

文章编号:1671-1637(2014)04-0064-12

基于制动驾驶意图辨识的纯电动客车 复合制动控制策略

赵 轩¹, 马 建¹, 汪贵平²

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:为了研究纯电动客车复合制动系统制动力分配比例,提出了基于制动驾驶意图辨识的复合制动控制策略。基于隐马尔科夫理论建立了双层制动驾驶意图辨识模型,运用道路试验数据对模型进行辨识验证。基于辨识出的驾驶意图和车速,以前后轮制动力分配比例、ECE法规、电机特性、滑移率、蓄电池特性、超级电容特性与传动系统特性为约束条件,制定了复合制动系统制动力分配策略,在9种工况下,应用Simulink对复合制动系统进行建模仿真。仿真结果表明:应用基于制动驾驶意图的纯电动客车复合制动控制策略后,在各种工况下,摩擦制动系统和电机再生制动系统能够协调稳定地工作,在保证制动安全性的前提下最大限度地回收了制动能量。低车速轻微制动时能量回收效率最高,可达到43.84%。高车速紧急制动时能量回收效率最低,仅为0.89%。

关键词:汽车工程;纯电动客车;制动驾驶意图;马尔科夫模型;复合制动;控制策略

中图分类号:U461.3

文献标志码:A

Composite braking control strategy of pure electric bus based on brake driving intention recognition

ZHAO Xuan¹, MA Jian¹, WANG Gui-ping²

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To research braking force distribution ratio of composite braking system for pure electric bus, a composite braking control strategy based on brake driving intention recognition was presented. A double-layer brake driving intention recognition model based on hidden Markov theory was set up and identified by using road experiment data. Based on recognized driving intention and vehicle speed, the distribution ratios of braking forces for front and rear wheels, ECE regulation, motor characteristics, slip ratios, battery characteristics, super capacitor characteristics and transmission system characteristics were taken as constraint conditions, the braking force distribution strategy of composite braking system was proposed, and the control strategy of composite braking system was simulated by Simulink software under 9 operating conditions. Simulation result shows that friction braking system and motor regenerative braking system can work coordinately and steadily under various operating conditions when the braking control strategy is applied, and braking energy can be recovered as much as possible under the

收稿日期:2014-05-11

基金项目:国家 863 计划项目(2012AA111106);国家自然科学基金项目(51207012);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G1221027,2013G3322009,2013G3222004,2013G3224020)

作者简介:赵 轩(1983-),男,陕西汉中,长安大学工程师,工学博士,从事电动汽车控制技术研究。

premise of ensuring braking safety. Energy recovery efficiency is highest under slight brake when vehicle speed was low, and the efficiency can reach to 43.84%. Energy recovery efficiency is lowest under emergency brake when vehicle speed is high, and the efficiency is only 0.89%. 2 tabs, 21 figs, 23 refs.

Key words: automotive engineering; pure electric bus; brake driving intention; Markov model; composite braking; control strategy

Author resume: ZHAO Xuan(1983-), male, engineer, PhD, +86-29-82334462, zhaoxuan@chd.edu.cn.

0 引言

电动汽车在节能减排方面具有明显的优势,应该迅猛发展,但是续航里程一直是制约其发展的主要因素,能量存储技术已成为电动汽车发展的瓶颈^[1-2],提高能量利用率成为电动汽车研究的主要方向。

据统计,在城市循环工况下,汽车制动消耗的能量占整车驱动能量的 31.3%~66.6%^[3]。其中欧洲 ECE 循环工况 60.1%的能量以制动热能的形式散失,美国 UDDS 循环工况 43.3%的能量以制动热能的形式散失,美国 NYCC 循环工况 60.8%的能量以制动热能的形式散失,美国 LA02 循环工况 59.4%的能量以制动热能的形式散失,伦敦公交循环工况 66.6%的能量以制动热能的形式散失,澳大利亚公交循环工况 31.3%的能量以制动热能的形式散失,因此,电动汽车制动过程散失能量的回收再利用成为提高能量利用率、增加续航里程最有效的途径。

电动汽车再生制动控制技术是现阶段的主要研究方向。在电动汽车再生制动控制策略研究方面,彭栋等提出了最优滑移率与制动转矩动态分配模糊控制策略,实现能量回收制动与 ABS 协同工作,以保证制动安全性^[4-5];张昌利等根据制动强度和储能装置 SOC 状态,提出基于模糊控制的制动力分配策略^[6];Walker 等基于制动安全性和稳定性要求对复合制动系统中摩擦制动力进行研究^[7];周磊等提出一种兼顾制动回馈控制和车轮防抱死控制的基于滑移率的电动汽车回馈制动控制策略^[8];Ko 等提出基于制动感觉和车速的前轮再生制动和后轮摩擦制动协同工作的制动力分配策略^[9];张元才等基于模糊控制对制动意图进行识别,研究中度制动过程中前后轴制动力分配策略在前轴式、中轴式、双轴式复合制动系统中的差异性^[10];马其贞基于模糊控制对制动意图进行识别,研究纯电动轿车前轴电液制动力分配比例^[11]。国内外电动汽车

制动控制策略研究方面主要将制动强度、储能装置、制动安全性、ABS、车速等因素作为制动力分配的影响因素,运用模糊控制理论对制动力分配策略进行研究,仅张元才等考虑到驾驶意图对电动汽车复合制动控制算法的影响,在对驾驶意图识别的过程中主要采用模糊控制理论^[10-11]。由于驾驶行为具有时序性,运用模糊控制理论难以体现驾驶意图和驾驶行为的时序性和精确性,因此,具有一定的局限性。同时张元才等仅针对中度制动过程中制动力分配策略展开研究,马其贞主要研究纯电动轿车前轴电液制动力分配策略。本文考虑到制动驾驶行为与制动驾驶意图的关系,以及制动驾驶行为的时序性特点,基于隐形马尔科夫链理论对制动驾驶意图进行识别,然后根据制动驾驶意图和车速,以前后轮制动力分配比例、ECE 法规、电机特性、滑移率、蓄电池和超级电容特性、传动系统特性等因素为约束条件,对纯电动客车复合制动系统制动力分配策略进行研究。

1 基于隐形马尔科夫链的制动驾驶意图辨识

1.1 隐形马尔科夫理论模型的基本概念

驾驶行为具有较强的时序特征,符合隐形马尔科夫模型理论,因此,本文采用隐形马尔科夫模型对驾驶意图进行辨识。由于一般需要解决的问题比马尔科夫模型所能描述的问题复杂,观测者往往无法获得模型的状态,观测时间序列与模型状态之间也没有直接的对应关系,而是通过观测概率分布体现,这样的模型称为隐形马尔科夫模型 HMM(Hidden Markov Model)^[12]。

HMM 是一种双重随机过程,不但能够描述各种状态之间相互转移的马尔科夫随机过程,而且能够描述各观测变量和状态之间统计关系的随机过程^[13-14]。HMM 由 5 个参数确定,即初始概率分布 π 、每个状态所对应的可能观测值的数量 M 、状

态数 N 、观测概率矩阵 B 与隐含状态之间转移概率矩阵 A 。

1.2 基于双层 HMM 制动驾驶意图辨识模型的建立

在汽车行驶过程中,驾驶人根据车辆运行状况和道路信息,采取制动驾驶操作行为,具有一定的时序性和规划性,这个具有时序性的规划过程就是制动驾驶意图^[15]。制动驾驶意图可以分割为一系列短时间段和较简单的制动驾驶行为,将这些以一定时间先后顺序发生的制动驾驶行为链接起来就实现了制动驾驶意图^[16-18],因此,制动驾驶意图就是规划出的制动驾驶行为,制动驾驶行为是对制动驾驶意图的实现,两者相辅相成。

制动驾驶意图是一种长时间段的具有分层结构的复杂事件^[19]。制动驾驶行为是由短时间段的基本动作组成,如制动踏板无动作、踩下制动踏板、保持制动踏板等,这些动作的作用时间较短,通常仅为几秒。制动驾驶意图是由这些表征制动驾驶行为的简单基本动作组成,如正常制动驾驶意图是由正常松开加速踏板、正常踩下制动踏板、制动踏板位置保持等一系列短时间段的基本动作按照时序性和规划性链接起来的。在这种情况下,隐形马尔科夫模型的识别效果并不理想,因此,本文采用分层隐形马尔科夫模型 LHMM(Layering Hidden Markov Model),来改进和补充 HMM 的不足。

图 1 为制动驾驶意图 LHMM,第 1 层为制动驾驶行为模型,第 2 层为制动驾驶意图模型。第 1 层模型中包括辨识制动驾驶行为的 HMM 和速度等级,观测序列值为制动踏板位移、加速踏板位移、制动踏板力和车速。在制动驾驶行为辨识过程中,根据对应的加速踏板和制动踏板信号,选取似然度最大的模型作为识别出的制动驾驶行为。对辨识出的制动驾驶行为进行符号化处理,作为第 2 层 HMM 的观测序列,根据制动踏板行为观测值和速度信号,选取似然度最大的模型作为识别出的制动驾驶意图。

LHMM 结构的训练过程见图 2,将训练过程分为 2 步,第 1 步对制动驾驶行为模型进行训练,第 2 步对制动驾驶意图模型进行训练。

1.2.1 制动驾驶行为模型

本文将制动驾驶行为分割成短时间段的基本驾驶行为,并按数据来源进行分类,利用分类后的加速踏板与制动踏板操作数据,分别训练出 6 个制动踏板操作行为模型和 6 个加速踏板操作行为模型。制动踏板操作行为模型的观测序列向量为位移、位移

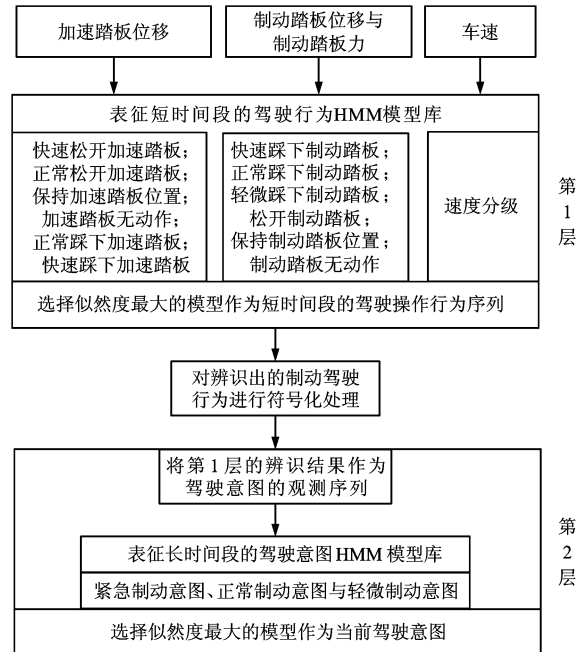


图 1 制动驾驶意图 LHMM 结构

Fig. 1 LHMM structure of brake driving intention

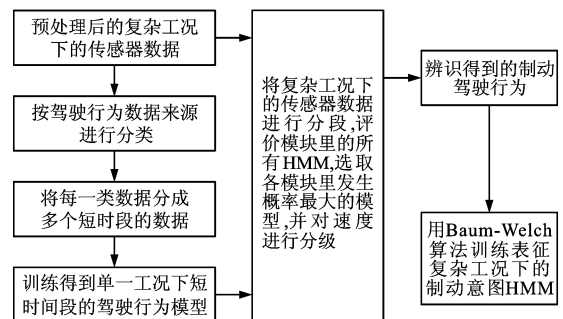


图 2 LHMM 结构训练过程

Fig. 2 LHMM structure training process

变化率和力,加速踏板操作行为模型的观测序列向量为位移和位移变化率。

根据采集到的制动踏板位移、制动踏板力与加速踏板位移,基于 Baum-Welch 算法^[13]中递归思想分别训练出 6 个操作制动踏板行为 HMM 和 6 个操作加速踏板行为 HMM,然后对车速分级,即把 $0 \sim 100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的车速分为 10 级,这样就确定了第 1 层 HMM 的辨识模型。然后实时同步采集一组观测序列数据,并按照数据来源分为 3 类,即制动踏板数据、加速踏板数据和车速数据,将这些数据作为第 1 层 HMM 的观测序列,运用前向-后向算法获得每个模块 HMM 相对于当前序列产生的可能性,并将产生概率最大的模型作为当前制动驾驶行为。

1.2.2 制动驾驶意图模型

将第 1 层 HMM 的制动驾驶行为辨识结果作为第 2 层 HMM 的输入观测序列,训练出 3 个制动

驾驶意图模型:正常制动驾驶意图、紧急制动驾驶意图和轻微制动驾驶意图。再应用 Baum-Welch 算法辨识模型参数,然后基于前向-后向算法辨识制动驾驶意图模型。

1.3 制动驾驶意图识别结果分析

LHMM 中第 1 层为制动驾驶行为辨识模型,输入观测序列由试验获得。在制动试验过程中采用激光位移传感器、VBOX-VGPS 车速记录仪和踏板压力计采集数据,然后将采集到的制动踏板位移、制动踏板力、加速踏板位移与车速实时同步地传输给多通道数据采集仪。驾驶操作行为数据采集过程见图 3。试验获得的驾驶操作行为数据构成了 HMM 训练数据库。



图3 驾驶操作行为数据采集过程

Fig. 3 Collection process of driving behavior data

1.3.1 制动操作行为门限值的确定

根据试验数据,基于 k -means 算法编写 MATLAB 的 m 程序,确定制动驾驶行为的门限值见图 4、5。紧急制动操作行为、正常制动操作行为和轻微制动操作行为的门限值由制动踏板位移 x_1 、制动踏板位移变化率 v_1 和制动踏板力 F 三者共同表征: $v_1 \geq 39 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 且 $F \geq 40 \text{ N}$ 时为紧急制动操作行为; $18 \text{ N} < F < 40 \text{ N}$, $x_1 > 29 \text{ mm}$ 且 $v_1 < 39 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

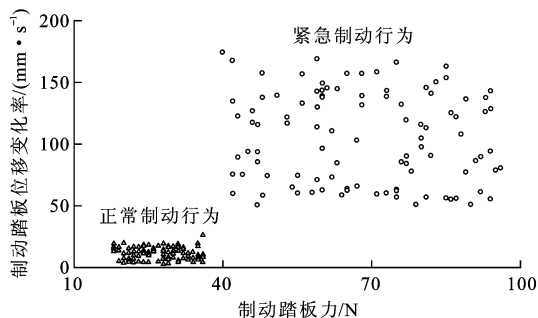


图4 紧急制动操作行为与正常制动操作行为门限值

Fig. 4 Emergency and normal braking operation behavior thresholds

时为正常制动操作行为; $F \leq 18 \text{ N}$ 且 $x_1 \leq 29 \text{ mm}$ 时为轻微制动操作行为。

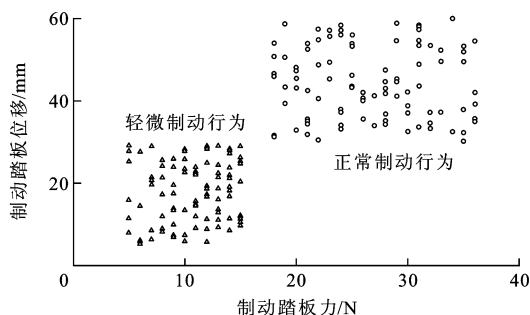


图5 轻微制动操作行为与正常制动操作行为门限值

Fig. 5 Slight and normal braking operation behavior thresholds

1.3.2 双层 HMM 离线训练

运用驾驶操作行为数据,对 HMM 中行为模型和意图模型进行离线训练。训练 HMM 时,首先将 HMM 工具箱加载到 MATLAB 中,运用前向-后向算法编写 MATLAB 的 m 文件程序,训练制动驾驶行为模型和制动驾驶意图模型。

1.3.3 制动驾驶意图模型辨识验证

通过试验采集一系列驾驶行为数据,运用试验数据对已训练的制动驾驶行为模型和制动驾驶意图模型进行辨识,似然度最大的模型就是当前制动驾驶行为 and 制动驾驶意图。将特征值转化为观测值符号后,便可用数字代表辨识得到的驾驶行为。图 6 为驾驶行为辨识结果。图 7 中数字表示辨识出的具有时序性的制动驾驶行为特征符号。加速踏板、制动踏板与车速特征符号化处理分别如下

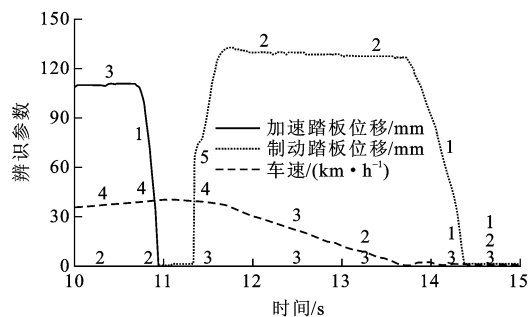


图6 驾驶行为辨识结果

Fig. 6 Recognition result of driving behaviors

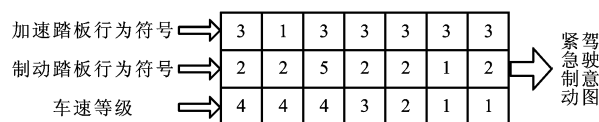


图7 驾驶意图辨识结果

Fig. 7 Recognition result of driving intentions

$$j = \begin{cases} 1 & v_2 < -16 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} & \text{快速松开加速踏板} \\ 2 & -16 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \leq v_2 < -2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} & \text{正常松开加速踏板} \\ 3 & -2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \leq v_2 < 2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} & \text{加速踏板位置保持} \\ 4 & 2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \leq v_2 < 16 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} & \text{正常踩下加速踏板} \\ 5 & v_2 \geq 16 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} & \text{快速踩下加速踏板} \\ 6 & 0 \text{ mm} \leq x_2 \leq 2 \text{ mm} & \text{加速踏板无动作} \end{cases} \quad (1)$$

$$k = \begin{cases} 1 & v_1 \leq -2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} & \text{松开制动踏板} \\ 2 & -2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} < v_1 < 2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} & \text{制动踏板位置保持} \\ 3 & F \leq 18 \text{ N} \text{ 且 } 2 \text{ mm} \leq x_1 \leq 29 \text{ mm} & \text{轻微踩下制动踏板} \\ 4 & 2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \leq v_1 < 39 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}, 18 \text{ N} < F < 40 \text{ N} \text{ 且 } x_1 > 29 \text{ mm} & \text{正常踩下制动踏板} \\ 5 & v_1 \geq 39 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \text{ 且 } F \geq 40 \text{ N} & \text{快速踩下制动踏板} \\ 6 & 0 \text{ mm} \leq x_1 < 2 \text{ mm} & \text{制动踏板无动作} \end{cases} \quad (2)$$

$$c = \begin{cases} 1 & 0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \leq v < 10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \\ 2 & 10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \leq v < 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \\ \vdots & \vdots \\ 10 & 90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \leq v < 100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: j 为加速踏板特征符号化值; k 为制动踏板特征符号化值; c 为车速特征符号化值; v_2 为加速踏板位移变化率; x_2 为加速踏板位移; v 为车速。

由图 6、7 可知, 根据加速踏板行为、制动踏板行为与车速 3 种驾驶行为的一连串连续行为共同辨识出紧急制动驾驶意图。加速踏板连续行为: 加速踏板位置保持→快速松开加速踏板→加速踏板位置保持→加速踏板位置保持→加速踏板位置保持→加速踏板位置保持→加速踏板位置保持; 制动踏板连续行为: 制动踏板位置保持→制动踏板位置保持→快速踩下制动踏板→制动踏板位置保持→制动踏板位置保持→松开制动踏板→制动踏板位置保持; 车速连续行为是车速连续降低直至停车。

2 纯电动客车复合制动控制策略

纯电动客车复合制动力由液压摩擦制动力和电机再生制动力组成。电动汽车的制动安全性和行驶经济性受到液压摩擦制动力与电机再生制动力分配比例的影响。本文根据制动驾驶意图和车速, 以前后轮制动力分配比例、ECE 法规、电机特性、滑移率、蓄电池特性、超级电容特性与传动系统特性为约束条件^[20-21], 对复合制动系统中制动力分配策略进行研究, 使得纯电动客车复合制动系统能够实现在保证制动安全性的前提下最大限度地回收制动能量^[22-23]。

2.1 约束条件

2.1.1 理想前后轮制动力分配比例

防止汽车制动时失去转向、跑偏和侧滑, 应按照

理想制动器制动力分配曲线(即 I 曲线)对前后轴制动力进行分配

$$\begin{cases} \frac{F_1}{F_2} = \frac{L_2 + \varphi h}{L_1 - \varphi h} \\ F_1 + F_2 = \varphi Mg \end{cases} \quad (4)$$

式中: F_1 为前轴制动力; F_2 为后轴制动力; L_1 为质心距前轴的距离; L_2 为质心距后轴的距离; h 为质心高度; φ 为附着系数; M 为汽车总质量; g 为重力加速度。

2.1.2 ECE 法规

联合国欧洲经济委员会制定了 ECER13 制动法规对 M2 类车辆前后轴制动力进行了限制, 以保证制动方向稳定性和制动效率, 具体法规为

$$\begin{cases} 1 - \frac{(z+0.07)(L_1-zh)}{0.85zL} \leq \beta \leq \frac{(z+0.07)(L_2+zh)}{0.85zL} \\ 0.10 \leq z \leq 0.61 \end{cases} \quad (5)$$

$$\beta \geq \frac{L_2 + zh}{L} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{(z-0.08)(L_2+zh)}{zL} \leq \beta \leq \frac{(z+0.08)(L_2+zh)}{zL} \\ 0.15 \leq z \leq 0.30 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} 1 - \frac{(z+0.08)(L_1-zh)}{zL} \leq \beta \leq 1 - \frac{(z-0.08)(L_1-zh)}{zL} \\ 0.15 \leq z \leq 0.30 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \beta \geq 1 - \frac{(z-0.0188)(L_1-zh)}{0.74zL} \\ z \geq 0.30 \end{cases} \quad (9)$$

式中: β 为制动力分配系数; z 为制动强度; L 为轴距。

2.1.3 电机特性

由电机特性可知, 纯电动客车制动时, 电机输出峰值扭矩受到电机最大转矩、最大功率、转速和效率的限制, 如式(10)所示

$$T_m = \begin{cases} 0 & 0 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} < n \leq 500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \\ T_e & 500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} < n \leq n_N \\ \frac{9550P/\eta}{n} & n_N < n \leq n_m \end{cases} \quad (10)$$

式中: T_m 为峰值扭矩; T_e 为最大转矩; P 为最大功率; η 为发电效率; n 为转速; n_N 为额定转速; n_m 为最高转速。

2.1.4 滑移率

当纯电动客车车轮滑移率在 19%~21% 范围内时,制动力系数达到最大^[4],车辆制动方向稳定性和操纵性最好。车轮滑移率是通过调节液压制动系统电液伺服阀实现的,液压制动控制系统逻辑控制规则见表 1。

表 1 逻辑规则

Tab. 1 Logic rules

车速/(km·h ⁻¹)	滑移率	工作状态	电磁阀响应时间/s
$v \geq 15$	$s \geq 0.21$	减压	0.01
	$0.21 > s \geq 0.19$	保压	0.00
	$s < 0.19$	增压	0.02
$v < 15$		增压	0.02

2.1.5 蓄电池和超级电容特性

为了保证储能元件(蓄电池和超级电容)的使用安全性和寿命,应根据 SOC 和温度限制最大充电电流,如式(11)、(12)所示

$$I_1 = \begin{cases} 0 & S > 0.8 \\ 0.5I_2 & 0.5 < S \leq 0.8 \\ I_2 & S \leq 0.5 \end{cases} \quad (11)$$

$$I_3 = \begin{cases} 0 & T > T_p \\ I_1 & T \leq T_p \end{cases} \quad (12)$$

式中: S 为蓄电池和超级电容 SOC 值; I_1 为 SOC 限值下蓄电池和超级电容最大允许充电电流; I_2 为蓄电池和超级电容最大允许充电电流; I_3 为温度限制下蓄电池和超级电容最大允许充电电流; T_p 为蓄电池和超级电容允许最高工作温度; T 为蓄电池和超级电容实时温度。

2.1.6 传动系统特性

纯电动客车制动时,仅驱动轮的制动能量能够传递给电机,实现回收再利用。当变速器处于空档位置时,电机不能实现再生制动功能,应避免低档位下坡时电机超速。

2.2 复合制动控制策略

纯电动客车复合制动控制器结构见图 8。根据辨识获得的制动驾驶意图和实时采集的车速信号,以制动力分配比例、电机特性、滑移率、蓄电池和超

级电容特性、传动系统特性为约束条件,经前后轮制动力分配控制器计算获得整车需求制动力和前后轮制动力分配比例。前轮摩擦制动器提供前轮需求制动力,后轮电液制动力分配控制器分配后轮电液制动力分配比例,以实现电动汽车复合制动系统制动力分配与控制。

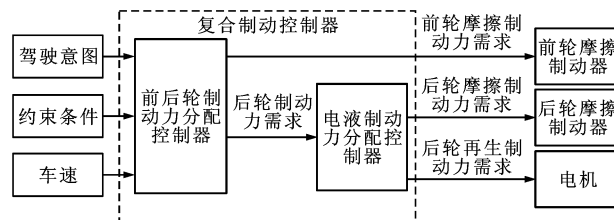


图 8 控制器结构

Fig. 8 Controller structure

控制策略流程见图 9,控制规则为:当复合制动控制器检测到低车速的轻微制动驾驶意图时,制动经济性影响因子远大于安全性影响因子,此时整车制动力由电机再生制动系统独立提供;当复合制动控制器检测到高车速的紧急制动驾驶意图时,制动安全性的影响因子远大于经济性影响因子,此时整车制动力由液压摩擦制动系统提供;其他情况下电液制动系统协调工作,使得复合制动系统在保证制动安全性的前提下最大限度地回收制动能量,即后轮制动力尽量由电机再生制动系统提供,当电机再生制动系统的制动力难以满足制动需求时,剩余的制动力由液压摩擦制动系统补充。

3 纯电动客车复合制动系统建模仿真

3.1 纯电动客车复合制动系统基本结构

纯电动客车复合制动系统结构见图 10,由制动踏板、主控制器、车轮、能源管理系统、功率变换器 IGBT、储能元件、电机及其控制模块、液压系统及其控制模块、复合制动控制模块、传动系统以及一些外围设备(传感器、智能仪表)等组成。电机再生制动系统作用时,电机再生制动力矩通过离合器、变速器、传动轴、主减速器和半轴传至车轮,实现制动减速的目的。同时,汽车行驶动能通过车身经车轮、半轴、主减速器、传动轴、变速器、离合器传至电机,电机将机械能转化为电能,通过功率变换器传输至储能装置(蓄电池和超级电容)加以存储再利用。

图 9 中: T_v 为整车需求制动力矩; T_r 为后轮需求制动力矩; T_f 为前轮制动力矩; T_l 为后轮制动力

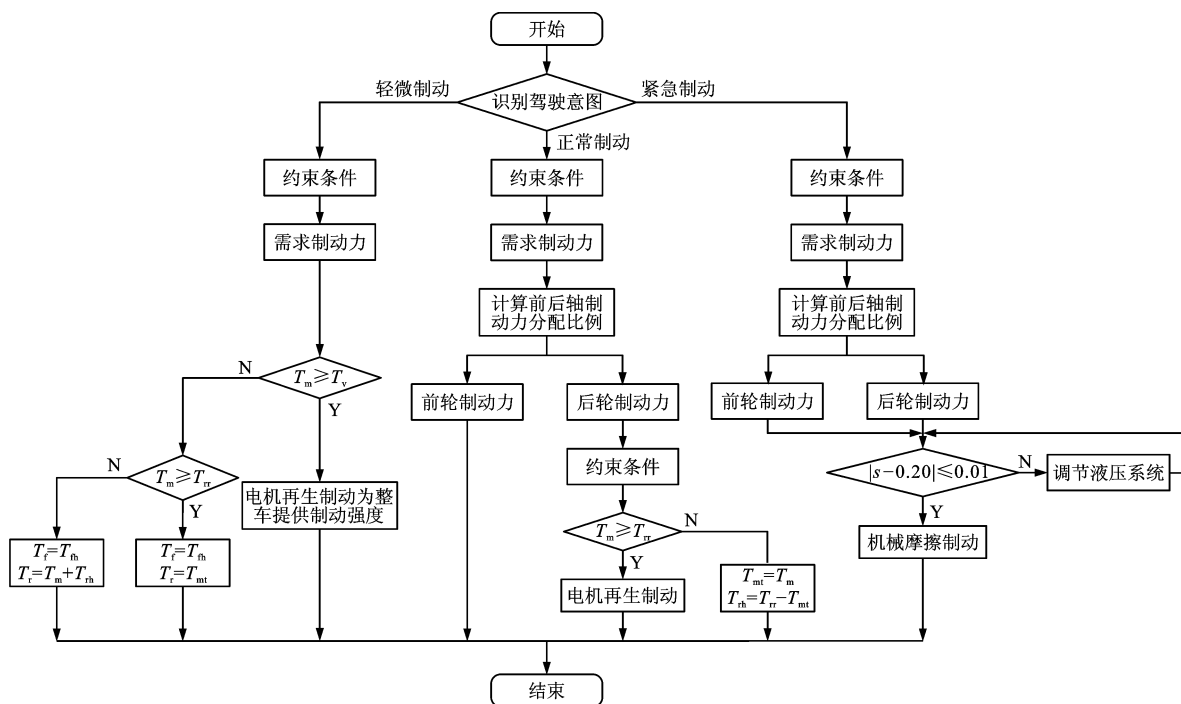


图 9 控制策略流程

Fig. 9 Control strategy process

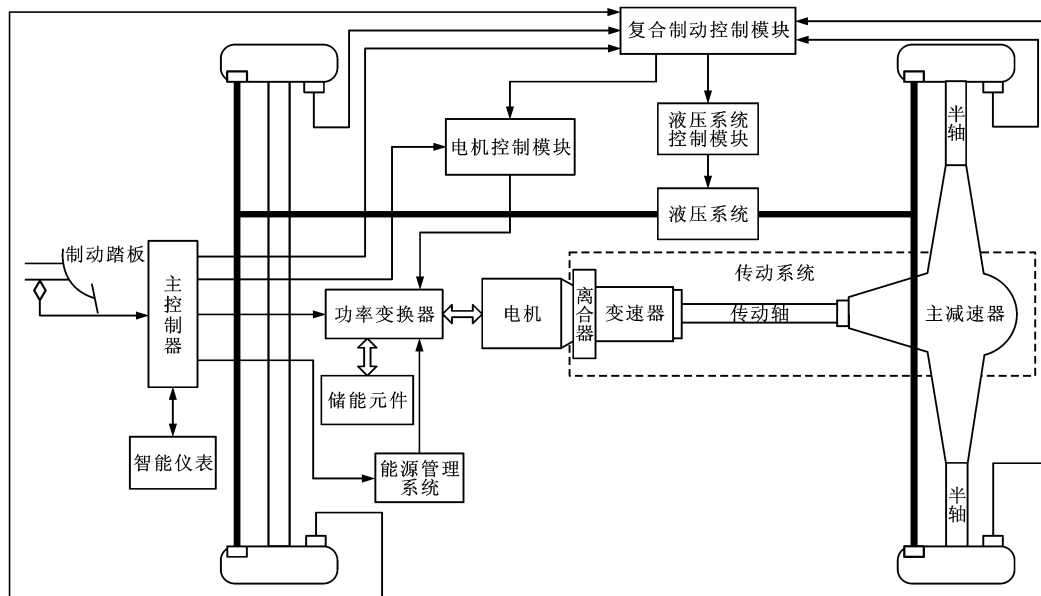


图 10 复合制动系统结构

Fig. 10 Composite braking system structure

矩; T_{fh} 为前轮液压制动力矩; T_{mt} 为电机制动力矩; T_{rh} 为后轮液压制动力矩。

3.2 复合制动系统建模

在 Simulink 环境下对纯电动客车复合制动系统进行建模仿真, 仿真模型见图 11, 由制动驾驶意图辨识模型、液压制动系统模型、整车模型、传动系统模型、电机模型、能源管理系统模型、蓄电池模型、超级电容模型、复合制动系统控制模型等组成。

3.3 仿真结果分析

本文分别在初速度为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的高车速紧急制动、正常制动和轻微制动, 初速度为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的中等车速紧急制动、正常制动和轻微制动, 初速度为 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的低车速紧急制动、正常制动和轻微制动等 9 种工况下对复合制动控制系统进行仿真。在此仅以初速度为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的高车速紧急制动和初速度为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的中等车速轻微制动为例进行

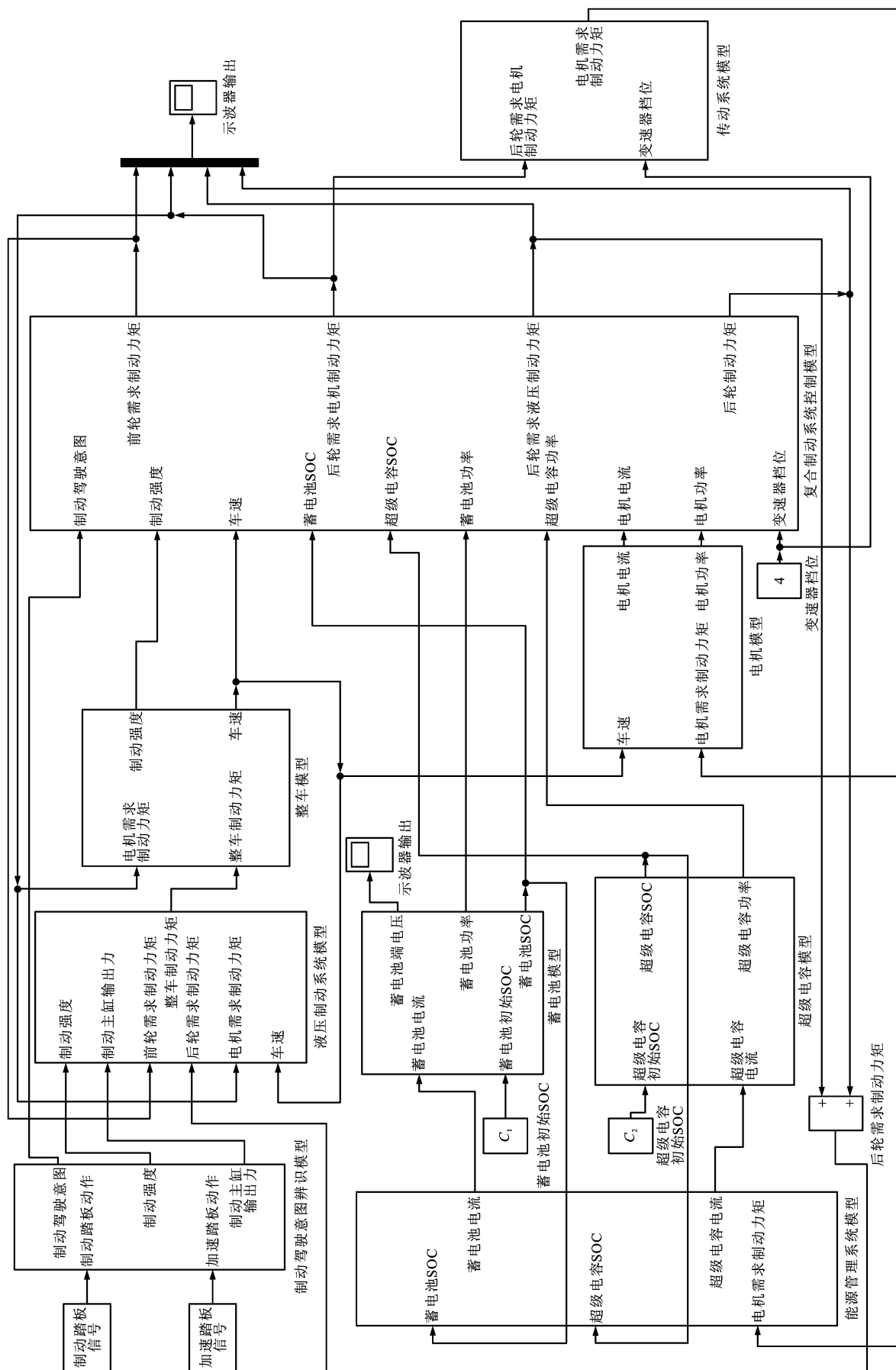


图11 纯电动客车复合制动系统仿真模型

图 11 纯电动公交车的制动系统仿真模型

说明。

3.3.1 高车速紧急制动仿真结果

在高车速紧急制动时,初速度为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 驾驶意图为紧急制动,蓄电池和超级电容 SOC 初始值均为 0.45,仿真获得纯电动客车复合制动系统需求制动力分配曲线、实际制动力分配曲线、制动强度曲线、车速与轮速曲线、蓄电池与超级电容 SOC 曲线分别见图 12~16, t 为制动时间。

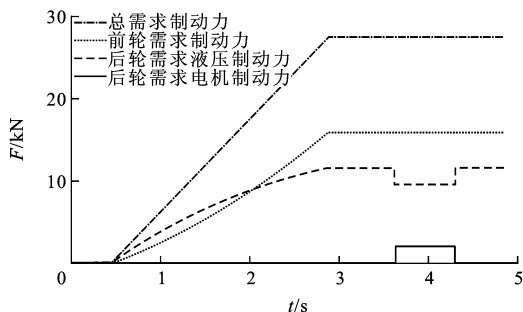


图 12 高速紧急制动时需求制动力分配曲线

Fig. 12 Demanding braking force distribution curves at high-speed emergency brake

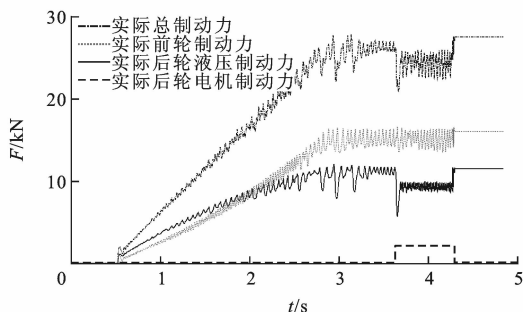


图 13 高速紧急制动时实际制动力分配曲线

Fig. 13 Actual braking force distribution curves at high-speed emergency brake

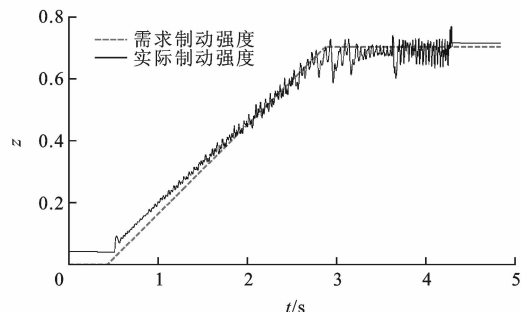


图 14 高速紧急制动时制动强度曲线

Fig. 14 Braking strength curves at high-speed emergency brake

纯电动客车以初速度 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的高车速紧急制动仿真结果表明:在控制策略作用下复合制动系统能够协调稳定地工作,达到整车制动安全性要求。在整个制动过程中,整车制动力主要由摩擦制动

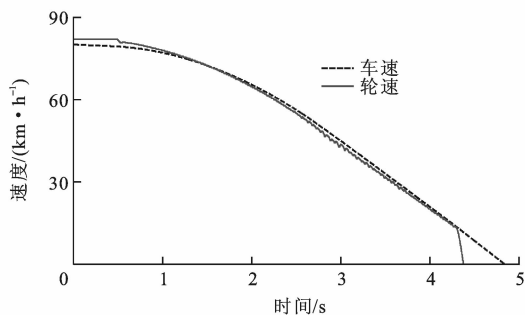


图 15 高速紧急制动时车速与轮速曲线

Fig. 15 Vehicle speed and wheel speed curves at high-speed emergency brake

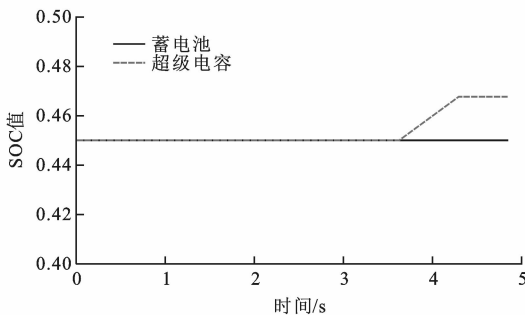


图 16 高速紧急制动时蓄电池与超级电容 SOC 曲线

Fig. 16 SOC curves of battery and super capacitor at high-speed emergency brake

系统提供。电机再生制动系统在车速低于 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时才参与制动,在转速低于 $500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时退出制动。整个制动过程回收能量最少,仅为 $8\,464 \text{ J}$,超级电容 SOC 值从 0.45 增加到 0.47。

3.3.2 中等车速轻微制动仿真结果

在中等车速轻微制动时,初速度为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 驾驶意图为轻微制动,蓄电池和超级电容 SOC 初始值均为 0.45,仿真获得纯电动客车复合制动系统需求制动力分配曲线、实际制动力分配曲线、制动强度曲线、车速与轮速曲线、蓄电池与超级电容 SOC 曲线分别见图 17~21。

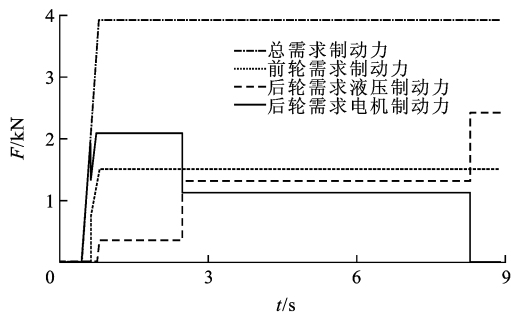


图 17 中等车速轻微制动时需求制动力分配曲线

Fig. 17 Demanding braking force distribution curves at middle-speed slight brake

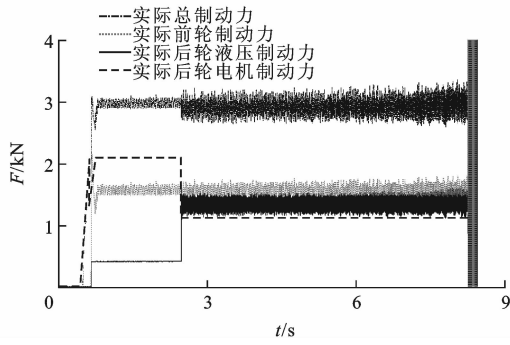


图 18 中等车速轻微制动时实际制动力分配曲线

Fig. 18 Actual braking force distribution curves at middle-speed slight brake

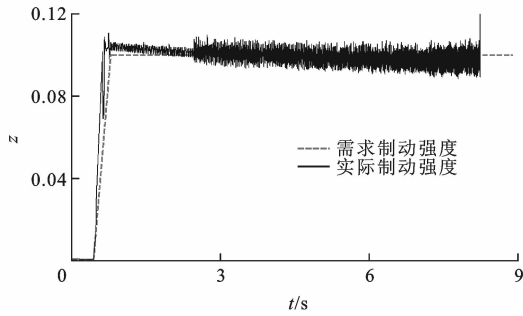


图 19 中等车速轻微制动时制动强度曲线

Fig. 19 Braking strength curves at middle-speed slight brake

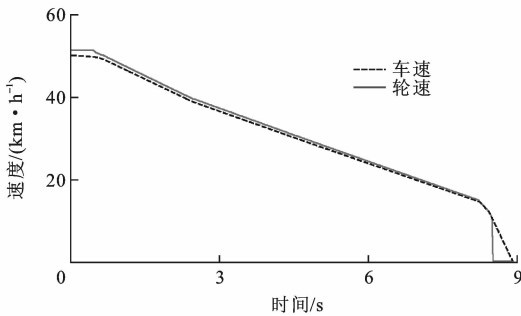


图 20 中等车速轻微制动时车速与轮速曲线

Fig. 20 Vehicle speed and wheel speed curves at middle-speed slight brake

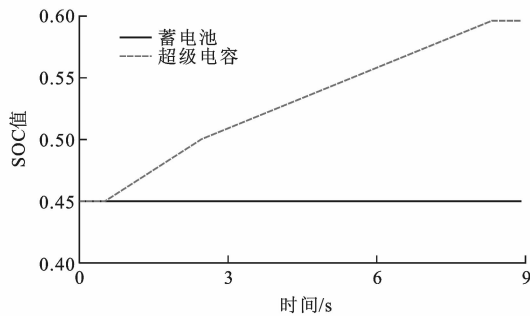


图 21 中等车速轻微制动时蓄电池与超级电容 SOC 曲线

Fig. 21 SOC curves of battery and super capacitor at middle-speed slight brake

纯电动客车以初速度 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的中等车速轻微制动仿真结果表明:在控制策略作用下复合制动系统能够协调稳定地工作,达到制动经济性和安全性的双重要求。电机再生制动力在整个制动过程中所占比例较大。电机再生制动系统在 0.63 s 之前独立提供整车制动力,摩擦制动系统在 0.63 s 之后才参与制动。由于受到超级电容 SOC 值的限制, 2.5 s 时电机再生制动力减小。电机再生制动系统在转速低于 $500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时退出制动。整个制动过程回收能量较多,可达到 $96\,470 \text{ J}$,超级电容 SOC 值从 0.45 增加到 0.60 。

3.4 仿真结果分析

在 9 种工况下,对纯电动客车复合制动控制系统进行了仿真研究,仿真结果见表 2。纯电动客车以初速度为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的高车速紧急制动和正常制动、初速度为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的中等车速紧急制动时,制动安全性要求最高,整车制动力主要由摩擦制动系统提供,电机再生制动系统参与制动很少,因此,能量回收效率较低;轻微制动时,整车需求制动力最小,对制动安全性要求较低,制动经济性要求较高,电机再生制动系统能够为后轮乃至整车独立提供制动力,因此,能量回收效率较高;纯电动客车以初速度为 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的低车速制动时,对制动安全性要求非常低,主要考虑制动经济性,能量回收效率较高,但是整车动能较小,回收能量较少。由试验结果可知,本文基于制动驾驶意图设计的制动力分配控制策略能够在保证制动安全性的前提下最大限度地回收制动能量,其中以初速度为 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的低车速轻微制动能量回收效率最高,可达到 43.84% 。

4 结 语

本文基于制动驾驶意图对纯电动客车复合制动系统制动力分配策略进行研究,首先基于隐形马尔科夫理论建立了第 1 层为制动驾驶行为模型、第 2 层为制动驾驶意图模型的双层隐形马尔科夫模型,基于道路试验数据对模型进行辨识验证。辨识结果表明,基于双层隐形马尔科夫模型对制动驾驶行为和制动驾驶意图辨识的方法,具有时效性强、准确率高的优点。然后基于辨识出的制动驾驶意图和车速,以前后轮制动力分配比例、ECE 法规、电机特性、滑移率、蓄电池和超级电容特性、传动系统特性为约束条件,制定了纯电动客车复合制动系统制动力分配控制策略。最后应用 Simulink 在 9 种工况下对复合制动系统进行建模仿真。仿真结果表明,本文提

表 2 仿真结果
Tab. 2 Simulation result

初速度/ (km · h ⁻¹)	驾驶意图	制动时间/s	制动距离/m	蓄电池/超级 电容 SOC 初值
80	紧急制动	4.8	69.2	0.45/0.45
	正常制动	6.1	81.4	0.45/0.45
	轻微制动	15.3	189.4	0.45/0.45
	驾驶意图	蓄电池 SOC 终值	超级电容 SOC 终值	能量回收 效率/%
	紧急制动	0.45	0.47	0.89
	正常制动	0.45	0.55	12.48
	轻微制动	0.45	0.70	33.78
初速度/ (km · h ⁻¹)	驾驶意图	制动时间/ s	制动距离/ m	蓄电池/超级 电容 SOC 初值
50	紧急制动	3.6	34.6	0.45/0.45
	正常制动	4.1	37.1	0.45/0.45
	轻微制动	8.9	75.1	0.45/0.45
	驾驶意图	蓄电池 SOC 终值	超级电容 SOC 终值	能量回收 效率/%
	紧急制动	0.45	0.47	2.47
	正常制动	0.45	0.52	15.19
	轻微制动	0.45	0.60	36.92
初速度/ (km · h ⁻¹)	驾驶意图	制动时间/ s	制动距离/ m	蓄电池/超级 电容 SOC 初值
30	紧急制动	2.7	16.1	0.45/0.45
	正常制动	2.7	16.2	0.45/0.45
	轻微制动	4.3	24.5	0.45/0.45
	驾驶意图	蓄电池 SOC 终值	超级电容 SOC 终值	能量回收 效率/%
	紧急制动	0.45	0.49	17.64
	正常制动	0.45	0.49	18.78
	轻微制动	0.45	0.52	43.84

出的基于制动驾驶意图辨识的复合制动控制策略在各种工况下,摩擦制动系统和电机再生制动系统能够协调稳定地工作,达到制动安全性和经济性的双重要求,有效提高了电动汽车能量利用率,实现了增加电动汽车续航里程的目的。

参考文献:

References:

- [1] 曹秉刚,张传伟,白志峰,等. 电动汽车技术进展和发展趋势[J]. 西安交通大学学报,2004,38(1):1-5.
CAO Bing-gang, ZHANG Chuan-wei, BAI Zhi-feng, et al. Technology progress and trends of electric vehicles[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(1): 1-5. (in Chinese)

- [2] CHAN C C, WONG Y S. The state of the art of electric vehicles technology[C]//IEEE. The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004: 46-57.
- [3] SCHMIDT M, ISERMANN R, LENZEN B, et al. Potential of regenerative braking using an integrated starter alternator[J]. SAE Paper, 2000-01-1020.
- [4] 彭 栋. 混合动力汽车制动能量回收与 ABS 集成控制研究[D]. 上海:上海交通大学,2007.
PENG Dong. Study on combined control of regenerative braking and anti-lock braking system for hybrid electric vehicle[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [5] ZHANG J Z, CHEN X, ZHANG P J. Integrated control of braking energy regeneration and pneumatic anti-lock braking[J]. Journal of Automobile Engineering, 2010, 224(5): 587-610.
- [6] 张昌利,张亚军,闫茂德,等. 双能量源纯电动汽车再生制动模糊控制与仿真[J]. 系统仿真学报,2011,23(2):233-238.
ZHANG Chang-li, ZHANG Ya-jun, YAN Mao-de, et al. Fuzzy control modeling and simulation of regenerative braking system for pure electric vehicle with dual-source energy storage system[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(2): 233-238. (in Chinese)
- [7] WALKER A M, LAMPERTH M U, WILKINS S. On friction braking demand with regenerative braking[J]. SAE Paper, 2002-01-2581.
- [8] 周 磊,罗禹贡,李富强,等. 电动汽车回馈制动与防抱死制动集成控制[J]. 清华大学学报:自然科学版,2009,49(5):728-732.
ZHOU Lei, LUO Yu-gong, LI Ke-qiang, et al. Braking control of electric vehicles while coordinating regenerative and anti-lock brakes[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 49(5): 728-732. (in Chinese)
- [9] KO J, KIM J, LEE G, et al. Development of a co-operative control algorithm during regenerative braking for a fuel cell electric vehicle[C]//IEEE. The 7th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Chicago: IEEE, 2011: 7-13.
- [10] 张元才,余卓平,徐 乐,等. 基于制动意图的电动汽车复合制动系统制动力分配策略研究[J]. 汽车工程,2009,31(3):244-249.
ZHANG Yuan-cai, YU Zhuo-ping, XU Le, et al. A study on the strategy of braking force distribution for the hybrid braking system in electric vehicles based on braking intention [J]. Automotive Engineering, 2009, 31(3): 244-249. (in Chinese)
- [11] 马其贞. 基于制动意图识别的制动能量回收控制算法研究[D]. 长春:吉林大学,2013.
MA Qi-zhen. Study on regenerative brake control algorithm based on braking intention identification[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [12] 孙 璐,郁 烨,顾文钧. 基于 PCA 和 HMM 的汽车保有量预测方法[J]. 交通运输工程学报,2013,13(2):92-98.
SUN Lu, YU Ye, GU Wen-jun. Car ownership prediction method based on principal component analysis and hidden-Markov model [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(2): 92-98. (in Chinese)

- [13] 曹 源,马连川,李 旺.铁道信号系统安全计算机状态监测方法[J].交通运输工程学报,2013,13(3):107-112.
CAO Yuan, MA Lian-chuan, LI Wang. Monitoring method of safety computer condition for railway signal system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(3): 107-112. (in Chinese)
- [14] 杨 琦,杨云峰,冯忠祥,等.基于灰度理论和马尔科夫模型的城市公交客运量预测方法[J].中国公路学报,2013,26(6):169-175.
YANG Qi, YANG Yun-feng, FENG Zhong-xiang, et al. Prediction method for passenger volume of city public transit based on grey theory and Markov model[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(6): 169-175. (in Chinese)
- [15] 张良力.面向安全预警的机动车驾驶意图识别方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2011.
ZHANG Liang-li. Research on motorist's intention recognition for traffic safety precaution[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [16] 王 臻.基于分层隐马尔科夫模型的聚众事件实时检测[D].桂林:桂林电子科技大学,2010.
WANG Zhen. Real time gathering event detection based on layered hidden Markov model[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2010. (in Chinese)
- [17] SATHYANARAYANA A, BOYRAZ P, HANSEN J H L. Driver behavior analysis and route recognition by hidden Markov models[C]//IEEE. 2008 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. Columbus: IEEE, 2008: 276-281.
- [18] ZONG Chang-fu, WANG Chang, YANG De-jun, et al. Driving intention identification and maneuvering behavior prediction of drivers on cornering[C]//IEEE. 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Changchun: IEEE, 2009: 4055-4060.
- [19] 宗长富,王 畅,何 磊,等.基于双层隐式马尔科夫模型的驾驶意图辨识[J].汽车工程,2011,33(8):701-706.
ZONG Chang-fu, WANG Chang, HE Lei, et al. Driving intention recognition based on double-layer HMM[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(8): 701-706. (in Chinese)
- [20] 尹安东,赵 韩,张炳力.微型电动轿车制动能量回收及控制策略的研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2008,31(11):1760-1763,1777.
YIN An-dong, ZHAO Han, ZHANG Bing-li. Study on regenerative braking and control strategy for electric vehicles[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2008, 31(11): 1760-1763, 1777. (in Chinese)
- [21] ZHOU Yu-cai, CHEN Shi-an, WANG Jun-cheng. Two-acceleration-error-input proportional-integral-derivative control for vehicle active suspension [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(3): 228-234.
- [22] 赵 轩.纯电动客车动力总成控制策略研究[D].西安:长安大学,2012.
ZHAO Xuan. Study on control strategy for powertrain of pure electric bus[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [23] YAO Zuo, WEI Heng, PERUGU H, et al. Sensitivity analysis of project level MOVES running emission rates for light and heavy duty vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(2): 81-96.