

基于稳态能量流法识别半主动颗粒阻尼 损耗因子的实验

薛程¹, 许祥曦¹, 苏战发¹, 朱信龙¹, 左敏¹, 夏兆旺¹, 刘献栋²

(1. 江苏科技大学 能源与动力学院, 江苏 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: 通过稳态能量流法推导了半主动颗粒阻尼损耗因子与响应的关系, 采用实验方法识别了半主动颗粒阻尼的损耗因子。分别研究了颗粒填充率和通电电压对半主动颗粒阻尼损耗因子的影响规律。研究结果表明: 增大通电电压能提高半主动颗粒阻尼的损耗因子, 损耗因子在到达一定电压后逐渐趋于稳定; 半主动颗粒阻尼的损耗因子随着颗粒填充率的增加而增大, 但颗粒填充率在达到 70% 以后, 半主动颗粒阻尼的损耗因子增幅变缓并逐渐趋于稳定。

关 键 词: 损耗因子; 半主动颗粒阻尼; 稳态能量流法; 内外因特性; 阻尼特性

中图分类号: V231.92; TB53

文献标志码: A

Experiment of identifying semi-active particle damping loss factor based on steady-state energy flow method

XUE Cheng¹, XU Xiangxi¹, SU Zhanfa¹, ZHU Xinlong¹,
ZUO Min¹, XIA Zhaowang¹, LIU Xiandong²

(1. School of Energy and Power,
Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 212003, China;
2. School of Transportation Science and Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The relationship between semi-active particle damping loss factor and response signal was derived by steady-state energy flow method, and semi-active particle damping loss factor was identified through experimental method. The internal and external features affecting semi-active particle damping loss factor were explored by changing particle filling rate and voltage. The experimental results showed that the semi-active particle damping loss factor can increase by increasing the voltage, and gradually become stable after reaching a certain voltage; in addition, the semi-active particle damping loss factor could increase through increasing particle filling rate. After reaching 70% particle filling rate, the loss factor increased slowly and became stable gradually.

收稿日期: 2019-07-11

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20191462)

作者简介: 薛程(1994—), 男, 硕士生, 主要从事振动控制方面的研究。

通信作者: 夏兆旺(1981—), 男, 教授, 博士, 主要从事振动与噪声方面的研究。E-mail: dlxzw@163.com

引用格式: 薛程, 许祥曦, 苏战发, 等. 基于稳态能量流法识别半主动颗粒阻尼损耗因子的实验[J]. 航空动力学报, 2020, 35(1): 60-65. XUE Cheng, XU Xiangxi, SU Zhanfa, et al. Experiment of identifying semi-active particle damping loss factor based on steady-state energy flow method[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(1): 60-65.

Key words: loss factor; semi-active particle damping; steady-state energy flow method; internal and external features; damping characteristics

颗粒阻尼技术最早应用于航空航天领域^[1-4],近年来颗粒阻尼技术受到国内外学者的广泛关注,从被动颗粒阻尼技术渐渐发展到半主动颗粒阻尼技术^[5-6]。半主动颗粒阻尼技术的减振耗能性能更好,在电磁场力、摩擦力和碰撞力的联合作用下,其减振耗能机理变得更加复杂^[7-8]。因此,准确识别半主动颗粒阻尼系统的损耗因子对半主动颗粒阻尼技术的应用具有重要意义。

半主动颗粒阻尼装置具有很强的非线性^[9-11],精准识别其损耗因子可以揭示半主动颗粒阻尼的阻尼非线性与颗粒直径、颗粒材料、颗粒填充率等因素之间的定量关系^[12-14]。姚冰等^[15-17]先测量了简谐激励下颗粒阻尼对隔振系统产生的冲击力,再通过稳态能量流法计算得出损耗因子与激振力参数之间的关系,最后通过实验验证了损耗因子计算的正确性。胡琛等^[18-19]通过理论和实验数据验证了稳态能量流法测量颗粒阻尼损耗因子的正确性,同时也研究了颗粒阻尼损耗因子与加速度信号和频率信号之间的定性关系。本文先通过稳态能量流法推导出损耗因子和力信号与加速度信号的相位差之间的关系,再通过实验数据识别颗粒阻尼损耗因子;最后研究了通电压和颗粒填充率对半主动颗粒阻尼损耗因子的影响规律。

1 半主动颗粒阻尼器模型

半主动颗粒阻尼器如图 1 所示:采用 PP 材

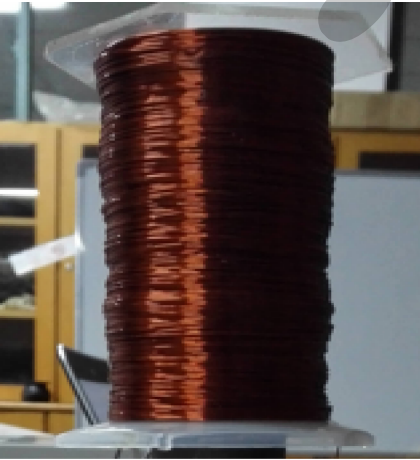


图 1 半主动颗粒阻尼器

Fig. 1 Semi-active particle damper

质柱状容器作为半主动颗粒阻尼的容纳装置;容纳装置外壁均匀缠绕 1700 匝铜导线;容纳装置上下端均使用轻质塑料挡板密封。采用质量占比填充率,填充率范围为 10%~90%;采用的颗粒阻尼材料为直径 2 mm 的钢球;未填充颗粒时颗粒阻尼器的质量为 720 g,每填充 10%的颗粒,质量增加 10 g。

2 损耗因子识别原理

本文采用稳态能量流法来识别半主动颗粒阻尼的内损耗因子。内损耗因子 η 是指在单位频率内损耗能量与平均储存能量之比。采用稳态能量流法的关键在于精确得出输入到系统的功率和结构表面的平均动能。稳态输入功率 P_{in} 和内损耗因子 η 由下式表示^[20]:

$$P_{in} = \text{Re}P_{in} + i \cdot \text{Im}P_{in} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\text{Re}P_{in}}{\omega E} \quad (2)$$

$$P_{in} = \langle f(t)v(t) \rangle = [\text{Re}(FV^*)]/2 \quad (3)$$

$$|P_{in}| = |F| |V| / 2 \quad (4)$$

$$\text{Re}P_{in} = |F| |V| \cdot \cos \varphi / 2 \quad (5)$$

$$\text{Im}P_{in} = i \cdot |F| |V| \cdot \sin \varphi / 2 \quad (6)$$

$$E = mVV^* / 2 = m |V|^2 / 2 \quad (7)$$

式中 $\text{Re}P_{in}$ 指输入功率的实部(损耗功率), $\text{Im}P_{in}$ 指输入功率的虚部(无功功率), ω 指激励频率, m 指结构体的动态质量, E 指结构平均动能; $f(t)$ 、 $v(t)$ 分别是激振力的时域信号和速度响应的时域信号, $\langle \rangle$ 指时间平均, F 、 V 分别为 $f(t)$ 、 $v(t)$ 的傅里叶变换, V^* 表示 V 的共轭复量, $| \cdot |$ 表示为该信号量的模。 φ 为力信号与速度信号相位角的差, 由 $\varphi_F - \varphi_V$ 表示。

结构体的动态质量 m 可通过无功功率 $\text{Im}P_{in}$ 和结构平均动能 E 之间的时间微分关系近似求得

$$m \approx \frac{2\text{Im}P_{in}/(\omega VV^*)}{|F| \cdot \sin \varphi / (\omega |V|)} \quad (8)$$

联立式(2)、式(5)、式(7)、式(8)可得损耗因子表达式:

$$\eta = \cot \varphi = \cot(\varphi_F - \varphi_V) \quad (9)$$

因为速度信号与加速度信号的相位差为 $\pi/2$, 式(9)还可变化为式(10):

$$\eta = \tan(\varphi_a - \varphi_F) \quad (10)$$

式中 φ_a 、 φ_F 、 φ_V 分别为加速度信号、力信号、速度信号的相位角。

3 半主动颗粒阻尼损耗因子实验

3.1 实验测试系统

半主动颗粒阻尼损耗因子实验测试系统如图 2 和图 3 所示。阻抗头安装在激振器的顶杆末端,阻抗头通过转接头与半主动颗粒阻尼器刚性连接。加速度传感器粘贴在颗粒阻尼器的上端挡板上。采集颗粒阻尼器上端的加速度信号和阻抗头上的力信号作为实验数据。为保证激振器对颗粒阻尼器产生稳定的激振力,将阻抗头上产生的力信号反馈给信号源控制仪,通过信号源控制仪和功率放大器调节激振力信号。同时,为产生恒定的加速度响应信号,排除质量改变对加速度响应的影响,在改变颗粒填充率时,也相应改变激振力幅值的大小。激振力幅值的变化由式(11)确定。

$$F_0 + \Delta F = (m_0 + \Delta m)a \tag{11}$$

式中 F_0 为激振力初始幅值的大小; ΔF 为激振力

幅值的变化量; m_0 为未填充颗粒时颗粒阻尼器的质量; Δm 为改变颗粒填充率时质量的变化量; a 为颗粒阻尼器上端的加速度响应幅值大小。

半主动颗粒阻尼主要是通过磁场调节颗粒的运动,实现控制阻尼的效果。由于颗粒阻尼器的空间限制,测试其磁场不容易实现,本实验研究主要用通电电压间接描述磁场与颗粒阻尼之间的关系。因此,将线圈接入电压控制仪,用于研究通电电压对颗粒阻尼损耗因子的影响规律。

3.2 实验数据分析

实验过程中,对半主动颗粒阻尼器施加扫频简谐激励,扫频范围为 15~25 Hz。通过改变通电线圈中电压和颗粒阻尼器内填充率的大小,分别比较不同电压和不同填充率下颗粒阻尼器上端的加速度响应。将采集到的加速度信号与力信号做传递函数分析,并求出力信号和加速度信号的相位差;通过所求出的相位差和式(10)计算得出半主动颗粒阻尼器在不同工况下的阻尼损耗因子。

图 4 所示为通电电压(U)为 1.5 V 时,在激振力频率附近的加速度信号与力信号的传递函数曲线。由图 4 可以看出:在激振力频率 20 Hz 处,不同颗粒填充率的传递函数均较为平稳,说明在该频率下可产生较稳定的力与加速度的相位差;传递函数随着颗粒填充率的增大而增大,主要原因是随着颗粒填充率的增大,颗粒阻尼器的内损耗能力也增大。次要原因是颗粒填充率的增大提高了阻尼器的整体质量。

图 5 所示为在一个周期 T 内不同颗粒填充率下激振力的时域信号图。为保证颗粒阻尼器产生幅值恒定的加速度响应信号,在提高颗粒填充

图 2 实验测试系统示意图

Fig. 2 Experimental test system schematic diagram

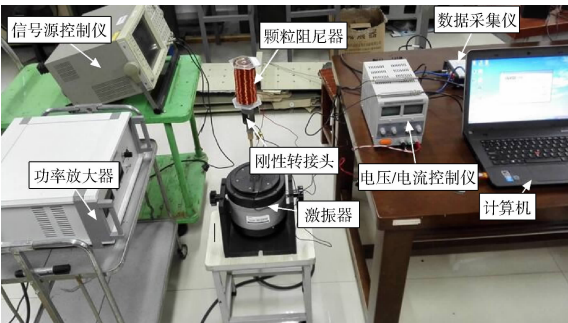


图 3 实验测试系统图

Fig. 3 Experimental test system

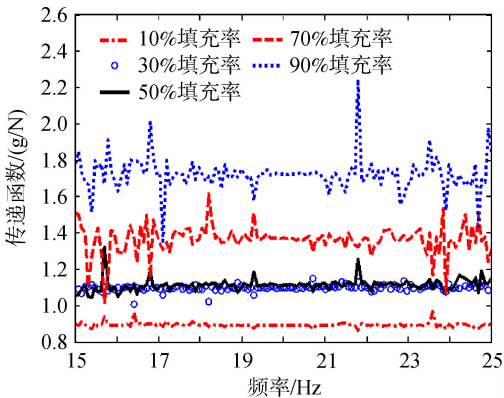


图 4 不同填充率下传递函数曲线($U=1.5\text{ V}$)

Fig. 4 Transfer curves at different filling rates ($U=1.5\text{ V}$)

率的同时,需根据式(11)相应地提高激振力信号的幅值。

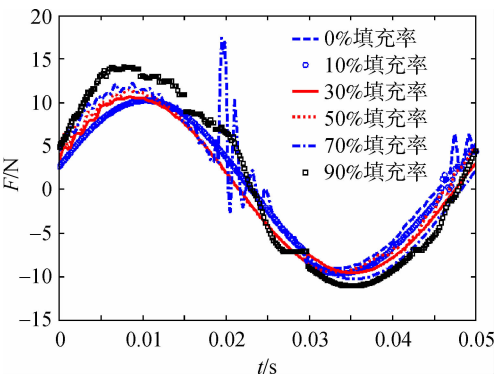


图 5 不同填充率下激振力信号的时域图

Fig. 5 Time-domain signals of exciting force at different filling rates

图 6 所示为颗粒填充率为 50%、不同电压时,半主动颗粒阻尼器上端加速度响应信号(其它颗粒填充率时也有类似规律)。从图 6 中可以看出:改变电压可以改变加速度响应的相位角 φ_a ; 通入 1 V 电压时,加速度响应的相位角 φ_a 发生明显的变化;随着电压的增大,加速度响应曲线逐渐左移,即加速度响应的相位角呈逐渐增大的趋势;加速度响应的相位角 φ_a 先快速增大,电压达到 2 V 后,相位角 φ_a 的增幅逐渐平缓并趋于稳定。图 6 中的冲击信号是由颗粒撞击容器上端密封板造成的。

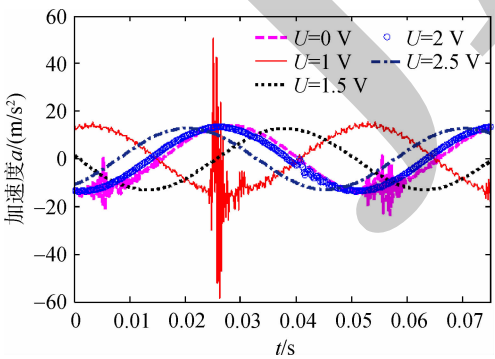


图 6 加速度响应随电压的变化规律(50%颗粒填充率)

Fig. 6 Voltage's effects on acceleration response (50% particle filling rates)

图 7 所示为通电电压为 2.5 V 时,在一个周期 T 内不同颗粒填充率下阻尼器上端加速度响应信号(其它通电电压时也有类似规律)。从图 7 中可以看出:随着颗粒填充率的增加,加速度响应的相位角 φ_a 呈现先快速增大,后缓慢增大并逐渐趋于稳定的趋势;当颗粒填充率由 30% 向 70% 变

化的过程中,加速度响应的相位角 φ_a 变化明显;随后随着颗粒填充率的增大,相位角 φ_a 的偏移量不断增大,但增幅逐渐趋于稳定。

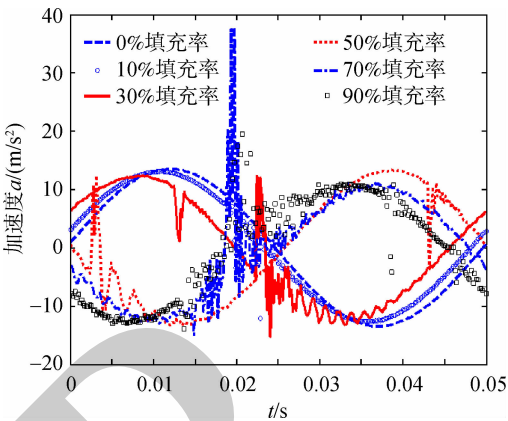


图 7 加速度响应随颗粒填充率的变化规律($U=2.5\text{ V}$)

Fig. 7 Filling rates' effects on acceleration response ($U=2.5\text{ V}$)

表 1 所示为各种不同工况下半主动颗粒阻尼损耗因子参数表。通过表 1 绘制图 8。

表 1 阻尼损耗因子参数表
Table 1 Particle damping loss factor

填充率	填充率/%				
	10	30	50	70	90
电压/V					
0	0.0743	0.073	0.061	0.1225	0.1481
1	0.0239	0.073	0.1225	0.1791	0.1911
1.5	0.0251	0.0743	0.1238	0.2255	0.2315
2	0.0365	0.0857	0.1481	0.3305	0.3469
2.5	0.049	0.0983	0.1726	0.3858	0.3984

图 8 所示为不同工况时,半主动颗粒阻尼损耗因子随颗粒填充率的变化曲线图。从图 8 中可以看出:施加电压后阻尼损耗因子发生了明显的变化,这主要是因为施加电压后,半主动颗粒阻尼器内部磁场发生了变化,使得颗粒运动发生了偏转;随着电压的升高,半主动颗粒阻尼损耗因子先呈现快速增大的趋势,随后逐渐趋于稳定。随着颗粒填充率的提高,半主动颗粒阻尼损耗因子总体呈不断增大的趋势,这是因为颗粒的增多提高了半主动颗粒阻尼器的内摩擦力,从而提高了半主动颗粒阻尼器耗散能量的能力;在没有施加电压时,阻尼损耗因子随颗粒填充率的增加先保持稳定,在达到 70% 填充率时,阻尼损耗因子快速增大,随后趋于平缓;在施加电压后,阻尼损耗因

子随颗粒填充率的提高先缓慢增加,在达到 50% 填充率后,半主动颗粒阻尼损耗因子呈快速增大的趋势,达到 70% 填充率后,半主动颗粒阻尼损耗因子逐渐趋于稳定。

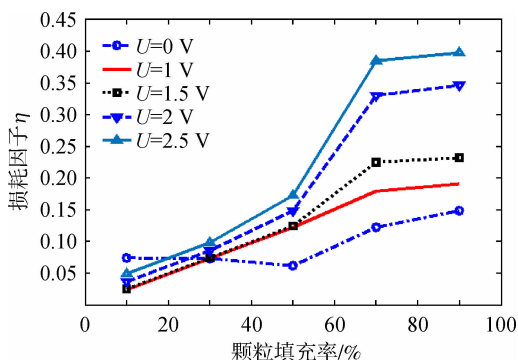


图8 颗粒填充率对损耗因子的影响

Fig. 8 Particle filling rates' effects on loss factor

4 结 论

1) 通过实验数据识别了半主动颗粒阻尼器的损耗因子;实验结果表明:在半主动颗粒阻尼器外壁缠绕通电线圈可改变阻尼器上端加速度响应信号的相位角;在刚通入电压时,加速度响应信号发生明显的相位偏移;随着通电电压的不断增大,相位偏移量逐渐增大,相应的半主动颗粒阻尼损耗因子也逐渐增大,到达一定电压后,损耗因子逐渐趋于稳定。

2) 提高颗粒填充率可提高半主动颗粒阻尼器的耗能能力。主要表现在随着颗粒填充率的提高,加速度响应的相位角偏移量变大,相应的半主动颗粒阻尼损耗因子也随之变大;在到达一定填充率后,损耗因子缓慢增大并逐渐趋于稳定。

参考文献:

[1] 段勇,陈前,林莎.颗粒阻尼对直升机旋翼桨叶减振效果的试验[J].航空学报,2009,30(11):2113-2118.
DUAN Yong, CHEN Qian, LIN Sha. Experiments of vibration reduction effect of particle damping on helicopter rotor blade[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(11): 2113-2118. (in Chinese)

[2] 赵燕,徐维,李玉龙,等.一种适用于颗粒非规则分布的阻止 SPH 数值断裂的方法[J].航空学报,2009,30(11):2100-2105.
ZHAO Yan, XU Fei, LI Yulong, et al. A method of preventing SPH numerical fracture for irregular particle models[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(11): 2100-2105. (in Chinese)

[3] 唐伟,王延荣,王相平,等.基于离散单元法的二维颗粒阻

尼研究[J].航空动力学报,2011,26(5):1159-1165.

TANG Wei, WANG Yanrong, WANG Xiangping, et al. Numerical study of particle damping in two dimensions by use of discrete element method[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(5): 1159-1165. (in Chinese)

- [4] 刘彬,王延荣,田爱梅,等.轮体结构颗粒阻尼器设计方法[J].航空动力学报,2014,29(10):2476-2485.
LIU Bin, WANG Yanrong, TIAN Aimei, et al. Design methodology for particle dampers applied to a wheel structure[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(10): 2476-2485. (in Chinese)
- [5] 夏兆旺,单颖春,刘献栋.基于悬臂梁的颗粒阻尼实验[J].航空动力学报,2007,22(10):1737-1741.
XIA Zhaowang, SHAN Yingchun, LIU Xiandong. Experimental research on particle damping of cantilever beam[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(10): 1737-1741. (in Chinese)
- [6] KIM J H, LEE C W. Semi-active damping control of suspension systems for specified operational response mode[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 260(2): 307-328.
- [7] HÄRTL J, OOI J Y. Numerical investigation of particle shape and particle friction on limiting bulk friction in direct shear tests and comparison with experiments[J]. Powder Technology, 2011, 212(1): 231-239.
- [8] LEI Xiaofei, WU Chengjun. Non-obstructive particle damping using principles of gas-solid flows[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(3): 1057-1065.
- [9] 肖望强,黄玉祥,李威,等.颗粒阻尼器配置对齿轮传动系统动特性影响[J].机械工程学报,2017,53(7):1-12.
XIAO Wangqiang, HUANG Yuxiang, LI Wei, et al. Influence of particle damper configurations on the dynamic characteristic for gear transmission system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7): 1-12. (in Chinese)
- [10] 唐伟,王延荣,王周成,等.二维振动结构的颗粒阻尼实验[J].航空动力学报,2011,26(3):628-634.
TANG Wei, WANG Yanrong, WANG Zhoucheng, et al. Experimental study of particle damping for a two-dimensional vibrating structure[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(3): 628-634. (in Chinese)
- [11] PARK Y M, KIM K J. Semi-active vibration control of space truss structures by friction damper for maximization of modal damping ratio[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(20): 4817-4828.
- [12] SHAH B M, NUDELL J J, KAO K R, et al. Semi-active particle-based damping systems controlled by magnetic fields[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(2): 182-193.
- [13] ABBAS H, HAI H, RONGONG J, et al. Damping performance of metal swarfs in a horizontal hollow structure[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(1): 9-13.

[14] LI Yingle, LI Jin, WANG Mingjun, et al. A solution of scattered field of particle in electromagnetic beam based on beam series expansion[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(12): 6375-6381.

[15] YAO Bing, CHEN Qian, XIANG Hongying, et al. Investigation on particle damper based on an approximate theoretical model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(3): 121-128.

[16] 姚冰, 陈前, 项红荧, 等. 颗粒阻尼吸振器试验研究[J]. 振动工程学报, 2014, 27(2): 201-207.
YAO Bing, CHEN Qian, XIANG Hongying, et al. The experimental study on dynamic properties of tuned particle damper[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(2): 201-207. (in Chinese)

[17] 姚冰, 陈前. 微重力下颗粒阻尼特性仿真研究[J]. 振动工程学报, 2013, 26(2): 232-238.

YAO Bing, CHEN Qian. Simulation study on micro-gravity behavior of particle dampers[J]. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26(2): 232-238. (in Chinese)

[18] 胡漂, 涂迪, 杨梁, 等. 电磁场下颗粒阻尼动态特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(4): 41-46.
HU Li, TU Di, YANG Liang, et al. Experimental investigation on dynamic properties of particle damping under electromagnetic field[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(4): 41-46. (in Chinese)

[19] 胡漂, 唐喆, 徐贤, 等. 颗粒阻尼器损耗因子外因特性研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(15): 2005-2009.
HU Li, TANG Zhe, XU Xian, et al. Study on external features of particle damping loss factor[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(15): 2005-2009. (in Chinese)

[20] NORTON M P. Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers[J]. Applied Acoustics, 1990, 30(1): 79-80.

(编辑: 张 雪)