

基于制动意图识别的后驱电动客车复合制动控制策略研究

苏亮^{1,2}, 石金明², 韩勇^{2,3}

- 厦门金龙联合汽车工业有限公司工程研究院, 福建, 厦门 361023;
- 厦门理工学院机械与汽车工程学院, 福建, 厦门 361024;
- 福建省客车先进设计与制造重点实验室, 福建, 厦门 361024)

摘要: 为延长电动客车续航里程, 提出一种基于意图识别的后驱电动客车制动力分配控制策略。采集分析了400组实车制动数据, 通过制动踏板开度及开度变化率来计算整车前、后轴制动力。考虑蓄电池约束及后轴电机再生制动约束, 制定制动控制策略, 并通过Simulink和TruckSim联合仿真验证控制策略的有效性。结果表明, 基于意图识别的复合制动控制策略对驾驶员制动意图识别准确率达95.7%。在中国典型城市循环工况下, 与无能量回收控制策略相比, 带有模糊神经网络回收控制策略、模糊控制回收策略及传统回收控制策略终值荷电状态分别提高了2.69%、2.09%和1.83%。

关键词: 制动意图识别; 模糊神经网络; 后驱客车; EMB; 能量回收

中图分类号: U461.3 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2025.02.10

Research on Composite Braking Control Strategy for Rear-Drive Electric Buses Based on Braking Intent Recognition

SU Liang^{1,2}, SHI Jinming², HAN Yong^{2,3}

- Xiamen Kinglong United Automobile Industry Co., Ltd., Xiamen 361023, Fujian, China;
- School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, Fujian, China;
- Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing of Buses, Xiamen 361024, Fujian, China)

Abstract: To extend the range of rear-drive electric buses, a brake force distribution control strategy based on intention recognition is proposed. Firstly, 400 sets of real-vehicle braking data were collected and analyzed. The brake pedal opening and its rate of change were used to calculate the braking force applied to the front and rear axles. Considering the battery constraints and the regenerative braking constraints of the rear axle motor, the braking control strategy is formulated and validated using Simulink-Trucksim joint simulation. The results show that the composite braking control strategy based on intention recognition achieves an accuracy of 95.7% in detecting the driver's braking intention. Under typical urban driving cycle in China, the fuzzy neural network-based energy recovery strategy, the fuzzy control recovery strategy, and the conventional recovery strategy

收稿日期: 2023-12-05 改稿日期: 2024-04-14 网络首发日期: 2024-06-14

基金项目: 福建省技术创新重点攻关及产业化项目(2022G043; 2023G048)

参考文献引用格式:

苏亮, 石金明, 韩勇. 基于制动意图识别的后驱电动客车复合制动控制策略研究[J]. 汽车工程学报, 2025, 15(2): 224-234.

SU Liang, SHI Jinming, HAN Yong. Research on Composite Braking Control Strategy for Rear-Drive Electric Buses Based on Braking Intent Recognition[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2025, 15(2): 224-234. (in Chinese)



increased the final state of charge (SOC) by 2.69%, 2.09% and 1.83%, respectively, compared with the non-recovery control strategy.

Keywords: braking intent recognition; fuzzy neural network; rear-drive bus; EMB; energy recovery

近年来, 电动汽车的普及率不断增长, 但续航里程不足的问题逐渐显现。研究表明, 在典型城市循环工况中, 电动客车制动所消耗的能量约为驱动所消耗能量的50%^[1], 回收这一部分制动能量可以提高车辆能量利用率, 进而增加续航里程^[2]。

电动客车制动系统由电机制动和机械制动两部分组成, 整体控制难度比传统制动系统大, 准确识别驾驶员的制动意图有益于制动控制策略的设计^[3], 可为电制动和摩擦制动的复合制动奠定基础^[4]。在车辆电动化、智能化背景下, 驾驶员制动意图识别控制已成为研究热点^[5-7]。马建等^[8]为了实现单轴驱动电动汽车能量回收最大化, 在保证满足ECE (Economic Commission of Europe) 法规和安全性的前提下, 将尽可能多的制动力分配到驱动轴, 但其研究对象为前驱电动轿车, 是否适用于后驱电动客车尚不清晰。ZHANG Junzhi等^[9]、张抗抗等^[10]针对后驱电动客车, 提出不同制动强度下的转矩分配方法, 丰富了后驱电动客车能量回收的制动控制, 但分配方法难以适用于解耦的线控系统车辆。XU Shiwei等^[11]对驾驶员操作制动踏板行为意图分为轻度、中度及紧急3个等级, 为车辆不同强度制动力分配奠定基础。XU Wei等^[12]以平均角速度作为意图识别输入参数, 研究了基于模糊控制的制动意图, 能量回收比其他控制策略多达10%, 但模糊控制依赖专家经验, 不具备自适应推断能力。LIAN Renzong等^[13]提出了基于隐马尔可夫理论的双层制动驾驶意图识别, 丰富制动意图辨识器的推断能力, 但无法很好地捕捉驾驶员制动操作这种长期依赖关系。ZHAO Xuan等^[14]选取LQV神经模糊系统的方法建立制动意图识别, 并在此基础上建立了机电复合制动控制策略。刘晏宇等^[15]通过对比分析模糊推理规则和神经网络两

种制动意图识别方法, 得出神经网络方法较准确。上述学者对驾驶员制动意图和制动能量回收进行了大量研究, 但多数针对前驱电动轿车且意图识别多依赖专家经验, 不具备自适应和自学习能力, 相应的控制策略也不适用于解耦式后驱电动客车。

本文以一款正在设计的后驱电动客车为研究对象, 首先通过分析大量实车制动数据, 选取模糊神经网络制动意图的方法进行制动强度识别, 再对比分析模糊神经网络回收策略、模糊控制回收策略、传统回收控制策略及无能量回收控制策略, 最后在Matlab/Simulink和TruckSim中联合仿真验证了所提控制策略的有效性。

1 研究方法

1.1 数据采集

为保证实车道路测试数据的可靠性, 试验在晴天或阴天, 风速不大于5 m/s的条件下进行, 在整个试验过程中尽可能保持初始制动速度、空气阻力等因素一致, 以此来采集不同制动强度下驾驶员制动踏板开度及开度变化率。通过将试验车行驶至平坦、硬实、干燥且轮胎与路面间的附着系数不小于0.7的沥青路面上, 在满足GB 21670—2008《乘用车制动系统技术要求及试验方法》等要求下, 从0开始加速, 当速度达到40 km/h时, 驾驶员进行切换踏板操作进行制动, 同时, 为尽可能减小热衰退带来的影响, 每间隔0.5 h做20组。

采用CAN卡连接车辆OBD口和上位机, 读取行驶过程中的车辆参数, 本文只读取与制动强度相关的参数, 如车速、制动减速度、制动踏板开度等, 采样频率为2 500 Hz。实车及上位机如图1所示。

通过实车道路试验的方法获取了小强度制动、中强度制动、大强度制动、紧急制动的试验结果各

100组, 进行统计分析, 表1为不同制动踏板开度和开度变化率下, 不同制动意图发生的频数统计结果。小强度制动下频数大小依次为S/S、S/M、M/S、S/B或M/M、S/E; 中强度制动下频数大小依次为M/M、M/B、M/E、B/S、S/B、S/E; 大强度制动下频数大小依次为B/M、B/E、B/B、B/S、M/E、E/S; 紧急制动下频数大小依次为E/B、B/E、B/B、E/E、E/M、E/S。其中, S、M、B、E分别代表制动踏板开度及开度变化率小、中、大、紧急的模糊子集。



图1 实车及上位机

表1 制动意图频数统计表

踏板开度/ 开度变化率	制动意图			
	S	M	B	E
S/S	48	0	0	0
S/M	39	0	0	0
S/B	2	5	0	0
S/E	1	4	0	0
M/S	8	1	0	0
M/M	2	35	0	0
M/B	0	28	0	0
M/E	0	19	9	0
B/S	0	8	11	0
B/M	0	0	42	0
B/B	0	0	14	17
B/E	0	0	17	21
E/S	0	0	7	3
E/M	0	0	0	13
E/B	0	0	0	31
E/E	0	0	0	15

1.2 制动意图识别

参考袁师召等^[4, 16]的分类方法, 本文对400组电动客车制动工况数据进行分析, 结合制动紧急程度将驾驶员制动意图分为小强度制动(保持一定车速并持续轻踩踏板的轻微制动操作)、中强度制动(遇异常状况采取的制动操作, 实现车辆减速或停车)、大强度制动(面临潜在行车危险时, 迅速减速或停车)、紧急制动(突发状况下采取的紧急制动)4种。

制动意图是驾驶员思维的体现, 无法用具体事物描述, 而通过控制模糊神经网络输入输出参数、模糊规则、隶属度函数可以更好地模拟驾驶员操纵踏板行为^[17]。

选用具有良好逼近非线性系统特征的Sugeno模糊神经网络模型来描述复杂系统的动态特性^[18], 设计自适应模糊神经网络识别器来进行驾驶员制动意图识别。网络由5层构成, 如图2所示, 前4层为前件网络, 构成匹配模糊规则, 最后一层为后件网络, 产生模糊规则。

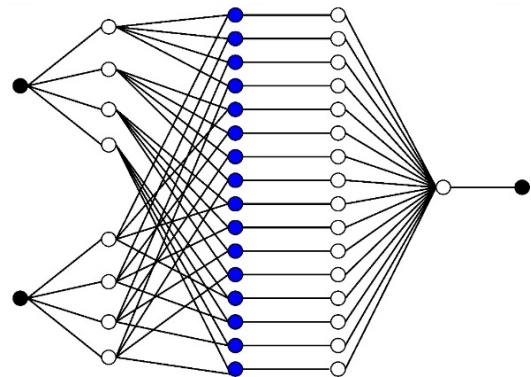


图2 神经网络结构

第1层: 网络输入层, 即制动踏板开度、开度变化率, 输入节点由两个神经元组成, 是线性的, 将如下的网络输入信号传到下一层:

$$x = [x_1, x_2]^T. \quad (1)$$

第2层: 网络隐含层, 计算输入变量在语言变量值的模糊集里对应隶属度函数:

$$u_i^j = u_A(x_i), \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

式中: n 为输入量维度数2; m 为输入量的模糊分割数4。

因此，隶属度函数为：

$$u_i^j = \exp\left[\frac{-(x_i - C_{i,j})^2}{\sigma_{i,j}^2}\right] \quad (3)$$

式中： $\sigma_{i,j}$ 为隶属度函数宽度； $C_{i,j}$ 为隶属度函数中心。

第 3 层：模糊规则制定层，节点与模糊规则一一对应，计算得出各规则的适应度，即：

$$\sigma_j = \min(u_{j_1}^1, u_{j_2}^2) \quad (4)$$

式中： $i_1 \in \{1, 2 \dots m_1\}$ ； $i_2 \in \{1, 2 \dots m_2\}$ 。

第 4 层：归一化层，本层节点数和前一层相同。

$$\bar{a} = a_i / \sum_{i=1}^m a_i \quad (j = 1, 2 \dots m) \quad (5)$$

第 5 层：解模糊层，即模糊神经网络的清晰化，也称作后件网络层，计算每一条规则后件作用，即：

$$v_j = p_{j0} + p_{j1}x_1 + \dots + p_{j,n}x_n = \sum_{k=0}^n p_{j,k}x_k \quad (6)$$

式中： $j = 1, 2, \dots, m$ 。

常见的隶属度函数图形分布主要有梯形、三角形、正态型、钟形等。为兼顾控制性能和计算效率，采用梯形和三角形的隶属度函数分布。制动踏板开度和开度变化率的隶属度函数分布曲线分别如图 3a、b 所示。

1.3 EMB 系统模型

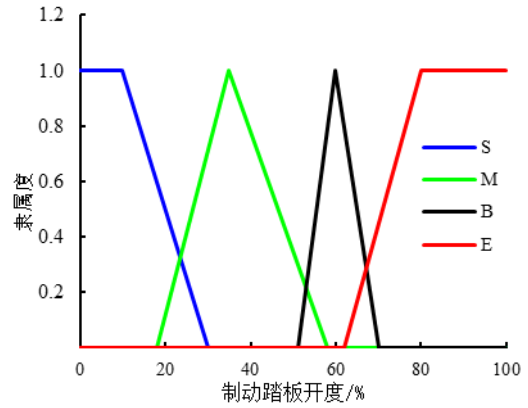
EMB 系统主要由驱动电机、传动机构及制动盘 3 部分组成。踏板位移传感器通过将踩制动踏板信号传送给电子控制单元 (Electronic Control Unit, ECU)，ECU 结合其他传感器信号计算需求制动力大小，将其传给传动机构来推动制动衬块压紧制动盘实现制动。选用永磁直流电机，可得动态方程为：

$$U = L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a I_a + E \quad (7)$$

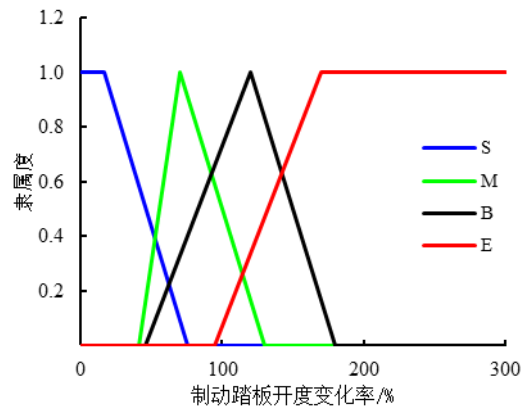
$$J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_c - T_f - T_L \quad (8)$$

$$T_c = K_t I_a \quad (9)$$

式中： J_m 为电机转子和负载等效到电机轴上的转动惯量； T_c 为电机电磁转矩； T_f 为电机摩擦转矩； T_L 为电机负载转矩； L_a 为电枢电感； I_a 为电枢电流； R_a 为电枢电阻； E 为反电动势， $E = K_e \frac{d\theta_m}{dt} = K_e \omega_m$ ，



(a) 制动踏板开度隶属度函数分布曲线



(b) 制动踏板开度变化率隶属度函数分布曲线

图 3 隶属度函数

其中， K_e 为电机反电动势系数， ω_m 为电机转动角速度； θ_m 为电机转角； K_t 为电机力矩系数。

传动机构模型中滚珠丝杠转角 θ_n 及丝杠螺母位移 x 分别为：

$$\theta_n = \frac{\theta_m}{i} \quad (10)$$

$$x = \frac{L\theta_n}{2\pi} \quad (11)$$

式中： θ_m 为电机转角； i 为行星齿轮减速器传动比； L 为丝杠的螺纹导程。

制动盘模型中所受夹紧力 F 与 x 的关系为：

$$F = K_f x^3 \quad (12)$$

式中： K_f 为夹紧力系数。

1.4 前、后轴控制策略

基于电子机械制动 (Electro-Mechanical Brake, EMB) 的双轴后驱电动客车复合制动系统如图 4 所示。主要包括 42 V 车载电源、电子机械制动踏板、

传感器、驱动电机、控制器（包括电子控制单元 ECU、驱动控制器 EMB-ECU）和 CAN 通信总线六大部分^[19-20]。取消了传统的液压制动与气压制动，利用 EMB 系统实现了制动踏板和制动力的完全解耦，在制动法规、电机、电池约束下分配前、后轴制动力，使单轮的 EMB 制动和后轴电机制动独立可控，进而达到不同制动强度下的制动力需求。

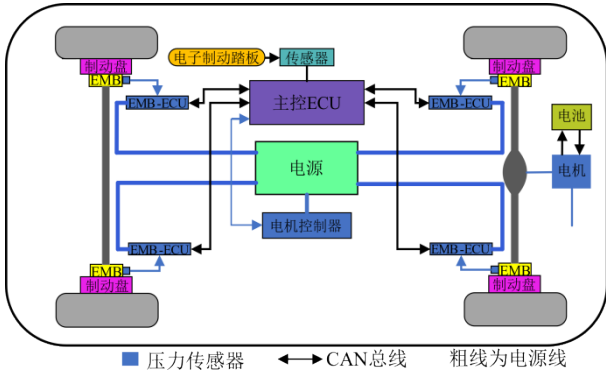


图4 复合制动系统结构简图

前、后轴制动力分配按理想制动力分配曲线（I 曲线）进行分配，可以保证前后车轮在任何附着系数路面上同时抱死，也可以在保证安全的前提下将更多制动力分配至后轴^[21]，如式（13）所示。

$$\begin{cases} F_{br} = \frac{1}{2} \left[\frac{G}{h_g} \sqrt{b^2 + \frac{4F_{br} h_g (a+b)}{G}} - \left(\frac{Gb}{h_g} + 2F_{br} \right) \right], \\ F_{bf} = zG - F_{br}. \end{cases} \quad (13)$$

式中： G 为车辆重力； F_{br} 、 F_{bf} 为后驱客车前、后轴制动力； a 为质心到前轴的距离； b 为质心到后轴的距离； z 为制动强度； h_g 为客车质心高度。

ECE R13 制动法规和 GB 12676 均对双轴汽车前后轮制动系统提出了明确的要求。当制动强度 z 在 0.2~0.8 之间时，应满足^[22]：

$$z \geq 0.1 + 0.85(\varphi - 0.2). \quad (14)$$

并且利用附着系数总是等于制动强度，以此来保证较高的附着利用率。基于以上法规，对本文后驱电动客车而言，ECE 下边界线为：

$$\begin{cases} F_{br} = \frac{G(z + 0.75)(b + zh_g)}{0.85(a + b)}, \\ F_{bf} = zG - F_{br}. \end{cases} \quad (15)$$

对于后驱电动客车而言，制动能量回收过程同

时受到电机和电池的影响，因此需要考虑电机、电池对制动能量回收的约束。电机在不同转速下能提供的最大制动力矩关系为：

$$T_{m_max} = \begin{cases} \frac{9550i_0\eta_t P_{m_max}}{n} & n > n_d, \\ T_{max}i_0\eta_t & n \leq n_d. \end{cases} \quad (16)$$

式中： T_{m_max} 为电机的最大制动力矩； P_{m_max} 为电机的峰值功率； T_{max} 为电机峰值扭矩； n 为电机转速； n_d 为电机基速； i_0 为主减速器传动比； η_t 为机械传动效率。

制动能量回收过程中，不同转速下电池对电机能提供最大制动力矩的约束关系为：

$$T_{b_max} = \begin{cases} \frac{9550i_0\eta_t P_{b_max}}{\eta_b n_b} & n \leq n_b, \\ \frac{9550i_0\eta_t P_{b_max}}{\eta_b n} & n > n_b. \end{cases} \quad (17)$$

式中： T_{b_max} 为电池最大充电功率下电机最大制动力矩； P_{b_max} 为电池最大充电功率； η_b 为充电效率。

为保证电机使用寿命和电池安全，电机所能提供的最大制动力矩应为 T_{m_max} 和 T_{b_max} 中的较小者，即：

$$T_{e_max} = \min(T_{m_max}, T_{b_max}). \quad (18)$$

本文运用式（19）进行电池 SOC 估算，暂不考虑温度对电池性能的影响，安时积分法计算式为：

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{3600C_{bat}} \int_0^t I_{bat} dt. \quad (19)$$

式中： SOC_0 为动力电池初始值； C_{bat} 为电池电容； I_{bat} 为电池电流。

1.5 复合制动控制策略

考虑到城市客车实际制动力按照 I 曲线分配存在超过其上方而导致后轮抱死发生侧滑的危险^[23]，因此，本文实际前、后轴制动力分配曲线略小于 I 曲线，差值主要由常用工况制动力幅度决定，如图 5 所示。确保在制动安全的前提下，分配更多的制动力到后轴进行能量回收，延长电动客车续航里程。

当制动意图识别结果为小强度制动，即 $z \leq 0.1$ 时，总需求制动力仅由后轴电机提供，此时前、后轴制动力分配关系如式（20）所示。

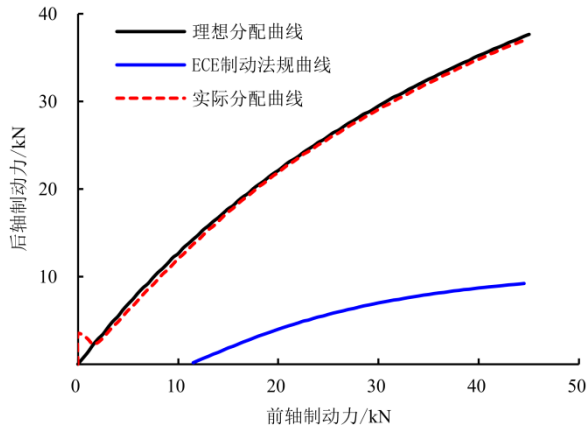


图 5 制动控制策略

$$\begin{cases} F = F_{br} , \\ F_{bf} = 0 , \\ F_{br} = F_{mot} \circ \end{cases} \quad (20)$$

当制动意图识别为中强度制动，即制动强度 $0.1 < z \leq 0.3$ 时，前轴 EMB 摩擦制动开始介入，后轴由电机提供需求制动力并进行能量回收。前、后轴制动力分配关系如式 (21) 所示。

$$\begin{cases} F = F_{bf} + F_{br} , \\ F_{bf} = F_{fEMB} , \\ F_{br} = F_{mot} \circ \end{cases} \quad (21)$$

当制动意图识别为大强度制动，即制动强度 $0.3 < z \leq 0.7$ 时，此时需求制动力比较大，后轴需求制动力由电机最大制动力和 EMB 制动力共同提供，前轴制动力由 EMB 提供。前、后轴制动力分配关系如式 (22) 所示。

$$\begin{cases} F = F_{bf} + F_{br} , \\ F_{bf} = F_{fEMB} , \\ F_{br} = F_{mot_max} + F_{rEMB} \circ \end{cases} \quad (22)$$

当制动意图识别为紧急制动，即制动强度 $z > 0.7$ 时，此时需求制动力较大且紧急，而由电机提供的制动力有限。为了安全考虑，紧急情况下退出电机制动，四轮制动力均由 EMB 提供。前、后轴制动力分配关系如式 (23) 所示。

$$\begin{cases} F = F_{bf} + F_{br} , \\ F_{bf} = F_{fEMB} , \\ F_{br} = F_{rEMB} \circ \end{cases} \quad (23)$$

式中： F 为制动意图识别后的总需求制动力； F_{bf} 为前轴所需制动力； F_{br} 为后轴所需制动力； F_{fEMB} 为前轴 EMB 制动力； F_{rEMB} 为后轴 EMB 制动力； F_{mot}

为电机所能提供的制动力； F_{mot_max} 为电机所能提供的最大制动力。

制动控制策略如图 6 所示。当收到驾驶员对制动踏板进行操作的信息后，模糊神经网络制动意图识别模块识别出制动强度，即需求制动减速度。再根据制动强度、电池 SOC 值及速度判断是否进行能量回收。若符合，在制动强度、电机、电池等约束下根据式 (20)~(23) 进行前、后轴制动力分配。若不符合，前、后轴制动力将按照式 (23) 进行分配。

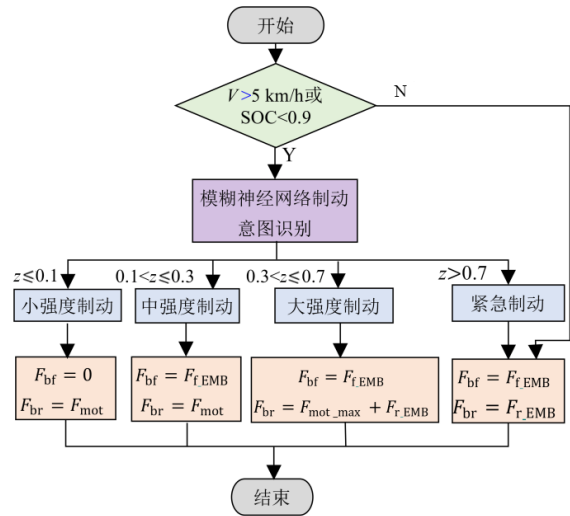


图 6 制动控制策略

2 结果

2.1 制动意图识别结果

为使模糊推理规则能更准确地反映电动车实际制动情况，结合表 1 频数统计表，根据发生概率最大化原则对不同模糊规则发生概率进行统计，制动意图概率统计结果见表 2。小强度制动主要对应 S/S、S/M、M/S 三种情况，中强度制动主要对应 S/B、S/E、M/M、M/B、M/E 五种情况，大强度制动主要对应 B/S、B/M、E/S 三种情况，紧急制动主要对应 B/B、B/E、E/M、E/B、E/E 五种情况。

表 3 为基于实车道路制动试验数据发生概率最大化原则确定的城市电动车制动模糊推理规则。由表 3 可知，随着制动踏板开度和开度变化率的增大，制动意图等级也在变大，符合实际情况。

图 7 为不同模糊规则下的制动意图识别等级，

表 2 制动意图概率统计表

踏板开度/ 开度变化率	制动意图			
	S	M	B	E
S/S	100%	0	0	0
S/M	100%	0	0	0
S/B	28.58%	71.42%	0	0
S/E	20.00%	80.00%	0	0
M/S	88.89%	11.11%	0	0
M/M	5.41%	94.59%	0	0
M/B	0	100%	0	0
M/E	0	67.86%	32.14%	0
B/S	0	42.11%	57.89%	0
B/M	0	0	100%	0
B/B	0	0	45.16%	54.84%
B/E	0	0	44.74%	55.26%
E/S	0	0	70.00%	30.00%
E/M	0	0	0	100%
E/B	0	0	0	100%
E/E	0	0	0	100%

表 3 模糊推理规则

制动踏板 开度	制动踏板开度变化率			
	S	M	B	E
S	小	小	中	中
M	小	中	中	中
B	大	大	紧急	紧急
E	大	紧急	紧急	紧急

可知在小强度、中强度、大强度、紧急制动情况下，实际值与期望值之间误差较小，均能识别出 16 种规则下的制动意图等级。因此，经过训练后的自适应模糊神经网络能较准确地反映制动踏板开度、开度变化率与制动强度之间的对应关系。

综合考虑训练样本数量及训练次数对自适应模糊神经网络的影响^[24]，本文选择了 47 组典型制动试验数据作为训练集，设定训练次数为 1 500 次，最后再通过实车试验选取 47 组能反映小、中、大、紧急 4 种典型制动的实车数据来验证制动意图效果。结果表明，除 2 组数据外，其余均能被制动意图正确识别，准确率达 95.7%。

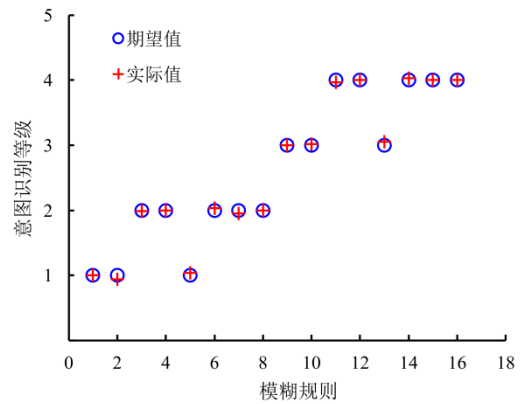


图 7 制动意图等级识别

2.2 联合仿真结果

为验证本文提出的后驱电动客车制动意图识别的可靠性和制动控制策略的可行性。在 Matlab/Simulink 中搭建了驾驶员 PI 控制模型、模糊神经网络制动意图识别模型、前后轴制动力分配模型、电机电池约束再生制动模型、复合制动模型及 EMB 模型（驱动电机模型、减速增距模型、运动转换模型、制动盘模型）等。在 TruckSim 软件中建立后驱客车整车模型进行联合仿真，逻辑框架如图 8 所示。首先，驾驶员将依据期望车速和实际车速之间的差值对踏板进行相应操作；其次，制动意图识别模块结合制动踏板开度及开度变化率计算需求制动强度 z ；最后，在需求制动强度下综合考虑电机电池特性后对电机制动力 F_{mot} 和 EMB 制动力 F_{EMB} 进行分配。

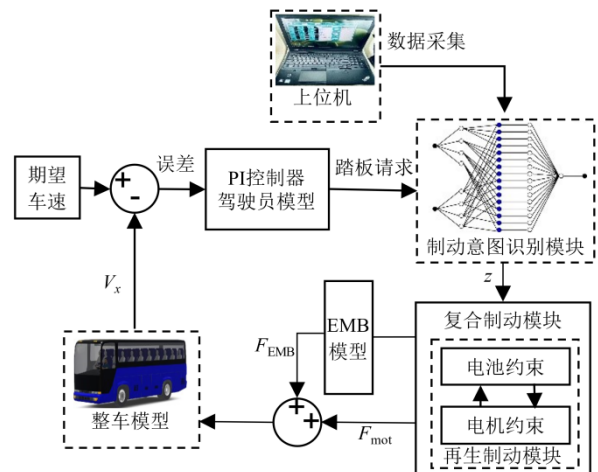


图 8 制动控制策略联合仿真逻辑图

本文研究的电动客车主要在城市工况中运行，为更接近车辆运行的实际情况，选取中国典型城市公交工况进行联合仿真，简称 CCBC 工况^[25]。CCBC 工况循环时间为 1 314 s，最高车速 60 km/h，平均车速 15.9 km/h，整个工况包括 19 次制动工况和 14 次停车工况。设定电池初始 SOC 值为 80%，路面附着系数设为 0.8。通过仿真对比有无带模糊神经网络制动意图识别的复合制动控制策略，验证了基于模糊神经网络制动意图识别的复合制动控制策略在循环工况中的性能。车辆及各部件参数见表 4。

表 4 整车及部件参数

参数	值	
整车质量/kg	11 200	
轴距/mm	5 700	
质心到前轴的距离/mm	3 420	
质心到后轴的距离/mm	2 280	
整车参数	质心高度/mm	1 100
	车轮滚动半径/mm	510
	主减速比	6.14
	空气阻尼系数	0.35
	迎风面积/m ²	9.10
电机参数	峰值功率/kW	200
	额定功率/kW	120
	峰值扭矩/Nm	2 800
	额定转矩/Nm	1 300
	峰值转速/(r/min)	2 500
	额定转速/(r/min)	881.50
电池参数	电池电压/V	450
	电池电容/Ah	280

图 9 为 CCBC 工况下实际车速和期望车速曲线拟合效果。由图可知，CCBC 工况实际车速能较准确地跟踪期望车速，整个行驶过程超调较小，表明电动客车在中国典型城市循环工况下，模糊神经网络制动意图识别模块能准确识别驾驶员的不同制动需求。

图 10a 为 CCBC 循环工况下的制动减速度曲线。由图可知，在整个循环工况下所研究的电动客车平

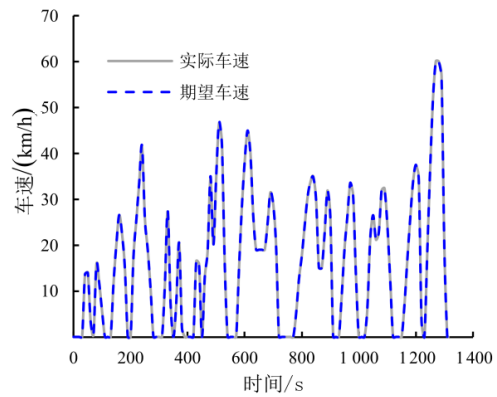
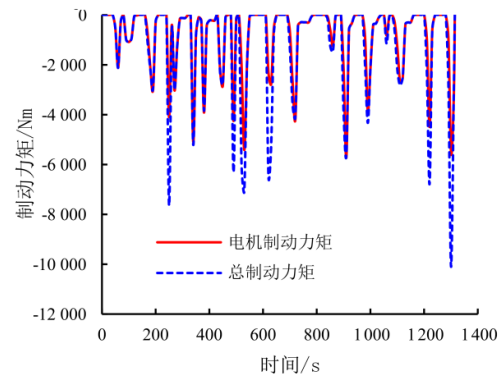
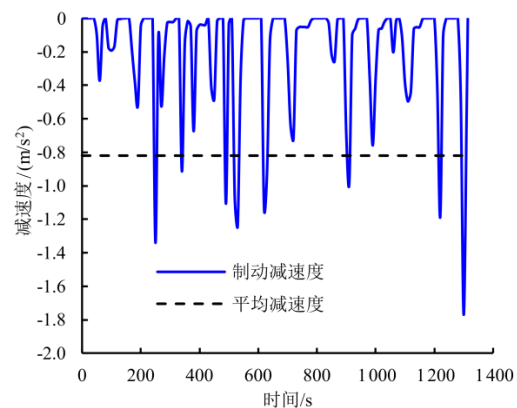


图 9 CCBC 工况实际车速与期望车速

均制动减速度为 0.82 m/s²，最大制动减速度不超过 1.8 m/s²，即制动强度不大于 0.18，对于高附着系数路面而言，客车制动时一般不会发生抱死情况。CCBC 循环工况下总需求制动力矩和电机所提供的制动力矩关系如图 10b 所示。在制动力需求较小的情况下，仅电机就可以满足需求制动力，制动力需求较大时，仅靠电机制动不能满足制动力需求，还需要 EMB 的摩擦制动参与。



(b) 复合制动力矩分配



(a) CCBC 工况减速度曲线

图 10 CCBC 工况下减速度与力矩分配

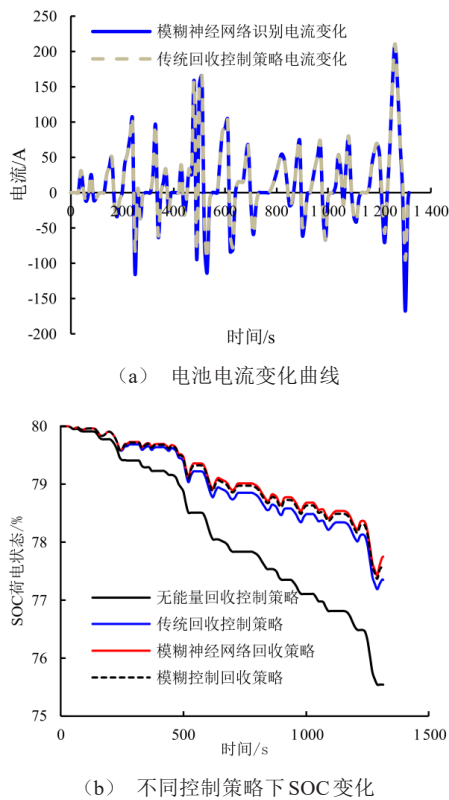


图 11 不同控制策略电流及 SOC 变化

模糊神经网络识别电池电流变化曲线如图 11a 所示。电流正值表示电机驱动，即能量消耗的过程，两种控制策略下超调较小。电流负值表示电机反转进行车辆制动，即进行能量回收过程，有模糊神经网络识别控制策略下可以更好地跟随车辆减速度。不同控制策略下 SOC 变化情况如图 11b 所示。

参考文献 (References)

- [1] ZHANG Junzhi, LI Yutong, LYU Chen, et al. New Regenerative Braking Control Strategy for Rear-Driven Electrified Minivans[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 82: 135-145.
- [2] 熊璐, 钱超, 余卓平. 电动汽车复合制动系统研究现状综述[J]. 汽车技术, 2015(1): 1-8.
XIONG Lu, QIAN Chao, YU Zhuoping. Review on Composite Braking System of Electric Vehicle[J]. Automobile Technology, 2015(1): 1-8. (in Chinese)
- [3] 王喆, 周晓军, 杨辰龙, 等. 驾驶员制动意图对多轴车辆紧急制动迟滞特性的影响[J]. 汽车工程, 2018, 40(10): 1185-1191.
WANG Zhe, ZHOU Xiaojun, YANG Chenlong, et al. Effects of Driver's Braking Intention on Hysteresis Characteristics of Emergency Braking in Multi-Axle Vehicle [J]. Automotive Engineering, 2018, 40 (10) : 1185-1191. (in Chinese)
- [4] 袁师召, 李军, 周舟. 基于制动意图识别的双轴四驱电动汽车制动控制策略研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(2): 158-164.
YUAN Shizhao, LI Jun, ZHOU Zhou. Research on Braking Control Strategy of Electric Vehicle with Double-Axis Four-Wheel Drive Based on Braking Intention Recognition[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2022, 45(2): 158-164. (in Chinese)
- [5] LIN Xinyou, LI Yalong, XIA Bin. An Online Driver

循环工况结束时，无能量回收控制策略下 SOC 为 75.54%；带有模糊神经网络意图识别回收控制策略下 SOC 为 78.23%，带有模糊控制回收策略下 SOC 为 77.63%，传统回收控制策略下 SOC 为 77.35%。表明带有模糊神经网络制动意图识别的控制策略较模糊控制回收策略可以回收更多能量。

3 结论

本文对实车道路测试采集的 400 组制动数据进行分析，采用模糊神经网络识别驾驶员制动意图等级，在 ECE 制动法规、电机特性以及电池特性等安全要素约束下建立前、后轴制动力控制策略，最后通过 Matlab/Simulink 与 TruckSim 软件联合仿真验证所提控制策略的有效性，得到以下结论。

1) 城市电动客车主要运行在低强度制动工况，该工况下模糊神经网络制动意图识别准确率达 95.7%。

2) 基于模糊神经网络的制动意图识别能提高现阶段意图识别不具备的自适应自学习能力，综合考虑驾驶员对制动踏板的常规和紧急操作，在工程实践中有较强的实用性。

3) 在 CCBC 工况下，带有模糊神经网络识别能量回收控制策略终值 SOC 高于模糊控制回收策略和传统回收控制策略，能达到延长电动客车续航里程，提升车辆经济性的目的。

- Behavior Adaptive Shift Strategy for Two-Speed AMT Electric Vehicle Based on Dynamic Corrected Factor[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 48:101598.1-101598.17.
- [6] DING Tao, ZENG Ziyu, BAI Jiawen, et al. Optimal Electric Vehicle Charging Strategy with Markov Decision Process and Reinforcement Learning Technique[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5811-5823.
- [7] QUAN Shengwei, WANG Yaxiong, XIAO Xuelian, et al. Real-Time Energy Management for Fuel Cell Electric Vehicle Using Speed Prediction-Based Model Predictive Control Considering Performance Degradation [J]. Applied Energy, 2021, 304: 117845.1-117845.14.
- [8] 马建, 李学博, 赵轩, 等. 电动汽车复合制动控制研究现状综述[J]. 中国公路学报, 2022, 35(11): 271-294.
- MA Jian, LI Xuebo, ZHAO Xuan, et al. Review of Electro-Mechanical Composite Braking Control for Electric Vehicles [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(11): 271-294. (in Chinese)
- [9] ZHANG Junzhi, LYU Chen, QIU Mingzhe, et al. Braking Energy Regeneration Control of a Fuel Cell Hybrid Electric Bus [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 76: 1117-1124.
- [10] 张抗抗, 徐梁飞, 华剑锋, 等. 后驱纯电动车制动能量回收系统及其策略的对比研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(2): 125-131, 138.
- ZHANG Kangkang, XU Liangfei, HUA Jianfeng, et al. A Comparative Study on Regenerative Braking System and Its Strategies for Rear-Wheel Drive Battery Electric Vehicles [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(2): 125-131, 138. (in Chinese)
- [11] XU Shiwei, ZHAO Xuan, YANG Naixing, et al. Control Strategy of Braking Energy Recovery for Range-Extended Electric Commercial Vehicles by Considering Braking Intention Recognition and Electropneumatic Braking Compensation[J]. Energy Technology, 2020, 8(9): 2000407.1-2000407.16.
- [12] XU Wei, CHEN Hong, ZHAO Haiyan, et al. Torque Optimization Control for Electric Vehicles with Four In-Wheel Motors Equipped with Regenerative Braking System [J]. Mechatronics: The Science of Intelligent Machines, 2019, 57: 95-108.
- [13] LIAN Renzong, PENG Jiankun, WU Yuankai, et al. Rule-Interposing Deep Reinforcement Learning Based Energy Management Strategy for Power-Split Hybrid Electric Vehicle[J]. Energy, 2020, 197: 117297.1-117297.9.
- [14] ZHAO Xuan, WANG Shu, MA Jian, et al. Identification of Driver's Braking Intention Based on a Hybrid Model of GHMM and GGAP-RBFNN [J]. Neural Computing and Applications, 2019, 31: 161-174.
- [15] 刘晏宇, 喻凡, 宋娟娟, 等. 采用神经网络与模糊控制的制动需求识别[J]. 中国机械工程, 2020, 31(23): 2847-2855.
- LIU Yanyu, YU Fan, SONG Juanjuan, et al. Detection of Brake Requests Using Neural Network and Fuzzy Control [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(23): 2847-2855. (in Chinese)
- [16] 曲代丽. 基于模糊神经网络的驾驶员制动意图辨识技术研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2016.
- QU Daili. Research on Identification Technology of Driver's Braking Intention Based on Fuzzy Neural Network [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [17] 秦贝贝, 陈增强, 孙明玮, 等. 基于自适应神经模糊推理系统的船舶航向自抗扰控制[J]. 智能系统学报, 2020, 15(2): 255-263.
- QIN Beibei, CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, et al. Active Disturbance Rejection Control of Ship Course Based on Adaptive-Neural-Based Fuzzy Inference System [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2020, 15(2): 255-263. (in Chinese)
- [18] TAKAGI T, SUGENO M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1985(1): 116-132.
- [19] HOSEINNEZHAD R. Position Sensing in Brake-by-Wire Callipers Using Resolvers [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(3): 924-932.
- [20] HOSEINNEZHAD R, BAB-HADIASHAR A. Fusion of Redundant Information in Brake-by-Wire Systems Using a Fuzzy Voter [J]. Journal of Advances in Information Fusion, 2006, 1(1): 52-62.
- [21] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 21-24.
- YU Zhisheng. Automobile Theory [M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 21-24. (in Chinese)
- [22] 曼弗雷德·米奇克, 亨宁·瓦伦托维兹. 汽车动力学: 第5版[M]. 陈荫三, 余强, 译. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- MITSCHKE M, WALLENTOWITZ H. Automotive Dynamics [M]. 5th ed. CHEN Yinsan, YU Qiang, Translate. Beijing: Tsinghua University Press, 2019. (in Chinese)

- [23] 杨坤,高松,王杰,等.基于EMB的解耦式制动能量回收系统研究[J].汽车工程,2016,38(9):1072-1079.
YANG Kun, GAO Song, WANG Jie, et al. A Study of Decoupled Brake Energy Recovery System Based on Electro-Mechanical Brake [J]. Automotive Engineering, 2016,38(9):1072-1079.(in Chinese)
- [24] 张丽君.基于制动意图识别的纯电动客车制动控制策略研究[D].西安:长安大学,2015.
ZHANG Lijun. Research on Braking Control Strategy Based on Braking Intention Recognition of Pure Electric Bus[D].Xi'an:Chang'an University,2015.(in Chinese)
- [25] 张继红.纯电动汽车电液制动系统再生制动控制策略研究[D].长春:吉林大学,2011.
ZHANG Jihong. Research on Regenerative Braking Control Strategy of Pure Electric Vehicle Electrohydraulic Braking System [D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)

作者简介



苏亮 (1980-), 男, 辽宁盘锦人, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为客车电驱系统和线控底盘。
E-mail: sul@mail.king-long.com.cn

通信作者



韩勇 (1984-), 男, 江西萍乡人, 教授, 主要研究方向为汽车安全、线控底盘。
E-mail: yonghanxmut@gmail.com