

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.01.005

基于 DEM 算法的多颗粒碰撞耗能机理 分析与振动抑制研究

杨 英, 赵西伟, 何 萌

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:针对机械构件主系的封闭空间中填充微小颗粒,进行振动抑制问题,对填充颗粒的尺寸、数量以及材料特性因素对振动抑制效果的影响开展了研究。通过采用离散单元法(discrete element method, DEM),分析了颗粒与颗粒以及颗粒与主系统之间的运动学特性,建立了能够充分表达颗粒在相互碰撞摩擦过程中的受力、变形关系以及耗能计算模型,分析了多个颗粒之间的碰撞与耗能机理,确定了碰撞过程中颗粒的状态、受力及耗能大小的计算求解算法。在 Matlab 环境下,针对不同颗粒材质、数量及大小对系统振动抑制性能进行了仿真分析,得出了颗粒材质大小以及数量对减振性能的影响规律,并通过搭建的试验台,进行了试验数据采集和分析。试验结果与仿真结果相吻合,验证了算法的有效性,该算法为提高机械构件的减振性能设计提供了重要参考。

关键词:颗粒阻尼;离散单元;振动抑制;碰撞与耗能

中图分类号:TH113.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)01-0023-05

Analysis of energy dissipation mechanism and vibration restrain about particles damping based on DEM

YANG Ying, ZHAO Xi-wei, HE Meng

(School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Aiming at the Mechanism main system with closed space which was filled in with tiny particles; vibration control problem was studied by analyzing the vibration control effect which was impact by the particles size number and material characteristic. Discrete element method (DEM) was used to analyze the kinematics characteristic among particles and particles with main system. Calculation models which can represent particles forces distortion and energy dissipation during impact collision and friction were established. The mechanism of collision and energy dissipation among particles was studied. The method which can determine the magnitude of particles state, force and energy dissipation during collision were found. The vibration property which is influenced by the particles material numbers and sizes was demonstrated by using Matlab. The vibration restrains rule was shown which was influenced by size number and material of particles. A test-bed was established. The testing result were identical with the simulation result, which shows that the algorithm is validity, this algorithm can provide an important reference for promoting vibration restrain design of the mechanism.

Key words: particle damping; discrete element method(DEM); vibration restrain; collision and energy dissipation

0 引 言

颗粒阻尼技术是 20 世纪 90 年代振动控制领域新

兴的一种被动减振技术,它主要通过振动体的有限封闭空间中填充微小颗粒,利用微小颗粒之间以及颗粒与阻尼器壁之间的摩擦和冲击作用消耗系统的振动

收稿日期:2016-07-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51205051)

作者简介:杨 英(1962-),女,辽宁沈阳人,博士,教授,博士生导师,主要从事车辆动态特性方面的研究. E-mail: yangyang@mail.neu.edu.cn

能量,从而起到阻尼作用,达到减振的效果。颗粒阻尼技术是一项效果显著且应用广泛的减振降噪技术,阻尼的产生机理在于将机械振动及声振的能量转化为热能或其他可以耗损的能量形式,以此来抑制振动和噪声^[1-3]。目前国内外的大量研究是通过实验,对影响颗粒阻尼效果的因素及其影响规律进行了分析^[5-6],这些影响因素包括阻尼器几何外形、颗粒尺寸颗粒材料以及颗粒之间的摩擦系数等。但由于多颗粒在腔体内的运动状态很难描述,同时颗粒的材质,数量,大小对振动抑制的效果尚不清楚。采用离散单元法分析颗粒的运动状态是目前的研究热点^[7]。

本研究采用 DEM 算法对颗粒阻尼减振机理开展研究,通过建立模型,确定算法流程,采用 Matlab 开展仿真研究,针对不同颗粒材质,数量及大小对减振性能的影响规律进行仿真研究,并通过试验验证算法的有效性。

1 多颗粒碰撞 DEM 建模及能耗计算

离散单元法 (DEM) 是研究不连续体力学行为的一种数值方法^[8],其基本原理是将不连续体分离成刚性单元的集合,利用力和位移的关系及牛顿第二定律建立起每个刚性单元的运动方程,再用动态松弛法迭代求解这些运动方程,从而求得不连续体的整体运动形态。

1.1 颗粒与颗粒的力学接触模型

颗粒间的相互作用如图 1 所示,空间两个球,连接球心的线段分别交球 i 于 p_i 交球 j 于 p_j 点,两球只有当球心距离 D_{ij} 小于两球半径之和时才产生接触,即:

$$D_{ij} < R_i + R_j$$

作用在 i 上的接触力可分为法向和切向分量。接触力的法向分量 f_n 和切向分量 f_t 如下式所示:

$$f_n = k_n \delta_n^{\frac{2}{3}} + c_n \delta_n^{\frac{1}{4}} \dot{\delta} \quad (1)$$

$$f_t = -\frac{\mu f_n \delta_t}{|\delta_t|} \quad (2)$$

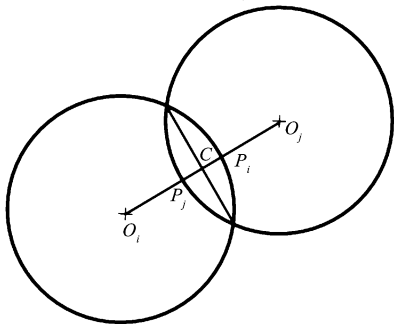


图 1 颗粒间的相互作用

式中: δ_n, δ_t —颗粒 i 的相对于颗粒 j 的法向位移和速度; δ_t —切向速度; c_n, μ —颗粒之间及颗粒和墙壁之间的阻尼常数和摩擦系数; k_n —弹簧弹性系数,如下式所示:

$$k_n = \frac{\sqrt{2R} E_p}{3(1 - \nu_p^2)} \quad (3)$$

式中: E, ν —弹性模量和泊松比;下标 p —指颗粒。

在切线方向,两接触球的摩擦力取决于在接触点处的相对切向运动。当相对切向速度为零时,摩擦力是剪切阻尼力 $\mu_d f_n$ 和动态摩擦力 $\gamma_s \nu_s \sqrt{\delta_n}$ 的最小值:

$$f_s = -\min(|\mu_d f_n|, |\gamma_s \nu_s \sqrt{\delta_n}|) \text{sign}(\nu_s) \quad (4)$$

式中: γ_s —切向阻尼系数; μ_d —动态摩擦系数; $\text{sign}(\nu_s)$ —摩擦力,始终在相对切向速度的相反方向,而且总是引起能量耗散。

主系统与微颗粒相互碰撞,使得主系统将一部分能量传递给微颗粒,这些能量引起了微颗粒之间的相对运动,引起由碰撞前后速度变化所产生的能量损耗^[9-10]。主系统传给微颗粒组合体的能量大部分由于这种机理而损耗掉,其余一部分能量成为微颗粒携带的动能参与下一次碰撞。如果产生了接触,接触点 C 处的相对位移可由相对速度的积分求得。

1.2 能量损耗计算

颗粒阻尼技术亦遵循能量耗散原理,其能耗分为弹性碰撞耗能 and 摩擦耗能。

发生碰撞接触的任意两个颗粒,其弹性碰撞耗能表示为:

$$\Delta E_e = \frac{1}{2} \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} (1 - e^2) |\Delta \nu|^2 \quad (5)$$

摩擦耗能由摩擦力做功决定,可表示为:

$$\Delta E_f = \mu |F_{xij} \delta_t| \quad (6)$$

颗粒与阻尼器壁之间的能量损耗也遵循同样计算方法。则系统总耗能量为所有颗粒之间以及颗粒与阻尼器壁之间的非弹性碰撞耗能和摩擦耗能的总和,即:

$$E_{\text{Loss}} = \sum \Delta E_e + \sum \Delta E_f \quad (7)$$

2 基于 Matlab 的 DEM 算法

散粒体在运动过程中各个单元与其他单元既有接

触又有分离,因此在 DEM 计算过程中,每次迭代都需要对每个球体单元的运动状态、受力状态、耗能大小以及与其他球体单元的碰撞接触情况进行计算、记录和更新^[11]。笔者采用 Matlab 进行编程,程序流程如图 2 所示。

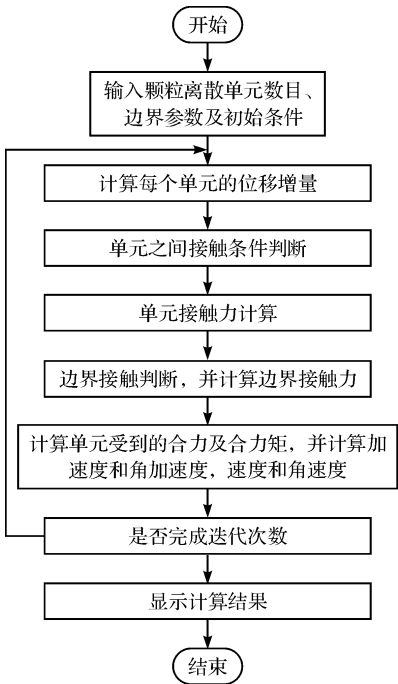


图2 程序流程图

由于系统采用差分法对微分运动方程求解,而每一迭代时步大小的确定对求解的稳定性有很大的影响。根据差分理论,要获得 $x(t)$ 的稳定解,在选取最大时步的前提下,迭代时间步长必须满足如下式条件:

$$\Delta t \leqslant 2 \min \sqrt{\frac{m_i}{k_i}} \left(\sqrt{1 + \xi_i^2} - \xi_i \right) \quad (8)$$
$$i = 1, 2, 3, \cdots, N$$

式中: ξ_i —系统的阻尼比, $\xi_i = c_i / (2 \sqrt{m_i k_i})$; N —颗粒的总数目。

本研究中采用固定时步的方法, Δt 取 0.001 ms 左右。

3 颗粒参数对减振性能影响仿真分析

基于上述仿真模型,笔者研究颗粒参数对减振效果的影响,主要包括:颗粒数量、颗粒大小和颗粒材质等对系统振动衰减速度的影响分析。

3.1 颗粒数量对减振性能的影响

本研究针对主系统的密闭空腔中填充有不同数量

颗粒时,主系统的振动衰减情况进行仿真分析。笔者分别将颗粒数量为 30 个、70 个和 100 个,材料为 45Mn2,直径 4 mm 钢颗粒,填充到箱体中,按照图 2 的流程图,编程进行仿真分析,仿真结果如图 3 所示。

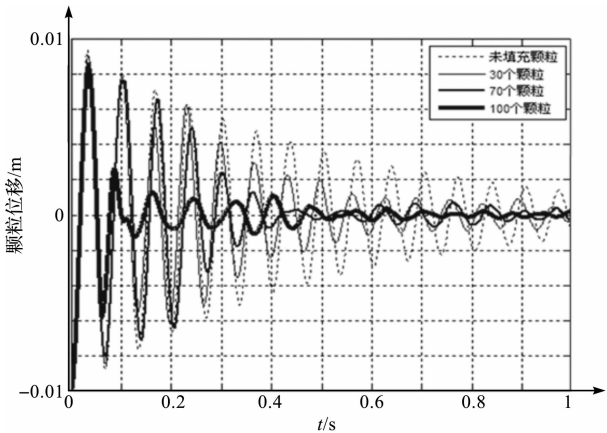


图3 不同数量颗粒时位移曲线对比图

随着颗粒数量的增大,振幅衰减速度明显提高,颗粒数量达到 100 时,在 0.5 s 时,箱体的振幅接近 0,颗粒阻尼减振效果更加明显。

3.2 颗粒材质对减振性能的影响

本研究针对主系统的密闭空腔中填充有不同材料颗粒时,主系统的振动衰减情况进行仿真分析,所选材料属性如表 1 所示。

表 1 颗粒材料属性				
材料名称	弹性模量/ (N · m ⁻²)	泊松比	质量密度/ (kg · m ⁻³)	抗剪模量/ (N · m ⁻²)
45Mn2	2.04E + 11	0.230	7.8E + 03	8.28E + 10
陶瓷	2.12E + 11	0.220	2.3E + 03	9.04E + 10
铅	1.40E + 10	0.400	1.1E + 04	4.90E + 10
聚丙烯 酸树脂	2.40E + 09	0.350	1.2E + 03	8.90E + 08

考虑到计算时间、计算效率和对比较效果等方面的影响,本研究取 70 个颗粒为基准,对比颗粒材质对振动衰减效率的影响。

仿真结果如图 4 所示。可以看出,当填充陶瓷颗粒时,在 1 s 时的运动基本停止,陶瓷的阻尼效果最好。聚丙烯酸树脂的阻尼效果最差。4 种材料 45Mn2、陶瓷、铅、聚丙烯酸树脂对箱体的质量比分别为 18.3%、5.4%、25.8%、2.81%。陶瓷对箱体的质量比只有 5.4%,可以确定陶瓷是最佳的填充材料,具有最佳的阻尼效果。

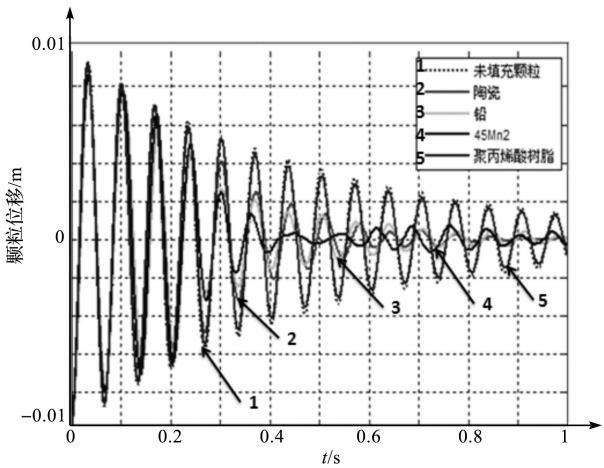


图 4 相同数量不同材质颗粒时位移曲线对比图

3.3 颗粒大小对减振性能的影响

本研究采用的颗粒粒径分别 4 mm、5 mm、8 mm 的 45Mn2 颗粒,填充到主系统的密闭空腔中,并以 20 个粒径为 8 mm 的颗粒质量为基准,对比分析不同颗粒粒径对主系统振动衰减效率的影响规律。仿真结果如图 5 所示。

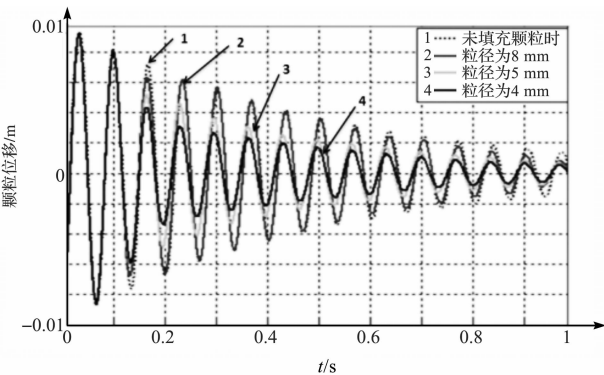


图 5 不同粒径颗粒时位移曲线对比图

可见,当填充不同粒径的颗粒时,颗粒的阻尼效率是不同的。填充粒径为 8 mm 的颗粒时,颗粒阻尼对系统振动的衰减效果不理想,但填充粒径为 5 mm 和

4 mm 的颗粒时,颗粒的阻尼效果较好。两者的粒径相差不大,阻尼效果也相近,粒径为 4 mm 的颗粒阻尼效果好于粒径为 5 mm 的颗粒。因此,颗粒的粒径越小,颗粒的阻尼效果越好。

4 实验及结果分析

试验台系统设计如图 6 所示。

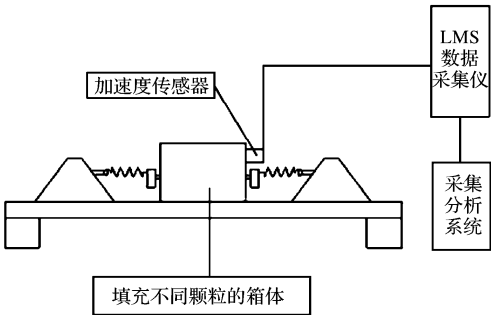


图 6 单自由度颗粒阻尼振动抑制系统试验

笔者将用来填充不同颗粒的箱体通过两端的弹性元件安装在试验台基座的光滑的轨道上,通过弹簧施加弹性力,实现箱体的往复自由运动,测试仪器包括振动系统试验台、LMS SCADAS Mobile 数据采集仪、LMS Test 采集分析系统以及加速度传感器。

针对水平方向单自由度振动系统^[12],笔者研究颗粒阻尼的减振特性。

本研究分别针对颗粒数量,大小和材料对减振性能的影响进行试验,结果如表 2 所示。由于在试验中,箱体与支撑面之间的接触是有摩擦的,而摩擦力的存在会耗散系统的部分能量,造成误差。因此,笔者将接触面做的尽可能的光滑来减弱摩擦力对系统的影响,以突出颗粒阻尼对系统减振的影响。在仿真当中,是通过假设系统有一个阻尼系数为 C 的阻尼器,因此,接触面的摩擦力对系统的阻尼系数不产生影响。

表 2 仿真与试验结果对比

颗粒种类	颗粒数量/ (个)			颗粒直径/ mm			颗粒材料			
	30	70	100	4	5	8	45Mn2	陶瓷	铅	聚丙烯酸树脂
振幅衰减到 0 时间/s										
仿真结果	0.9	0.7	0.5	1.3	1.5	1.6	1.1	1	1.3	2.2
试验结果	0.8	0.6	0.4	1.2	1.3	1.4	1	0.9	1.1	2.0
误差率(%)	11	14	20	7	13	12	10	10	15	9

针对水平方向单自由度的颗粒阻尼振动系统,本研究通过试验,研究了颗粒材料、数量和颗粒粒径三因素的变化对颗粒阻尼减振效果的影响,试验结果表明添加颗粒可使振动系统的阻尼水平得到明显的改善,且改善效果与颗粒材料密度、填充率和颗粒粒径三因素对主系统的振动抑制有重要作用。

5 结束语

笔者基于DEM理论建立了多颗粒碰撞的数学模型;本研究编制了相应的Matlab仿真程序,应用该程序对特定情形中的颗粒阻尼的阻尼耗能特性进行了计算,分析了颗粒阻尼对系统的减振效果和能量耗散机理;在不同的填充率、不同颗粒材料和不同粒径下进行了多颗粒碰撞的仿真研究,对颗粒阻尼减振效果的影响因素进行了试验分析,填充颗粒阻尼之后,箱体振动衰减明显加快,仿真和试验均验证了颗粒阻尼具有显著减振效果,得出以下结论:

(1)随着颗粒数量的增大,颗粒阻尼减振效果更加明显;

(2)所用的材料的弹性模量越大,泊松比越小,颗粒的耗能性能越好,阻尼效果越好,密度对系统的减振性能影响相对不大;

(3)颗粒的粒径越小,颗粒阻尼减振效果越好。

可见,在颗粒阻尼的耗能过程中,碰撞耗能占主导作用,与颗粒减振理论相一致;同时,揭示了不同的填充率、不同颗粒材料和不同粒径时,对减振效果的影响规律,试验验证了算法的有效性,该算法可应用于机械构件的减振设计。

参考文献(References):

- [1] LU Z, WANG D, LI P. Comparison study of vibration control effects between suspended tuned mass damper and particle damper[J]. **Shock and Vibration**, 2014, 2014(2): 1-7.
- [2] WANG M. Feasibility study of nonlinear tuned mass damper for machining chatter suppression[J]. **Journal of Sound & Vibration**, 2011, 330(9): 1917-1930.
- [3] 鲁正, 吕西林, 闫维明, 等. 颗粒阻尼器减震控制的试验研究[J]. **土木工程学报**, 2012(1): 243-247.
- [4] 张海东, 洪永明, 杜杰. 颗粒阻尼器冲击试验研究[J]. **兵工自动化**, 2016, 35(1): 8-11.
- [5] 张功学, 李松峰, 游丽嘉. 颗粒直径对阻尼器减振性能影响的试验研究[J]. **机械设计与制造工程**, 2014(6): 61-64.
- [6] 曹海兰, 张功学, 张可欣, 等. 体积不同配比颗粒对阻尼器减振的试验研究[J]. **科学技术与工程**, 2015, 15(4): 193-196.
- [7] FRIEND D, KINRA V K. Particle impact damping[J]. **Sound and Vibration**, 2000, 233(1): 93-118.
- [8] OLSON S E. An analytical particle damping model[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2003, 264(5): 1155-1166.
- [9] 周宏伟, 陈前, 林莎. 垂直简谐激励下阻尼颗粒动态特性研究[J]. **振动与冲击**, 2007, 26(9): 124-127.
- [10] 周宏伟, 陈前, 段勇. 颗粒阻尼系统动力学特性研究[J]. **振动与冲击**, 2008, 27(5): 109-111.
- [11] MAO K, WANG M Y, XU Z W. DEM simulation of particle damping[J]. **Powder Technology**, 2004, 142(2): 154-165.
- [12] SAEKI M. Impact damping with granular materials in a horizontally vibrating system[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2002, 251(1): 153-161.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

杨英, 赵西伟, 何萌. 基于DEM算法的多颗粒碰撞耗能机理分析与振动抑制研究[J]. **机电工程**, 2017, 34(1): 23-27.

YANG Ying, ZHAO Xi-wei, HE Meng. Analysis of energy dissipation mechanism and vibration restrain about particles damping based on DEM[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 34(1): 23-27.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>