的测试手段也很不成熟, 特别是对于冲击波与结构的耦合问题的实验研究比较重视。本文中拟讨论一种用模型实验的方法模拟水中冲击波与结构的耦合作用, 并提出了相应的动态光学测试技术。同时, 用有限元法对该问题进行了数值计算, 并对数值方法的精度及存在的问题进行了讨论。

## 2 水中冲击波流场测量技术

### 2.1 基本原理

水中动态流场的测量目前主要采用接触式测量方法, 即采用各种形式的压力传感器将压力信号转换为电信号, 该方法只能进行逐点测量。对于冲击波传播问题, 由于压力波遇到传感器会发生反射和折射等, 传感器的存在会严重干扰流场, 使测量结果失真。因此人们正积极探讨非接触式测量方法——光测法。用光学方法对水中动态流场进行定量测量不仅不干扰流场, 而且还可以测得光场内所有点的压力信息, 这是电测法不可比拟的。虽然国内外不少学者致力于这方面的研究<sup>[9]</sup>, 但到目前为止还没有能够定量测量水中动态流场的光学方法。本文中采用动态全息干涉法, 实现了对水中冲击波流场的定量测量。实验装置及光路简图如图 1 所示, 图中  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M$  为平面镜,  $B_S$  为分光镜,  $H$  为全息干板。

\* 收稿日期: 2003-06-25; 修回日期: 2004-03-12

作者简介: 刘德新(1965—), 男, 博士后, 副教授。

采用离轴全息干涉法,由红宝石脉冲激光器发出的光经棱镜分为两束:一束经水槽照射到干板上,称为物光;另一束直接照射到记录介质上,称为参考光。当水中冲击波传播时,水压力的变化使水的密度发生变化,水密度的改变使其折射率发生变化,水的折射率的变化使物光光程发生变化,从而在全息干板上形成干涉条纹。

下面分析水压力变化与全息干涉条纹的对应关系

$$\Psi(x, y) = n(x, y)D \quad (1)$$

式中:  $\Psi$  为光程,  $n$  为水的折射率,  $D$  为物光在水中所走的几何路程,此处即为水槽的厚度。当水处于静止状态时,进行第一次曝光,设此时水压力为  $p_0$ ,对应的折射率为  $n_0$ 。在水中冲击波传播的某个时刻进行第二次曝光,设此时水压力为  $p_1$ ,对应的折射率为  $n_1$ 。两次曝光之间由于水压力变化引起的物光光程增量为

$$\Delta\Psi(x, y) = \Psi_1 - \Psi_0 = D[n_1(x, y) - n_0(x, y)] = D\Delta n \quad (2)$$

式中:  $\Delta n$  为水压力变化引起的折射率的增量。当水压力较小时,水可以看成线弹性介质,折射率与压力的关系为线性关系。设

$$\frac{\Delta p}{\Delta n} = \beta \quad (3)$$

式中:  $p$  为水压力,  $\beta$  为水的压力光性常数,可由实验方法标定<sup>[9]</sup>。在温度为 20°C 时,蒸馏水的压力光性常数为 495GPa。

物光光程的增量正比于全息干涉条纹级次

$$\Delta\Psi = N\lambda \quad (4)$$

式中:  $N$  为条纹级次,  $\lambda$  为激光波长。将(2)式、(3)式代入(4)式得

$$\Delta p = N\lambda\beta/D \quad (5)$$

由上式可知,测得干涉条纹级次分布  $N(x, y)$ ,即可求得压力增量(即冲击波超压)的分布  $\Delta p(x, y)$ 。

### 2.2 水中的弹性薄板动态变形的测试方法

弹性薄板与水中冲击波相互作用,受冲击波的横向冲击,发生动态变形,板的变形速度很高。随着脉冲激光器的出现而发展起来的动态全息干涉法,能够测量物体任意时刻的变形,且具有灵敏度高、可得全场信息等特点。本文中采用双脉冲激光器用全息干涉法对水中弹性薄板受水中冲击波作用产生的弯曲波进行研究。

全息记录光路如图 2 所示,在薄板受冲击前进行第一次曝光,在薄板受冲击后发生变形时的某个时刻进行第二次曝光,设此时板变形(挠度分布)为  $W_t(x, y)$ ,可知

$$W_t(x, y) = \frac{N(x, y)\lambda}{2\cos\theta} \quad (6)$$

由全息干涉条纹图测得条纹级次  $N$  后,即可由上式确定板的挠度。通过变换第二次曝光的时刻  $t$ ,即可测得不同时刻板的变形情况。

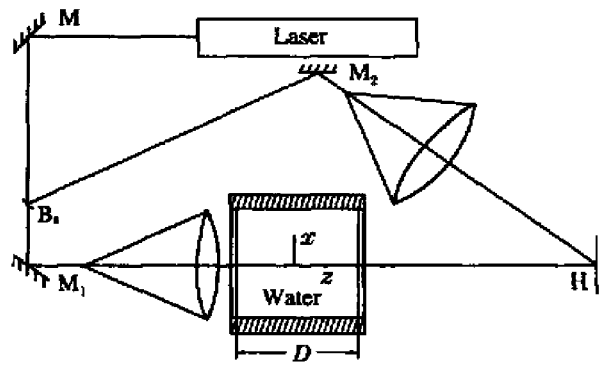


图 1 实验装置及测量光路

Fig.1 Experimental set up and measuring optical route

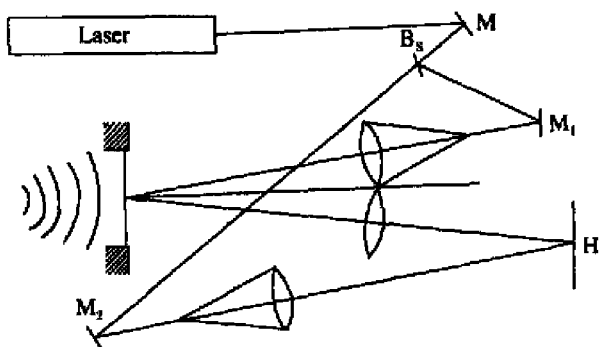


图 2 动态全息干涉法测量光路

Fig.2 Measurement optical route using dynamic holographic interferometry

### 3 水中冲击波与弹性薄板耦合作用的实验研究

实验装置主要包括以下几个部分<sup>[10]</sup>: (1)产生水中冲击波的波源装置。采用自行研制的电爆炸导体装置产生水中冲击波,波形上升前沿很陡。(2)红宝石脉冲激光器系统。产生脉冲宽度很短的激光脉冲,用以进行全息记录。(3)水中冲击波测试光路。对每个时刻的水中冲击波瞬态流场进行定量测量。(4)薄板动态变形的测试光路。对弹性薄板受水中冲击波作用产生的动态变形进行记录。(5)延时同步控制系统。控制激光器在电爆炸后不同的时刻发出电脉冲以记录该时刻的水中冲击波流场及薄板的动态变形。

实验采用厚 1mm、直径 90mm 的铝合金弹性圆薄板,圆板中心距冲击波源 45mm,冲击波能量 7J。当爆炸源距薄板很近时,冲击波作用很强,属于非线性问题,该测试方法不适用。根据两次曝光干涉的结果得出不同时刻板的变形,通过预置不同的时刻,即可得出一系列不同时刻板的变形。图 3 为电爆炸后不同时刻水中冲击波的全息干涉条纹图。图 4 为不同时刻弹性薄板动态变形的全息干涉条纹图。

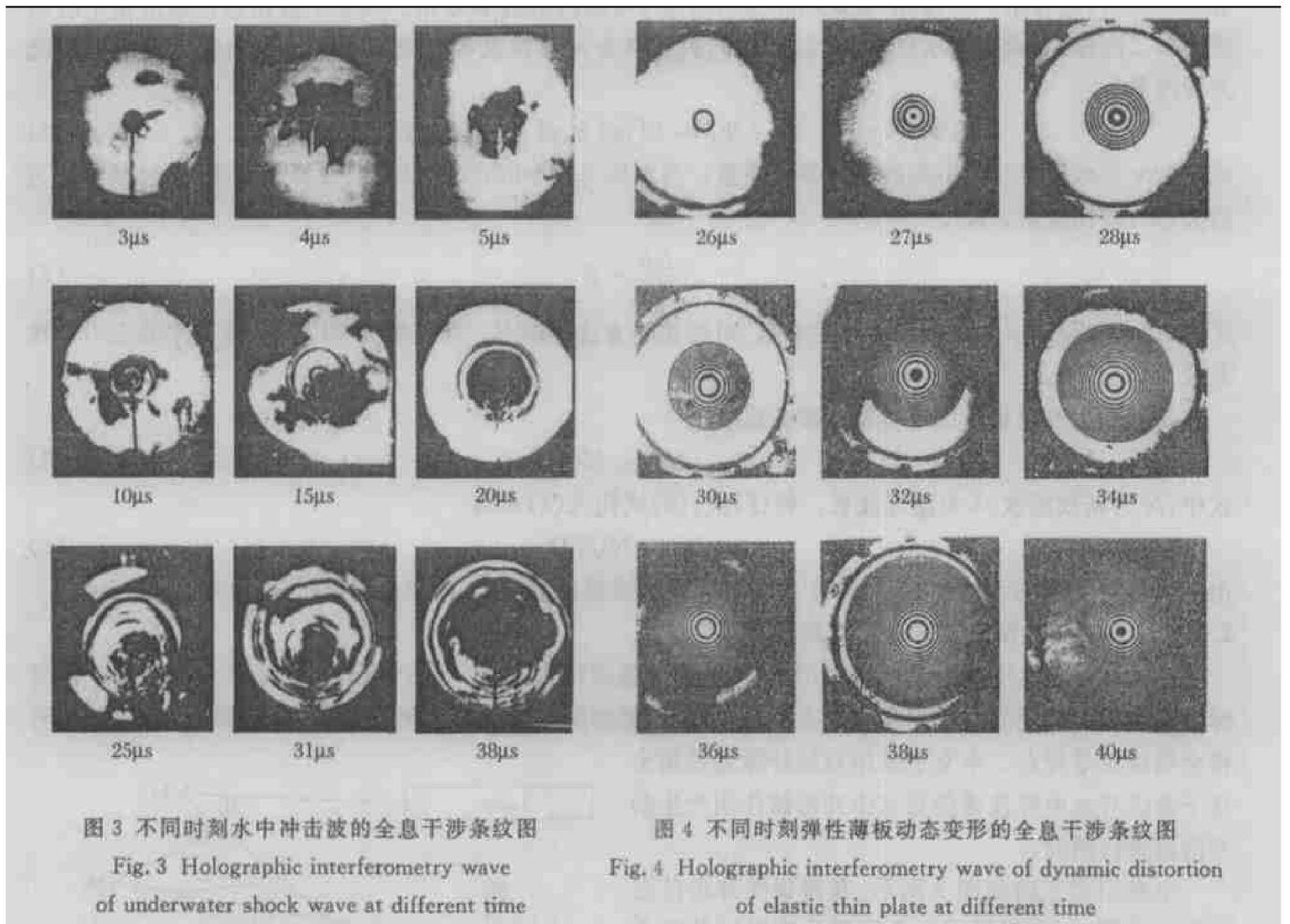


图 3 不同时刻水中冲击波的全息干涉条纹图

Fig. 3 Holographic interferometry wave of underwater shock wave at different time

图 4 不同时刻弹性薄板动态变形的全息干涉条纹图

Fig. 4 Holographic interferometry wave of dynamic distortion of elastic thin plate at different time

### 4 水中冲击波与弹性薄板耦合作用的数值计算

当水压力较小时,水可以看成是声学介质,波传播方程为

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (7)$$

式中: $c$  为水的声速。

弹性薄板受横向冲击波时的动态变形微分方程由 P. Mindlin<sup>[11]</sup> 给出

$$\left[ \nabla^2 - \frac{m}{Q} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \left[ D \nabla^2 - \frac{mh^2}{12} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] W + m \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = \left[ 1 - \frac{D}{Q} \nabla^2 + \frac{mh^2}{12Q} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] p_p \quad (8)$$

式中: $p_p$  为板所受的压力, $D$  为弯曲刚度, $m$  为板单位面积的质量, $W$  为板的挠度。

$$Q = 6D\theta^2 / ((1 + \nu^2)h^2) \tag{9}$$

其中  $\theta$  为固体半空间同真空分界面上的瑞利波速与切变波速之比,  $\nu$  为泊松比。

当载荷分布梯度不大, 而且薄板厚度比弯曲波的波长小得多时, 可以忽略剪切变形和转动惯性的影响, Kirchhoff 给出了(8)式的简化形式

$$D \nabla^4 W + m \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = p_p \tag{10}$$

流固交界面上的连续条件为: 压力连续, 速度连续, 其一般表达式为

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\rho \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} \tag{11}$$

式中:  $u_n = \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}$  为结构表面法线方向变形,  $\rho$  为流体密度。本文中水与弹性薄板耦合作用, 连续条件为

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} \tag{12}$$

方程(7)、(10)及(12)构成封闭的方程组。采用伽辽金加权余量法进行有限元离散化, 得泛函方程

$$\int_S \left[ \nabla^4 W + \frac{\bar{m}}{D} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} - \frac{p}{D} \right] \delta W dS = 0 \tag{13}$$

$$\int_{\Omega} \nabla(p) \cdot \nabla(\delta \phi) d\Omega + \frac{1}{c^2} \int_{\Omega} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \delta \phi d\Omega + \int_{\Gamma_1} \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} \delta \phi dS + \frac{1}{c} \int_{\Gamma_2} \frac{\partial \phi}{\partial t} \delta \phi dS = 0 \tag{14}$$

式中:  $\Gamma_1$  为流固交界面,  $\Gamma_2$  为 Sommerfield 无反射边界。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_2 & \mathbf{K}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{W} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 & \mathbf{M}_2 \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{p} \\ \ddot{W} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \tag{15}$$

式中:  $\mathbf{K}_i$ 、 $\mathbf{C}_i$ 、 $\mathbf{M}_i$  分别为刚度、阻尼和质量矩阵,  $\mathbf{B}$  为载荷阵。

采用逐步积分法求解动力方程即可求得单元节点的水压力及板的挠度。

### 5 数据结果及结论

实验方法测得的水中冲击波压力分布如图 5 所示, 图中虚线表示有限元计算结果,  $R$  为冲击波传

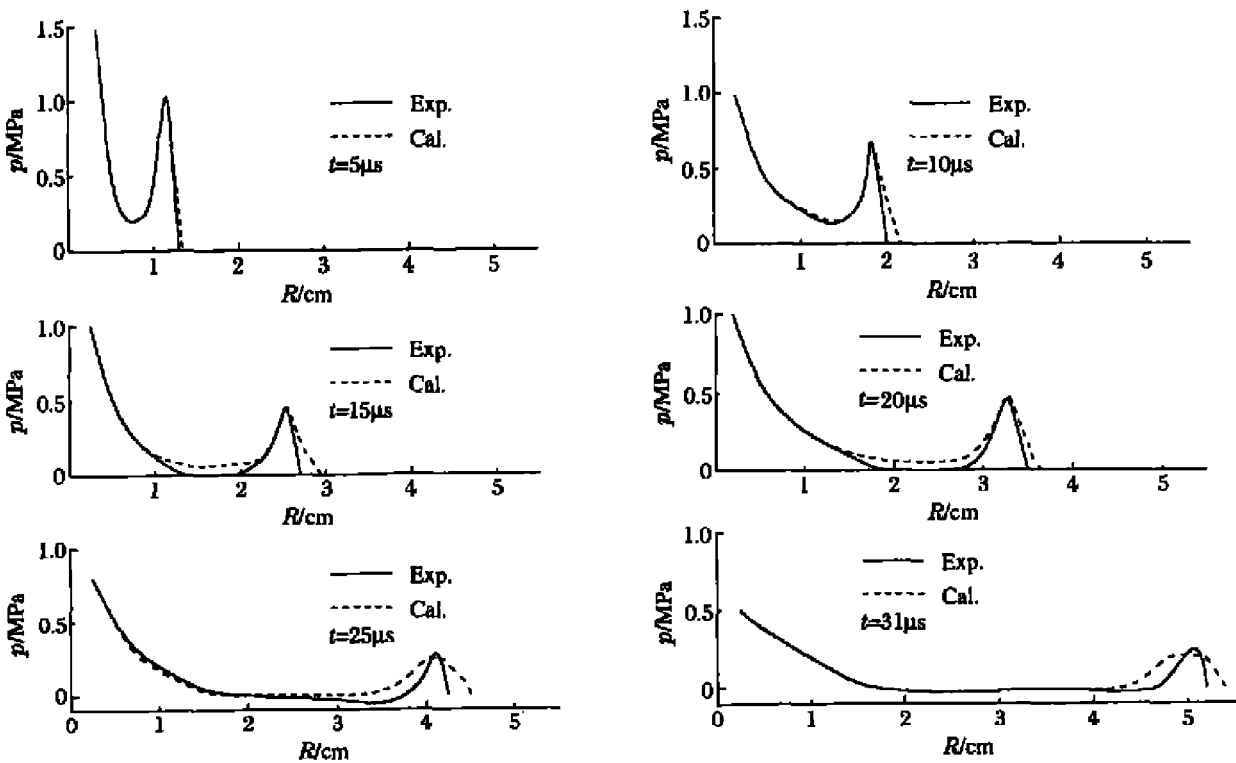


图 5 水中冲击波压力分布

Fig.5 Pressure distribution of underwater shock wave

播直径,  $p$  为水中冲击波的峰值压力。与实验结果比较表明, 用有限元法计算水中冲击波传播问题是可行的, 但单元的划分和时间步长的选取必须保证冲击波的高频分量可以无阻尼的传播。

弹性薄板动态变形的实验结果及计算结果如图 6 所示, 图中虚线表示计算结果,  $R$  为冲击波传播直径,  $W$  为板的挠度。实验结果很明显地反映出薄板动态变形的波传播特性, 说明对水中冲击波与弹性薄板的耦合作用问题需按波传播处理。用有限元法对流固耦合问题进行数值计算应兼顾流体和固体中的波传播特性, 以确保计算结果的准确性。

用有限元法计算波传播问题时, 单元网络的划分要比静态问题或振动问题精确得多, 因此对计算机的内存要求很高。由于时间步长一般很小, 所以计算时间也较长。对大型复杂问题的波传播过程数值分析, 目前仍有一定的困难。

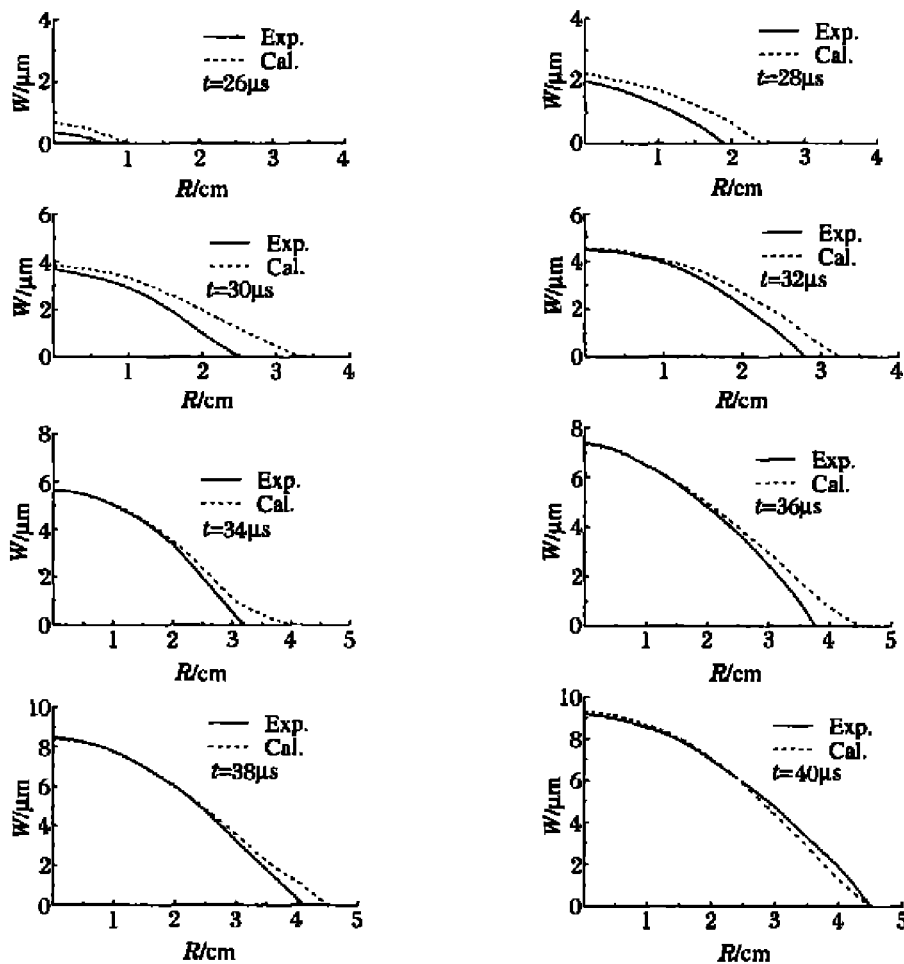


图 6 弹性薄板动态变形结果

Fig. 6 Results of dynamic distortion of elastic thin plate

### 参考文献:

- [1] Westergaard H M. Water pressures on dams during earthquakes[J]. Trans. of American Society of Civil Engineering, 1933, 59(3): 418-472.
- [2] 郑哲敏. 平板在流体作用下的振动[J]. 力学学报, 1958, 2(1): 11-16.  
ZHENG Zhe-min. Vibration of panel in the presence of a fluid[J]. Acta Mechanica Sinica, 1958, 2(1): 11-16.
- [3] 郑哲敏, 马宗魁. 悬臂梁在一侧受有液体作用时的自由振动[J]. 力学学报, 1959, 3(2): 111-120.  
ZHENG Zhe-min, MA Zong-kui. Vibration of cantilever beam placed against water with free surface[J]. Acta Mechanica Sinica, 1959, 3(2): 111-120.
- [4] Gpeanspan J E. Fluid-solid interaction[A]. The Winter Annual Meeting of the ASME[C]. Pittsbergh, Pennsylvania,

1967.

- [5] Bishop R E D, Price W G. Hydroelasticity of Ships[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1979.
- [6] Zienkiewicz O C, Bettess P. Fluid-structure dynamic interaction and wave forces: An introduction to numerical treatment[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1978, 13(1): 1-16.
- [7] FENG Zhen-xing, Hung T C. The coupled BE/FE algorithm for fluid-structure interaction: 2-D and 3-D numerical results[J]. Acta Mechanica and Scientia, 1987, 7(2).
- [8] Hinton E, Bettess P, Lewis Hinton R W. Numerical methods for coupled problems[A]. Proceedings of the International Conference Held at the University College Swansea[C]. Swansea, U K: Pineridge Press, 1981.
- [9] Pbhichal M. Optical Methods in Dynamics of Fluids and Solids[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1985.
- [10] 刘德新. 水中冲击波与弹性薄板耦合作用的研究[D]. 天津: 天津大学, 1990: 12-24.
- [11] Mindlin P. Influence of rotary inertia and shear on flexural motion at isotropic elastic plast[J]. Journal of Applied Mechanics, 1951, 18(31).

## Study on the interaction of underwater shock wave and elastic thin plate

LIU De-xin, FENG Hong-qing<sup>\*</sup>, TONG Jing-wei, LI Hong-qi

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The fluid-solid coupling interaction of underwater shock wave and elastic thin plate is investigated in this paper. Experiment equipment for the problem is set up. Dynamic holographic interferometry is used to measure underwater dynamic pressure field quantitatively. The distribution of distortion of elastic thin plate against underwater shock wave at different time is measured. The figure of holographic interferometry wave is achieved. At the same time the fluid-solid coupling problem of underwater shock wave and elastic thin plate is calculated numerically using finite element method. The simulation results show good agreement with experimental results. It also shows that the finite element method is efficient to calculate the transmission problem of underwater wave.

**Key words:** mechanics of explosion; fluid-solid interaction; holographic interferometry; underwater shock wave; elastic thin plate

---

<sup>\*</sup> Corresponding author: FENG Hong-qing  
E-mail address: fenghq@twmail.tju.cn  
Telephone: 022-27403774-8018