

基于遗传算法优化模糊控制器的 电动汽车复合电源能量管理策略

朱峰¹, 王朋波², 刘永辉^{1*}

1. 山东交通学院汽车工程学院, 山东 济南 250357; 2. 山东飞控信息科技有限公司, 山东 济南 250013

摘要:为了合理分配电动汽车动力电池和超级电容器的实际输出功率并延长电池寿命,基于 MATLAB/Simulink 仿真对比新欧洲驾驶循环(new European driving cycle, NEDC)工况下,逻辑门限控制策略、模糊控制策略、遗传算法(genetic algorithm, GA)优化模糊控制策略下的复合能量管理系统和整车行驶性能。仿真结果表明:GA 优化模糊控制策略有效减小动力电池荷电状态下下降速度及动力电池温度上升速度,提高车辆续航里程;相比模糊控制策略,优化后电动汽车续航里程增大 12.1 km,最大爬坡性能提高 0.3%,最高车速提高 0.2 km/h;相比逻辑门限控制策略,优化后电动汽车续航里程增大 18.8 km,最大爬坡度提高 0.6%,最高车速提高 0.6 km/h。

关键词:纯电动汽车;复合电源;遗传算法;模糊控制

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)02-0032-06

引用格式:朱峰,王朋波,刘永辉.基于遗传算法优化模糊控制器的电动汽车复合电源能量管理策略[J].内燃机与动力装置,2025,42(2):32-37.

ZHU Feng, WANG Pengbo, LIU Yonghui. Composite power energy management strategy for electric vehicle based on optimized fuzzy controller of genetic algorithm[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(2): 32-37.

0 引言

随着全球双碳战略深入推进及环境保护标准提高,新能源汽车作为传统燃油车的重要替代方案,在能源结构调整中发挥着关键作用^[1]。新能源汽车多采用锂电池作为动力电池能量来源,但随着充放电次数的增加,电池会出现寿命衰减、容量下降、内阻增大、低温性能及充电效率降低等问题,导致车辆动力性与经济性大幅降低^[2]。超级电容器功率密度可达 10 kW/kg,能量回收效率大于 95%,工作温度为-40~70℃,由超级电容器与动力电池组成的复合电源储能系统可避免动力电池的上述缺点,显著提高电池脉冲电流稳定性,延长电池使用寿命^[3]。

基于动态工况的能量管理策略利用动力电池比能量高、超级电容器比功率高的特性,合理分配动力电池和超级电容器的功率,是复合电源储能系统的设计重点,众多学者对此开展了大量研究。专祥涛等^[4]采用逻辑门限控制策略分配动力电池与超级电容器的功率,有效提高了电池寿命,延长了续航里程。Shen 等^[5]使用模糊控制解决了电动汽车由于高电流频繁变化导致的电池容量衰减问题,但由于模糊控制器的局限性,不能时刻保持最优的控制效果,应结合优化算法,自适应调整控制参数,提高隶属度函数的适应度。Tifour 等^[6]通过粒子群优化模糊控制的方法设计能源管理系统,使混合动力汽车燃油经济性提高了 7.5%,但粒子群算法缺乏变异机制,种群多样性损失率超过 40%,在迭代后期易出现局部最优问题。遗传算法模拟生物进化过程,采用锦标赛选择、两点交叉、高斯变异等操作,维持种群多样性,使基因型差异

收稿日期:2025-02-26

第一作者简介:朱峰(2001—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要研究方向为道路交通运输,E-mail:2692107315@qq.com。

* 通信作者简介:刘永辉(1981—),男,山东威海人,教授,主要研究方向为智慧能源及工业物联网控制、传感及测试技术、CFD 数值分析等,E-mail:lyh1981@139.com。

度大于 65%,全局寻优成功率达 92.3%,特别适合解决多峰值的非线性优化问题,避免出现局部最优问题。

本文中采用遗传算法优化模糊控制器对动力电池和超级电容器进行功率分配;采用 MATLAB/Simulink 软件对优化后的模糊控制器进行建模分析,结合 ADVISOR 中纯电动汽车模块,仿真对比新欧洲驾驶循环(new European driving cycle, NEDC)工况下,控制策略对动力电池及整车性能的影响,并提出最优控制策略。

1 复合电源能量分配模式

根据车辆在 NEDC 工况下动力电池和超级电容不同的工作状态,将复合电源的工作模式分为动力电池单独提供整车能量、超级电容器单独提供整车能量、超级电容器与动力电池共同提供整车能量及能量回收 4 种模式^[7]。不同模式的能量流向如图 1 所示,图中变换器为直流(direct current, DC)/DC 变换器^[8]。

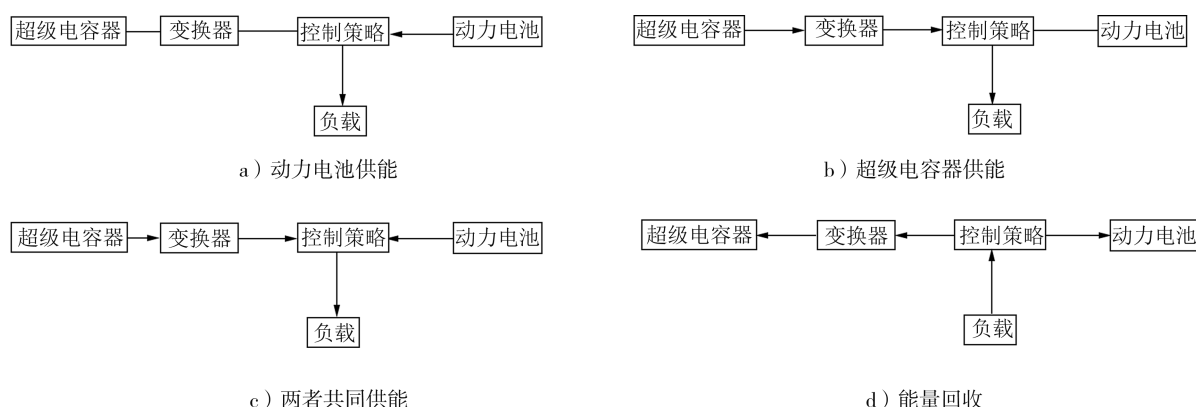


图1 不同模式的能量流向

当汽车匀速或低速行驶时,驱动电机需求功率较小,可利用动力电池比能量较高的特性,由动力电池单独长时间为整车提供能量;当驱动电机需求功率瞬时增大时,可利用超级电容器比功率较高、大电流下充放电较快的优势^[9],由超级电容器单独提供整车能量,延长电池使用寿命;当车辆加速、超车或爬坡时^[10],电机需求功率急剧增加,可由超级电容器辅助动力电池共同输出驱动电机需要的大电流、高功率,两者共同提供整车能量以维持动力电池工作电流相对稳定;当车辆刹车或减速时,车辆动能转化为制动能,此时电机工作在发电模式,电机吸收部分制动能,利用超级电容在短时间内吸收大电流、快速充放电的特性,在超级电容器荷电状态(state of charge, SOC)未达到 100%时,由超级电容器优先吸收电机发电能量,至 SOC 达到 100%后,再由动力电池吸收剩余能量。

2 控制策略及仿真结果

2.1 逻辑门限控制策略

采用逻辑门限控制策略进行能量控制,主要确定规则以管理复合电源动力汽车中的能量分配^[11]。逻辑门限控制策略将车辆驱动模式和制动模式分开,计算驱动状态或制动状态下汽车平均功率 P_a 、汽车实际状态功率 P_s 、整车需求功率 P_r 、电池荷电状态 S_b 、超级电容器荷电状态 S_c 及超级电容器最小荷电状态 $S_{c,min}$,结合动力电池与超级电容器的荷电状态分析,将整车需求功率合理分配给动力电池和超级电容器。该策略可提高能量使用效率,确保车辆在行驶过程中保持最佳性能^[12]。

驱动状态下对比 P_s 、 P_a 决定汽车供能模式:1) 当 $P_s < P_a$,整车需求功率较小,由动力电池直接提供车辆动力来源;2) 当 $P_s \geq P_a$,整车需求功率较大,能量控制系统优先使用超级电容器供电,若 $S_c > S_{c,min}$,需设置滤波函数将部分整车需求功率分给超级电容器,其余功率由动力电池提供;若 $S_c \leq S_{c,min}$,直接由动力电池

池提供车辆动力来源。

制动状态下对比 P_r 、 P_a 决定汽车供能模式,控制系统优先为超级电容器充电,剩余电量再充入动力电池:1)当 $P_r > P_a$ 时,控制系统优先给超级电容器充电。2)当 $P_r \leq P_a$ 时,控制系统首先判断超级电容器是否满电,若不满电优先给超级电容器充电,剩余电量给动力电池充电;若满电,直接给动力电池充电。

2.2 模糊控制策略

模糊控制策略是一种基于模糊逻辑的控制方法,通过定义模糊规则和隶属度函数控制系统参数,用于处理复杂、模糊或不确定信息的系统。

模糊控制策略将汽车分为驱动、制动两种状态^[13],两种状态下均将超级电容器功率比例因数(整车需求功率分配给超级电容器的比例) k_c 作为输出端,当车辆为驱动状态时, S_c 、 S_b 、 P_r 为输入端,车辆为制动状态时, S_b 、 S_c 为输入端。采用 Simulink 设计基于模糊控制的复合能量源控制模型,控制流程如图 2 所示,图中红色方框部分 P_r 只作为驱动状态输入端。输入参数经模糊控制器采用模糊规则计算后,输出 k_c 至功率分配器,使其动态分配超级电容器与动力电池的功率,提高能量管理效率。

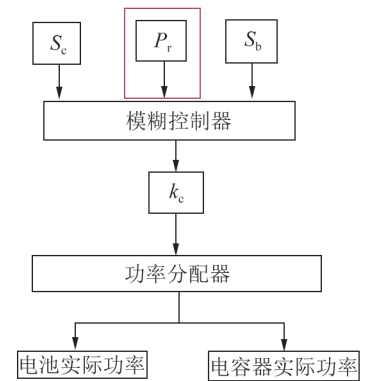


图 2 复合能量源控制流程

2.2.1 模糊论域及子集

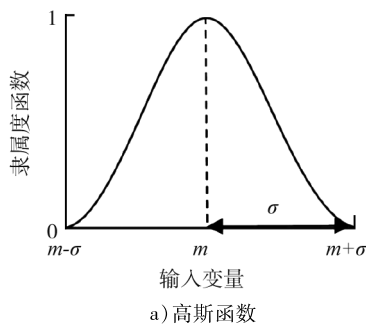
S_c 、 S_b 、 P_r 、 k_c 的模糊论域分别为 $[0.2, 1]$ 、 $[0.2, 1]$ 、 $[0, 1]$ 、 $[0, 1]$, 根据各参数的模糊论域建立模糊控制器, 车辆驱动、制动状态下, 各参数对应的模糊子集如表 1 所示, 表中 W 、 S 、 M 、 B 、 H 分别表示模糊子集较小区间、低值区间、中值区间、高值区间、较大区间。

2.2.2 隶属度函数

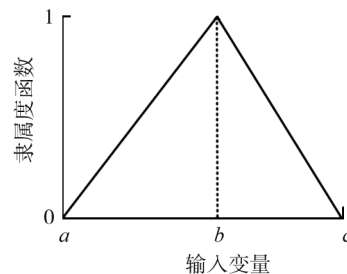
隶属度函数用 0~1 表示一个参数或元素属于某个模糊集合的程度, 允许渐进式的归属关系。模糊控制器中的隶属度函数有高斯函数、三角函数两种类型。两种隶属度函数示意如图 3 所示。

表 1 车辆驱动、制动状态下各参数的模糊子集

参数	驱动状态模糊子集	制动状态模糊子集
S_c	$\{S, M, B\}$	$\{W, S, M, B\}$
S_b	$\{S, M, B\}$	$\{S, M, B\}$
P_r	$\{W, S, M, B, H\}$	
k_c	$\{W, S, M, B, H\}$	$\{W, S, M, B\}$



a) 高斯函数



b) 三角函数

图 3 两种隶属度函数示意

由图 3 可知:高斯函数隶属度主要由输入变量参数中心 m 和参数宽度 σ 决定;三角函数隶属度主要由输入参数下限边界 a 、典型输入参数 b 、输入参数上限边界 c 决定。高斯函数中的 m 、 σ 及三角函数中的 a 、 b 、 c 为遗传算法的优化参数。

车辆驱动状态下, S_b 的全部模糊子集, S_c 的模糊子集 S 、 B 、 P_r 的模糊子集 W 、 H 、 k_c 的模糊子集 W 、 H 的隶属度函数均为高斯函数; S_c 的模糊子集 M 、 P_r 的模糊子集 S 、 M 、 B 、 k_c 中的模糊子集 S 、 M 、 B 的隶属度函数均为三角函数。车辆制动状态下, S_b 的全部模糊子集, S_c 及 k_c 中的模糊子集 W 、 B 的隶属度函数均为高斯函数, S_c 及 k_c 中的模糊子集 S 、 M 的隶属度函数均为三角函数。

2.2.3 模糊规则

根据复合电源中各部件的工作模式及工作特性,结合动力电池与超级电容器的优势,制定驱动、制动状态下的模糊规则,通过模糊规则动态调整 k_c ,实现汽车驱动状态下动力电池和超级电容器间的最优功率分配,确保复合电源系统高效稳定运行。

驱动状态模糊控制规则如表2所示。由表2可知:驱动状态下,当 S_b 模糊子集较大且 P_r 模糊子集较小时,此时 k_c 较小,动力电池承担更多输出功率;当 P_r 模糊子集增大时, k_c 增大,超级电容器承担更多输出功率; S_c 直接影响 k_c , S_c 较大时, k_c 增大; S_c 较小时, k_c 减小。

制动状态下,为实现制动能量的合理分配,确保动力电池和超级电容器的安全性与高效性, S_b 较大时,为避免动力电池过充, k_c 增大,超级电容器吸收更多制动能量; S_b 较小时, k_c 减小,动力电池吸收更多能量以补充电量; S_c 影响 k_c , S_c 较大时, k_c 减小,避免电池过充; S_c 较小时, k_c 增大,优先利用电容器高功率特性吸收能量。制定制动状态模糊规则为: S_c 对应的子集分别为 W 、 S 、 M , S_b 对应的子集分别为 S 、 M 、 B 时, k_c 均为 B ; S_c 对应的子集为 B , S_b 对应的子集分别为 S 、 M 、 B 时, k_c 均为 W 。

表2 驱动状态模糊控制规则

S_c	S_b	k_c				
		$P_r=W$	$P_r=S$	$P_r=M$	$P_r=B$	$P_r=H$
S	S	W	W	S	S	S
	M	W	W	S	S	S
	B	W	W	S	S	S
M	S	W	S	M	M	B
	M	W	W	M	B	H
	B	W	W	M	B	H
B	S	W	S	M	B	H
	M	W	S	M	B	H
	B	W	W	M	B	H

2.3 基于遗传算法优化模糊控制器

模糊控制器依赖于专家经验定义控制规则和模糊集合,在实际应用中,由于客观因素(如系统动态变化)的影响导致控制器控制效果不稳定^[14]。本文中采取遗传算法(genetic algorithm, GA)优化模糊控制器隶属度函数,弱化客观因素的影响,提高控制器灵活性,达到高效、稳定的控制效果。

2.3.1 目标函数

车辆能量消耗率是评价电动汽车经济性与能效水平的重要指标,反映车辆在行驶过程中单位里程或单位时间消耗的电能,与整车质量、驱动系统效率、行驶工况、环境温度等密切相关。车辆能量消耗率

$$C=E/d, \quad (1)$$

式中: E 为汽车充电电量, $W \cdot h$; d 为一个工况行驶的距离, km 。

复合电源系统优化的目标函数为:

$$f=\min(k_d C), \quad (2)$$

式中: k_d 为权重因数, $k_d=0.005$ 。

2.3.2 遗传算法流程

遗传算法流程如图4所示^[15]。

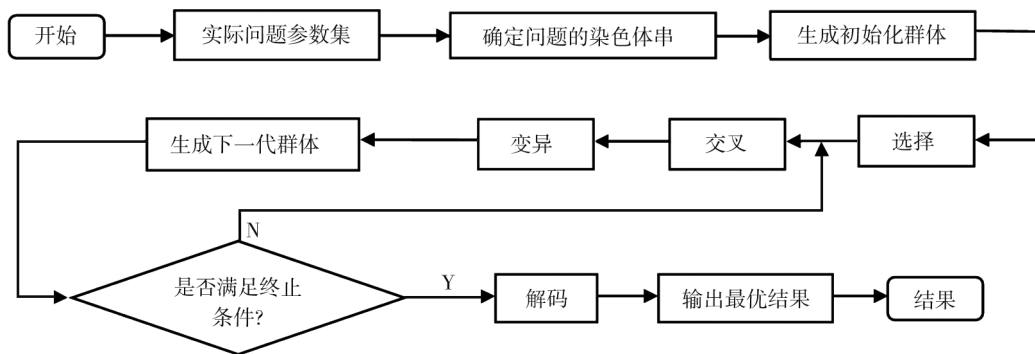


图4 遗传算法流程

将模糊控制器的隶属度函数参数采用实数编码生成染色体,并随机生成初始化群体;通过 ADVISOR 平台在 NEDC 工况下仿真,以能量消耗率 C 为核心,结合式(2)评估适应度;采用遗传算法中的锦标赛选择机制(压力因数为 1.5)、两点交叉进行重组(交叉概率为 0.8)和高斯变异(变异概率为 0.1)迭代优化参数,形成“参数优化-仿真验证-反馈迭代”闭环,输出最优参数组合。

2.3.3 遗传算法优化模糊控制

遗传算法优化模糊控制器的原理如图 5 所示。

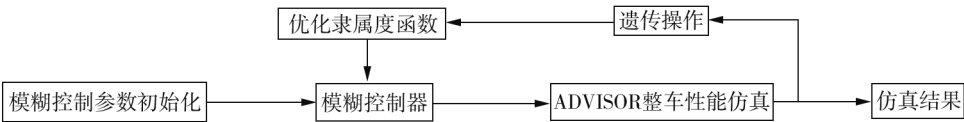


图 5 遗传算法的优化原理

以驱动状态为例,将模糊控制器的 S_e 、 S_b 、 P_r 视为个体基因,通过优化隶属度函数确定输入、输出变量的模糊化规则,将模糊控制参数初始化以构建模糊控制策略;模糊控制器根据实时需求生成控制指令,驱动系统运行;采用遗传操作(选择、交叉、变异)动态调整输入参数,提高控制稳定性;优化后的参数输入 ADVISOR 整车仿真模块,模拟计算车辆动力性与经济性参数;仿真结果通过量化指标评估参数优劣,并作为适应度反馈至遗传算法,触发参数再次优化,形成“参数优化→仿真验证→反馈迭代”的闭环流程,实现能耗最低或动力平衡等预设目标。该流程结合遗传算法的全局寻优能力与模糊控制的动态适应性,多次迭代获得整车性能最优解。

2.4 仿真结果分析

NEDC 工况规定了标准的测试循环及测试环境,确保不同车型测试数据的可比性,NEDC 仿真工况如图 6 所示。为了验证遗传算法优化模糊控制器的有效性,基于 NEDC 工况,结合 ADVISOR 平台纯电动汽车模块,分别使用逻辑门限控制、模糊控制、遗传算法优化模糊控制 3 种策略对复合能量源系统进行仿真,对比动力电池温度和动力电池 SOC 评价控制策略的有效性。不同控制策略下的电池温度、SOC 对比如图 7 所示。

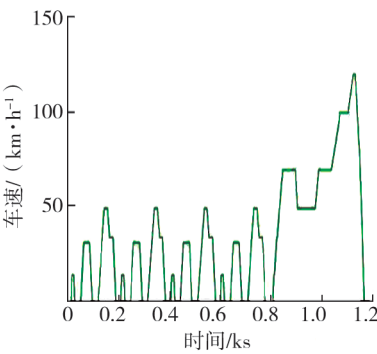


图 6 NEDC 仿真工况

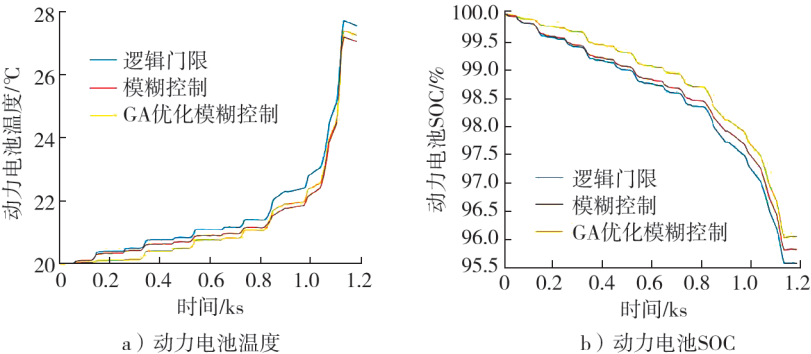


图 7 不同控制策略下的电池温度、SOC 对比

由图 7 可知:基于逻辑门限控制策略,动力电池 SOC 下降速度较快、温度上升明显;经过遗传算法优化后的模糊控制策略可有效地降低动力电池 SOC 下降速度以及温度上升的速度,提高车辆的续航里程。不同控制策略汽车性能仿真结果如表 3 所示。

表 3 不同控制策略汽车性能仿真结果

策略类型	续航里程/km	加速性能/%	爬坡性能/%	最大车速/(km·h ⁻¹)
逻辑门限控制策略	237.2	2.8	32.2	157.4
模糊控制策略	243.9	2.8	32.5	157.8
GA 优化模糊控制策略	256.0	2.9	32.8	158.0

由表3可知:采用基于遗传算法优化模糊控制策略,电动汽车的整体性能较优,对比单一模糊控制策略,电动汽车续驶里程增加12.1 km,最大爬坡性能提高0.3%,最大车速增加0.2 km/h;对比逻辑门限控制策略,电动汽车续驶里程增加18.8 km,最大爬坡提高0.6%,最大车速提高0.6 km/h。

采用遗传算法优化模糊控制器隶属度函数后,控制器决策能力增强,响应速度加快,动态性能改善,稳定性、适应性和鲁棒性显著提高,能更好地应对复杂工况,实现更高效、更稳定的控制效果。

3 结论

1) 逻辑门限控制策略将车辆分为驱动、制动两种状态。驱动状态下,通过比较汽车实际状态功率与汽车平均功率决定供能模式,制动状态下,通过比较整车需求功率与汽车平均功率决定供能模式。

2) 模糊控制策略将车辆分为驱动、制动状态。驱动状态将超级电容器荷电状态、电池荷电状态、整车需求功率作为输入端,制动状态将超级电容器荷电状态、电池荷电状态作为输入端;驱动、制动状态均将超级电容器功率比例因数作为输出端。

3) 基于遗传算法优化模糊控制策略以车辆能量消耗率作为核心指标,增加遗传算法操作,将优化后的参数输入 ADVISOR 整车仿真模块,再将仿真结果反馈至遗传算法,形成“参数优化-仿真验证-反馈迭代”的闭环流程。

4) 不同控制策略对电动汽车整体性能影响较大,NEDC 循环工况下,对比逻辑门限控制、模糊控制和基于遗传算法优化模糊控制3种策略整车性能仿真控制结果,采用基于遗传算法优化模糊控制策略时电动汽车性能提高效果最明显,其次是模糊控制策略、逻辑门限控制策略。

参考文献:

- [1] 周振云.采取有效技术对策降低汽车排放污染探讨[J].时代汽车,2023(3):13-15.
- [2] WANG W, LI Y, SHI M, et al. Optimization and control of battery-flywheel compound energy storage system during an electric vehicle braking[J]. Energy, 2021, 226: 120404.
- [3] SILVA L C A, ECKERT J J, LOURENÇO M A M, et al. Electric vehicle battery-ultracapacitor hybrid energy storage system and drivetrain optimization for a real-world urban driving scenario[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2021, 43(5): 1-15.
- [4] 专祥涛,崔婷婷.电动汽车复合电源系统能量管理研究[J].电源技术,2020,44(4):549-552.
- [5] SHEN Y P, LI Y F, TANG Y H, et al. An energy management strategy based on fuzzy logic for hybrid energy storage system in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2022, 17(1): 53-60.
- [6] TIFOUR B, BOUKHIFER M, HAFIFA A, et al. An optimal fuzzy logic control for a fuel cell hybrid electric vehicle based on particle swarm and advisor[C]//Proceedings of IEEE Green Technologies Conference. Denver, USA: IEEE, 2021: 148-154.
- [7] 胡杰,王明,刘迪,等.基于交通信息的复合电源系统控制策略优化[J].汽车工程,2021,43(5):675-682.
- [8] 李蕊,程诗尧,罗义钊,等.适用于可再生能源系统的新型高压DC/DC变换器[J].电子器件,2022,45(5): 1174-1181.
- [9] 张雷,胡晓松,王震坡.超级电容管理技术及在电动汽车中的应用综述[J].机械工程学报,2017,53(16):32-43.
- [10] 张卫,杨珏,张文明,等.纯电动汽车蓄电池-超级电容复合能源系统研究[J].电测与仪表,2019,56(3):82-90.
- [11] 王红艳,张文倩.改进型逻辑门限混合储能系统控制策略研究[J].智慧电力,2020,48(5):41-46.
- [12] 赵靖纹.纯电动汽车复合储能系统及其能量控制策略的研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
- [13] 姬浩然.基于模糊控制的永磁同步电机控制系统研究[J].科技创新与应用,2021,11(34):28-31.
- [14] 王浩,施卫,蒋龙,等.遗传算法优化模糊控制的纯电动汽车制动力分配控制策略[J].电子制作,2019(21):58-60.
- [15] 马一丁,张多纳,焦展宇,等.基于遗传算法的基站选址技术研究[J].电子技术与软件工程,2022(23):25-30.

(下转第44页)

characteristic values, and the influence of different engine operation speeds, output torque, oil temperatures and main bearing clearances on each time-domain characteristic value are analyzed. The experimental results show that the time-domain characteristic and the peak value of combustion pressure increases with the increase of engine speed, torque and main bearing clearance increases, the time-domain characteristic and the peak value of combustion pressure decreases with the rise of oil temperature.

Keywords: crankshaft main bearing; abnormal wear; block vibration; time-domain analysis

(责任编辑:胡晓燕)

.....
(上接第 37 页)

Composite power energy management strategy for electric vehicle based on optimized fuzzy controller of genetic algorithm

ZHU Feng¹, WANG Pengbo², LIU Yonghui^{1*}

1. School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shandong Flight Control Information Technology Co., Ltd., Jinan 250013, China

Abstract: In order to allocate the actual output power of electric vehicle power batteries and supercapacitors reasonably and extend the life of batteries, MATLAB/Simulink software is used to simulate and compare the composite energy management system and vehicle driving performance under the logic threshold control strategy, fuzzy control strategy, and genetic algorithm (GA) optimized fuzzy control strategy under the new European driving cycle (NEDC) operating conditions. The simulation results show that the GA optimized fuzzy control strategy effectively reduces the rate of decrease in the state of charge of the power battery and the rate of temperature rise of the power battery, and improves the driving range of the vehicle. Compared with the fuzzy control strategy, the optimized electric vehicle has an increased driving range of 12.1 km, improved maximum climbing performance by 0.3%, and increased maximum speed by 0.2 km/h. Compared with the logic threshold control strategy, the driving range of electric vehicles is increased by 18.8 km, the maximum climbing slope is increased by 0.6% and maximum speed is increased by 0.6 km/h.

Keywords: pure electric vehicle; composite power supply; genetic algorithm; fuzzy control

(责任编辑:胡晓燕)