

文章编号:1673-0062(2018)01-0040-06

轴向流中固支弹性薄板的大挠度流固耦合系统的数值模拟

童立明,郭长青*,陶立佳

(南华大学 土木工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘要:就轴向流中两端固支大挠度弹性薄板的流固耦合振动特性,固支薄板的结构动力学方程用有限元法离散,流场采用不可压缩的二维粘性流体(N-S 方程)用有限体积法离散,结合 ADINA 中的流体单元划分技术,建立了双向流固耦合作用下轴向流中两端固支薄板的二维仿真模型.通过模拟仿真分析研究了给定不同流速下固支板的流固耦合振动特征和大挠度系统的振动稳定性.分别得出了不同流速下固支板中点的挠度—流速曲线、挠度时程曲线及挠曲线图.结果表明:当流速小于固支板的临界流速时,板将处于稳定的直线平衡状态;当流速大于固支板的临界流速时,板将在新的位置达到弯曲平衡状态,以及在弯曲平衡位置附近发生极限环振动.

关键词:流固耦合;弹性薄板;临界流速;大挠度;有限体积法

中图分类号:TB126

文献标志码:A

Fluid-Structure Interaction Simulation of Clamped Elastic Plate with Large Deformation Subjected to Axial Flow

TONG Li-ming, GUO Chang-qing*, TAO Li-jia

(School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: The dynamic reply and flow field features of fluid structure interaction system of large deformation clamped elastic thin plates suffered to axial flow are simulated numerically. The structural dynamics equation is dispersed by finite element method. The fluid region used an incompressible two-dimensional viscous fluid (Navier-Stokes equations), which is discretized by the finite volume method. A two-dimensional clamped simulation plate model in the axial flow with two-way fluid-structure interreaction is established, which is based upon the fluid element division technology in ADINA. Through the numerical simulation, it analyzed the fluid-structure interaction vibration characteristics and the stability of the large-deflection system of clamped plate with different flow velocities. The deflection velocity curve, deflection time-history curve and deflection curve have been obtained respectively. Results show that when

收稿日期:2017-11-06

作者简介:童立明(1993-),男,硕士研究生,主要从事流固耦合力学的研究.E-mail:37802668@qq.com.* 通讯作者:郭长青,E-mail:GuoCQ@hotmail.com

the flow velocity is lower than the critical flow velocity, the plate will be in a stable linear balance; when the flow velocity is over the critical flow velocity, the plate will bend to a new position and the limit cycle vibration will occur near the new position of equilibrium.

key words: fluid-structure interaction; elastic plate; critical velocity; large deformation; finite volume method

0 引言

流固耦合现象广泛存在于多个领域,具有重要的工程应用背景,轴向流中板状结构的流致振动是流固耦合力学中非常重要的问题之一,在飞机设计、航空动力、机械工程和水利水电工程等领域中有着广泛的应用^[1-4].近年来,很多研究学者对该问题作了较为深入的研究,在实验研究、理论计算和模拟仿真上取得了丰富的成果.Païdoussis 和 Dowell 做了相关的理论分析和模拟实验^[5-6].Guo 和 Païdoussis 采用奇异积分方程法,使有限长度板所在的平面上的扰动速度和压力混合边界条件得到全部满足^[7-8].吕坤等研究了弹性薄平板在非定常流动下的振动特性以及流场的流动特性^[9].目前已有轴向流中板状结构的流固耦合作用的研究见参考文献[10-13].本文结合 ADINA 中有限元建模技术^[14],建立了理想弹性固支薄板在二维轴向流作用下的数值计算模型,以期能为相关的实验研究和工程实际问题提供参考.

1 数值计算方法及其实现

1.1 流体控制方程

1) 质量守恒方程:单位时间内流场域流体微元中质量增加的量必须等于该同一单位时间内出入该微元体流体的净质量.

2) 动量守恒方程:流场域中单位体积上的惯性力等于单位体积上的应力张量的离散度加上单位体积上的质量.

所取的计算模型中的流体为空气(2D-Fluid),采用有限元体积法(基于 SIMPLE 算法)求解二维状态下粘性瞬态的不可压缩 N-S 方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

其中 ρ 为流体密度, p 为压力, t 为时间, u_i 为速度分量 ($i = 1, 2$), x_i 为坐标分量 ($i = 1, 2$), μ 为动力粘度.

1.2 结构控制方程

固支薄板采用有限元法离散用二维大挠度实体单元(2D-Solid)模拟,其结构动力学方程采用 Newmark 积分求解(不考虑结构的阻尼):

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{p\} \quad (3)$$

式中, $[M]$ 、 $[K]$ 分别为等式中的质量矩阵、刚度矩阵, $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{x\}$ 分别为系统对应的加速度和位移, $\{p\}$ 为由流体流动下加载的压力(荷载),且以矢量形式加载到结构的单元节点上.

1.3 数值仿真模型与流体网格划分

进行分析之前,使用前处理模块(ADINA-AUI)建立固支板的数值模型以及对应的轴向流场模型,通过 ADINA-FSI 模块中的直接耦合算法求解方程.计算模型中流体运用交错网格的 SIMPLE 方法,采用结构性贴体网格.网格划分:1) 越靠近固支板,网格应越密;2) 靠近上、下槽边,网格应稍密.

1.4 计算模型与边界条件

以轴向流中两端固支薄板为研究对象,结构中网格划分为 9 节点单元,弹性薄板长度 $L = 100 \text{ mm}$,板厚 $h = 0.1 \text{ mm}$,板宽 b 取单位长度,板密度 $\rho_b = 1.48 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E = 3.5 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.25$.流体中网格划分为 4 节点单元,流体密度 $\rho = 1.226 \text{ kg/m}^3$,动力粘性系数 $\mu = 18 \times 10^{-6} \text{ Pa}$,流场高度 $H = 800 \text{ mm}$,平行来流在 $t = 1 \text{ s}$ 时加载到恒定终值速度 U ,固支板的数值计算模型如图 1 所示.

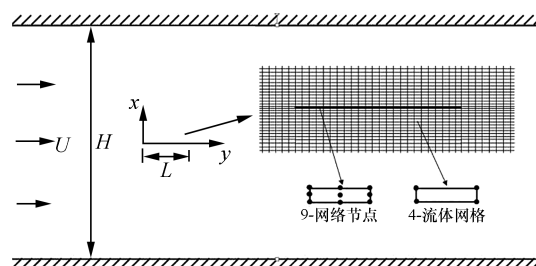


图 1 二维数值模型示意图

Fig.1 Two-dimensional sketch map of numerical model

流场区域及边界条件:依据文献[10,13],拟取计算流场如图1中所示,左端入口采取流速的边界条件,右端出口采取自由边界条件.设置上下槽边为固壁状态,固支板的存使流场成为多连域,板的上下界面为流固耦合边界.

2 计算结果及分析

2.1 挠度—流速曲线

图2为系统流固耦合时,板中点的挠度—流速曲线.

固支板产生弯曲出现挠度的临界流速 $U_c = 4.14 \text{ m/s}$.当平行来流的流速 $U < U_c$ 时,板将仍处于到原来的直线平衡状态(图2中I段).

当流速 $U > U_c (4.14 \text{ m/s})$ 时,固支板发生静态失稳,发生弯曲变形,挠度开始增大,结构板产生一定的静位移,出现弯曲平衡状态(Pitchfork分岔),挠度随流速的增大而增大(图2中II段).

当流速 U 大于或等于 16.3 m/s 时,固支板将在弯曲平衡位置附近发生极限环振动(Hopf分岔).流速越大,极限环振动出现越明显,极限环振动的振幅随流速的增大而增大(图2中III段).

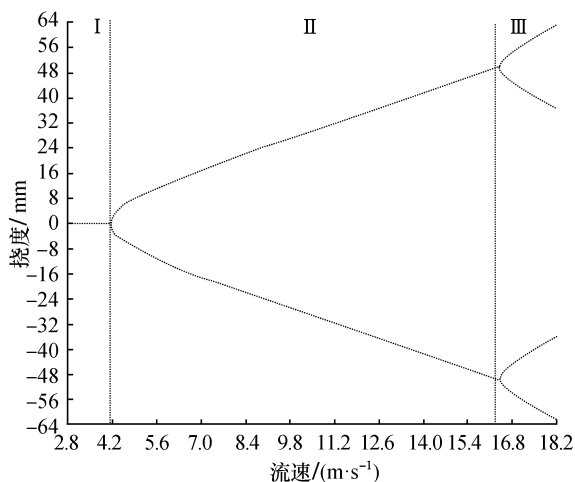


图2 板中点的挠度—流速曲线
Fig.2 Deflection-velocity curve at the midpoint of the plate

2.2 中点挠度时程曲线

图3(a)为流速 $U = 4.14 \text{ m/s}$ 下固支板的中点挠度时程曲线,本文所取的计算模型中对结构板施加很小的初始扰动,流体在板的上、下界面产生举力从而让板在平行来流的作用下开始振动.当 $U = 4.14 \text{ m/s}$ 时,固支板的最大挠度约为 0.0125 mm ,因为平行来流的流速小于固支板耦

合形态的临界流速,结构板此时只发生轻微的自振,轴向流的流速如图2中的I段.

图3(b)为流速 $U = 5.2 \text{ m/s}$ 下固支板中点的挠度时程曲线,当 $U = 5.2 \text{ m/s}$ 时,板中点的最大挠度约为 9.37 mm .本文模型中平行来流是随着时间逐渐加载至恒定速度,在 $t = 0 \sim 1 \text{ s}$ 时流速从零增加到恒定终值.在 $t = 0 \sim 1 \text{ s}$ 这段时间内,结构板处在流体中初始的直线平衡状态被打破,随着时间的增大,平行来流的流速已经大于固支板自振的临界流速,板出现了明显的挠度增加,结构板开始运动,出现一定的静位移.大约在 $t = 1.17 \text{ s}$ 时,经过多次往复振动后在新的位置达到弯曲平衡状态.

图3(c)为流速 $U = 12.6 \text{ m/s}$ 下固支板中点的挠度时程曲线, $U = 12.6 \text{ m/s}$ 时板中点的最大挠度值约为 36.25 mm .在 $t = 0.5 \text{ s}$,板开始向上运动,固支板的挠度开始出现“突变”现象,在板的上半部分出现明显的挠度增大.在 $t = 0.65 \sim 1.4 \text{ s}$ 这段时间内,时程曲线呈现出“锯齿状”的变化形式,结构板开始多次的反复振动.当 $t = 1 \text{ s}$ 时,流体的流速增加至恒定终值,板此时受到恒定流速的较大扰动,振动频率达到最大值,随后振幅逐渐衰减最终在新的位置达到弯曲平衡位置.

图3(d)为流速 $U = 13.2 \text{ m/s}$ 下固支板中点的挠度时程曲线, $U = 13.2 \text{ m/s}$ 时板中点的最大挠度值约为 38.28 mm .当 $t = 0.5 \text{ s}$ 时板在平行轴向来流的作用下瞬时的直线平衡状态被打破,开始发生向下的偏移,结构板的向下的挠度显著增加.随着初始流速的增加,当 $t = 0.62 \text{ s}$ 时处于板初始位置下半部分的振动的振幅开始出现反复振动,最终达到负向挠度值的最大值.当 $t = 1.0 \text{ s}$,流速增加至恒定终值,相当于在板的上下界面施加了较大的扰动,结构板产生单次回振现象,板的挠度出现“突变”现象,开始出现较大的向上挠度.处在板初始位置下半部分的振幅跨过初始位置进入上半部分开始呈现“锯齿状”的振动,板的正向挠度逐渐增加,在新的位置开始往复振动后出现衰减最终趋于新的弯曲平衡状态.相比于 $U = 12.6 \text{ m/s}$ 、 $U = 5.2 \text{ m/s}$,固支板中点的最大挠度值随流速的增大而增大,板发生振动的时间随流速的增大而减少,而振动的振幅、频率增大.

流体流速在图2中II段取值时,固支板在初始流速的增加过程中,板将出现屈曲,开始出现随机的向上或者向下的运动,时程曲线呈现出“锯齿状”的现象,随着流速的继续加载,最终固支板

将在新的位置达到各自对应流速下的弯曲平衡状态.

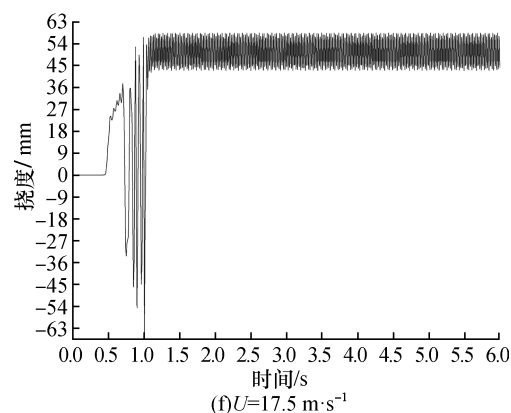
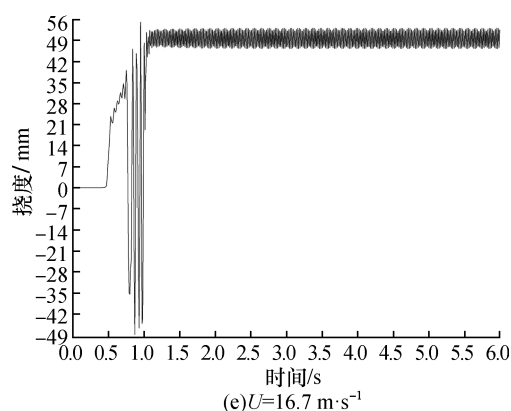
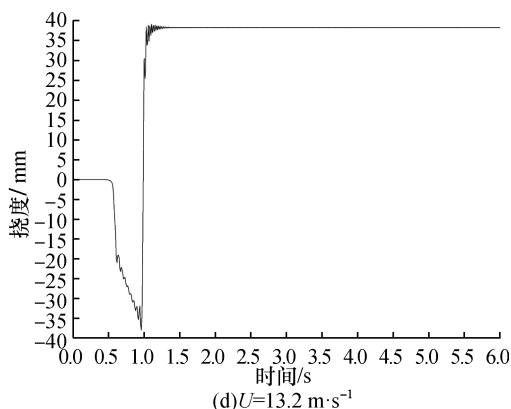
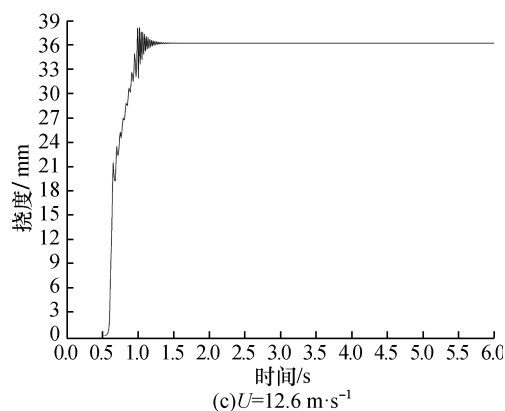
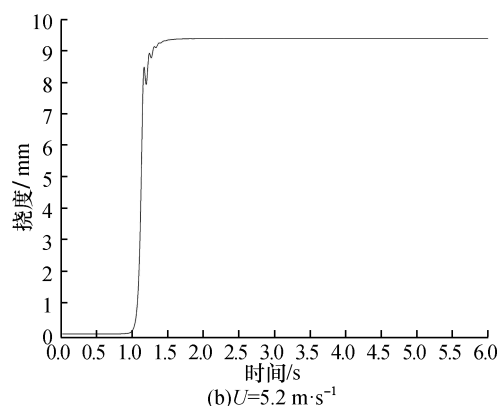
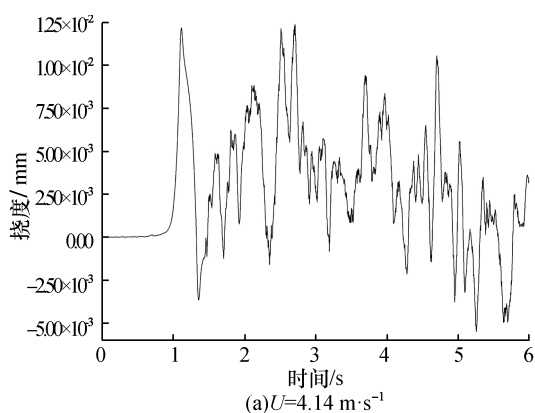


图 3 固支板中点的挠度时程曲线
Fig.3 Clamped plate midpoint
deflection time-history curve

图 3(e) 和图 3(f) 分别为流速 $U = 16.7 \text{ m/s}$ 和 $U = 17.5 \text{ m/s}$ 下固支板中点的挠度时程曲线, $U = 16.7 \text{ m/s}$ 时板中点的最大挠度值约为 53.15 mm , $U = 17.5 \text{ m/s}$ 时板中点的最大挠度值约为 58.44 mm . 大约在 $t = 0.45 \sim 1.0 \text{ s}$ 时, 整个系统处于瞬态的不稳定状态, 大约在 $t = 0.45 \sim 0.7 \text{ s}$ 时结构板受到冲击荷载的影响, 结构板开始偏离平衡位置向上运动, 出现较大的正向挠度, 振动的挠度随着时间的增大而增大. 大约在 $t = 0.7 \sim 1.0 \text{ s}$ 时, 结构板自身平衡位置上半部分的振幅跨过初始位置进入到下半部分, 之后板偏离初始位置开始出现随机的振动正向挠度和负向挠度. 大约在 $t = 1.0 \text{ s}$ 结构板达到正向挠度的最大值, 板在轴向流作用下发生静力发散失稳, 以最大静位移处为中心系统发生稳定的极限环振动. 流体的流速在图 2 中Ⅲ段取值时, 固支板在静力发散失稳后达到弯曲平衡位置附近发生极限环振动的时间随流速的增大而减少, 极限环振动的振幅随速度的增大而增大, 对应振动的频率增大.

2.3 挠曲线图

图 4 为不同流速下板中点的挠曲线图, 反映

了在各个流速下不同时刻系统的振动形态,结构板的挠曲线图形呈不对称形式,具有行波叠加的特征.从图4(a)所示,当 $U_c = 4.14 \text{ m/s}$ 时,此时流体的流速在图2(I)的范围内,固支板的正向最大振幅约为 0.0125 mm ,平行来流流速小于板耦合的临界流速,在流场细小扰动作用下,板会发生自振,最后仍会恢复到稳定的直线平衡状态.

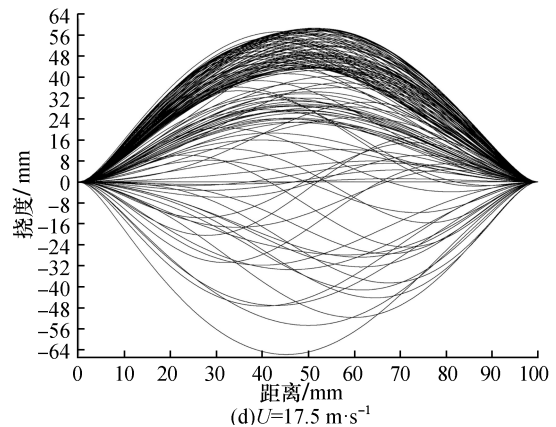
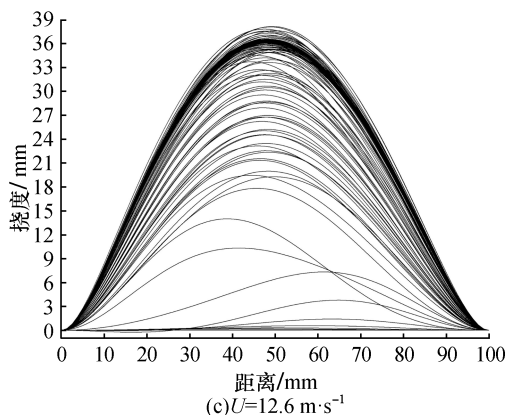
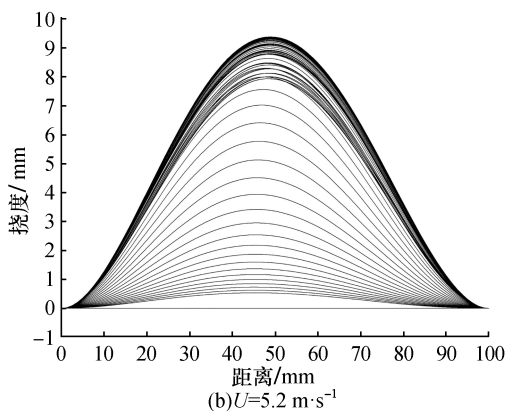
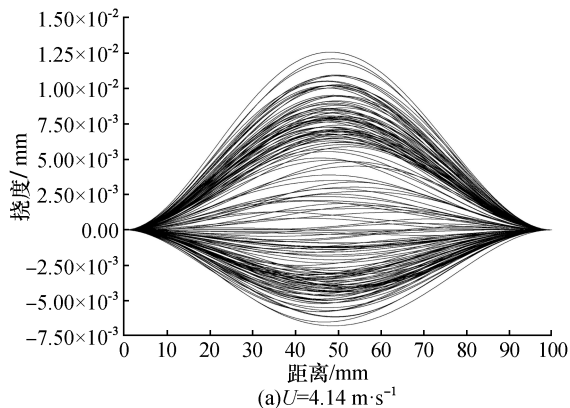


图4 不同流速下板中点的挠度线图

Fig.4 Deflection curve of the midpoint of the plate at different velocity

当流体流速在图2中Ⅱ段内取值时,如图4(b)流速 $U_c = 5.2 \text{ m/s}$ 所示,随着流体的加载,固支板的振幅的大小与板长大致相等且板在挠度约为 $8.5 \sim 9.37 \text{ mm}$ 处振动形态较为密集.由图4(c)流速 $U_c = 12.6 \text{ m/s}$ 固支板中点的挠曲线图所示,随着流速的增大,板的振幅增大且振动形态在大约板长4倍处较为密集,板的振动形态密集程度渐渐发散.图4(d)流速 $U_c = 17.5 \text{ m/s}$ 下固支板的振动响应,流体此时的流速处于图2(Ⅲ)范围内,轴向流在初始加载过程中结构板离开原初始位置随机的向一侧偏移,随着流速的增大,从挠曲线图上明显的看到板的振动既有正向挠度、也有负向挠度,并且在挠度约为 $43.22 \sim 58.41 \text{ mm}$ 处振动形态较为密集.当振动的振幅超过静平衡位置一定距离后结构板在新的平衡位置发生极限环振动,固支板此时以平行来流所对应的最大静位移为中心做周期的极限环形式振动(Hopf分叉).

2.4 流场压力的变化

当流速 U 在图2中Ⅲ段内取值时,固支板在静力发散失稳后达到新的弯曲平衡附近发生极限环振动.从图3(f)可知,当流速 $U = 17.5 \text{ m/s}$ 时,结构板大约在 $t = 1.0 \text{ s}$ 后最终开始以最大静位移为中心做周期的极限环振动且振动的周期 T 为 0.02 s .从中取 $t = 4.13 \sim 4.15 \text{ s}$ 进行分析,如表1所示.当 $t = 4.13 \text{ s}$ 时,板中点的最大挠度值约为 58.22 mm ,此时结构板极限环振动的振幅达到正向振幅的最大值的,处于最高位置.当 $t = 4.135 \text{ s}$ 时,板中点的最大挠度值约为 50.74 mm ,根据图3(f)可知,此时板处在了静挠度位置.当 $t = 4.14 \text{ s}$ 时,板中点的最大挠度值约为 43.25 mm ,达到极

限环振动正向振幅的最小值,处于最低位置.当 $t=4.145$ s 时,板中点最大挠度值约为 50.83 mm,回到了静挠度位置.最后当 $t=4.15$ s,板中点的最大挠度值约为 58.41 mm,回到了最高位置.在振动的周期内,固支板出现了 3 次上行、3 次下行方向的振动情况,通过对流场压力做功的分析,压力做正功的次数大于负功的次数,如表 1 所示.由于流体存在粘性阻尼的作用,在结构板发生振动时候,阻尼力使得振动的振幅逐渐下降,而流场压力的变化使得整个非线性振动的系统有着能量的输入,板得以继续以最大静位移处为中心作周期性的极限环振动(板的自激振动).

表 1 $U=17.5$ m/s 时,流场压力变化与振动的关系

Table 1 $U=17.5$ m/, Relationship between the change of flow field pressure and vibration

序号	时间 /s	挠度 /mm	位置	振动方向	上压力 / 10^{-5} N	下压力 / 10^{-5} N	压力做功
1	4.130 0	58.22	最高		65.31	62.19	零
2	4.132 5	53.38		下行	77.74	75.12	正功
3	4.135 0	50.74	静挠度	下行	81.74	82.90	负功
4	4.137 5	45.94		下行	75.05	73.64	正功
5	4.140 0	43.25	最低		97.37	100.20	零
6	4.142 5	46.38		上行	78.43	79.81	正功
7	4.145 0	50.83	静挠度	上行	82.24	83.45	正功
8	4.147 5	53.91		上行	76.24	73.53	负功
9	4.150 0	58.41	最高		66.21	63.05	零

3 结 论

本文对轴向流中固支弹性薄板的流固耦合系统的数值模拟得到了以下结论:

1) 平行来流流速较小时,板处于稳定的直线平衡状态.随着流速增加到某一临界值时,板将离开初始耦合界面产生随机的向上或者向下的振动,并伴随有多次反复振动的现象,板的振幅和挠度随流速的增大而增大,产生 Pitchfork 分岔.当流速增加到另一个临界值时,板在一定的时间内发生回振现象且伴随着静力发散失稳后达到弯曲平衡位置附近发生极限环振动(Hopf 分岔曲线).

2) 通过对流场压力的变化与固支板振动的关系分析,流体的最大压力出现在固支板的上、下流固耦合界面且将在上、下表面产生压力差,板出

现极限环振动且振动具有行波的特征,反映出流固耦合过程中二者之间的交互作用.

参考文献:

- [1] 许多,顾瑞,徐惊雷,等.内并联式 TBCC 进气道分流板流固耦合分析[J].飞机设计,2013,33(4):59-63.
- [2] 郭帅,徐惊雷,顾瑞.单边膨胀喷管移动板的流固耦合研究[J].航空动力学报,2015,30(6):1382-1390.
- [3] 倡晓辉,卢文秀,褚福磊.带有任意边缘裂纹的自由圆板流固耦合动力特性[J].机械工程学报,2012,48(9):50-55.
- [4] 沈春颖,何士华,杨婷婷,等.平面直升闸门流固耦合振动同步测试模型试验研究[J].振动与冲击,2016,35(19):219-224.
- [5] SHELLEY M J, ZHANG J. Flapping and bending bodies interacting with fluid flows [J]. The annual review of fluid mechanics, 2011, 43(1):449-465.
- [6] TANG L, PAÏDOUSSIS M P. On the instability and the post-critical behavior of two-dimensional cantilevered flexible plates in axial [J]. Journal of sound and vibration, 2007, 305(1):97-115.
- [7] GUO C Q, PAÏDOUSSIS M P. Stability of rectangular plates with free side-edges in two-dimensional inviscid channel flow [J]. Journal of applied mechanics, 2000, 67(1):171-176.
- [8] GUO C Q, PAÏDOUSSIS M P. Analysis of hydroelastic instabilities of rectangular parallel-plate assemblies [J]. Journal of pressure vessel technology, 2000, 122(4):502-508.
- [9] 吕坤,张狄,谢永慧.不同来流下薄平板流固耦合特性分析[J].中国电机工程学报,2011,31(26):76-82.
- [10] 洪伟斌,郭长青,盛叶舟,等.轴向流中两平行弹性薄板大挠度流固耦合系统的数值模拟[J].南华大学学报(自然科学版),2015,29(4):92-97;103.
- [11] 王凡.简支大挠度弹性薄板在轴向流中的流固耦合系统的动力特性[D].衡阳:南华大学,2016:33-41.
- [12] 胡世良.平板流固耦合振动的数值分析[J].上海交通大学学报,2013,47(10):1487-1493.
- [13] 王凡,郭长青,郑坤.轴向流中平行简支弹性薄板的大挠度流固耦合的数值模拟[J].南华大学学报(自然科学版),2016,30(2):59-64.
- [14] 王小虎. ADINA 有限元建模中特征建模技术应用分析[J].四川地质学报,2011,31(4):438-441.

(责任编辑:龙威)