

商用车氢燃料电池混合动力系统评估模型构建

孙文¹, 王霞², 陈建伟¹, 白书战^{1*}, 李国祥¹

1. 山东大学核科学与能源动力学院, 山东 济南 250061; 2. 中国重型汽车集团有限公司, 山东 济南 250000

摘要:通过理论建模、仿真分析和试验验证,全面评估燃料电池混合动力商用车的动力性能与经济性能。从整车动力学出发,分析驱动力、阻力与车辆运动状态之间的动态关系,结合燃料电池、动力电池和电机的特性,建立精确的整车纵向动力学模型和动力总成多层次模型;设计基于规则的能量管理策略,实现燃料电池与动力电池间的动态功率分配。实际路谱工况的仿真结果与试验数据的对比表明:模型在车速、电机功率、燃料电池功率、动力电池功率等方面的相对误差均小于5%,所建模型精度高且能量管理策略有效。研究结果可为燃料电池混合动力商用车的性能优化和能量管理策略开发提供参考。未来将进一步探索基于数据驱动的动力系统策略,以提高动力对复杂工况的适应能力。

关键词:商用车;氢燃料电池混合动力;仿真模型;能量管理策略;功率

中图分类号:U469.7

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)04-0069-06

引用格式:孙文,王霞,陈建伟,等. 商用车氢燃料电池混合动力系统评估模型构建[J]. 内燃机与动力装置, 2025,42(4):69-74.

SUN Wen, WANG Xia, CHEN Jianwei, et al. Evaluation model of hydrogen fuel cell hybrid power system for a commercial vehicle[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025,42(4):69-74.

0 引言

在双碳战略和智能制造持续推进的背景下,新能源汽车产业已成为全球汽车工业技术变革和绿色转型的重要方向^[1]。动力系统作为新能源汽车的核心,其性能直接关系到汽车的安全性、经济性、动力性与智能化水平^[2]。相比传统燃油汽车,新能源汽车动力系统结构复杂,能量转换链路多样,涉及电机、电池、驱动、控制系统等多个子系统的高度耦合,工况变化剧烈,非线性特性突出。精准的数学模型对新能源汽车整车及动力系统的设计优化、性能仿真、控制策略开发与状态预测具有基础性和战略性意义^[3-4]。

当前,新能源汽车整车及动力系统的建模方法主要包括物理建模、数据驱动建模以及混合建模。物理建模侧重于系统机理和动力学过程的物理规律表达,虽便于参数解析和机理分析,但在高维复杂系统中存在建模与标定工作量大、实时性受限等问题;数据驱动建模依赖大数据和人工智能算法,能够捕捉系统运行中的非线性和时变特性,但对数据质量和场景泛化能力要求较高;混合建模方法通过机理与数据的深度融合,兼顾了物理解释性与建模灵活性,是当前新能源汽车领域高精度建模的研究热点^[5-6]。

面对复杂多变的实际工况与快速演进的新能源技术,新能源汽车整车及动力系统的精确建模在参数辨识、模型结构选择、多物理场耦合、动态特性捕捉、模型自适应等方面仍面临诸多挑战^[7],亟需开展系统性、前瞻性的研究,构建涵盖整车、动力总成及其关键部件的多层次、多尺度、高精度建模体系,为整车性

收稿日期:2025-07-01

基金项目:山东省重点研发计划项目(2020CXGC010406)

第一作者简介:孙文(1993—),男,山东烟台人,工学博士,主要研究方向为新能源汽车动力系统控制,E-mail:727223768@qq.com。

*通信作者简介:白书战(1979—),男,山东莘县人,工学博士,教授,博士生导师,主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制技术、整机开发与可靠性技术及新能源汽车技术,E-mail:baishuzhan@sdu.edu.cn。

能优化、能量管理及智能控制等提供坚实的理论基础与工程支撑^[8]。

基于上述研究背景,本文中针对燃料电池氢电混动商用载货汽车,系统开展整车纵向动力学建模、动力总成物理建模、能量管理策略研究。通过理论模型建立、仿真分析与试验验证,系统评估燃料电池混合动力系统在商用车上的动力性能与经济性能,并验证能量管理策略的有效性。

1 整车纵向动力学模型

整车纵向动力学模型是新能源汽车性能仿真、能量管理、控制策略设计与整车参数优化的基础。该模型主要描述车辆在加速、减速以及匀速行驶过程中,驱动力、阻力与车辆运动状态之间的动态关系。通过对整车纵向力的精确建模,可以实现对整车动力性、经济性、制动性等性能指标的量化分析和预测^[9-10]。

整车纵向动力学模型可依据牛顿第二定律建立,其基本表达式为:

$$m \frac{dv_x}{dt} = F_{\text{trac}} - F_{\text{res}},$$

式中: m 为整车质量, v_x 为车辆纵向速度, F_{trac} 为车辆驱动总牵引力, F_{res} 为车辆在纵向行驶过程中的总阻力, t 为时间。

F_{trac} 由动力系统(电驱动系统、混合动力系统)提供,受电机输出特性、传动系统效率、轮胎附着条件等影响。 F_{res} 主要包括滚动阻力 F_{roll} 、空气阻力 F_{air} 、坡道阻力 F_{slope} 、加速阻力(惯性力) F_{acc} , 计算式分别为:

$$F_{\text{roll}} = mgf_r \cos \theta,$$

$$F_{\text{air}} = \frac{1}{2} \rho C_D A v_x^2,$$

$$F_{\text{slope}} = mg \sin \theta,$$

$$F_{\text{acc}} = m_{\text{eq}} \frac{dv_x}{dt},$$

式中: g 为自由落体加速度; f_r 为轮胎滚动阻力系数; θ 为道路坡度角; ρ 为空气密度; C_D 为空气阻力系数; A 为迎风面积; m_{eq} 为等效质量,考虑了旋转部件等附加惯性。

综上,车辆纵向动力学综合表达式为:

$$(m - m_{\text{eq}}) \frac{dv_x}{dt} = F_{\text{trac}} - (F_{\text{roll}} + F_{\text{air}} + F_{\text{slope}})。$$

通过上述整车纵向动力学建模,可为整车动力性仿真、能耗分析、电驱系统与整车协同优化设计提供理论基础和技术支撑。

2 车辆动力系统建模

为准确评估商用车燃料电池混合动力系统整体性能,建立包含整车纵向动力学模型、动力系统模型(含燃料电池及氢系统、动力电池系统、电机驱动系统)以及能量管理策略模型在内的多层次、模块化的整车动力系统仿真模型,各子模型通过明确定义的物理量进行耦合与数据交互。整车仿真模型如图 1 所示,图中 BMS 为电池管理系统,DC/DC 为直流/直流转换器。

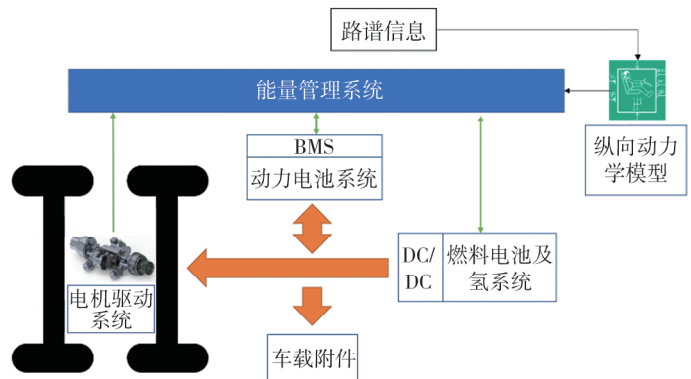


图 1 整车仿真模型

整车纵向动力学模型描述整车在不同工况下的速度、加速度等动态行为,输出对车辆驱动力的需求。动力电池系统模型根据整车动力学模型给出的驱动力需求,各子模块输出实际牵引力和能量状态,反馈给纵向动力学模型和能量管理策略。能量管理策略模型根据动力电池荷电状态(state of charge, SOC)等信息,动态调节燃料电池和动力电池的功率分配,调整各能源模块的工作状态以满足系统约束,实现多能源协同优化。各子模块之间的耦合关系通过明确定义的接口和信号传递实现,保证模型的模块化、可扩展性和可移植性。

2.1 燃料电池建模

燃料电池系统是新能源汽车动力系统的重要组成部分,其模型的精确性对于整车动力学分析、能量管理策略设计、系统优化与仿真具有关键意义。燃料电池建模通常包括电堆静态/动态特性、电化学反应机理、辅助系统(如空压机、加湿器、冷却系统)以及能量管理等。

燃料电池电堆的输出特性主要由其极化曲线(电压-电流特性曲线)描述。电堆输出电压

$$U_{\text{cell}} = E_{\text{nernst}} - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{conc}},$$

式中: E_{nernst} 为可逆电动势,由能斯特方程计算,反映理想状态下的电池电压; V_{act} 为活化极化损失,描述电极表面电化学反应产生的过电势; V_{ohm} 为欧姆极化损失,反映电解质、极板等部件的电阻; V_{conc} 为浓差极化损失,反映传质过程中的浓度梯度效应。

各项损失使用常用半经验公式进行建模:

$$V_{\text{act}} = A \ln(I/J_0),$$

$$V_{\text{ohm}} = IR_{\text{ohm}},$$

$$V_{\text{conc}} = -B \ln(1 - I/J_{\text{max}}),$$

式中: I 为工作电流, J_0 为交换电流密度, R_{ohm} 为等效内阻, J_{max} 为最大允许电流密度, A 、 B 为拟合参数。

燃料电池电堆总输出电压

$$U_{\text{stack}} = N_{\text{cell}} U_{\text{cell}},$$

式中 N_{cell} 为燃料单电池个数。

2.2 动力电池建模

动力电池模型的准确性直接影响能量管理算法的有效性和整车能耗经济性。对于燃料电池载货车,动力电池主要承担能量缓冲、辅助动力输出、能量回收等任务。因此,动力电池模型需兼顾精度与实时性,常采用等效电路模型。

电池端电压

$$U_{\text{bat}} = U_{\text{oc}} - IR_0 - U_{\text{RC}},$$

式中: U_{oc} 为开路电压; R_0 为电池内阻; U_{RC} 为极化电压, $U_{\text{RC}} = IR_1 [1 - e^{-t/(R_1 C_1)}]$,其中, R_1 、 C_1 为极化环节参数。

采用SOC状态方程描述动力电池SOC随时间变化的动态过程,其离散形式为:

$$Q_{\text{SOC},k+1} = Q_{\text{SOC},k} - \frac{\eta I \Delta t}{Q_{\text{nom}}},$$

式中: $Q_{\text{SOC},k}$ 、 $Q_{\text{SOC},k+1}$ 分别为 k 时刻和 $k+1$ 时刻的动力电池SOC, η 为库仑效率, Q_{nom} 为电池额定容量, Δt 为时间步长。

2.3 电机建模

电机建模是整车能量管理策略分析的重要组成部分,直接影响系统能量分配的合理性及车辆运行性能。针对燃料电池载货车常用的永磁同步电机或异步电机,建模时应在保证精度的同时兼顾计算效率,便于实时能量管理控制。

电机输出转矩

$$T_{\text{em}} = f_1(n, U, I),$$

式中: n 为电机转速, U 为电机端电压。

电机输出功率 P_{em} 的数值

$$\{P_{em}\} = \{T_{em}\} 2\pi\{n\} / 60 ,$$

式中: $\{T_{em}\}$ 为以 $N \cdot m$ 为单位的 T_{em} 的数值, $\{n\}$ 为以 r/min 为单位的 n 的数值。

2.4 整车模型集成

整车模型集成的核心是将动力总成(燃料电池系统、动力电池、电机/驱动系统)、底盘系统(传动、制动、悬架等)及车身负载等各子系统模型有机耦合,形成可用于控制策略开发与仿真的完整车辆系统级模型。

整体模型可在 MATLAB/Simulink 等仿真环境中集成,保留各个子系统的输入输出接口,动态获取各子系统运行状态,实时调整控制策略参数,进行不同能量管理策略的快速切换和效果对比分析。

2.5 整车能量管理策略

本文中采用基于规则的能量管理策略,通过动力电池 SOC 状态判断动力电池的充电状态,当 $Q_{SOC} < Q_{SOC,min}$ 时,动力电池需要燃料电池发电提高 SOC,当 $Q_{SOC} > Q_{SOC,max}$ 时,燃料电池停止给动力电池充电。基于规则的能量管理策略如图 2 所示,图中: P_{mot} 为电机需求功率; P_{fc} 为燃料电池功率; P_{low} 为燃料电池待机功率; P_{max} 为燃料电池最大功率; P_{effmax} 为燃料电池系统高效区功率,通常为燃料电池额定功率的 30%~50%。

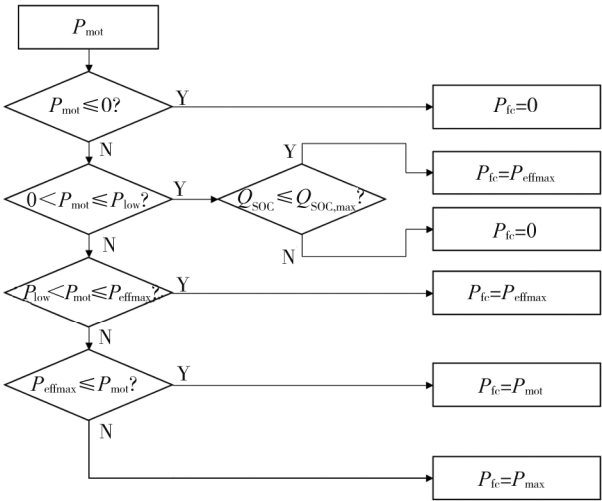


图 2 基于规则的能量管理策略

3 结果分析

对比仿真与试验的车速、电机功率、燃料电池功率、动力电池功率,全面评估燃料电池氢电混动商用车的动力性能和经济性能。仿真计算所需的整车主要参数如表 1 所示。

表 1 整车主要参数

整车整备质量/kg	迎风面积/m ²	车轮半径/mm	电机额定功率/kW	动力电池容量/(A·h)	燃料电池额定功率/kW
12 150	8	542.5	70	216	160

3.1 车速

基于实际路谱的仿真车速和在相同工况下试验车辆的车速对比如图 3 所示。

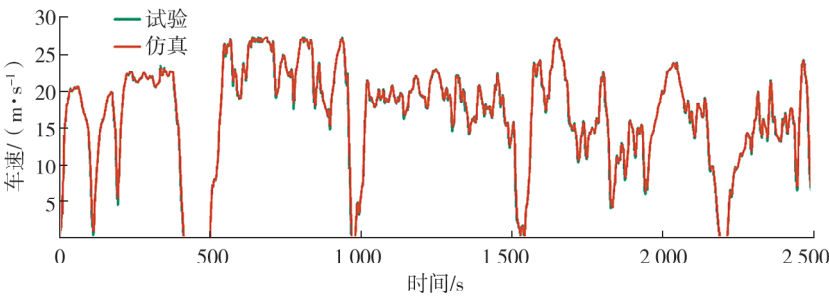


图 3 仿真与试验车速对比

由图 3 可知:仿真与试验车速变化趋势一致,高度吻合,最大相对误差小于 3%;起步阶段,仿真结果与试验结果的差异较小,表明模型在牵引力计算和动力总成动态响应方面具备较高的可靠性;高速工况下,仿真与试验的车速变化趋势基本一致。车速误差主要来源于空气阻力系数和轮胎滚动阻力系数的标定误差。整车仿真模型在车辆动态响应方面表现良好,能够准确反映加速、减速和匀速行驶阶段的动力学特性。

3.2 电机功率

仿真与试验电机功率的对比如图4所示。

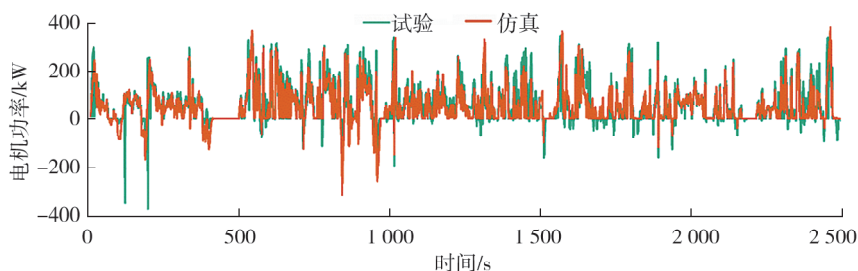


图4 仿真与试验电机功率对比

由图4可知:不同工况下,仿真与试验电机功率变化一致,两者的相对误差小于5%,尤其在加速和爬坡工况下,电机的功率输出与需求匹配良好;在高负载工况(爬坡阶段),电机功率输出对实际车辆的动力需求响应及时,模型在电机效率特性和传动系统效率预测方面具有较高的可信度。电机功率误差主要源自电机非线性特性在极端工况下的简化建模,未来可通过建立更精细的电机控制模型进行优化。整车仿真模型对电机功率的预测准确性较高,能够反映电机快速响应工况下的动态特性。

3.3 燃料电池功率

仿真与试验燃料电池功率对比如图5所示。

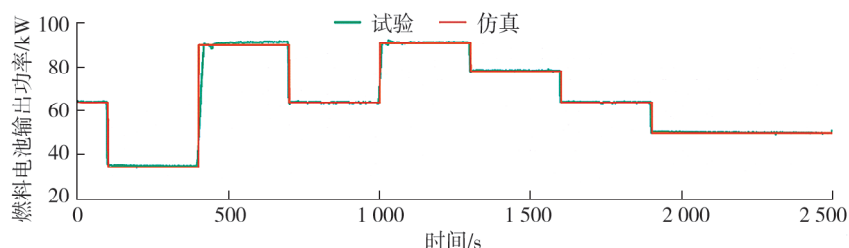


图5 仿真与试验燃料电池功率对比

由图5可知:不同工况下,仿真与试验燃料电池功率基本吻合,平均相对误差在1%以内;燃料电池在车辆加速阶段提供稳定的功率输出,在匀速行驶阶段维持低功率运行,有效满足了整车的动力需求;仿真模型能够精确反映燃料电池在动态工况中的功率输出特性,尤其是在加速和爬坡阶段,燃料电池输出曲线平稳,无明显波动;在低负载工况下,燃料电池维持高效区间工作,表明能量管理策略能够有效调节燃料电池的输出功率,避免不必要的能量浪费。燃料电池功率误差主要源自燃料电池极化曲线参数的标定误差,尤其是在极低功率或极高功率工况下,模型的近似处理可能导致微小误差。

3.4 动力电池功率

仿真与试验动力电池功率对比如图6所示。

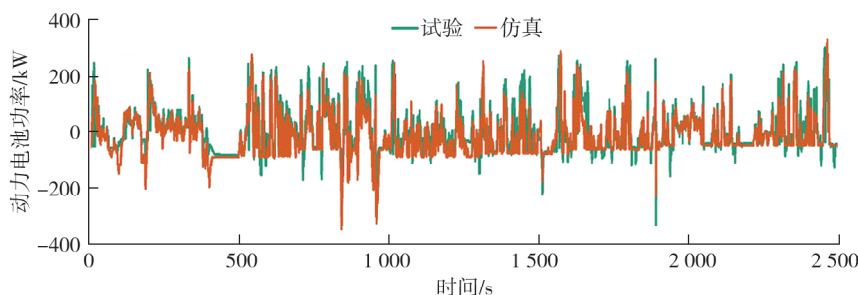


图6 仿真与试验动力电池功率对比

由图6可知:不同工况下,仿真与试验动力电池充放电功率基本一致,最大相对误差小于5%;在起步

和加速阶段,动力电池快速响应整车的瞬时高功率需求,体现了仿真模型对电池动态特性的良好捕捉能力;在减速阶段,能量回收效率较高,动力电池能够有效吸收车辆减速过程中的能量,进一步验证了能量管理策略的合理性。动力电池功率误差主要来源于动力电池 SOC 模型的简化处理,特别是在 SOC 趋近上下限时,电池内阻特性可能导致误差增大。

4 结论

针对燃料电池氢电混动商用车动力系统,建立整车纵向动力学模型和动力总成多层次模型,结合实际路谱,通过仿真与试验对比,验证模型的准确性和能量管理策略的有效性,并对车辆的动力性能和经济性能进行全面评估。

1)建立的整车模型能够精确模拟车辆在实际工况下的动态响应特性,仿真与试验的车速、电机功率、燃料电池功率、动力电池功率的相对误差均控制在合理范围内(最大相对误差不超过5%),表明模型具有较高的精度和可靠性。

2)基于规则的能量管理策略能够实现燃料电池与动力电池之间的动态功率分配,确保燃料电池始终维持高效运行,动力电池在能量缓冲、辅助动力输出和能量回收中发挥重要作用。能量管理策略在不同工况下表现出较好的鲁棒性和适应性。

3)本研究验证了燃料电池氢电混动系统在商用货车领域的应用潜力,未来可进一步结合数据驱动方法优化能量管理策略,提高系统对复杂工况的适应能力;同时,在动力电池特性建模、燃料电池动态响应优化和整车能量效率提高方面仍有较大研究空间。

参考文献:

- [1] 符梁铭. 新能源汽车发展前景及分析建议[J]. 时代汽车, 2025(13): 80-82.
- [2] 赵震. 燃料电池载货车动力系统能量利用率提高研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [3] HU H W, YUAN W W, SU M H, et al. Optimizing fuel economy and durability of hybrid fuel cell electric vehicles using deep reinforcement learning-based energy management systems[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 291: 117288.
- [4] 缪畅畅. 燃料电池混合动力系统建模及功率分配技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [5] 王丽. 基于数据驱动燃料电池燃气轮机(SOFC-GT)混合动力系统控制策略研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2024.
- [6] 林翠霞. 燃料电池混合动力系统建模及其能量实时控制研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2022.
- [7] ZHANG Z, ZHANG T Z, HONG J C, et al. Energy management strategy of a novel electric-hydraulic hybrid vehicle based on driving style recognition[J]. Sustainable Energy & Fuels, 2023, 7(2): 420-430.
- [8] 张可健. 燃料电池汽车混合动力系统能量管理策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [9] 杨雨泽. 市域车多堆燃料电池混合动力系统能量管理研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2023.
- [10] SULAIMAN N, HANNAN M A, MOHAMED A, et al. Optimization of energy management system for fuel-cell hybrid electric vehicles: issues and recommendations[J]. Applied Energy, 2018, 228: 2061-2079.

Evaluation model of hydrogen fuel cell hybrid power system for a commercial vehicle

SUN Wen¹, WANG Xia², CHEN Jianwei¹, BAI Shuzhan^{1*}, LI Guoxiang¹

1. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. China National Heavy Duty Truck Group Co., Ltd., Jinan 250000, China

Abstract : Through theoretical modeling , simulation analysis , and experimental verification , the power performance
(下转第 80 页)

Design of a piston profile based on finite element analysis

SUN Chenyuan^{1,2}, FENG Xiaojing^{1,2}, YUAN Wentao^{1,2}, GU Dingfeng³

1. Binzhou Bohai Piston Co., Ltd., Binzhou 256602, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Advanced Engine Piston Components (Under Preparation), Binzhou 256602, China;

3. Beijing Foton Cummins Engine Company Limited, Beijing 102206, China

Abstract: To address the uneven contact pressure distribution on the skirt and pin bore profiles of an aluminum piston in a diesel engine, a topology optimization design method is employed to collaboratively optimize the oval parameters of the skirt's transverse cross-section and the pin bore contour. Numerical simulations are conducted after iterative optimization. The results show that when the skirt's transverse cross-section adopts a superimposed corrected ellipse, combined with a double tapered pin bore structure optimized by adjusting the length of inner and outer linear segments and diameter recess, the contact pressure of the piston skirt and the peak contact pressure of the pin hole both decrease by 6%, and the contact area increases. After bench testing verification, the optimized key mating parts such as the piston skirt and pin hole have good contact, and there are no abnormal wear phenomena such as peeling on the piston surface under cyclic loading. The piston meets the durability requirements of the engine.

Keywords: piston; profile; ovality; contact pressure; finite element analysis

(责任编辑:刘丽君)

.....
(上接第 74 页)

and economic performance of fuel cell hybrid commercial vehicles are evaluated. Starting from the dynamics of the entire vehicle, the dynamic relationship between driving force, resistance, and vehicle motion state is analyzed, and the characteristics of fuel cells, power batteries, and motors are combined to establish accurate longitudinal dynamics models of the entire vehicle and multi-level models of the powertrain. A rule-based energy management strategies are designed to achieve dynamic power allocation between fuel cells and power cells. The comparison between the simulation results of actual road spectrum conditions and experimental data shows that the relative errors of the model in terms of vehicle speed, motor power, fuel cell power, power battery power, etc. are less than 5%. The model has high accuracy and effective energy management strategies. The research results can provide reference for the performance optimization and energy management strategy development of fuel cell hybrid commercial vehicles. In the future, we will further explore data-driven power system strategies to enhance the system's adaptability to complex operating conditions.

Keywords: commercial vehicle; hydrogen fuel cell hybrid power system; simulation model; energy management strategy; power

(责任编辑:臧发业)