

DOI: 10.7652/xjtuxb201406022

磁流变液双质量飞轮扭振减振特性研究

毛阳, 陈志勇, 史文库, 邬广铭, 王世朝, 孙宁
(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 130022, 长春)

摘要: 为检验设计的磁流变液双质量飞轮对传动系扭振的减振特性, 基于 AMESim 建立了磁流变液双质量飞轮的仿真模型, 获得其在不同扭转激励幅值、不同激励频率以及不同电流下的动刚度和滞后角曲线, 并通过扭转试验台架验证了模型的准确性。进而结合其动态特性可由电流控制的特性搭建了控制模型, 对其进行发动机台架试验, 分别获得怠速、匀速、加速、减速、点火及熄火工况时磁流变液双质量飞轮对传动系扭振的衰减情况, 并与普通双质量飞轮进行了对比。结果表明: 磁流变液双质量飞轮在各个工况下对传动系扭振的衰减性能都优于普通双质量飞轮。

关键词: 磁流变液; 双质量飞轮; 动态特性; 扭振; 减振特性

中图分类号: U463.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)06-0127-07

Torsional Vibration Damping Characteristics of Magneto-Rheological Fluid Dual Mass Flywheel

MAO Yang, CHEN Zhiyong, SHI Wenku, WU Guangming, WANG Shichao, SUN Ning
(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: To investigate torsional vibration damping characteristics of magneto-rheological fluid dual mass flywheel (MRF-DMF) in power train, the dynamic stiffness and loss angle under different conditions of excitation amplitudes, excitation frequencies and currents are gained from MRF-DMF model constructed by AMESim and verified on torsion bench. By combining the dynamic characteristics driven by different currents, the controlling model is established and tested on engine bench. The damping characteristics of MRF-DMF in the cases of idle, constant speed, speed up, slow down, ignition and stalling are obtained and compared with the ordinary dual mass flywheel (DMF). It indicates that the MRF-DMF in damping the power train torsional vibration outperforms the ordinary DMF in all operations.

Keywords: magneto-rheological fluid; dual mass flywheel; dynamic characteristic; torsional vibration; damping characteristic

为更好地控制车辆动力传动系统扭转振动和噪声, 双质量飞轮扭转减振器已经逐步取代了离合器从动盘式扭转减振器, 成为近 20 年发展起来的一种更为有效的新型扭转减振器^[1-3]。双质量飞轮扭转减振器克服了离合器从动盘式扭转减振器的局限性, 不仅可以大幅度改变减振器两侧的转动惯量分配, 还能增大减振器的工作转角并降低其扭转刚度,

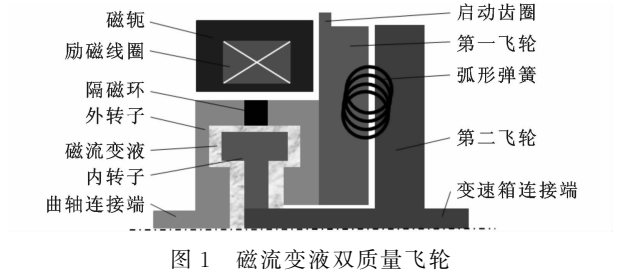
从而实现对车辆传动系扭振更好的控制^[4-6]。

国内已经有多位学者对双质量飞轮进行了系统的研究, 并且取得了一定的成果^[7-11]。如今对双质量飞轮的研究已经较为成熟, 但由于车辆在不同工况下对双质量飞轮的扭转阻尼有着不同的要求, 而普通双质量飞轮的扭转特性无法根据不同工况进行调节, 这严重制约了双质量飞轮对传动系扭振的衰

减效果。本文结合磁流变液在磁场作用下流变特性可瞬间发生变化的特性,设计并制作了新型扭转减振器-磁流变液双质量飞轮,通过仿真和试验曲线证实了其动态特性可由电流控制的特性,基于该性能建立了控制模型并进行了发动机台架试验,测量了磁流变液双质量飞轮在怠速、匀速、加速、减速、点火及熄火工况时对扭转振动的衰减性能,并与普通双质量飞轮进行对比,验证了磁流变液双质量飞轮在各个工况下性能的优越性。

1 基本结构和工作原理

磁流变液双质量飞轮结构如图 1 所示。其中,外转子和第一飞轮构成第一质量,第一质量与发动机曲轴相连;内转子和第二飞轮构成第二质量,第二质量与变速箱相连;第一、二飞轮之间安装了弧形螺旋弹簧;内、外转子间的空隙充满了磁流变液。

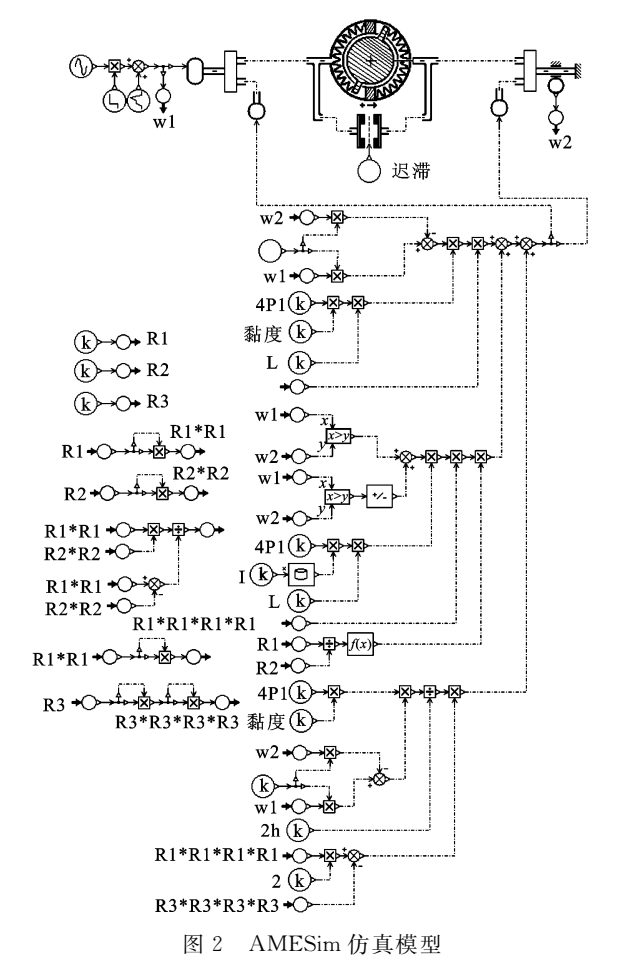


根据磁流变液在磁场作用下黏度可实现瞬间变化的特性,可通过改变励磁线圈电流的大小来实现磁流变液双质量飞轮扭转阻尼的实时调控。当要求磁流变液双质量飞轮提供较小的扭转阻尼时,不给励磁线圈施加电流,此时磁流变液表现出 Newton 流体的特性,内、外转子之间只受到较小的扭转阻尼作用;当要求磁流变液双质量飞轮提供较大的扭转阻尼时,给励磁线圈施加一定的电流,此时磁流变液表现出 Bingham 流体的特性,内、外转子之间受到较大的扭转阻尼作用。

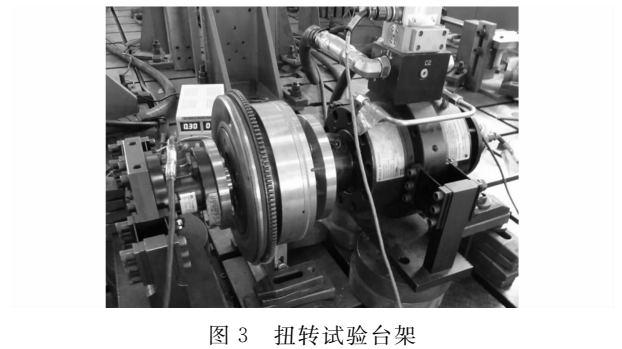
2 建模仿真及试验验证

为检验设计的磁流变液双质量飞轮的动态特性,建立了基于 AMESim 的磁流变液双质量飞轮模型,如图 2 所示。该模型是由普通双质量飞轮部分和磁流变液阻尼部分组成的,通过左端信号输入端输入正弦扭转激励,右端固定端提取扭矩输出,进而进行数据处理即可获得其动刚度和滞后角曲线。

为验证所建立的磁流变液双质量飞轮模型的准确性,搭建了如图 3 所示的试验台架对其进行试验

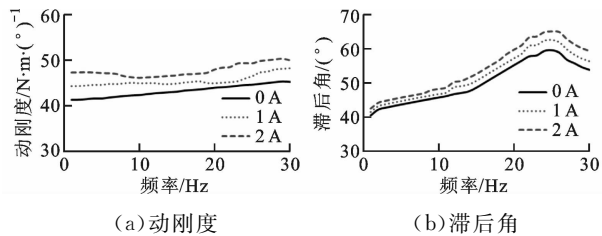
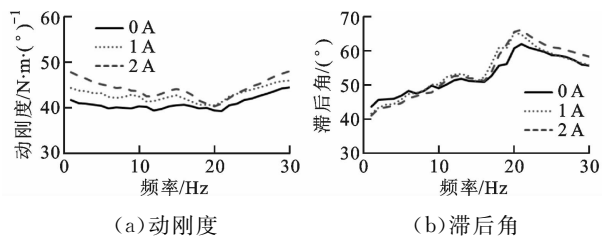
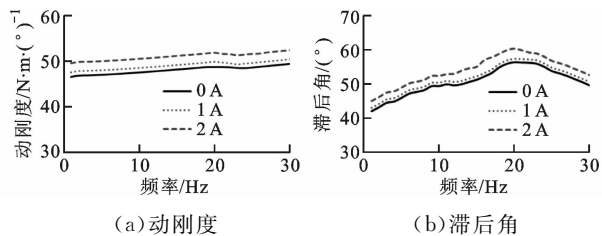
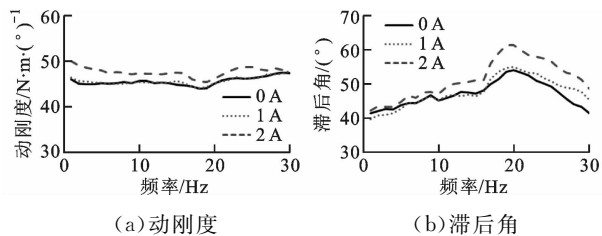


验证。



试验和仿真的加载条件相同,首先将磁流变液双质量飞轮预扭 20° ,然后对其施加扭转幅值分别为 1° 和 2° 的正弦扭转激励,激励频率范围为 $1\sim 30\text{ Hz}$,频率间隔为 1 Hz ,并同时对其施加大小分别为 $0、1$ 和 2 A 的电流,获得仿真和试验的动刚度和滞后角曲线,分别如图 4~7 所示。

从上述的对比可知,仿真曲线与试验曲线存在些许的差异,这可能是由于模型中对弧形弹簧非线性摩擦的模拟以及对励磁线圈在端面间隙处磁场强度的计算存在一定误差造成的,但总体上仿真与试

图 4 扭转幅值为 1° 时的动态特性(仿真)图 5 扭转幅值为 1° 时的动态特性(试验)图 6 扭转幅值为 2° 时的动态特性(仿真)图 7 扭转幅值为 2° 时的动态特性(试验)

验曲线趋势一致,能较好地吻合。因此,基于 AMES-im 建立的仿真模型能较好地模拟出磁流变液双质量飞轮的动态特性。

从动态特性曲线可以看出,磁流变液双质量飞轮的动刚度和滞后角受扭转激励幅值、励磁线圈电流等因素的影响。随着扭转幅值的增加,动刚度和阻尼角都明显减小;随着励磁线圈电流的增加,动刚度和阻尼角都明显增大。其中,动刚度和滞后角随励磁线圈电流变化而改变的特性是磁流变液双质量飞轮与普通双质量飞轮的一个重要区别,故可在发动机启动工况及大载荷冲击工况时,对其施加电流以提供较大的阻尼力矩。在较为平稳的工况时,施加小电流或不施加电流以提供较小的阻尼力矩,从而实现车辆传动系扭振的实时控制。

3 发动机台架试验

3.1 试验台架及控制模型

为验证磁流变液双质量飞轮对传动系扭转振动的衰减性能,对其进行发动机台架试验,并与普通的双质量飞轮(二者第一飞轮、第二飞轮、弧形弹簧的结构和参数都相同)进行比较,验证了磁流变液双质量飞轮性能的优越性。试验仪器和台架如图 8 所示,其中双质量飞轮的第一质量与发动机曲轴相连,第二质量与测功机连接,并分别在第一飞轮启动齿圈和第二飞轮测速齿圈处布置霍尔传感器,采集第一飞轮和第二飞轮的瞬时角速度波动;在曲轴皮带轮和测功机输出轴上布置磁钢和霍尔传感器,采集发动机曲轴和测功机输出轴的平均转速。

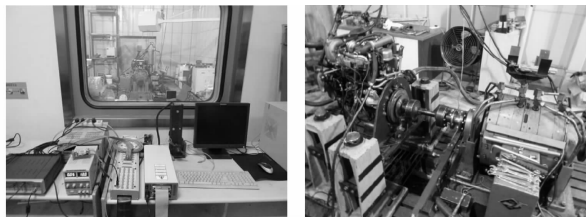


图 8 试验仪器(左)及试验台架(右)

试验台架的数据采集和控制系统采用 dSPACE 1103 实时系统,并在 Matlab/simulink 中建立控制模型,如图 9 所示。图中,在 DS1103_DSP_F2D 模块的 Frequency1~Frequency4 端口分别采集第二飞轮的瞬时角速度、测功机输出轴的平均转速、发动机曲轴的平均转速及第一飞轮的瞬时角速度;DS1103_DSP_PWM 模块输出励磁线圈的电流控制信号;DS1103_DSP_ADC_C1 模块采集励磁线圈的电流,用于 PID 控制的反馈。

通过调节台架中发动机的控制系统来模拟汽车的怠速、匀速、加速、减速、点火及熄火等工况,同时使用测功机对其施加相应的当量阻力矩来模拟传动系及车轮承受的力矩,比较磁流变液双质量飞轮和普通双质量飞轮在各个工况下对发动机扭振的衰减性能。

3.2 试验结果及分析

3.2.1 怠速工况 发动机怠速工况下普通双质量飞轮和磁流变液双质量飞轮第一飞轮的转速波动情况如图 10 所示。

将第一飞轮的时域转速波动转化为转速波动均方根值,如图 11 所示。由图可知,在发动机怠速工况下,相比普通双质量飞轮,磁流变液双质量飞轮能更有效地降低发动机的扭振。这主要是由于磁流变

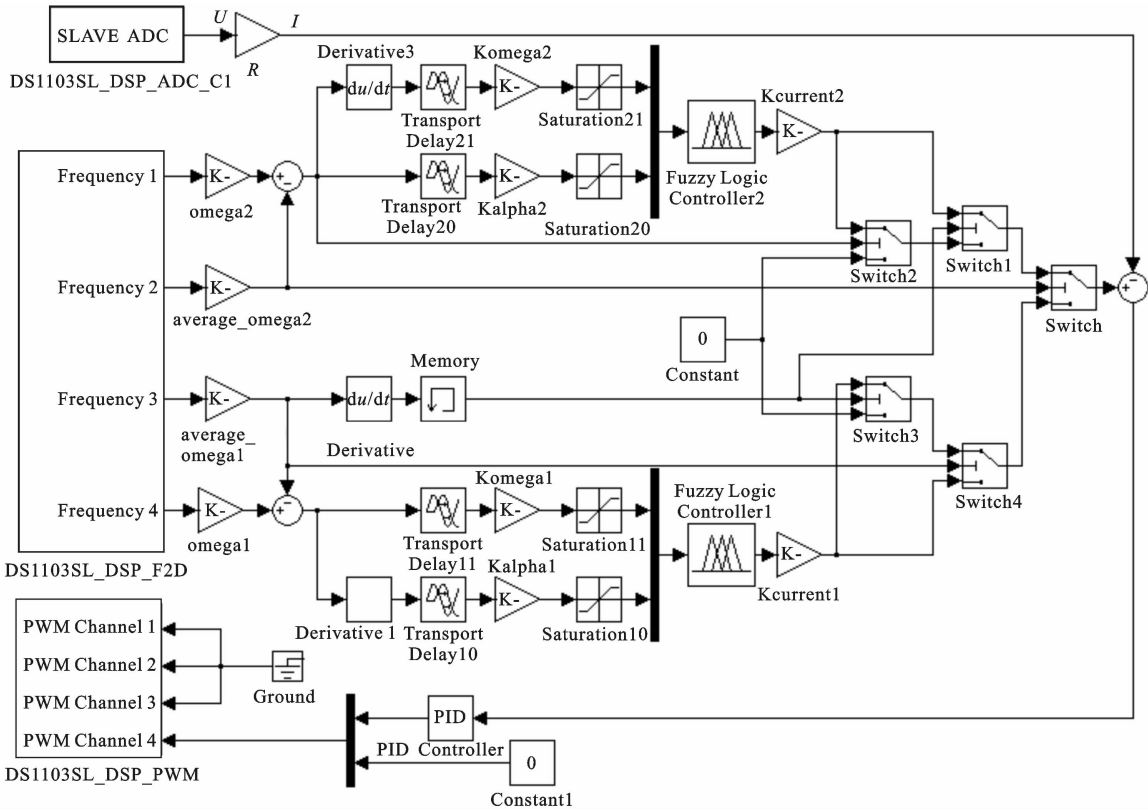
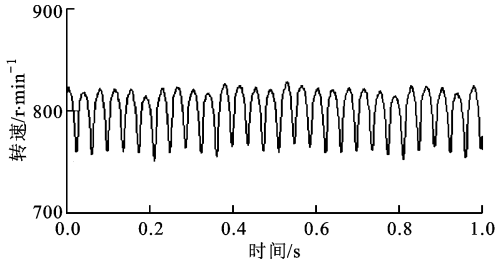
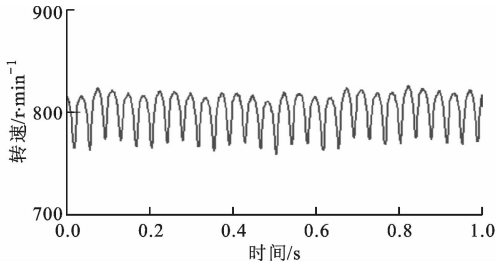


图 9 控制模型



(a) 普通双质量飞轮



(b) 磁流变液双质量飞轮

图 10 第一飞轮的转速波动

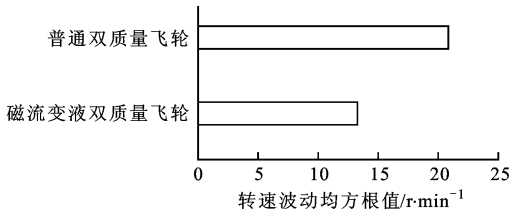
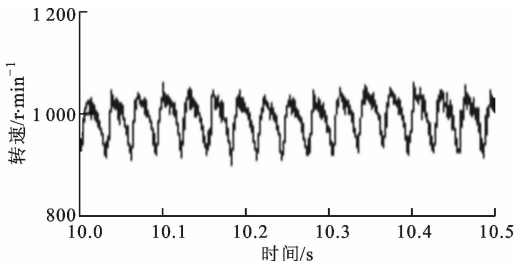


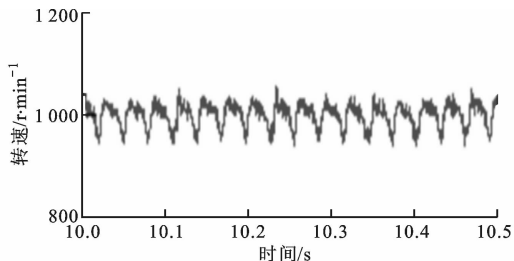
图 11 第一飞轮的转速波动均方根值

液双质量飞轮的第一质量具有较大的转动惯量,从而更有利于衰减发动机曲轴转速的波动。

3.2.2 匀速运转工况 发动机匀速运转工况(发动机转速为 1 000 r/min、2 500 r/min 和 3 500 r/min)下普通双质量飞轮和磁流变液双质量飞轮第二飞轮的转速波动如图 12~14 所示。

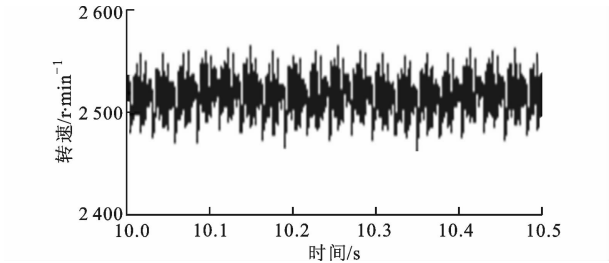


(a) 普通双质量飞轮

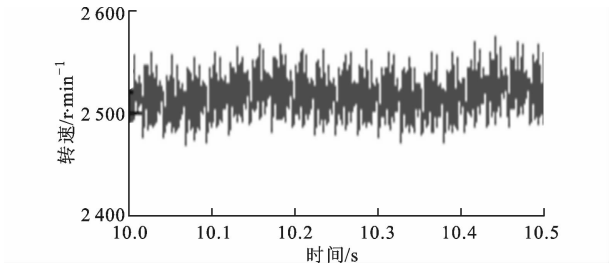


(b) 磁流变液双质量飞轮

图 12 1 000 r/min 时第二飞轮的转速波动

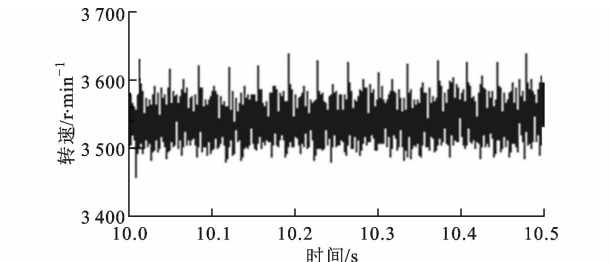


(a) 普通双质量飞轮

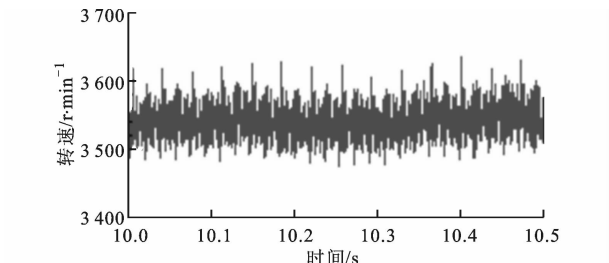


(b) 磁流变液双质量飞轮

图 13 2 500 r/min 时第二飞轮的转速波动



(a) 普通双质量飞轮



(b) 磁流变液双质量飞轮

图 14 3 500 r/min 时第二飞轮的转速波动

将第二飞轮的时域转速波动转化为转速波动均方根值,如图 15 所示。由图可知,在发动机匀速运转工况下,相比普通双质量飞轮,安装磁流变液双质量飞轮时第二飞轮的转速波动均方根值有所下降,但效果不明显。这主要是测功机产生的阻力矩比较平稳,发动机的工况也较为稳定,因此对衰减扭振的作用较小。

3.2.3 加速工况 发动机加速运转工况下普通双质量飞轮和磁流变液双质量飞轮第二飞轮的转速波动如图 16 所示。

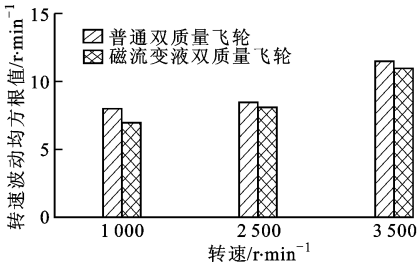
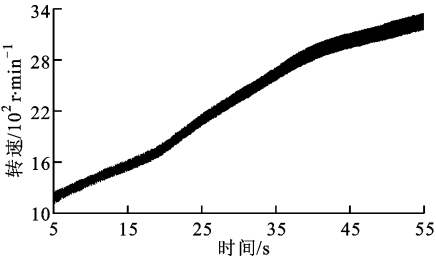
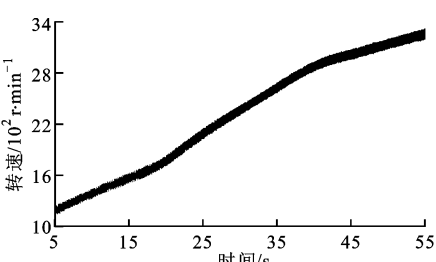


图 15 匀速工况下第二飞轮的转速波动均方根值



(a) 普通双质量飞轮



(b) 磁流变液双质量飞轮

图 16 加速运转工况下第二飞轮的转速波动

将第二飞轮的时域转速转化为转速波动均方根值,如图 17 所示。由图可知,在发动机加速运转时,磁流变液双质量飞轮第二飞轮的转速波动明显小于普通双质量飞轮第二飞轮的转速波动,因此磁流变液双质量飞轮能有效地衰减发动机加速运转时的扭振。

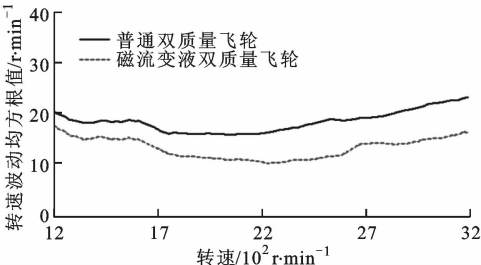
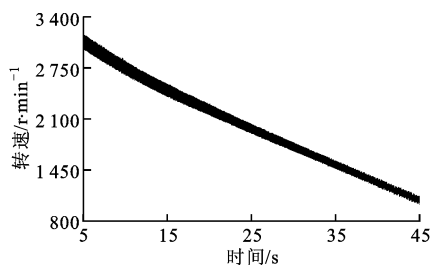
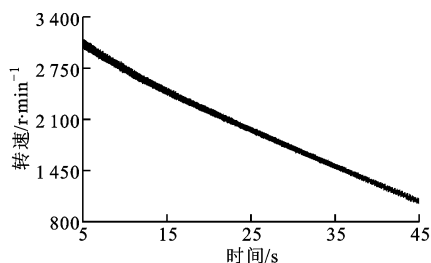


图 17 加速运转工况下第二飞轮转速波动均方根值

3.2.4 减速工况 发动机减速运转工况下普通双质量飞轮和磁流变液双质量飞轮第二飞轮的转速波动如图 18 所示。



(a) 普通双质量飞轮



(b) 磁流变液双质量飞轮

图 18 减速运转工况下第二飞轮的转速波动

将第二飞轮的时域转速转化为转速波动均方根值,如图 19 所示。由图可知,在发动机减速运行工况下,磁流变液双质量飞轮第二飞轮的转速波动明显小于普通双质量飞轮的转速波动,因此磁流变液双质量飞轮能有效地衰减发动机减速运转时的扭振。

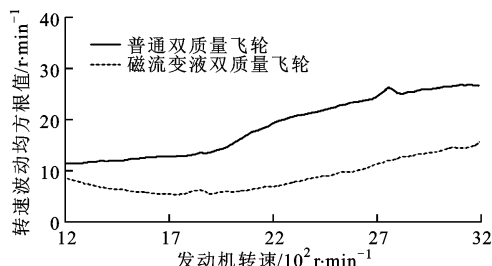


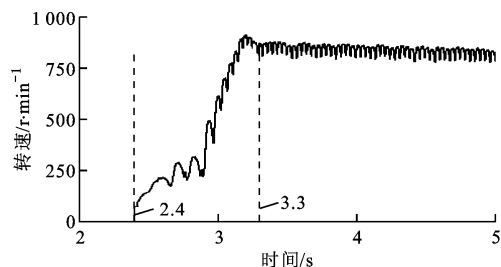
图 19 减速运转工况下第二飞轮转速波动均方根值

3.2.5 点火工况 发动机点火工况下普通双质量飞轮和磁流变液双质量飞轮第一飞轮的转速波动如图 20 所示。

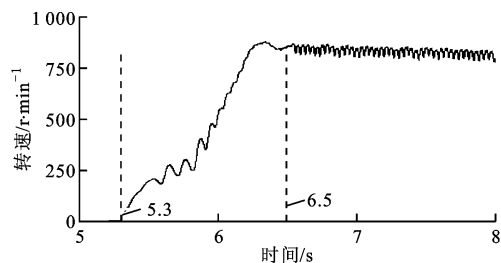
由图可知,在发动机点火工况下,安装磁流变液双质量飞轮可以显著减小发动机转速在上升过程中的波动。

3.2.6 熄火工况 发动机熄火工况下普通双质量飞轮和磁流变液双质量飞轮第一飞轮的转速波动如图 21 所示。

由图可知,在发动机熄火工况下,安装磁流变液双质量飞轮可以显著减小发动机转速在下降过程中的波动。

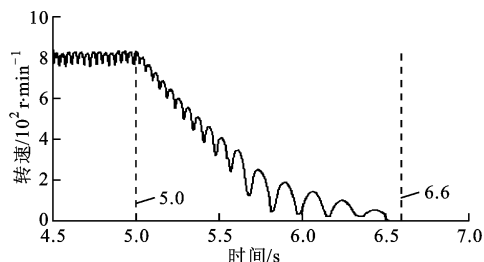


(a) 普通双质量飞轮

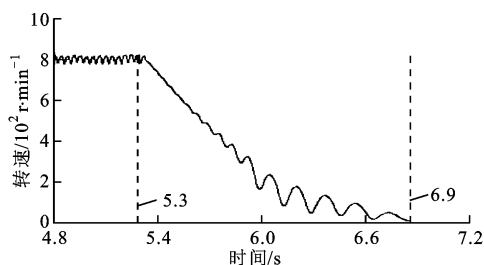


(b) 磁流变液双质量飞轮

图 20 点火工况下第一飞轮的转速波动



(a) 普通双质量飞轮



(b) 磁流变液双质量飞轮

图 21 熄火工况下第一飞轮的转速波动

4 结 论

(1) 基于 AMESim 对设计的磁流变液双质量飞轮进行建模仿真分析,获得了不同扭转激励幅值、不同激励频率以及不同电流时的动刚度和滞后角曲线,并通过试验验证了模型的准确性。结果表明,磁流变液双质量飞轮的动态特性可由电流控制。

(2) 结合磁流变液双质量飞轮动态特性可由电流控制的特性,建立了相应的控制模型,并搭建了发动机试验台架,通过试验比较了磁流变液双质量飞

轮与普通双质量飞轮在怠速、匀速、加速、减速、点火及熄火工况下对传动系扭振的衰减情况。对比表明:磁流变液双质量飞轮在各个工况下对传动系扭振的衰减性能都要优于普通双质量飞轮。

参考文献:

- [1] 李伟,史文库. 双质量飞轮(DMF)的研究综述[J]. 噪声与振动控制, 2008(5): 1-5.
LI Wei, SHI Wenku. Summary of studies of dual mass flywheel(DMF) [J]. Noise and Vibration Control, 2008(5): 1-5.
- [2] GAILLARD C L, SINGH R. Dynamic analysis of automotive clutch dampers [J]. Applied Acoustics, 2000 (7): 399-424.
- [3] 陈德民,史小飞,刘国强,等. 双质量飞轮设计与减振特性研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2012, 50(7): 15-17.
CHEN Demin, SHI Xiaofei, LIU Guoqiang, et al. Study on vibration reduction and design of dual mass flywheel [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2012, 50(7): 15-17.
- [4] CENTEA D, RAHNEJAT H, MENDAY M T. Non-linear multibody dynamic analysis for the study of clutch torsional vibrations (judder) [J]. Applied Mathematical Modelling, 2001(25): 177-192.
- [5] THEODOSSIADES S, GNANAKUMARR M, RAHNEJAT H, et al. Effect of a dual-mass flywheel on the impact-induced noise in vehicular powertrain systems [J]. Automobile Engineering, 2006, 220(6): 747-761.
- [6] AHN K, LEE J M, LIM W, et al. Analysis of a clutch damper using a discrete model [J]. KSME International Journal, 2004, 18(11): 1883-1890.
- [7] 史文库,龙岩,卢玉东. 多级非线性双质量飞轮参数设计和优化[J]. 振动与冲击, 2009, 28(5): 92-96.
SHI Wenku, LONG Yan, LU Yudong. Study on multistage non-linear dual mass flywheel damper [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(5): 92-96.
- [8] 宋立权,李亮,尹玉明,等. 基于形状约束的双质量飞轮设计理论研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(1): 111-118.
SONG Liqian, LI Liang, YIN Yuming, et al. Study on design theory of dual mass flywheel based on shape constraint [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(1): 111-118.

- [9] 吕振华,吴志国,陈涛. 双质量飞轮-周向短弹簧型扭振减振器弹性特性设计原则及性能分析[J]. 汽车工程, 2003, 25(5): 493-497.
LÜ Zhenhua, WU Zhiguo, CHEN Tao. The design principles and performance analysis of DMF-CSS torsional damper [J]. Automotive Engineering, 2003, 25 (5): 493-497.
- [10] 刘圣田. 双质量飞轮式扭振减振器对振动的控制分析[J]. 农业机械学报, 2004, 35(3): 16-19.
LIU Shengtian. Influences of a dual-mass flywheel damper on idling vibration [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2004, 35 (3): 16-19.
- [11] 李伟. 汽车传动系用 DMF-CS 的设计方法与扭振隔振特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.

[本刊相关文献链接]

- 刘石,仲继泽,冯永新,等. 使用磁流变阻尼器的大型汽轮发电机定子端部绕组振动控制. 2013, 47(4): 39-43. [doi: 10. 7652/xjtuxb201304008]
- 薛晓敏,孙清,伍晓红,等. 磁流变阻尼器滞回模型参数的敏感性分析及其简化模型. 2013, 47(7): 102-107. [doi: 10. 7652/xjtuxb201307019]
- 薛晓敏,孙清,张陵,等. 利用遗传算法的磁流变阻尼器结构舍时滞半主动控制. 2010, 44(9): 122-127. [doi: 10. 7652/xjtuxb201009024]
- 郑军,曹兴进,张光辉. 传动装置中磁流变液瞬态流动特性的数值计算. 2007, 41(9): 1053-1057. [doi: 10. 7652/xjtuxb200709011]
- 许增金,王世杰. 往复压缩机轴系扭振的数值分析. 2010, 44(3): 100-104. [doi: 10. 7652/xjtuxb201003021]
- 张超,陈天宁,王小鹏,等. 颗粒阻尼线性离散元模型参数的选取方法. 2014, 48(3): 96-101. [doi: 10. 7652/xjtuxb201403018]
- 舒歌群,赵文龙,梁兴雨,等. 约束阻尼结构的振动分析及结构参数优化研究. 2014, 48(3): 108-114. [doi: 10. 7652/xjtuxb201403020]
- 王成,缙锦,白俊卿,等. 利用主成分分析的模态参数识别. 2013, 47(11): 97-104. [doi: 10. 7652/xjtuxb201311018]
- 周正,卢傅安,祁大同,等. 一种离心风机蜗壳减振降噪的数值优化方法. 2011, 45(9): 59-64. [doi: 10. 7652/xjtuxb201109011]
- 王建伟,徐晖,马宁. 内嵌自主移动钢球欧拉梁自适应碰撞减振研究. 2010, 44(11): 103-108. [doi: 10. 7652/xjtuxb201011021]

(编辑 赵炜)