

电磁液冷缓速器制动力矩影响参数

李德胜, 尹汪雷, 张 凯

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘要: 针对传统电涡流缓速器的风冷散热、热衰退问题严重的缺点, 提出一种双凸极构造的电磁缓速器模型. 在该缓速器的定子内设有液体通道, 通过液冷措施及时排出缓速器工作时产生的热量, 使其保持较低的温度; 介绍了该缓速器的结构, 在进行理论分析后, 应用电磁场有限元分析专用工具, 对缓速器的磁场和涡流场进行分析, 详细讨论了电导率、励磁电流以及励磁电流饱和程度对制动力矩的影响. 结果表明: 随着电导率的增加, 制动力矩逐渐趋于饱和; 当励磁电流饱和时, 随着励磁电流的增大, 制动力矩不会明显地增加; 当励磁电流的饱和程度不断增加时, 制动力矩变化缓慢.

关键词: 电磁液冷缓速器; 制动力矩; 有限元仿真

中图分类号: U 463. 51

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2014)06 - 0831 - 06

Influence Factor of Braking Torque in Electromagnetic Liquid-cooled Retarder

LI De-sheng, YIN Wang-lei, ZHANG Kai

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Aiming at air cooling and thermal recession problem of the traditional eddy current retarder, a type of salient pole electromagnetic liquid-cooled retarder (ELR) was proposed. The liquid channels were equipped in the retarder's stator. The heat generated during the operation was discharged through a liquid-cooled system, which can make the retarder maintain a lower temperature. Firstly this paper introduced the structure of retarder. After conducting theoretical analysis, the magnetic and the eddy current field of the retarder were analyzed by the finite element analysis software. The effects of the conductivity, the excitation current and excitation current saturation degree on the brake torque were discussed in detail. Results show that the braking torque becomes increasingly saturated with the increase of the electrical conductivity; when the excitation current is saturated, the torque increases slightly with the increase of the excitation current; when the degree of saturation excitation current increases, the torque changes slowly.

Key words: electromagnetic liquid-cooled retarder; braking torque; finite element simulation

近几年国内缓速器市场大多都采用电涡流缓速器, 其已在大型客车上得到了广泛使用, 但由于其采

用空气冷却, 导致缓速器热衰退严重, 无法长时间制动^[1-4]. 这些问题使得电涡流缓速器难以满足大型

收稿日期: 2013-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277005)

作者简介: 李德胜(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事微机电系统(MEMS)和汽车缓速器及其产业化方面的研究, E-mail: dsl@bjut.edu.cn

货运车辆的制动要求. 为了克服传统电涡流缓速器热衰退的缺点, 本文提出了一种双凸极构造的电磁液冷缓速器^[5]. 这种缓速器的结构简单, 只有1个线圈且为静止部件; 工作状态易于控制, 可以实现无极制动; 并且通过液冷散热可以很好地解决传统缓速器不能长时间工作的问题. 本文在介绍该缓速器结构及其工作原理的基础上, 运用电磁场有限元专用软件进行电磁场和制动力矩的仿真, 将仿真得到的制动力矩曲线与实验测量得到的制动力矩曲线进行对比, 根据制动力矩计算公式, 运用仿真软件对制动力矩影响较大的几个因素进行仿真, 得到不同因素的变化对制动力矩的影响^[6-7].

1 缓速器结构及工作原理

双凸极构造的电磁液冷缓速器结构如图1所示. 缓速器包括定子、转子和线圈. 缓速器转子为齿形转盘, 该齿形转盘的轴向剖面为工字型, 工字型两侧的凸起为缓速器凸极; 缓速器与传动轴相连且缓速器线圈为独立的一部分, 安装在缓速器的2个凸极之间, 并且与缓速器定子固定在一起; 缓速器定子中带有水道, 定子内壁上产生的热量可以通过水道中的水散发出去.

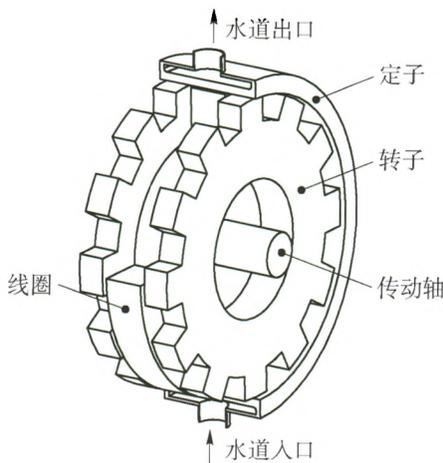


图1 缓速器基本结构

Fig.1 Basic structure of retarder

该液冷缓速器工作时, 缓速器线圈通电后产生磁场, 即会形成环形封闭磁路, 当汽车传动轴带动缓速器转子旋转时, 缓速器定子切割转子发出的磁力线, 在缓速器定子内表面会产生涡流, 从而产生制动力矩. 缓速器的工作原理为: 将动能转换为热能, 缓速器工作后产生的热量可以通过定子内水道中的液体带走. 采用液冷散热的方式可以很好地解决缓速器热衰退问题, 使得缓速器得到稳定的制动力矩.

2 电磁场理论分析

2.1 缓速器磁路分析

考虑到工程实践中磁场的计算和分析都较为复杂, 该双凸极缓速器的磁路中也常常出现磁路饱和等现象, 为了对其进行分析, 首先需要将缓速器的磁场简化为磁路模型进行分析.

该结构缓速器磁路形式如图2所示, 由于双凸极缓速器中缓速器的转子为齿形结构, 所以磁力线在转子盘上会分开从各个齿经过, 再通过气隙到达缓速器定子内壁上, 气隙中的磁力线垂直于缓速器转子的外圆面以及缓速器定子的内圆面. 在只考虑1个磁极的情形下, 可以将磁路进一步简化, 得到图3所示的磁路. 在一系列简化过程中, 磁路中磁通 Φ 的方向与大小都始终未变化.

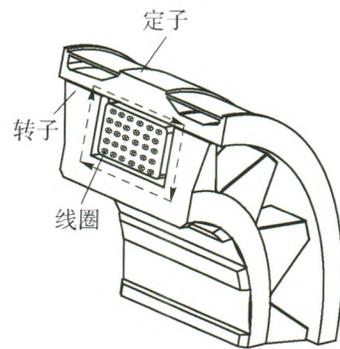


图2 缓速器磁路示意图

Fig.2 Schematic diagram of magnetic circuit

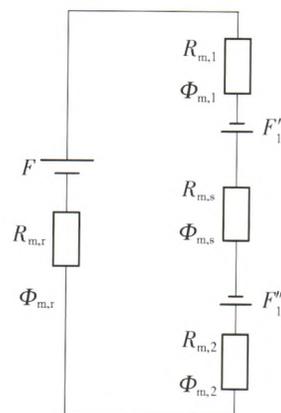


图3 缓速器磁路等效磁路示意图

Fig.3 Magnetic circuit equivalent schematic of retarder

图3为简化后的单个磁极所对应的磁路, 则一个磁极磁路中的总磁阻(H^{-1})为

$$R_m = R_{m,r} + R_{m,1} + R_{m,s} + R_{m,2} \quad (1)$$

式中: $R_{m,r}$ 为缓速器转子的磁阻(H^{-1}); $R_{m,1}$ 为第1个气隙的磁阻(H^{-1}); $R_{m,s}$ 为缓速器定子的磁阻

(H^{-1}); $R_{m,2}$ 为第 2 个气隙的磁阻 (H^{-1}).

由于空气磁导率不高, 其相对磁导率 $\mu_r \approx 1$, 气隙产生的磁阻为

$$R_{m,d} = \frac{\delta}{\mu_0 s_p} \quad (2)$$

式中: δ 为气隙的间距 (m); μ_0 为真空磁导率 (H/m); s_p 为气隙的面积 (m^2).

2.2 缓速器制动力矩计算

缓速器的制动力矩的大小直接影响着缓速器的性能指标, 所以在缓速器的研究中, 制动力矩的理论计算显得尤为重要. 在计算缓速器制动力矩的时候, 可以将动磁问题转化为静磁问题来解决. 通过理论推导可以得出缓速器平均制动功率为^[8]

$$\bar{p}_1 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\bar{p}_1 = \frac{B^2 \omega^2 R_m^2 \Delta h a b^3}{12\rho(a^2 + b^2)} \quad (3)$$

式中: a 为凸极顶端的周向宽度; b 为凸极顶端的轴向宽度; B 为磁感应强度; ω 为角速度; ρ 为电阻率; R_m 为一个磁路的总磁阻; Δh 为涡电流集肤深度. 坐标系的建立如图 4、5 所示.

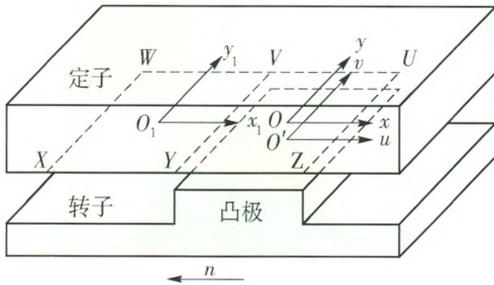


图 4 制动力矩分析中的坐标系

Fig. 4 Rectangular coordinate systems in the braking torque analysis

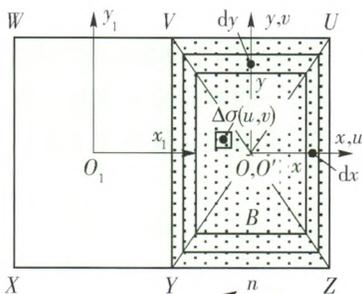


图 5 制动力矩计算坐标系

Fig. 5 Calculation of the coordinate systems

则制动力矩为

$$T = \frac{p}{\omega_n} = \frac{(B_1^2 \Delta h_1 + B_2^2 \Delta h_2) \pi R_s^2 a b^3 n N_p}{180\rho(a^2 + b^2)} \quad (4)$$

式中: p 为缓速器制动功率; B_1 为磁通密度被增强部

分的磁感应强度; B_2 为磁通密度被减弱部分的磁感应强度; Δh_1 为磁通密度被增强部分的涡电流集肤深度; Δh_2 为磁通密度被减弱部分的涡电流集肤深度; R_s 为定子内表面半径; n 为缓速器转速; N_p 为凸极对数.

从式(4)中可以看到, 缓速器的制动力矩与上面介绍的一些因素相关, 理论计算十分复杂, 所以, 要想确定不同参数对制动力矩影响的大小, 需要使用电磁场专用软件 JMAG 进行数值仿真.

3 制动力矩参数影响数值仿真

为了减小模型的计算尺寸, 有效地节省计算资源, 根据周期对称边界条件和平面对称边界条件, 建立缓速器 1/12 模型, 如图 6 所示. 尺寸参数如表 1 所示, 其中, θ 为转子的旋转角度, R_i 为转子内表面半径, L_m 为转子凸极轴向长度, g 为气隙长度. 使用日本 JSOL 开发的 JMAG 软件进行电磁场仿真. 该软件用于各种电机和电磁设备磁场的精确计算. 使用 JMAG-Designer 对该缓速器模型进行电磁场分析和制动力矩的仿真运算, 根据表 1 的尺寸参数, 经过材料设定、边界条件设定、网格划分、有限元求解等步骤, 得到仿真制动力矩的大小, 如图 7 所示. 为验证数值分析的正确性, 按照表 1 中的参数研制了该双凸极结构缓速器试验样机, 并进行了多种性能试验, 得到在不同转速和励磁电流下缓速器的制动力矩. 图 7 为缓速器制动力矩 (励磁电流为 30 A) 测试数据和仿真数据的比较结果, 其中, T 为制动力矩, 可知计算值和试验值曲线基本吻合. 图 8 为缓速器实物试验测试系统.

表 1 缓速器尺寸参数

Table 1 Parameter of retarder

$\theta / (^{\circ})$	R_i / mm	L_m / mm	g / mm
30	242	75	1

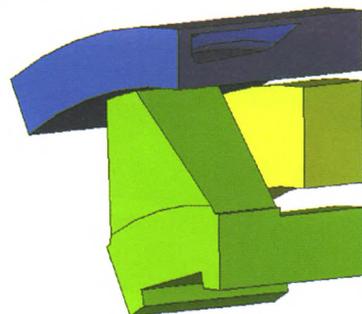


图 6 缓速器电磁场分析模型

Fig. 6 Electromagnetic model of retarder

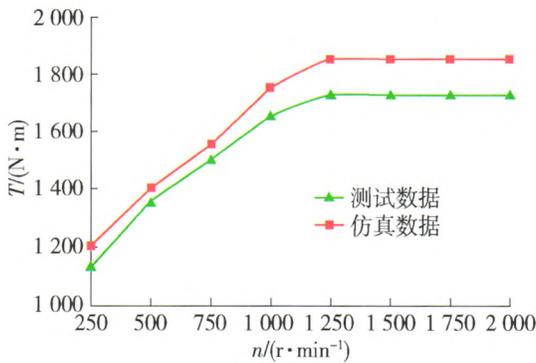
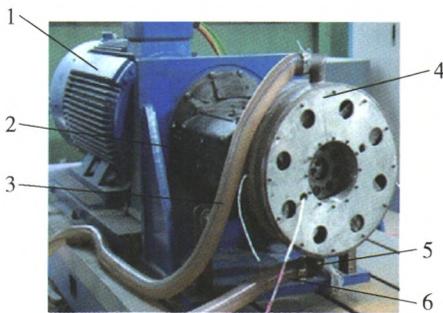


图7 试验和计算制动力矩曲线

Fig. 7 Braking torque obtained by measurement and calculation



1—电动机;2—变速箱;3—出水管;4—缓速器;5—进水口温度传感器;6—进水管.

图8 缓速器试验

Fig. 8 Liquid-cooled eddy current retarder with a structure of two salient poles were installed at test bench

4 仿真结果与讨论

为了系统研究缓速器的制动性能,下面对缓速器的磁路进行分析,并且通过数值模拟分析电导率、磁导率以及饱和程度对制动力矩的影响.

4.1 缓速器磁场分布

建立双凸极部分的1/12模型进行分析,得到如图9所示的缓速器缓速装置部分的三维静态磁场矢量分布图.当缓速器转子开始转动时,定子内壁的

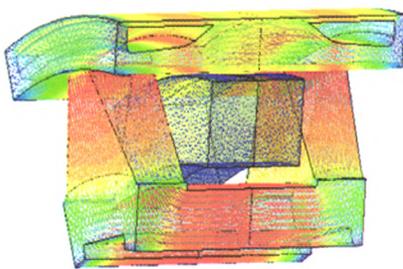


图9 缓速器凸极部分三维磁场矢量分布图

Fig. 9 Static 3-D magnetic flux vector maps of retarder

涡流会产生磁场且与励磁线圈产生的磁场方向相反,从而使得气隙磁密分布不均,进而使得缓速器内磁场发生畸变.图10、11分别为缓速器静态时一个凸极端面所对应的气隙磁密三维分布图和其所对应的定子表面磁密分布图,其中, B_g 为气隙磁密(T), θ 为转子的旋转角度, s 为齿厚.从图10、11中可以看出,由于涡流反磁通的存在,气隙磁密的分布已经发生畸变.

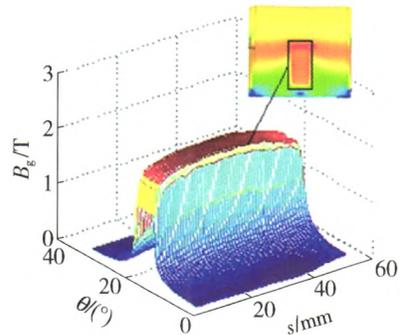


图10 静态气隙磁密3D分布图

Fig. 10 3D distribution of static air flux density

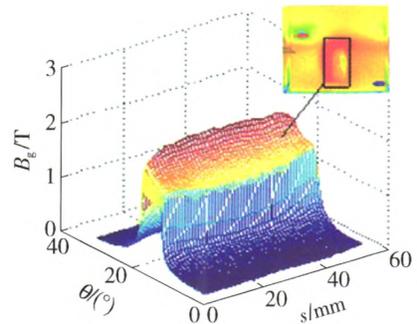


图11 瞬态气隙磁密3D分布图

Fig. 11 3D distribution of transient air flux density

4.2 电导率(温度)对制动力矩的影响

由于缓速器是将汽车动能转化为热能的一种装置,缓速器长时间工作使得定子温度急剧上升,最高温度可达600℃,导致定子电导率下降,电阻与温度的关系式为

$$R = R_0 [1 + \alpha(t - t_0)] \quad (5)$$

式中: R 为温度为 t 时的电阻; R_0 为温度为 t_0 时的电阻; α 为电阻温度系数.材料和温度都会影响定子的电导率,电导率随温度基本呈线性变化.

通过对模型进行瞬态仿真运算,得到转速 $n = 1000 \text{ r/min}$ 、缓速器励磁电流为40 A时制动力矩随定子电导率变化的关系曲线,如图12所示,其中, σ 为电导率($\text{MS} \cdot \text{m}^{-1}$).从图12中可以看出,电导率小于 $5 \text{ MS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,电导率与制动力矩大小基本呈线

性关系,当电导率大于 $5 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$ 时,由于涡流的集肤效应,集肤深度 Δh 变小,使得随着电导率的增加,制动力矩增长率变小并逐渐趋于饱和. 电导率主要受其工作中温度升高的影响,如不采用水冷方法散热,非常容易导致定子电导率下降,这也是电涡流缓速器出现热衰退的主要原因.

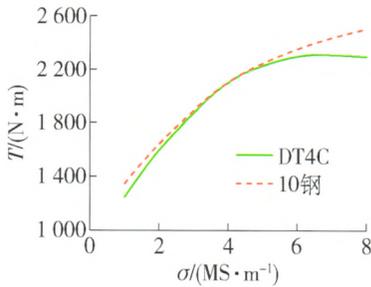


图 12 制动力矩与电导率关系曲线

Fig. 12 T - σ curve

4.3 励磁电流对制动力矩的影响

气隙磁密的大小对于制动力矩的影响非常明显,涡电流密度与气隙磁密成正比例关系,气隙磁密越大,涡电流密度越大,而在磁路分析中可知,当励磁电流增加时,磁路未达到饱和之前气隙磁密也会增加. 为此建立了定、转子均为 10 号钢、转子转速 $n = 1000 \text{ r/min}$ 的模型,通过改变励磁电流的大小得到如图 13 所示的励磁电流与平均气隙磁密和制动力矩的关系曲线,其中, $B_{g,av}$ 为平均气隙磁密 (T). 从图 13 中可以看出,当励磁电流小于 10 A 时,平均气隙磁密和制动力矩与励磁电流之间基本呈线性关系;当励磁电流继续增加时,平均气隙磁密和制力矩变化趋于平缓,此时磁路已经饱和.

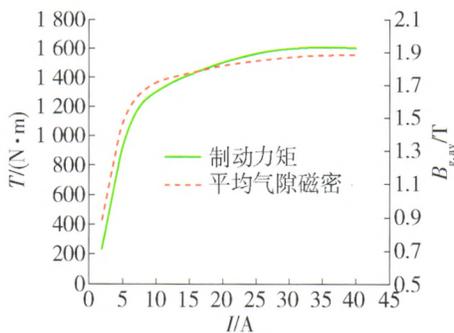
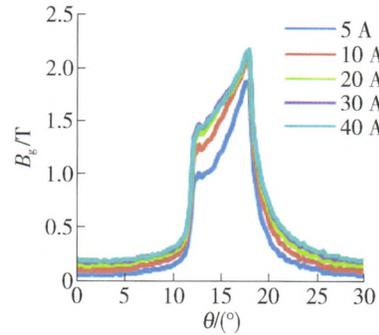


图 13 制动力矩、平均气隙磁密与电流关系曲线

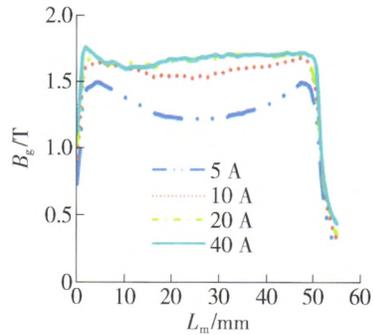
Fig. 13 T & $B_{g,av}$ -current curve

图 14 示出了不同励磁电流时气隙磁密分布,其中, θ 为转子的旋转角度 ($^\circ$); L_m 为转子凸极轴向长度 (mm). 如图 14 (a) 所示,类似于电机中的电枢反应一样,气隙磁密发生畸变:一边减少,一边略有增

加. 当电流较小时,涡电流产生的磁动势对于励磁电流产生的磁动势的削弱较为明显. 从图 14 (b) 可以看出,气隙磁密在其轴向分布上也会受到涡电流的影响,且在凸极端面所对应的气隙平面的中间部分,削弱最为明显.



(a) 周向气隙磁密分布



(b) 轴向气隙磁密分布

图 14 不同励磁电流气隙磁密分布图

Fig. 14 Different excitation current flux density distribution

4.4 饱和程度对制动力矩的影响

通过上述分析可知,当励磁电流为 10 A 时缓速器磁路进入饱和状态,励磁电流从 10 A 增加至 40 A 时其饱和程度不断增加,但是制动力矩变化缓慢. 通过参数化运算,考察励磁电流为 40 A 和 10 A 两种条件下,制动力矩随转速的变化曲线,如图 15 所示. 从图 15 中可以看出,当转速较低时 (低于 500 r/min), 10 A 和 40 A 励磁电流条件下的制动力矩大

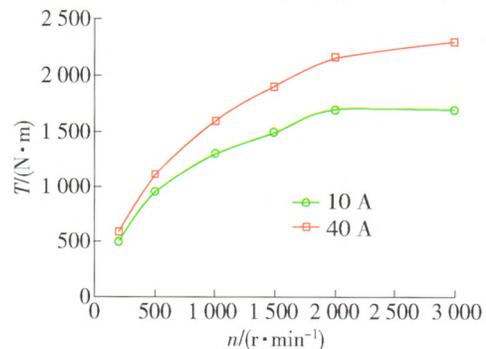


图 15 制动力矩与转速关系曲线

Fig. 15 T - n curve

小非常接近,随着转速的增加,涡电流密度增大,其反磁势亦增加,此时,10 A 和 40 A 励磁电流条件下制动力矩差值变大,说明涡电流反磁势对于不同饱和程度气隙磁密的削弱程度不同.

5 结论

1) 对于双凸极电磁液冷缓速器,随着电导率的增加,力矩没有出现明显的衰退现象.

2) 当励磁电流继续增加时(励磁电流饱和时),随着励磁电流的增大,制动力矩不会明显地增加,说明此时的磁路已经饱和.

3) 当励磁电流的饱和程度不断增加时,制动力矩的变化缓慢. 涡电流反磁势对于不同饱和程度气隙磁密的削弱程度不同.

参考文献:

- [1] 何仁,刘成晔,衣丰艳. 车用涡流缓速器转子盘温度场计算方法[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2005, 26(2): 117-120.
HE Ren, LIU Cheng-ye, YI Feng-yan. Calculation method of eddy current retarder in the car of the rotor temperature [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2005, 26(2): 117-120. (in Chinese)
- [2] 刘成晔,沈建明,何仁,等. 电涡流缓速器转子盘风道散热结构参数影响分析[J]. 兵工学报, 2011, 32(2): 236-241.
LIU Cheng-ye, SHEN Jian-ming, HE Ren, et al. The structure parameter influence analysis of eddy current air cooling retarder[J]. Ordnance Journal, 2011, 32(2): 236-241. (in Chinese)
- [3] LIU C Y, JIANG K J, ZHANG Y. Design and use of an eddy current retarder in an automobile[J]. International Journal of Automotive Technology, 2011, 12(4): 611-616.
- [4] LONG Z, LI Y, YANG Z, et al. Experiment and research on performance characteristic of eddy-current retarder[C] // International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence. [S. l.]: IEEE Computer Society, 2010: 510-513.
- [5] 李德胜,杜肖,叶乐志,等. 一种凸极构造的液冷式电涡流缓速器:中国, ZL201210061975. 6[P]. 2012-07-25.
- [6] 叶乐志,李德胜. 永磁缓速器制动性能影响因素的数值模拟[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(11): 1624-1630.
YE Le-zhi, LI De-sheng. Numerical simulation on influence factor torque in permanent magnet retarder for vehicle[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(11): 1624-1630. (in Chinese)
- [7] LORIMER W L, LIEU D K, HULL J R, et al. Correlation of experimental data and three-dimensional finite element modeling of a spinning magnet array [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(5): 3004-3007.
- [8] 焦兵锋. 电磁液冷缓速器多场耦合分析与优化设计[D]. 北京:北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 2013.
JIAO Bing-feng. Multifield coupled analysis and optimization of the electromagnetic liquid-cooled retarder [D]. Beijing: College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, University of Technology, 2013. (in Chinese)

(责任编辑 刘 潇)