电池在环实时仿真测试系统开发

丁健[1] 尹可欣[2] 吕文静[3]

（1.中汽研华诚认证（天津）有限公司，天津 300399；2.中汽研（天津）汽车工程研究院有限公司，天津 300399；3.中国汽车技术研究中心有限公司，天津 300399）

【摘要】针对现有电池包测试工况覆盖面较窄及功能验证能力不足的问题，提出了一种电池在环实时仿真测试平台方案。首先设计了测试系统总体架构，建立汽车动力学模型、策略模型、电池热管理模型，搭建了电池在环实时仿真平台，并分别开展功能测试和夏冬工况试验，结果表明，在夏季100 km/h与冬季80 km/h工况下，车速、电池温度及SOC的仿真结果与实车数据误差均小于5%，电池在环实时仿真测试平台可以较好地模拟各种真实路况，具有较好的实时性，可有效缩短实车测试时间。

关键词：电池包 硬件在环测试 热管理 工况试验

中图分类号：U469.7 **文献标志码：**A **DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20260090

Development of a Real-Time Simulation Testing System for Battery in the Loop

Ding Jian[1], Yin Kexin[2], Lü Wenjing[3]

(1. CATARC Certification Co., Ltd., Tianjin 300399; 2. CATARC (Tianjin) Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300399; 3. China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin 300399)

【Abstract】A real-time simulation platform for battery pack in the loop testing is proposed to address the issues of narrow coverage of existing battery pack testing conditions and insufficient performance verification capabilities. Firstly, the overall architecture of the testing system is proposed, and the vehicle dynamics model, strategy model and battery thermal management model are established. A real-time simulation platform for the battery pack in the environment is built, and functional testing and summer and winter working condition tests are conducted. Under the summer 100 km/h and winter 80 km/h operating conditions, the errors of vehicle speed, battery temperature and SOC between the simulation results and real vehicle data are all less than 5%. The battery-in-the-loop real-time simulation test platform can effectively simulate various real road conditions with good real-time performance, thereby significantly reducing the time required for actual vehicle testing.

Key words: Battery pack, Hardware in the loop, Thermal management, Operation experiments

【引用格式】丁健，尹可欣，吕文静. 电池在环实时仿真测试系统开发[J]. 汽车工程师，2026(9)：30-35+42.

DING J, YIN K X, LÜ W J. Development of a Real-Time Simulation Testing System for Battery in the Loop[J]. Automotive Engineer, 2026(9): 30-35+42.

1 前言

电池管理系统（Battery Management System，BMS）等新能源汽车零部件控制系统的开发和测试通常采用V模式开发流程，以在提高效率的同时降低开发风险[1-2]。其中，虚拟控制器的运行环境可以通过硬件在环（Hardware-in-the-Loop，HIL）测试平台建立。

在电池包及BMS的测试系统开发研究中，实车道路/场地测试可以获得最为真实的电池包性能表现，但是测试工况覆盖面较窄，对试验条件要求较高[3]。dSPACE公司[4]提出了一种可对BMS组件进行全面测试的HIL测试系统，可满足不同场景下的测试需求。Guo等[5]利用HIL测试系统验证了荷电状态（State of Charge，SOC）估计算法的可行性与准确性。Morello等[6]开发了一种硬件在环测试平台，通过建立精确的电池模型测试BMS的功能，具有更好的测试安全性。German等[7]开发了基于可

控电流源和实时模拟器的特定功率测试台。曹铭[8]采用dSPACE验证了BMS充电通信流程并基于RT_LABBMS搭建硬件在环测试平台对所开发的BMS进行了全面测试与验证。熊杰[9]、邵玉龙[10]等利用NI PXIe实时系统对BMS的关键功能进行测试，为BMS硬件在环测试系统的设计提供了新方案。综上，现有研究主要存在以下不足：传统BMS HIL测试局限于信号级功能验证，无法反映真实电池包的电-热耦合响应；实车测试结果真实，但工况覆盖窄、周期长、成本高，且极端工况测试存在安全风险。

针对上述问题，本文以某电动汽车的电池包和BMS作为研究对象，提出一种电池在环（Battery in the Loop，BIL）实时仿真测试方法，将真实电池包与整车动力学、热管理实时模型闭环连接，实现对电池包电-热性能的在线验证，从而在保留HIL测试的高效性与安全性的同时引入真实电池包的物理响应。

2　测试系统总体架构

2.1　总体方案

本文提出的电池在环实时仿真测试系统框架如图1所示，该测试系统在虚拟工况、虚拟道路及虚拟能量需求输入下，控制真实充放电系统及真实的环境系统，便捷模拟各种真实路况，获得试验数据。

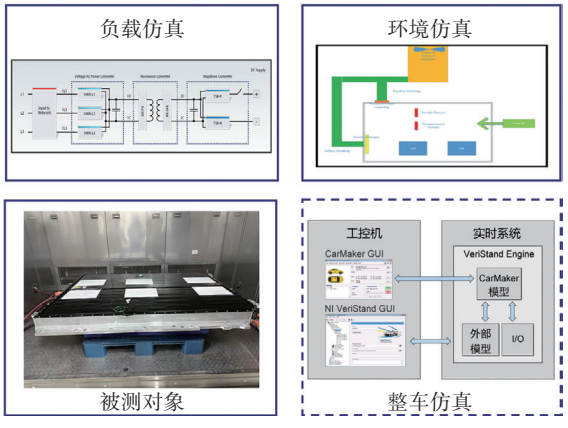


图1　电池在环实时仿真测试系统框架

2.2　硬件组成

测试系统的硬件主要包括NI PXIe-8840实时控制器、NI硬件板卡、高性能工控机、环境舱、水冷机、虚拟负载、电池包、CANoe硬件。

测试过程中涉及的信号类型主要有模拟信号、数字信号、控制器局域网（Controller Area Network，CAN）信号，实时系统中各硬件的型号及其用途如表1所示。

表1　实时系统硬件选型

型号	用途说明
NI PXIe-1078Q机箱	安装和供电平台，模块数据通信
NI PXIe-8840控制器	实时运行车辆动力学模型，控制其他板卡
NI PXIe-8510/6高速CAN总线卡	实时系统与其他子系统间的通信
NI PXIe-6738模拟输出板卡	模拟输出信号
NI PXIe-4304模拟输入板卡	模拟输入通信

电池虚拟负载在执行充电桩模拟时，可接收并响应包含电流、电压、功率、预充参数以及特定频率与幅值的纹波在内的指令。该负载将这些激励耦合至被测设备的直流输入端，以模拟真实工况下的直流母线电流扰动。电池包环境模拟系统接收上位机工程软件的温度设定指令，控制被测电池包的环境温度。电池包的冷却/加热系统主要实现电池的热管理功能，该系统通过以太网与主控系统连接，主要通过LabVIEW控制。

2.3　软件组成

测试系统的软件主要包括NI LabVIEW/VeriStand/TestStand 2020、MATLAB/Simulink 2020a、IPG CarMaker 8.0和CANoe软件。

其中，上位机通过运行NI VeriStand实验管理软件的方式实时监控测试结果，网口与NI实时机通信将VeriStand项目工程下载到NI实时机运行。自动化测试通过NI TestStand实现。CarMaker用于道路场景建模和车辆动力学参数化建模。MATLAB/Simulink用于搭建其他策略算法模型。下位机下载车辆动力学模型并实时运行，通过I/O板卡和CAN与待测电池包通信，采集相关指令并执行控制指令，将结果反馈至整个系统，实现闭环控制。主控系统通过CAN协议与电池虚拟负载、电池包环境模拟系统、BMS通信，BMS通过CAN协议实现快充等功能。

软、硬件集成后电池在环实时仿真测试系统如图2所示。

3　实时仿真模型

3.1　整车动力学模型

本文选取纵向动力学模型进行动力学分析，汽车纵向牵引力为：

$$F_t=F_f+F_w+F_i+F_j \tag{1}$$

式中：F_f为滚动阻力，F_w为空气阻力，F_i为坡道阻力，

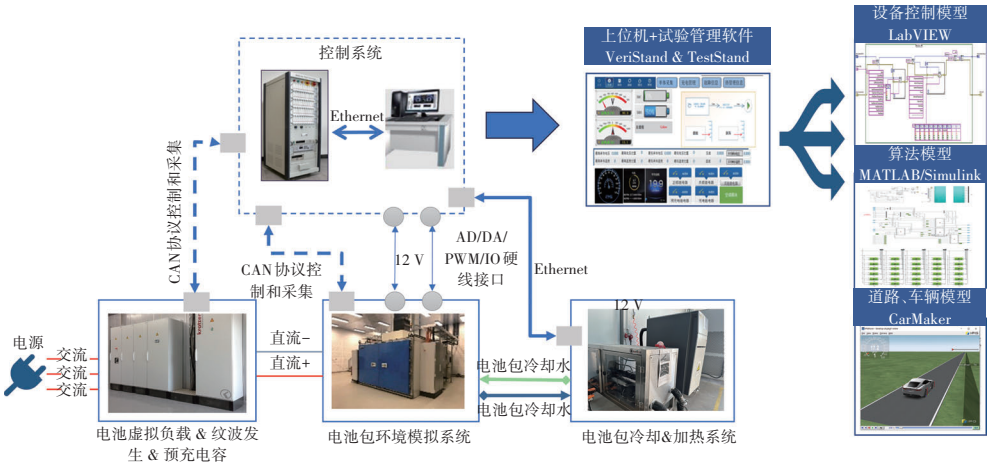


图2　电池在环实时仿真测试系统集成示意

F_j为加速阻力。

式(1)可以展开为:

$$\frac{T_{mot}i_o\eta_T}{r}=mgf\cos\alpha+\frac{C_DA}{21.15}u^2+mg\sin\alpha+\delta m\frac{dv}{dt}\quad(2)$$

式中:T_{mot}为主驱动电机转矩,r为轮胎半径,η_T为传动效率,i_o为主减速器速比,α为坡道角,f为滚动阻力系数,m为整车质量,δ为旋转质量换算系数,A为迎风面积,v为车速,C_D为空气阻力系数。

在CarMaker上根据台架试验和实车开发参数进行动力学参数化建模,主要关注纵向动力学参数。对于与测试功能关联度不大的其他参数,选择CarMaker中的默认值。动力学参数化建模界面如图3所示,场景化仿真界面如图4所示。

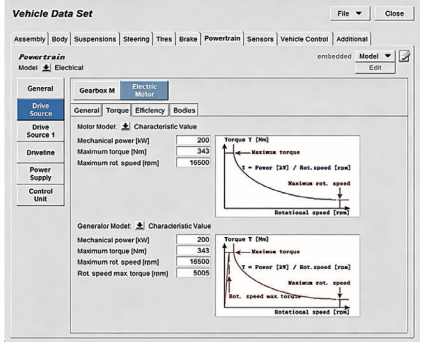


图3　车辆动力学参数化建模

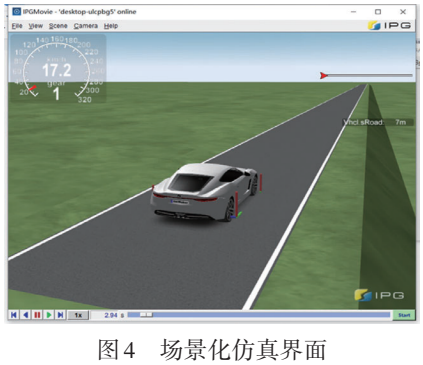


图4　场景化仿真界面

3.2　MATLAB/Simulink策略控制模型

BMS的工作原理如图5所示。BMS与电池包间通过线束连接,信号线束与电池包内部的传感器相连。低功率电缆在单体电池均衡过程中承载电流,电机通过大功率电缆与电池包和充电机连接,以满足高功率传输的需求。

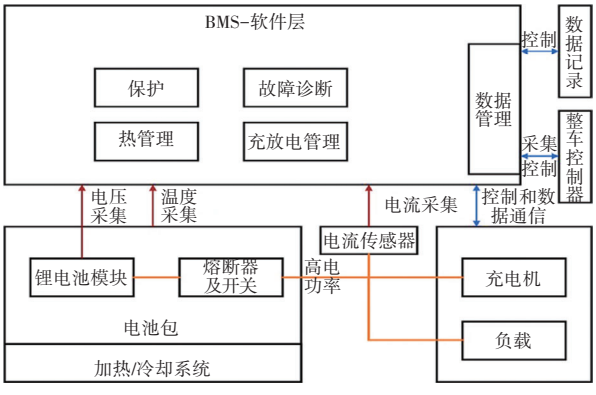


图5　BMS的结构和功能

通过电池包容量标定可以准确评估电池的实际容量,了解电池的储能能力,为电池选型与应用提供参考依据。电池的容量和能量计算公式分别为:

$$C=\int_{t_0}^{t_1}I\mathrm{d}t\quad(3)$$

$$E=\int_{t_0}^{t_1}IU\mathrm{d}t\quad(4)$$

式中:C为电池容量,I为母线电流,E为电池能量,U为母线电压。

为防止电动汽车在高电压条件下起动时电流过大,从而导致电子设备和电池损坏,需进行预充[11]。预充电路如图6所示,其中,K_1为主正继电器,K_2为预充继电器,C_1为电容,主要指MCU大电容。电池泄放指电池内部储存的电能通过外部电

路释放到外部环境中,可保障电池使用安全、延长电池寿命、维持设备正常运行。故障报警模块通过温度、电流等传感器数据监测电池的状态,并在异常时执行相应的安全保护措施。

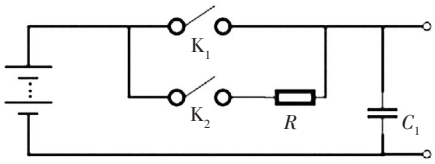


图6　预充电路示意

其中,预充电阻的计算方法为:

$$\begin{cases} R=\dfrac{t}{C\cdot\ln\left(\dfrac{u_s}{u_s-u_t}\right)} \\ u_t=u_s-u_s\cdot e^{-\frac{t}{RC}} \end{cases} \tag{5}$$

式中:R为预充电阻;t为时间,一般小于500 ms;u_s为电池包及电源的输出电压;u_t为电容预充所需达到的电压。

预充电阻功率计算公式为:

$$P=\frac{U_{max}^2}{20R} \tag{6}$$

式中:U_{max}为预充电阻两端的最大电压,P为预充电阻的功率。

通过MATLAB/Simulink搭建策略模型,可实现电池包容量标定、电池包预充泄放、负载故障报警功能,如图7所示。

3.3　电池热管理模型

电池热管理系统是保障电池运行安全的决定性外在因素,也是提升电池系统寿命等性能指标的关键[12]。其主要功能为避免电池组因热失控出现爆炸或失效,并将电池系统的温度维持在合理范围内,有效避免单体电池间的性能差异。电池热管理模型的设计目标如图8所示。

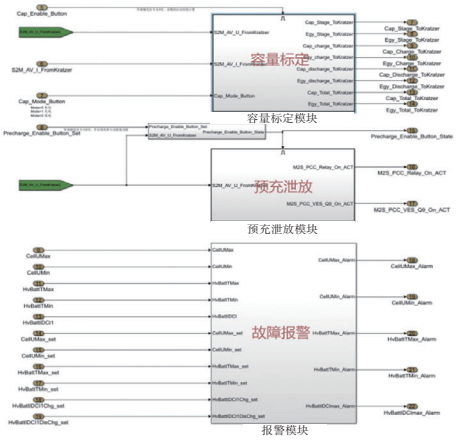


图7　控制策略模型

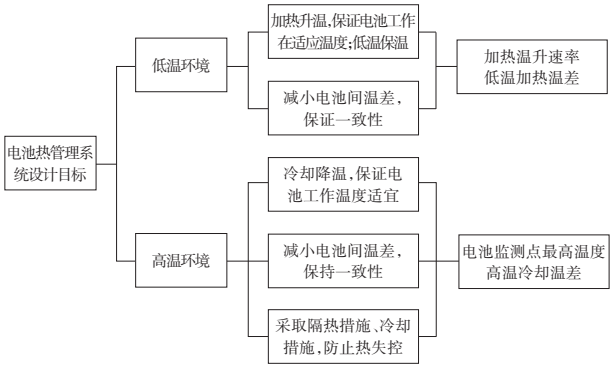


图8　热管理模型设计目标

热量计算公式为:

$$Q=cm\Delta T \tag{7}$$

式中:Q为热量,c为物体比热容,m为质量,ΔT为温度变化量。

单体电池的产热量公式为:

$$\dot{Q}=I\left(V-V_{oc}-T_{ref}\frac{dV_{oc}}{dT}\right) \tag{8}$$

式中:I为电流,V_{oc}为开路电压,T_{ref}为参考温度,T为电池温度。

电池充电过程中的热平衡方程为:

$$C_{bat}m\frac{dT}{dt}=Q_{heat}-h\cdot A\cdot\left(T-T_{amb}\right)-Q_{cool} \tag{9}$$

式中:C_{bat}为电池比热容,T为电池温度,Q_{heat}为电池充放电中的产热功率,h为对流换热系数,A为对流换热面积,T_{amb}为环境温度,Q_{cool}为液冷散热功率。

本文测试系统采用水冷,具有较好的冷却效果,可以使电池包的温度分布均匀。其中,制冷量和冷却水流量的计算公式分别为:

$$Q_2=\frac{Q_1}{\alpha}=\frac{k\cdot Q_{req}}{\alpha} \tag{10}$$

$$L=\frac{Q_1}{\Delta T\cdot C_p} \tag{11}$$

式中:Q_2为制冷量;Q_1为冷却负荷;α为冷水机的制冷系数;k为冷却负荷系数,根据具体应用场景和环境条件确定;Q_{req}为需求热量;L为冷却水流量;C_p为冷却水比热容。

利用电池热管理功能模块,可以实现冷却系统功率控制,本文搭建的电池热管理模型如图9所示。

4　试验验证与分析

4.1　系统集成

通过NI VeriStand平台建立定制化工程文件实现系统控制,通过上位机输入工况曲线,上位机通过CAN总线与电池包虚拟负载中的虚拟储能

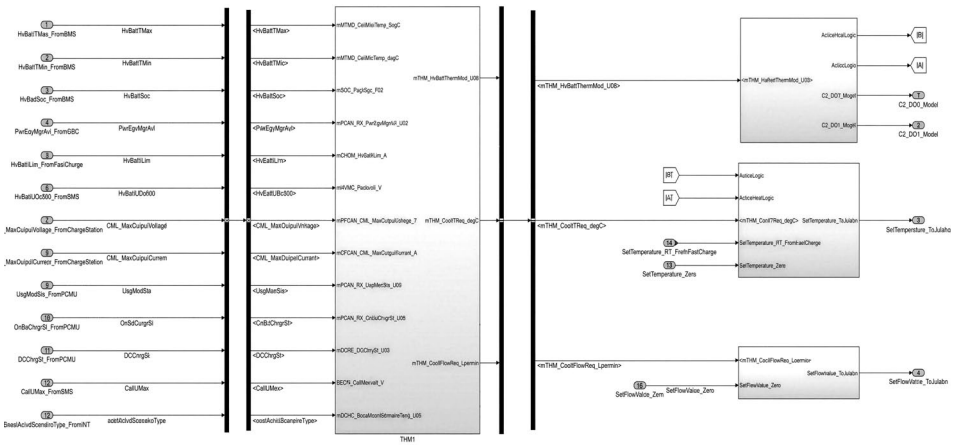


图9　电池热管理模型

系统控制单元(Virtual Energy Storage Control Unit,VCU)通信,从而实现对虚拟负载的控制。VeriStand项目中预留各控制器的Simulink模型接口,实现各控制器间的闭环控制。系统联调框架如图10所示。

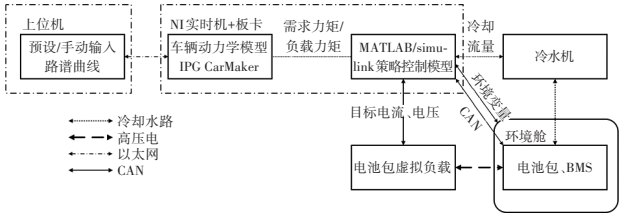


图10　系统联调框架示意

4.2　试验分析

对电池包进行测试,选用夏季100 km/h、冬季80 km/h工况作为测试工况,将整车动力学模型、控制策略模型、热管理模型经编译下载到HIL系统的实时控制器中,HIL系统按照固定周期10 ms实时运行模型程序。完成BIL测试后,与实车数据进行对比。

4.2.1　功能测试

以电池预充、泄放为例,在低压条件下,闭合预充继电器,闭合快充负正继电器,开始预充,预充结束后,闭合主正继电器,断开预充继电器,此时测试系统可正常上高压。

下电泄放时,断开主正继电器,进入主动泄放环节,金属氧化物半导体场效应晶体管(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor,MOSFET)开关信号自动接入(0为接入,1为断开),信号值自动切换为0,当电容两端电压为60 V时,主动泄放完成,随后断开快充正继电器和快充负继电器,虚拟负载下电,过程如图11所示。预充过程实测耗时420 ms,满足小于500 ms的行业设计要求,预充完成后母线电压与电池电压差值小于10 V,可安全闭合主正继电器。

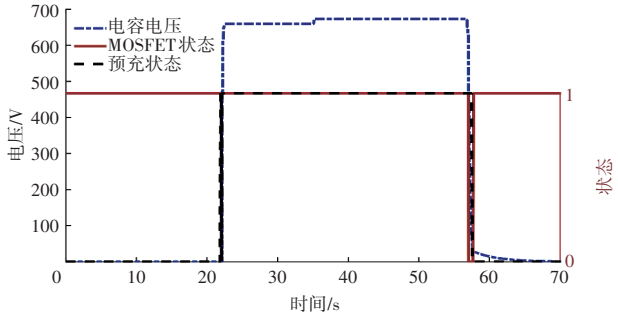
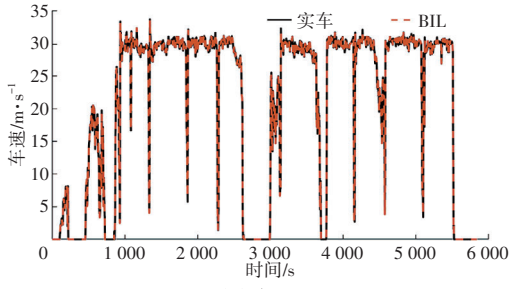


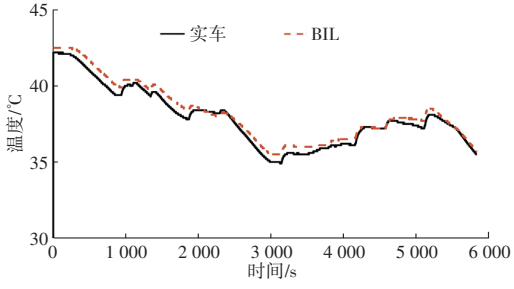
图11　预充、泄放示意

4.2.2　工况测试

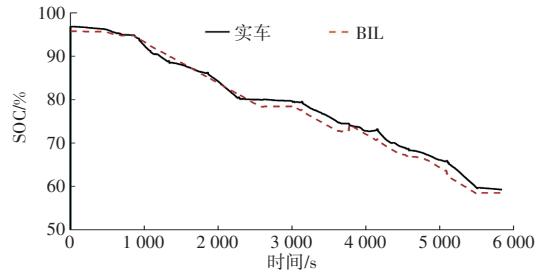
夏季100 km/h工况实车测试与BIL测试对比结果如图12所示,结果表明:所搭建的BIL测试平台能够基于驾驶员意图完成车速跟随,车速最大误差为0.8%,出现在第3 145 s;单体电池温度保持在35~45 ℃范围内,最大误差为1.7%,出现在第3 135 s;电池SOC最大误差为4.9%,出现在第5 102 s。



(a)车速



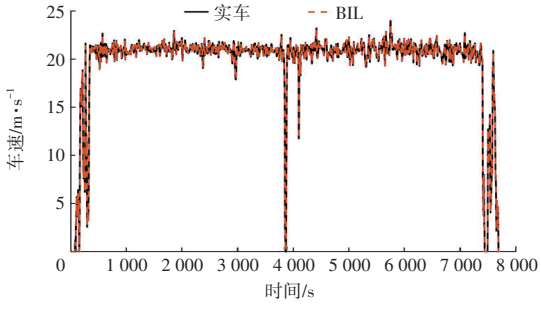
(b)单体电池温度



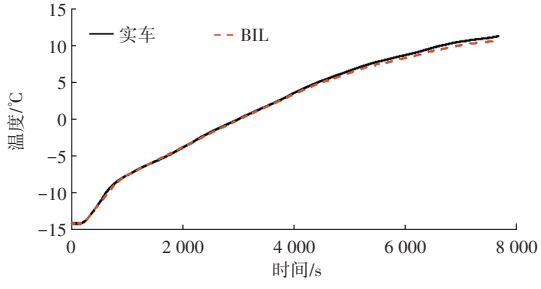
(c)电池SOC

图12　夏季100 km/h工况实车测试与BIL测试对比结果

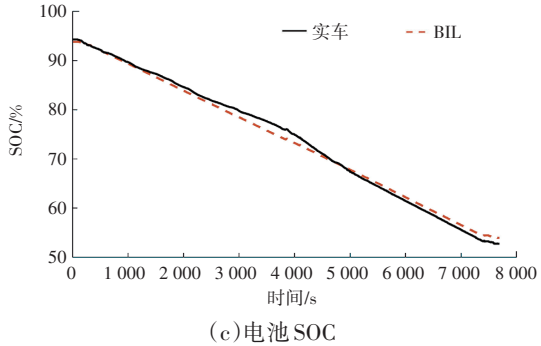
冬季80 km/h工况实车测试与BIL测试对比结果如图13所示,结果表明:所搭建的BIL测试平台能够基于驾驶员意图完成车速跟随,最大误差为0.6%,出现在第5 751 s;单体电池温度最大误差为4.8%,出现在第6 954 s;电池SOC最大误差为2.6%,出现在第3 877 s。



(a)车速



(b)单体电池温度



(c)电池SOC

图13　冬季80 km/h工况实车测试与BIL测试对比结果

5　结束语

本文以某款电动汽车的电池包与电池管理系统作为研究对象,设计搭建一种电池在环实时仿真测试系统,该系统具有模拟电池包容量标定、预充泄放、故障报警、热管理等测试功能,可以实现测试流程的设计、编写及管理,使测试流程能够自动化运行,从而更加高效地验证电池的可靠性。试验结果表明,在夏季100 km/h与冬季80 km/h行车工况下,车速、单体电池温度、电池SOC的BIL测试表现与实车测试结果基本一致,误差均小于5%,验证了平台的有效性与工程实用性。此外,平台采用模块化软硬件架构,基于成熟商业软件搭建,可快速适配不同车型的电池包测试需求,可有效缩短电池包开发周期,降低实车测试成本。

参　考　文　献

[1] 李兆麟, 李华伟, 郑四发, 等. 智能新能源汽车车载控制基础软硬件关键技术研究进展[J]. 汽车工程, 2023, 45(9): 1530-1542.
LI Z L, LI H W, ZHENG S F, et al. Research Progress on Key Technologies of Basic Software and Hardware for Intelligent New Energy Vehicle Onboard Control[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(9): 1530-1542.

[2] 杨世春, 卢宇, 周思达, 等. 车用动力电池标准体系研究与分析[J]. 机械工程学报, 2023, 59(22): 3-19.
YANG S C, LU Y, ZHOU S D, et al. Research Progress of Standards for Lithium-Ion Batteries on Electric Vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(22): 3-19.

[3] 覃小婷. 电池管理系统硬件在环测试平台的设计与实现[D]. 南宁: 广西大学, 2023.
QIN X T. Design and Implementation of Hardware-in the-Loop Test Platform for Battery Management System[D]. Nanning: Guangxi University, 2023.

[4] HAUPT H, PLÖGER M, BRACKER J. Hardware-in-the-Loop Test of Battery Management Systems[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(21): 658-664.

[5] GUO L, LI J Q, FU Z J. Lithium-Ion Battery SOC Estimation and Hardware-in-the-Loop Simulation Based on EKF[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 2599-2604.

[6] MORELLO R, DI RIENZO R, RONCELLA R, et al. Hardware-in-the-Loop Platform for Assessing Battery State Estimators in Electric Vehicles[J]. IEEE Access, 2018, 6: 68210-68220.

[7] GERMAN R, TOURNEZ F, DESREVEAUX A, et al. Full Power Constraints HiL Setup for Battery Module Testing in Electric Vehicles[C]// 2021 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Gijon, Spain: IEEE, 2021: 1-6.

(下转第42页)

时性仿真结果表明，该模型端到端推理时延远低于充电数据采集周期，进一步验证了该方法用于在线“即充即检”的工程可行性。

未来研究将进一步融合更广泛的电网互动数据与多车型充电样本，开发自适应增量学习框架，以应对动力电池全生命周期性能退化的动态预警需求。

参 考 文 献

[1] 李清波，张懋慧，罗英，等. 基于等效电路模型融合电化学原理的锂离子电池荷电状态估计[J]. 储能科学与技术，2024，13(9)：3072-3083.
LI Q B，ZHANG M H，LUO Y，et al. Lithium-Ion Battery State of Charge Estimation Based Onequivalent Circuit Model[J]. Energy Storage Science and Technology，2024，13(9)：3072-3083.

[2] 吴巫朔，王涛，王丽. 基于深度确定性策略梯度算法的新能源汽车动力电池充电管理方法[J]. 汽车工程师，2025(9)：41-48.
WU W S，WANG T，WANG L. An Optimized Battery Charging Strategy Using Deep Deterministic Policy Gradient[J]. Automotive Engineer，2025(9)：41-48.

[3] GAO D X，WANG Y，ZHENG X Y，et al. A Fault Warning Method for Electric Vehicle Charging Process Based on Adaptive Deep Belief Network[J]. World Electric Vehicle Journal，2021，12(4).

[4] 陆秋琴，田园，黄光球. 结合大气污染特征的VOCs聚集区识别方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学)，2024，38(3)：308-317.
LU Q Q，TIAN Y，HUANG G Q. A Method for Identifying VOCs Aggregation Areas Based on the Characteristics of Air Pollution[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)，2024，38(3)：308-317.

[5] DONG J，ZHANG Y L，HU J. Short-Term Air Quality Prediction Based on EMD-Transformer-BiLSTM[J]. Scientific Reports，2024，14(1).

[6] 雷南林，饶博，姜颖，等. 基于WOA-VMD与TCN-Transformer的实车动力电池SOH预测[J/OL]. 汽车技术(2026-07-27) [2026-07-29]. https://doi. org/10.19620/j. cnki.1000-3703.20260065.
LEI N L，RAO B，JIANG Y，et al. SOH Prediction of Real Vehicles Power Battery Based on WOA-VMD and TCN-Transformer[J/OL]. Automobile Technology (2026-07-27) [2026-07-29]. https://doi. org/10.19620/j. cnki. 1000-3703.20260065.

[7] PEDDAKAPU K，SAID D M，RAAVI P H. Energy Conversion and Emission Trade-offs in Hybrid Marine Microgrids: A CNN-LSTM Forecasting Approach[J]. Energy Conversion and Management，2026，350.

[8] WANG Z R，CHEN L，WANG C B. Weekly Periodicity Feature-Driven CNN-GRU and LightGBM Hybrid Model for Short-Term Multi-Step Building Load Forecasting[J]. Energy，2026，355.

[9] WANG S Z. A Stock Price Prediction Method Based on BiLSTM and Improved Transformer[J]. IEEE Access，2023，11：104211-104223.

（责任编辑　斛　畔）

修改稿收到日期为2026年7月22日。

（上接第35页）

[8] 曹铭. 电池管理系统关键技术研究及测试系统构建[D]. 南昌：南昌大学，2020.
CAO M. Research on Key Technology and Test System Construction of Battery Management System[D]. Nanchang：Nanchang University，2020.

[9] 熊杰. BMS硬件在环系统开发[D]. 北京：清华大学，2018.
XIONG J. Development of BMS HIL Test Platform[D]. Beijing：Tsinghua University，2018.

[10] 邵玉龙. 电动汽车BMS关键技术研究及硬件在环测试系统构建[D]. 长春：吉林大学，2018.
SHAO Y L. Research on the Key Technologies of BMS in Electric Vehicles and the Construction of Hardware-in-the-Loop Testing System[D]. Changchun：Jilin University，2018.

[11]《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述·2023[J]. 中国公路学报，2023，36(11)：1-192.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China’s Automotive Engineering Research Progress：2023[J]. China Journal of Highway and Transport，2023，36(11)：1-192.

[12] 舒强，王艺帆，梁元. 我国电动汽车动力电池安全标准现状及展望[J]. 汽车工程，2022，44(11)：1706-1715.
SHU Q，WANG Y F，LIANG Y. Current Situation and Prospect of Traction Battery Safty Standards for Electric Vehicles in China[J]. Automotive Engineering，2022，44(11)：1706-1715.

（责任编辑　斛　畔）

修改稿收到日期为2026年5月9日。