

# 电传动车辆反拖系统设计与分层控制策略研究\*

金纯 郑舒阳 田海永

(北京科技大学机械工程学院,北京 100083)

**摘要:**针对轮边电传动汽车长距离下坡工况中发动机的高怠速、高油耗,设计了反拖回馈电传动系统,轮边电动机再生制动能量回馈至直流母线,由整流模块切换到控制同步牵引发电机,使其工作在牵引电动机状态,反拖发动机至额定转速,此时发动机油门关闭。依据分层控制思想,提出了车辆行驶状态判断的上层控制算法、基于发电机转子频率跟踪的中层控制算法和基于双模糊控制的底层控制算法反拖回馈的3层控制体系。台架试验表明:该传动方式可以提供发动机功率20%的连续制动力,节省燃油,控制策略鲁棒性好,对驾驶员意图识别能力强。

**关键词:**车辆 电传动 制动回馈 反拖

**中图分类号:** U469.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0022-06

## 引言

轮边电驱动系统具有结构简单、容易实现大扭矩传递和故障率低等优点,尤其适合低速大扭矩的非公路载重车辆。但该方式与发动机无机械连接,无法采用发动机排气制动的方式来实现车辆的下坡缓行。目前,电传动载重车辆均采用整车的惯性能量(动能和势能)转换为电能并通过制动电阻栅转换成热能消耗的方式来实现车辆的制动、减速功能。在长距离下坡制动工况中,为了满足牵引电机冷却、机械制动、转向等能量需求,发动机必须处于高怠速、高油耗状态。因此,合理地利用制动能量,降低燃油消耗,是目前国内外非公路电传动载重汽车亟待解决的问题。

对于机械传动车辆的制动能量利用,主要是研究发动机的摩擦、排气制动为车辆提供持续的制动力<sup>[1-4]</sup>;混合动力汽车制动能量回馈的研究中,多集中在发动机制动与电动机制动的最优分配以增大电池组能量回收效率上<sup>[5-10]</sup>。而对于频繁启动、制动的电传动交通工具,通常采用超级电容作为制动储能装置<sup>[11-17]</sup>。非公路电传动车辆功率大,不适合采用蓄电池或超级电容的方式进行能量回收,只能采用制动电阻耗散的方式。

发动机反拖转矩、同步电机启动瞬间的电流冲击、驾驶员制动意图的监测,对反拖系统的启动、运行、退出都有很大影响<sup>[18]</sup>。本文设计反拖回馈电传动系统,当车辆处于制动、缓行工况时,轮边电机制

动能回馈到直流母线,通过整流逆变模块驱动同步发电机使其工作在电动机状态,拖动柴油机至额定转速。此时柴油机只有少量的燃油喷射,或不喷油。利用电传动汽车测试试验台,对发动机-发电机反拖工况特性进行研究。设计一种分层控制策略监测行车状态及制动踏板动作,依据电机转子频率启动同步电机并根据母线电压及制动强度输出反拖转速信号,监测驾驶员制动踏板动作退出反拖工况。最后在试验台架上对反拖回馈系统进行试验分析。

## 1 反拖系统设计

反拖系统如图1所示,由发动机、同步发电机、整流逆变模块和轮边电动机组成,与目前电传动矿用汽车传动系统的区别是设计开发能够使能量双向流动的整流逆变模块来替换不控整流模块。图1中的虚线箭头标出了反拖回馈系统的能量流动方向。在长下坡反拖回馈工况中,轮边电动机再生制动能量回馈到直流母线,整流逆变模块利用制动能量驱动同步发电机,与发电机直连的发动机此时即相当于负载,为系统提供一定的制动力矩,又相当于动力源为系统的冷却、转向等提供动力。

在反拖回馈过程中,要使系统成功启动并保证运转过程的稳定性、安全性,须满足以下约束条件:

(1)驾驶员操作意图的监测。以反拖状态确认开关 $k_p$ 作为驾驶员主动确认反拖回馈的开关,在开关确认后,驾驶员只能通过制动踏板操作来表达自己的期望的反拖特性。这些事件主要是:增加制动强

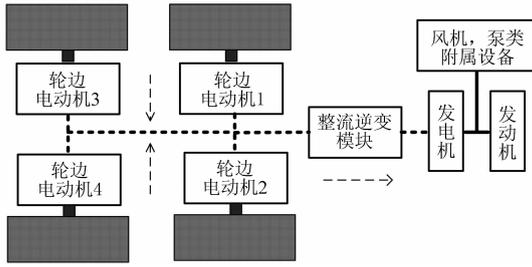


图 1 反拖系统

Fig. 1 Anti-drive system

度、减小制动强度、正常退出、紧急制动。反拖回馈控制系统需要准确识别司机的操作意图。

(2) 发动机反拖转矩。台架试验显示, 发动机在反拖中提供的制动功率占发动机额定功率的 5% ~ 30%。反拖制动功率会随发动机转速升高增大至额定功率的 30%。本台架试验发动机为康明 QSL9 型发动机, 额定功率为 220 kW/(1 800 r/min); 反拖启动转矩在 105 ~ 300 N·m 之间。同步发电机在发动机怠速转速启动时不是通常情况下的静止启动而是带载、带速启动, 启动一瞬间阻抗较大, 不容易被拖到同步转速, 如果不加以有效地控制会导致启动失败。图 2 为台架试验中同步发电机从静止开始反拖发动机, 发动机从 420 r/min 至 2 000 r/min 转矩随转速变化的曲线。其中, 转速在 420 r/min 前发动机出现大幅震荡并作为参考。发动机怠速状态启动发动机阻抗达到 175 N·m, 在最高转速 2 000 r/min 时达到 318 N·m, 因此在反拖中需要提供足够的驱动功率以供启动反拖, 本文通过监测母线电压来判断系统能量是否足够支撑反拖系统启动。

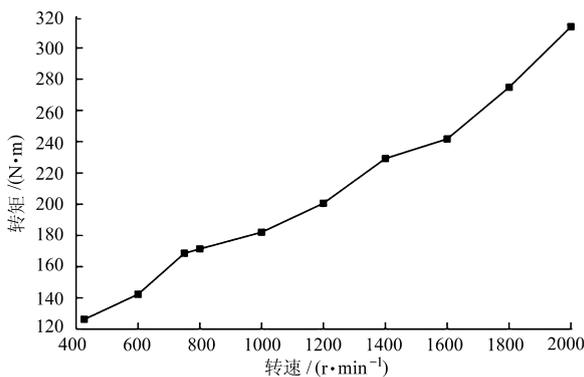


图 2 反拖发动机转速-转矩曲线

Fig. 2 Speed - torque curve of anti-drive engine

(3) 反拖启动电流冲击。同步发电机启动瞬间处于发动机怠速运转状态, 发电机定子中仍留有一部分电压, 整流逆变模块启动时与剩余交流电源并联运行会产生较大的电流冲击, 导致 IGBT 过流保护。电动机启动时定子电流、转矩如图 3、4 所示, 定子电流幅值最大达到了 48.3 A, 达到了稳定运转情况时的 3 倍, 电动机转速无法被拖至稳定值, 在 750 ~

815 r/min 区间剧烈震荡。启动时的电流冲击是控制系统要考虑的重要因素之一, 需要在启动过程中施以控制以保证反拖成功启动。

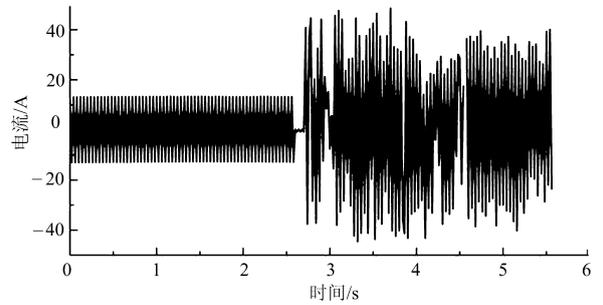


图 3 启动过程定子电流波形

Fig. 3 Current waveform of start time

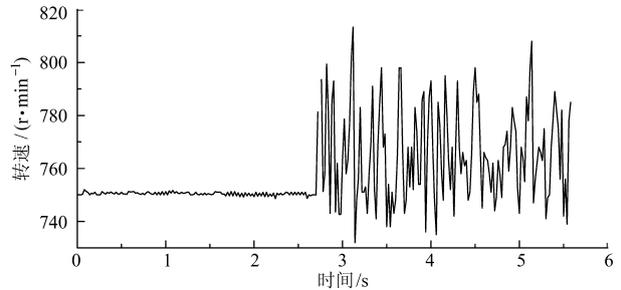


图 4 启动过程转速波形

Fig. 4 Speed waveform of start time

## 2 基于分层的反拖回馈控制策略

根据反拖系统约束条件及行车工况的特点, 提出分层控制结构, 如图 5 所示。控制器的上层接受反拖状态确认开关  $k_p$  及车速  $v$ 、发动机转速  $n_e$ , 判断此时车况是否满足启动条件; 中层控制器负责启动、运行控制, 追踪同步电机的频率及电压以减小启动电流冲击; 底层控制器处理驾驶员的制动踏板意图, 根据制动踏板开度  $S$  及  $S$  的变化率判断驾驶员的正常退出、紧急制动的操作意图; 并根据制动踏板开度  $S$  及母线电压  $U$  计算输出反拖转速  $n$ 。

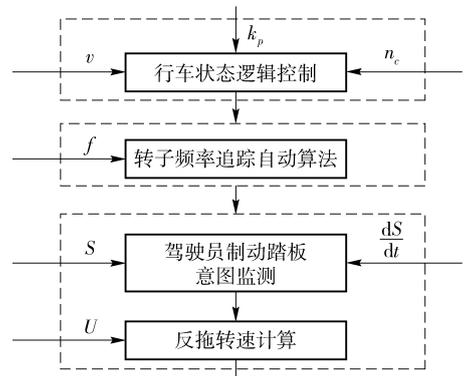


图 5 分层控制结构

Fig. 5 Hierarchy control architecture

### 2.1 上层控制算法

上层控制算法的目的是判断行车状态, 以确保

车况符合反拖制动的条件。接受驾驶员反拖确认状态  $k_p$  及车辆的行驶情况:车速  $v$  是否低于 15 km/h; 发动机转速是否处在怠速转速  $n_e = 750$  r/min。行驶工况控制满足

$$k = \begin{cases} 0 & (k_p = 0 \text{ 或 } n_e \geq 750 \text{ 或 } v \geq 15) \\ 1 & (k_p = 1 \text{ 且 } n_e = 750 \text{ 且 } v < 15) \end{cases}$$

## 2.2 基于转子频率跟踪的中层控制算法

针对同步发电机带速启动中的电流冲击,设计了基于转子频率跟踪的同步电动机启动算法。启动后,转速传感器监测同步电动机转子频率,并由转子频率根据  $V/f$  曲线计算出整流逆变模块施加电压  $U$ ,按照此时的电压  $U$ 、频率  $f$  启动可以减小并联时电流冲击。启动后判断电流波动是否平缓,若波动较大则重新搜索转速,若波动平稳则整流逆变模块就按相应的频率、幅值进行输出。根据测得的转子频率与逆变器施加的定子磁场旋转频率,计算同步电动机运转的滑差  $s$ ,使  $s$  小于 5%,以保证电动机能够拖入同步转速。基于定子频率追踪的控制策略图如图 6 所示。

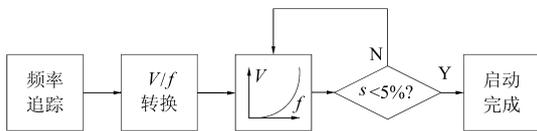


图 6 中层算法

Fig. 6 Middle layer algorithm

## 2.3 基于双模糊控制的底层控制算法

在反拖回馈运行中会遇到行车、紧急制动急等工况,需要控制器对驾驶员制动脚踏板动作做出判断<sup>[19-20]</sup>,鉴于驾驶员制动意图模型的不确定性,选用了模糊控制算法,可对缓慢踩下、抬起踏板,紧急踩下、抬起踏板等概念进行识别判断。底层控制算法结构如图 7 所示。

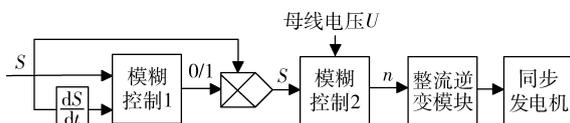


图 7 底层算法

Fig. 7 Bottom layer algorithm

模糊控制器 1 的输入为制动踏板开度  $S$  及其变化率  $\frac{dS}{dt}$ ,经过模糊化、模糊规则判断、反模糊化得到输出量,控制器 1 的输出开关状态量:0/1,其中输出 1 代表驾驶员的意图为启动反拖制动,0 表示结束反拖回馈。输出开关量 0/1 再与制动踏板开度  $S$  做乘法运算,运算结果  $0/S$  作为模糊控制器 2 的一个输入。

根据前面分析和已有的经验得到制动策略:

(1)当制动踏板开度  $S$  较小,即输入  $S$  为 PS 时,判定驾驶意图为轻度电缓行制动,不进入反拖回馈运行。

(2)当制动踏板开度  $S$  较大,即输入  $S$  为 PB 时,判定驾驶意图为停车制动,为保证制动安全不启动反拖回馈。

(3)当制动踏板开度  $S$  一般,即输入  $S$  为 PN 时判定驾驶意图为进入反拖回馈运行,当制动强度有较大的正向、负向变化时,判断为紧急制动或退出反拖制动,考虑车辆行驶安全两种情况都应停止制动回馈,制动能量全部由制动电阻承担。

模糊控制器 2 计算反拖转速。随着电传动系统制动功率的增加,牵引冷却系统等需要工作在高转速以增加散热功率。模糊控制可根据不同的制动率动态协调反拖转速,本文设计的模糊控制规则为在制动功率达到 80% 前使反拖转速呈线性增长,制动功率达到 80% 后发动机在额定转速 1 800 r/min 运转。

## 3 试验

为了验证反拖回馈电系统分层控制策略的可行性,针对长距离下坡工况进行了台架模拟试验。试验平台用发电机、发动机、对拖异步电机等实际器材进行试验,较仿真模型可以得到更实际的试验结果。试验台原理图和试验设备分别如图 8、图 9 所示。

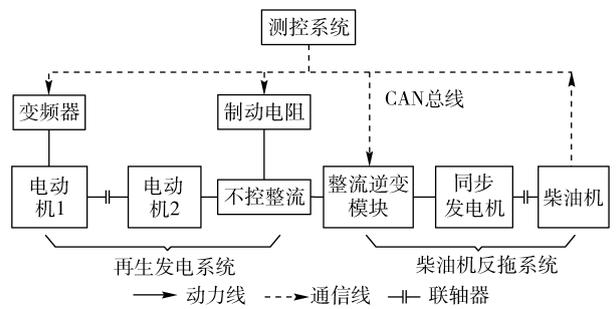


图 8 试验台架示意图

Fig. 8 Schematic diagram of test bench

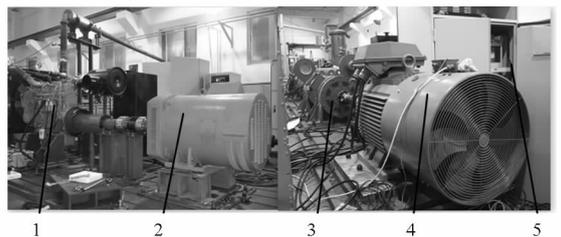


图 9 反拖系统试验台

Fig. 9 Test bench of anti-drive system

1. 发动机 2. 同步发电机 3. 负载 4. 电动机 5. 变流器

主要包括:

(1)轮边电动机:采用双异步电动机对拖的方

式,异步电动机1通过变频器拖动异步电动机2使其处在发电状态,三相电经过不控整流提供给整流逆变模块。通过调节变频器转速,双异步电动机对拖可以模拟在不同功率下轮边电机的再生能量回馈。

(2) 整流逆变模块:将电力二极管变换为IGBT,在运行工况中工作在不控整流状态,在反拖回馈中驱动同步发电机。

(3) 控制单元:控制器采用DSP+FPGA的架构。FPGA对电机转子转速 $n_e$ 、驾驶员反拖确认开关 $k_p$ 、母线电压 $U$ 等信号进行采集、比较。模糊控制算法中对输入信号进行了十六进制编码的处理以提高运算的精度和速度,并与设定好的隶属度数值作比较可计算出输入值所在的隶属度,并采用基于IF-THEN的语句结构设计了底层模糊规则。

(4) QSL9型220 kW柴油机、200 kW同步发电机。

(5) 检测部分:转速转矩传感器、电压、电流传感器、开度传感器、电机功率分析仪和模拟信号采集仪,用来监测、记录实验数据。

试验设定了2种运行工况:启动运行工况和紧急制动工况。

### 3.1 启动运行工况

启动工况中逐渐增加制动踏板开度 $S$ 并提高母线电压以模拟反拖回馈启动运行过程。如图10所示,当制动开度 $S$ 大于0.3后反拖并未启动,此时母线电压强度并未满足条件。当母线电压升高至500 V后,在3.5 s时刻反拖启动运行,转速抖动持续了0.3 s,而后波动幅度逐渐减小。待电动机拖入同步后进入稳定运行,在6.4 s时加入持续时间为0.5 s的扰动,考察模糊控制器的抗干扰性,随着制动踏板扰动,控制系统检测到制动踏板开度 $S$ 的变化并调整了同步电动机输出转速给定。反拖转速下降至1 150 r/min,扰动结束后恢复至原始转速1 380 r/min,显示了系统抗干扰能力,母线电压变化平稳。

### 3.2 紧急制动工况

紧急工况中,制动踏板初始开度在0.735、1.5 s时踩下制动踏板至1,检测系统的控制效果。控制效果如图11所示,控制器准确识别了1.5 s时制动踏板的紧急制动意图,并控制反拖转速缓慢下降。母线电压最大增到530 V,并未出现大幅度突变。3 s后系统处于电阻制动状态,通过对拖电动机变频器制动电阻的消耗,母线电压逐渐恢复至500 V。发动机转速逐渐减至750 r/min后启动。

## 4 结论

(1) 轮边电传动车辆长距离下坡工况中,反拖

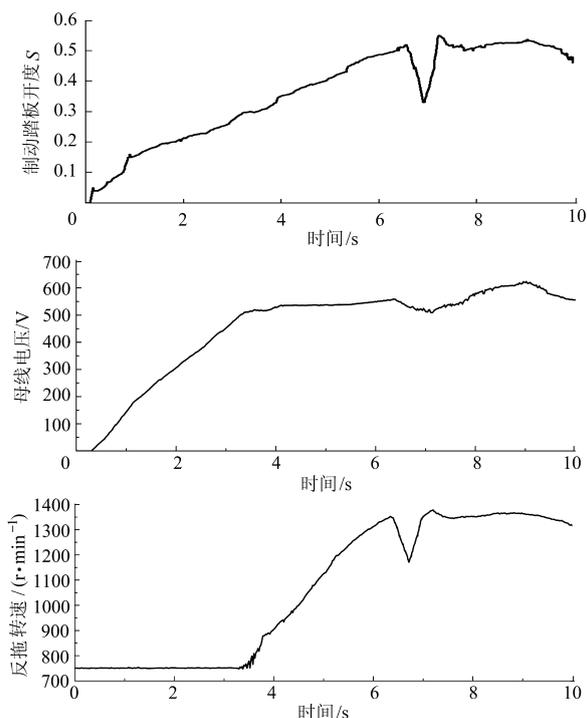


图10 启动运行工况

Fig. 10 Starting condition

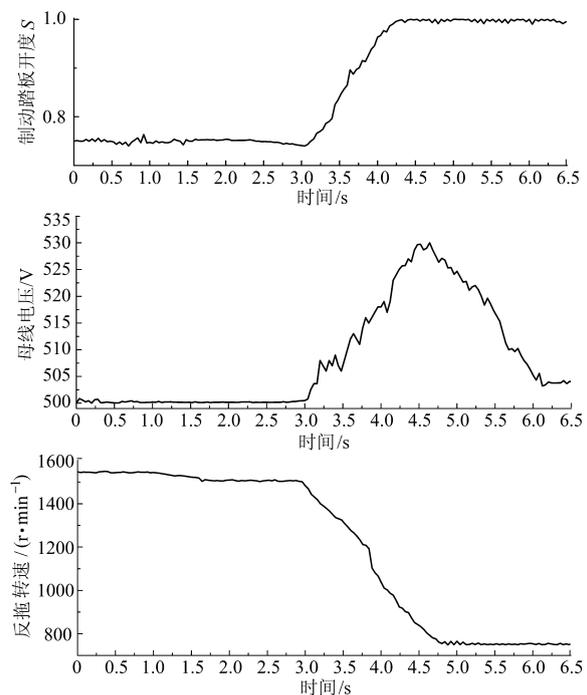


图11 紧急制动工况

Fig. 11 Emergency braking condition

回馈系统可在发动机油门关闭的情况下输出额定转速,可有效节约燃油并为系统提供动力及制动力。

(2) 台架试验结果表明:分层反拖控制策略可以很好地解决反拖运行启动过程中的电流冲击、驾驶员紧急制动意图判断的问题,既能实现反拖系统的启动、平稳运行,又能保障在紧急时刻发挥主动安全作用。

## 参 考 文 献

- 1 喻凡,李道飞. 车辆动力学集成控制综述 [J]. 农业机械学报, 2008,39(6):1-7.  
Yu Fan, Li Daofei. Review on integrated vehicle dynamics control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6):1-7. (in Chinese)
- 2 严军,过学迅. 液力传动重型车辆下坡工况发动机反拖起动机研究 [J]. 车辆与动力技术, 2010(2):14-17.  
Yan Jun, Guo Xuexun. Research on engine cranking process in downhill condition for a heavy vehicle with hydraulic transmission [J]. Vehicle & Power Technology, 2010(2):14-17. (in Chinese)
- 3 Lu Wei, Liu Wei, Yao Jia, et al. Simulation of CVT ratio control strategy of engine braking [C] // 2010 2nd International Asia Conference Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR), 2010, 3:166-169.
- 4 董伟,于秀敏,张友坤. 汽车下坡时发动机制动 CVT 控制策略 [J]. 吉林大学学报:工学版, 2006,36(5):651-653.  
Dong Wei, Yu Xiumin, Zhang Youkun. CVT control strategies for engine brake on long downhill of vehicle [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006,36(5):651-653. (in Chinese)
- 5 张博,李君,高莹,等. Plug-in 混合动力汽车能量管理策略优化设计 [J]. 农业机械学报, 2009,40(9):21-25.  
Zhang Bo, Li Jun, Gao Ying, et al. Optimizations of Plug-in hybrid electric vehicle energy management control strategy [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(9):21-25. (in Chinese)
- 6 Bai Zhifeng, Cao Binggang. Robust control for regenerative braking of battery electric vehicle [J]. Control Theory & Applications, 2008,2(12):1105-1114.
- 7 滕飞,吕建刚. 基于效率优化的履带车辆再生制动控制策略 [J]. 农业机械学报, 2012,43(2):13-15.  
Teng Fei, Lü Jian'gang. Control strategy for regenerative braking of tracked vehicle based on efficiency optimization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(2):13-15. (in Chinese)
- 8 王锋,钟虎,马兹林. 滑行工况下混合动力系统的再生制动 [J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2009,37(7):63-67.  
Wang Feng, Zhong Hu, Ma Zilin. Regenerative brake of hybrid system on sliding conditions [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2009,37(7):63-67. (in Chinese)
- 9 陈静,王登峰,刘彬娜. 燃料电池-蓄电池-超级电容混合动力汽车控制策略 [J]. 农业机械学报, 2008,39(10):37-40.  
Chen Jing, Wang Dengfeng, Liu Binna. Control strategy of fuel cell - battery - ultracapacitor hybrid electric vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(10):37-40. (in Chinese)
- 10 舒红,秦大同,胡明辉,等. 轻度混合动力汽车再生制动能量管理策略 [J]. 机械工程学报, 2009,45(1):168-173.  
Shu Hong, Qin Datong, Hu Minghui, et al. Regenerative braking energy management strategy for mild hybrid electric vehicles [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009,45(1):168-173. (in Chinese)
- 11 Ayad M Y, Pierfederici S, Ra S, et al. Voltage regulated hybrid DC power source using supercapacitors as energy storage device [J]. Energy Conversion and Management, 2007,48(7):2196-2202.
- 12 Ayad M Y, Becherif M, Henni A, et al. Passivity based control applied to DC hybrid power source using fuel cell and supercapacitors [J]. Energy Conversion and Management, 2010,51(7):1468-1475.
- 13 Payman A, Pierfederici S, Meibody-Tabar F. Energy control of super capacitor fuel cell hybrid power source [J]. Energy Conversion and Management, 2008,49(6):1637-1644.
- 14 Uzunoglu M, Alam M S. Dynamic modeling design and simulation of a PEM fuel cell/ultra-capacitor hybrid system for vehicular applications [J]. Energy Conversion and Management, 2007,48(5):1544-1553.
- 15 Adib E, Farzanehfard H. Soft switching bidirectional DC - DC converter for ultracapacitor batteries interface [J]. Energy Conversion and Management, 2009,50(12):2879-2884.
- 16 Farzanehfard H, Beyragh D S, Adib E. A bidirectional soft switched ultracapacitor interface circuit for hybrid electric vehicles [J]. Energy Conversion and Management, 2008,49(12):3578-3584.
- 17 Reza Teymourfar. Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line [J]. Energy Conversion and Management, 2012,56:206-214.
- 18 王庆年,唐先智,王鹏宇,等. 基于神经网络的混合动力汽车驾驶意图识别方法 [J]. 农业机械学报, 2012,43(8):33-36.  
Wang Qingnian, Tang Xianzhi, Wang Pengyu, et al. Driving intention identification for hybrid vehicles based on neural network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(8):33-36. (in Chinese)
- 19 赵峰,罗禹贡,李克强,等. 混合动力汽车牵引力分层控制与硬件在环试验 [J]. 农业机械学报, 2011,42(4):9-12.  
Zhao Feng, Luo Yugong, Li Keqiang, et al. Hierarchical traction control for hybrid electric vehicle and hardware-in-loop test [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(4):9-12. (in Chinese)
- 20 罗禹贡,陈涛,李克强. 智能混合动力电动轿车整车控制系统 [J]. 清华大学学报, 2010,50(8):1272-1276.  
Luo Yugong, Chen Tao, Li Keqiang. Control system for an intelligent hybrid electric vehicle [J]. Journal of Tsinghua University, 2010,50(8):1272-1276. (in Chinese)

## Anti-drive System Design and Hierarchy Control Strategy of Electric Drive Vehicle

Jin Chun Zheng Shuyang Tian Haiyong

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To solve the problems of high idle speed and fuel consumption of wheeled electric drive vehicle on long downhill condition, an anti-drive energy feedback system was designed. The wheeled motors regenerative braking energy was feedback to DC bus and switched from rectifier to inverter module. The synchronous traction generator was driven by inverter as traction motor, which dragging the engine speed to the rated state, and at this time, the throttle was closed. Based on the hierarchical control idea, a three layers control algorithm of anti-drive feedback system, the up layer control algorithm of vehicle state estimation, middle layer of tracking generator rotor frequency and underlying layer of double fuzzy, was put forward. Bench test result showed the anti-drive energy feedback system could provide continuous braking force which equal to 20% of engine power, and save 15% of fuel. The control strategy has good robustness and strong driver intention recognition.

**Key words:** Vehicle Electric drive Regenerative braking Anti-drive

(上接第 41 页)

- 16 徐涛, 杨泽亮, 甘云华. 液体乙醇微尺度层流扩散燃烧的数值模拟[J]. 华南理工大学学报, 2011, 39(3): 90-94.  
Xu Tao, Yang Zeliang, Gan Yunhua. Numerical simulation of microscale laminar-flow diffusion combustion of liquid ethanol[J]. Journal of South China University of Technology, 2011, 39(3): 90-94. (in Chinese)
- 17 Maruta K. Micro and mesoscale combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 125-150.
- 18 Datta A. Effects of gravity on structure and entropy generation of confined laminar diffusion flames[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2005, 44(5): 429-440.
- 19 Kim N I, Kato S, Kataoka T, et al. Flame stabilization and emission of small Swiss-roll combustors as heaters[J]. Combustion and Flame, 2005, 141(3): 229-240.
- 20 Yuasa S, Oshimi K, Nose H, et al. Concept and combustion characteristics of ultra-micro combustors with premixed flame[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2455-2462.

## Effect of Heat Loss on Micro Flame Stability in Confined Space

Gan Yunhua<sup>1</sup> Luo Yanlai<sup>1</sup> Feng Qingying<sup>2</sup> Shi Yanling<sup>3</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

2. Guangzhou China Resources Thermal Power Co., Ltd., Guangzhou 511455, China

3. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The characteristics of ethanol-air microscale laminar-flow diffusion combustion were investigated. Combined with experimental study and numerical simulation, the effects of surface heat loss on the flame stability in the confined space were systematically analyzed. The surface heat loss was controlled by electrical heating inside. According to the results, the electrical heating reduced the effects of heat loss and enhanced the stability effectively. Using the appropriate electrical heating power, it reached the widest stability limits of combustion. The flame feature size and temperature distribution were both changed by the electrical heating. The electrical heating raised the flame temperature. The chemical reaction rate became bigger, and the micro-flame shifted upstream. Within a certain range, the electrical heating increase was greater than the increase of the heat loss. The electrical heating inhibited the heat loss and enhanced the stability.

**Key words:** Micro-combustion Confined space Heat loss Flame stability