

文章编号:1671-6833(2023)06-0091-08

磁流变阻尼器滞回性能试验与计算模型分析

赵 军,高 宁,李小鹏,雷波波,赵 毅

(郑州大学 土木工程学院,河南 郑州 450001)

摘 要:为研究磁流变阻尼器(MRD)的力学性能,共完成了 11 组轴向往复荷载作用下 MRD 力学性能试验,分别考虑了电流大小、峰值点位移、加载速率和电流控制方式等因素的影响,分析了 MRD 阻尼力-位移曲线变化规律和各阶段特征。结果表明:轴向往复荷载作用下,MRD 峰值点阻尼力基本随电流大小呈线性增长;峰值点位移小于初始位移时,MRD 峰值点阻尼力较小,峰值点位移大于初始位移时,MRD 峰值点阻尼力较为稳定;MRD 峰值点阻尼力随加载速率的增大而增大;加载过程中关闭电流,MRD 阻尼力将迅速降低至 0 A 时阻尼力,若继续通电,则 MRD 阻尼力仍能在较短加载位移后达到稳定状态。最后,建立了考虑电流大小、峰值点位移、加载速率及电流控制方式等影响因素的 MRD 阻尼力-位移曲线计算模型,经验证,计算曲线与试验曲线能较好地吻合。

关键词:磁流变阻尼器;往复荷载;阻尼力;阻尼力-位移曲线;曲线模型

中图分类号:0482.54

文献标志码:A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2023.03.021

磁流变阻尼器(magnetorheological damper, MRD)是一种利用磁流变效应提供可控阻尼的半主动控制器件,具有阻尼可控、功耗低、响应迅速等特点,能够对结构起到良好的减振作用^[1-2]。MRD 在桥梁工程中的应用较多,主要目的为实现对斜拉索的振动控制。在国内,2006 年至 2013 年间,李金海^[3]、曹宏^[4]、瞿伟廉等^[5]分别将 MRD 应用于山东滨州黄河大桥、长沙洪山大桥和岳阳洞庭湖大桥;2015 年,国外学者 Weber 等^[6]成功将 MRD 应用于俄罗斯岛大桥。MRD 在建筑工程中的应用较少,日本将 40 t MRD 先后成功应用于博物馆和 Keio 大学建筑中^[7]。

MRD 对电流变化具有极高的灵敏度,电流变化的瞬间 MRD 阻尼力同时发生改变,因此,可通过改变供给电流的大小实时控制 MRD 阻尼力。近年来,学者利用 MRD 这一特性,将 MRD 应用于混凝土抗震结构以提高其抗震性能,减小地震作用下的结构响应^[8-12]。相对于钢筋混凝土抗震结构,CFRP 筋混凝土抗震结构可以有效减小震后残余变形,但是耗能能力相对较低^[13-14]。通常采用

增设耗能元件提高抗震结构的耗能能力,但是传统的耗能元件如屈曲约束支撑、软钢阻尼器及摩擦阻尼器等在受力时将产生塑性变形或永久性偏位,进而增加结构变形^[15-16]。因此,在 CFRP 筋混凝土抗震结构中采用传统耗能元件虽然耗能能力有所提高,但是结构变形恢复性能将受到耗能元件变形的限制,无法发挥残余变形较小的优势。MRD 可通过调节电流提高结构耗能且不增加残余变形,是 CFRP 筋混凝土抗震结构理想的耗能元件。在结构受力时增大电流提高 MRD 阻尼力,以提高结构的耗能能力;在结构卸载或荷载为 0 kN 时减小或关闭电流降低阻尼力,以降低或消除 MRD 对结构恢复功能的限制,实现不增大结构的残余变形。

目前,对于 MRD-CFRP 筋混凝土柱及剪力墙抗震性能已开展了相关的试验研究^[8,10],研究表明,MRD 对 CFRP 筋混凝土柱及剪力墙抗震性能影响较大,但是理论分析研究较少,限制了 MRD 在抗震结构中的应用。为开展 MRD-CFRP 筋混凝土柱及剪力墙抗震性能理论分析,需要首先开展 MRD 力

收稿日期:2023-05-10;修订日期:2023-06-15

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFE0125600)

作者简介:赵军(1971—),男,河南漯河人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事工程结构与材料研究,E-mail:zhaoj@zzu.edu.cn。

通信作者:李小鹏(1993—),男,河南周口人,郑州大学助理研究员,博士,主要从事工程结构与材料研究,E-mail:lixpeng163@163.com。

引用本文:赵军,高宁,李小鹏,等.磁流变阻尼器滞回性能试验与计算模型分析[J].郑州大学学报(工学版),2023,44(6):91-98.(ZHAO J,GAO N,LI X P,et al. Experimental and calculation model analysis on hysteresis properties of magnetorheological damper[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science),2023,44(6):91-98.)

学性能方面的研究。轴向往复荷载作用下 MRD 力学性能虽有少量试验研究成果^[17],但是未考虑加载速率和电流控制方式对 MRD 阻尼力影响。因此,为深入研究 MRD 力学性能,本文将开展轴向往复荷载作用下 MRD 力学性能试验研究,同时考虑峰值点位移、电流大小、加载速率和电流控制方式的影响,最后提出轴向往复荷载作用下 MRD 阻尼力-位移曲线计算模型。

1 试验概况

1.1 MRD 设计概况及工作原理

图 1 为 MRD 示意图,本文试验采用课题组制作的四线圈剪切阀式磁流变阻尼器,外部形状为圆柱体,外部缸筒高为 596 mm,直径为 150 mm;活塞杆直径为 40 mm,行程为 ± 40 mm。MRD 内部的多级活塞有 4 个凹槽,每个凹槽缠绕漆包线,采用环氧树脂密封进行绝缘处理;多级活塞两端分别与活塞杆连接并穿过缸筒内部,一端活塞杆与试验装置或其附属连接件相连,另一端引出铜线与直流电源箱相连。磁流变液采用自制方法获得,其组分主要包括铁粉、硫酸钠和液体石蜡等。

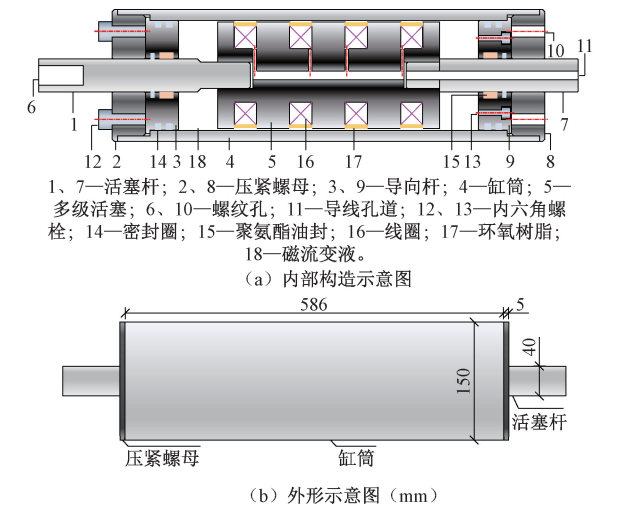


图 1 MRD 示意图

Figure 1 MRD schematic diagram

MRD 加载过程中,活塞与缸体发生相对运动,挤压磁流变液并使其流过缸体与活塞间的间隙,调节电流可使 MRD 内部磁场强度改变,磁流变液黏度也随之改变^[18],进而可控制阻尼力大小。

1.2 加载装置

图 2 为加载装置。加载设备为 MTS 拉力试验机,最大荷载为 ± 200 kN,行程为 ± 50 mm。将 MRD 和拉力试验机牢固连接后,MTS 拉力试验机对 MRD 施加轴向往复荷载。

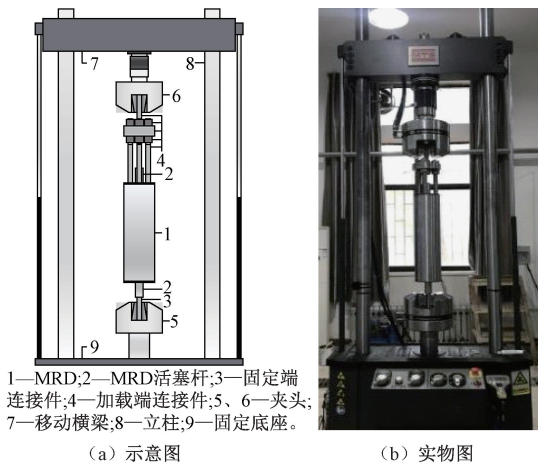


图 2 MRD 轴向往复荷载试验装置

Figure 2 MRD axially cyclic loading test device

1.3 加载制度

轴向往复荷载作用下 MRD 力学性能试验采用位移控制加载,具体加载制度如下。

(1) 电流大小 I 和峰值点位移 Δ_m 的影响。分别进行 4 组不同峰值点位移 Δ_m 、不同电流大小 I 的 MRD 力学性能试验,各组试验加载速率 v 均为 1.0 mm/s。4 组试验峰值点位移 Δ_m 分别为 ± 5 、 ± 10 、 ± 20 及 ± 40 mm,每组试验均包含 8 个加载等级,每级进行 1 次往复加载,各级循环峰值点位移 Δ_m 相同,对应的电流 I 分别为 0、0.04、0.08、0.12、0.16、0.20、0.24、0.28 A。4 组试验分别命名为 I-5、I-10、I-20 和 I-40,加载制度如图 3(a) 所示。

(2) 加载速率 v 的影响。进行 3 组不同加载速率 v 的 MRD 力学性能试验,同时考虑了电流大小 I 的影响。每组试验均包含 6 个加载等级,每级进行 1 次往复加载,各级峰值点位移均为 ± 40 mm,每级循环加载速率分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mm/s。每组试验电流大小 I 保持不变,但 3 组试验电流大小 I 不同,分别为 0、0.14 和 0.28 A,3 组试验分别命名为 V-0、V-0.14 和 V-0.28,加载制度如图 3(b) 所示。

(3) 电流控制方式的影响。分别进行 4 组不同电流控制方式的 MRD 力学性能试验。结合混凝土结构拟静力试验,试验中各级循环峰值点位移以 ± 3.88 mm 为级差逐级增加。每组试验均包含 11 个加载等级,每级进行 2 次往复循环加载。4 组试验分别命名为 M-0、M-0.28、M-P 和 M-S,其中试验 M-0 全程关闭电流;试验 M-0.28 全程保持通电,电流大小为 0.28 A;试验 M-P 在每级循环峰值点位移处断电 1 次,随后继续保持通电,电流大小为

0.28 A;试验 M-S 在每次循环在峰值点向 0 mm 加载过程中,加载至 1/3 峰值点位移处断电 1 次,随后继续保持通电,电流大小仍为 0.28 A。加载制度如图 3(c) 所示。

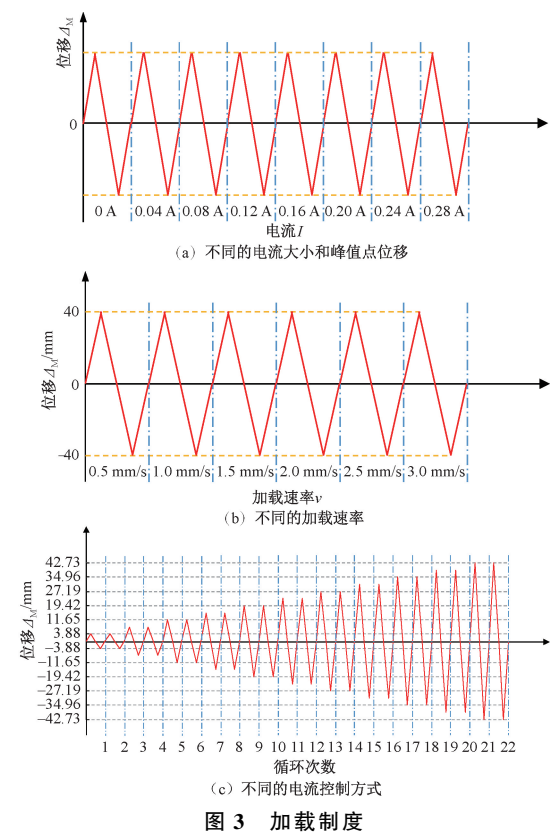


Figure 3 Loading system

2 试验结果与分析

2.1 电流大小对 MRD 阻尼力的影响

图 4 为试验 I-5、I-10、I-20 和 I-40 的 MRD 阻尼力-位移曲线图。由图 4 可知,由于 MRD 制作时磁流变液未充满阻尼器,自 0 kN 加载时,初始位移 4~5 mm 荷载增长较小,斜率趋近于零,接近于水平线,该阶段为初始位移段。随后曲线进入荷载增长段,即初始位移段之后的 2~3 mm 加载段,该阶段荷载急剧增加,斜率急剧增大。该阶段结束后曲线进入荷载稳定段,荷载稳定段初期时荷载略微下降,随着位移的增大,阻尼力保持稳定状态。由于试件制作缺陷以及试验 I-5 的峰值点位移较小,试验 I-5 不具备明显的荷载稳定段,呈现捏拢现象。加载至峰值点后卸载,卸载段斜率趋向于无穷大,荷载急剧下降,但位移几乎不变。

图 5 为试验 I-5、I-10、I-20 和 I-40 各级循环正、反向峰值点阻尼力随电流大小变化关系图。由图 5 可知, I 为 0~0.28 A 时,峰值点阻尼力随电流大小的增大而提高。 I 为 0.04 A 时的峰值点阻尼力相对

0 A 时提高较小; I 为 0.04~0.20 A 时,峰值点阻尼力随着 I 的增大显著提高;0.20 A 以后,曲线斜率略微降低,说明 MRD 峰值点阻尼力增幅放缓。整体而言, I 为 0~0.28 A 时,峰值点阻尼力基本随电流大小呈线性增长,电流每提高 0.04 A,峰值点阻尼力可提高 16 kN。

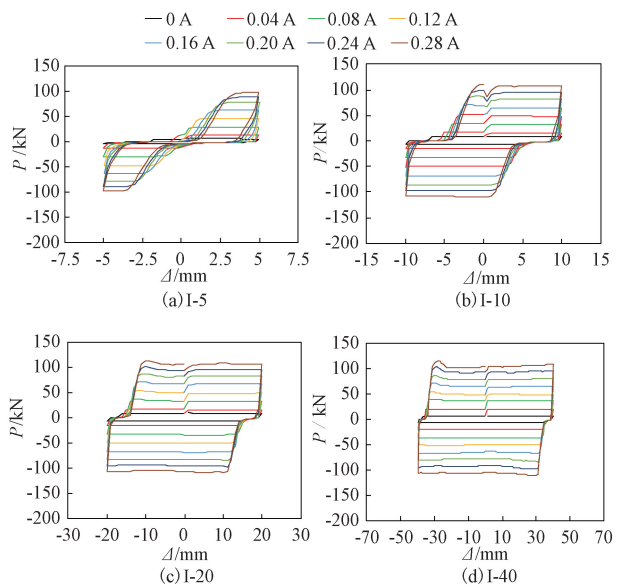


图 4 不同电流大小下 MRD 阻尼力-位移曲线

Figure 4 MRD damping force-displacement curves with different currents

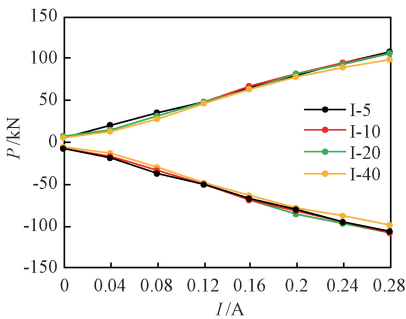


图 5 峰值点阻尼力随电流大小变化关系

Figure 5 Relationship between damping force and current at peak point in each cycle

2.2 峰值点位移对 MRD 阻尼力的影响

根据试验 I-5、I-10、I-20 和 I-40 的试验结果,绘制了相同电流大小、不同峰值点位移下的 MRD 阻尼力-位移曲线图,如图 6 所示。图 6(a)、6(b)、6(c) 及 6(d) 电流大小分别为 0、0.08、0.16、0.28 A。由图 6 可知,峰值点位移为 40 mm 且电流大小相同时,试验 I-40 各级循环的峰值点阻尼力高于 I-5、I-10、I-20,试验 I-20 和 I-10 峰值点阻尼力基本相同,试验 I-5 峰值点阻尼力最低。相同的电流大小和加载速率下,峰值点位移小于 10 mm 时,MRD 阻尼力较小,在峰值点位移大于 10 mm 时,

MRD 阻尼力基本维持稳定状态。说明峰值点位移小于初始位移时,峰值点阻尼力较小,大于初始位移时,峰值点阻尼力较为稳定。

2.3 加载速率对 MRD 阻尼力的影响规律

图 7 为试验 V-0、V-0.14 和 V-0.28 的 MRD 阻尼力-位移曲线图。由图 7 可知,MRD 阻尼力随加载速率增大而增长。当 I 为 0 A 时,加载速率每提高 0.5 mm/s,正向峰值点阻尼力提高 1.6~1.9 kN,反向峰值点阻尼力提高 1.7~2.1 kN;当 I 为 0.14 A 时,加载速率每提高 0.5 mm/s,正向峰值点阻尼力提高 2.0~4.2 kN,反向峰值点阻尼力提高 2.6~4.4 kN;当 I 为 0.28 A 时,加载速率每提高 0.5 mm/s,正向峰值点阻尼力提高 1.3~7.1 kN,反向峰值点阻尼力

提高 3.1~8.9 kN。

2.4 电流控制方式对 MRD 性能的影响

图 8 为试验 M-0、M-0.28、M-P 和 M-S 的 MRD 阻尼力-位移曲线图。由图 8 可知,试验中关闭电流,随后再次供给电流且电流大小为 0.28 A 时,MRD 在加载较短位移后,阻尼力仍然可以稳定在 100 kN 左右。图 8(b)与 8(c)曲线相似,但是由实测数据分析可知,M-P 的卸载段由峰值点阻尼力急剧降至 0 kN,而 M-0.28 则由峰值点阻尼力缓慢降至 0 kN,M-P 卸载段斜率相对于 M-0.28 更趋近于无穷大。由 M-S 可知,在加载过程中关闭电源,MRD 将瞬间降至 0 A 时的阻尼力,继续通电,加载较短位移后阻尼力可重新达到稳定状态。

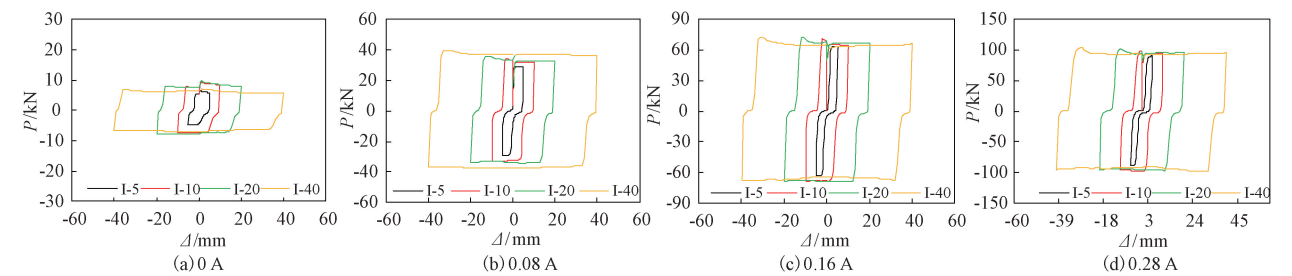


图 6 不同峰值点位移下 MRD 阻尼力-位移曲线

Figure 6 MRD damping force-displacement curves at different peak displacements

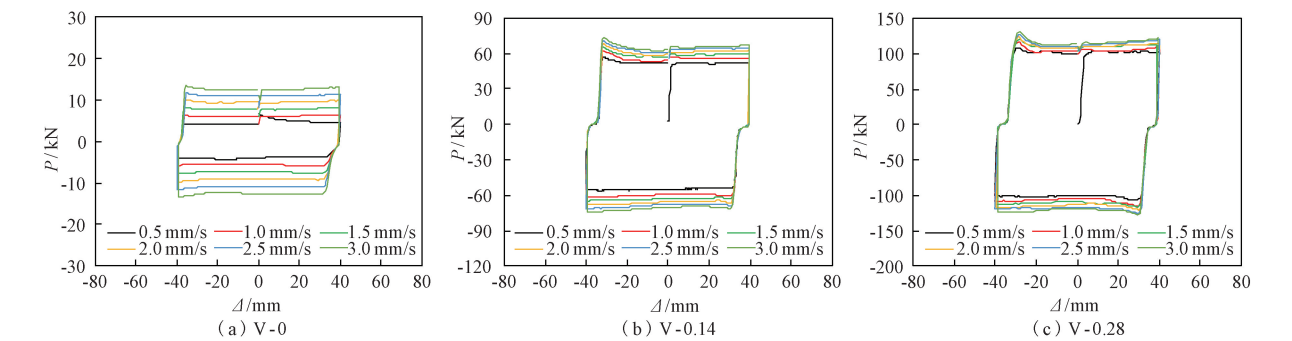


图 7 不同加载速率下 MRD 阻尼力-位移曲线

Figure 7 MRD damping force-displacement curves with different loading rates

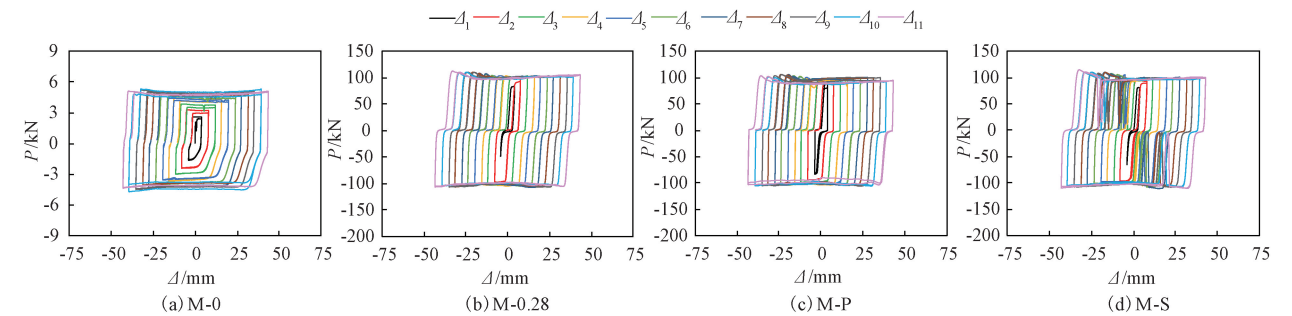


图 8 不同电流控制方式下 MRD 阻尼力-位移曲线

Figure 8 MRD damping force-displacement curves under different current control modes

3 MRD 阻尼力-位移曲线计算模型

3.1 模型简化

MRD 阻尼力-位移试验曲线滞回环呈中心对称,正、反向曲线特征相似。图 9 为阻尼力-位移曲线滞回环简化模型,假设正、反向曲线完全中心对称。以图 9 正向加载曲线($A-B-C-D-(E)-A'$)为例,曲线可分为 4 个阶段,即初始位移段(AB 段)、荷载增长段(BC 段)、荷载稳定段(CD 段)、卸载段($D(E)A'$ 段)。各阶段基本特征如下:初始位移段和荷载稳定段内阻尼力随着位移的增大变化较小;卸载段内位移变化较小;荷载增长段内阻尼力基本随位移呈线性增长。因此,可将 AB 段和 CD 段简化为水平段, $D(E)A'$ 段简化为斜率无穷大的竖直段, BC 段简化为斜率为 K 的直线段。另外,对于 $D(E)A'$ 段,若关闭电流,则曲线由卸载点首先降低至点 E 处,随后卸载至点 A' ;若保持电流不变,则曲线由卸载点直接降低至点 A' 处。

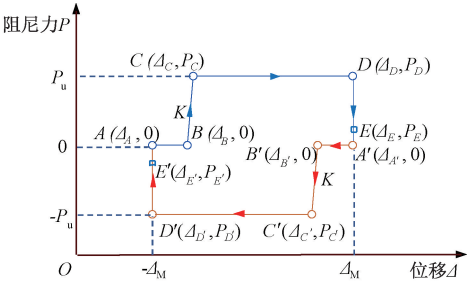


图 9 滞回环简化模型
Figure 9 Simplified hysteretic model

3.2 MRD 峰值点阻尼力计算式

通过对各组试验每级循环正、反向峰值点阻尼力试验值的回归分析,得到峰值点阻尼力 P_u 与电流 I 和加载速率 v 的计算式:

$$P_u = 364.78I + 6.33v + 0.024. \tag{1}$$

图 10 为峰值点阻尼力计算值与试验值对比图, $P_{u,c}$ 为计算值, $P_{u,t}$ 为试验值。由图 10 可知,计算值与试验值吻合较好,误差为 1%~8%。

3.3 特征点和特征曲线计算式

(1) 荷载增长段。图 11 分别为各组试验每级循环荷载增长段 B 、 C 点处位移 Δ_B 、 Δ_C 与峰值点位移 Δ_M 分布关系图。由图 11 可知, Δ_B 、 Δ_C 基本随 Δ_M 线性增长。通过线性拟合,分别得到 Δ_B 和 Δ_C 计算式:

$$\Delta_B = \Delta_M - 4.9; \tag{2}$$

$$\Delta_C = \Delta_M - 7.1. \tag{3}$$

根据直线方程,由式(1)、(2)和(3)可得到荷载增长段斜率 K 计算式,即

$$K = 165.80I + 2.88v + 0.01. \tag{4}$$

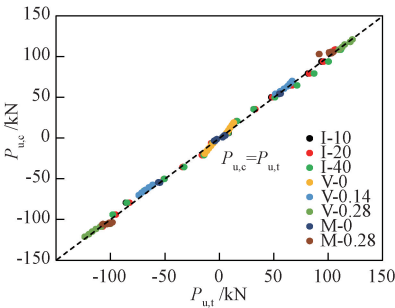


图 10 峰值点阻尼力计算值和试验值对比
Figure 10 Comparison between calculated and test values of damping force at peak point

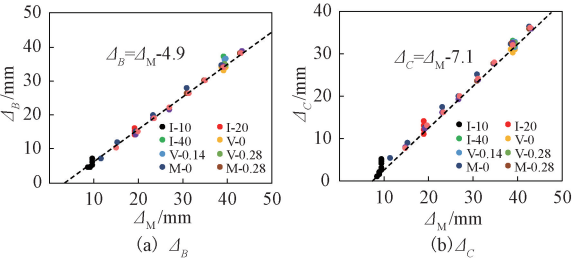


图 11 Δ_B 、 Δ_C 与 Δ_M 分布关系
Figure 11 Relationship between Δ_B , Δ_C and Δ_M

(2) 关闭电流时阻尼力及再加载段。图 12 分别为相同加载等级下试验 M-P 和 M-S 关闭电流时 MRD 阻尼力与试验 M-0 峰值点阻尼力关系图, P_p 和 P_s 分别为 M-P 和 M-S 关闭电流时阻尼力, $P_{u,0}$ 为 M-0 各级循环峰值点阻尼力。由图 12 可知, P_p 和 P_s 与 $P_{u,0}$ 相差较小,说明试验过程中如关闭电流,阻尼力将瞬间降低至 0 A 时的阻尼力,因此,断电处阻尼力,即图 9 中 E 点处阻尼力可近似为 0 A 时阻尼力,结合式(1),可得到关闭电流时阻尼力计算式:

$$P_E = 6.33v + 0.024. \tag{5}$$

图 13 为试验 M-S 同级循环断电后再加载段斜率 K_s 与荷载增长段斜率 K 关系图。由图 13 可知, MRD 关闭电流后,再供给相同大小的电流, K_s 与 K 较为接近,因此,可近似认为 K_s 与 K 相等,可采用式(4)进行 K_s 的计算。

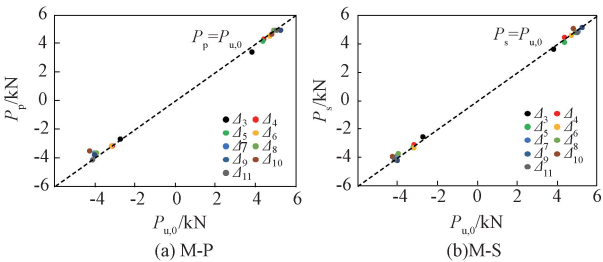


图 12 关闭电流时阻尼力 P_p 、 P_s 与 $P_{u,0}$ 关系
Figure 12 Relationship between P_p , P_s and $P_{u,0}$

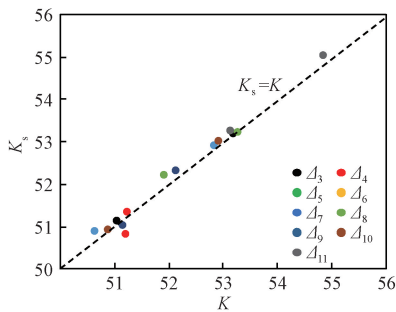


图 13 断电再加载段斜率 K_s 与荷载增长段斜率 K 关系

Figure 13 Relationship between K_s of re-loading phase after closing current and slope K of load increasing phase

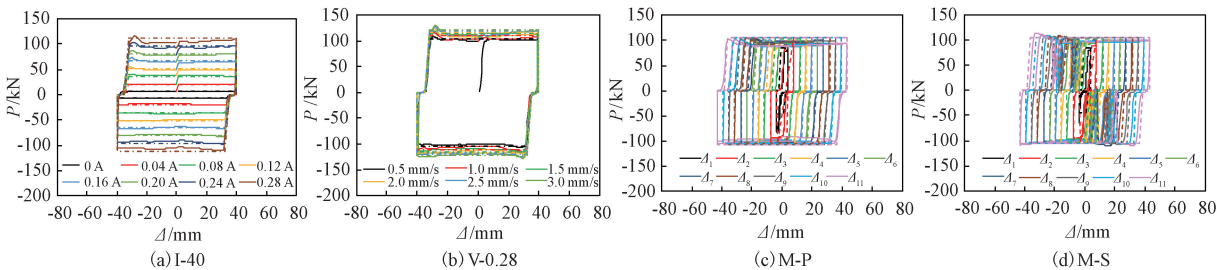


图 14 计算曲线与试验曲线对比

Figure 14 Comparison between calculated and test curve

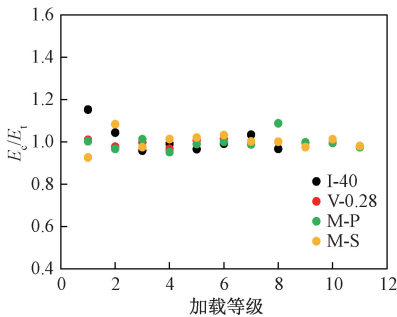


图 15 耗能计算值 E_c 与试验值 E_t 对比

Figure 15 Comparison between calculated value E_c and test value E_t of energy dissipation

5 结论

本文进行了轴向往复荷载作用下 MRD 力学性能试验,分析了电流大小、峰值点位移、加载速率和电流控制方式对 MRD 阻尼力的影响规律。

(1)相同峰值点位移和加载速率下,当电流大小为 0.04~0.20 A 时,MRD 峰值点阻尼力随电流大小基本呈线性增长;当电流大小为 0.20~0.28 A 时,MRD 峰值点阻尼力增长幅度逐渐减小。

(2)相同的电流大小和加载速率下,当峰值点位移小于初始位移时,峰值点阻尼力较小,大于初始位移时,峰值点阻尼力较为稳定。

4 模型验证

图 14 为试验 I-40、V-0.28、M-P 和 M-S 计算曲线和试验曲线对比图,虚线代表计算曲线,实线代表试验曲线。由图 14 可知,计算曲线与试验曲线具有较高的吻合度。图 15 为各级循环耗能计算值 E_c 与试验值 E_t 对比图,其中试验 M-S 和 M-P 各级耗能试验值取 2 次循环的平均值。由图 15 可知, E_c 与 E_t 的比值为 0.93~1.15,误差较小。

综上所述,本文提出的计算模型在计算轴向往复荷载作用下 MRD 阻尼力-位移曲线时具有较高的精确度,且能够很好地描述不同电流大小、位移幅值、加载速率和电流控制方式对 MRD 力学性能的影响。

(3)相同的电流大小和峰值点位移下,MRD 峰值点阻尼力随着加载速率的增大而增大。

(4)在加载过程中关闭电流,MRD 阻尼力瞬间降至 0 A 时的阻尼力,若继续供给电流,MRD 阻尼力在较短的加载位移内仍能达到该电流大小下的阻尼力状态,且再加载段与荷载增长段斜率近似相等。

(5)本文提出的计算模型在计算轴向往复荷载作用下 MRD 阻尼力-位移曲线时具有较高的精确度,能够很好地描述不同电流大小、峰值点位移、加载速率和电流控制方式下 MRD 阻尼力-位移曲线变化规律。

参考文献:

[1] BAHAR A, POZO F, ACHO L, et al. Parameter identification of large-scale magnetorheological dampers in a benchmark building[J]. Computers & Structures, 2010, 88(3/4): 198-206.

[2] 杨岗,李芾,赖森华,等.基于磁流变阻尼器的高速受电弓模糊半主动控制[J].科学技术与工程,2020,20(11):4534-4539.

YANG G, LI F, LAI S H, et al. Semi-active control of fuzzy for high-speed pantograph using MRD[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(11): 4534

- 4539.
- [3] 李金海. 磁流变液及其智能阻尼器的研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- LI J H. Research and application of magnetorheological fluid and its intelligent damper[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [4] 曹宏. 磁流变阻尼器在拉索减振中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- CAO H. The research on the application of MR damper in cable vibration mitigation[D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [5] 瞿伟廉, 秦顺全, 涂建维, 等. 武汉天兴洲公铁两用斜拉桥主梁和桥塔纵向列车制动响应智能控制的理论与关键技术[J]. 土木工程学报, 2010, 43(8): 63-72.
- QU W L, QIN S Q, TU J W, et al. Theory and crucial technologies of intelligent control for responses in deck and towers of Wuhan Tianxingzhou cable-stayed bridge subjected to train braking[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(8): 63-72.
- [6] WEBER F, DISTL H. Amplitude and frequency independent cable damping of Sutong Bridge and Russky Bridge by magnetorheological dampers[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2015, 22(2): 237-254.
- [7] FUJITANI H, SODEYAMA H, TOMURA T, et al. Development of 400 kN magnetorheological damper for a real base-isolated building[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5052: 265-276.
- [8] 赵军, 王培培, 冯益博, 等. 配置 MRD 的 CFRP 筋混凝土柱抗震性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(4): 23-31.
- ZHAO J, WANG P P, FENG Y B, et al. Experiment on seismic performance of CFRP reinforced concrete column with MRD[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(4): 23-31.
- [9] FU W Q, ZHANG C W, LI M, et al. Experimental investigation on semi-active control of base isolation system using magnetorheological dampers for concrete frame structure[J]. Applied Sciences, 2019, 9(18): 3866.
- [10] 张香成, 陈娜, 罗芳, 等. 铅-磁流变阻尼器在减震结构中的位置优化[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(2): 44-49.
- ZHANG X C, CHEN N, LUO F, et al. Position optimization of lead magnetorheological damper in energy dissipation structural[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2018, 39(2): 44-49.
- [11] LI J, MEI Z, CHEN J B, et al. Experimental investigations of stochastic control of randomly base-excited structures[J]. Advances in Structural Engineering, 2012, 15(11): 1963-1975.
- [12] 王蒂, 黄平明. 超大跨度斜拉桥纵向减震耗能塔、梁连接装置研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2008, 29(4): 112-115, 144.
- WANG D, HUANG P M. Research on deck-tower connection of super long-span cable-stayed bridge[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2008, 29(4): 112-115, 144.
- [13] 王作虎, 罗义康, 刘杜, 等. CFRP 筋-高强钢筋/高强混凝土柱的抗震性能[J]. 复合材料学报, 2021, 38(10): 3463-3473.
- WANG Z H, LUO Y K, LIU D, et al. Seismic behavior of high-strength concrete columns reinforced with CFRP tendons and high-strength steels[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2021, 38(10): 3463-3473.
- [14] ZHAO J, REN W B, RUAN X H, et al. Experimental study on the seismic performance of columns reinforced by the CFRP bar and sheet[J]. Applied Composite Materials, 2021, 28(4): 1291-1313.
- [15] 王静峰, 王新乐, 李贝贝, 等. 屈曲约束支撑装配式混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(12): 72-80.
- WANG J F, WANG X L, LI B B, et al. Experimental studies on seismic performance of prefabricated concrete frame structures with buckling-restrained braces[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(12): 72-80.
- [16] 马立威, 张海宾, 王燕. 转动型摩擦阻尼器试验研究与理论分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(5): 1001-1011.
- MA L W, ZHANG H B, WANG Y. Experimental research and theoretical analysis of rotational friction damper[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(5): 1001-1011.
- [17] ZHANG X C, WU G B, ZHAO J. Quasi-static mechanical properties and mechanical model of MRD[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(3): 46-53.
- [18] 祝世兴, 杨丽昆, 魏戡, 等. 基于改进 Bingham 模型的磁流变阻尼器力学建模及试验研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(4): 254-264.
- ZHU S X, YANG L K, WEI J, et al. Modeling and experimental study of magnetorheological damper based on improved Bingham model[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35(4): 254-264.

Experimental and Calculation Model Analysis on Hysteresis
Properties of Magnetorheological Damper

ZHAO Jun, GAO Ning, LI Xiaopeng, LEI Bobo, ZHAO Yi

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To study the mechanical properties of magnetorheological damper (MRD), 11 groups of MRD mechanical properties tests with axially cyclic loading were completed. The effects of current size, peak displacement, loading rate and current control mode were considered. The variation law of damping force-displacement curve and characteristics of each stage of MRD were analyzed. The results showed that the damping force at the peak point of MRD increased linearly with the current. When the peak displacement was less than the initial displacement, the MRD peak damping force was small, and when the peak displacement was greater than the initial displacement, the MRD peak damping force was relatively stable; the damping force at the peak point of MRD increased with the increase of loading rate; when the current was closed, the damping force of MRD would be rapidly reduced to 0 A. If the power was continued, the damping force of MRD could still reach a stable state after a short loading displacement. Finally, the calculation model of MRD damping force-displacement curve considering the influence factors such as current size, peak displacement, loading rate and current control mode was established. It was verified that the calculation curve was in good agreement with the experimental curve.

Keywords: magnetorheological damper; cyclic loading; damping force; damping force-displacement curve; curve model

(上接第 60 页)

Construction and Application of Wind Turbine Diagnosis System Based on
Knowledge Graph

CHEN Hong^{1,2}, CHEN Xincal¹, GONG Xiaobin³, HAN Dongyang¹, LIU Huajie¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Mechanical and Electrical, Hami Vocational and Technical College, Hami 839099, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: To address the precision problems in wind turbine fault diagnosis and maintenance processes, the lack of management of fault domain knowledge, and the large amount of historical fault data records left behind, a wind turbine fault diagnosis system was proposed to be constructed in the form of a knowledge graph. Firstly, knowledge extraction of fault texts was carried out by an improved named entity recognition model BERT-BiLSTM-CRF. The data set used text data of wind turbine fault cases and accident analysis in the past 10 years. And it was proved through experiments that the improved entity recognition method was 2.54% more effective compared to the traditional model in the wind turbine fault domain. The extracted knowledge entities were then structurally analysed. As the traditional fault tree lacked purpose in actual fault reasoning, and each bottom event had different levels of importance to the top event, it was proposed that the characteristic attributes of the fault was introduced, as branching conditions, into the fault tree reasoning, to complete the fault tree qualitative and quantitative analysis, and the fault mode impact and hazard analysis (FMECA) were combined to refine the fault domain knowledge model. Then Protégé development tools were use to complete the ontology modelling of the fault tree structure based on the six-tuple concept, so that the constructed ontology knowledge base could meet the prerequisites for inference. Finally, the visualization of knowledge model was realized by Neo4j, and the ability of reading and writing knowledge data was improved.

Keywords: knowledge graph; knowledge extraction; wind turbine; fault diagnosis; ontology