

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.10.019

四凸极液冷电磁缓速器数值模拟与实验研究*

张凯¹, 白家晗¹, 陈立强², 卢阳阳¹, 董伟琰³, 牛继高¹(1. 中原工学院机电学院, 郑州 450007; 2. 山推工程机械股份有限公司, 济宁 272073;
3. 内蒙古电力(集团)有限责任公司乌兰察布供电公司, 乌兰察布 012000)

[摘要] 为解决中重型车辆长下坡时因主制动器频繁工作导致其制动效能严重衰退问题, 提出一种四凸极液冷电磁缓速器结构。建立车辆下坡动力学模型分析制动需求, 采用等效磁路法对其制动力矩进行计算, 使用有限元法对其制动特性进行数值分析。利用分级变论域模糊控制策略结合缓速器进行车辆下坡时的制动控制, 使用MATLAB/Simulink建立控制器和整车长下坡制动模型并进行联合仿真。设计了2 100 N·m样机, 通过台架实验和车载道路实验对样机制动特性进行测试, 实际测量值与分析计算值基本一致, 平均误差在5%内, 在转速为1 250 r/min时制动力矩可达2 200 N·m, 满足中重型车辆制动需求。

关键词: 四凸极; 缓速器; 等效磁路; 制动特性; 变论域

Numerical Simulation and Experimental Study of Four Salient Poles Liquid-Cooled Electromagnetic Retarder

Zhang Kai¹, Bai Jiahao¹, Chen Liqiang², Lu Yangyang¹, Dong Weiyao³ & Niu Jigao¹1. School of Mechatronics Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007;
2. Shantui Construction Machinery Co., Ltd., Jinan 272073;
3. Inner Mongolia Grid Ulanqad Power Supply Company, Ulanqad 012000

[Abstract] To solve the problem of significant degradation in braking efficiency of medium and heavy-duty vehicles during prolonged downhill descents due to frequent engagement of the main brake system, a four salient poles liquid-cooled electromagnetic retarder structure is proposed in this paper. A vehicle downhill dynamics model is established to analyze the braking demand, using the magnetic equivalent circuit method to calculate its braking torque, and using the finite element method to numerically analyze its braking characteristics. The hierarchical variable domain fuzzy control strategy combined with a retarder is used for vehicle downhill braking control, and the controller and overall vehicle downhill braking model are established using MATLAB/Simulink for joint simulation. A 2 100 N·m prototype is designed. The braking characteristics of the prototype are tested through bench test and on-road vehicle tests. The results show that the actual measured value and the calculated value is basically consistent, with an average error within 5%, with the braking torque reaching 2 200 N·m when the speed is 1 250 r/min, which can meet the needs of medium and heavy duty vehicle braking.

Keywords: four salient poles; retarder; magnetic equivalent circuit; braking characteristics; variable universe

* 河南省高等学校重点科研项目(22A580002)资助

原稿收到日期为2024年03月30日, 修改稿收到日期为2024年04月07日。

通信作者: 张凯, 讲师, 博士, E-mail: zhsngkai0168@163.com。

前言

近年来中重型车辆的装载负重逐渐增加,整车制动系统在陡坡与长下坡路段承受巨大的制动力,主制动器频繁工作产生摩擦温升,其制动效能在高速时严重下降直至完全丧失^[1-4],为坡道行车埋下了严重的安全隐患,每年在坡道路段因制动系统失效造成的重大交通事故频频发生。

缓速器是一种辅助制动装置,安装有缓速器的车辆在长下坡路段能在少使用或者不使用主制动器的情况下快速降低车速。Lei等^[5]提出基于液力缓速器进行车辆下坡恒速制动,但是液力缓速器存在着低速特性差的问题,在车辆处于低速时无法提供足够的制动力。兰海潮等^[6]提出联合制动策略,动态调节电涡流缓速器制动力矩输出,通过降低缓速器温升来延长其工作时间,但电涡流缓速器频繁工作时仍存在热衰退严重的问题。Tian等^[7]提出了一种新型涡流-液力混合缓速器,在低速时主要依靠电涡流缓速器部分制动,在高转速时由电涡流缓速器

与液力缓速器两部分共同制动,结合两者制动特性互补,但该缓速器体积较大且结构复杂,不便于拆装与维修。

针对上述问题,本文提出一种四凸极结构电液缓速器,建立车辆长下坡过程动力学模型,分析车辆制动需求,依据制动需求设计出相应的缓速器。根据电磁学原理,运用数值分析法推导出该缓速器制动力矩的计算公式,利用有限元法分析缓速器的内部磁场分布并预测制动性能。采用分级变论域模糊控制策略,结合缓速器数学模型,通过仿真验证缓速器在励磁电流无级调节下的制动效果。通过台架实验和车载道路实验对缓速器样机制动特性进行验证。

1 车辆下坡动力学模型分析

目标18 t中重型车辆模型主要参数如表1所示。为便于建模与分析,设置下坡坡度 α 为 7° ,坡道足够长;在下坡过程中,车轮设为纯滚动,整车处于滑行状态,主制动器踏板与油门踏板均未踩下,缓速器处于工作状态。

表1 车辆模型主要参数

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|-------------------|-------|-------------|-------|
| 整车质量 m/t | 18 | 风阻系数 C | 0.8 |
| 迎风面积 S/m^2 | 6 | 滚动阻力系数 f | 0.015 |
| 发动机气缸工作容积 V_h/L | 4.16 | 气缸数 i | 4 |
| 后桥速比 k | 4.875 | 发动机冲程数 t | 4 |
| 车轮半径 r/mm | 286 | 传动效率 η | 0.95 |

搭建整车下坡动力学模型,如图1所示。

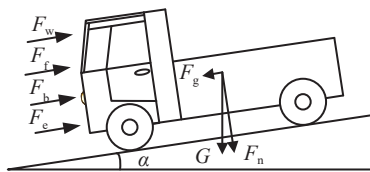


图1 车辆长下坡动力学示意图

依据图1,汽车下坡时动力学平衡方程^[8]如下:

$$\partial m \frac{dv}{dt} = F_g - F_w - F_f - F_e - F_b \quad (1)$$

$$F_w = 0.5C\rho Sv^2 \quad (2)$$

$$F_f = F_n f \quad (3)$$

$$F_e = \frac{p_m V_h i k}{\pi t r \eta} \quad (4)$$

$$F_g = G \sin \alpha \quad (5)$$

$$F_n = G \cos \alpha \quad (6)$$

$$p_m = 3.5864 - 0.5283A + 0.2728A^2 \quad (7)$$

$$A = \frac{ns}{30} \quad (8)$$

式中: ∂ 为车辆旋转质量换算系数; v 为车速; F_w 、 F_f 、 F_e 、 F_g 、 F_n 分别为车辆下坡时受到的空气阻力、滚动阻力、发动机制动力、重力分力和车辆对路面的压力; F_b 为缓速器制动力; ρ 为空气密度; i 为发动机气缸数; p_m 为气缸有效压力; n 为发动机转速; s 为活塞行程。

由车辆模型与动力学平衡方程计算分析,缓速器最大输出制动力矩 $2100 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时,即可满足车辆下坡制动需求,因此本文依据制动需求设计出具有相应制动力矩的缓速器样机。

2 缓速器结构与工作原理

2.1 缓速器安装方式

缓速器安装在汽车传动轴中部,通过支架与车架中部左右纵梁连接,这种安装方式类似于发动机在车架的固定方式,缓速器壳体通过橡胶垫固定在车架上,转子部分通过连接法兰与传动轴相连。缓速器采用水冷散热方式,出水口经过外置节温器与散热器连接,进水口与发动机出水口相连。缓速器安装效果如图2所示。

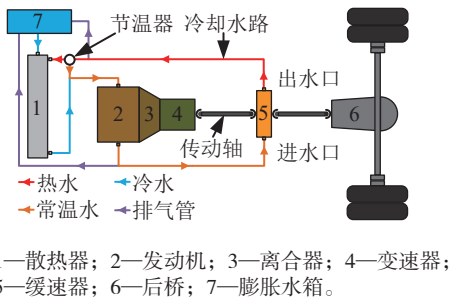


图2 缓速器安装效果示意图

2.2 结构与工作原理

四凸极电液缓速器结构如图3所示,主要由一个内置双冷却水道的定子、两个四凸极转子以及两个独立的励磁线圈组成。线圈安装在定子两侧,转子固定在连接盘上,连接盘中心连接汽车传动轴,由传动轴带动转子旋转。

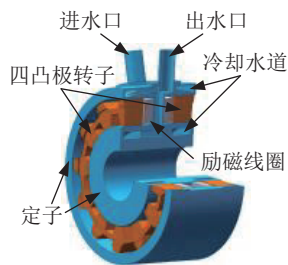


图3 缓速器三维结构示意图

缓速器工作时,励磁线圈通入电流产生磁场,磁场从线圈发出,经过定子、气隙和转子形成闭合磁路,并在转子的上下齿端上产生NS极。当转子随传动轴周向转动时,经过定子内侧表面的磁通呈周期性变化,定子内表面形成感应涡流,涡流产生反向的磁场,与励磁线圈发出的磁场相互作用产生制动力^[9]。在制动过程中,定子内表面由焦耳效应产生

的大量热量被定子水道中的冷却液带走。四凸极电液缓速器的主要设计参数如表2所示。

表2 主要设计参数

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|----------|-------|---------------------|------|
| r_1/mm | 70 | L/mm | 256 |
| r_2/mm | 141.4 | L_1/mm | 110 |
| r_3/mm | 142.2 | L_2/mm | 63 |
| r_4/mm | 174.7 | L_3/mm | 18 |
| r_5/mm | 189.7 | $\alpha_1/(^\circ)$ | 50 |
| r_6/mm | 217.2 | $\alpha_2/(^\circ)$ | 7.39 |
| r_7/mm | 218 | $\alpha_3/(^\circ)$ | 28.7 |
| r_8/mm | 250 | $\alpha_4/(^\circ)$ | 30 |

3 数学建模与分析

3.1 缓速器模型电磁场数学分析

由于缓速器结构具有周向对称性,本文只取其1/12结构进行数学分析。缓速器单体简化模型如图4所示。

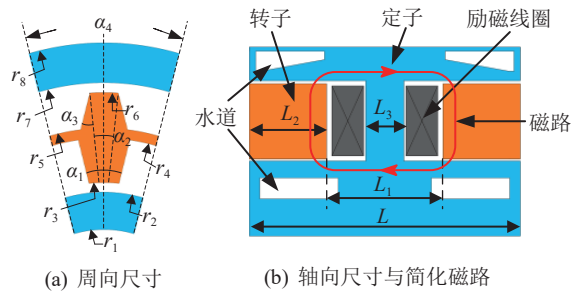


图4 缓速器单体简化模型

根据简化模型建立其等效磁路模型,建模时考虑了缓速器内电磁场的端部效应,分析模型如图5所示。励磁线圈产生的磁动势可以表示为

$$F_c = NI \tag{9}$$

式中: N 为线圈匝数; I 为励磁电流大小。

根据图4和图5可以得到由励磁线圈产生的缓速器转子上、下气隙磁感应强度幅值:

$$B_s = \frac{F_c}{S_{\delta s} \lambda} \tag{10}$$

$$B_n = \frac{F_c}{S_{\delta n} \lambda} \tag{11}$$

$$\lambda = R_1 + 2R_2 + 2R_s + 2R_3 + 2R_n + 2R_4 + R_5 \tag{12}$$

式中 $S_{\delta s}$ 、 $S_{\delta n}$ 为上、下气隙导磁面积。

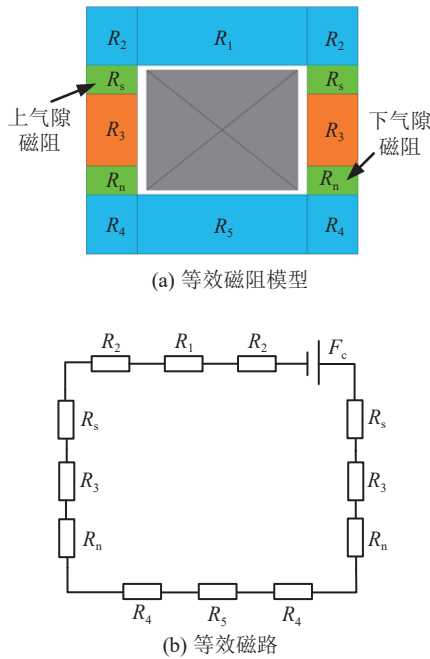


图5 等效磁路模型

3.2 制动力矩数值计算分析

经有限元分析结果表明,在缓速器工作时,定子中的感应涡流集中分布在靠近气隙附近的定子内侧面集肤深度内,如图6(a)所示。该集肤深度满足:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\omega\mu}} \quad (13)$$

式中: σ 为定子电导率; ω 为转子角速度; μ 为定子磁导率。

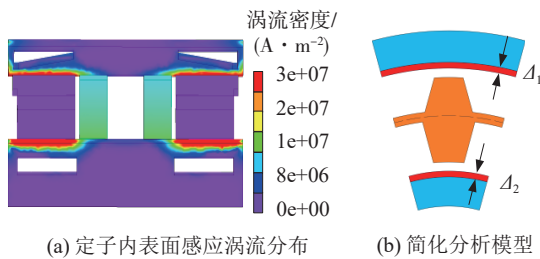


图6 定子内表面感应涡流仿真分析

由感应涡流激发的感应磁场会抑制原磁场的变化,两者相互作用形成合成气隙磁场:

$$B_{\delta p} = B_s + B_1 \quad (14)$$

$$B_{\delta n} = B_n + B_2 \quad (15)$$

式中: $B_{\delta p}$ 为上气隙合成磁场; $B_{\delta n}$ 为下气隙合成磁场; B_1 为感应涡流产生的上气隙磁场; B_2 为感应涡流产生的下气隙磁场。

为方便计算,分析模型简化为图6(b),并提出以下假设:

(1)定子内侧表面感应电涡流只沿轴向流动。

(2)无限薄的涡流层与气隙密度相同。

(3)考虑转子连齿层的影响,利用卡特系数得到有效气隙 δ_e 。

基于图6(b),定子内侧上、下表面无限薄的涡流层可表示为^[10-12]

$$J_n^{us, ds} = \sum_{n=1}^{\infty} J_n^{us, ds} \cos(kx) \quad (16)$$

式中 J_n^{us} 、 J_n^{ds} 分别为上、下定子内表面涡流密度谐波幅值。

根据假设(2)可以得到以下表达式:

$$J_n^{us} = k(r_6 - \frac{r_4 + r_5}{2} + \delta_e + \Delta_1) \frac{B_{\delta p}}{\mu_0} \quad (17)$$

$$J_n^{ds} = k(\delta_e + \Delta_2) \frac{B_{\delta n}}{\mu_0} \quad (18)$$

$$\delta_e = k_\delta \delta \quad (19)$$

式中: μ_0 为空气磁导率; k_δ 为卡特系数。

定子上、下内表面的感应涡流产生的功率 P 可以计算为^[13]

$$P_1 = 12 \int_0^{L_2} \int_{r_8}^{r_8 + \Delta_1} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \frac{(J_n^{us})^2}{\sigma} d\theta \quad (20)$$

$$P_2 = 12 \int_0^{L_2} \int_{r_2 - \Delta_2}^{r_2} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \frac{(J_n^{ds})^2}{\sigma} d\theta \quad (21)$$

缓速器制动力矩可以由下式得到:

$$T = \frac{P_1 + P_2}{\omega} \quad (22)$$

推导出缓速器制动力为

$$F_b = \frac{T}{r_1} \quad (23)$$

4 有限元分析

4.1 单体模型磁密分布分析

定子和转子材料选用10号钢,模型网格划分采用六面体单元,网格单元的大小直接影响计算精度和时间^[14]。由于定子内表面的感应涡流具有集肤效应,且在不同转速下的集肤深度不同,因此将定子集肤深度网格的厚度设置为0.3 mm,整体网格设置为6层。考虑到转子和定子磁场饱和时漏磁会增加,将气隙边界网格的最大单元尺寸设置为4 mm。模型网格化结果如图7(a)所示。

在励磁电流120 A,转子转速2 000 r/min时,瞬

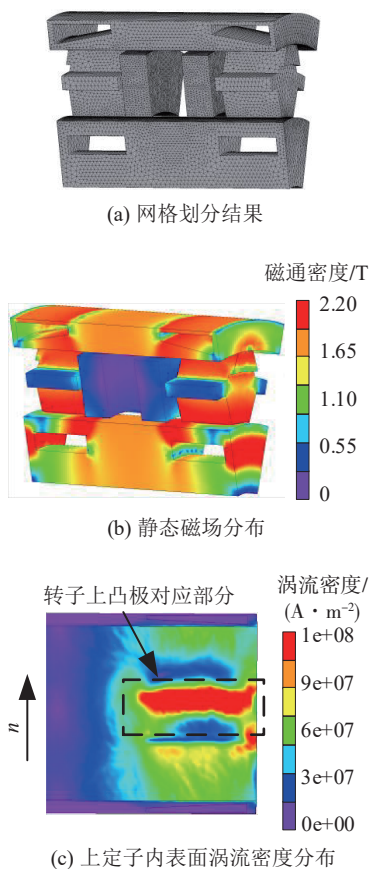


图7 有限元仿真

态仿真得到缓速器的磁场分布如图7(b)所示,可以看出四凸极转子齿端聚磁效果良好,齿端磁密最大能达到2.2 T左右。

图7(c)为上定子内表面感应涡流分布趋势,感应涡流主要集中在转子凸极齿端对应部分,这是由于转子齿的特殊形状增大了凸极齿端与定子内表面间的磁场,提升了凸极对应部分的气隙磁密强度,进一步引发了感应涡流的产生。四凸极的特殊结构提高了主磁通的利用率,每个凸极齿端均能与对应形成的感应涡流相互作用产生制动力,增强了缓速器的制动能力。

4.2 气隙磁密分析

气隙磁通密度的大小将直接影响定子内表面产生的感应涡流大小,从而影响到缓速器的制动力矩。将线圈励磁电流分别设置为30、60、90和120 A这4组,在这4组励磁电流下对缓速器单体模型进行静态仿真,得到的周向上、下气隙磁密曲线如图8(a)和图8(b)所示。

可以看出,周向气隙磁密随励磁电流的增大而增大,但气隙磁密的增幅随励磁电流的增大而减小。

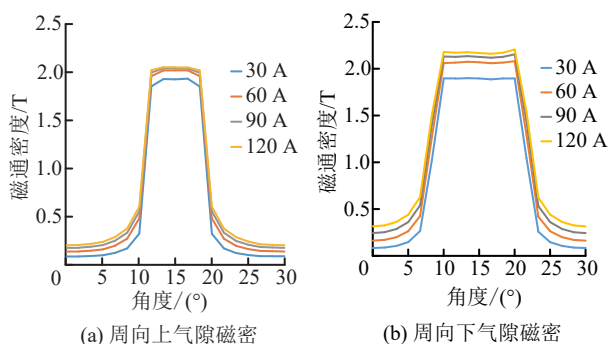


图8 不同励磁电流下的周向气隙磁密

周向下气隙的饱和程度比上气隙小,下气隙磁密降幅较低。当励磁电流为120 A时上气隙磁密最大值为2.04 T、下气隙磁密最大值为2.2 T。

4.3 制动性能预测

为了研究四凸极电液缓速器的涡流制动性能,在上述4组不同励磁电流的条件下,将每组励磁电流对应的转子转速分别设置为500、1 000、1 500和2 000 r/min并进行仿真。图9为有限元仿真结果,可以看出在转子转速相同的情况下,缓速器制动力矩随线圈励磁电流的增大而增大。当励磁电流恒定时,缓速器制动力矩起初随转子转速增大而迅速增大,随后制动力矩增长速度变缓并趋于平稳,最后制动力矩开始下降,这是由于感应涡流存在去磁效应,随着转子转速增大,感应涡流磁动势不断增强导致合成气隙磁场开始减弱,从而造成缓速器制动力矩的降低^[15]。

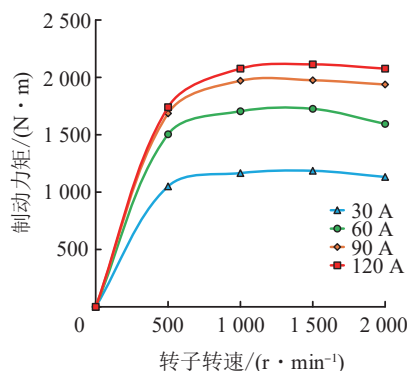


图9 有限元瞬态仿真结果

当线圈励磁电流为120 A、转子转速为1 250 r/min时,最大制动转矩约为2 225 $N \cdot m$,其中转子上方气隙产生的制动转矩约为1 439 $N \cdot m$,下方气隙产生的制动转矩约为786 $N \cdot m$ 。

5 分级变论域控制机理分析与验证

5.1 电气连接与控制

缓速器的开关和制动力矩输出由车载ECU中的核心嵌入式芯片MCU控制。电气控制系统如图10所示,控制系统主要由MCU、IGBT模块、速度传感器、温度传感器和CAN通信模块组成。缓速器线圈励磁电流由车载电源供电,MCU通过外部传感器采集车速、外转子温度等信号,对采集信号进行分析处理,通过IGBT动态调节缓速器线圈励磁电流大小。

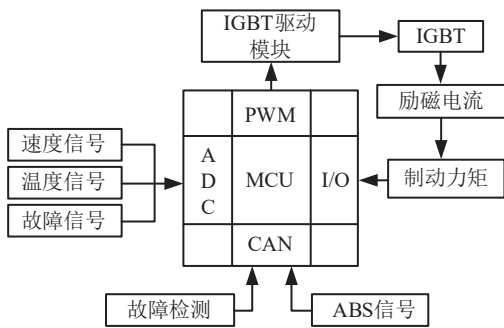


图10 缓速器电气控制原理图

5.2 车辆下坡过程制动控制

控制过程如图11所示,以实时车速 v_d 与设定的目标车速 v_c 作为输入,分级变论域模糊控制器根据车速偏差 e 和偏差变化率 e_c 动态调节缓速器线圈励磁电流值 I ,实现缓速器制动力矩智能化控制^[16]。

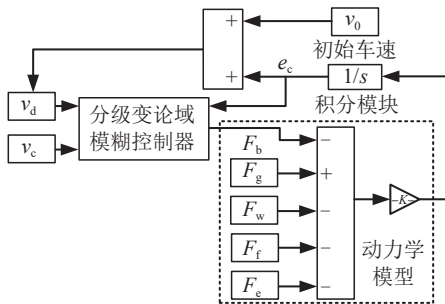


图11 制动控制过程

5.3 控制器设计与建模

分级变论域模糊控制器具体结构如图12所示。车速偏差范围分为3个级别,其中I级为 $[-5 \text{ km/h}, 5 \text{ km/h}]$, II级为 $[-20 \text{ km/h}, 20 \text{ km/h}]$, III级为 $[-35 \text{ km/h}, 35 \text{ km/h}]$ 。设定下坡目标速度后,车速

由初始高速调整至设定的目标低速的过程中会逐渐进入较低的论域,最终进入I级论域的范围,实现了速度微调的效果,这种方法有效提高了控制的精确性。

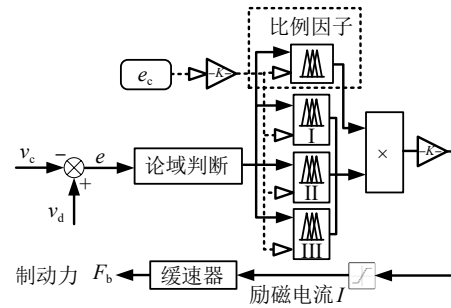


图12 分级变论域模糊控制器

在车速偏差分级模糊计算部分中,车速偏差变化率 e_c 论域取 $[-3, 3]$,输出量论域取 $[0, 3]$,将输入量论域均离散为7个点并用NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB这7个语言值进行模糊化,这7个语言值分别表示实时车速相对于设定的目标车速“很高”“较高”“稍高”“正好”“稍低”“较低”“很低”,以及当前车速变化“急速降低”“快速降低”“稍微降低”“保持不变”“稍微升高”“快速升高”“急速升高”。具体控制规则如表3所示。

表3 分级模糊计算控制规则

| e_c | e | | | | | | |
|-------|-----|----|----|---|----|----|----|
| | PB | PM | PS | Z | NS | NM | NB |
| PB | B | B | M | M | S | VS | Z |
| PM | B | M | M | S | S | VS | Z |
| PS | B | M | S | S | S | VS | Z |
| Z | B | M | VS | Z | Z | Z | Z |
| NS | M | M | VS | Z | Z | Z | Z |
| NM | M | S | VS | Z | Z | Z | Z |
| NB | S | VS | VS | Z | Z | Z | Z |

在比例因子的模糊计算中,输入量 e_c 和 e 的论域均为 $[-3, 3]$,输出量的论域为 $[0, 1]$ 。输出论域由B、M、S、Z这4个语言值进行模糊化,分别表示输出励磁电流为“最大”“中等”“较小”“零”。具体控制规则如表4所示。

5.4 仿真与分析

依据车辆下坡动力学平衡方程与缓速器数学模型,建立18 t车辆在坡度为 7° 时的下坡制动模型,车辆初速度分别设置为80、70、60 km/h,目标车速为50 km/h,进行3组对比仿真实验,结果如图13所示。

表4 比例因子模糊计算控制规则

| e_c | e | | | | | | |
|-------|-----|----|----|---|----|----|----|
| | PB | PM | PS | Z | NS | NM | NB |
| PB | B | B | B | B | M | S | Z |
| PM | B | B | B | B | S | S | Z |
| PS | B | B | M | M | S | Z | Z |
| Z | B | B | M | Z | Z | Z | Z |
| NS | B | B | M | Z | Z | Z | Z |
| NM | B | B | S | Z | Z | Z | Z |
| NB | B | M | S | Z | Z | Z | Z |

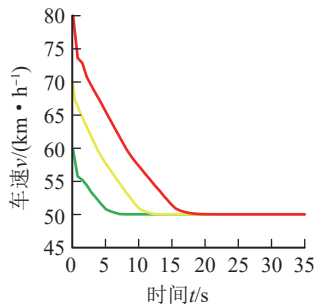


图13 分级变论域恒速仿真结果

由图13可以看出,车速由初始设定值达到目标车速的调节时间分别为17、12、7 s,随后实时车速能保持在目标车速并维持稳态,稳态平均误差不超过1%。相较于传统模糊控制策略,分级变论域模糊控制策略在车速调节过程中无超调量产生^[17]。该仿真进一步验证了四凸极液冷电磁缓速器在励磁电流无极调节下的制动特性。

6 实验与分析

基于前文的分析开发出四凸极液冷电磁缓速器的样机,如图14所示。为了测试缓速器的制动性能,进行台架实验和车载道路实验,台架测试系统框图如图15所示。

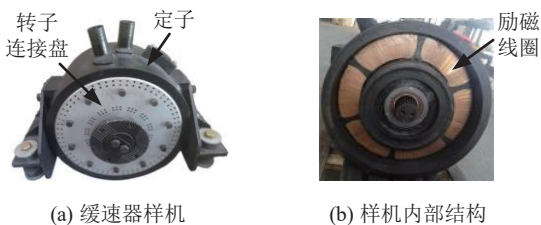


图14 四凸极液冷电磁缓速器样机

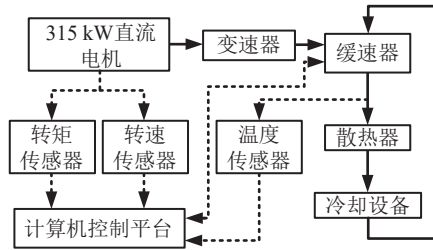


图15 台架测试系统框图

测试系统由315 kW直流电机、转矩和转速传感器、温度传感器、变速器、冷却设备和计算机控制平台组成。由计算机控制平台调节缓速器励磁线圈的电流值,控制缓速器制动力矩,并实时监控和记录测试数据。实验台架如图16所示。

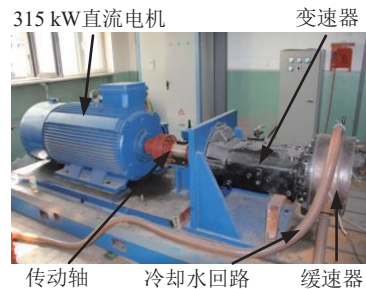


图16 测试台架

6.1 空损力矩测试

空损力矩测试是为了检测安装缓速器后车辆需额外消耗的动能,这是影响车辆的起动性能和行车能耗的重要指标。

在测试过程中将直流电机转速设置在500~2 000 r/min之间,转速每增加250 r/min,记录一次实验台的整体空损力矩。实验台架安装缓速器后,缓速器不工作,按照上述实验流程再次测试,测试结果如表5所示。当未安装缓速器时,实验台架整体空损力矩 T_0 为25 N·m。安装缓速器后,在转速为2 000 r/min时台架整体空损力矩 T_n 最大,最大空损力矩为38 N·m,此时缓速器空损力矩 T_b 为最大值13 N·m,满足设计要求。

表5 空损力矩测试结果

| 空损力矩 | 转速/(r·min ⁻¹) | | | | | | |
|--------------|---------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 500 | 750 | 1 000 | 1 250 | 1 500 | 1 750 | 2 000 |
| T_0 /(N·m) | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| T_n /(N·m) | 29 | 31 | 34 | 35 | 36 | 36 | 38 |
| T_b /(N·m) | 4 | 6 | 9 | 10 | 11 | 11 | 13 |

6.2 制动力矩测试

在实验台架上使用计算机控制平台控制外部电源的输出电流,设置3个电流挡位,25、50和80 A。转速设置在250~2 000 r/min之间,转速每增加125 r/min,记录一次缓速器的制动力矩稳定值。实验结束后,得到了在不同转速下各挡位电流对应的制动力矩,并与有限元计算值进行对比,如图17所示。可以看出:计算结果与实测结果平均误差在5%以内,产生误差的主要原因是缓速器工作时的漏磁、温升和样机加工误差等因素的影响。在励磁电流为80 A、转速为1 250 r/min时最大制动力矩约为2 200 N·m,随后由于涡流去磁效应,制动力矩趋于平稳。

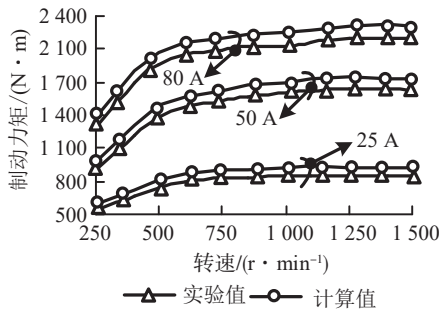


图17 制动力矩实验值与有限元计算值对比

6.3 持续制动特性测试

为了检测缓速器在持续下坡时的制动性能,通过计算机控制平台将转速设置为1 250 r/min,线圈励磁电流设置为70 A,实验持续10 min,每隔1 min记录一次缓速器的制动力矩和冷却水温,实验结果如图18所示。随着制动时间的增加,缓速器的制动力矩从2 150缓慢下降至1 860 N·m,制动力矩降低13.49%,冷却水温保持在95℃以下。传统电涡流缓速器在相同测试工况下工作10 min后,定子温度高达480℃,制动力矩热衰退高达46%^[18],说明本文提出的四凸极结构液冷缓速器有效解决了传统电涡流缓速器热衰退严重的问题,且冷却水道设计布局合理,制动性能热衰退低,长时间工作后输出的制动力矩仍能满足车辆的制动需求。

6.4 车载道路实验

通过车载道路实验对缓速器实际性能进行测试,如图19所示。缓速器安装在18 t货车传动轴中部,通过支架与车辆底盘固定,转子连接盘与传动轴相连,水冷回路进口与发动机冷却水出口相连,水冷回路出口经过外置节温器与车辆散热器相连,通过

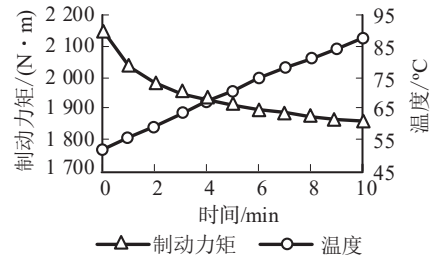


图18 持续制动特性曲线



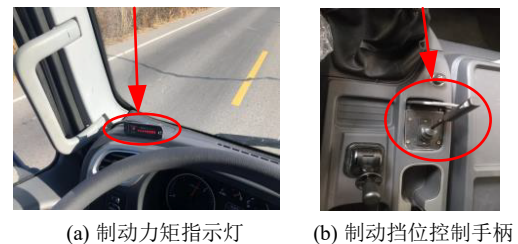
(a) 18 t中重型货车

(b) 缓速器安装效果

图19 缓速器实车安装

车载电池给缓速器励磁线圈供电。

在坡道角度为7°的长下坡测试路段,环境温度为18℃。试验车辆以90 km/h的初始速度挂挡滑行,只使用缓速器进行制动,目标车速为30 km/h。缓速器实时制动力矩输出监测装置与制动挡位控制手柄如图20所示,8个指示灯全部亮起表示缓速器正在输出最大制动力矩。



(a) 制动力矩指示灯

(b) 制动挡位控制手柄

图20 缓速器制动控制方式

缓速器使用最大制动挡位输出,当车速降至目标车速时,记录车辆减速时间。随后重复上述实验,得到缓速器实际制动特性结果如表6所示。当车辆仅使用缓速器制动时,将速度从90降低到30 km/h所需的时间约为18 s。经过转换计算得到车辆的减速度约为0.93 m/s²,满足车辆长下坡制动需求。

表6 车载道路实验结果

| 测试 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 时间/s | 17.5 | 17.8 | 17.9 | 18.1 | 18.3 | 18.5 |

7 结论

(1)本文针对中重型车辆长下坡制动需求提出了一种四凸极液冷电磁缓速器结构,采用等效磁路法建立其数学模型,通过有限元方法对其制动特性进行预测,利用分级变论域模糊控制策略分析缓速器在励磁电流无级调节下的制动性能。

(2)设计开发出四凸极液冷电磁缓速器的样机,进行台架测试和车载道路测试。结果表明,该缓速器的最大空损力矩为 $13\text{ N}\cdot\text{m}$, 10 min 连续制动后制动力矩仅降低 13.49% ,制动力矩分析计算结果与实测结果平均误差在 5% 以内,在励磁电流为 80 A 、转速为 $1\,250\text{ r/min}$ 时,缓速器实测制动力矩可达 $2\,200\text{ N}\cdot\text{m}$ 。在坡道为 7° 的测试路段, 18 t 测试车辆仅使用缓速器进行制动时,车速由 90 降低到 30 km/h 所需的时间约为 18 s ,满足中重型车辆长下坡制动需求。

参考文献

- [1] 李臣,晋杰,杨良坤.盘式和鼓式制动器热衰退性能对比实验研究[J].汽车工程,2017,39(12):1397-1401,1430.
LI C, JIN J, YANG L K. A comparative experimental study on thermal fade performance of disc and drum brakes [J]. Automotive Engineering, 2017, 39(12): 1397-1401, 1430.
- [2] 林恩景.载重量对鼓式制动器温度场的影响[J].冶金设备,2021(6):48-51.
LIN E J. Effect of load weight on drum brake temperature field [J]. Metallurgical Equipment, 2021(6): 48-51.
- [3] 严悦.液冷电磁缓速器影响因素仿真与分析[J].机电信息,2020(26):1-3.
YAN Y. Simulation and analysis of electromagnetic liquid-cooled retarder influencing factors [J]. Mechanical and Electrical, 2020(26): 1-3.
- [4] DING Z W, ZHOU L, XU J, et al. Vehicle retarders: a review [J]. IEEE Access, 2023, 11: 102757-102767.
- [5] LEI Y L, SONG P X, FU Y. Design of constant-speed control method for water medium hydraulic retarders based on neural network PID [J]. Automotive Innovation, 2020, 3(2): 147-157.
- [6] 兰海潮,马宗钰,李学博,等.基于动态规划的电动商用车长下坡联合制动控制策略[J].西北大学学报(自然科学版),2020,50(6):987-995.
LAN H C, MA Z Y, LI X B, et al. The long downhill combined braking control strategy of electric commercial vehicles based on dynamic programming [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2020, 50(6): 987-995.
- [7] TIAN J S, LI D S, YE L Z. Study on braking characteristics of a novel eddy current-hydraulic hybrid retarder for heavy-duty vehicles [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(3): 1658-1666.
- [8] 陈浩,袁良信,孙涛,等.电动轮汽车车速与道路坡度估计[J].汽车工程,2020,42(2):199-205.
CHEN H, YUAN L X, SUN T, et al. Estimation of in-wheel motor driven electric vehicle speed and road gradient [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(2): 199-205.
- [9] 张凯,李德胜,尹汪雷,等.自励式液冷电磁缓速器的数值模拟与实验研究[J].汽车工程,2015,37(6):699-706.
ZHANG K, LI D S, YIN W L, et al. Numerical simulation and experimental study of the self-excited liquid-cooled electromagnetic retarder [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(6): 699-706.
- [10] GUO W G, LI D S, YE L Z. Performance analysis of a novel self-excited, liquid-cooled, and bridge integrated electromagnetic retarder for heavy vehicles with trailer [J]. International Journal of Automotive Technology, 2019, 20(5): 1023-1032.
- [11] KOU B Q, JIN Y X, ZHANG H, et al. Nonlinear analytical modeling of hybrid-excitation double-sided linear eddy-current brake [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1-4.
- [12] 郭文光.汽车能动型电磁缓速器研究[D].北京:北京工业大学,2021.
GUO W G. Research on automotive active electromagnetic retarder [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2021.
- [13] CHO S Y, LIU H C, AHN H W, et al. Eddy current brake with a two-layer structure: calculation and characterization of braking performance [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11): 1-5.
- [14] ZHANG K, LI D S, ZHENG R, 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.
- [15] ZHANG K, LI D S, DU X, 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.
- [16] LEI Y L, SONG P X, ZHENG H P, et al. Constant speed control method of hydraulic retarder based on fuzzy PID [C]. SAE Paper 2017-01-1113.
- [17] 陈孝玉,敖克勇,刘小雍,等.汽车液力缓速器恒速控制策略仿真研究[J].机床与液压,2019,47(10):160-165.
CHEN X Y, AO K Y, LIU X Y, et al. Simulation research on vehicle with hydraulic retarder constant speed control strategy [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(10): 160-165.
- [18] YE L Z, LIU Y P, LI D S. Performance analysis and optimization of liquidcooled and flywheel-type eddy current retarder [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(6): 1-5.