

粘滞阻尼器抑制斜齿圆柱齿轮轴系振动实验研究^①

路凯华^{②*} 何立东^{**} 马 靓^{***} 闫 伟^{**} 柏 赞^{*}

(^{*}北京中冶设备研究设计总院有限公司 北京 100029)

(^{**}北京化工大学机电工程学院 北京 100029)

(^{***}中国运载火箭技术研究院 北京 100076)

摘要 设计了一种剪切型粘滞阻尼器结构,研究其对斜齿圆柱齿轮轴系的振动控制规律。对该剪切型粘滞阻尼器的结构特点和减振耗能特性进行了介绍,在此基础上,搭建了一级斜齿圆柱齿轮传动实验台,实验研究了粘滞阻尼器对斜齿圆柱齿轮轴系的减振特性。实验结果表明,在较宽的转速范围区间,粘滞阻尼器可以同时抑制斜齿圆柱齿轮轴系水平和轴向的振动,有效改善齿轮副的啮合状态,衰减其冲击振动,减小振动激励。粘滞阻尼器可以大幅抑制斜齿圆柱齿轮系统啮合频率的高次谐波成分的振动。阻尼器不同安装位置的振动数据表明,在主、从动轴上同时安装粘滞阻尼器的减振效果要优于单轴安装阻尼器,因此,在实际应用中,要尽可能将粘滞阻尼器安装于振动较大的轴系,以获得理想的减振效果。

关键词 粘滞阻尼器; 斜齿圆柱齿轮; 轴系; 减振

0 引言

齿轮传动结构简单、运行稳定、传动效率高,是机器设备中常见的动力传输机构。斜齿圆柱齿轮传动是齿轮传动中常见的一种结构,在高转速、重载荷机械中较为常见。斜齿轮传动传输效率高,振动噪声相对较小,但工作条件恶劣时,在内部和外部的激励下也将产生较大的振动和噪声,严重时可能造成设备损坏。齿轮系统的减振降噪方法一直是比较热门的研究课题,可将目前的研究结果归结为 3 大类:第一,从振动源处采取措施来减小振动激励,如优化设计齿轮参数、齿廓修形^[1-2],在齿轮轮体上粘贴阻尼材料^[3-4],在轮体或轴系上设计阻尼耗能结构^[5-6]等;第二,在轴承部位采取隔振措施减小振动传递,如在轴承外圈安装阻尼合金制作的弹性阻尼衬套^[7],在轴承支承部位安装整体式挤压油膜阻尼

器^[8-9]等;第三,采用高阻尼材料制造箱体,或进行箱体结构优化以减小其振动响应^[10-11]。优化设计方法费时费力,计算资源耗费较大;在轮体上粘贴阻尼材料不仅增加轮体重量,而且减振频带较窄;在轴承外圈安装弹性阻尼套需要改变箱体结构,同时要考虑支承强度的问题。

粘滞性阻尼器作为一种被动耗能装置,主要通过装置中的运动部件在阻尼液中作剪切运动产生阻尼力,从而来耗散系统的振动能量。粘滞性阻尼器在交通和建筑行业的结构减振中应用较多,此外,文献[12]显示粘滞阻尼器在管道系统的振动控制方面也表现颇佳。粘滞阻尼器的动力特性主要取决于阻尼液的性能和阻尼装置的结构。通常粘滞阻尼器的阻尼液需要具备以下特点:较高的黏度,可压缩性小,耐高温稳定性好,不易挥发。黄秀金等人^[13-14]研究了粘滞阻尼器对直齿圆柱齿轮轴系振动的抑制规律,表明粘滞阻尼器对直齿轮轴系的径向振动有

① 国家科技重大专项(2017-IV-0010-0047)资助项目。

② 男,1991 年生,博士,工程师;研究方向:冶金熔渣干法粒化与余热回收;联系人,E-mail: kaihualu1991@163.com
(收稿日期:2020-09-07)

较好的抑制效果,且能实现宽频减振。

鉴于粘滞阻尼器优良的阻尼耗能性能,本文考虑将其用于斜齿圆柱齿轮轴系的振动控制。文中设计了一种适用于齿轮轴系的剪切型粘滞阻尼器结构,这种阻尼器不改变原有斜齿轮轴系支承结构,通过轴承将轴系的振动能量传递到阻尼器剪切元件,依靠剪切元件在阻尼液中的运动耗散振动能量。搭建了一级斜齿轮传动实验台,实验研究了不同转速、不同阻尼器安装工况下斜齿轮轴系径向、轴向的振动情况,获得了粘滞阻尼器对斜齿轮系统的振动抑制规律,以期为斜齿圆柱齿轮系统减振降噪提供一种新方法。

1 粘滞阻尼器结构及减振耗能原理

参考管道用粘滞阻尼器装置^[12],开发了一种轴系用剪切型粘滞阻尼器结构,如图 1 所示。该阻尼器的基本组成包括活塞、壳体、阻尼液和滚动轴承。滚动轴承由螺栓固定在活塞上,活塞浸没在壳体的阻尼液中。阻尼液选用二甲基硅油,二甲基硅油黏度较大,且热稳定性高,不易变质,适合做粘滞阻尼器的阻尼液。

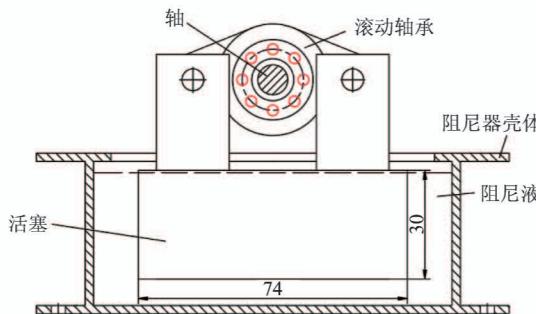


图 1 粘滞阻尼器结构

使用时,阻尼器固定在基础上,通过滚动轴承与齿轮轴系连接。滚动轴承和轴系是过盈配合,这样可以实现在不影响轴系转动的同时将其径向和轴向振动传递给阻尼器活塞,从而带动阻尼器活塞剪切阻尼液产生阻尼力,将振动能量转化为热量散失掉。该粘滞阻尼器实质上是一种耗能或能量转化装置,使用时只需将其安装在传动轴上,不改变齿轮轴系原有的支承结构。

2 粘滞阻尼器减振斜齿轮轴系机理

基于齿轮动力学^[15]和牛顿定律,不考虑齿轮的齿面摩擦,建立斜齿圆柱齿轮系统的弯-扭-轴啮合耦合型振动分析模型,如图 2 所示,齿轮螺旋角为 β 。

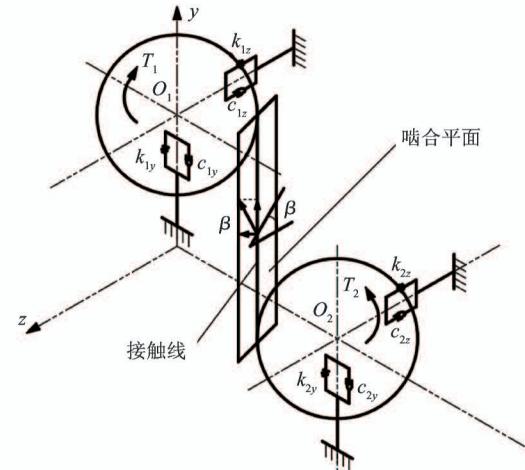


图 2 斜齿圆柱齿轮系统振动模型

由图 2,得到系统的运动微分方程为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + c_{1y} \dot{y}_1 + k_{1y} y_1 = -F_y \\ m_1 \ddot{z}_1 + c_{1z} \dot{z}_1 + k_{1z} z_1 = F_z \\ I_1 \ddot{\theta}_1 = -T_1 - F_y R_1 \\ m_2 \ddot{y}_2 + c_{2y} \dot{y}_2 + k_{2y} y_2 = F_y \\ m_2 \ddot{z}_2 + c_{2z} \dot{z}_2 + k_{2z} z_2 = -F_z \\ I_2 \ddot{\theta}_2 = -T_2 - F_y R_2 \end{cases} \quad (1)$$

即斜齿圆柱齿轮系统同时存在径向、轴向和扭转振动,式中 m_i 、 I_i ($i=1,2$) 分别为齿轮的质量和转动惯量, c_{1y} 、 c_{2y} 为齿轮 1、2 的径向振动阻尼系数, k_{1y} 、 k_{2y} 为齿轮 1、2 的径向振动刚度系数, c_{1z} 、 c_{2z} 为齿轮 1、2 的轴向振动阻尼系数, k_{1z} 、 k_{2z} 为齿轮 1、2 的轴向振动刚度系数, y_i 、 z_i 和 θ_i ($i=1,2$) 分别为齿轮在径向、轴向的振动位移和扭转振动位移, F_y 和 F_z 分别为径向动态啮合力和轴向动态啮合力, R_i ($i=1,2$) 是齿轮的基圆半径, T_1 和 T_2 分别是驱动力矩和阻力矩。

粘滞阻尼器不改变斜齿轮轴系的支承结构,可以等效为轴系支承阻尼,以从动轴安装粘滞阻尼器

为例建立安装阻尼器后的斜齿圆柱齿轮振动分析模型如图 3 所示。

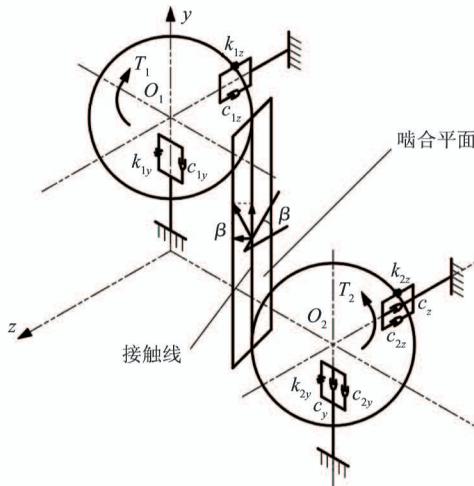


图 3 斜齿圆柱齿轮系统振动模型(从动轴安装阻尼器)

根据图 3 建立系统安装阻尼器后的运动微分方程为

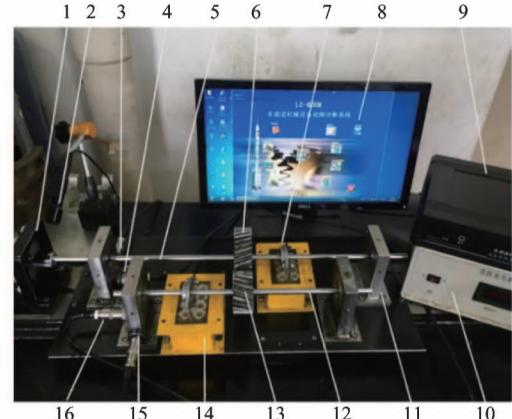
$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + c_{1y} \dot{y}_1 + k_{1y} y_1 = -F_y \\ m_1 \ddot{z}_1 + c_{1z} \dot{z}_1 + k_{1z} z_1 = F_z \\ I_1 \ddot{\theta}_1 = -T_1 - F_y R_1 \\ m_2 \ddot{y}_2 + (c_{2y} + c_y) \dot{y}_2 + k_{2y} y_2 = F_y \\ m_2 \ddot{z}_2 + (c_{2z} + c_z) \dot{z}_2 + k_{2z} z_2 = -F_z \\ I_2 \ddot{\theta}_2 = -T_2 - F_y R_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 c_y, c_z 分别为轴系安装粘滞阻尼器后系统在径向和轴向获得的附加振动阻尼系数。对比式(1)和式(2)可知,粘滞阻尼器的安装使得系统的径向振动位移 y_i ($i=1,2$) 和轴向振动位移 z_i ($i=1,2$) 减小,表明粘滞阻尼器可以有效降低斜齿圆柱齿轮系统的径向和轴向振动,下文将通过实验进行验证。

3 实验装置介绍

图 4 所示是搭建的一级斜齿圆柱齿轮传动实验台,两根轴均是直径为 10 mm 的光轴,分别支承在一对角接触球轴承上。主、从动齿轮分别通过胀紧套安装在两根轴上,齿轮副参数如表 1 所示。主动轴跨距设计为 470 mm,从动轴跨距为 330 mm,主动轴通过柔性联轴器和一台直流调速电机连接,电机转速由转速控制器调节。4 个加速度传感器分别吸

附在两根齿轮轴靠近电机侧的轴承座上,用来采集其水平和轴向的振动数据。采集后的振动数据送 LC-8008 故障诊断与振动监测系统进行分析、存储和显示。轴系转速由光电传感器测量。齿轮副旋转过程采用滴油方式对其进行润滑。实验装置中部分元器件的型号如表 2 所示。



1-电机;2-光电转速传感器;3-加速度传感器 1;4-加速度传感器 2;5-主动轴;6-主动齿轮;7-粘滞阻尼器 1;8-计算机;9-LC8008 故障诊断与振动监测系统;10-转速控制器;11-轴承座;12-从动轴;13-从动齿轮;14-粘滞阻尼器 2;15-加速度传感器 3;16-加速度传感器 4

图 4 斜齿圆柱齿轮传动实验台

表 1 齿轮副参数

齿轮参数	数值
主动轮齿数 Z_1	32
从动轮齿数 Z_2	20
传动比 i	1.6
法面模数/mm	3
压力角/ $^\circ$	20
螺旋角 $\beta/^\circ$	16
理论中心距/mm	80

表 2 实验装置中部分元器件型号

元器件	型号
角接触球轴承	7200AC
加速度传感器	F258
光电转速传感器	LG-930
直流调速电机	90SY56-G

4 结果与讨论

设置 LC-8008 系统的分析频率为 2 kHz,采样点

数为 1024。实验测量了有、无阻尼器两种工况下斜齿轮轴系的振动,对比研究粘滞阻尼器对斜齿圆柱齿轮轴系的振动控制规律。

4.1 阻尼器抑制斜齿轮轴系振动分析

如图 5 所示,首先将粘滞阻尼器安装于从动轴、从动齿轮左侧 78 mm 处。调节转速控制器从而改变电机提供的转速,实验转速范围为主动轴 $n_1 = 500 \sim 1800 \text{ r/min}$,从动轴 $n_2 = n_1$, $i = 800 \sim 2880 \text{ r/min}$ 。图 6 是斜齿轮系统轴承座各个测点的加速度峰值随转速的变化曲线,转速每间隔 100 r/min 记录一次数据。

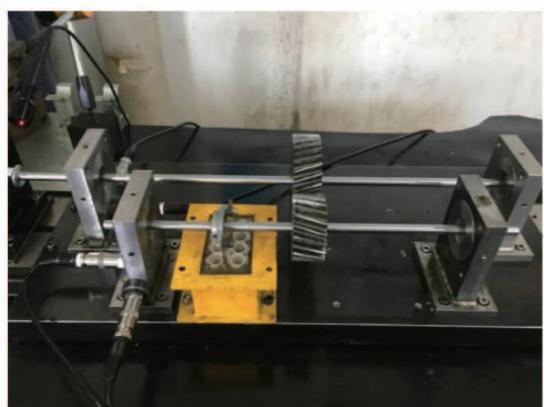
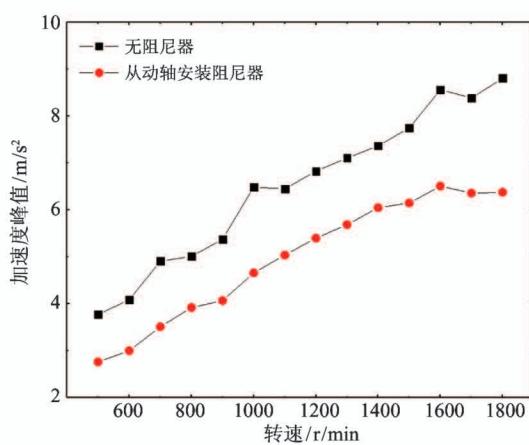
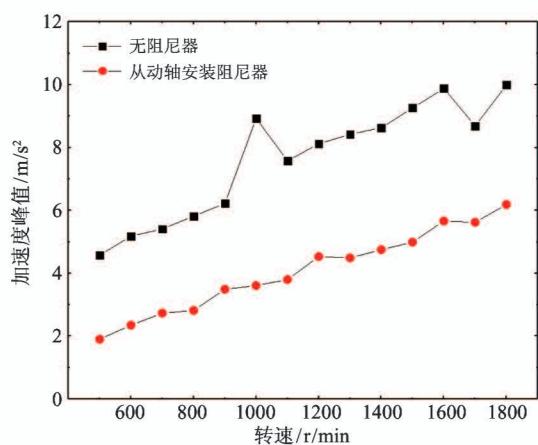


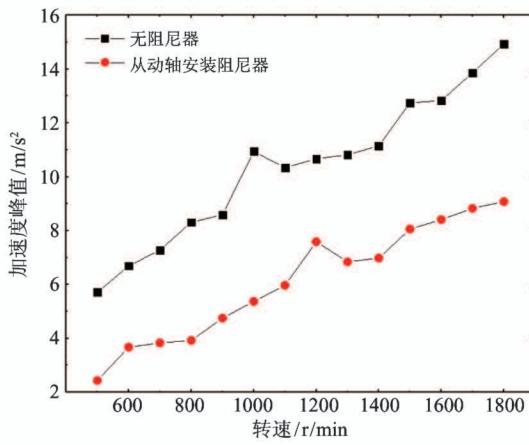
图 5 斜齿圆柱齿轮传动实验台(仅从动轴安装粘滞阻尼器)



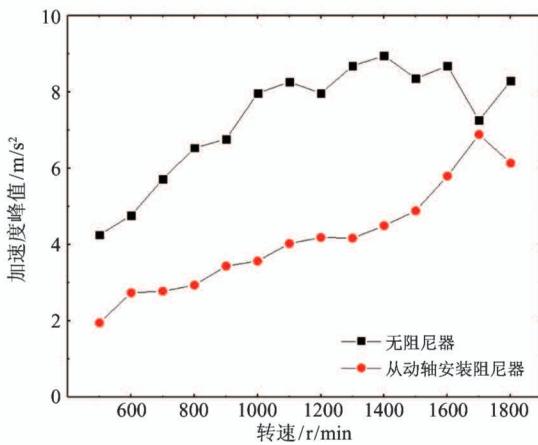
(a) 主动轴水平方向加速度峰值



(b) 主动轴轴向加速度峰值



(c) 从动轴水平方向加速度峰值



(d) 从动轴轴向加速度峰值

图 6 轴承座测点加速度峰值随转速变化曲线

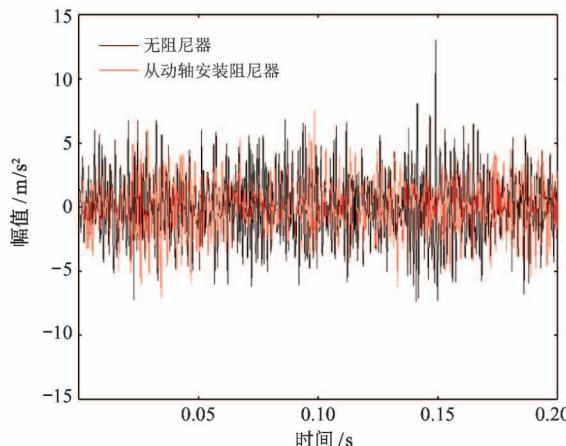
由以上振动数据可知,斜齿轮轴系的振动值随转速的增大呈增大的趋势。从动轴安装粘滞阻尼器后,测点振动值得到了明显的降低。在整个实验转速范围内,粘滞阻尼器对斜齿轮轴系各个测点的振

动都有良好的振动抑制效果,说明粘滞阻尼器不仅对斜齿轮系统的径向振动有较好的减振效果,对其轴向振动也可以很好地进行控制。以主动轴转速 500 r/min 工况下从动轴的振动为例,安装阻尼器前

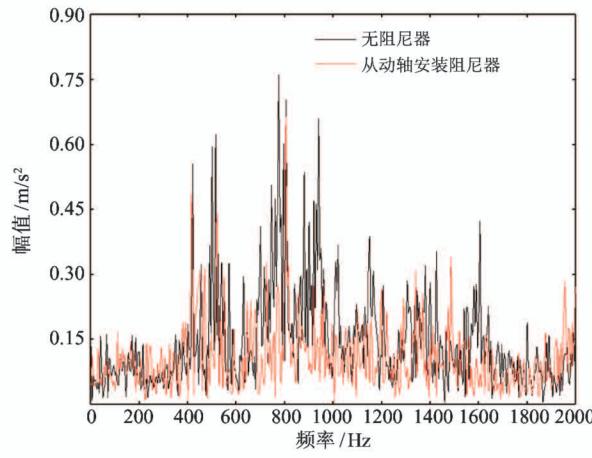
水平和轴向测点的振动值分别为 5.71 m/s^2 和 4.26 m/s^2 , 安装阻尼器后对应的振动值分别为 2.43 m/s^2 和 1.95 m/s^2 , 振动降幅分别为 57.4% 和

54.2%。

下面从时域和频域角度研究粘滞阻尼器对斜齿轮系统的减振特性, 图7~图10分别是主动轴转速

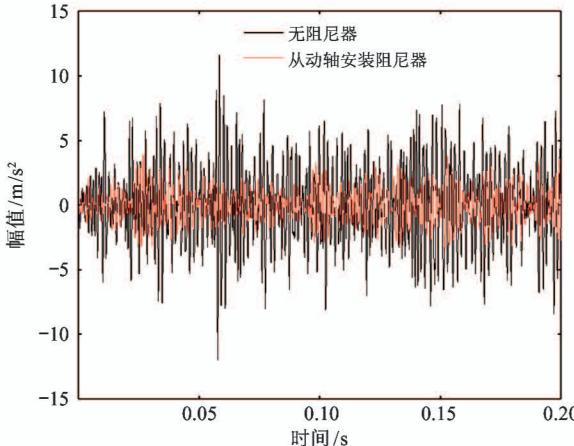


(a) 时域波形

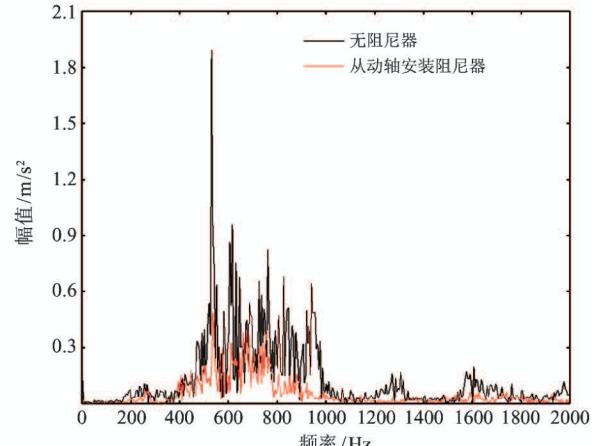


(b) 频谱

图7 主动轴水平测点

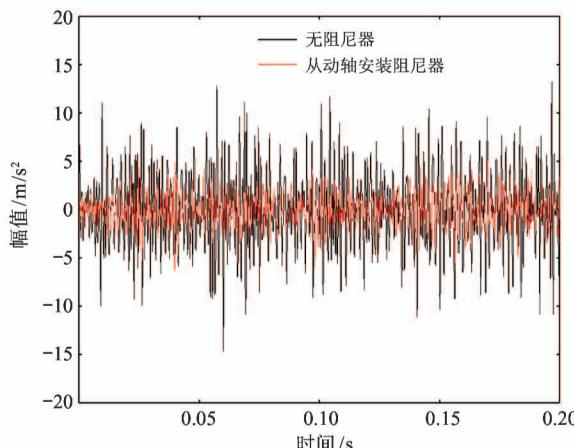


(a) 时域波形

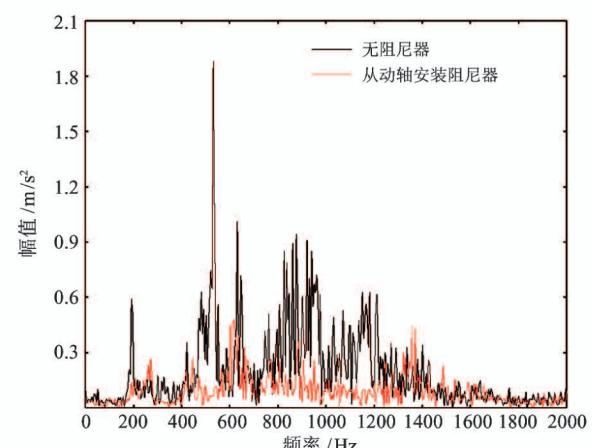


(b) 频谱

图8 主动轴轴向测点

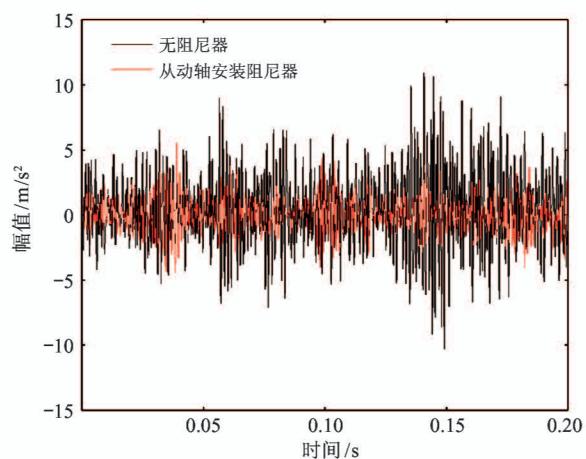


(a) 时域波形

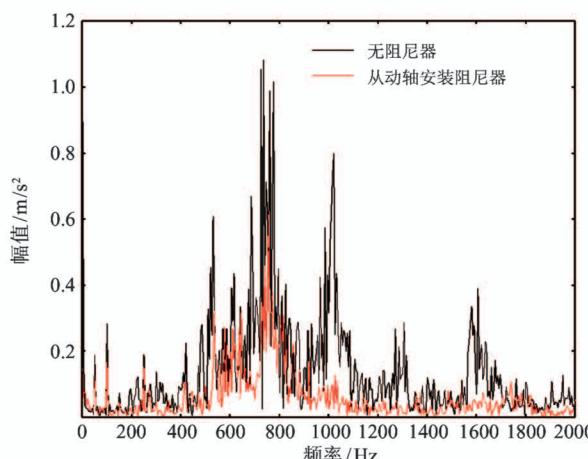


(b) 频谱

图9 从动轴水平测点



(a) 时域波形



(b) 频谱

图 10 从动轴轴向测点

为 500 r/min 工况下斜齿轮轴系 4 个测点的振动时域波形和频谱图。

根据图 7(a)、图 8(a)、图 9(a) 和图 10(a) 所示时域波形, 斜齿轮传动过程中出现较为明显的冲击振动, 安装粘滞阻尼器可以衰减其冲击振动, 表明在从动轴上安装粘滞阻尼器有利于改善齿轮副的啮合状态, 减小齿轮副的啮合激励, 从而降低了两根轴系的振动。

根据齿轮副参数可知主动轴转速 500 r/min 下斜

齿轮系统的啮合频率为 $f_r = f_1 \cdot Z_1 = f_2 \cdot Z_2 = 267$ Hz。图 7(b)、图 8(b)、图 9(b) 和图 10(b) 的频域分析表明, 该斜齿圆柱齿轮传动系统振动频率成分较多, 系统啮合频率振动较小, 啮合频率的高次谐波(2 倍、3 倍)振动较大, 且边频较宽。安装阻尼器后, 这些幅值较高频率成分的振动得到了较好的抑制, 这些频率成分的振动值如表 3 所示。因为电机转速有一定的波动, 实验倍频成分相对理论值有一定偏差。

表 3 啮合频率倍频处振动幅值

f / Hz	测点	不加阻尼器/ m/s^2	从动轴加阻尼器/ m/s^2	降幅/%
530	主动轴水平	0.624	0.223	64.3
	主动轴轴向	1.895	0.206	89.1
	从动轴水平	1.884	0.065	96.5
	从动轴轴向	0.609	0.148	75.7
805	主动轴水平	0.602	0.097	83.9
	主动轴轴向	0.475	0.160	66.3
	从动轴水平	0.564	0.250	55.7
	从动轴轴向	0.368	0.229	37.8

由表 3 两种工况下的振动数据对比可知, 安装粘滞阻尼器能使各个测点 2 倍啮合频率和 3 倍啮合频率处的振动幅值有较大程度降低, 表明粘滞阻尼器具有良好的阻尼减振特性, 能抑制齿轮传动主要频率成分处的振动。

4.2 阻尼器安装位置对减振效果的影响

4.1 节的实验工况是在从动轴上安装粘滞阻尼

器, 下面通过实验研究阻尼器安装位置对其减振特性的影响。在上述研究的基础上, 在相同实验转速范围内测量粘滞阻尼器安装于主动轴及同时安装于主、从动轴工况下斜齿轮轴系的振动。阻尼器安装主动轴时, 置于齿轮右侧 78 mm 处, 如图 11 所示; 在主、从动轴上同时安装阻尼器时, 阻尼器 1 置于齿轮右侧 78 mm 处, 阻尼器 2 置于齿轮左侧 78 mm 处,

如图4所示。

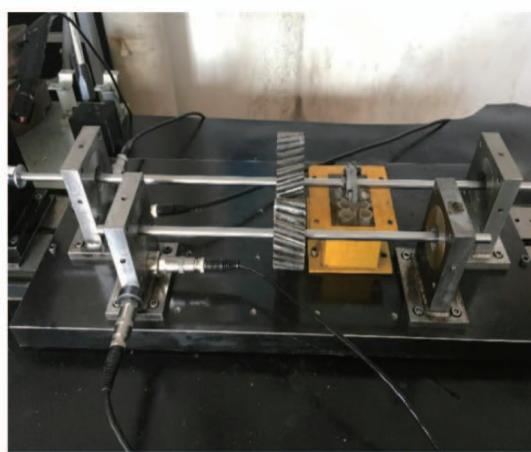


图11 斜齿圆柱齿轮传动实验台(仅主动轴安装粘滞阻尼器)

同样设置主动轴的实验转速区间为 $n_1 = 500 \sim 1800 \text{ r/min}$, 分别测量了主、从动轴水平和轴向的振动加速度峰值随转速的变化, 实验结果如图12所示。

从上述实验数据可以看出, 无论是主动轴安装粘滞阻尼器, 还是从动轴安装粘滞阻尼器, 对不同转速下斜齿圆柱齿轮轴系的水平和轴向振动均有较好的抑制。在从动轴上安装粘滞阻尼器的减振效果要优于在主动轴安装阻尼器, 这是因为从动轴的振幅相比主动轴要大一些, 较大的振幅更能使阻尼器产生较大的粘滞阻尼力, 从而使轴系振动降幅更大。相比单轴安装粘滞阻尼器, 两轴同时安装阻尼器的减振效果更好, 这是因为两轴安装粘滞阻尼器可以

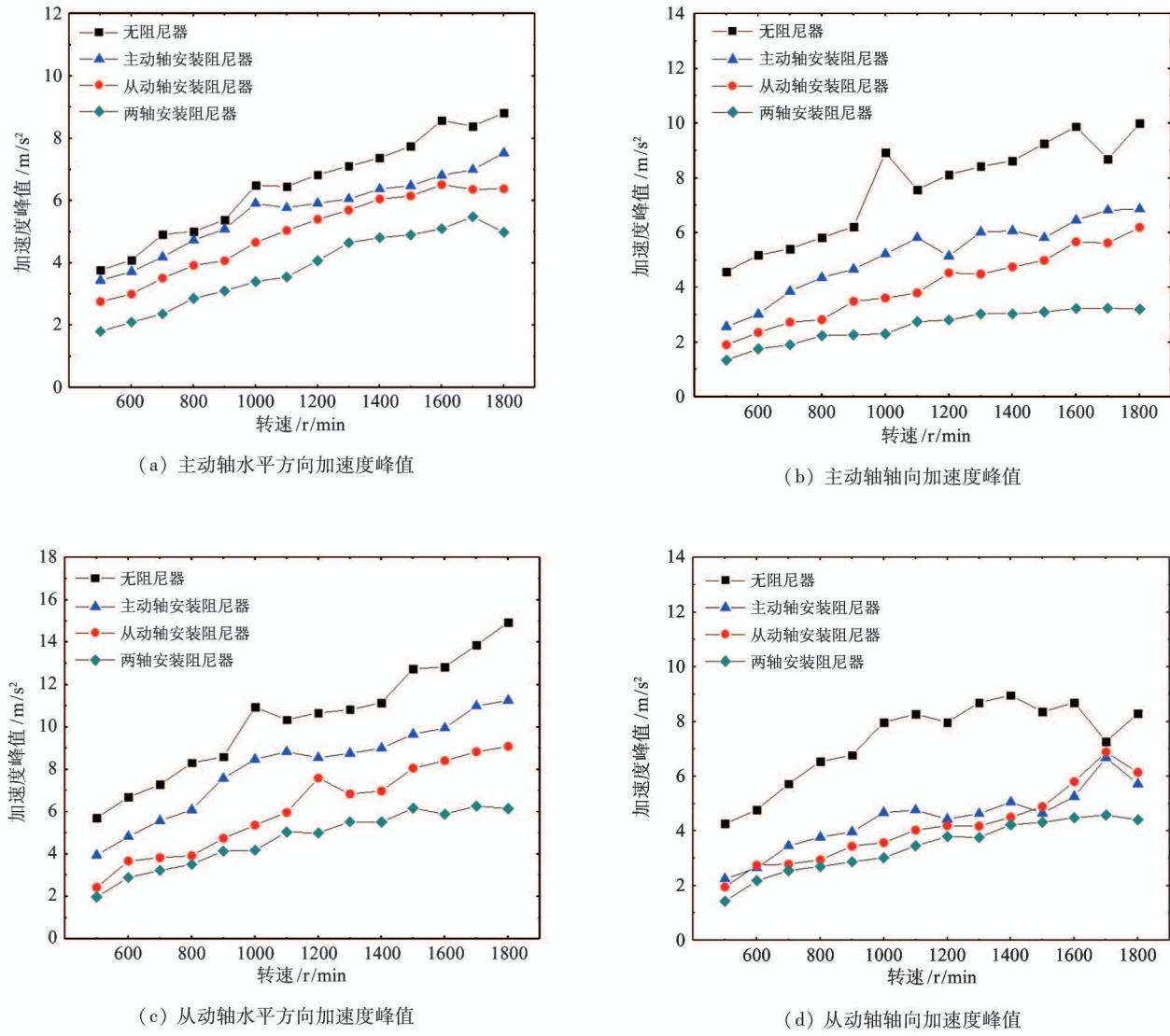


图12 轴承座测点加速度峰值随转速变化曲线

在两轴上同时产生阻尼抑制力,从而更大幅度地降低轴系振动。如主动轴转速为 600 r/min 时,主动轴轴向测点振动的原始值为 5.18 m/s^2 ,在主动轴上安装粘滞阻尼器、从动轴上安装粘滞阻尼器及两轴安装粘滞阻尼器后的振动值分别为 3.02 m/s^2 、 2.35 m/s^2 和 1.76 m/s^2 ,振动降幅分别为 41.7%、54.6% 和 66.0%,振动降幅逐渐增大。因此,在实际应用中,应尽可能将粘滞阻尼器安装于振动较大的轴系,以获得理想的减振效果。

5 结论

本文将一种剪切型粘滞阻尼器用于斜齿圆柱齿轮系统的振动控制,通过实验研究了其减振特性,得到如下结论。

(1) 在较宽的转速范围区间,粘滞阻尼器可以同时抑制斜齿圆柱齿轮轴系水平和轴向的振动。

(2) 粘滞阻尼器能够改善斜齿圆柱齿轮副的啮合状态,衰减其冲击振动,减小振动激励。

(3) 粘滞阻尼器可以大幅抑制斜齿圆柱齿轮系统啮合频率的高次谐波成分的振动。

(4) 主、从动轴上同时安装粘滞阻尼器的减振效果要优于单轴安装阻尼器。在实际应用中,要尽可能将粘滞阻尼器安装于振动较大的轴系,以获得理想的减振效果。

本文所述研究成果拓宽了粘滞性阻尼器的应用领域,也为斜齿圆柱齿轮系统的减振降噪设计提供了一种新技术。

参考文献

- [1] Eritenel T, Parker R G. Nonlinear vibration of gears with tooth surface modifications [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2013, 135(5): 051005
- [2] Hu Z H, Tang J Y, Zhong J, et al. Effects of tooth profile modification on dynamic responses of a high speed gear-rotor-bearing system [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 76: 294-318
- [3] 王庆洋,曹登庆,杨军波. 阻尼环对齿轮系统轴向振动的减振特性研究 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(6): 190-194
- [4] 毛炳秋,林莉,曹挺杰. 采用阻尼环降低齿轮传动振动噪声的研究 [J]. *机械设计与研究*, 2005, 21(1): 47-49
- [5] 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
- [6] Guan Y H, Lim T C, Shepard W S, et al. Experimental study on active vibration control of a gearbox system [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 282(3): 713-733
- [7] 戴光昊,于晓辉,尹逊民,等. 阻尼支撑圈在齿轮箱中的应用 [J]. *舰船科学技术*, 2014, 36(9): 141-145
- [8] Lu K H, He L D, Zhang Y P, et al. Experimental study on vibration suppression of gear shaft misalignment with ISFD [J]. *High Technology Letters*, 2019, 25(1): 17-27
- [9] 路凯华,何立东,闫伟,等. 整体式挤压油膜阻尼器在齿轮箱中的应用 [J]. *振动、测试与诊断*, 2020, 40(4): 765-774
- [10] Abbes M S, Fakhfakh T, Haddar M, et al. Effect of transmission error on the dynamic behavior of gearbox housing [J]. *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 34: 211-218
- [11] Zhu C C, Lu B, Song C S, et al. Dynamic analysis of a heavy duty marine gearbox with gear mesh coupling [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2009, 223(11): 2531-2547
- [12] 余栋栋,何立东,冀沛尧. 阻尼减振技术在管道上的应用研究 [J]. *噪声与振动控制*, 2017, 37(6): 186-189
- [13] 黄秀金,何立东,夏雪然. 从动轴粘滞阻尼器安装对齿轮轴系减振的实验研究 [J]. *机电工程*, 2014, 31(12): 1551-1554
- [14] 黄秀金,何立东,夏雪然,等. 齿轮轴系黏滞阻尼器减振技术的实验研究 [J]. *机械传动*, 2015, 39(2): 99-103
- [15] 李润方,王建军. 齿轮系统动力学 [M]. 北京:科学出版社, 1996: 170-174

Experimental study on vibration suppression of helical cylindrical gear shafts with viscous damper

Lu Kaihua^{*}, He Lidong^{**}, Ma Liang^{***}, Yan Wei^{**}, Bai Yun^{*}

(^{*} Beijing Metallurgical Equipment Research Design Institute Co. Ltd., Beijing 100029)

(^{**} College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)

(^{***} China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076)

Abstract

A shear viscous damper structure is designed to study the vibration control law of helical cylindrical gear shafts. The structural characteristics and energy dissipation characteristics of the shear viscous damper are introduced. On this basis, a first-grade helical cylindrical gear transmission test-bed is built, and the vibration reduction characteristics of helical cylindrical gear shafts with viscous damper are experimentally studied. The experimental results show that the viscous damper can suppress the horizontal and axial vibration of helical cylindrical gear shafts at the same time in a wide speed range, effectively improve the engaging status of the gear pair, attenuate the impact vibration and reduce the vibration excitation. This viscous damper can greatly reduce the vibration of high-order harmonic components of the meshing frequency of helical cylindrical gear system. The vibration data of different installation positions of the damper show that the damping effect of installing viscous dampers on the driving and driven shafts at the same time is better than that of the single shaft's damper installation. Therefore, in practical application, the viscous damper should be installed on the shaft with larger vibration as much as possible to obtain the ideal vibration reduction effect.

Key words: viscous damper, helical cylindrical gear, shaft, vibration reduction