

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)04-0182-04

基于模糊神经网络的电动汽车制动能量回收控制系统

孙少杰

(陕西交通职业技术学院 汽车工程学院, 陕西 西安 710018)

摘要:为有效提升电动汽车续航能力,实现有限能量源的充分利用,建立基于模糊神经网络的电动汽车制动能量回收控制系统。通过阻力、牵引力及车速数学公式掌握电动汽车动力机制,运用模糊神经网络5层结构得到输入信号代数总和,融合离线训练和在线修改训练策略,比较制动总力矩与发电力矩大小,实现电动汽车制动动力控制;组建电动汽车制动能量回收控制系统,利用控制器局域网络总线完成系统内外部通讯。实验结果表明,所建系统有效减少了电动汽车制动距离与时间,充分回收车体动能来延长续航里程,提高用户对电动汽车驾驶性能的满意度。

关键词:模糊神经网络;电动汽车;制动能量回收;控制系统;信号识别

中图分类号: TP273; TP18

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)04-0182-04

Braking energy recovery control system of electric vehicle based on fuzzy neural network

SUN Shaojie

(School of Automotive Engineer, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, Shaanxi, China)

Abstract: In order to effectively improve the range of electric vehicles and make full use of limited energy sources, a control system of braking energy recovery for electric vehicles based on fuzzy neural network is established. Through the mathematical formulas of resistance, traction force and speed, the electric vehicle dynamic mechanism is mastered, and the algebraic sum of input signals is obtained by using the five-layer structure of fuzzy neural network. The off-line training and online modification training strategies are combined to compare the total braking torque and the generating torque, so as to realize the electric vehicle braking power control. An electric vehicle braking energy recovery control system is established, and the internal and external communication of the system is completed by using the controller local area network bus. The experimental results show that the system can effectively reduce the braking distance and time of electric vehicles, fully recover the kinetic energy of the vehicle body to extend the driving range, and improve the user's satisfaction with the driving performance of electric vehicles.

Keywords: fuzzy neural network; electric vehicles; braking energy recovery; control system; signal recognition

我国汽车保有量的急速增长,导致路政系统遭受巨大压力,并出现环境污染问题。电动汽车的崛起很好地缓和了此种压力,在能源利用率方面具备一定优势,确保了能源的可再生运用,所以现阶段对电动汽车的发展层出不穷^[1]。当前,续航问题变成新能源汽车研发的关键技术难题,制动能量回收控制技术能增强能量的应用效率,是解决续航问题的重要探究方向。相关研究证实^[2],假如电动汽车制动时把损耗的动能采用电机变换为电能进行保存,能提升续航里程15%~35%。

文献[3]提出智能纯电动汽车再生制动力控制策略研究,通过创建控制模型,探究能量回收情况。文献[4]提出采用电机效率图划分电动汽车制动模式,使用模糊控制原理输出模糊识别器,按照冲击度值评估模式切换标准,分配轮胎制动力。

以上两种方法均未考虑驱动电机发电特征与对应输出性能,导致制动能量回收耗能较多,无法满足增加续航这一基础目标。为此,本文设计一种基于模糊神经网络的电动汽车制动能量回收控制系统。计算车辆动力系统阻力、牵引力及车速三个参数,在模糊神经网络模型中组建偏差函数,得到制动踏板行程改变率与汽车电池剩余电量,对比制动总力矩与发电力矩数值,完成制动信号识别与动力控制;运用数据采集板和通讯显示板构建电动汽车制动能量回收控制系统,完成车辆信息的实时显示,准确掌握续航里程情况,增加电动汽车行驶路程。

1 制动信号识别与动力控制

电动汽车行驶过程中会受到复杂路面状况与周边环境的影响,为合理分配行驶动力,实现电动汽车平稳行驶,

收稿日期:2025-06-09;录用日期:2025-08-25

基金项目:陕西省教育厅科学研究计划项目资助(24JK0339)

作者简介:孙少杰(1990—),女,硕士研究生,副教授,研究方向:智能汽车技术,新能源汽车技术。

引用本文:孙少杰. 基于模糊神经网络的电动汽车制动能量回收控制系统[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(4): 182-185. (SUN Shaojie. Braking energy recovery control system of electric vehicle based on fuzzy neural network[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(4): 182-185.)

增强制动能量回收控制系统可靠性,运用模糊神经网络对汽车制动踏板采取识别与动力控制。考虑到电动汽车刹车踏板能量回收控制信号特征,首先按照汽车行驶的真实情况计算动力系统相关参数,识别各参数产生的输入信号。电动汽车动力系统运行基础定理可使用数学公式来描述,下面分别阐明车辆阻力、牵引力及车速。

和电动汽车运动相悖的阻力涵盖轮胎滚动阻力、空气阻力与爬坡阻力。车辆驾驶在软路面过程中,路面的形变量较大,轮胎和地面的摩擦损失较低。将滚动阻力 F_r 计算过程记作

$$F_r = P \times f_r \quad (1)$$

式中, P 表示车轮中央的铅垂载荷, f_r 是滚动阻力指数。则车辆在坡面时的滚动阻力为

$$F_r = P \times f_r \cos \alpha \quad (2)$$

式中, α 为路面倾斜角度。

空气阻力遭受多方面要素影响,占据比例最高的是形状阻力,然后是表面突出物引发的干扰阻力、内循环阻力、诱导阻力及摩擦阻力。将空气阻力 F_w 的推导过程描述为

$$F_w = \frac{1}{2} \rho A_f C_D (v + v_w)^2 \quad (3)$$

式中, ρ 表示空气密度, A_f 是迎风面积值, C_D 是空气阻力指数, v 代表车辆行驶速率, v_w 是车辆运动的风速变量。

上坡运动时车辆重力会沿着坡面进行运动,产生爬坡阻力 F_g , 记作

$$F_g = mg \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

式中, m 为车辆质量。

驱动力顺着驱动系统进行传输,从电机至主减速器再传递至差速器,最后将力作用在轮胎上。扭矩通过动力设备传输至驱动轮的过程为

$$T_w = i_g \times i_0 \times \eta_i \times T_p \quad (5)$$

式中, i_g 代表传动设备的传动比例, i_0 是末端传动齿轮传动比例, η_i 表示动力设备值驱动轮的传动速率, T_p 是动力设备输出转矩值。

因此将驱动轮牵引力 F_t 表示为

$$F_t = \frac{T_w}{r_d} = \frac{i_g i_0 \eta_i T_p}{r_d} \quad (6)$$

式中, r_d 表示轮胎有效半径, T_w 为轮胎所占路面大小。

驱动轮胎转速 N_w 为

$$N_w = \frac{N_p}{i_g i_0} \quad (7)$$

式中, N_p 表示输出端的轮胎转速。

最终把电动汽车轮胎中心移动速率均值描述为:

$$v = \frac{\pi N_w \times r_d}{30} \quad (8)$$

由此完成电动汽车制动动力控制,让车辆具备更优续航能力,为电动汽车制动能量回收控制系统的主要目标提供可能性,对车辆的能量回收与充电续航能力作出显著响应,需要进一步提升电动汽车制动能量回收性能,实现电

动汽车制动能量回收控制系统设计。

2 系统实现

本文主要目标是构建电动汽车制动能量回收控制系统,并利用模糊神经网络有效提升电动汽车制动能量动力控制与分配性能。模糊神经网络包含隶属度函数层、模糊推论层、模糊化层、消除模糊化层与输出层。按照方法确立最终目标,明确对应的电动汽车动力系统参数数量与对应模糊变量个数,掌握网络模糊制动能量变量集合。

使用模糊神经网络进行电动汽车制动能量回收控制过程中,要按照制动能量回收控制系统真实值与预期学习值来推导学习偏差,再使用偏差值调节系统参变量,调节过程包含系统五个层次之间的权重和模糊层内每个关联的函数因子,详细训练步骤如下。

将模糊神经网络模型偏差函数设置为

$$E_c = \frac{1}{2} (o_{k_q} - o_{k_q}^*) \quad (9)$$

式中, o_{k_q} 、 $o_{k_q}^*$ 分别表示第 q 条模糊规则下第 k 个节点的输出预期值与真实值。

模型经过训练与调节参变量,让电动汽车制动能量回收控制系统控制偏差为最低^[5],符合预期偏差范围标准。将权重参变量调节过程记作

$$\omega_{k_q} = D(n) - \eta (o_{k_q} - o_{k_q}^*) / E_c \quad (10)$$

式中, $D(n)$ 是迭代数量, η 是学习因子。

针对关联函数内的参变量,其调节模式为

$$p = \omega_{k_q} \times \eta + \beta \quad (11)$$

式中, β 表示阻尼系数。

模糊神经网络训练电动汽车制动能量回收控制过程有在线与离线两种模式,为确保电动汽车制动踏板识别有效性,在真实环境中使用离线训练和在线修改相结合的训练策略。挑选车辆行驶速率与加速踏板行程改变程度当作模糊神经网络控制器输入值,充分考虑车速改变特性与运行状况,使用五个模糊语言描述车辆行驶速率特征实现电动汽车电机驱动力矩控制目标,即

$$\text{Speed} = \{ \text{较低, 低, 中, 高, 较高} \} \quad (12)$$

为完成高效率制动踏板动力分配目标,将制动踏板行程改变率、汽车电池剩余电量当作汽车制动模糊神经网络模型的输入值。将两种输入值分别描述成

$$\text{BrkPedRatio} = \{ \text{缓慢, 适中, 较急, 很急} \} \quad (13)$$

$$\text{SOC} = \{ \text{低, 较低, 中, 高, 较高} \} \quad (14)$$

依照真实电动汽车制动能量回收控制情况,在若干条模糊规则基础上,将车速 Speed 作为模糊输入,制动踏板行程改变率 BrkPedRatio、汽车电池剩余电量 SOC 作为模糊输出。模糊输出是一个单点结构,通常具备固定节点数值,一般将全部输入信号的代数总和当作输出值,运算过程为:

$$D_v = \frac{\text{Speed} \times p_{k_q}}{\text{BrkPedRatio} \times q_{k_q} + \text{SOC}} \quad (15)$$

式中, p_{k_q} 与 q_{k_q} 均为可调节参变量, 即结论参变量。

在输出层中处理上一层的输出信息, 获得最终的输出结果。根据输出结果, 将制动能量回收控制系统分为分布式结构, 包含数据采集板与通讯显示板两个部分, 系统整体结构如图 1 所示。

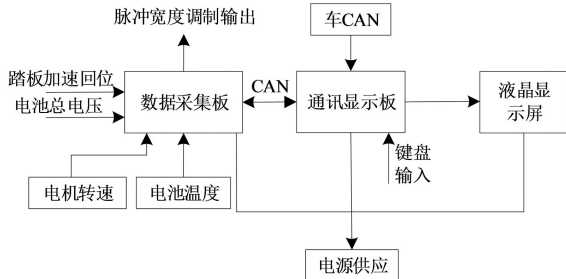


图 1 电动汽车制动能量回收控制系统结构

Fig. 1 Structure of the braking energy recovery control system for electric vehicles

数据采集板主要任务是收集电池电压、电池温度、充电电流数值、刹车信号、加速踏板信号等, 如图 2 所示。另外, 基于模糊神经网络的制动控制方法也通过数据采集板完成^[6]。硬件检测在上电初始化后实现, 关键用来勘测主板每个硬件是否产生错误。加速踏板回零信号的测量安置于主函数内, 通过查找模式完成测量, 利用输入/输出 (input/output, I/O) 接口直接传递至中央处理器。两档制动踏板信号和电池电压、电流信号均利用终端模式以 40 ms 的速度完成变换。微小的区别在于, 制动踏板信号收集任务通过单片机自带的 AD 线路进行转变, 电池电压与电流信号的收集通过 AD976 芯片完成转变。控制器局域网络 (controller area network, CAN) 通讯板块可以完成和显示通讯板的高效率信息传递。

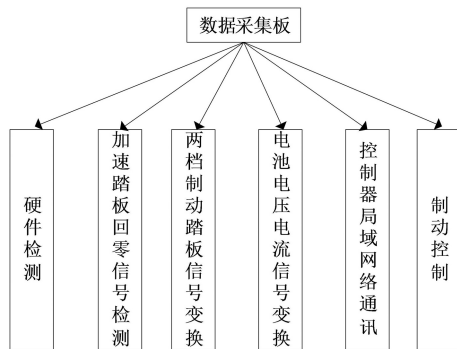


图 2 数据采集板内部结构

Fig. 2 Internal structure of the data acquisition board

通讯显示板担负和外部平台沟通、传输电池剩余量、刹车终止等操作, 系统内的液晶显示屏可以查看充电状态、电池电压及温度, 图 3 为通讯显示板内部结构。液晶显示板块能呈现出不同的数据与图形, 一秒中断板块可以在不同的驾驶情况下刷新液晶屏幕信息, CAN1 板块用来完成和数据采集板的交互^[7-9], CAN2 板块用来完成车辆整体的信息交流。PC 通信板块可实现上位机交流通信, 上位机程序使用 Visual Basic 设计语言进行研发。

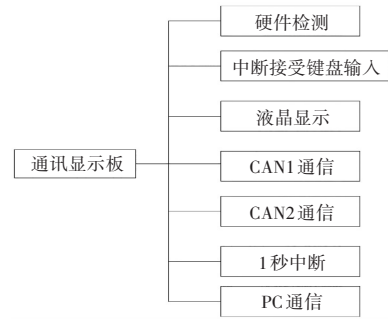


图 3 通讯显示板内部结构

Fig. 3 Internal structure of the communication display board
系统内部与外部通讯都使用 CAN 总线, 将 CAN 总线工作过程表示成图 4。

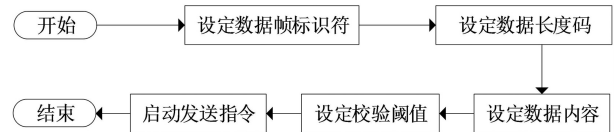


图 4 CAN 总线工作过程

Fig. 4 Working process of the CAN bus

结合上述分析, 实现基于模糊神经网络的电动汽车制动能量回收控制系统设计。

3 仿真实验

利用仿真实验证明本文系统优越性, 采用 Simulink 软件搭载制动能量回收控制系统, 运用 AVL CRUISE 软件构建电动汽车结构模型, 运用模糊神经网络方法探寻恰当的制动力分配。电动汽车关键参数如表 1 所示。

表 1 仿真电动汽车关键参数

Tab. 1 Key parameters of the simulated electric vehicle

实验项目	参数	数值
整车参数	车辆整备质量/kg	1 480
	轮胎半径/m	0. 321
	轴距/m	2. 93
	质心与前轴的间距/m	1. 356
	质心高度/m	0. 7
	永磁同步电机	峰值功率/kW
	峰值扭矩/(N · m)	260
电池	标称电压/V	310
	容量/(A · h)	280

将文献[3-4]作为对比方法, 比较 3 种方法不同初始车速下降至安全车速需要消耗的时间与制动距离, 结果如表 2、3 所示。

表 2 初始速度下降至安全车速的时间消耗对比

Tab. 2 Comparison of time consumed to decelerate from initial speed to safe speed

实验方法	初始速度下降至安全车速的时间/s		
	40 km · h ⁻¹	80 km · h ⁻¹	120 km · h ⁻¹
文献[3]	1. 55	2. 74	3. 87
文献[4]	0. 93	1. 96	2. 49
本文方法	0. 71	1. 44	2. 40

表3 3种方法下的制动缩减距离

Tab. 3 Braking distance reduction under three methods

实验方法	制动缩减距离/m		
	40 km · h ⁻¹	80 km · h ⁻¹	120 km · h ⁻¹
文献[3]	2.13	6.25	8.51
文献[4]	2.49	6.74	8.76
本文方法	2.57	7.11	9.82

从两个表格内容看出,本文方法要优于两个文献方法,其制动能量回收控制策略在紧急制动时可以最大程度减少制动时间,同时降低了车辆的制动距离。初始车辆速度是40 km/h时,因为车速很低,方法的优势并不显著,但伴随车辆行驶速度的增加,本文方法的制动距离与时间锐减,证明该方法可以更好地与地面形成摩擦,路面附着能力优秀。图5是3种方法制动能量回收控制方法下的电池荷电状态伴随时间的改变情况。

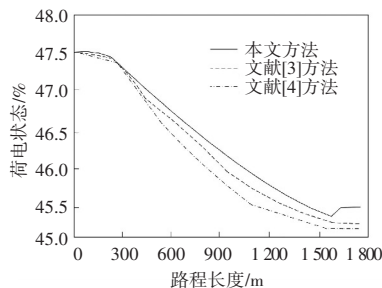


图5 电池SOC伴随时间的改变情况

Fig. 5 Variation of battery SOC over time

从图5中看到,原始荷电状态是47.5%,驾驶1748 m后,本文方法剩余电荷为45.6%,文献[3]剩余电荷为45.3%,

文献[4]剩余电荷为45.2%。由此看出本文方法制动能量回收性能最优,可充分保证电动汽车较长的续航时间。

4 结论

制动能量回收控制是完善电动汽车行驶平稳性、提升车辆续航的重要技术。本文通过模糊神经网络来识别制动信号,完成对应的制动力控制,运用分布式系统结构,搭建数据采集板与通讯显示板,完成制动能量回收控制逻辑,实现优秀的能量再利用效果,为新能源汽车研发与制造提供参考借鉴。

参考文献

- [1] 庞松岭, 赵海龙, 张晨佳. 计及充电需求差异的电动汽车充电设施协同优化配置[J]. 电测与仪表, 2024, 61(12): 171-177.
- [2] 李争争, 周志刚, 杨文豪, 等. 电动汽车主动制动能量回收控制策略研究[J]. 中国科技论文, 2020, 15(8): 935-941.
- [3] 张炳力, 闻静, 黄鹤, 等. 智能纯电动汽车再生制动力控制策略研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(1): 13-18.
- [4] 李聪波, 易茜, 胡芮, 等. 基于模式模糊识别的电动车双电机系统再生制动控制[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(4): 871-881.
- [5] 向楠, 张向文. 电动汽车再生制动模糊神经网络控制策略研究[J]. 电气传动, 2020, 50(7): 86-91.
- [6] 韩海云, 杨柳, 李彦鹏, 等. 基于神经网络的光伏充电桩有序充电控制系统[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(4): 142-146.
- [7] 武曦, 全力, 朱孝勇, 等. 基于能耗最优的电动拖拉机转矩控制策略研究[J]. 农机化研究, 2025, 47(8): 266-272.
- [8] 程慧琳, 武剑, 张晶, 等. 计及电动汽车充放电时空分布的输配网协同降损低碳策略研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(11): 122-132.
- [9] 汤兆平, 孙剑萍. 生物燃料可持续发展面临的挑战及对策研究[J]. 农机化研究, 2014, 36(3): 212-215.

(上接第176页)

参考文献

- [1] 卜晨. 基于机器学习的城市道路交通拥塞状态识别方法[J]. 现代电子技术, 2024, 47(14): 142-146.
- [2] 薛先斌, 谭北海, 余荣, 等. 基于行车风险场的交通冲突风险预警方法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(6): 1-7.
- [3] 冯笑媚. 基于深度学习的道路交通目标自动化检测算法研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2024(1): 39-43.
- [4] HOU X. Urban traffic accident factor analysis, risk prediction and early warning based on big data technology [C]//Proceedings of the 2023 9th International Conference on Computing and Artificial Intelligence. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2023: 691-696.
- [5] YAN X. Research on urban road safety detection based on machine learning [C]//Proceedings of the 2024 Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area International Conference on Digital Economy and Artificial Intelligence. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2024: 862-866.
- [6] 宋如飞. 基于GIS技术的土地空间信息查询系统设计[J]. 现代电子技术, 2023, 46(17): 107-110.

- [7] 陈一路, 王贵. 考虑通信延迟的桥梁防撞自动预警方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(7): 71-74.
- [8] 姜栋, 赵文吉, 王艳慧, 等. 地理加权回归的城市道路时空运行态势空间网格计算方法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2023, 48(6): 988-996.
- [9] 王艺霖, 肖媛媛, 左鹏飞, 等. 基于改进聚类算法的交通事故多发点识别方法[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(10): 2993-2999.
- [10] 张驰, 周郁茗, 翟艺阳, 等. 公路事故多发路段辨识方法研究综述[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(5): 72-87.
- [11] 王超, 张海涛, 郑皓天, 等. 考虑客户用电安全隐患的配电网脆弱线路风险自动预警方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(2): 45-48, 67.
- [12] 朱丁涛, 李晓东, 王俊骅. 基于驾驶行为预警数据和交通事故热点对比的危化品运输路径研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(11): 115-121, 147.
- [13] 魏云凤, 黄群龙, 梁昭伟. 基于交通流基本图的交通拥堵预警方法研究[J]. 公路, 2024, 69(9): 238-244.
- [14] 李胜琴, 杜鹏. 考虑驾驶员差异性的安全距离模型优化[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2023, 44(3): 249-253.
- [15] 冯海霞, 宁二伟, 王琦, 等. 基于GIS的济南市交通事故成因分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2023, 42(5): 124-131.