DOI：10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.04.001
高哲，梁书秀，孙昭晨，等. 脉冲波作用下竖直弹性板的水弹性响应[J]. 水利水运工程学报，2015(4)：1-8.（GAO Zhe，LIANG Shu-xiu，SUN Zhao-chen，et al. Hydroelastic response of a vertical elastic plate to pulse wave[J]. Hydro-Science and Engineering，2015(4)：1-8.）

脉冲波作用下竖直弹性板的水弹性响应

高　哲[1]，梁书秀[1]，孙昭晨[1]，王兴刚[2]

（1. 大连理工大学 海岸及近海工程国家重点实验室，辽宁 大连　116024；2. 南京水利科学研究院，江苏 南京　210029）

摘要：基于线性势流理论，将流场分为 3 个部分：入射势与反射势部分、辐射势的记忆部分、辐射势的瞬时部分，竖直弹性板的时域振动基于模态叠加法，利用傅里叶与拉普拉斯变换求解流场控制方程，与板的振动方程耦合，推导得出波浪作用下竖直弹性板的时域耦合方程，并利用二级四阶隐式 Runge-Kutta 法求解方程。首先给定竖直板一个初始弯曲，得到的结果与解析解和数值解结果吻合良好，验证了方法的正确性。其次对脉冲波作用下弹性竖直板的响应进行研究，分析了板的刚度系数、质量系数、脉冲幅值和边界条件对其水弹性响应的影响。研究结果表明，刚度系数对板的振动频率影响很大，脉冲幅值与板的振动幅度正相关，两边固定时对竖直弹性板的疲劳损伤最严重。

关　键　词：竖直弹性板；模态叠加法；水弹性响应；脉冲波

中图分类号：TV131.3⁺3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1009-640X(2015)04-0001-08

随着人类对海洋领域探索的不断深入，水弹性问题[1]受到越来越多学者的关注。已往考虑波浪对结构物的作用时通常将结构物假设为刚性，随着结构物向大型化、轻薄化的发展，当结构物某一尺度远大于另一方向尺度时，需要对水动力响应和弹性变形进行耦合分析。

水平薄板通常是研究水弹性问题的主要模型，因为它是许多工程实际结构物的简化，例如超大型浮体(VLFS)[2]、海上浮冰[3]等。但目前对竖直薄板模型的研究却不多。M. A. Peter 等[4]首先对弹性竖直板进行研究，基于势流理论和谱理论得到波浪与竖直板相互作用下响应的线性解析解。G. He 等[5-8]使用 BEM-FEM 方法和模态叠加法对非线性波与线性竖直板进行一系列研究。范从军等[9]研究了规则波作用下竖直弹性板的响应。竖直板的研究与水平板不同之处在于压力的求解，竖直板可根据伯努利方程直接求出压力分布(不考虑静水压力)。这样在线性条件下，规则的竖直板可以得到其运动响应的解析解。

波浪冲击下的弹性竖直板有很重要的研究价值，例如矩形液体晃荡、板桩码头等。其中脉冲波对竖直板的冲击应引起重视，在此冲击下，结构物会瞬间产生较大的形变，一旦超出设计标准，便会发生重大事故。此外在不断的冲击下，波浪的反射能够引起结构物的动响应，从而使结构物产生各种疲劳损伤。所以对脉冲波冲击下竖直板的水弹性研究有重要的理论意义和工程应用价值。

对于薄板的水弹性问题解决方法有很多，目前主要有 3 种方法：直接法、模态叠加法和谱理论法。直接法是利用流场分析方法来确定压力分布，用有限元求解弹性体运动方程，再联立求解弹性体各节点位移。E. Watanabe 等[10]利用有限元方法研究了圆形 VLFS 的弹性响应，X. Liu 和 S. Sakai[11]利用 BEM-FEM 方法分析了时域内规则波和随机波作用下浮体的水弹性响应。模态叠加法是将弹性薄板变形表示为多个振动模

收稿日期：2014-10-09
基金项目：国家自然科学基金“自然基金群体项目”(51221961)
作者简介：高　哲(1989—)，男，江苏南通人，博士研究生，主要从事波浪对建筑物作用的研究。
E-mail：qingmuxiaoshuai@163.com

态的叠加,利用边界元或者压力分布法,联合薄板运动方程求解各模态幅值,最后叠加得到薄板的运动响应。M. Kashiwagi[2]对基于模态叠加法的薄板研究进行回顾和总结。谱理论法是结合特征函数展开,得到薄板响应的单频解,此方法的优点是求得的解是全时域的。M. H. Meylen[12]首次提出此方法分析了浅水中水平薄板的水弹性。

本文将基于模态叠加法,在势流理论下,利用傅里叶变换和拉普拉斯变换求得板与波浪耦合方程的解析解,利用自编程序分析了刚度系数、质量系数、脉冲幅值和边界条件对水弹性响应的影响。

1 模型建立与分析

建立如图 1 所示的右手坐标系。x 轴在平均自由水面上,y 轴在竖直板中轴线上。假定流体为无旋、无黏、不可压缩,流体运动满足线性势流理论。板高度 D,厚度 t,弹性模量 E,密度 ρ_1,泊松比 μ,水密度 ρ,有限均匀水深 d。由模态叠加法,板的位移表示为:

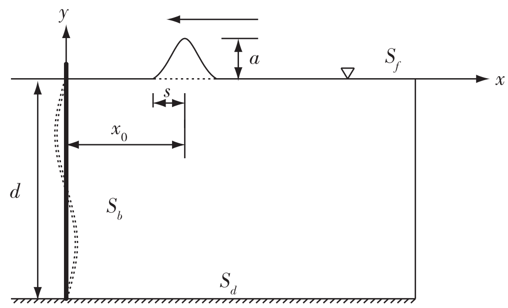


图 1 竖直板水弹性模型

Fig. 1 A hydroelastic model for vertical plate

$$\xi(y,t)=\sum_{n=1}^{\infty}\alpha_n(t)\omega_n(y) \tag{1}$$

式中:α_n 为模态系数;ω_n 为振动模态;n 为模态阶数。

1.1 流场运动方程

控制方程为:

$$\begin{cases}\nabla^2\varphi=0\\ \dfrac{\partial\varphi}{\partial x}=\dot{\xi}(t) \qquad (x=0,\ -d\leqslant y\leqslant 0)\\ \dfrac{\partial\varphi}{\partial y}=0 \qquad (x\geqslant 0, y=-d)\\ \dfrac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}+g\dfrac{\partial\varphi}{\partial y}=0 \qquad (x\geqslant 0, y=0)\end{cases} \tag{2}$$

初始条件:$\varphi(x,y,0)=0, \dfrac{\partial\varphi}{\partial t}=-g\eta_0(x) \qquad (t=0)$,其中 η_0 表示初始波面升高。

速度势 φ 和波面 η 分解为入射势和反射势 φ_1,辐射势的记忆 φ_{n2} 和瞬时 φ_{n3} 三个部分[13]:

$$\varphi(x,y,t)=\sum_{j=1}^{3}\varphi_j(x,y,t), \quad \eta(x,t)=\sum_{j=1}^{3}\eta_j(x,t) \tag{3}$$

式中:$\varphi_j=\sum_{n=1}^{\infty}\varphi_{nj}, j=2,3;\quad \eta_j=\sum_{n=1}^{\infty}\eta_{nj}, j=2,3$。

入射势和反射势部分[13]:

$$\begin{cases}\nabla^2\varphi_1=0\\ \dfrac{\partial\varphi_1}{\partial x}=0 \qquad (x=0,\ -d\leqslant y\leqslant 0)\\ \dfrac{\partial\varphi_1}{\partial y}=0 \qquad (x\geqslant 0,\ y=-d)\\ \dfrac{\partial^2\varphi_1}{\partial t^2}+g\dfrac{\partial\varphi_1}{\partial y}=0 \qquad (x\geqslant 0,\ y=0)\end{cases} \tag{4}$$

初始条件：$\varphi_1(x,y,0)=0,\ \dfrac{\partial\varphi_1}{\partial t}=-g\eta_0(x),t=0$。

利用傅里叶变换，结合初始条件、边界条件求解方程，对任意初始波面 $\eta_0(x)$：

$$\varphi_1(x,y,t)=-\frac{2g}{\pi}\int_0^\infty\frac{\eta_0{}^*(k)}{\beta^*}\frac{\cosh k(y+d)}{\cosh kd}\cos(kx)\sin(\beta^* t)\,\mathrm{d}k \tag{5}$$

$$\eta_1(x,t)=\frac{2}{\pi}\int_0^\infty\eta_0{}^*(k)\cos(kx)\cos(\beta^* t)\,\mathrm{d}k \tag{6}$$

式中：$\beta^*=\sqrt{gk\tanh(kd)}$，$\eta_0{}^*(k)=\int_0^\infty\eta_0(x)\cos(kx)\,\mathrm{d}x$。

第 n 阶模态下辐射势的瞬时部分：

$$\begin{cases}\nabla^2\varphi_{n2}=0\\ \dfrac{\partial\varphi_{n2}}{\partial x}=\dot{\alpha}_n(t)\omega_n(y) & (x=0,\ -d\leqslant y\leqslant 0)\\ \dfrac{\partial\varphi_{n2}}{\partial y}=0 & (x\geqslant 0,\ y=-d)\\ \varphi_{n2}=0 & (x\geqslant 0,\ y=0)\end{cases} \tag{7}$$

利用特征函数展开，结合边界条件、留数定理，得到速度势以及波面，具体推导可见文献[14]：

$$\varphi_{n2}(x,y,t)=-\frac{2}{d}\dot{\alpha}(t)\sum_{m=1}^{\infty}\frac{\int_{-d}^{0}\omega_n(y)\cos a_m(y+d)\,\mathrm{d}y}{a_m}\cos a_m(y+d)\,\mathrm{e}^{-a_m x} \tag{8}$$

$$\eta_{n2}(x,t)=\frac{2}{\pi}\alpha_n(t)\int_0^\infty\frac{F_n(k)}{\cosh kd}\cos(kx)\,\mathrm{d}k \tag{9}$$

式中：$a_m=\dfrac{2m-1}{2d}\pi$，$F_n(k)=\int_{-d}^{0}\omega_n(y)\cosh k(y+d)\,\mathrm{d}z$。

第 n 阶模态下辐射势的记忆部分：

$$\begin{cases}\nabla\varphi_{n3}=0\\ \dfrac{\partial\varphi_{n3}}{\partial x}=0 & (x=0,\ -d\leqslant y\leqslant 0)\\ \dfrac{\partial^2\varphi_{n3}}{\partial t^2}+g\dfrac{\partial\varphi_{n3}}{\partial y}=-g\dfrac{\partial\varphi_{n2}}{\partial y} & (x\geqslant 0,y=0)\\ \dfrac{\partial\varphi_{n3}}{\partial y}=0 & (x\geqslant 0,\ y=-d)\end{cases} \tag{10}$$

初始条件：$t=0$，　$\varphi_{n3}=0$，　$\dfrac{\partial\varphi_{n3}}{\partial t}=0$。

利用拉普拉斯变换及边界条件、初始条件和瞬时部分，可推导出速度势与波面[9]

$$\varphi_{n3}=-\frac{2g}{\pi}\int_0^\infty\frac{F_n(k)}{\beta^*\cosh^2 kd}\cosh k(y+d)\cos(kx)\,\mathrm{d}k\times\int_0^t\dot{\alpha}_n(\tau)\sin\beta^*(t-\tau)\,\mathrm{d}\tau \tag{11}$$

$$\eta_{n3}=\frac{2}{\pi}\int_0^\infty\frac{F_n(k)}{\cosh kd}\cos(kx)\,\mathrm{d}k\times\int_0^t\dot{\alpha}_n(\tau)\cos\beta^*(t-\tau)\,\mathrm{d}\tau \tag{12}$$

1.2 板的运动方程

假定竖直板为伯努利–欧拉弹性薄板，只产生水平位移，β，γ 分别表示刚度系数和质量系数，则板满足振动方程[6]：

$$\beta \frac{\partial^4 \xi(y,t)}{\partial y^4} + \gamma \frac{\partial^2 \xi(y,t)}{\partial t^2} = p(0,y,t) \tag{13}$$

$$\partial_y^4 \omega_n = \lambda_n{}^4 \omega_n, \quad p = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t}\Big|_{x=0} \tag{14}$$

变量无因次化：

$$(x^*, y^*, \xi^*) = \frac{1}{d}(x, y, \xi), \quad t^* = t\sqrt{\frac{g}{d}}, \quad \varphi^* = \frac{\varphi}{\sqrt{gd^3}}, \quad p^* = \frac{p}{\rho g d}$$

为了方便，以下将上标 * 去除。

1.3 时域耦合方程

如图 1 所示，以脉冲波为例，初始波面为：

$$\eta_0(x) = \begin{cases} \dfrac{a}{2}\left[1 + \cos\dfrac{\pi}{s}(x - x_0)\right] & |x - x_0| \leqslant s \\ 0 & |x - x_0| > s \end{cases} \tag{15}$$

式中：a 为脉冲幅值。然后对波面傅里叶变换：

$$\eta_0^*(k) = \int_0^\infty \eta_0(x)\cos(kx)\,\mathrm{d}x = \frac{a\pi^2 \cos(kx_0)\sin(ks)}{k[(\pi^2 - (ks)^2]} \tag{16}$$

将上述求解的速度势代入板的振动方程：

$$\begin{aligned} &\sum_{n=1}^{\infty} [\gamma \ddot{\alpha}_n(t) + \beta \lambda_n^4 \alpha_n(t)]\,\omega_n(z) = \frac{2}{\pi}\rho g \int_0^\infty \frac{\cosh k(y+d)}{\cosh kd}\eta_0^*(k)\cos\beta^* t\,\mathrm{d}k + \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \left[\begin{aligned} &\frac{2}{d}\rho \ddot{\alpha}_n(t) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\int_{-d}^{0} \omega_n(z)\cos a_m(y+d)\,\mathrm{d}z}{a_m} \cos a_m(y+d) + \\ &\frac{2g}{\pi}\rho \int_0^\infty \frac{F_n(k)}{\cosh^2 kd}\cosh k(y+d)\,\mathrm{d}k \times \int_0^t \dot{\alpha}_n(\tau)\cos\beta^*(t-\tau)\,\mathrm{d}\tau \end{aligned} \right] \end{aligned} \tag{17}$$

利用模态正交性得到：

$$\begin{aligned} &\gamma d\, \ddot{\alpha}_n(t) + \beta \lambda_n^4 d \alpha_n(t) = \frac{2}{\pi}\rho g \int_0^\infty T_{0n}\eta_0^*(k)\cos\beta^* t\,\mathrm{d}k + \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2}{d}\rho\, \ddot{\alpha}_n(t) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{T_{mn}^2}{a_m} + \frac{2g}{\pi}\rho \int_0^\infty T_{0n}^2\,\mathrm{d}k \int_0^t \dot{\alpha}_n(\tau)\cos\beta^*(t-\tau)\,\mathrm{d}\tau \right] \end{aligned} \tag{18}$$

式中：$T_{0n} = \dfrac{\int_{-d}^{0} w_n(z)\cosh k(z+d)\,\mathrm{d}z}{\cosh kd}$，$T_{mn} = \int_{-d}^{0} w_n(z)\cosh a_m(z+d)\,\mathrm{d}z$。

写成无因次化矩阵形式，详细推导可见文献[9]：

$$(\boldsymbol{M} + \boldsymbol{A})\,\ddot{\alpha}_n(t) + \boldsymbol{B} + \boldsymbol{K}\alpha_n(t) = \boldsymbol{f}_{ex} \tag{19}$$

式中：$\boldsymbol{M}$ 为质量矩阵；$\boldsymbol{A}$ 为附加质量矩阵；$\boldsymbol{B}$ 为附加阻尼矩阵；$\boldsymbol{K}$ 为刚度矩阵；$\boldsymbol{f}_{ex}$ 为激振力矩阵。

波面升高：

$$\begin{aligned} &\eta(x,t) = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty \eta_0^* \cos(kx)\cos\beta^* t\,\mathrm{d}k + \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{\pi}\alpha_n(t) \int_0^\infty \frac{F_n(k)}{\cosh kd}\cos(kx)\,\mathrm{d}k + \frac{2}{\pi}\int_0^\infty \frac{F_n(k)}{\cosh kd}\cos(kx)\,\mathrm{d}k \times \int_0^t \dot{\alpha}_n(\tau)\cos\beta^*(t-\tau)\,\mathrm{d}\tau \right) \end{aligned} \tag{20}$$

2　数值验证与分析

首先验证模型正确性;其次在脉冲波作用下,与 G. He 等[6]研究取得的结果进行对比,验证本程序对脉冲波作用下的有效性;最后深入研究边界条件、刚度系数,质量系数和脉冲幅值对响应和产生的辐射势波高的影响。

2.1　模型验证

为验证模型正确性,首先对比解析解[4]和 FEM-BEM[5]方法,在初始时刻波面水平下,给定竖直板一个初始弯曲 $\alpha_n{}^0 = 0.01\delta_{1n}$。板高 $D = 1.0$,刚度系数 $\beta = 0.01$,质量系数 $\gamma = 0.1$,板两端固定,水深 $d = 1.0$。利用二级四阶隐式 Runge-Kutta 求解。图 2 和 3 分别给出竖直板中点的位移和波面在 $x/d = 4.0$ 辐射波高时间历程。可见,不同方法下板中点位移和辐射波高的比较,表明解析解和数值解与本文方法的结果吻合很好,即验证了本文方法的有效性。

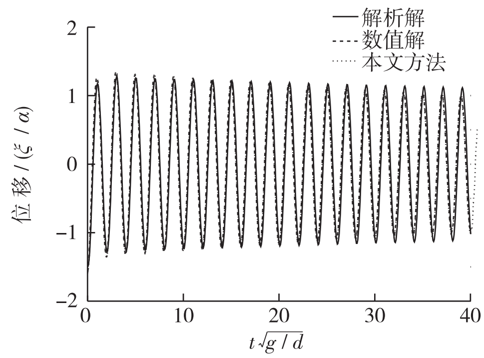


图 2　板中点位移验证对比(两边固定)

Fig. 2　Comparison of plate centre displacement (both sides fixed)

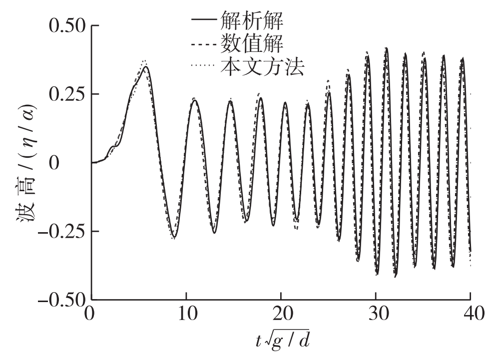
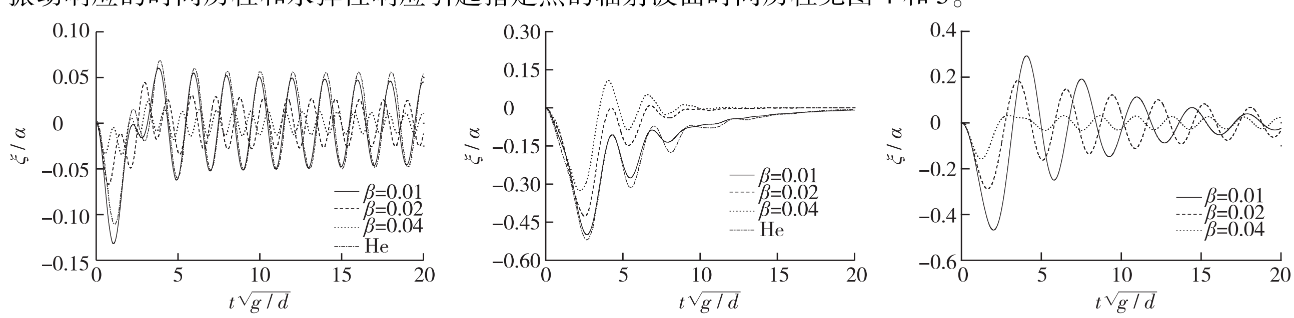


图 3　$x/d = 4.0$ 处辐射波高验证对比(两边固定)

Fig. 3　Comparison of radiation elevation at $x/d = 4.0$ (both sides fixed)

2.2　脉冲波对竖直板的冲击

针对波浪对刚性竖直板作用的研究不少,但目前考虑它们之间的水弹性影响却不多。由脉冲函数可以组合出多种波浪分布形式,因此能够考虑各种波浪与弹性板的相互作用。为了简便起见,这里仅考虑单脉冲波对竖直板的冲击,取参数 $a/d = 0.05$,$x_0/d = 0.7$,$s/d = 0.5$。质量系数 D=0.1 时,不同边界条件下竖直板振动响应的时间历程和水弹性响应引起指定点的辐射波面时间历程见图 4 和 5。



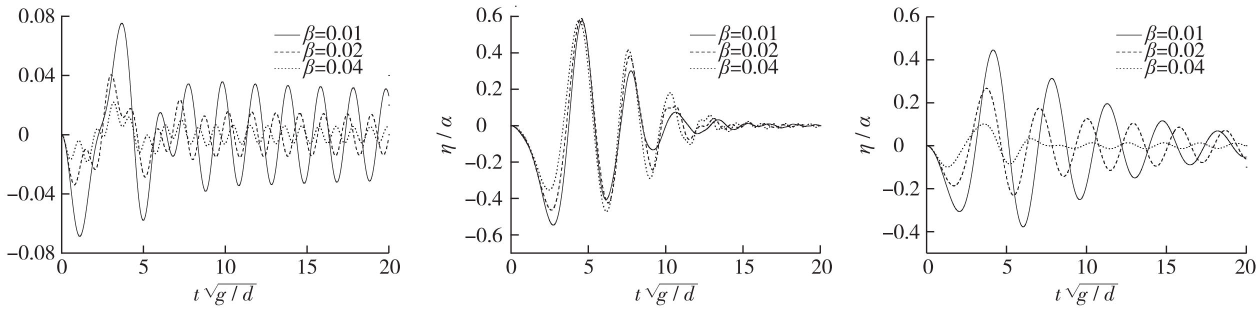
(a) 两边固定　(b) 一边固定　(c) 两边简支

图 4　板中点位移对比

Fig. 4　Comparison of displacement at centre of plate

图 4(a)和(b)中给出与 G. He[6]研究结果对比,吻合良好,证明本方法在脉冲波作用下的可行性。由图 4 也可见:脉冲波冲击下板的响应频率受刚度系数影响很大,响应频率随着刚度系数的增大而变快;板的响

应幅值跟刚度系数和边界条件均有关,响应幅值随刚度系数增大而减小,弹性板在两边简支下变形最大,一边固定次之,两边固定变形最小,而板的响应的衰减由快到慢依次是一边固定、两边简支、两边固定。尤其两边固定情况下,板的响应消失很慢,这很容易引起板的疲劳损伤。



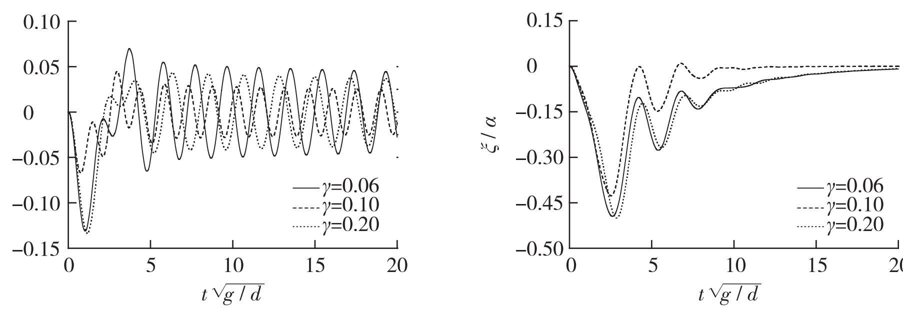
(a) 两边固定 (b) 一边固定 (c) 两边简支

图 5 $x/d = 0.7$ 辐射波高对比

Fig. 5 Comparison of radiation elevation at $x/d = 0.7$

图 5 表明:脉冲波冲击下板的振动所引起的辐射波受刚度系数的影响明显,随着刚度系数的增大辐射波频加快;且边界条件的不同,辐射波衰减快慢也不同,一边固定情况下,辐射波衰减远快于两边固定和两边简支。

图 6 为刚度系数 $\beta = 0.01$ 时,不同质量系数下竖直板的振动响应的时间历程,可见:脉冲波冲击下,质量系数对板的运动响应有影响,但规律不明显,主要是由于板的振动初期受脉冲波冲击影响较大,当脉冲波消失后,水弹性开始起主导作用,二者叠加呈现图中所示的现象。



(a) 两边固定 (b) 一边固定

图 6 不同质量系数下板中点位移对比

Fig. 6 Comparison of displacement at centre of plate under different quality coefficients

图 7 和 8 表示不同脉冲幅值下竖直板振动响应和辐射波面的时间历程,可见:脉冲波作用下,脉冲幅值对板的振动响应和辐射波高均有明显影响。以一边固定为例,随着脉冲幅值增大,板的响应幅值和辐射波高都变大。此外脉冲波冲击下,在板的振动初期会产生较大变形,此时对结构物的危害最大。

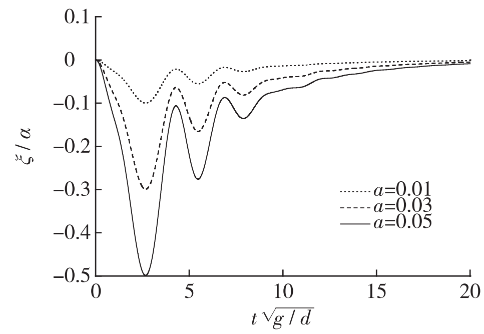


图 7　不同脉冲幅值下板中点位移对比(一边固定)

Fig. 7　Comparison of displacement at centre of plate (one side fixed)

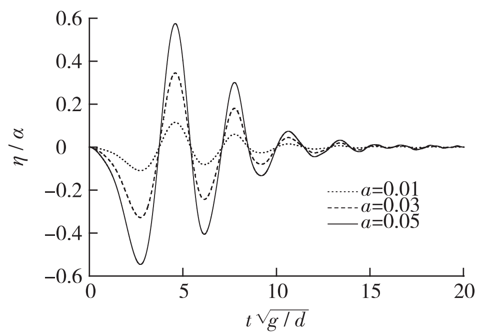


图 8　不同脉冲幅值下 $x/d = 0.7$ 处辐射波高对比(一边固定)

Fig. 8　Comparison of radiation elevation at $x/d = 0.7$ (one side fixed)

3　结　语

基于势流理论和模态叠加法,利用傅里叶与拉普拉斯变换求解流场,再与板的运动方程耦合,使用二级四阶隐式 Runge-Kutta 法求解耦合方程。首先验证了在板的初始弯曲下响应结果与解析解和 BEM-FEM 数值解吻合很好,说明方法的正确性。此方法的优点在于确定时间步长情况下,可事先计算好耦合方程中的振动积分函数,方便接下来的各种情况计算,节省时间。其次考虑了不同刚度系数、质量系数、脉冲幅值、边界条件情况下脉冲波对竖直板的水弹性响应影响,最后得到如下结论:

(1)板的刚度系数越大,板的振动频率越快,振动幅值越小。

(2)脉冲波作用下,板的边界条件对板的水弹性响应有很大影响,两边固定振动幅值远小于一边固定和两边简支,且板的振动和辐射波的衰减要慢很多,尤其两边固定情况下,板的振动衰减很慢,容易造成板的疲劳损伤。

(3)脉冲波冲击下,弹性板振动会瞬间产生较大变形,这表明脉冲波对结构的危害不可忽视;板的振动幅度和辐射波高随脉冲幅值增大而增大;响应初期主要以脉冲波冲击为主,而后水弹性占主导。

参　考　文　献:

[1] WU You-sheng. Hydroelasticity of floating bodies[D]. London: University of Brunel, 1984.

[2] KASHIWAGI M. Research on hydroelastic responses of VLFS: Recent progress and future work[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2000, 10(2): 81-90.

[3] SQUIRE V A. Review of ocean waves and sea-ice revisited[J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 49(2): 110-133.

[4] PETER M A, MEYLAN M H. Time-dependent interaction of water waves and a vertical elastic plate[C]//Proceedings of the 23rd International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Keroa, 2008.

[5] HE G, KASHIWAGI M. Nonlinear analysis on wave-plate interaction due to disturbed vertical elastic plate[J]. Journal of Hydrodynamics(SerB), 2010, 22(5): 507-512.

[6] HE G, KASHIWAGI M, HU C. Nonlinear solution for vibration of vertical elastic plate by initial elevation of free surface[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2010, 22(1): 34-40.

[7] HE G, KASHIWAGI M. Numerical analysis of the hydroelastic behavior of a vertical plate due to solitary waves[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2012, 17(2): 154-167.

[8] HE G, KASHIWAGI M. Nonlinear solution for vibration of vertical plate and transient waves generated by wave impact[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2009, 19(3): 189-197.

[9] 范从军, 梁书秀, 孙昭晨. 时域内规则波作用下竖直板的水弹性响应[J]. 海洋工程, 2013, 31(5): 37-44. (FAN Cong-

jun, LIANG Shu-xiu, SUN Zhao-chen. Hydroelastic response of a vertical plate under regular wave action in time domain[J]. The Ocean Engineering, 2013, 31(5): 37-44. (in Chinese))

[10] WATANABE E, UTSUNOMIYA T. Hydroelastic analysis of pontoon-type VLFS: a literature survey[J]. Engineering Structure, 2004, 26(2): 245-256.

[11] LIU X, SAKAI S. Time domain analysis on the dynamic response of a flexible floating structure to waves[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(1): 48-56.

[12] MEYLAN M H. Spectral solution of time-dependent shallow water hydroelasticity[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 454: 387-402.

[13] KOROBKIN A A, STUKOLOV S V, STUROVA I V. Motion of a vertical wall fixed on springs under the action of surface waves [J]. Journal of Applied mechanics and Technical Physics, 2009, 50(5): 841-849.

[14] 贺五洲, 戴遗山. 摇板式造波机所造二维规则波的时域线性解[J]. 中国造船,1993(2): 1-9. (HE Wu-zhou, DAI Yi-shan. Linear solution in time domain for two-dimension regular wave generation by rocker flap wavemaker[J]. Shipbuilding of China, 1993(2): 1-9. (in Chinese))

Hydroelastic response of a vertical elastic plate to pulse wave

GAO Zhe[1], LIANG Shu-xiu[1], SUN Zhao-chen[1], WANG Xing-gang[2]

(1. *State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering*, *Dalian University of Technology*, *Dalian* 116024, *China*; 2. *Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210029, *China*)

Abstract: Based on the linear potential flow theory, the flow field is divided into three sections: incident potential and reflection potential, memory section of radiation potential and transient section of the radiation potential. The time-dependent elastic deflection of a vertical elastic plate is described by the mode-expansion method, the velocity potential is solved by using Fourier transform and Laplace transform, and the implicit 4th-order Runge-Kutta scheme with uniform time step is applied to solve the coupled motions of an elastic plate and fluid. First, with an initial condition that the elastic plate is bent, the comparative results are in good agreement with corresponding linear analytical solution and numerical solution. Second, the hydroelastic vibration of a vertical elastic plate induced by the pulse wave is considered, and the effects of the elastic plate stiffness coefficient, mass coefficient, pulse amplitude and edge conditions on hydroelastic behavior are studied systematically. Finally, the following conclusions have been obtained: the stiffness coefficients have a great impact upon the vibration frequency; the vibration amplitude values have a positive correlation with the pulse amplitude values; and the fatigue damage of the vertical elastic plate is the most severe when the plate is fixed on both sides.

Key words: vertical elastic plate; a mode-expansion method; hydroelastic response; pulse wave