

能动型电磁液冷缓速器设计与试验

郭文光 李德胜 叶乐志 张凯 门爽

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘要: 针对电涡流缓速器耗电量大和制动力矩热衰退严重的问题,基于涡流制动与电机再生制动原理,提出一种将液冷式电涡流缓速器与单相外转子磁阻电机结构相结合的新型能动型缓速器。建立了能动型缓速器的电磁场数学模型,数值模拟预测了其制动性能,优化了电机的开通、关断角,计算了下坡持续制动时电机能量回收时的功率,最后对该缓速器的空损力矩、制动力矩热衰退、发电性能和电动性能进行了台架试验,试验结果表明,在1000 r/min时涡流制动力矩达到1260 N·m,持续制动12 min,制动力矩仅下降15%,可满足重型货车的辅助制动需求;电机再生制动力矩随着转速的增大呈先增大后减小的趋势,在1000 r/min时制动力矩达到最大;当车辆以35 km/h的速度下坡制动时,能量回收功率可达到94 kW。

关键词: 电涡流; 能量回收; 数值模拟; 制动性能

中图分类号: U463.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)10-0396-07

Design of Active Electromagnetic Liquid-cooled Retarder for Heavy Vehicles

GUO Wenguang LI Desheng YE Lezhi ZHANG Kai MEN Shuang

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

Abstract: To solve high power consumption and problem of braking torque heat-fade of the conventional eddy current brake, a new active electromagnetic liquid-cooled retarder was proposed based on the principle of eddy current brake and motor energy regeneration brake. The new type of retarder included a liquid cooled eddy current retarder and a single-phase switched reluctance motor with an outer rotor. The mathematical model of electromagnetic field for the retarder was established. The braking performance of the retarder was predicted by numerical simulation, the opening and closing angle of the switched reluctance motor were optimized, and the energy recovery power of the the switched reluctance motor in the downhill continuous braking, the energy recovered in the emergency braking and start torque at low speed were calculated. At last, tests for the air loss moment, heat-fade of braking torque, power generation performance and power-driven performance were carried out. The test results showed that the eddy current braking torque reached 1260 N·m at 1000 r/min. The braking torque was declined by 15% in the continuous braking stage. The braking torque of the motor was increased at first and then decreased with the increase of speed. When the speed was 1000 r/min, the braking torque of the motor reached the maximum; when the vehicle was slowed down at speed of 35 km/h, the recovery power was up to 94 kW.

Key words: eddy current; energy recovery; numerical simulation; braking performance

0 引言

随着汽车工业技术的发展和道路交通的改善,重型车辆呈现出高速化、大吨位的发展趋势,从而大幅度增加了车辆的制动负荷。因此,单一的机械制动系统已难以满足重型车辆的制动要求。为保证重

型车辆具有良好的行驶安全性、舒适性和经济性,解决车辆在下坡连续制动所导致的制动性能严重衰退问题,国外在重型车辆上普遍采用缓速器制动装置^[1]。缓速器作为一种汽车辅助制动装置,按其工作原理不同主要分为以下5种:发动机缓速器、排气制动缓速器、电涡流缓速器、液力缓速器和永磁缓速

收稿日期: 2018-04-11 修回日期: 2018-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51777003、51741701)和北京市自然科学基金项目(3182007)

作者简介: 郭文光(1988—),男,博士生,主要从事汽车辅助制动装置理论研究,E-mail: guowenguanglz@163.com

通信作者: 李德胜(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事 Mems 和缓速器技术研究,E-mail: dsli@bjut.edu.cn

器^[2]。在这几种缓速器中,电涡流缓速器以其低速大扭矩、结构简单、可靠性高等优点,在汽车辅助制动市场上得到了最为广泛的应用^[3]。然而电涡流缓速器工作时需要消耗大量的电能,这对汽车蓄电池产生较大的冲击,且由于采用风冷方式散热,持续制动时制动力矩热衰退严重^[4-5]。

针对电涡流缓速器性能的不足,SHEN 等^[6]提出一种具有双转子盘的自励式电涡流缓速器,该缓速器通过内置永磁发电机实现自励。NIAN 等^[7]提出一种基于永磁发电机的能量收回式制动系统。ZHANG 等^[8-9]提出一种自励式电磁液冷缓速器,较好地解决了缓速器耗电和热衰退等问题。然而,上述方案均利用永磁电机实现自励,不可避免地带来了成本问题,且并没有充分将车辆制动能量回收再利用。

本文针对重型车辆制动,基于涡流制动和开关磁阻电机再生复合制动原理,提出一种能动型液冷式缓速器。通过建立涡流制动和电机再生数学模型,同时结合数值模拟方法,对该新型缓速器制动性能和发电性能进行研究。

1 结构与工作原理

提出的能动型缓速器结构上由液冷式电涡流缓速器和外转子单相磁阻电机组成。液冷式电涡流缓速器由外形类似于圆环的定子、具有导磁凸极的转子和一组独立的励磁线圈构成;外转子单相磁阻电机由磁阻电机定子、磁阻电机转子、磁阻电机绕组和相位检测部分构成;缓速器转子和磁阻电机转子固定在转子支架上,与汽车传动轴一起旋转,如图 1 所示。缓速器线圈在通入直流电后产生磁场,定子切割旋转的转子发出的磁力线产生涡流,电涡流产生的磁场与励磁线圈产生的磁场相互作用产生制动力^[10-14]。制动时定子上产生的热量通过循环冷却液带走。开关磁阻电机运行时遵循磁阻最小原理,因磁场弯曲而产生切向的磁拉力,从而实现发电和电动的功能^[15]。

2 涡流制动电磁分析

2.1 电磁场数学模型

2.1.1 静态磁场

根据液冷式电涡流缓速器结构的对称性,只对模型的 1/12 进行计算和分析。当缓速器的励磁线圈被通入电流时,励磁线圈产生的磁场围绕转子、气隙和定子之间构成回路,如图 2a 所示。每个回路的等效磁路如图 2b 所示。

因此,将磁路中的磁阻简化为

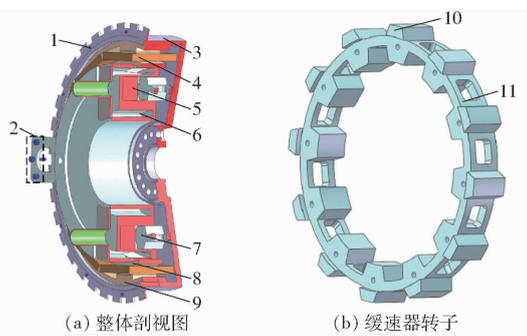


图 1 新型能动型缓速器

Fig. 1 Structure diagram of new energy recovery retarder

1. 小磁铁 2. 相位检测部分 3. 缓速器转子支架 4. 磁阻电机线圈 5. 缓速器励磁线圈 6. 冷却水道 7. 缓速器转子 8. 磁阻电机定子 9. 磁阻电机转子 10. 转子凸板 11. 转子齿连接部分

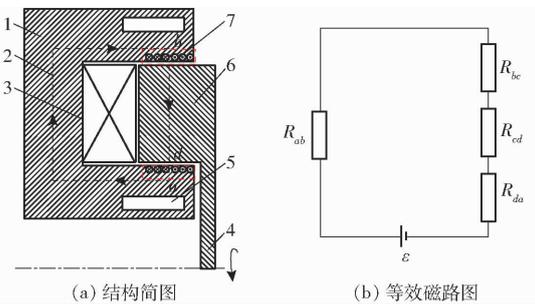


图 2 电涡流缓速器静态磁路图

Fig. 2 Static magnetic circuit diagrams of eddy current retarder

1. 定子 2. 磁路 3. 线圈 4. 转子 5. 水道 6. 转子凸极 7. 电涡流

$$R = R_{ab} + R_{bc} + R_{cd} + R_{da} \quad (1)$$

式中 R ——单个凸极齿磁路的总磁阻

R_{ab} ——定子部分总磁阻

R_{cd} ——转子部分总磁阻

R_{bc} 、 R_{da} ——气隙磁阻

转子、定子均选用导磁率相对较高的铁磁质材料制成,它们的磁阻相对于气隙磁阻很小。因此,定子部分总磁阻 R_{ab} 和转子部分总磁阻 R_{cd} 可忽略不计^[16]。故单个凸极齿磁路的总磁阻为

$$R \approx R_{bc} + R_{da} = 2R_{bc} = \frac{2L_0}{\mu_0 S} \quad (2)$$

式中 L_0 ——气隙长度 S ——凸极面积

μ_0 ——真空磁导率

在恒定磁场下,磁路中的磁动势 $\Phi = NI/R$,再根据基尔霍夫定律^[17]与式(2)可得气隙磁场中的磁感应强度为

$$B_0 = \frac{\mu_0 NI}{L_0} \quad (3)$$

式中 N ——线圈匝数 I ——励磁电流

2.1.2 瞬态磁场

电涡流缓速器工作时,旋转的转子凸板使定子

内表面感应涡流。定子内的涡流会产生磁动势,该感应磁动势将对励磁线圈的主磁场产生影响,即涡流磁动势会影响原来气隙磁场的大小和分布^[18-20]。

因此,气隙磁场是由励磁线圈产生的气隙磁场和涡流产生的气隙磁场的合成,根据式(3)得到的静态气隙磁场强度 B_0 ,可得

$$B_\delta = B_0 + B_i \quad (4)$$

式中 B_δ ——气隙内的合成磁场

B_i ——涡流产生的气隙磁场

缓速器内的瞬态电磁场满足以下方程

$$\nabla \times B_i = \mu J \quad (5)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B_\delta}{\partial t} \quad (6)$$

$$J = \sigma E \quad (7)$$

$$\nabla \cdot B_i = 0 \quad (8)$$

$$\nabla \cdot B_0 = 0 \quad (9)$$

式中 J ——电涡流密度

μ ——相对磁导率 E ——电场强度

σ ——电导率 t ——时间

联合式(5)~(9)得

$$\frac{1}{\sigma\mu} \nabla^2 B_i - \frac{\partial B_i}{\partial t} = \frac{\partial B_0}{\partial t} \quad (10)$$

联合式(5)、(10),可求得定子中的电涡流密度。涡流在定子上产生的功率为

$$P_e = 2 \iiint \frac{J^2}{\sigma} dV = 2 \int_0^b \int_{r_2}^{r_2+\Delta} \int_0^{2\pi} \frac{J^2}{\sigma} d\theta \quad (11)$$

其中

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

式中 ω ——转子角速度

V ——涡流等效趋肤深度的体积

r_2 ——定子内径

b ——转子轴向长度

Δ ——涡流等效趋肤深度

2.2 数值模拟

为了预测缓速器涡流制动性能,对电磁液冷缓速器进行有限元仿真,设计参数如表1所示。

2.2.1 电磁场瞬态仿真

根据电涡流缓速器结构的对称性,同时考虑有限元分析计算的时间问题,分析模型简化为1/12。在模型分析时,设定线圈中励磁电流为60 A,转子转速为1 000 r/min。瞬态气隙磁场分布和涡流密度分布如图3所示。由图3a可以看出,励磁线圈产生的磁通主要围绕C型定子和转子凸极构成回路,且转子凸极中间部分产生的磁通密度较小,而其两端部分产生的磁通密度较大。转子凸极的特殊形状增大了气隙磁密的强度,有一定的聚磁效果。由图3b可

表1 电磁液冷缓速器的设计参数

Tab.1 Design parameters of cooling electromagnetic retarder

参数	数值/型号
定子外半径 r_1 /mm	200
定子内半径 r_2 /mm	102
转子外半径 r_3 /mm	170
转子内半径 r_4 /mm	125
定子轴向长度 l_1 /mm	128
转子轴向长度 l_2 /mm	60
定子材料	10号钢
转子凸极齿数 n	12
质量/kg	125

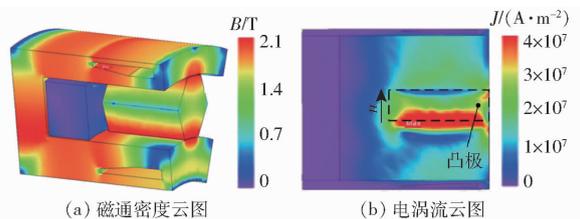


图3 电磁场瞬态仿真结果

Fig.3 Transient simulation results of electromagnetic field

以看出,涡流更集中转子凸极下边缘对应的定子部分。

2.2.2 制动性能仿真

为了研究缓速器的涡流制动性能,将线圈励磁电流分别设定在20、30、50、80 A下进行仿真,转子转速设为0~2 000 r/min。仿真结果如图4所示。由图4可以看出,制动力矩随着励磁电流的增大而增大,不同励磁电流下的制动力矩随转速的增加先快速增大,然后缓慢增大,最后趋于平稳。当励磁电流为80 A,转速在1 500 r/min时,缓速器制动力矩达到1 450 N·m。

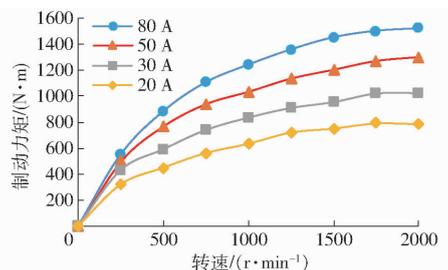


图4 不同励磁电流下的制动力矩随转速变化曲线

Fig.4 Braking torque-current curves under different exciting currents

3 再生制动器电磁场分析

提出的能动型缓速器的能量回收功能是靠6/6的单相外转子磁阻电机实现,该单相磁阻电机定子和转子都是凸极结构,均由硅钢片制成。几组励磁线圈固定在定子上呈圆周均匀分布,当励磁线圈通

电时,相邻励磁线圈产生的磁场极性相反,磁通在相邻的定、转子凸极上形成闭合磁路,如图 5a 所示;等效电路如图 5b 所示。

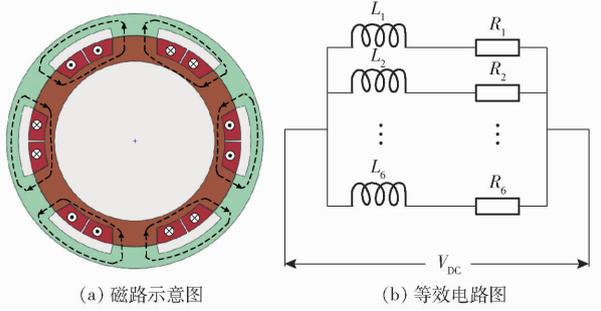


图 5 开关磁阻电机分析模型

Fig. 5 Analysis models of switched reluctance motor

3.1 电磁场数学模型

开关磁阻电机的转矩可以通过对磁共能 $W'(i, \theta)$ 求 θ 的偏导得到,即

$$T_e = \frac{\partial W'(i_m, \theta)}{\partial \theta} \quad (12)$$

式中 θ ——转子位置角 W' ——磁共能

i_m ——第 m 组绕组两段的励磁电流

考虑到该磁阻电机线圈同时励磁的工作模式,可得电机的合成转矩由 6 组定、转子产生的转矩叠加而成

$$T = \sum_{e=1}^6 T_e \quad (13)$$

根据法拉第定理和欧姆定律建立电路方程

$$u_m = i_m R_m + \frac{d\psi_m}{dt} \quad (14)$$

其中 $\psi_m = \psi_m(i_m, \theta) = L_m(i_m, \theta) i_m$

式中 u_m ——第 m 组绕组的端电压

R_m ——第 m 组绕组的电阻

ψ_m ——第 m 组绕组的磁链

忽略功率二极管及铁心饱和影响,求得第 m 组线圈的发电方程

$$\frac{di_c}{d\theta} = - \frac{u_c + i_c R_m + i_c \frac{\partial L_m(\theta) \omega}{\partial \theta}}{L_m(\theta) \omega} \quad (15)$$

式中 i_c ——第 m 相绕组的续流电流

u_c ——第 m 相绕组两端的换相电压

L_m ——第 m 相绕组的电感

3.2 数值模拟

为了预测缓速器再生制动性能,对开关磁阻电机进行有限元仿真,设计参数如表 2 所示。

表 2 开关磁阻电机的设计参数

Tab. 2 Design parameters of switched reluctance motor

参数	数值
定子外半径 r_5 /mm	260
定子内半径 r_6 /mm	200
转子外半径 r_7 /mm	315
转子内半径 r_8 /mm	260.4
轴向长度 l_3 /mm	80
极弧系数	0.9
质量/kg	85

3.2.1 静态电磁场仿真

考虑到开关磁阻电机结构的对称性,将分析模型简化为 1/6。在模型分析时,设励磁电压为 280 V,单组线圈匝数为 260。图 6a、6b、6c 分别为电感最小位置、电感上升位置和电感最大位置下的电机磁密分布图。由图 6 可知,当转子齿中心线与定子齿槽中心线重合时,电机的气隙磁密较小,在 $0 \sim 1.2 \times 10^{-5}$ T 范围内;转子齿中心线与定子齿中心线重合时,气隙磁密较大,而定子轭部平均磁密为 1.4 T 左右。

3.2.2 开通、关断角优化

以北汽福田生产的某款重型货车为例,减速比 i 为 5,车轮半径 r 为 0.5 m。车辆恒速下坡时车速在 35 km/h,计算的变速箱输出轴转速约 1 000 r/min,因此在对电机进行仿真分析时,转子转速设定为 1 000 r/min。

(1) 固定关断角、改变开通角

分析模型时,设定转子转速为 1 000 r/min,关断角为 25° 。图 7 为不同开通角下仿真时的瞬态电流和输出转矩,随着开通角依次增大,瞬态电流和输出转矩都依次上升。为了增大电机的制动力矩,同时尽可能地减少负力矩,开通角选择为 -1° 。

(2) 改变关断角、固定开通角

设定转子转速为 1 000 r/min,开通角为 0° 。图 8 为不同关断角下仿真时的瞬态电流、输出转矩对比。

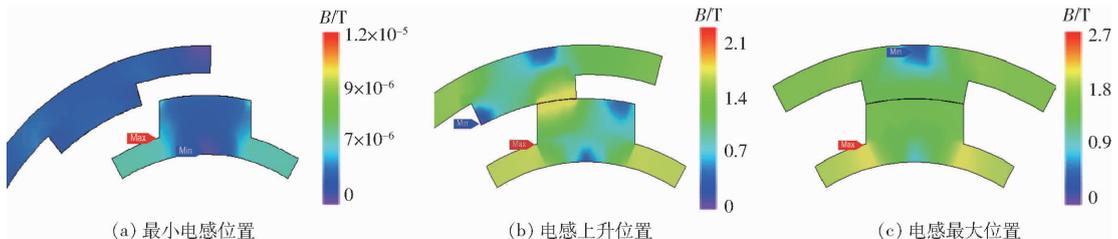


图 6 磁场密度分布图

Fig. 6 Magnetic field density distribution diagrams

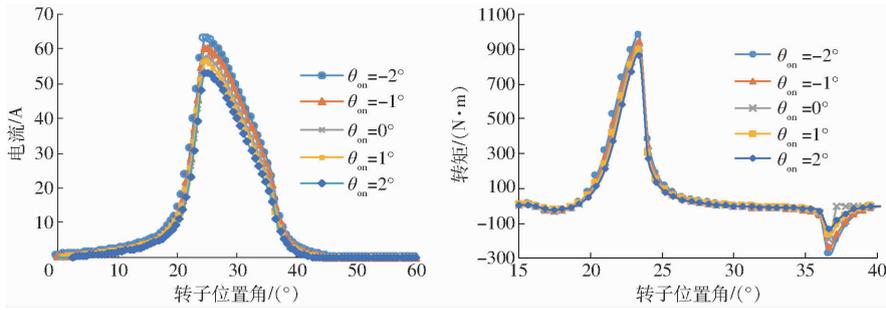


图7 固定关断角,不同开通角下的一组线圈瞬态电流、输出转矩对比($\theta_{\text{off}} = 25^\circ$)

Fig. 7 Comparison of transient current and braking torque under different opening angles and fixed off angle

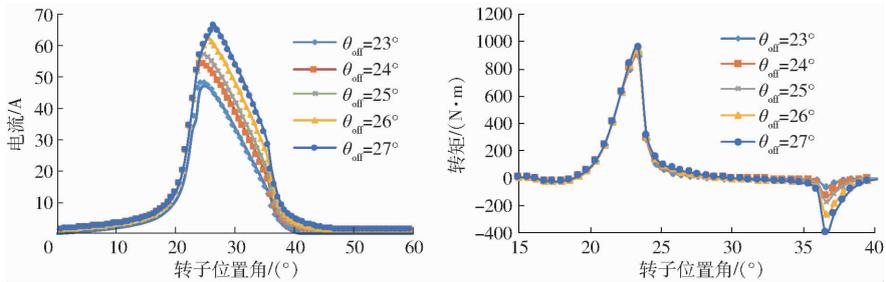


图8 固定开通角,不同关断角下的一组线圈瞬态电流、输出转矩对比($\theta_{\text{on}} = 0^\circ$)

Fig. 8 Comparison of transient current and braking torque under different turn off angles and fixed opening angle

随着关断角依次增加,瞬态电流的区间跨度增加,有利于提高制动转矩。为了避免制动时产生较大的负力矩,选择关断角为 24° 。

3.2.3 再生制动-转速特性

为了研究再生制动-转速特性,分别对磁阻电机的制动力矩-速度特性和发电电流-速度特性进行分析。图9给出了最优开通角、关断角下的周期内电机不同转速下的制动力矩。由图9可知,随着转速的增大,转矩呈先增大后减少的趋势。图10给出了最优开通角、关断角下的周期内电机不同转速下的电流,由图10可知,随着转速的增大,发电电流呈先增大后减小的趋势,当转速为 750 r/min 时,磁阻电机产生的再生电流最大。

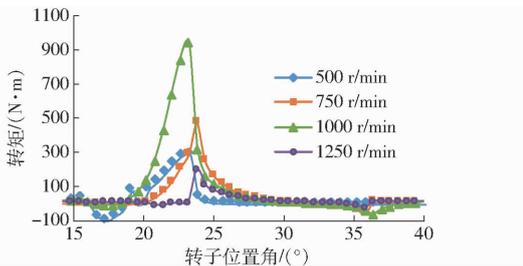


图9 电机不同转速下的制动力矩

Fig. 9 Braking torque of motor at different speeds

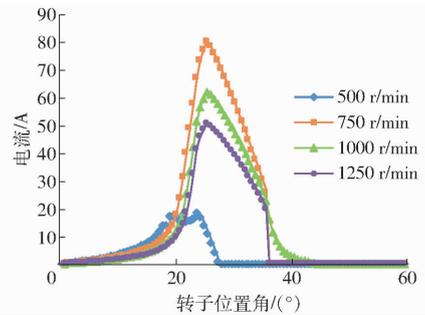


图10 不同转速下的电流

Fig. 10 Current of a group of coils at different speeds

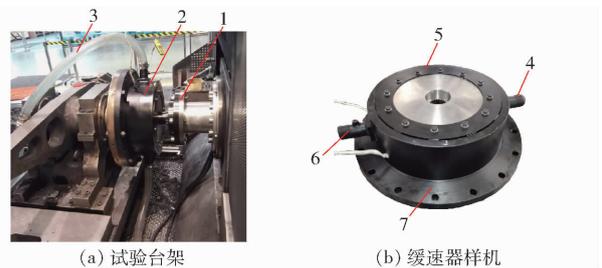


图11 缓速器实物图

Fig. 11 Physical diagram of active retarder

1. 拖动电动机 2. 缓速器 3. 冷却水管 4. 进水口 5. 转子支架 6. 出水口 7. 定子

磁液冷缓速器样机,如图11b所示。

4.1 空损力矩特性

空损力矩是指缓速器处于非制动工况时,定子内存的空气和转子的剩磁给车辆传动系统带来的额外制动力矩。空损力矩会影响车辆的启动性能,增大车辆油耗,是缓速器性能的重要指标。图12给出了缓速器样机在不同转速下的空损力矩与空损功率,由图12可

4 试验

为对设计的缓速器进行性能测试,搭建了试验台架,如图11a所示。该试验平台主要由大功率驱动电机、变速箱、扭矩仪、电流互感器、电控柜、水冷系统等组成。根据表1和表2的设计参数,试制电

知,空损力矩和空损功率随着转速的增加而增大,当转速为 2 000 r/min 时,空损力矩为 12 N·m。

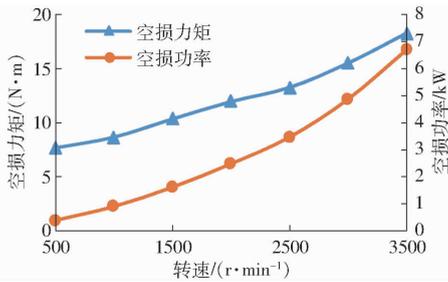


图 12 缓速器空损力矩与空损功率

Fig. 12 No-load loss torque and power of retarder

4.2 涡流制动特性

试验时,将缓速器励磁电流设定为 80 A,励磁电流由外部稳压电源提供。图 13 给出了不同转速下制动力矩的理论值与试验值。由图 13 的试验值可知,制动力矩随着转速增加而增大,当转速超过 1 500 r/min 继续增加时,制动力矩增加很小,当转速增加到 2 000 r/min 时,制动力矩达 1 460 N·m。在转速小于 1 000 r/min 时,制动力矩理论计算值小于试验值,当在转速大于 1 000 r/min 时,制动力矩理论计算值大于试验值,最大误差为 13%,这是由于缓速器材料的电导率和磁导率都受温度的影响,有限元计算模型中没有考虑温度的影响。

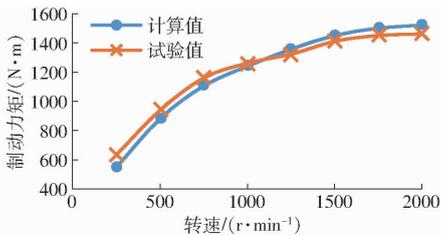


图 13 理论与试验制动力矩-转速特性曲线对比

Fig. 13 Comparison diagram of calculations and experiments of braking torque and speed

为了测试缓速器持续下坡时的制动能力,将转速设为 1 000 r/min,励磁电流设为 80 A,持续制动 12 min。图 14 给出了缓速器制动力矩热衰退曲线。由图 14 可知,缓速器初始制动力矩为 1 260 N·m,工作 12 min 后,制动力矩下降至 1 071 N·m,下降了 15%。由此看出,液冷式缓速器具有良好的抗热衰退性能。

4.3 磁阻电机制动发电特性

当车辆下坡持续制动时,为了保持车速稳定在 30 ~ 40 km/h^[21],缓速器一般设置在恒定的挡位,用主制动器配合制动。假设车速恒定在 35 km/h 时,转换到磁阻电机转子的转速为 1 000 r/min。

为了研究车辆在恒速下坡制动时,缓速器制动发电特性,将转速设定在 1 000 r/min,设定开通角和

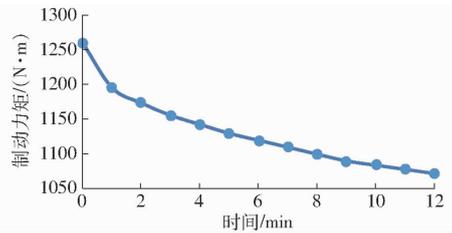


图 14 制动力矩热衰退曲线

Fig. 14 Curve of braking torque heat-fade

关断角分别为 -1° 、 24° 进行试验。图 15 给出了磁阻电机电流试验值和仿真计算值的对比曲线,由图 15 的试验值可知,缓速器功率可达 96 kW。满挡时,涡流制动消耗的功率为 2 kW 的功率,可知蓄电池可回收的功率为 94 kW;一个周期的试验有效电流与理论计算误差为 14%,误差可能来源于模型的简化和测量精度。

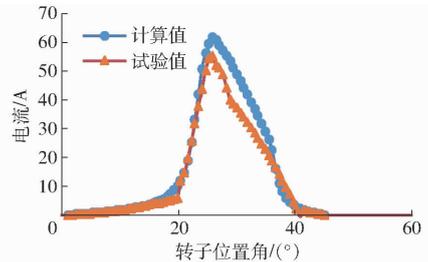


图 15 电机瞬态电流试验值和仿真计算值的对比曲线

Fig. 15 Comparison curves between experimental and calculated currents in a coil

4.4 磁阻电机电动特性

由上述分析可知,缓速器制动时回收的能量远超过涡流制动所需要的,且考虑到重型车辆启动和爬坡时耗油量较大,利用开关磁阻电机的电动性能,将回收的能量用于车辆启动和爬坡达到助力的效果,因此通过台架试验研究了磁阻电机电动特性。图 16 给出了电机在低速的驱动力矩。由图 16 可以看出,驱动力矩随着转速的增大而减小,当转速为 125 r/min 时,最大的驱动力矩为 1 250 N·m。图 17 给出了电机在低速时驱动所需的电流。由图 17 可以看出驱动电流随着转速的增大而减小。

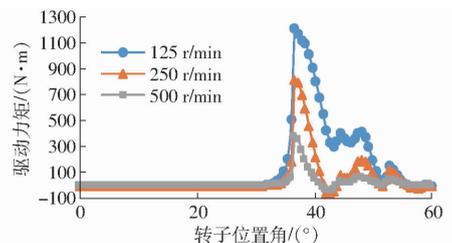


图 16 电机在低速时的驱动力矩

Fig. 16 Driving torque of motor at low speed

5 结论

(1) 提出了一种能动型液冷缓速器,建立了数

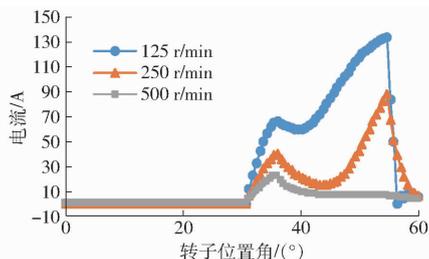


图 17 电机在低速驱动时需要的电流

Fig. 17 Current required for motor at low speed

学分析模型,采用有限元法分析了电磁液冷缓速器

和磁阻电机内的电磁场分布,并对缓速器的制动性能、发电性能和低速驱动性能进行了试验研究。

(2) 转速在 1 000 r/min 时,缓速器涡流制动力矩达到 1 260 N·m;持续制动 12 min,制动力矩仅下降 15%,具有良好的抗热衰退性能。

(3) 当车辆下坡制动时,回收功率可达 94 kW,大幅度降低重型车辆燃油消耗。开关磁阻电机在实现再生制动和电驱动时,产生和消耗的电流较大,需配上一组超级电容。

参 考 文 献

- 1 ANWAR S. A parametric model of an eddy current electric machine for automotive braking applications[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12(3): 422-427.
- 2 SHARIF S, FAIZ J, SHARIF K. Performance analysis of a cylindrical eddy current brake[J]. Electric Power Applications, IET, 2012, 6(9): 661-668.
- 3 CHOI J, JANG S. Analytical magnetic torque calculations and experimental testing of radial flux permanent magnet-type eddy current brakes[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(7): 07E12-1-07E712-3.
- 4 YE Lezhi, LI Desheng, JIAO Bingfeng. Design and performance of a water-cooled permanent magnet retarder for heavy vehicles[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(3): 953-958.
- 5 JIAO Bingfeng, LI Desheng, DU Xiao, et al. Performance analysis and experimentation of a liquid-cooled eddy current retarder with a dual salient poles design[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(1): 84-90.
- 6 SHEN Haijun, HE Ren, YANG Xiaojun. Experiment study and design of self-excited retarder[J]. Automotive Technology, 2010, 32(3): 258-262.
- 7 NIAN Xiaohong, PENG Fei, ZHANG Hang. Regenerative braking system of electric vehicle driven by brushless DC motor[J]. IEEE Transactions Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5798-5808.
- 8 ZHANG Kai, LI Desheng, DU Xiao, et al. Numerical analysis and experimentation of a novel self-excited and liquid-cooled eddy current retarder[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(1): 196-203.
- 9 ZHANG Kai, LI Desheng, DU Xiao, et al. Design and performance of a self-excited and liquid-cooled electromagnetic retarder[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(1): 13-20.
- 10 KOU Baoquan, JIN Xinxin, ZHANG He, et al. Nonlinear analytical modeling of hybrid-excitation double-sided linear eddy-current brake[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 8003404.
- 11 WANG Jian, ZHU Jianguo. A simple method for performance prediction of permanent magnet eddy current couplings using a new magnetic equivalent circuit model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(3): 2487-2495.
- 12 HYEON-JAE S, JANG-YOUNG C, HAN-WOOK C. Analytical torque calculations and experimental testing of permanent magnet axial eddy current brake[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(7): 4152-4155.
- 13 THIERRY L, ABDERREZAK R. 3-D analytical model for axial-flux eddy-current couplings and brakes under steady-state conditions[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(10): 8203712.
- 14 DAVIES E J. An experimental and theoretical study of eddy-current couplings and brakes[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1963, 82(67): 401-419.
- 15 薛玉春, 张义民, 贺向东. 电动汽车开关磁阻电机的激振力研究[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 25-29.
- 16 XUE Yuchun, ZHANG Yimin, HE Xiangdong. Research on excitation of SR motor on electric vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 25-29. (in Chinese)
- 17 赵迎生, 何仁, 王永涛. 电涡流缓速器对车辆制动稳定性的影响分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(9): 16-18.
- 18 ZHAO Yingsheng, HE Ren, WANG Yongtao. Analysis on influence of eddy current retarder on braking stability of vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9): 16-18. (in Chinese)
- 19 胡国良, 钟芳. 磁场结构对径向流磁流变阀动态性能的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 411-420. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170952&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.052.
- 20 HU Guoliang, ZHONG Fang. Influence of magnetic field structure on dynamic performance of radial magnetorheological valve[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 411-420. (in Chinese)
- 21 MEHMET G, ERSIN Y, METIN A. Design, analysis and real time dynamic torque control of single-rotor-single-stator axial flux eddy current brake[J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(9): 869-876.
- 22 COUETEL C, PANDELE P, YONNET J P, et al. Design of permanent magnet coupling using the PASCOSMA methodology[J]. Electric Machines and Drives, International Conference IEMD, 1999.
- 23 SOOYOUNG C, HUAI-CONG L, HANWOONG A. Eddy current brake with a two-layer structure; calculation and characterization of braking performance[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11): 8110205.
- 24 何仁, 王永涛, 赵迎生. 汽车联合制动系统的性能仿真分析[J]. 兵工学报, 2007, 28(10): 1153-1158.
- 25 HE Ren, WANG Yongtao, ZHAO Yingsheng. Performance simulation analysis of the united brake system of automobiles[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(10): 1153-1158. (in Chinese)