

基于工况聚类识别的纯电动客车驾驶模式 自适应切换控制研究

李文皓, 黄玉鹏, 杨传开, 陈振国, 吴洪亭

(中通客车股份有限公司, 山东 聊城 252000)

摘要:为更准确识别车辆驾驶环境并优化能耗,本文基于实际行驶工况数据,选取平均车速、停车时间比、加速时间比及减速时间比等特征参数,并采用模糊C均值聚类方法对行驶工况进行分类。在此基础上,结合车辆工况、驾驶模式和预设规则库等多重因素,构建了一种基于规则的驾驶模式自适应切换策略。该策略能够根据实时驾驶环境自动选择相匹配的驾驶模式,从而提升整车对复杂行驶条件的适应性与能耗经济性。

关键词:纯电动客车; 工况聚类识别; 驾驶模式; 自适应切换

中图分类号:U469.1

文献标志码:A

DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.01.004

Research on Adaptive Switching Control of Pure Electric Bus Driving Mode Based on Condition Clustering and Recognition

LI Wenhao, HUANG Yupeng, YANG Chuankai, CHEN Zhenguo, WU Hongting

(Zhongtong Bus Holding Co., Ltd., Liaocheng 252000, China)

Abstract:To cluster the driving conditions and identify the current driving environment, this paper selects characteristic parameters such as average speed, stop time ratio, acceleration time ratio, and deceleration time ratio, from real-world driving data and applies the fuzzy C-means clustering method for analysis. Building on the clustering results, a rule-based driving mode switching strategy is developed by integrating vehicle status, driving environment, and predefined rule set to achieve adaptive switching. The proposed strategy automatically selects the matching driving mode based on real-time conditions, thereby enhancing the vehicle's adaptability to varying driving scenarios and improving its overall energy economy.

Key words:pure electric bus; condition clustering and recognition; driving mode; adaptive switching

当前纯电动客车的驾驶模式需要驾驶员手动切换,因而驾驶员必须同时具备对驾驶环境与模式匹配性的准确判断能力和执行匹配操作的专业驾驶操作技能。若驾驶员不主动切换驾驶模式,车辆将无法适应复杂多变的交通环境,这既会影响驾驶体验,也会增加能耗;若驾驶员频繁进行手动切换,则可能因注意力分散而影响行车安全。针对这一矛盾,本文提出了一种驾驶模式自适应切换策略。该策略通过在线识别实时驾驶环境,并基于规则库进行决策,使车辆能自主匹配最佳驾驶模式,最终在降低驾驶员操作负荷的同时,有效兼顾整车的经济性与环境适应性。

1 车辆工况分析与识别

1.1 数据处理及分析

本文采用的数据为实车历史行驶数据,涵盖高速

公路工况、市区拥堵/行驶缓慢工况、普通省道行驶工况和市区正常行驶工况。对获取的数据进行处理,排除明显的异常值后得到如图1所示的部分车速-时间曲线。

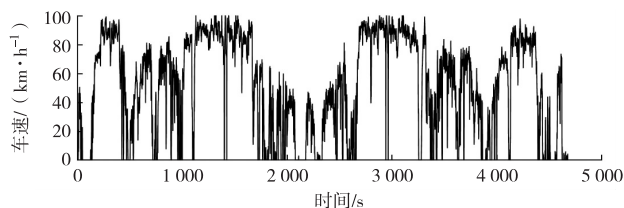


图1 车辆行驶历史工况数据

完整的工况数据共18 146 s,考虑到工作量与工况识别的精度,采用定步长划分^[1]的方式,以120 s为一个周期对工况数据进行分割,共得到151个工况片段。系统通过分析平均车速、停车时间比、加速与

收稿日期:2025-03-27。

第一作者:李文皓(1997—),男,硕士,工程师,主要从事新能源电控研发相关工作。E-mail:410075487@qq.com。

减速时间比等参数来提取当前工况片段的特征^[2], 进而识别车辆所处的驾驶环境类型。

1.2 基于模糊 C 均值的工况聚类分析

本文面向实时嵌入式系统, 综合考虑实时处理、资源配置及多任务调度等因素, 采用模糊 C 均值算法对历史行驶数据进行离线处理, 并将得到的聚类中心作为固定参数特征值输入至嵌入式系统, 在满足实时性要求的基础上保障功能的实现。

模糊 C 均值算法^[3]是一种无监督的聚类算法。与传统聚类算法不同, 模糊 C 均值算法允许样本以不同隶属度分属多个簇, 因而能更有效地处理边界模糊或数据重叠的样本。然而, 该算法具有一定的局限性, 即对噪声和异常值较为敏感。其根源在于算法的模糊隶属机制: 该机制在迭代更新聚类中心时, 需综合考虑所有数据点 (包括噪声) 的隶属度, 这使得噪声点会干扰中心的定位, 进而影响聚类结果的准确性。

模糊 C 均值算法的具体步骤如下:

步骤 1: 初始化隶属度矩阵, 随机选择数据点作为初始聚类中心, 每个样本到每个聚类中心的隶属度为 0~1 的随机数。

步骤 2: 采用欧式距离计算每个数据点到每个聚类中心的距离, 根据距离计算每个数据点属于每个簇的隶属度。

步骤 3: 根据当前隶属度, 重新计算聚类中心。

步骤 4: 重复步骤 2 和步骤 3, 直到满足最大迭代次数或聚类中心不再明显变化为止。最终, 根据最后一次迭代的隶属度, 确定每个数据点所属的簇。

模糊 C 均值聚类中, 聚类数量 K 需依据经验及对数据集的理解来指定, 其理论取值范围为 $2 < K < \text{样本总数}$ 。结合文献[1], 本文设定 $K=4$ 。通过对行驶工况片段进行模糊 C 均值聚类, 得到 4 个聚类簇, 分别标记为 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 。各聚类簇的中心特征参数值详见表 1。

表 1 模糊 C 均值聚类中心特征参数

聚类簇	平均车速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	停车时间比/ %	加速时间比/ %	减速时间比/ %
A_1	3.23	65.38	13.62	16.87
A_2	38.05	20.15	28.13	33.65
A_3	67.01	5.46	24.12	31.79
A_4	85.05	0.15	18.36	21.24

结合表 1 中的特征参数, A_1 至 A_4 分别对应四种典型行驶工况: A_1 对应市区拥堵路况, 其平均车速最

低, 停车时间占比最高, 呈现频繁启停的跟车行驶特征; A_2 对应市区正常行驶工况, 平均车速较低, 停车时间占比较高; A_3 对应普通省道工况, 平均车速较高, 且因路况复杂需频繁加减速, 其加速与减速时间占比均较高; A_4 对应高速公路工况, 平均车速高, 停车占比极低, 车辆运行状态最为平稳。

1.3 驾驶环境识别

为实现驾驶环境的实时识别, 系统首先需将连续的车辆行驶数据以 120 s 为周期进行切割^[4], 每个片段代表一种特定的动态工况。然后, 提取每个工况片段的平均车速、停车时间占比、加速时间比、减速时间比等特征参数。最终, 计算这些特征参数与 1.2 节中所得 4 个聚类中心的欧氏距离, 并依据最近邻原则将当前片段判定为距离最小的类别, 以此完成环境识别。

根据最小欧式距离原理^[5], 将车辆实时工况与 1.2 节中已构建的工况库进行匹配, 进而识别出车辆当前的驾驶环境。当前实时工况片段特征向量与第 i 个工况聚类中心特征向量之间的欧式距离计算公式如式(1)所示。

$$d_i = \sqrt{\sum_{j=1}^4 (x_j - c_{ij})^2}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

式中: d_i 为当前实时工况片段与第 i 个工况聚类中心的距离; x_j 为当前工况片段 4 个特征参数中第 j 个特征值; c_{ij} 为第 i 类工况的第 j 个特征参数的聚类中心值。

2 驾驶模式自适应切换控制系统

2.1 系统方案设计

如图 2 所示, 本文设计的驾驶模式自适应切换控制系统包括感知层、控制层和执行层。整车控制器通过 CAN 总线获取实时车速信号, 并计算平均车速、停车时间比和加速时间比等特征参数, 在线识别驾驶环境。控制器随即以此识别结果为依据, 动态调整电机功率、转矩系数及扭矩梯度等关键参数, 使动力系统匹配当前工况。系统通过构建这一从感知到执行的实时闭环, 从而完成了驾驶模式的自适应切换。

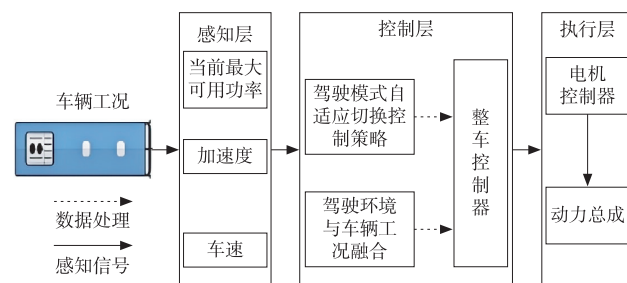


图 2 系统架构

2.2 驾驶模式方案设计

为实现驾驶模式切换过程的平顺性,控制策略协同调整三个关键参数:转矩系数、转矩梯度变化率及电机功率。其中,转矩系数定义为当前转速下电机实际输出扭矩与最大可输出扭矩之比^[6]。调整该系数将直接改变整车控制器的扭矩请求值;转矩梯度变化率指扭矩在单位时间内的变化速率,用于调控扭矩变化的平顺性。与此同时,电机控制器接收整车控制器的功率限制指令,对输出功率进行相应调整。通过对上述三者的协同调控,系统得以实现对电机输出特性的实时、精确动态控制,从而确保模式切换过程平稳且响应迅速。

本文设计的驾驶模式包括运动模式、经济模式和标准模式。三种模式的核心区别在于对电机功率与转矩梯度变化率的差异化标定,具体设定如下:①运动模式下电机对加速踏板的响应较为灵敏,转矩梯度变化率增大,车辆动力性能提升,加速效果较好。该模式下,电机功率设定为当前电机可用最大功率,转矩梯度变化速率设定为:当满踩加速踏板时,扭矩可在 1 s 内从当前值线性增长至电机峰值扭矩。②经济模式下电机动力输出平缓,车辆动力性降低,经济性提升,适用于城市行驶缓慢路段及高速公路匀速驾驶场景。该模式下,电机功率设定为电机额定输出功率,转矩梯度变化速率设定为:当满踩加速踏板时,扭矩可在 3.5 s 内从当前值线性增长至电机峰值扭矩。③标准模式适用于大多数驾驶场景,车辆动力性介于运动模式与经济模式之间。该模式下,电机功率设定为电机当前可用功率的 80%,转矩梯度变化速率设定为:当满踩加速踏板时,扭矩可在 2.5 s 内从当前值线性增长至电机峰值扭矩。

不同驾驶模式间的扭矩设定存在显著差异,其切换过程中的扭矩跃变会造成车辆纵向冲击^[7],进而影响行驶平顺性和驾驶舒适性。结合理论计算与实际工程经验,设定相同电机转速下不同模式间最大扭矩变化不超过 260 N·m。具体转矩系数见表 2。表中 S 为加速踏板开度, L_1 、 L_2 和 L_3 分别为运动、经济 and 标准模式对应开度下的转矩系数。由表 2 可知,在经济模式下,当加速踏板开度为 45%时,请求扭矩值即为当前转速下电机峰值扭矩的 50%。

表 2 三种模式的转矩系数

$S/\%$	L_1	L_2	L_3	$S/\%$	L_1	L_2	L_3
0	0	0	0	60	0.80	0.60	0.65
15	0.35	0.15	0.23	80	0.90	0.75	0.80
30	0.50	0.30	0.40	90	0.95	0.85	0.90
45	0.65	0.50	0.60	100	1	1	1

2.3 驾驶模式自适应切换控制策略

基于规则的控制策略是指根据设计者的工程认知和知识制定的策略^[8]。该策略在嵌入式系统应用中,具有成本低、可定制的优势。本文通过建立基于规则的驾驶模式自适应切换控制策略,实现车辆驾驶模式的自适应切换。具体规则如下:

规则①:车辆每次上车进入标准驾驶模式;整车控制器检测运动模式标志位 $SportFlag = 0$ 、经济模式标志位 $EcoFlag = 0$,发送标准模式标志位 $StandFlag = 1$,车辆进入标准模式。规则②:若判定车辆当前驾驶环境为普通省道,发送运动模式标志位 $SportFlag = 3$,车辆进入运动模式。规则③:若判定车辆当前驾驶环境为高速公路或拥堵路况,整车控制器发送经济模式标志位 $EcoFlag = 2$,车辆进入经济模式。规则④:为保障不同路况间的平顺过渡并防止模式频繁切换,进行模式切换时,需满足以下条件:滑行时间需不小于 1 s,并发出提示音;驾驶员再次踩下踏板后,方执行模式切换;切换完成后,该模式至少保持 120 s 不变。规则⑤:在统计计算周期内的怠速时间占比时,需排除停车等待时间。若剩余时段中,整车处于 Ready 状态且车速为 0 的时间占比高于 70%,则退出拥堵模式,切换为标准驾驶模式。

3 实车测试

采用实车测试的方式对上述控制策略进行验证,测试环境涵盖城市拥堵、市区正常行驶、高速公路、普通省道等工况,采用 Canalyzer 设备作为数据采集工具,对行驶过程进行记录(见图 3)。

系统以 120 s 为周期对驾驶环境进行实时识别,由此产生连续的驾驶模式标志位序列。该输出序列如图 4 所示,测试结果表明,系统能有效区分不同驾驶模式,且输出稳定。在 0~840 s 时间周期内,算法判定当前处于城市正常行驶路况,车辆进入标准模式;在 840~1 050 s 时间周期内,车辆处于静止状态,根据规则⑤,车辆保持标准模式。此后,车辆由拥堵

路况向普通省道路况过渡, 驾驶模式则由经济模式转为标准模式, 随着车速提升, 车辆进入运动模式。当车辆行驶约 2 200 s 并进入高速路段时, 车辆先由标准模式进入运动模式, 维持 120 s 运动模式后, 驾驶模式稳定在经济模式。

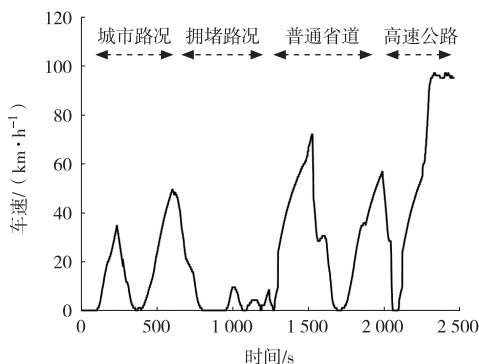


图3 测试工况

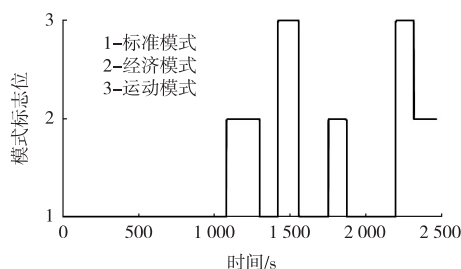


图4 驾驶模式标志位时间序列图

4 基于驾驶模式自适应切换的能耗测试

实施驾驶模式自适应调整可适应复杂路况并提升经济性。本文提出一种基于驾驶模式自适应切换的能耗测试方法, 整体测试基于转鼓试验环境, 测试工况涵盖高速、拥堵、市区、普通省道等, 采用续驶里程贡献率指标对能耗优化效果进行计算, 其计算公式见式(2)。

$$\tau = \frac{E_{\text{close}} - E_{\text{open}}}{E_{\text{open}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: τ 为驾驶模式自适应切换功能的续驶里程贡献率; E_{close} 为驾驶模式自适应切换功能关闭时(默认采用标准驾驶模式)的能量消耗量, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{km}$; E_{open} 为驾驶模式自适应切换功能开启时的能量消耗量, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{km}$ 。 E_{close} 与 E_{open} 可通过试验过程中电能变化量与行驶距离之比得到。

采用我司 11 m 纯电动旅团客车在转鼓试验台进

行测试, 为避免驾驶风格对能耗的影响, 由同一位驾驶员分别进行 3 组工况循环测试, 最终测试结果取平均值。测试结果表明: 未搭载驾驶模式自适应切换功能的整车平均能耗约为 $0.5635 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{km}$, 搭载驾驶模式自适应切换功能的整车平均能耗约为 $0.5142 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{km}$, 续驶里程贡献率约为 9.58%。

5 结束语

为提升整车在复杂驾驶环境下的经济性, 本文提出了一种驾驶模式自适应切换控制方法。首先, 基于实车历史数据, 采用模糊 C 均值聚类实现对不同驾驶环境的识别; 进而, 融合当前工况与驾驶模式, 建立了基于规则的驾驶模式切换策略。最后, 通过实车测试验证了算法有效性。结果表明, 所提方法能够实现驾驶模式的自适应切换, 并有效提升了车辆经济性。

此外, 基于规则的驾驶模式切换控制策略简便且易实现, 但此策略过于依赖工程师经验, 未来可采用基于 BP 神经网络的预测算法对行驶工况进行预测, 通过车联网平台与车端的信息交互, 提高模式切换的准确性和适应性。

参考文献:

- [1] 李方舟, 钟勇, 邱煌乐, 等. 基于工况识别与预测的纯电动汽车剩余里程估算研究[J]. 车用发动机, 2024(5): 86-92.
- [2] 吴浩, 丁文敏, 魏广杰, 等. 基于路况和驾驶习惯的自适应能量回收控制策略[J]. 汽车安全与节能学报, 2023, 14(1): 106-117.
- [3] 宋鹏翔. 插电式混合动力公交车工况预测与智能能量管理策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [4] 王金鹏. 基于风格识别与工况预测的智能车节能速度优化[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [5] 魏恒, 何超, 李加强, 等. 基于实际行驶工况的纯电动汽车续驶里程在线估算方法研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(12): 149-158.
- [6] 费为伟. 纯电动客车整车控制策略开发与硬件在环测试[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [7] 张晓, 杨凌云, 杨志超, 等. 新能源商用车驾驶模式的控制研究[J]. 汽车电器, 2023(6): 40-42.
- [8] 张震. 电液混合动力汽车能量管理策略研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2024.