

# 内嵌流体柔性板的流体自适应减振机理数值分析

王建伟, 徐晖, 季聪, 徐立勤

(西安交通大学强度与振动教育部重点实验室, 710049, 西安)

**摘要:** 基于内嵌流体自适应减振理论, 对内嵌流体柔性板在一、二阶固有频率定频激励作用下的流体运动减振效果进行了数值研究. 通过对内嵌流体柔性板的振动分析, 将其转化为活动边界流体动力学模型. 对不同模型进行仿真分析, 揭示出封闭腔内流体运动的规律以及流体与板的力学相互作用特性, 特别是流体运动的峰特征和自适应现象. 提出了流体运动能耗量化准则, 从能耗的角度阐明了内嵌流体单元运动减振的有效性以及自适应特性, 并以此为标准对不同情况下的流体运动减振效果进行了评价.

**关键词:** 内嵌流体柔性板; 自适应减振; 能耗量化准则; 内嵌流体单元

**中图分类号:** O351.2; O328 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)05-0612-05

## Numerical Analysis of Self-Adaptive Vibration Suppression for Flexible Plate with Imbedded Fluid Subsystem

WANG Jianwei, XU Hui, JI Cong, XU Liqin

(MOE Key Laboratory for Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Based on the method of self-adaptive vibration suppression with interior inlay viscous fluid unit (IVFU), the effect and mechanism of a flexible plate with imbedded fluid subsystem (PIFS) under specific steady sinusoidal excitations are investigated via numerical simulations. By analyzing the vibration of the flexible plate, a pure hydrokinetic model with dynamic boundary conditions simplified from the original liquid-solid coupling model is obtained. Several simplified models are evaluated numerically, and the results show the fluid movement rule in the closed cavity, and the characteristics of fluid-plate interaction, especially the peak and self-adaptive phenomena. In order to illustrate the inherent mechanism and effectiveness of vibration suppression due to the fluid movement from energy dissipation viewpoint, a quantitative criterion of energy dissipation is proposed, which serves as a standard to appraise effects of vibration suppression in different cases.

**Keywords:** flexible plate with imbedded fluid subsystem (PIFS); self-adaptive vibration suppression; energy dissipation criterion; inlay viscous fluid unit (IVFU)

随着柔性结构在机械、建筑、航空航天等诸多领域得到日益广泛的应用, 消除其有害振动、实现快速平稳运动已成为非常重要的问题<sup>[1]</sup>. 基于此工程背景, 根据仿生学、黏性流体特性和力学原理等, 本课题组提出了内嵌式黏性流体单元自适应减振方法 (IVFUM), 在此方向上, 深入研究了带有附加质量

的柔性机械臂系统非线性动力学特性<sup>[2]</sup>; 建立了碰撞阻尼器力学模型对内嵌固体质量块的柔性梁模型进行分析<sup>[3-4]</sup>, 并针对碰撞间隙等参数进行了优化; 在内嵌流体单元研究方面, 对平槽、斜槽内嵌流体欧拉梁进行了仿真分析, 得到了相应的流体运动响应状况<sup>[5-6]</sup>. 本文在上述研究的基础上, 对内嵌流体柔

性板(PIFS)的一、二阶定频激励响应进行了分析,系统地研究了流体运动规律以及相应的力学特性,并提出了判定流体运动减振效果的能耗量化准则。

## 1 柔性板流体动力学模型

实际模型如图1所示,为一内部开有封闭空腔的铝质悬臂柔性板,为了实现其低频、低刚度、柔性化,板的正、反面非空腔部位均进行了挖空(图中画×处)。安装在板固定端处的激振器对板实施定频激励(如图2所示),所采用的激振频率为该内嵌流体柔性板的一、二阶固有频率。显然,这是一个典型的流固耦合模型。由于流体质量相对于铝质板来说较小( $\leq 3\%$ ),实验证明,耦合系统在其一、二阶固有频率定频激励下的稳态响应和空板的稳态响应相似,只是因为流体运动吸收能量的作用导致响应的幅值变小。因此对流体而言,可把板与流体的交界面处理为活动边界,其运动规律设定为空板的主振型,在理论上将流固耦合问题近似地转化为活动边界流体动力学问题进行处理。由于柔性板结构的复杂性,无法从理论上得到主振型解析解,因此本文先采用 ANSYS 软件对柔性板进行模态分析,得出一、二阶主振型数值解,而后采用最小二乘法对数值解进行数据拟合,得到主振型表达式为

$$S_k(x, t) = B_k U_k \sin(2\pi f_k t) \quad (1)$$

式中:  $B_k$  为振幅响应系数;  $U_k$  为主振型;  $k=1, 2$ 。

利用 ANSYS 对柔性板进行模态分析,由分析结果可知,板的一阶主振型形态为沿板长度方向上的抛物线型,而沿板宽度方向并无变化,故根据对称性,可将三维流场问题简化为二维问题进行分析(见图3)。针对数值解进行拟合,得板的一阶主振型近似表达式为

$$U_y(x) = -0.4781 \cos(\beta x) + 1.0975 \sin(\beta x) +$$

$$0.6352 \cosh(\beta x) - 0.0731 \sinh(\beta x) \quad (2)$$

式中:  $\beta = 1.875/0.166 = 11.2952$ 。将内嵌流体柔性板的一阶固有频率( $f_1 = 138 \text{ Hz}$ )作为活动边界振动频率,不同的振幅响应系数代表不同的激振强度。柔性板的二阶主振型是关于板中线的反对称形状,图4为简化的二阶活动边界流体动力学模型。以二阶主振型作为流体活动边界,考虑接口程序编制和计算精度,以中线为对称轴将板的  $xoy$  平面划分为16个呈反对称的区域,针对不同区域进行多项式拟合,方法与一阶类似,在此不再赘述。柔性板的二阶固有频率  $f_2 = 320 \text{ Hz}$ 。

## 2 流体运动减振机理分析

### 2.1 一阶计算结果及分析

内嵌流体柔性板(1/2 体积水)在一阶定频激励下的流体运动计算结果如图5、图6所示。

2.1.1 一阶壁面压力分析 从计算结果可以看出,一阶定频激励下流体的运动规律表现出峰特征,即在板自由端振幅最大的地方流体运动剧烈、混乱,呈现出沸腾现象。这种剧烈的流体运动,表征流体具有强烈吸收能量的能力,从而使板的振幅降低。仿真结果显示,封闭腔内的流体区域可划分为非能耗区、过渡区和能耗区(见图5),其中能耗区是流体运动减振的主要工作区域。进一步比较 1/2 体积水在不同振动强度下的自由液面形状可知,能耗区随振动强度增加而变宽,更多的流体参与运动耗能。

考虑二维模型细长的特点以及数据的可操作性,决定沿板长度方向每 6 mm 作为一个单位,把该段长度上流体对壁面  $y$  方向作用的合力积分为其中间位置的集中力  $F_y$ 。下面以  $B_1 = 0.001$  时的计算结果为例,说明在不同区域  $F_y$  的变化规律。

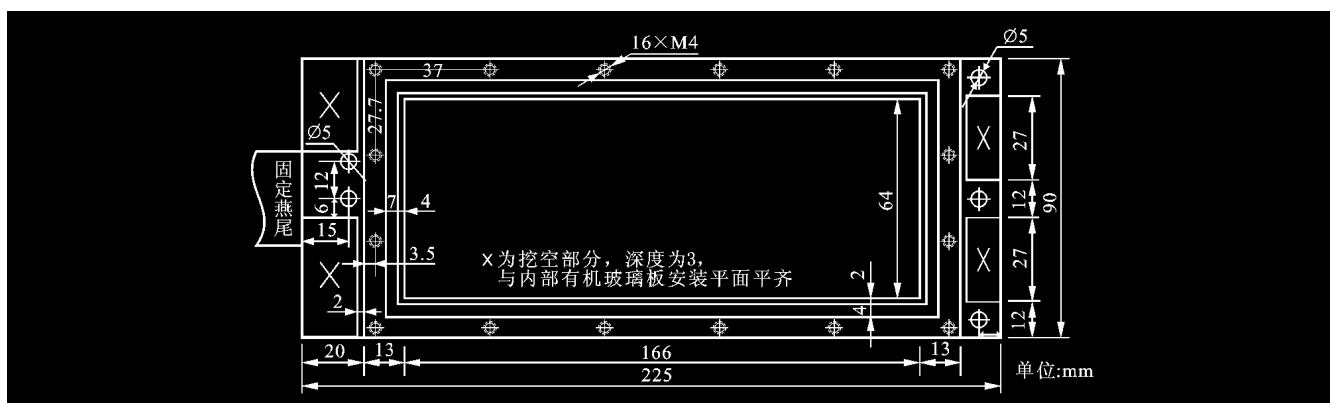


图1 柔性板结构图

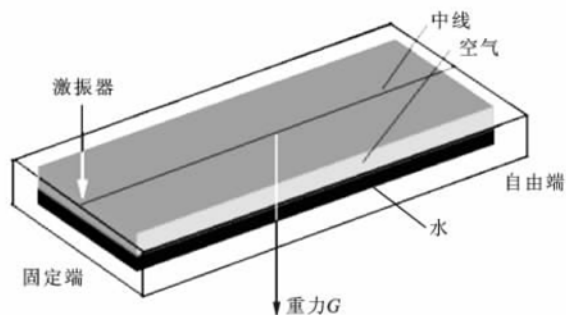


图2 柔性板定频激励示意图

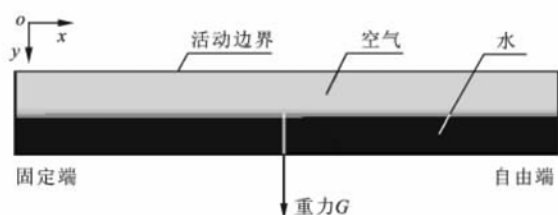


图3 一阶二维活动边界流体动力学模型

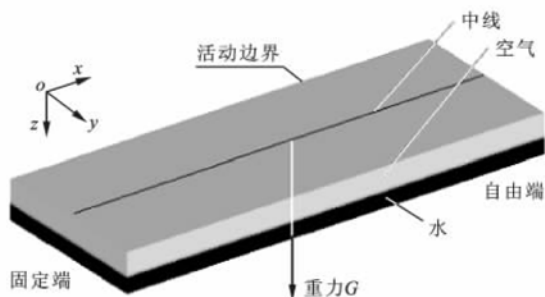


图4 二阶三维活动边界流体动力学模型

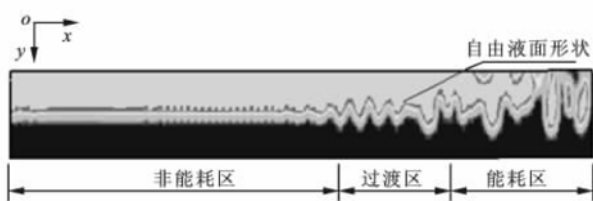
图5  $B_1=0.000\ 5$ 时的自由液面形状(第6周期末)图6  $B_1=0.001$ 时的自由液面形状(第6周期末)

图7~图9揭示在3个区域内  $F_{yi}$  随时间的变化规律。在非能耗区,  $F_{yi}$  曲线是标准正弦曲线, 并和相应的壁面位移曲线  $S_{yi}$  完全同步,  $F_{yi}$  的平均值并非为0, 而是流体对下底边的静压; 在过渡区,  $F_{yi}$  曲

线为近似正弦曲线, 相对于非能耗区, 该曲线的峰值出现明显的高低波动, 但在相位上仍然和位移曲线同步; 在能耗区,  $F_{yi}$  曲线相对于标准正弦曲线来说出现了明显的抖动、毛刺等现象, 这是流体在能耗区的剧烈运动造成的, 但在宏观上有明显周期特性。

2.1.2 流体运动减振能耗分析 由于简化模型无法直接得到柔性板响应幅值的变化情况, 故采用能量耗散作为流体运动减振的量化判定标准, 并利用它比较内嵌 1/2 和 2/3 体积水时的运动减振作用。由前面的结果可知, 能耗区的  $F_{yi}-t$  曲线虽不是严格意义上的周期函数, 但它在宏观上具有明显的周期特性。基于此特性, 同时兼顾数据稳定性(流体运动充分激起)和计算时间等因素, 取第6周期内的流体运动能量耗散  $W_i$  (流体做功) 作为实际量化判定指标。计算公式如下

$$W_i = \int_t^{t+T} F_{yi}(t) v_i(t) dt \approx \sum_t^{t+T} F_{yi}(t) v_i(t) \Delta t \quad (3)$$

式中:  $v_i(t) = 2\pi f_1 B_1 (-0.478 \cos \beta x_i + 1.0975 \sin \beta x_i + 0.635 \cosh \beta x_i - 0.073 \sinh \beta x_i) \cos(2\pi f_1 t)$ ,  $f_1 = 138 \text{ Hz}$ ,  $x_i = 0.007 + 0.006(i-1)$ 。

由图10可知, 在同样的振动强度下, 2/3 体积水的  $F_{yi}$  值要大于 1/2 体积水的  $F_{yi}$  值, 但由图11可知, 在  $F_{yi}$  一周期内做功(即流体运动耗能)方面, 1/2 体积水却优于 2/3 体积水, 即 1/2 体积水在流体运动减振效果上优于 2/3 体积水。经过分析认为, 产生这种规律的原因是: 2/3 体积水具有体积重量优势, 故对腔壁作用力较大, 但是在相同的振动强度下, 2/3 体积水的运动剧烈程度却不如 1/2 体积水的, 虽然相对而言前者有更多的流体参与了运动减振, 但其运动剧烈程度的不足抵消了它的体积重量优势, 故 2/3 体积水总的运动减振效果不如 1/2 体积水。这一分析与实验结果相符。

## 2.2 二阶计算结果及分析

内嵌流体柔性板(1/2 体积水)在二阶定频激励下流体运动的计算结果如图12、图13所示。

2.2.1 二阶壁面压力分析 从计算结果可以看出, 二阶定频激励下流体运动出现了很强的自适应特征, 流体向振动强度最大处(即运动呈反对称的自由端2个角点)聚集(见图12), 并且形成对称的2个扇形区域, 随激振强度增加扇形区域扩大。与一阶分析结果相比, 二阶激励并未出现剧烈的流体运动区。

考虑到模型的特点和数据的可操作性, 将柔性板的  $xoy$  平面划分为  $6 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  的四边形区域共计  $27 \times 16$  个(上、下2个平面均作同样操作), 将

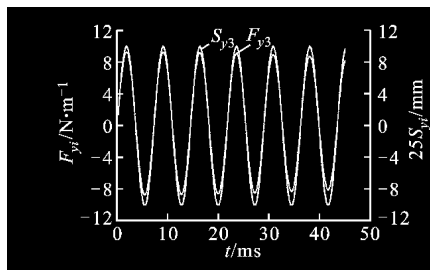


图7  $F_{y3}$  随时间的变化规律  
(非能耗区)

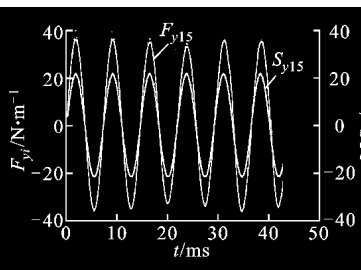


图8  $F_{y15}$  随时间的变化规律  
(过渡区)

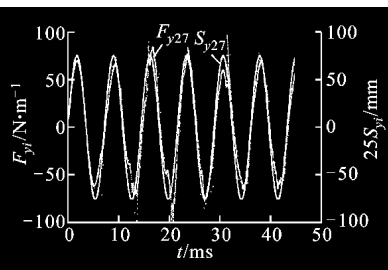


图9  $F_{y27}$  随时间的变化规律  
(能耗区)

每个区域中流体对壁面的 $z$ 向作用力等效为作用在该区域中心的集中力 $F_{z(i,j)} (1 \leq i \leq 27; -8 \leq j \leq 8)$ . 下面以 $B_2 = 0.000\ 5$ 时 $1/2$ 体积水的计算结果为例,说明 $F_{z(i,j)}$ 在典型位置的变化规律.

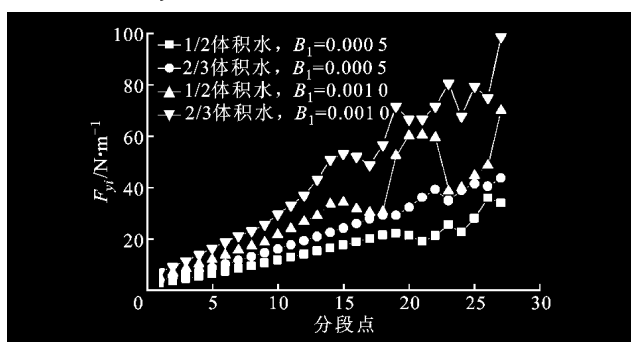


图10 5.25周期时刻 $F_{y_i}$ 沿梁长度方向的变化规律

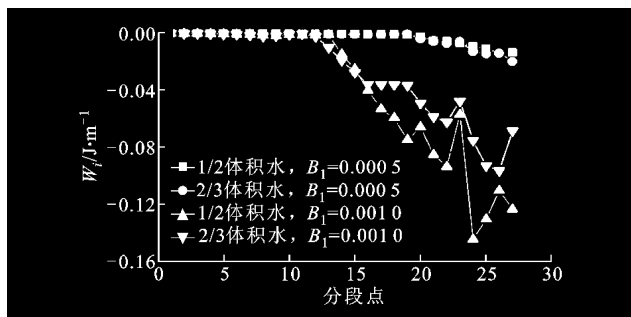


图11  $F_{y_i}$ 在第6周期内所做功 $W_i$ 的变化规律

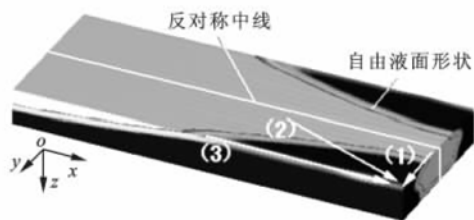


图12  $B_2 = 0.000\ 5$ 时的自由液面形状(第12周末)

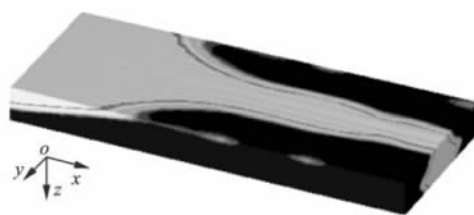


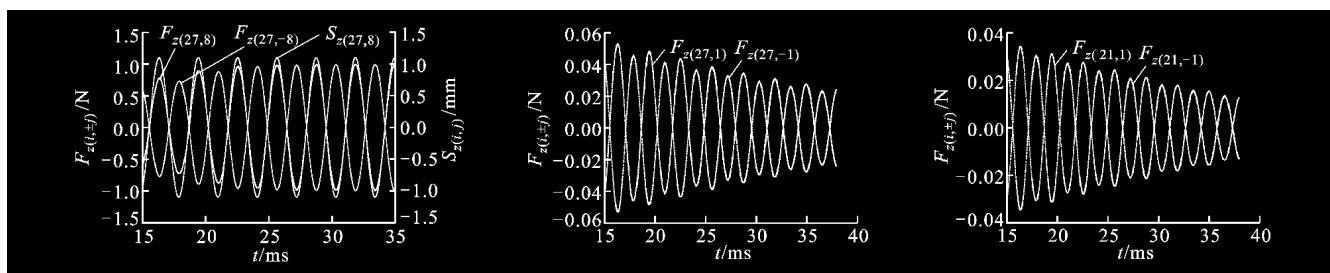
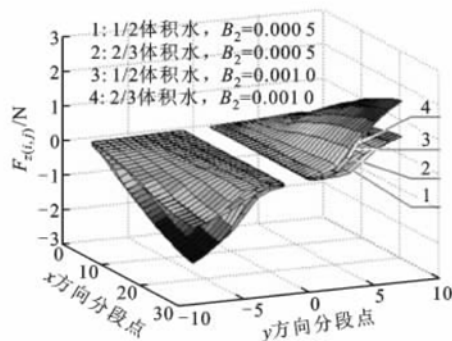
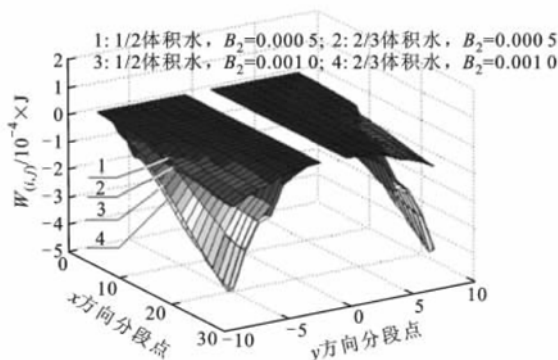
图13  $B_2 = 0.001$ 时的自由液面形状(第12周末)

图14中 $F_{z(27,\pm 8)}$ 的变化规律反映流体随时间向2个振动强度大的角点聚集的过程,是流体自适应特性的体现: $F_{z(27,\pm 8)}$ 变大,并在流体充满角点区域时达到幅值稳定.图15、图16则反映流体从所在位置流走的过程, $F_{z(27,\pm 1)}$ 、 $F_{z(21,\pm 1)}$ 的幅值逐渐变小并趋稳定.结合图12的自由液面形状可以很明显地看出,流体沿路线(1)的自适应过程最强,路线(2)次之,路线(3)则没有,这是因为流体自适应流动与振动强度梯度密切相关,路线(1)的梯度最大,故自由端横截面上的流体自适应现象最明显(自适应现象是指流体在一、二阶共振激励下自动地向振动大处集结的现象,最早在柔性梁实验中被观察到).

**2.2.2 流体运动减振能耗分析** 从流场数据稳定考虑,取第12周期 $F_{z(i,j)}$ 做的功 $W_{(i,j)}$ 作为二阶激励下流体运动减振的判定指标.图17为 $F_{z(i,j)}$ 在11.25周期时刻的分布规律,表现了 $F_{z(i,j)}$ 的幅值特性.通过公式(3)计算出整个 $xoy$ 平面各点所做的功,得到如图18所示的能耗曲面.从这2个图中可以看出:在相同激励强度下,2/3体积水由于存在体积重量优势,故在 $F_{z(i,j)}$ 的幅值上较1/2体积水稍大(见图17);在 $F_{z(i,j)}$ 做功(流体运动耗能)方面,仍是2/3体积水的稍大一些(见图18),但该值的量级较小,这一结果与一阶激励时的分析结果不同.产生这种情况的原因是,在二阶激励下流体运动具有显著的自适应性,即向以角点为中心、振动强度大的扇形区域聚集,这使原本应该出现在该区域的流体剧烈运动缺乏相应的运动空间,而扇形区域以外的地方又缺乏足够的振动强度,故整体区域均没有出现流体剧烈运动,在这种情况下体积重量优势使得2/3体积水的 $F_{z(i,j)}$ 所做的功(能耗)相对大一点,但总体来说二阶激励下流体的减振效果没有一阶激励时明显.

### 3 结 论

通过仿真分析得到了封闭腔内的流体运动规律:在一阶定频激励下流体运动出现峰特征,在柔性

图 14  $F_{z(27,\pm 8)}$  随时间的变化规律图 15  $F_{z(27,\pm 1)}$  随时间的变化规律图 16  $F_{z(21,\pm 1)}$  随时间的变化规律图 17 11.25 周期时  $F_{z(i,j)}$  的分布规律图 18  $F_{z(i,j)}$  第 12 周期所做功  $W_{(i,j)}$  的变化规律

板自由端振动强度最大处,流体运动呈现出剧烈的沸腾现象;在二阶激励情况下,流体运动表现出很强的自适应性,随响应时间延长,流体向振动幅值最大处(即运动呈反对称的板自由端 2 个角点)聚集,形成对称的 2 个扇形区域,随激振强度增加扇形区域扩大。通过对一阶激励时自由液面形状、流体对壁面作用力和流体运动耗能方面的分析,得出了作用力随时间的变化曲线在各个区域的特征。二阶激励下的仿真结果显示流体的自适应特性。由于活动边界流体动力学简化模型无法直接得到柔性板响应幅值的减振情况,本文提出以能量消耗作为新的流体运动减振效果评判准则。利用该准则判定一阶固有频率定频激励下的流体运动具有显著的减振效果,并且发现:柔性板内嵌 1/2 体积水时的运动减振效果明显优于内嵌 2/3 体积水时的减振效果;内嵌流

体在二阶激励下的运动减振效果较一阶激励时的差,但具有很好的自适应特性。

#### 参考文献:

- [1] 黄文虎,王心清,张景绘,等. 航天柔性结构振动控制的若干新进展[J]. 力学进展,1997,27(1):5-18.  
HUANG Wenhui, WANG Xinqing, ZHANG Jinghui, et al. Some advances in the vibration control of aerospace flexible structures [J]. Advances in Mechanics, 1997,27(1):5-18.
- [2] 阎安志,徐晖,成建联,等. 柔性机械臂振动抑制的混合控制[J]. 应用力学学报,2004,21(4):62-66.  
YAN Anzhi, XU Hui, CHENG Jianlian, et al. Hybrid control scheme for vibration suppression of a flexible manipulator [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2004,21(4):62-66.
- [3] CHENG Jianlian, XU Hui. A research on nonlinear dynamic characteristic of vibro-impact system under harmonic excitation [J]. Journal of Materials and Structures, 2006,1(2):247-266.
- [4] CHENG Jianlian, XU Hui, YAN Anzhi, et al. Using inner mass impact damper for attenuating structural vibration and experimental research [C]//Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics. New York, USA: Science Press USA Inc., 2005:1016-1022.
- [5] 黄志祥,徐晖,徐立勤. 具有内嵌黏性流体的欧拉梁自适应减振模式研究[J]. 西安交通大学学报,2006,40(9):1099-1103.  
HUANG Zhixiang, XU Hui, XU Liqin. Adaptive vibration suppression mode for Euler beam with interior inlay viscous fluid [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(9):1099-1103.
- [6] ZHANG X, LI J, XU H, et al. Numerical study of self-adaptive vibration suppression for flexible structure using interior inlay viscous fluid unit method [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 297(3/4):627-634.

(编辑 葛赵青)