

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.055

# 基于代表性片段的新能源汽车多城市工况曲线构建优化方法

王义博, 刘海江, 魏冉

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 为了提高新能源汽车在多种城市工况下的车速循环测试效率, 对3个不同地区的新能源汽车工况曲线提出一种筛选方法并利用代表性片段对3个城市工况曲线重构。用速度、加速度等能耗相关性大的特征参数计算原始曲线的特征值并划分运动片段, 计算片段间的欧式距离并进行相似性排序; 用能耗特征信息与相似性排序结果筛选出具有代表性的片段; 用少量代表性片段组合出与原始曲线具有能耗一致性的新曲线。结果表明: 新曲线在曲线特征值、速度-加速度联合概率分布、续航里程仿真以及实车台架测试中, 均能反映原始曲线的特征, 且构建新曲线使用的片段数量远少于原曲线, 提高了测试效率。

**关键词:** 新能源汽车; 工况曲线构建; 片段筛选; 特征值计算; 曲线能耗仿真; 聚类分析

**中图分类号:** U467.1    **文献标志码:** B    **文章编号:** 1671-5276(2025)01-0270-06

## Multi-city Case Curve Constructed Optimization Method of New Energy Vehicles Based on Representative Fragments

WANG Yibo, LIU Haijiang, WEI Ran

(School of Mechanical and Power Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of the speed cycle test of new energy vehicles under various urban working conditions, this paper proposes a method which screens and uses representative fragments to reconstruct the working condition curves of new energy vehicles in three different regions. The characteristic parameters of the original working condition curves in three different regions were analyzed and calculated, the characteristic values of the original curve were calculated by using the characteristic parameters with high correlation of energy consumption such as velocity and acceleration, the motion segments were divided, and the Euclidean distance between the segments was calculated for similarity ranking. The representative segments were screened out by using the energy consumption characteristic information and the similarity ranking results, and a new curve with energy consumption consistency with the original curve was combined by using a small number of representative fragments. The results show that the new curve can reflect the characteristics of the original curve in the curve characteristic value, the velocity-acceleration joint probability distribution, the range simulation results and the real car platform test, and the number of fragments used to construct the new curve is much less than the original one, which improves the efficiency of test.

**Keywords:** new energy vehicles; construction of working condition curves; fragment screening; eigenvalue calculation; curve energy consumption simulation; cluster analysis

## 0 引言

随着环保意识的提高和政府对于新能源汽车的支持力度增加, 越来越多的消费者开始选择购买新能源汽车。然而新能源汽车的续航里程是用户关注和考虑的主要因素<sup>[1-3]</sup>。目前, 中国商用新能源汽车主要使用中国轻型车测试工况 (CLTC) 进行续航里程的测试。面对不同城市的复杂道路状况, 使用 CLTC 测试得到的续航里程无法很好地与用户实际续航体验相对应。国内外学者针对

不同城市的道路特点进行了行驶工况的研究。SUN 等<sup>[4]</sup>基于数据驱动方法构建了美国6个地区的驾驶循环工况; SALIHU 等<sup>[5]</sup>针对科索沃的路况特征和驾驶员行驶数据建立了循环工况; BRADY 等<sup>[6]</sup>构建了符合爱尔兰当地的道路工况曲线; SEERS 等<sup>[7]</sup>针对某种车型开发了行驶工况; 王楠楠<sup>[8]</sup>采用模糊均值聚类方法构建了合肥市的行驶工况; 张宏等<sup>[9]</sup>对车速区间赋予权重并构建了呼和浩特市典型汽车行驶工况; 姜平等<sup>[10]</sup>利用最大似然估计分类方法构建了合肥市的行驶

**第一作者简介:** 王义博 (1999—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向为信号处理、数据分析、智能装备制造及工艺设计, 2232675@tongji.edu.cn。

工况;李耀华等<sup>[11]</sup>通过马尔可夫蒙特卡罗方法构建了西安市城市公交行驶工况;徐婷等<sup>[12]</sup>利用改进的短行程法构建了高原山区乘用车行驶工况;CHEN 等<sup>[13]</sup>对比了 5 种常用工况构建方法,并建立了相应的指标来对驾驶工况进行评价;CUI 等<sup>[14]</sup>在传统工况构建方法上提出 MMACO 的驾驶循环优化方法。由于路况的差异性,对于汽车生产商而言,使用不同的工况曲线进行测试可以反映更真实的能耗信息,但是当目标城市增多时,测试效率和成本会随之剧增。目前针对多个目标城市进行工况曲线测试时,缺少一种既能保证工况曲线反映不同城市的一般路况特征,又能提高工况测试效率的工况曲线构建方法。

虽然不同城市的工况曲线总体上差异较大,但是不同曲线中的某一部分在能耗和特征值上具有一定的相似性,因此通过选择不同曲线中的相似部分经过变换、组合后的新曲线在工况测试中就具有了替代原曲线的作用。合理地选取片段,可以缩小变换前后曲线的差距,提高新曲线在工况测试中的合理性。因此本文提出一种新的工况曲线构建优化方法,以 3 个不同地区城市用户出行数据构建的 3 条原始工况曲线为研究对象,对其中的片段进行重新分类,计算片段间的相似性,并根据结果筛选出具有代表性的片段,替代其他片段重新合成新的城市工况曲线,并与原曲线进行对比,确保合成后的新曲线能够最大程度保留原曲线的特征信息,同时极大缩减了所用片段的数量。使用重构的新曲线进行续航测试时,不仅能够反映不同地区的工况特点确保测试的准确性,同时也减少了数据的输入,有利于提高测试效率。

## 1 曲线构建优化方法分析

### 1.1 数据来源

常用的数据采集方法主要有:平均车流统计法、车辆追踪法、自主行驶法<sup>[15]</sup>,其中,自主行驶法不需要规划特定的试验路线,由驾驶员按正常驾驶试验车辆,可获取大量的试验数据。本文采用自主行驶法采集乘用车实际道路行驶数据。通过试验车辆 CAN 总线获得车辆车架号、行驶速度、行驶里程、行车时间等车辆实时行驶工况数据。这些数据通过车载终端传输到 GPRS/Internet 网络,通过中心服务器对数据进行收集、

存贮,使用时再从服务器中提取并进行分析处理。本文选用的 3 条原始工况曲线是由国内 3 个新能源车主要分布地区的实际道路行驶数据构建所得,曲线如图 1 所示。

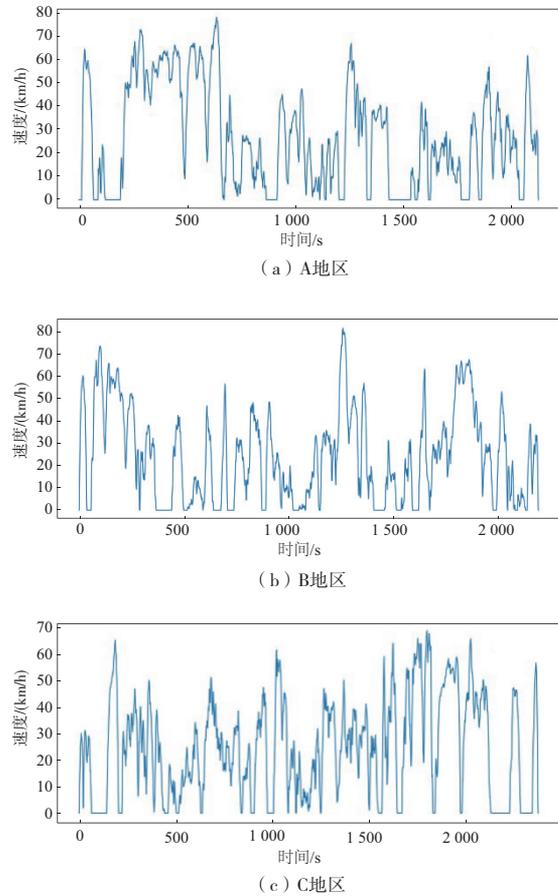


图 1 各地区工况合成曲线

### 1.2 特征值选取

对这 3 条曲线进行运动片段的重新划分,并选择合适的特征值进行描述。电车行驶过程中,电能转换为机械能产生驱动力,工况曲线测试过程,电车的驱动力方程  $F$  和车速循环功耗  $W$  如式(1)一式(2)所示。

$$F = kv^2 + ma + n \quad (1)$$

$$W = \int F dx \quad (2)$$

式中: $v$  为车速; $a$  为加速度; $k$ 、 $m$ 、 $n$  均为阻力系数。

由上述公式可以看出,速度、加速度和里程均是对功耗影响较大的因素,因此本文针对上述因素选择如表 1 所示的特征值对曲线及运动学片段进行描述。

表 1 各地区工况曲线特征参数

特征参数	A 地区	B 地区	C 地区
里程/m	15 653	14 635	16 258
总时长/s	2 127	2 194	2 379
平均速度/(km/h)	26.49	24.01	24.60
速度标准差/(km/h)	21.66	20.42	18.66
平均加速度/(m/s <sup>2</sup> )	0.49	0.51	0.53
加速度标准差/(m/s <sup>2</sup> )	0.58	0.60	0.63
车速循环功耗/(J/m)	307.11	301.49	293.78

## 2 工况曲线重构

### 2.1 片段分类

3 条曲线共 53 条运动片段。为了对这 53 个片段进行合理的分类,分别计算各片段的特征值,并组合特征值进行聚类计算<sup>[16-17]</sup>。当组合速度和车速循环功耗进行聚类时,片段的分类情况较好,如图 2 所示(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)。

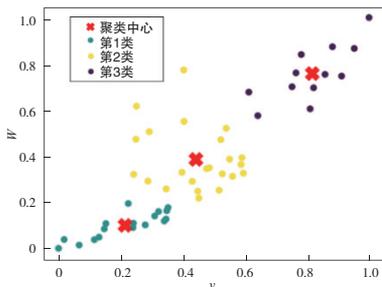


图 2 速度-车速循环功耗聚类结果

从聚类结果可以看出,53 个片段被分成 3 类,其中第 1 类代表速度和功耗较低,共 18 个片段,记为低速段;第 2 类代表速度和功耗比较适中,有 23 个片段,记为中速段;第 3 类代表速度和功耗较高的片段,共有 12 个片段,记为高速段。

### 2.2 片段筛选

为了进一步对各组内片段进行对比及筛选,找出各组内具有代表性的片段,需要对各组的片段进行相似性计算和排序。计算方法如图 3 所示,分别计算各片段间的欧式距离  $L$ ,再找出其中距离其余片段最近的片段,即为该组中具有代表性的片段。分别计算 3 类片段的代表性片段,筛选的结果如表 2 所示。

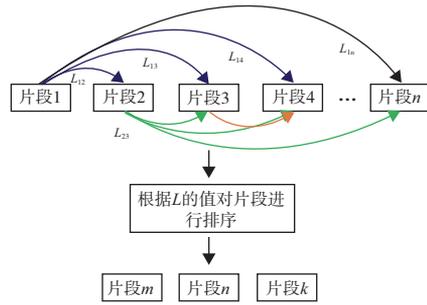


图 3 片段相似性排序方法

表 2 筛选出的代表性片段

曲线代号	片段时长/s	片段里程/m
$l_1$	24	76
$l_2$	36	105
$l_3$	50	50
$l_4$	126	508
$l_5$	52	190
$l_6$	128	408
$m_1$	164	1 022
$m_2$	149	670
$m_3$	69	461
$m_4$	62	358
$m_5$	142	738
$h_1$	130	1 241
$h_2$	252	3 034
$h_3$	159	1 633

### 2.3 曲线拼接与验证

利用筛选出的片段,按照图 4 所示的流程图进行工况曲线的重构,得到的 A、B、C 3 个地区的曲线表达式和特征值对比结果,分别如式(3)一式(5)和图 5 所示。

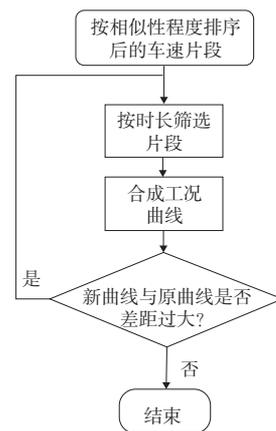


图 4 曲线拼接流程图

$$L_A = 3l_1 + 3l_2 + l_4 + l_6 + 2m_1 + m_3 + 20m_4 + 3h_3 \quad (3)$$

$$L_B = 2l_2 + 5l_3 + l_6 + 2m_2 + 2m_4 + 3m_5 + h_1 + h_2 + 3h_3 \quad (4)$$

$$L_C = 3l_1 + 4l_5 + l_6 + 3m_1 + 3m_5 + 8h_1 \quad (5)$$

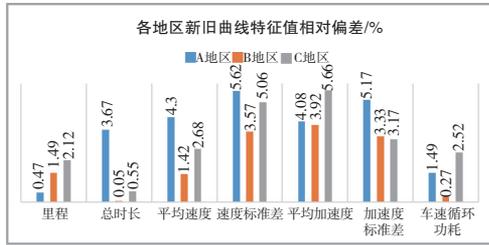


图5 曲线特征相对偏差

根据上述对比结果可以看出,新合成的曲线与原曲线的特征值对比结果差距均在±10%以内。为了进一步验证新曲线能否代表原曲线,对比新老曲线的车速-加速度联合概率分布<sup>[18]</sup>,如图6所示,新曲线与原始曲线的联合概率分布均较为相似,以联合概率分布的方均根误差(RMSE)作为指标来定量评价其相似性,如表3所示,所构建的新工况相对于原始曲线的数据均有很小的方均根误差。最终,使用了6种第1类片段,5种第2类片段以及3种第3类片段重构了3个不同地区的工况曲线,极大地缩减了工况测试时需要使用的片段数量,重构后的新曲线如图7所示。

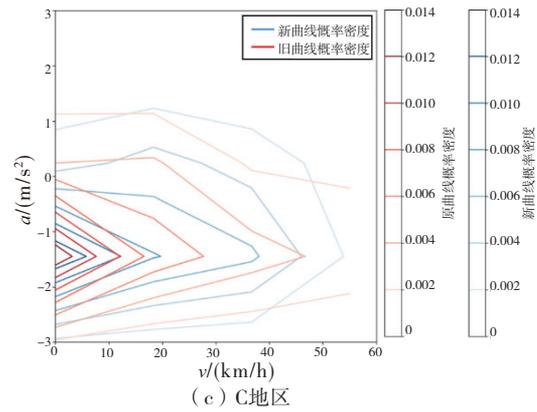
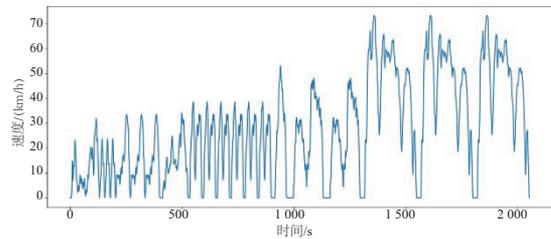


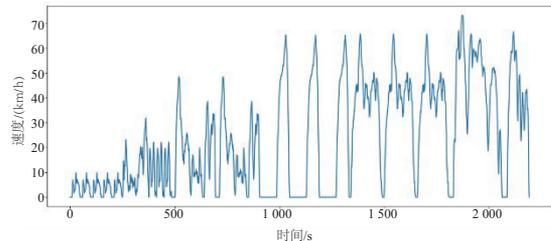
图6 速度-加速度联合概率分布对比图

表3 速度-加速度联合概率分布的方均根误差(RMSE)

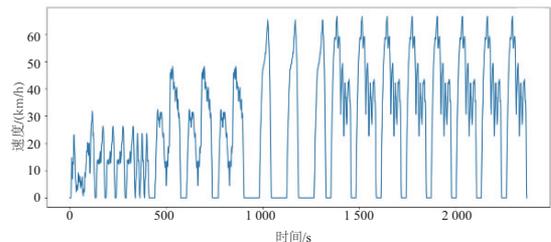
A地区	B地区	C地区
0.001 04	0.000 65	0.001 74



(a) A地区



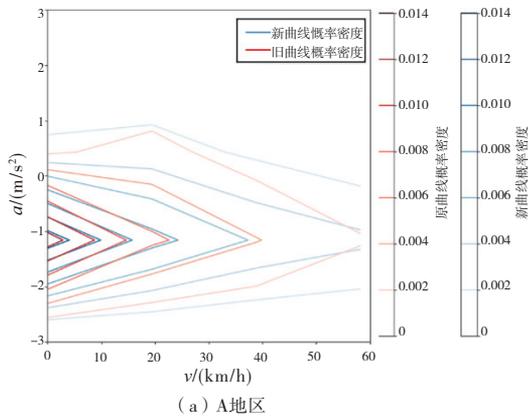
(b) B地区



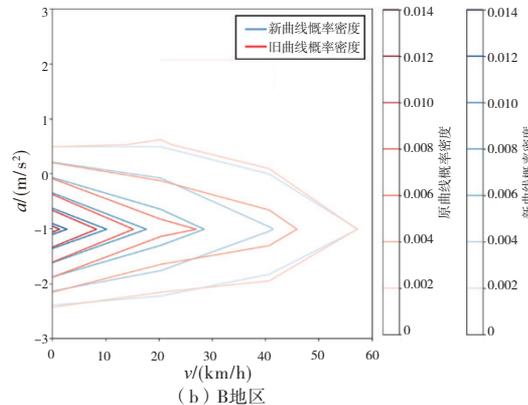
(c) C地区

图7 各地区新合成曲线图

筛选后的14个片段,低中速段的片段数量明显多于高速段,原因主要是:1)3个地区的所有片段中,低中速的片段数量较多,且片段间的差异相对更大;2)高速片段代表的一般是距离较长且行驶平稳的路况,因此片段之间的差异性更小;3)本文数据源是新能源车的城市实车道路数据,城市



(a) A地区



(b) B地区

道路中高速工况占比较少。

### 2.4 能耗仿真验证

利用 AVL-Cruise 软件对新能源车的传动系统、电池模块、电机模块以及能量回收模块进行仿真建模<sup>[19]</sup>,并输入 3 个地区的新合成曲线与原曲线进行续航里程和耗电量的仿真模拟实验,仿真模型主要的模块及连接如图 8 所示,仿真结果如表 4 所示。3 个地区新合成曲线的续航里程仿真结果相较于原曲线,偏差均在 5% 以内,表明新合成的曲线在能耗上能够较好地反映原工况曲线。

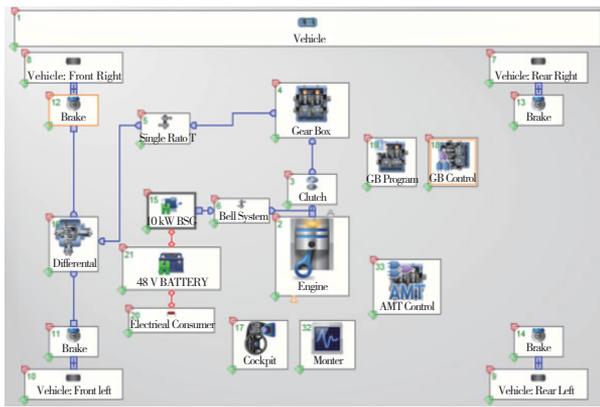


图 8 仿真模块布置图

表 4 续航仿真结果对比

地区	单位续航里程/(km/kWh)		相对偏差/%
	原曲线	新曲线	
A	14.47	13.76	-4.9
B	13.86	13.99	0.9
C	14.01	13.42	-4.2

### 2.5 台架测试验证

为了进一步对比验证新合成曲线的合理性和有效性,对新旧曲线进行实车台架测试试验,对比二者的实车台架测试续航结果。台架测试试验台的功能模块主要包括电力测功机系统、冷却系统、电池模拟器、功率分析仪、自动控制系统及被测电机系统、环境仓等,场景搭建如图 9 所示。台架试验主要测试原曲线整体的续航里程、新曲线整体的续航里程以及新曲线各片段的续航里程,测试流程如图 10 所示,测试结果如表 5 所示。3 个地区新曲线的实车台架测试续航结果相较于原曲线,偏差均在 5% 以内,这证明新曲线能够代表原曲线进行能耗测试。



图 9 台架测试系统

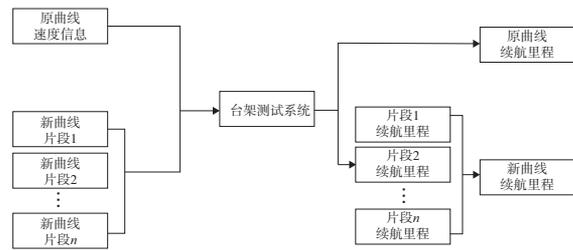


图 10 曲线测试流程

表 5 续航实车测试结果对比

地区	单位续航里程/(km/kWh)		相对偏差/%
	原曲线	新曲线	
A	15.37	14.93	-2.9
B	14.43	14.87	3.0
C	14.97	14.66	-2.1

## 3 结语

本研究以 3 个不同地区城市道路数据构建的工况曲线为研究对象,依据速度、加速度、车速循环功耗等与新能源车续航测试相关性较大的特征参数对 3 个地区原始曲线中的片段进行重新分类,计算每类片段集中各曲线特征值的欧式距离进行相似性排序,并参照相似性排序和原曲线特征筛选出代表性片段,利用代表性片段重新组合出与原曲线差异较小的新曲线,并从特征值对比、速度-加速度联合概率分布、整车能耗仿真以及实车台架测试 4 个方面对新老曲线进行对比验证。结果表明,新曲线不仅保留了原曲线蕴含的信息,同时极大地减少了使用片段的数量,提高了新能源车循环工况测试实验的效率,同时也为其他城市构建典型道路工况提供了参考。

## 参考文献:

- [1] 马建,刘晓东,陈轶嵩,等. 中国新能源汽车产业与技术发展现状及对策[J]. 中国公路学报,2018,31(8): 1-19.
- [2] LIU Y H, LU K F, PENG Z R, et al. Autonomous shuttle acceptance in an American suburban context; a revealed preference study in Lake Nona, Florida [J]. Travel Behaviour and Society, 2024, 37: 100865.
- [3] 唐葆君,王翔宇,王彬,等. 中国新能源汽车行业发展水平分析及展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019, 21(2): 6-11.
- [4] SUN R J, TIAN Y X, ZHANG H B, et al. Data-driven synthetic optimization method for driving cycle development[J]. IEEE Access, 2019, 7: 162559-162570.
- [5] SALIHU F, DEMIR Y K. Driving cycle for passenger cars on urban roads in pristina, Kosovo [J]. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2023, 18(1): 69-93.
- [6] BRADY J, O'MAHONY M. Development of a driving cycle to evaluate the energy economy of electric vehicles in urban areas[J]. Applied Energy, 2016, 177: 165-178.
- [7] SEERS P, NACHIN G, GLAUS M. Development of two driving cycles for utility vehicles [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 41: 377-385.
- [8] 王楠楠. 城市道路行驶工况构建及油耗研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [9] 张宏, 姚延钢, 张露. 呼和浩特市轻型汽车运行工况构建研究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(11): 104-110.
- [10] 姜平, 石琴, 陈无畏. 基于马尔科夫的城市道路行驶工况构建方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 26-30.
- [11] 李耀华, 任田园, 邵攀登, 等. 基于马尔可夫链的西安市城市公交工况构建[J]. 中国科技论文, 2019, 14(2): 121-128.
- [12] 徐婷, 崔世超, 刘明, 等. 高原山区乘用车行驶工况构建方法研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(2): 117-124.
- [13] CHEN Z Y, FANG Z Y, ZHANG Q, et al. Constructing the real-world driving cycle for electric vehicle applications: a comparative study [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2022: 014233122210943.
- [14] CUI Y P, ZOU F M, XU H, et al. A novel optimization-based method to develop representative driving cycle in various driving conditions [J]. Energy, 2022, 247: 123455.
- [15] 胡志远, 秦艳, 谭丕强, 等. 基于大样本的上海市乘用车行驶工况构建[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(10): 1523-1527.
- [16] 曾小荣, 孔令文, 杨学易, 等. 主成分分析在车辆行驶工况中的应用[J]. 汽车实用技术, 2014(5): 5-9.
- [17] 潘登. 混合动力汽车城市循环工况构建及运行工况多尺度预测[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [18] 王绪, 李睿, 黄英, 等. 考虑不同路面特征的军用履带车辆循环工况构建[J]. 兵工学报, 2024, 45(3): 907-915.
- [19] 黄鼎友, 曾文杰, 曾发林. 某纯电动汽车动力系统参数匹配与仿真分析[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(6): 130-133.

收稿日期: 2024 - 07 - 17

(上接第 260 页)

## 参考文献:

- [1] 吕良和. 液压驱动关节的自适应鲁棒速度控制研究[J]. 国防交通工程与技术, 2023, 21(3): 8-12.
- [2] 王耀武, 张得礼, 胡雪刚. 基于自适应阻抗模型的双机器人协调搬运内力控制[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(6): 162-165.
- [3] 仲宇翔, 林鹤云, 王激尧, 等. 基于滑模控制的记忆电机调磁转速波动抑制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2512-2521.
- [4] 陈祥文, 李海涛. 带有谐波减速器的框架系统速度波动抑制[J]. 光学精密工程, 2022, 30(20): 2457-2466.
- [5] 李克讷, 马玉如, 王温鑫, 等. 基于伪逆的冗余度机械臂关节速度约束方案[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 225-233.
- [6] 卢浩, 郭士杰, 杨志强, 等. 2R 耦合驱动关节动力学建模与参数辨识[J]. 机械工程学报, 2022, 58(23): 51-64.
- [7] 仇斌权, 陈思鲁, 古莹奎, 等. 面向能耗最优的机器人关节梯形速度轨迹同步规划[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(4): 32-36, 42.
- [8] 王冲冲, 杨桂林, 陈庆盈, 等. 基于自适应干扰估计器的协作机器人关节速度波动抑制方法[J]. 机器人, 2023, 45(1): 48-57.
- [9] 谢能斌, 辛绍杰. 基于 PSO-SA 的机器人关节空间轨迹规划[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(1): 122-128.
- [10] 王清清, 奚琳. 基于 SSD 的码垛机械臂关节速度纠偏运动规划[J]. 计算机仿真, 2021, 38(7): 340-344.

收稿日期: 2023 - 09 - 19