

颗粒阻尼器结构振动特性耦合算法仿真与试验*

夏兆旺¹ 温华兵¹ 刘献栋²

(1. 江苏科技大学能源与动力工程学院, 镇江 212003; 2. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191)

【摘要】 颗粒阻尼技术中,颗粒与颗粒、颗粒与孔壁之间的碰撞和摩擦使得颗粒阻尼器具有高度非线性。为此,提出一种能够对颗粒阻尼器的减振性能进行快速预测的仿真算法——离散元-有限元耦合算法,并进行了试验验证,基于该算法研究了颗粒阻尼器的各参数对减振性能的影响规律。试验与仿真结果表明:耦合算法是有效的;影响颗粒阻尼器减振性能的主要参数是填充率和颗粒密度。

关键词: 颗粒阻尼 振动特性 非线性 耦合算法

中图分类号: O328; TB53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)08-0026-04

Coupling Algorithm Simulation and Experiment of Structure Vibration Characteristics for Particle Dampers

Xia Zhaowang¹ Wen Huabing¹ Liu Xiandong²

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China

2. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract

The performance of particle damper is strongly nonlinear. The collisions and friction were existed between particles and particles, particles and cavity walls. A coupling simulation algorithm based on the combination of the discrete element method and the finite element method was presented to calculate the response of system with particle dampers. Comparison between the analytical and experimental results showed that simulation of the response of a cantilever plate with a particle damper was accurate. It showed that the response of the cantilever plate depended on the mass-fill ratio and particle density of the particle damper.

Key words Particle damping, Vibration characteristics, Nonlinear, Coupling algorithm

引言

颗粒阻尼减振器是含有颗粒的腔体结构,在腔体中填入一定数量的颗粒,结构发生振动时,利用颗粒之间以及颗粒与孔腔壁之间的摩擦、碰撞进行能量耗散与转换,从而降低结构的振动幅值。通常采用铁、铅、钨、铝等金属材料颗粒,因此,在恶劣的温度环境仍具有良好的减振效果,且具有抗老化、低成本、噪声小、减振频带宽等优点^[1~4]。此外,颗粒阻尼器不需要对原结构外形尺寸进行大的改动。因此在汽车及普通机械产品中具有广泛的工程应用前

景,国内外均已开展了颗粒阻尼器在减振方面的应用研究^[5~7]。

提出离散元-有限元耦合算法,以充分发挥有限元法计算连续结构振动的优势和离散元法计算颗粒运动的优势。并对提出的耦合算法进行试验验证,通过仿真算法研究各参数对颗粒阻尼器减振效果的影响规律。

1 颗粒运动方程

离散元法的原理和计算过程是根据单元间力的相互作用和牛顿运动定律,采用动态松弛法进行循

收稿日期: 2010-09-13 修回日期: 2010-11-10

* 上海交通大学海洋工程国家重点实验室开放基金资助项目(1005)和航空科学基金资助项目(2007ZB51025)

作者简介: 夏兆旺,讲师,博士,主要从事振动与噪声控制研究,E-mail: dlxzw@163.com

环迭代计算,在每一个时步都更新单元的位置,并遍及整个单元集合。通过对系统中每个单元的微观运动过程进行跟踪研究,考虑每个单元对结构系统的作用力,即可得到整个系统的宏观运动规律。对于球形单元在任意坐标轴、任意时刻 t ,考虑每一单元受力作用后产生的平动和转动。由牛顿第二定律得到

$$\begin{cases} \ddot{x}_i(t) = \partial \dot{x}_i(t) / \partial t = \left(\sum F(t) \right)_i / m_i \\ \ddot{\theta}_i(t) = \partial \dot{\theta}_i(t) / \partial t = \left(\sum M(t) \right)_i / I_i \end{cases} \quad (1)$$

式中 $x_i(t)$ ——平动位移 $\sum F(t)$ ——合力
 m_i ——质量 $\theta_i(t)$ ——角位移
 $\sum M(t)$ ——合力矩 I_i ——转动惯量

由中心差分法可得 $t + \Delta t/2$ 时刻颗粒的加速度和速度为

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t + \Delta t/2) = \dot{x}_i(t - \Delta t/2) + \frac{\left(\sum F(t) \right)_i}{m_i} \Delta t \\ \dot{\theta}_i(t + \Delta t/2) = \dot{\theta}_i(t - \Delta t/2) + \frac{\left(\sum M(t) \right)_i}{I_i} \Delta t \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_i(t + \Delta t/2) = x_i(t) + \dot{x}_i(t + \Delta t/2) \Delta t \\ \theta_i(t + \Delta t/2) = \theta_i(t) + \dot{\theta}_i(t + \Delta t/2) \Delta t \end{cases} \quad (3)$$

这样,经过 Δt 后单元 i 就移动到一个新的位置,并产生新的接触力和接触力矩,计算其所受的合力 $\sum F(t + \Delta t/2)$ 和合力矩 $\sum M(t + \Delta t/2)$ 后返回式(2)计算,重复这一过程,即可得到每个单元以及整个颗粒群体的运动特性。

2 颗粒接触力学模型

在计算颗粒间的接触关系时,只考虑法向和切向接触力,因为颗粒接触面积很小,由两球球心方向相对转动引起的力矩可忽略不计。颗粒单元之间的接触可以简化为弹簧-阻尼器-滑块模型,如图 1 所示。

赫兹公式只适用于无摩擦的弹性接触,所以,它只能对颗粒接触的法向力进行计算。赫兹粘弹性模型^[8]表示的法向力为

$$F_n = k_n \delta_n^{\frac{3}{2}} + c_n v_n \quad (4)$$

式中 k_n ——法向刚度系数 δ_n ——叠合量
 c_n ——法向阻尼系数
 v_n ——法向相对速度

如果法向位移恒定,法向力和接触面半径都将保持不变,则切向力随实际的切向位移而变。但法

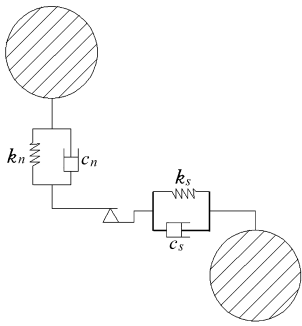


图 1 颗粒接触模型

Fig. 1 Particle contact characteristics showing contact stiffness and contact damping

向位移与切向位移往往同时发生变化,此时可以通过切向的位移增量与力增量间的关系得到切向力,其粘弹性力学模型为

$$F_s(t) = F_{ns}(t - \Delta t) + k_s v_s \Delta t + c_s v_s \quad (5)$$

式中 k_s ——切向刚度系数
 v_s ——切向速度
 c_s ——切向阻尼系数

切向力还需满足库仑定律,即

$$F_s = \begin{cases} F_s(t) & (F_s(t) < \mu F_n) \\ -\mu F_n & (F_s(t) \geq \mu F_n) \end{cases} \quad (6)$$

3 颗粒接触时步

在计算中,时步必须取得很小,以保证在一个时步内每个颗粒的动量只能传播给其临近的颗粒,并且颗粒加速度近似恒定。实际中,通常根据瑞利波的传播特性确定时步。根据瑞利波沿着颗粒表面的传播速度^[9]得到临界时间步长为

$$\Delta t = \frac{\pi R_{\min}}{0.1631\gamma + 0.876605} \sqrt{\frac{\rho}{G}} \quad (7)$$

式中 $R_{\min}$ ——颗粒最小半径 ρ ——颗粒密度
 γ ——泊松比 G ——剪切模量

4 有限元-离散元耦合算法

针对带颗粒阻尼器结构振动特性,将擅长计算复杂连续结构的有限元法与擅长计算离散颗粒运动的离散元法结合起来,提出了基于有限元-离散元的耦合仿真算法,用成熟软件 Nastran 计算结构的响应,用自编的离散元算法计算颗粒的响应,其计算流程如图 2 所示,主要通过 Matlab 调用相应的有限元和离散元计算结果进行循环计算。

5 试验验证

试验测试系统和平板叶片如图 3、4 所示。填充颗粒为直径 2 mm 钢球,钢球密度为 7 800 kg/m³,填

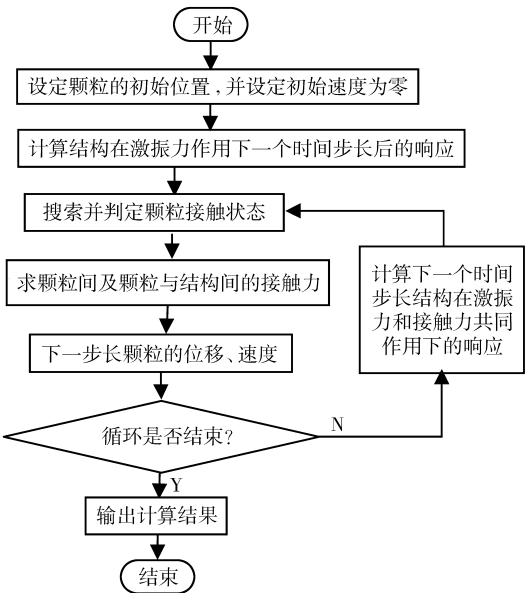


图2 仿真算法流程图

Fig.2 Flow chart of simulation algorithm

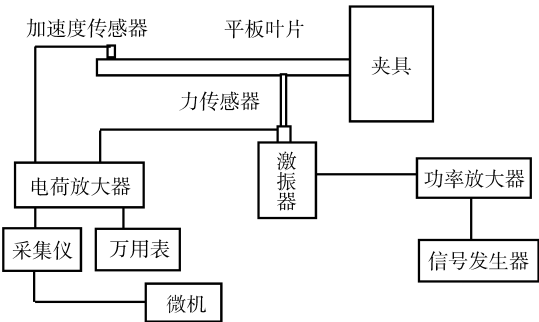


图3 试验测试原理图

Fig.3 Schematic of test

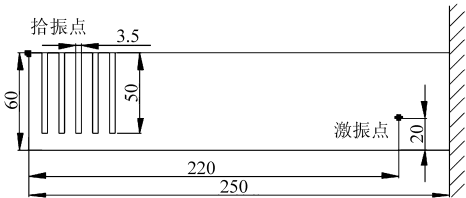


图4 带颗粒阻尼器的平板叶片

Fig.4 Schematic of cantilever plate

充率分别为0%、30%、50%、70%和90%。正弦激振力幅值分别为0.2 N、0.4 N、0.8 N和1.0 N。

平板结构在振幅为0.4 N的简谐激振力作用下,带颗粒阻尼器与不带颗粒阻尼器两种状况时平板结构第一阶响应的仿真结果与试验结果如图5所示。带颗粒阻尼器的颗粒填充率为50%。可以看出:仿真结果和试验结果有很好的-致性,说明颗粒阻尼器在结构共振时有很好的减振效果,所提出的仿真算法是可行、有效的。

6 仿真

试验验证了仿真算法的准确性,为仿真分析各

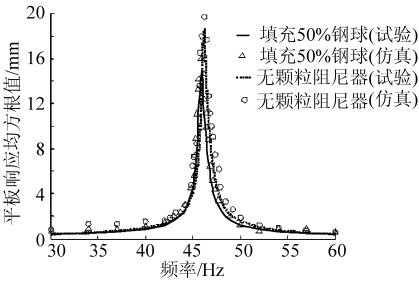


图5 不同激振力频率下仿真与试验结果

Fig.5 Comparison between experimental and calculated results

参数对结构振动特性的影响提供了保障,节省了试验成本。

颗粒密度是影响颗粒阻尼器减振效果的重要因素。由于颗粒阻尼器一般采用金属颗粒,所以本文主要仿真分析密度在400~18 000 kg/m³之间的颗粒材料对减振效果的影响。正弦激振力振幅为1.6 N,平板结构测点响应与颗粒密度的关系如图6所示,从图中可以看出:在其他参数相同时,颗粒密度越大,系统的减振效果越好;同时,仿真计算结果也表明,70%颗粒填充率时的颗粒阻尼器减振效果比30%和50%颗粒填充率的减振效果好。

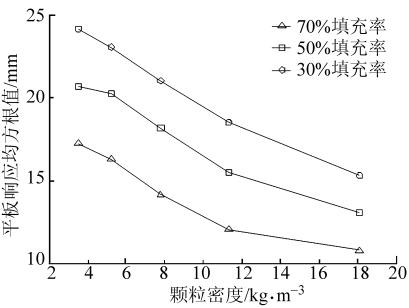


图6 颗粒密度与响应的关系

Fig.6 Influence of the particle densities on the vibration

通过仿真分析研究颗粒填充率对平板结构减振效果的影响,颗粒阻尼器填充颗粒为2 mm钢球,带颗粒阻尼器平板在振幅为1.6 N的正弦激振力作用下的测点响应与颗粒填充率的关系如图7所示。

从图中可以看出:颗粒填充率对平板结构的共振频率影响较小,其主要原因是不同颗粒填充率的颗粒阻尼对系统质量影响不大,同时不会影响系统

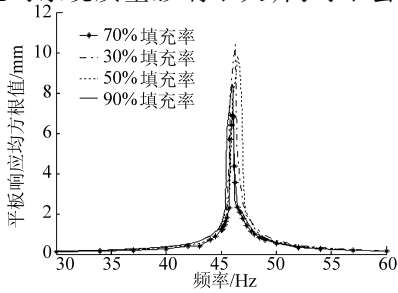


图7 不同填充率时平板的频响曲线

Fig.7 Frequency curves with different mass fill ratios

刚度;在 70% 的颗粒填充率下,颗粒阻尼器的减振效果最好,这与试验结果有很好的 consistency,进一步说明仿真算法是可行的。

7 结束语

提出了一种能够对颗粒阻尼器减振性能进行快

速预测的仿真算法——离散元-有限元耦合算法,并进行了试验验证。结果表明:提出的耦合算法是有效的;影响颗粒阻尼器减振性能的主要参数是填充率和颗粒密度。颗粒密度越大,颗粒阻尼器的减振效果越好。

参 考 文 献

1 Panossian H V. An overview of NOPD: passive damping technique[J]. Shock Vibration, 1991,1(6):4~10.

2 Papalou A, Masri S F. An experimental investigation of particle damper under harmonic excitation[J]. Journal of Vibration and Control, 1998,4(4):361~379.

3 Panossian H V. Structural damping enhancement via non-obstructive particle damping technique[J]. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 1992,114(1):101~105.

4 Simonian S S. Particle beam damper[C]//Proceedings of SPIE Conference on Passive Damping, SPIE, 1995:149~160.

5 Ramachandran S, Lesieutre G. Dynamics and performance of a harmonically excited vertical impact damper[J]. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 2008,130(2):1002~1008.

6 Wu C J, Liao W H, Wang M Y. Modeling of granular particle damping using multiphase flow theory of gas-particle[J]. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 2004,126(2):196~201.

7 Ashley S. A new racket shakes up tennis[J]. Mechanical Engineering, 1995,117(8):80~81.

8 Mishra B K. A review of computer simulation of tumbling mills by the discrete element method: part I—contact mechanics [J]. International Journal of Mineral Processing, 2003,71(1~4):73~93.

9 Rayleigh. On waves propagated along the plane surface of an elastic solid [C]. Proceedings of the London Mathematic Socieity, 1887,17:4~11.

(上接第 40 页)

12 杜瑞成,杨善东,郭志东. 三种覆膜穴播成穴器方案设计与理论研究[J]. 山东理工大学学报:科技版,2003,17(2):15~18.

Du Ruicheng, Yang Shandong, Guo Zhidong. Design and theoretical analysis of three kinds of punch planting indenting tools [J]. Journal of Shandong Unirversity of Technology: Science and Technology, 2003,17(2):15~18. (in Chinese)

13 杜瑞成,郭志东. 舵轮式动定瓣成穴播种器:中国,200910015503.5[P]. 2009-10-07.

14 张泽平,马成林,左春桢. 精播排种器及排种理论研究进展[J]. 吉林工业大学学报,1995,25(4):112~117.

Zhang Zeping, Ma Chenglin, Zuo Chuncheng. The development of the seed-metering device for precision planter and its theoretical study[J]. Journal Jilin University of Technology, 1995,25(4):112~117. (in Chinese)

15 夏俊芳,许绮川,吴一鸣,等. 旱作多功能精密穴播轮成穴机理的研究[J]. 农业工程学报,2001,17(5):11~14.

Xia Junfang, Xu Qichuan, Wu Yiming, et al. Mechanism study of forming sinus and casting seed for multi-functional precision hill-drop sowing wheel for dry land crop[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001,17(5):11~14. (in Chinese)

16 张学军,杨莹,周岭. 滚筒式穴播器的重要参数选择与确定[J]. 农业机械学报,1998,29(增刊):63~65.

Zhang Xuejun, Yang Ying, Zhou Ling. Selection and definitiveness on main pain parameters of bunch planting cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998,29(Supp.):63~65. (in Chinese)

17 聂渤海,付汝杰,王维祥. ZBMG 型滚筒式穴播机设计原理 [C]//中国农业机械学会种植机械专业组,精密播种技术论文集,1983.

18 JB/T 7732.1—2006 铺膜播种机[S].

19 陈学庚,卢勇涛. 气吸滚筒式棉花精量穴播器排种性能试验[J]. 农业机械学报,2010,41(8):35~38.

Chen Xuegeng, Lu Yongtao. Sowing-performance of air-suction cylindrical cotton precision dibbler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(8):35~38. (in Chinese)