

文章编号:1673-0062(2016)02-0059-06

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

王 凡,郭长青*,郑 坤

(南华大学 城市建设学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:分析研究了轴向流中简支弹性薄板大挠度流固耦合系统的振动响应和流场特性.板结构动力学方程采用基于位移的有限元法离散;流场采用二维不可压缩粘性流体 N-S 方程,并用有限体积法离散;在此基础上结合动网格控制技术,建立模拟双向流固耦合作用下轴向流中简支弹性薄板的二维数值模型.利用该数值模型得到了单块简支板随流速变化流致振动特性,研究了结构大挠度的振动稳定性,分别得到了 Pitchfork 分岔曲线和非线性系统结构的 Hopf 分叉曲线.通过轴向流恒定流速下不同间距的平行两块简支弹性薄板流固耦合的数值模拟得到了的流致振动特性.

关键词:弹性薄板;大挠度;振动响应;流场特性;双向流固耦合

中图分类号: O33 **文献标识码:** A

Fluid-structure Interaction Simulation of Simply Supported Parallel Plate with Large Deformation Subjected to Axial Flow

WANG Fan, GUO Chang-qing*, ZHENG Kun

(School of Urban Construction, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: The dynamic response and flow field characteristics of fluid structure interaction system of simply-supported elastic thin plates with large deformation subjected to axial flow are studied numerically. The structural dynamics equation is discretized by displacement-based finite elements. The fluid domain is governed by two-dimensional incompressible viscous Navier-Stokes equations, which are discretized by the finite volume method. Based on this and combined with dynamic grid control technology, the two-dimensional numerical model of simply-supported elastic thin plate in the axial flow with two-way fluid-structure interaction is built. By using this numerical model, the flow-induced vibration characteristics of a single plate as well as the vibration stability of the large deflection structure are studied, Pitchfork bifurcation curve and Hopf bifurcation curve of nonlinear system structure

收稿日期:2016-01-26

作者简介:王 凡(1988-),男,湖南永兴人,南华大学城市建设学院硕士研究生.主要研究方向:流固耦合力学.*通讯作者.

have been obtained respectively. The flow vibration characteristics are gained through the numerical simulation of two simply supported parallel plate with different spacing and constant axial flow velocity.

key words: elastic plates; large deformation; dynamic behavior; flow field characteristics; two-way fluid-structure interaction

0 引言

流体与弹性薄壁结构之间的流固耦合作用是流固耦合研究领域中的一个比较突出的问题,板状结构在反应堆燃料元件结构一体化设计及相关工程中有着极大的应用价值,在航空航天、船舶以及生物机体仿真等工程同样有着广泛的应用,众多相关领域学者对此进行过深入的研究,在实验研究、理论计算和数值仿真三个方面取得了丰硕的成果。近期,Michael 和 Zhang^[1] 对这方面问题做了一个简要的综述,系统的介绍了近年来在这方面取得的研究成果和结论。鲁丽^[2] 首先采用 Hopf 分岔的代数判据研究了无粘流中悬臂非线性板状结构流固耦合振动稳定性及其分叉特性。Bein^[3] 等采用非线性板理论和非线性活塞理论研究了两端简支板的动力特性。在流固耦合的工程实际问题中的大多数情况下,弹性薄壁构件的变形为几何非线性,再加上流体方程的非线性,将导致流体和弹性体相互作用界面上的强非线性^[4]。本文所选用的结构材料为理想的弹性材料,做二维处理,流场采用二维不可压缩的粘性流体,采用双向流固耦合方法,并结合动网格控制技术^[5],建立了二维轴向流中各类支座下弹性薄板的几个流固耦合数值模型,以期对相关实验研究和理论计算提供参考^[6-8]。

1 数值计算方法及其实现

1.1 流体控制方程

本文模型中的流体为空气,基于二维瞬态、粘性、不可压缩的 N-S 方程选用 SIMPLEC 算法的有限体积法来求解:

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

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

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

1.2 结构控制方程

利用有限元方法对弹性薄板结构进行离散,

采用 Newmark 数值积分求解结构动力学方程,进行瞬态动力学分析(不考虑结构阻尼):

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

其中, $[M]$ 为质量矩阵, $[K]$ 为刚度矩阵, $\{\dot{x}\}$ 、 $\{\ddot{x}\}$ 分别为加速度和位移, $\{p\}$ 为由流体运动引起的荷载(压力),并以矢量形式加载到单元节点上。

1.3 流固耦合及动网格控制

分别在 ADINA 中建立结构模型和流场模型,且确保流体和结构模型中的时间积分是相容。将结构模型和流体模型一起导入到 ADINA-FSI 求解器进行流固耦合的迭代计算。考虑结构为非线性及大变形带来的流场网格变形问题,易引起网格畸变从而导致运算停止,本文采用移动网格法^[5]处理流固耦合界面网格大变形,界面采用任意的拉格朗日-欧拉法(ALE)^[4]。

1.4 计算模型与边界条件

单块板模型:弹性薄板的长度 $L = 100 \text{ mm}$,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 $\nu = 0.25$;流体密度 $\rho_b = 1.226 \text{ kg/m}^3$,动力粘性系数 $\mu = 18 \times 10^{-6} \text{ Pa}$,流场高度 $H = 800 \text{ mm}$;质量比 $\alpha = 0.78$,平行来流加载到恒定速度 U 。板的支座形式:采用左端铰接右端定向支座固定上下移动,二维建模见图 1 中。

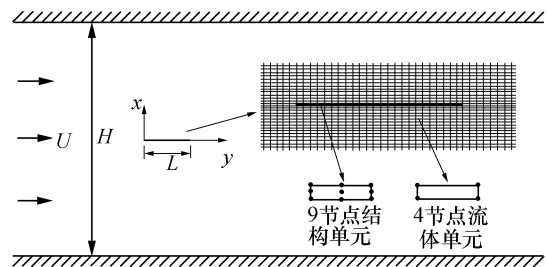


图 1 二维数值模型示意图

Fig.1 The two-dimensional sketch map of numerical model

流场区域及边界条件:本研究的流场计算流场区域如图 1 所示,二维建模且网格采用四边形结构化网格,左边作为进口采用速度入口边界条

件,右端作为出口采用自由出口边界条件;上下槽边为固壁条件;板的上、下面为流-固耦合交界面.

平行双块板模型:平行双板对称平行轴向流布置,间距为 D . 流场高度 $H=D+800$ mm,其他各项物理参数同单块板模型一样.

2 结果分析

2.1 板的流致振动特性

2.1.1 单块板的流致振动特性

当流速小于临界流速(2.85 m/s 左右)时,流体压力差的作用小于板的弹性恢复力的作用,扰动消失后,板将恢复直线平衡状态,直线平衡状态是稳定的.

当流速超过一定值(临界流速)时,流体压力差的作用大于板的弹性恢复力的作用,板将产生更大弯曲,直线平衡状态是不稳定的.板结构产生一定的静位移,并在流域中保持稳定.流速-挠度曲线 Pitchfork 分岔曲线如图2板挠度分岔曲线(II).

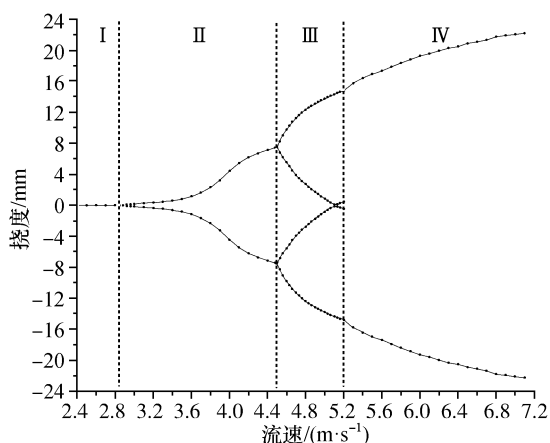


图2 板挠度分岔曲线

Fig.2 Bifurcation curve of the plate deflection

当流速大于 4.48 m/s 的时候,板以流速为 4.48 m/s 流速对应的静位移值的挠度处为中心做极限环振,如图3是流速 5 m/s 下板中点的振动时程曲线.极限环颤振随着流速的增大,挠度快速增大,板的刚度也随之增大,Hopf 分岔曲线如图2分岔曲线(III);随着流速的加大,处于板初始位置上(下)半部分的振动的振幅跨过板初始位置进入下(上)半部分,Hopf 分岔曲线区域交叉,上下两个极限环振动的区域重叠,相互影响下板以板初始位置为中心极限环振动,在振动过程中受所在区域的振动稳定极限环振动平衡位置的影响,振动过程中有单侧的回振现象,如图4所示

流速 6 m/s 下班中点的时程曲线.Hopf 分岔曲线如图2分岔曲线(IV).

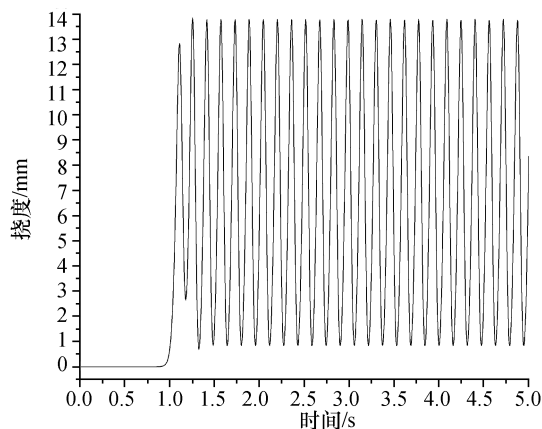


图3 流速 5 m/s 下板中点的振动时程曲线

Fig.3 The plate midpoint vibration time-history curve with flow velocity of 5 m/s

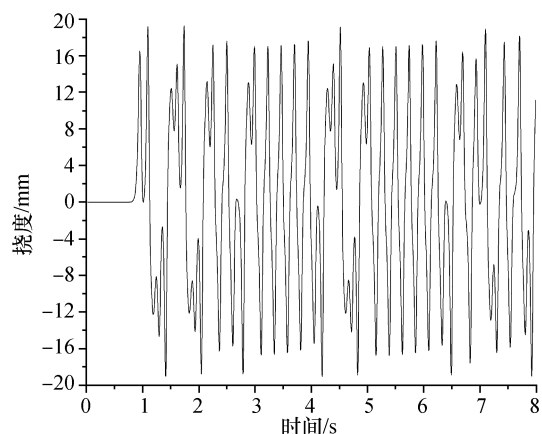


图4 流速 6 m/s 下班中点的时程曲线

Fig.4 The plate midpoint vibration time-history curve with flow velocity of 6 m/s

2.1.2 平行双块板的流致振动特性

本模型为在采用流速为 5 m/s 的情况下,研究平行双块板在不同间距下的振动特性.

当 $D/L=0.15$ 时,平行的两块板在流体流速加载到 5 m/s 过程中相互分离,最后以相对的静位移保持静止,如图 5a 所示.当 $D/L=0.2$ 时,板在开始受到扰动后微微振动,慢慢的振幅变大达到平衡,两板成同相位对称振动,如图 5b 所示.当 D/L 在 0.2 到 0.32 之间时,板的振动也是在开始受流体扰动时两块板异相位开始振动,慢慢的相互影响一段时间后,经过一个或多个拍现象后过渡到同相位振动,如图 5c 所示 $D/L=0.30$ 时的时程曲线.统计数

据有在 D/L 小于 0.32 左右范围内,随着 D/L 的增大静平衡位置的挠度值减小,各块板的振动振幅逐

渐增大,且在此范围内两板以同相位开始振动后,平衡后板最大挠度值都为 16 mm.

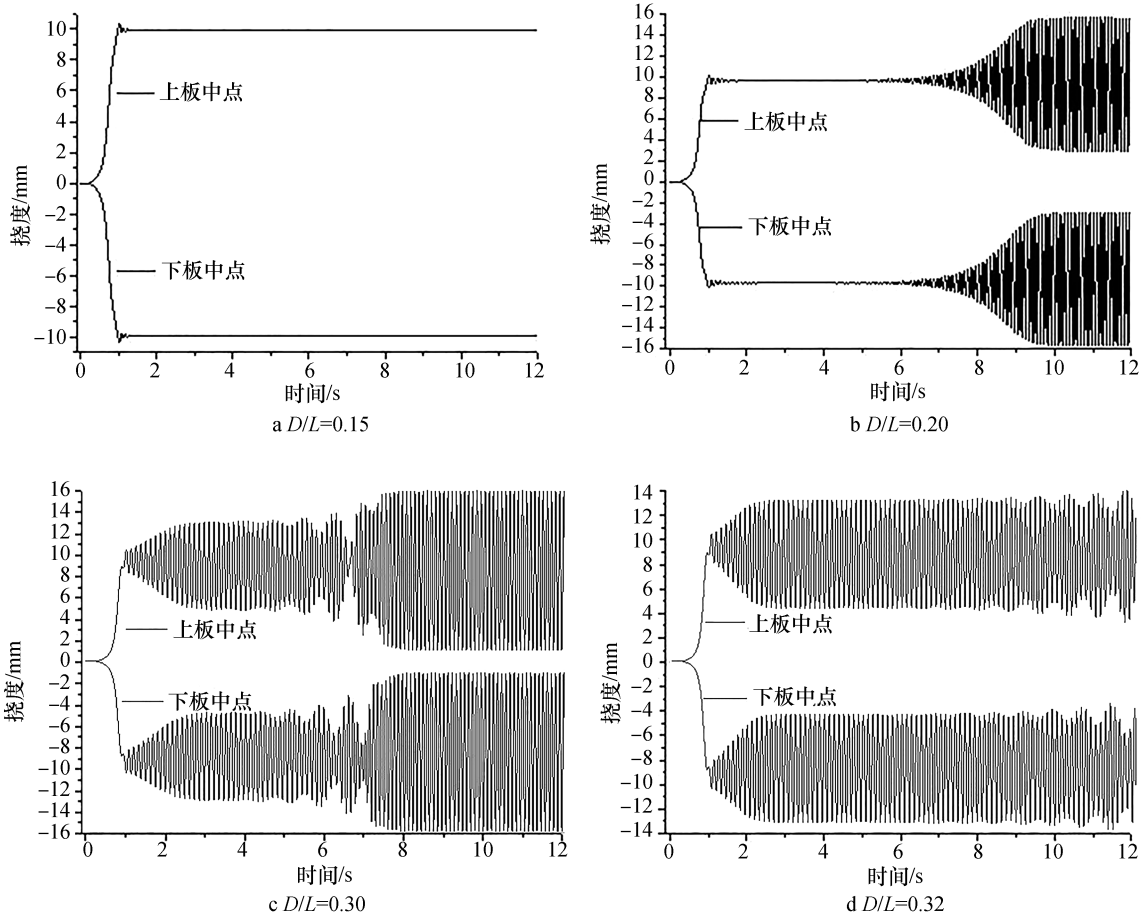


图 5 板中点的振动时程曲线

Fig.5 The plate midpoint vibration time-history curve

当 $D/L=0.32$ 时,板开始异相位振动,一定时间后在平行板振动的相互影响下,两板的振动过程产生拍现象,振动振幅分别此强彼弱,如图 5d.

当 D/L 在 0.32 到 0.6 之间时,两块板始终进行异相位振动,如图 6e 所示 $D/L=0.50$ 时的时程曲线. D/L 值越接近 0.6 时振动一定的时间后也会出现拍现象.统计数据有在 D/L 在 0.32 到 0.6 范围内,随着 D/L 的增大静平衡位置的挠度值减小,各块板的振幅逐渐增大且在此范围内两板以同相位开始振动后,平衡后板最大挠度值相对稍有变化(都接近单块板在流速 5 m/s 下的最大挠度值 14 mm).

当 $D/L=0.6$ 时,板开始异相位振动,一定时间后在平行板振动的相互影响下,两板的振动过程产

生拍现象,振动振幅分别此强彼弱,如图 6f 所示.

当 D/L 在 0.6 到 3.25 之间,两块板开始进行异相位振动,在一定数量的拍节奏后变为同相位振动,如图 6g 所示 $D/L=1.00$ 时的时程曲线.随着两块板之间的 D/L 值在稍大于 0.6 时,从相位振动跨越到同相位的节拍次数迅速减到为一次.且随着 D/L 值的增大,由于板间距的增大,相互影响的作用减弱,两块板在相位转换为同相位的时间越长.统计数据有在 D/L 在 0.6 到 3.4 范围内,随着 D/L 的增大静平衡位置的挠度值减小,各块板的振幅逐渐增大,且在此范围内若两板以同相位开始振动后,平衡后板最大挠度值相对稍有变化(都接近单块板在流速 5 m/s 下的最大挠度值 14 mm).

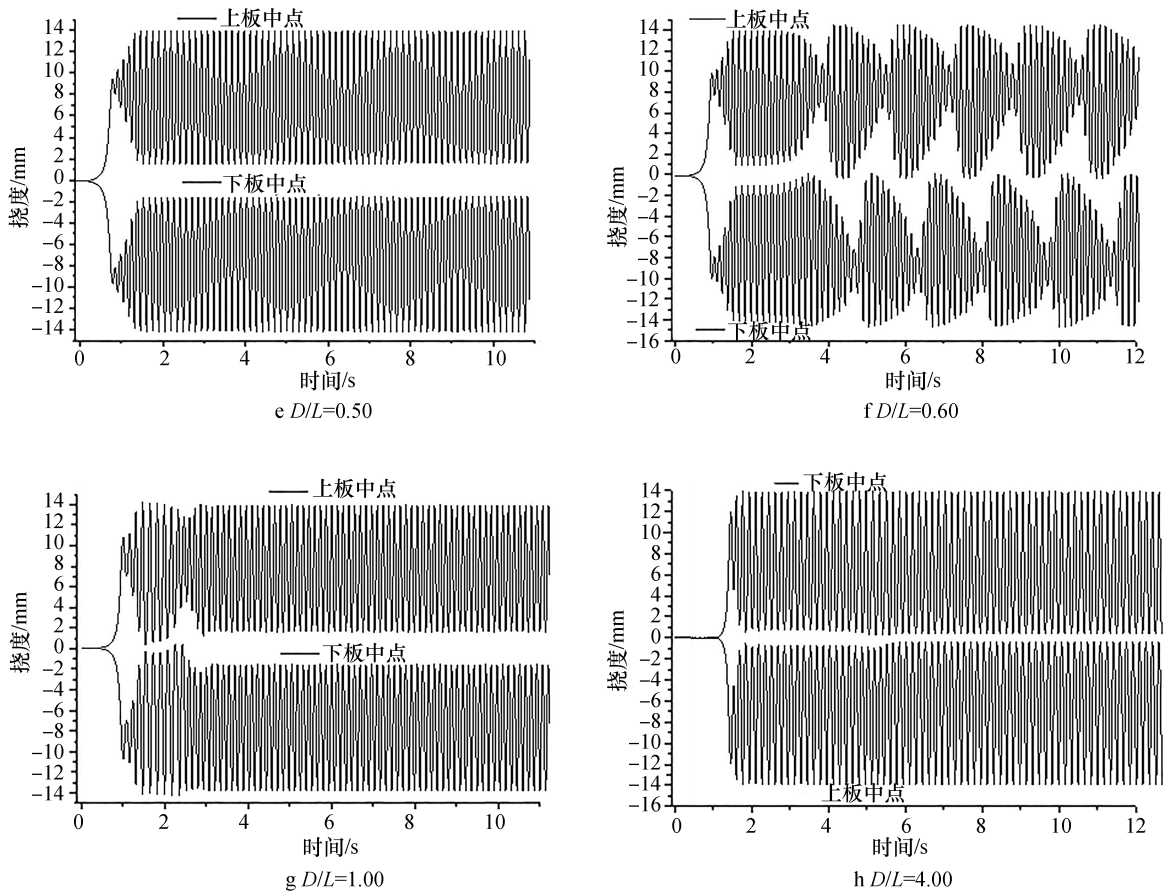


图6 板中点的振动时程曲线

Fig.6 The plate midpoint vibration time-history curve

当 D/L 在大于 3.25 左右后, 两板起始震动方向变为相互靠内侧震动, 开始进行异相位振动, 在一定数量的拍节奏后变为同相位振动, 如图 6h 所示 $D/L=4.00$ 时的时程曲线. 统计数据有在此后随着 D/L 值的增大, 由于板间距的增大, 相互影响的作用减弱, 两块板在相位转换为同相位的时间越长, 直至相互没影响, 各自以单块振动特性振动.

2.2 流场特性

由于速度和压力是流体方程的两个的变量, 涡量是流速的函数, 因此着重分别分析了涡量、压力、速度的变化. 单块板模型中: 当流速增大到图 2 分岔曲线(III)的流速范围时, 流场中流体从阻流体两侧剥离, 板的流场下游的两侧会产生两道并列对称排列的旋涡, 每对旋涡在板振动到改变振动方向的位置脱离, 形成卡门涡街. 旋涡在脱离板后随流速方向下流, 在一定距离后才有侧向偏移, 对应板绕度最大时产生的旋涡的侧向偏移最大. 尾涡的速度和大小及偏移距离都随着流场流速的增大而增大. 流速 5 m/s 下的流场涡量云图如图 7 所示; 随着流速的增大, 处于图 2 分岔曲线(IV)

的流速范围时, 板的流场下游的两侧会产生两道非对称和并列排列的旋涡. 旋涡在脱离板后随流速方向下流, 在一定距离后才有侧向偏移, 对应板绕度最大时产生的旋涡的侧向偏移最大.

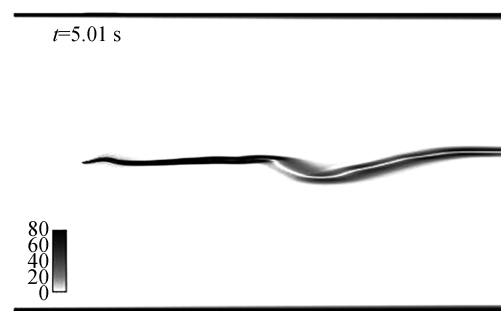


图7 流速 5 m/s 下的涡量云图

Fig.7 The vorticity cloud diagram with flow velocity of 6 m/s

流速 6 m/s 下的流场涡量云图如图 8 所示. 平行双块板模型中: 与单块板振动效应类似, 两块板各自振动效应产生的旋涡在脱离板后随流速方向

流动,在一定距离后才有侧向偏移,对应板绕度最大时产生的漩涡的侧向偏移最大.如图 $9D/L = 1.0$,流速 5 m/s 下的涡量云图.

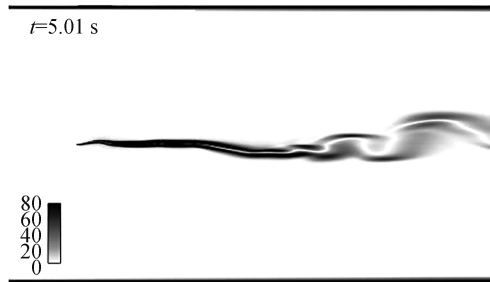


图8 流速 6 m/s 下的涡量云图
Fig.8 The vorticity cloud diagram with flow velocity of 6 m/s

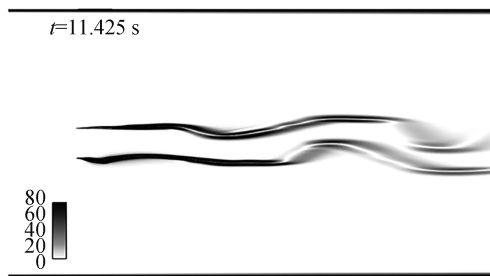


图9 $D/L=1.0$,流速 5 m/s 下的涡量云图
Fig.9 $D/L=1.0$,the vorticity cloud diagram with flow velocity of 6 m/s

3 结论

本文对轴向流中简支弹性薄板的大挠度流固耦合系统进行了数值模拟,得出了如下结论:

1) 在简支板系统中当流速较小时,板处于稳定的直线平衡状态.当超过临界流速时,板的挠度有确定的值,产生随遇平衡;随着流速增大,在单

一振动区域内的极限环振,以及跨两个平衡振动区域的振动反应.探究了特定流速下不同间距的平行板振动特性.

2) 分别通过对涡量、压力及流速三者的云图分析,在流场下游形成卡门涡街,涡街根据简支板所振动的区域不同存在并列或错位排列的区别.直观形象的反应了流固耦合系统之间的相互交互作用.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 鲁丽.非线性板状结构流固耦合复杂响应研究[D].成都:西南交通大学,2006.
- [3] Bein T,Friedmann P,Zhong X,et al.Hypersonic flutter of a curved shallow Panel with aerodynamic heating [C]//Proceeding of the 34th AIAA/ASME Adaptive Structure Forum,La Jolla CA,USA,1993:19-22.
- [4] 朱洪来,白象忠.流固耦合问题的描述方法及分类简化准则[J].工程力学,2007,24(10):92-99.
- [5] 程志远,李黎,龙晓鸥,等.移动网格技术在计算流体动力学数值仿真中的应用[J].重庆大学学报,2013,36(2):96-101.
- [6] Zhao W S,Païdoussis M P.Theoretical and experimental investigations of the dynamics of cantilevered flexible plates subjected to axial flow[J].Journal of Sound and Vibration,2012,331(3):575-587.
- [7] 崔振东,唐益群,郭长青.叠层板状结构在非线性支承下的流固耦合振动[J].西北地震学报,2007,29(2):119-122
- [8] 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(1/2):97-115.