

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2015.06.008

新型客车磁流变缓速器制动力计算与仿真

许晓勤¹, 陈淑梅²

(1. 福建船政交通职业学院 汽车运用工程系, 福建 福州 350007;
2. 福州大学 机械工程学院, 福建 福州 350116)

摘要: 随着汽车工业的进步,商用汽车逐步向高速及大型化发展,制动安全问题日益突出。安装辅助制动装置是实现大型车辆安全制动的重要途径之一。文章分析传统电涡流缓速器及液力缓速器优缺点,设计一种新型的单盘型客车磁流变缓速器。该缓速器在挤压-剪切混合模式下工作;以磁流变液(MRF)的流变特性为基础,推导该缓速器制动力矩计算公式,并在 MATLAB 环境下对该制动力矩公式进行仿真和分析,结果显示客车磁流变缓速器制动力矩主要与磁场强度大小有关,与转速和磁流变液间隙厚度关系很小。

关键词: 磁流变液; 缓速器; 制动力; 仿真

中图分类号: U463.51 文献标志码: A 文章编号: 1672-4348(2015)06-0551-06

Braking moment calculation and simulation of a novel coach magnetorheological retarder

Xu Xiaoqin¹, Chen Shumei²

(1. Automotive Application Engineering Department, Fujian Chuanzheng Communication College, Fuzhou 350007, China;
2. College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: With the advance of automotive industry, commercial vehicles are gradually developing into high speed and large-scale vehicles. As the braking function of the commercial vehicle has faced great challenges, installing auxiliary braking device is an effective way to achieve the safe braking of large-scale vehicles. The advantages and disadvantages of the traditional eddy current retarder and magnetorheological retarder were analysed. A novel coach single-plate magnetorheological retarder was designed, which operates under compression plus shear mode. Based on the rheological properties of magnetorheological fluid (MRF), the braking moment was derived and simulated. The results indicate that the braking moment mainly depends on the intensity of magnetic field and is hardly affected by the speed and the thickness of MRF.

Keywords: magnetorheological fluid (MRF); retarder; braking moment; simulation

磁流变制动器是近年来兴起的利用磁流变液的可控粘性产生制动力矩的新型制动装置,具有制动力矩稳定,噪声小,体积质量小等特点,能有效弥补传统辅助制动装置低速性能差,电流消耗高等不足。

关于磁流变制动器研究的例子很多,Huang等人提出了在剪切模式下工作的圆筒形磁流变制动器^[1];Li等人用实验测出MR制动器在相对较低转速下的转矩特性^[2];Bydon描述了Lord MR制动器的结构和工作原理^[3],研究结果表明在最高温度70℃内其最大转矩可达5.65 N·m。Park等人设计了用于汽车的MR制动器^[4]。Sukhwani和

收稿日期: 2015-09-20
基金项目: 福建省教育厅 A 类项目(JA14376)
第一作者简介: 许晓勤(1981-),女,福建厦门人,讲师,硕士,研究方向:电磁流变的应用与研究。

Hirani 设计了转速达 2 000 r/min 的 MR 制动器^[11],此设计考虑了剪切模式下 MR 间隙的影响。Nguyen 和 Choi 考虑了汽车 MR 制动器零场摩擦热的最小化来优化制动器性能^[5]。前面提到的 MR 制动器都只利用了 MR 流体的剪切模式。而用剪切模式与压缩模式相结合的方式比单用剪切模式所能达到的应力更高,Tang 等人研究表明如果沿着磁场方向压缩 MR 流体,剪切屈服应力可大大提高^[6]。Kulkarni 等人试验了动力加载过程中挤压与剪切模式相结合的情况^[7]。Mazlan 等人用实验研究两种 MR 流体(MRF-241ES 和 MRF-132DG)在压缩模式下电流大小的影响^[8]。文章着重研究客车单盘型磁流变制动器,在挤压与剪切混合模式下,建立制动力矩动力学模型并进行仿真。

1 剪切模式与压缩模式下制动力矩动力学模型建立

客车单盘型磁流变缓速器结构如图 1 所示,在挤压与剪切混合模式下工作。该结构的优点是在轴向方向尺寸较小,使得转子的转动惯量较小,反应较灵敏。磁流变缓速器结构包括轴 15,旋转盘 10,磁盘 1、3、5,电磁线圈 2 和 9,轴承 13,唇形密封圈 14 等。其中磁盘 5 固定不动,磁盘 1 和 3 在磁盘 5 内线圈 9 通电时由于电磁吸力向右轴向滑动。安装在轴 15 上的旋转盘 10 两侧以及外围的环形空间充满了磁流变液 8。唇形密封圈用于密封磁流变液,并允许磁盘 1 和 3 在磁盘 5 线圈通电时轴向滑动。采用 6 个压缩弹簧抑制磁盘 5 内线圈产生的电磁力。

磁流变缓速器不起作用时,转盘 10 与传动轴 15 以相同的速度一起旋转,此时磁流变液类似于牛顿流体,粘性小,阻力小。磁流变缓速器开始工作时,先给磁盘 5 内的线圈 9 通电产生电磁吸力使磁盘 1 和 3 向右滑动,即磁流变液压缩后,再给磁盘 1 和 3 内的线圈 2 通电产生所需要的屈服应力,随着线圈电流的增加屈服应力增大,由此来控制磁流变缓速器的制动转矩。

在挤压与剪切混合模式下工作的剪切屈服应力公式^[9]

$$\tau_y(H) = \tau_0 + K(H)P_e \tag{1}$$

式中, τ_0 指 MR 流体在零压缩时的剪切屈服应力,随着磁场强度的增加而增大; $K(H)$ 是个常

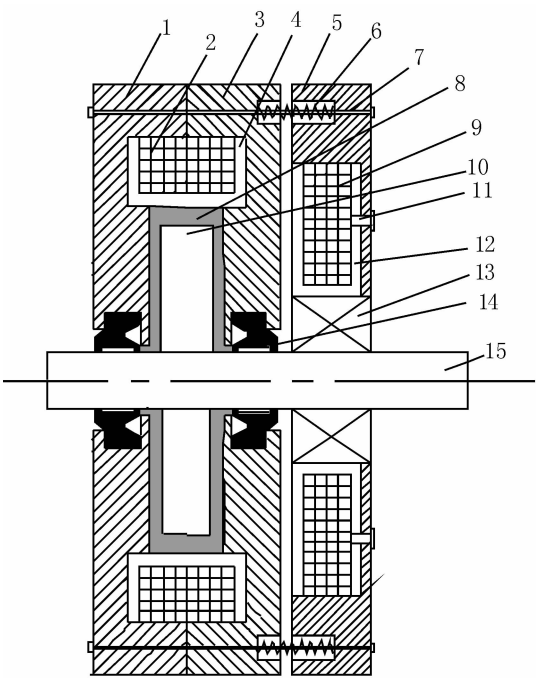


图 1 客车磁流变缓速器工作原理图

1,3,5-磁盘; 2,9-线圈; 4,12-磁轭; 6-弹簧; 7-螺栓; 8-磁流变液; 10-转盘; 11-螺钉; 13-轴承; 14-唇型密封圈; 15-轴

Fig. 1 Working principle of coach magnetorheological retarder

数,随着磁场强度的增加而增大; P_e 是压应力。

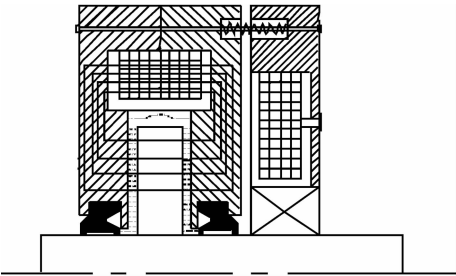
1.1 剪切模式下的磁路

客车磁流变缓速器在剪切模式下工作的示意图如图 2。由图 2(b)的仿真可知,磁力线经过磁流变液且垂直于磁盘 1、3 和转盘 10。

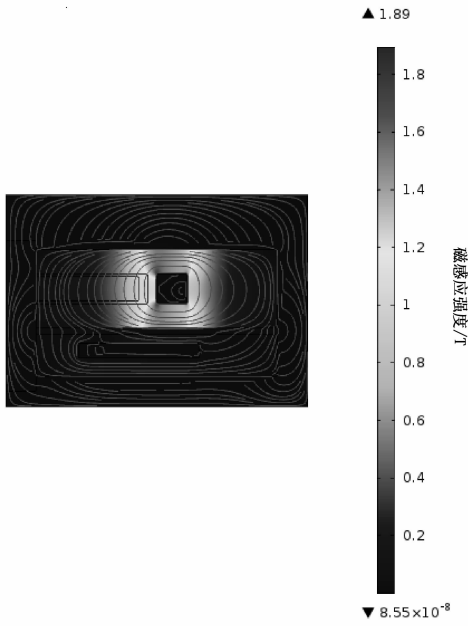
如图 3,转盘 10 内径和外径分别为 r_1 和 r_2 ,间隙厚度为 h 。采用 Bingham 模型的制动转矩公式^[2]

$$T = \frac{4}{3}\pi(r_2^3 - r_1^3)\tau_0 + \frac{\pi\eta\omega}{h}(r_1^4 - r_1^4) \tag{2}$$

式中, η 是 MR 流体粘度。然而由公式(2)估计的



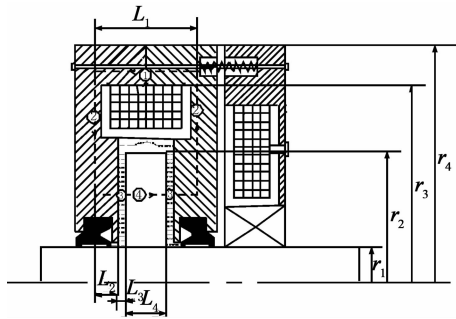
(a) 磁场示意图



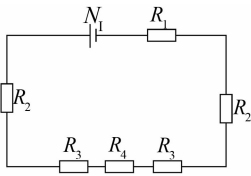
(b) COMSOL 磁场强度与磁力线仿真

图2 仅线圈2通电时的磁场分布

Fig.2 Magnetic field distribution with only coil 2 being energized



(a) 磁路序号



(b) 等效图

图3 剪切模式下的磁路

Fig.3 Magnetic circuit under shear mode

制动转矩并不是很理想^[6]。Farhoud 等人提出 Herschel-Bulkley 模型更精确,结果更可靠。MR 制动器的制动转矩采用 Herschel-Bulkley 模型如下

$$T = \frac{4\pi}{3}(r_2^3 - r_1^3)\tau_0 + \frac{4\pi K\omega^n}{(n+3)h^n}(r_2^{n+3} - r_1^{n+3}) \quad (3)$$

式中, K 是粘稠度指数; n 是通过实验得出的剪切稀化指数。

如图3,整个磁路由4部分组成,每个部分都用相应的序号标明。每个部分的磁阻根据磁路的欧姆定律由 Wang 等人给出^[10]

$$R_1 = \frac{L_1}{\pi\mu_1(r_4^2 - r_3^2)}, R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_1}\right)}{2\pi\mu_2 L_2},$$

$$R_3 = \frac{L_3}{\pi\mu_3(r_2^2 - r_1^2)}, R_4 = \frac{L_4}{\pi\mu_4(r_2^2 - r_1^2)} \quad (4)$$

式中, $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ 是每个部分磁导率; r_1, r_2, r_3, r_4 是有效半径; L_1, L_2, L_3, L_4 是有效长度。

$$\sum R_s = R_1 + 2R_2 + 2R_3 + R_4 \quad (5)$$

磁路的磁通量 ϕ_s 为^[10]

$$\phi_s = \frac{N_s I}{\sum R_s} \quad (6)$$

式中, N_s 指线圈匝数; I 是电流。根据柯西霍夫第二定律,工作间隙的磁感应 B_s 可由(7)式得到^[4]

$$B_s = \frac{\phi_s}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \quad (7)$$

1.2 挤压模式下的磁路

如果给 MR 流体施加一个快速压缩聚集过程,由此形成的微观结构强度比单链结构强很多^[9]。在磁场压缩区,铁颗粒形成强而有力的厚柱,如图4(a)。图4(b)是线圈9通电时产生的磁场,可见线圈9通电产生的磁通通过磁流变液,在此磁场作用下磁盘1、3向磁盘5方向移动;线圈9断电解除压缩,磁盘1、3回到其初始位置。

根据法向力(F_e)和旋转盘面积(A_A)可得出正应力^[9]

$$P_e = \frac{F_e}{A_d} = \frac{F_e}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \quad (8)$$

法向力

$$F_e = -\frac{\phi_c^2}{A_d \mu_{air}} \quad (9)$$

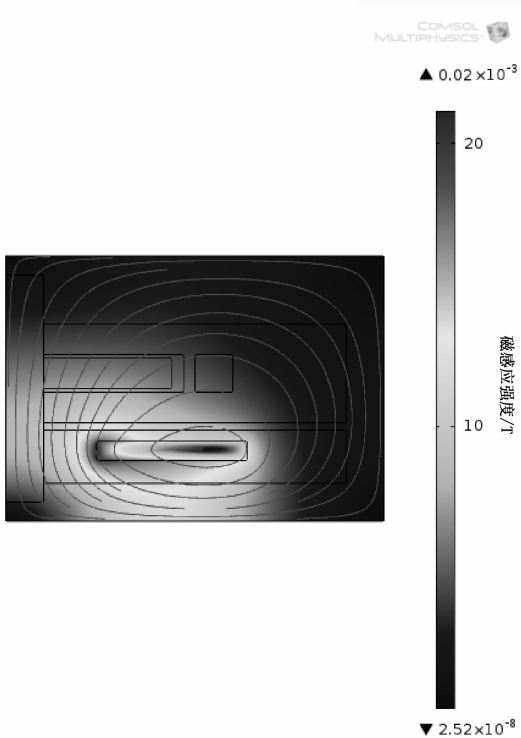
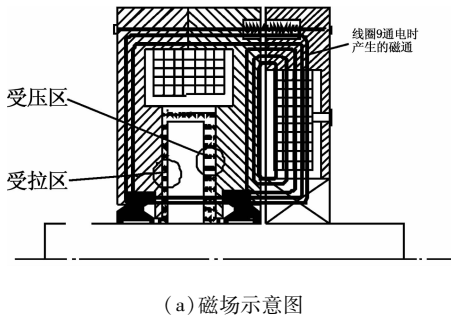
式中, ϕ_c 是线圈9通电时产生磁场的磁路磁通量; μ_{air} 是空气绝对磁导率, $\mu_{air} = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。

将式(9)代入式(8)得

$$P_e = -\frac{\phi_c^2}{A_d^2 \mu_{air}} = \frac{\phi_c^2}{\pi^2(r_2^2 - r_1^2)^2 \mu_{air}} \quad (10)$$

根据力平衡方程有:

$$mx + 6K_c(\delta - x) - \mu_k mg = F_e \quad (11)$$



(b) COMSOL 强度与磁力线仿真

图 4 仅线圈 9 通电时的磁场分布

Fig. 4 Magnetic field distrlbution with only coil 9 being energized

式中, m 和 \ddot{x} 分别为运动部件的质量和加速度; K_c 、 δ 、 x 分别是弹簧刚度、预压缩量和弹簧的瞬时位移; μ_k 是动摩擦系数; 文章设计的缓速器采用 6 个弹簧, 每个弹簧的刚度为

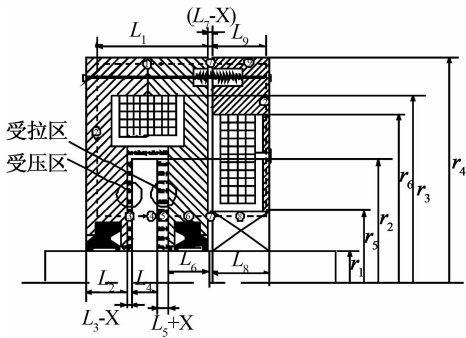
$$K_c = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a} \quad (12)$$

式中, d 指金属丝直径; G 是弹簧剪切模量; D 是线圈直径; N_a 是有效匝数。

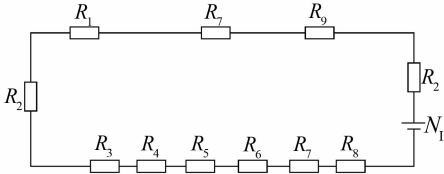
线圈 9 通电后的磁路如图 5, 它由 10 个部分组成, 每个部分用相应序号标明。

每个部分的磁阻根据磁路欧姆定律可得

$$R_1 = \frac{L_1}{\pi \mu_1 (r_4^2 - r_3^2)}, R_2 = \frac{\ln(r_4/r_1)}{2\pi \mu_2 L_2},$$



(a) 磁路序号



(b) 等效图

图 5 挤压模式下的磁路

Fig. 5 Magnetic circuit under compression mode

$$\begin{aligned} R_3 &= \frac{L_3 - x}{\pi \mu_3 (r_2^2 - r_1^2)}, R_4 = \frac{L_4}{\pi \mu_4 (r_2^2 - r_1^2)} \\ R_5 &= \frac{L_5 + x}{\pi \mu_5 (r_2^2 - r_1^2)}, R_6 = \frac{L_6}{\pi \mu_6 (r_4^2 - r_1^2)}, \\ R_7 &= \frac{L_7 - x}{\pi \mu_7 (r_4^2 - r_1^2)}, R_8 = \frac{L_8}{\pi \mu_8 (r_5^2 - r_1^2)}, \\ R_9 &= \frac{L_9}{\pi \mu_9 (r_4^2 - r_6^2)} \end{aligned} \quad (13)$$

式中, $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5, \mu_6, \mu_7, \mu_8, \mu_9$ 为每个部分的磁导率; $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$ 是有效半径; $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8, L_9$ 是有效长度; x 是弹簧瞬时位移。

磁路总的磁阻 $\sum R_c$ 表达式为

$$\sum R_c = R_1 + 2R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + 2R_7 + R_8 + R_9 \quad (14)$$

磁路的磁通量 ϕ_c 为:

$$\phi_c = \frac{N_c I}{\sum R_c} \quad (15)$$

式中, N_c 是线圈 9 匝数; I 是电流。

1.3 剪切与挤压混合模式下的磁路

给磁流变液施加挤压磁场(线圈 9 通电)后再给线圈 2 通电形成剪切磁场, 磁流变液所在磁路如图 6。

如图 6 所示, 整个磁路包括 5 个部分, 每个部分用相应序号标明。每个部分的磁阻(R)可根据

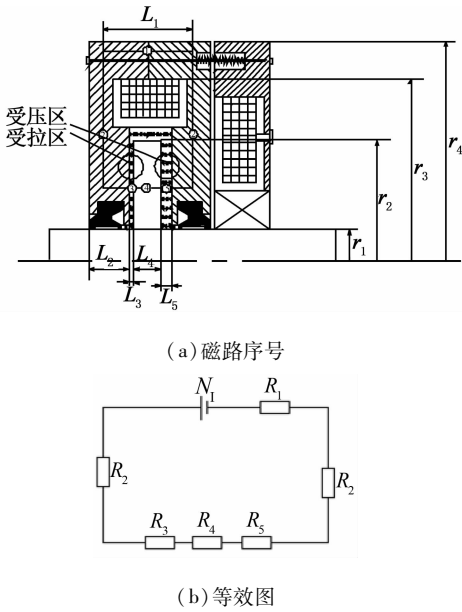


图6 剪切与挤压混合模式下的磁路

Fig. 6 Magnetic circuit under shear plus compression mode

磁路欧姆定律得^[10]

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{L_1}{\pi\mu_1(r_4^2 - r_3^2)}, R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_1}\right)}{2\pi\mu_2 L_2}, \\ R_3 &= \frac{L_3}{\pi\mu_3(r_2^2 - r_1^2)}, R_4 = \frac{L_4}{\pi\mu_4(r_2^2 - r_1^2)}, \\ R_5 &= \frac{L_5}{\pi\mu_5(r_2^2 - r_1^2)} \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5$ 指每个部分磁导率; r_1, r_2, r_3, r_4 是有效半径; L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 是有效长度。

磁路总磁阻 $\sum R_{cs}$ 为^[10]

$$\sum R_{cs} = R_1 + 2R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (17)$$

利用磁路磁通量公式得^[10]

$$\phi_{cs} = \frac{N_s I}{\sum R_{cs}} \quad (18)$$

式中, N_s 为线圈2匝数; I 为电流值。根据柯西霍夫第二定律,工作间隙的磁感应 B_{cs} 为^[10]

$$B_{cs} = \frac{\phi_{cs}}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \quad (19)$$

总的制动转矩可分为两个区域,一个压缩区域,另一个为拉伸区域。压缩区域传递扭矩为

$$dT_1 = \tau_y(H) \cdot 2\pi r dr \cdot r = 2\pi\tau_y(H)r^2 dr \quad (20)$$

对公式(20)进行积分得

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{2\pi}{3}(r_2^3 - r_1^3)(\tau_0 + K(H)P_e) + \\ &\quad \frac{2\pi K\omega^n}{(n+3)(h-x)^n}(r_2^{n+3} - r_1^{n+3}) \end{aligned} \quad (21)$$

在拉伸区域传递扭矩为

$$dT_2 = \tau_0 2\pi r dr \cdot r = 2\pi\tau_0 r^2 dr \quad (22)$$

对公式(22)进行积分得

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{2\pi}{3}(r_2^3 - r_1^3)\tau_0 + \\ &\quad \frac{2\pi K\omega^n}{(n+3)(h+x)^n}(r_2^{n+3} - r_1^{n+3}) \end{aligned} \quad (23)$$

总的扭矩为

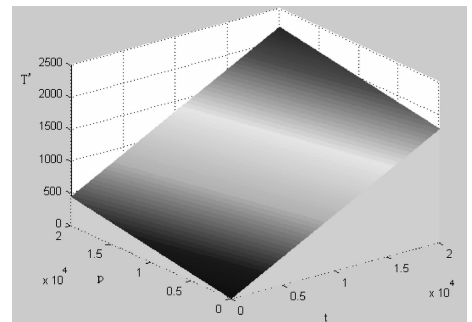
$$\begin{aligned} T &= T_1 + T_2 = \frac{2\pi}{3}(r_2^3 - r_1^3)(2\tau_0 + K(H)P_e) + \\ &\quad \frac{2\pi K\omega^n}{(n+3)}(r_2^{n+3} - r_1^{n+3}) \left[\frac{1}{(h-x)^n} + \frac{1}{(h+x)^n} \right] \end{aligned} \quad (24)$$

式(24)中, T 是挤压和剪切混合模式下的理论扭矩。 $K(H)$ 的值可通过实验求出总转矩 T , H 取不同值时 T 不同,代入公式(23)反求 $K(H)$, 根据 H 与 $K(H)$ 若干组对应关系利用曲线拟合方法求出 $K(H)$ 与 H 的对应关系。

2 制动力矩公式仿真

转矩公式(24)第一项 $T = \frac{2\pi}{3}(r_2^3 - r_1^3)(2\tau_0 +$

$K(H)P_e)$ 与磁场大小有关,先不考虑 $K(H)$, 假设 $K(H) = 1$, 取 $r_4 = 0.22$ m, $r_1 = 0.05$ m, $n = 0.145$, $K = 0.33$ (n 跟 K 的值根据实验室现有的磁流变液 MRF-132DG 特性选取), 则 T' 与 τ_0, P_e 的关系如图 7(a); 转矩公式第二项 $T'' = \frac{2\pi K\omega^n}{(n+3)}(r_2^{n+3} - r_1^{n+3}) \left[\frac{1}{(h-x)^n} + \frac{1}{(h+x)^n} \right]$, 为了安装方便并减少磁阻, h 的值一般取 0.5 ~ 2 mm^[11], T'' 与 ω, h 的关系如图 7(b)。



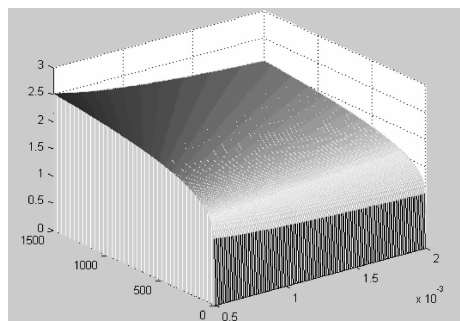
(b) T' 与 ω 、 h 的关系

图 7 制动力矩与相关参数的关系图

Fig. 7 Relationship between braking moment and relevant parameters

分析公式(23)和图 7 后可知:

1) 转矩公式第一项 T' 与 τ_0 、 P_e 成正比, T' 随剪切屈服应力 τ_0 的增大而增大, 随挤压应力 P_e 的增大而增大;

2) 转矩公式第二项 T'' 与 ω 、 h 值关系不大, 在

h 取值范围内(0.5 ~ 2 mm)几乎与 h 大小无关; T'' 随 ω 的增大而增大, 但增大幅度很小;

3) 因此客车磁流变缓速器制动力矩主要由剪切屈服应力 τ_0 和挤压应力 P_e 决定, 而由 MRF 特性可知, τ_0 和 P_e 的大小由磁感应强度 B 决定。于是, 调节线圈中的励磁电流控制磁感应强度 B , 可以达到控制 T 的目的。

4 结论

磁流变缓速器在客车上的应用研究刚刚起步, 尚未得到规模化应用。文章设计出客车磁流变缓速器工作原理图, 推导了工作在剪切与挤压混合模式下的制动力计算公式, 并利用 MATLAB 软件分析制动力影响因素, 对于开发出具有自主知识产权磁流变缓速器产品, 推动客车缓速器的升级换代, 提高车辆行驶的主动安全性都将有重要意义。

参考文献:

- [1] Huang J, Zhang J Q, Yang Y. et al. Analysis and design of a cylindrical magneto-rheological fluid brake[J]. Journal of Materials Processing and Technology, 2002, 129: 559 - 562.
- [2] Li W H, Du H. Design and experimental evaluation of a magnetorheological brake[J]. Int J Adv Manuf Technology, 2003, 21: 508 - 515.
- [3] Sapinski B, Bydon S. Magnetorheological rotary brake: analysis, design considerations and experimental evaluation[J]. Engineering Transactions, 2006, 54(3): 233 - 247.
- [4] Edward J P, Luis D, Falcao da Luz, et al. A performance evaluation of an automotive magnetorheological brake design with a sliding mode controller[J]. Mechatronics, 2006(16): 405 - 416.
- [5] Sukhwani V K, Hirani H. Design, development, and performance evaluation of high-speed magnetorheological brakes[J]. Journal of Materials: Design and Applications, 2008, 222: 73 - 82.
- [6] Nguyen Q H, Choi S B. Optimal design of an automotive magnetorheological brake considering geometric dimensions and zero-field friction heat[J]. Smart Materials and Structures, 2010(19): 1 - 6.
- [7] Tang X, Zhang X, Tao R, et al. Structure-enhanced yield stress of magnetorheological fluids[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(5): 2634 - 2638.
- [8] Kulkarni P, Ciocanel C, Vieira S L, et al. Study of the behavior of MR fluids in squeeze, torsional and valve modes[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2003, 14: 99 - 104.
- [9] Mazlan S A, Ekrem N B, Olabi A G. The performance of magnetorheological fluid in squeeze mode[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16: 780 - 785.
- [10] Wang D M, Hou Y F. Design and experimental evaluation of a multidisk magnetorheological fluid actuator[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2012, 24(5): 640 - 650.
- [11] Kikuchi T, Kobayashi K, Inoue A. Gap-size effect of compact MR fluid brake[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22: 1677 - 1683.