

磁性液体阻尼减振实验台的设计和实验分析*

冯振华, 李德才, 杨文明

(北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京, 100044)

摘要 为了测试磁性液体阻尼器的有效性和各种参数对阻尼器减振效果的影响,设计一种阻尼器模型,并根据阻尼器的工作原理设计一套满足频率低、位移小、加速度小等条件的实验台,根据实验要求,在实验台上对磁性液体阻尼器进行实验。结果表明:实验台可实现频率范围为0.74~5.75 Hz的振动;与没有安装阻尼器相比,弹性悬臂梁在安装阻尼器后振幅完全衰减的振动时间缩短约65%;安装阻尼器后的悬臂梁对数衰减率随频率大小的变化规律是先增大后减小,然后再增大;安装阻尼器后的悬臂梁对数衰减率随着振幅的增大而增大;磁性液体阻尼器对于不同长度悬臂梁的振动都起到了很好的减振作用,当悬臂梁的长度为0.7 m时,磁性液体阻尼器的减振效果最好;磁性液体阻尼器对于不同初始振幅的悬臂梁振动都具有良好的减振效果。

关键词 磁性液体; 阻尼器; 实验台; 对数衰减率

中图分类号 TB123

1 问题的提出

磁性液体出现之后,提出了将磁性液体应用于阻尼的想法^[1],美国NASA最先开发了一种无线电天文探测卫星用磁性液体阻尼器^[2],随后活塞式磁性液体阻尼器^[3]和调谐磁性液体阻尼器^[4]等多种阻尼器被提出。

航天器中大挠性空间结构(如太阳能帆板)由于具有跨度大、质量轻和刚度低等结构特点,使得其振动具有频率低、位移小和加速度小等特征^[5],并且航天器处于空气阻尼很小的太空环境中,空间结构的振动会持续很长时间。具有上述特征的振动问题会对航天器的运行造成严重影响,因此必须要采取有效的振动控制措施。笔者针对这种特征的振动,提出一种对惯性力非常敏感的磁性液体阻尼器,此阻尼器具有不需要外界提供能量、可靠性高和寿命长等优点。

磁性液体用于阻尼减振器的工作原理如图1所示,在一个非导磁性的轻金属壳体内充满磁性液体,里面放置一块永磁体。根据磁性液体的二阶浮力原理^[6],永磁体悬浮在磁性液体中,若壳体作加速度变化的往复振动或旋转振动,永磁体受到变化的惯性力作用会在磁性液体中做相应的运动,从而带动磁

性液体剪切流动,利用磁性液体的黏性^[7]进行耗能,最终转变为热量散发出去,达到减振效果。

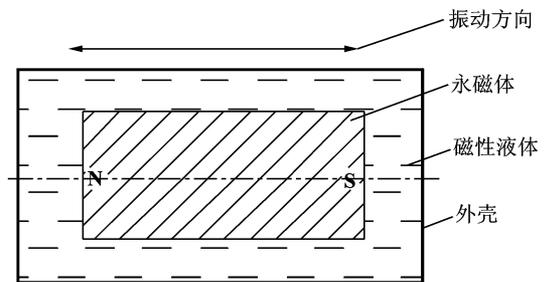


图1 磁性液体阻尼器原理图

目前,电子、液压和机械等振动装置的结构复杂、成本较高,不能满足航天器中部件的局部振动要求。为此,根据磁性液体阻尼器的工作原理,专门设计一套满足频率低、位移小和加速度小等条件的实验台来测试磁性液体阻尼器的减振效果及各种参数对阻尼器减振效果的影响。

2 实验台设计

根据被减振物体比如航天器上的太阳能帆板的安装特点,选用弹性悬臂梁作为振动源,实验方案对减振实验台的要求包括:振动频率为0.8~5 Hz,工

* 国家自然科学基金资助项目(50875017)

收稿日期:2011-03-23;修改稿收到日期:2011-06-24

作振幅为5~20 mm;磁性液体阻尼器方便安装与拆卸;实验装置能够显示电压数据、加速度数据和实验时间;能够把加速度信号处理成位移信号,并过滤掉不需要的信号。

设计的实验台主要包括黄铜板、固定黄铜板的支架、振动测试系统(振动传感器、数据采集器、振动测试软件)、电源、万用表、磁性液体阻尼器模型和计算机等。实验装置如图2所示。采用三角钢焊接的支架作为支撑装置,支架用螺钉与地面固定,并采取弹性隔振措施消除地面振动对支架的影响。将铜板的一端固定在支架上,另一端处于自由状态,且可以通过选择不同长度的铜板来实现不同的振动频率。传感器固定于铜板自由末端的某一位置,然后与数据采集器连接,再将数据采集器与计算机连接。这样,铜板自由末端产生的信号通过传感器采集后传输给数据采集器,经数据采集器的模数转换后输入到计算机,由计算机中的振动测试软件输出电压数据文件,这些数据经过编写的Matlab程序处理可得到振动的加速度和位移等所需参数。

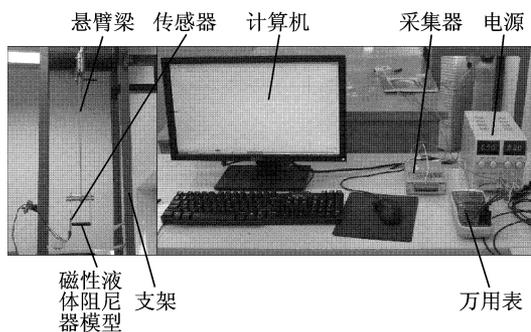


图2 实验装置图

2.1 振动源

由于磁性液体阻尼器中含有永磁体,所以安装阻尼器附近的实验装置不能导磁,以免对阻尼器的减振效果造成影响,而且悬臂梁必须具有足够的弹性以满足实验要求的振动频率,这样可选用黄铜板作为弹性悬臂梁,如图3所示。实验时通过控制铜板的长度来控制铜板自由末端所产生振动频率的大小,初步选取的铜板长度范围为0.7~2.0 m,宽度为50 mm,厚度为5 mm。

2.2 传感器和数据采集器

2.2.1 传感器

根据使用环境和实验条件要求,选取美国Lancetec公司生产的ULT27型压电式加速度传感器

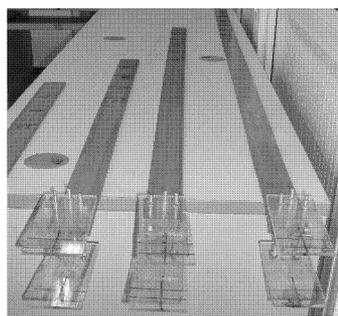


图3 铜板实物图

器^[8],如图4所示。它具有体积小、质量小、功耗小、寿命长等优点,特别是它具有良好的动态特性,其性能参数如表1所示。

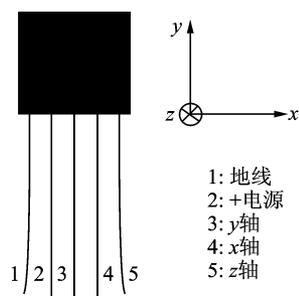


图4 ULT27型加速度传感器

表1 压电式加速度传感器的性能参数

型号	频率范围/ Hz	温度/ °C	电压/ V	质量/ g
ULT2742	0~17	0~70	2.7~3.6	5

压电式加速度传感器是利用质量块 m 由预紧力压在晶片上,与被测加速度 a 作用时,晶体处会受到惯性力 $F=ma$ 作用,由此产生压电效应,因此质量块的质量决定了传感器的灵敏度所以尽量选用质量小的传感器。

输出电压

$$V_{\text{out}} = (V_0 + Sa)V_s/3 \quad (1)$$

加速度

$$a = (V_{\text{out}}3/V_s - V_0)/S \quad (2)$$

其中: a 为被测加速度(单位 g); S 为标定的加速度计灵敏度(单位 V/g); V_s 为电源电压(单位 V); V_0 为标定的零点偏置电压(单位 V)。

2.2.2 数据采集器

数据采集器可从传感器和其他待测设备等模拟和数字被测单元中自动采集非电量或电量信号,并送到计算机中进行分析处理。

采集器选用美国DATAQ公司的DI710型独立数据记录仪^[9],如图5所示。该数据采集器具有很高的同步精度,可通过USB口与计算机连接使用。它具有16通道,采样频率为4.8 kHz,分辨率为14 bit,模拟信号的输入范围为±10 V。通常结合基于计算机或者其他专用测试平台的测量软、硬件产品来实现用户自定义的测量。

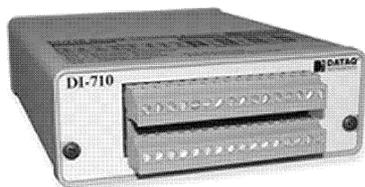


图5 DI710型独立数据记录仪

2.3 振动测试软件及程序

测试软件使用与DI710独立数据记录仪配套的WinDaq多功能记录分析软件^[9]。该软件具有实时数据采集,数据显示,数据记录,数据回放和数据分析等功能。作为通用的数据分析软件,可读取标准文本格式的试验数据文件,把数据实时转换到Excel数据表中,但不能将采集到的加速度信号处理成位移信号,故采用Matlab编写一套程序来解决此问题。此程序可过滤掉不需要的无用信号,可精确将加速度信号处理成所需要的位移信号。

3 减振实验

3.1 实验及数据处理方法

为了验证磁性液体阻尼器的减振效果以及测试各种参数对阻尼器减振效果的影响,制作一种阻尼器模型,其重量为7.62 g,外壳内径为8.7 mm,长度为58 mm;选用Nd-Fe-B材料的圆柱形永磁体,其直径为6.5 mm,长度为12 mm;使用北京交通大学磁性液体实验室制备的煤油基磁性液体,其饱和磁化强度为27.02 kA/m,其中分散有Fe₃O₄磁性颗粒。将磁性液体阻尼器安装在悬臂梁的自由端,在如图2所示的实验台上进行减振实验。

悬臂梁振动时由于阻尼器中磁性液体粘性的存在导致其能量耗散,梁的振动被抑制,用梁振动的对数衰减率 Δ 来衡量这种抑制作用的强弱

$$\Delta = \ln\left(\frac{A_i}{A_{i+1}}\right) \quad (3)$$

其中: A_i, A_{i+1} 分别为第*i, i+1*个周期的振幅。

3.2 实验结果分析

3.2.1 悬臂梁长度与产生振动频率之间的关系

对未安装磁性液体阻尼器时悬臂梁在不同悬挂长度的振动进行测试,根据实验输出结果,得到悬臂梁的悬挂长度与其自由末端所产生振动频率之间的关系,如图6所示。

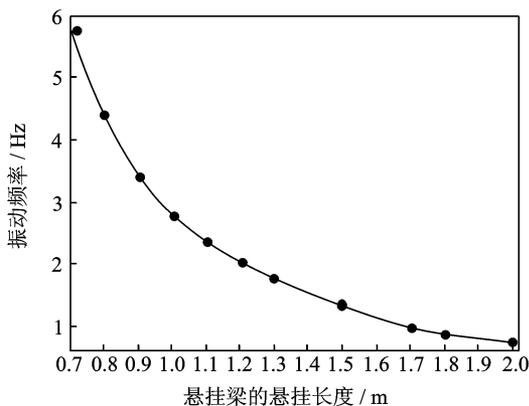
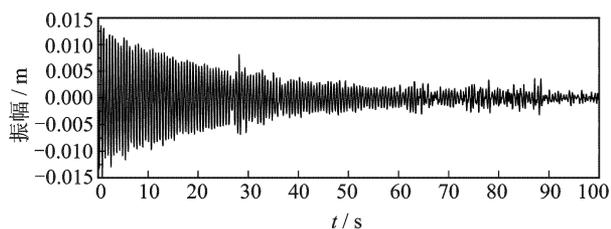


图6 悬臂梁的悬挂长度与振动频率之间的关系

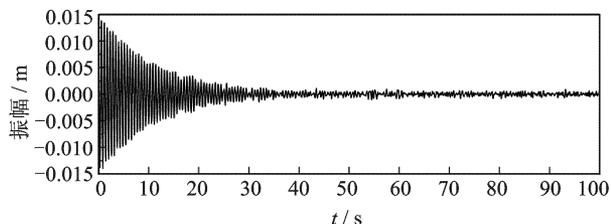
由图6可知,在悬臂梁的弹性变形范围内,其自由末端所产生的振动频率随着悬挂长度的增大而减小,并且在实验的长度范围0.7~2.0 m内,本实验装置可实现的振动频率范围为0.74~5.75 Hz,满足小位移、低频率振动的实验要求。

3.2.2 磁性液体阻尼器减振效果分析

在悬臂梁长度为1.3 m、初始振幅为15 mm、环境温度为22 °C的条件下,对阻尼器模型进行减振实验,得到悬臂梁在安装磁性液体阻尼器前、后的振幅衰减对比图,如图7所示。



(a) 无阻尼器时悬臂梁的振动



(b) 有阻尼器时悬臂梁的振动

图7 悬臂梁的振动衰减对比图

由图7可以看出,安装阻尼器后悬臂梁的振幅衰减很快,说明磁性液体阻尼器可有效抑制悬臂梁的振动。在相同的振动频率和初始振幅下,悬臂梁的振动在安装阻尼器之前从振幅0.015 m衰减至0 m附近,至少需要100 s,而安装阻尼器后完全衰减需要35 s左右,振动时间缩短约65%。

3.2.3 对数衰减率的变化规律

根据实验结果可知,悬臂梁在安装磁性液体阻尼器后的阻尼特性与悬臂梁的振动频率和初始振幅的大小有关。以下将悬臂梁在安装阻尼器前、后的对数衰减率分别按不同初始振幅和不同频率的工况予以比较。

图8为在给定悬臂梁自由端的不同初始振幅时,安装阻尼器前、后的悬臂梁对数衰减率随频率的变化曲线。由图8(a)~8(c)可知,对于3种不同初始振幅的振动,在实验的频率区域内,安装阻尼器后的悬臂梁对数衰减率均是先随着频率的增大而增大,而后随着频率的增大而减小,然后再随着频率的增大而增大,在频率为5.75 Hz时达到最大值。

可见,对于3种不同的初始振幅,在实验的频率范围内,安装阻尼器后的悬臂梁对数衰减率随频率大小的变化规律非常相似,均是先增大后减小,然后再增大,且均存在着一最大对数衰减率差值,计算后的最大对数衰减率差值及其对应的频率值如表2所示。由表2可知,磁性液体阻尼器对于长度为0.7 m的悬臂梁有最好的减振效果。

表2 不同初始振幅下的最大对数衰减率差值及其对应的频率值

振幅/mm	f/Hz	最大对数衰减率差值
5	5.75	0.038 7
10	5.75	0.039 9
15	5.75	0.036 2

由分析可知,在3种初始振幅下对于不同长度的悬臂梁,安装阻尼器后的对数衰减率都大于安装前的对数衰减率,说明磁性液体阻尼器对不同长度的悬臂梁振动都具有良好的抑制作用,但抑制作用的强弱不同,当悬臂梁的长度为0.7 m时,阻尼器对悬臂梁的振动有最好的减振效果。

图9为在给定悬臂梁的不同长度时,安装阻尼器前、后的悬臂梁对数衰减率随振幅的变化曲线。选择3种不同长度的铜板进行分析,在实验的振幅区

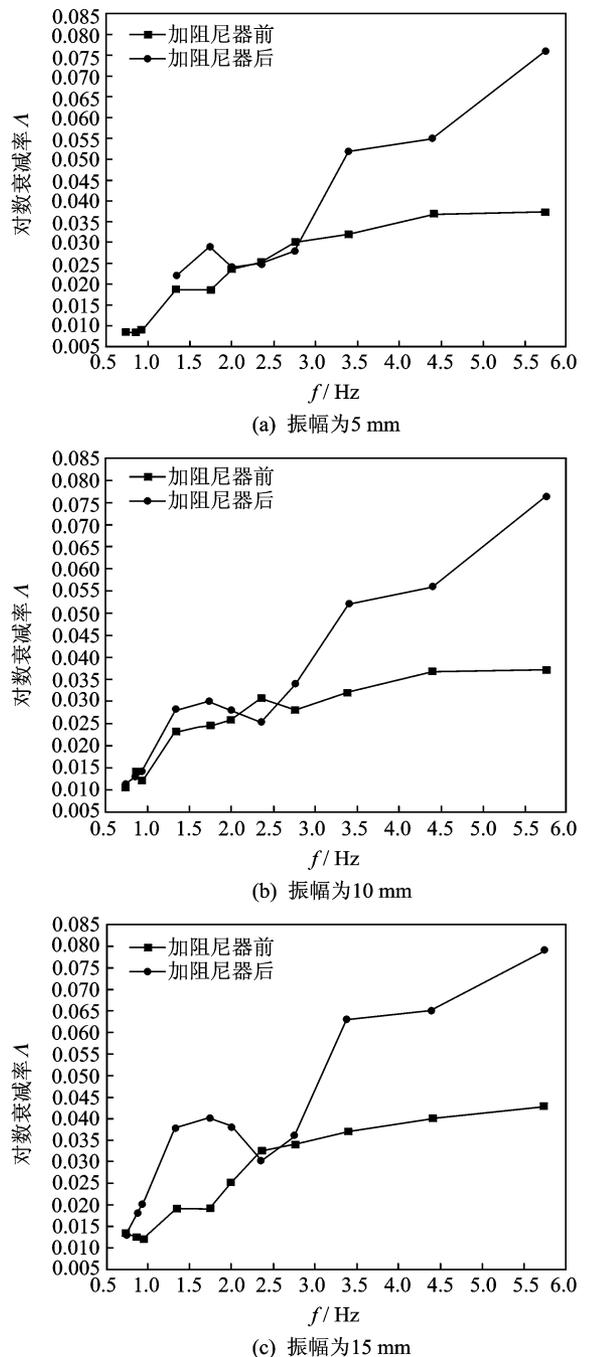
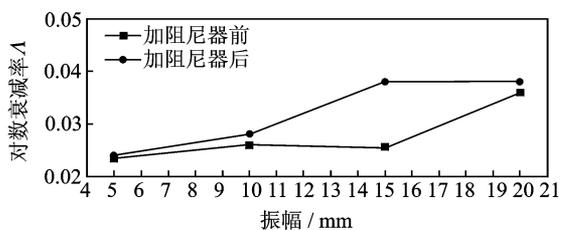


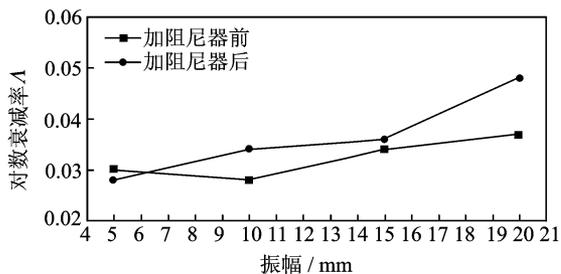
图8 不同初始振幅下对数衰减率随频率的变化曲线

域内安装阻尼器后的悬臂梁对数衰减率都大于安装前的值,表明磁性液体阻尼器对悬臂梁自由端处于不同初始振幅的振动都有减振效果,且安装阻尼器后的悬臂梁对数衰减率均随着振幅的增大而增大,说明振幅越大,悬臂梁振动的能量衰减越快。

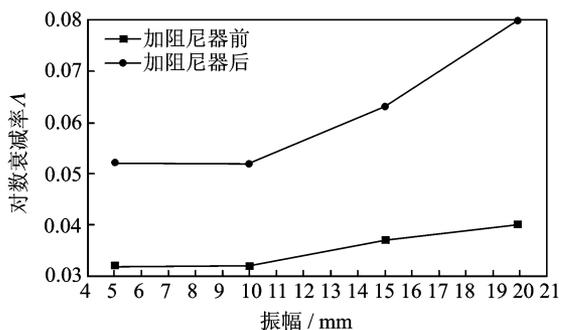
综上所述,实验测得的对数衰减率与悬臂梁的长度和振幅之间都具有良好的相关规律性,揭示了本研究中磁性液体阻尼器初步可适用的悬臂梁长度和振幅范围,为理论及实验研究奠定了基础。



(a) 频率为2 Hz(对应悬臂梁长度为1.2 m)



(b) 频率为2.76 Hz(对应悬臂梁长度为1.0 m)



(c) 频率为3.39 Hz(对应悬臂梁长度为0.9 m)

图9 不同频率下对数衰减率随振幅的变化曲线

4 结论

1) 选用悬臂的黄铜板作为振动源,可以满足磁性液体阻尼减振实验的频率和振幅要求。

2) 在悬臂梁的长度为 1.3 m、初始振幅为 15 mm、环境温度为 22 °C 的实验条件下,安装磁性液体阻尼器,悬臂梁的振动时间比安装前缩短了约 65%,减振效果显著。

3) 在实验条件下安装阻尼器后的悬臂梁对数衰减率随频率的变化规律是先增大后减小,然后再增大;安装阻尼器后的悬臂梁对数衰减率随着振幅的增大而增大。

4) 在实验条件下磁性液体阻尼器对于不同长度的悬臂梁都起到了很好的减振作用,当悬臂梁的长度为 0.7 m 时,阻尼器的减振效果最好。

5) 在实验条件下磁性液体阻尼器对于不同初始振幅的悬臂梁振动都具有良好的减振效果。

参 考 文 献

- [1] Rosensweig R E. The fascinating magnetic fluids[J]. New Scientist, 1966, 20: 146-148.
- [2] Aviation Corporation Missiles, Space and Electronics Group. Final report-feasibility study and model development for a ferrofluid viscous damper [R]. Greenbelt, Maryland: [s. n.], 1967.
- [3] Nakatsuka K, Yokoyama H, Shimoiizaka J. Damper application of magnetic fluid for a vibration isolating table [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1987, 65: 359-362.
- [4] Masato A, Yozo F, Shuji K. Active tuned liquid damper (TLD) with magnetic fluid[C]// Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. Bellingham: Smart Structures and Materials, 1998, 3329: 620-623.
- [5] Bashtovoi V G, Kabachnikov D N, Kolobov A Y. Research of the dynamics of a magnetic fluid dynamic absorber[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 252: 312-314.
- [6] Rosensweig R E. Fluidmagnetic buoyancy[J]. AIAA Journal, 1966, 4(10): 1751-1758.
- [7] 李德才. 磁性液体理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 122-132.
- [8] Lance Technologies, Inc. ULT27 built-in IC strain accelerometers [EB/OL]. (2007-01-01). <http://www.lancerec.com/prodout/lt07.htm>. [2011-03-01].
- [9] Data Acquisition Instruments, Inc. Data acquisition products [EB/OL]. (2007-01-01). <http://www.dataq.com/products/index.htm>. [2011-03-01].



第一作者简介:冯振华,男,1983年11月生,助理工程师。主要从事机电液磁一体化的理论及应用研究。
E-mail: fzhhua@yahoo.cn