

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200684

基于电池模型的电动汽车充电故障监测与预警方法

张元星¹, 李斌¹, 颜湘武², 王玲², 蒋林洳¹, 刁晓虹¹, 李涛永¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司北京市电动汽车充换电工程技术研究中心, 北京 100192;

2. 华北电力大学(保定), 河北 保定 071003)

摘要: 随着我国电动汽车的规模化发展, 电动汽车充电过程中的故障监测与预警得到业内人士的重视。针对这些问题, 提出了一种基于电池模型的电动汽车充电故障监测与预警方法。通过动力电池模型荷电状态和电池电动势在线估计, 实时调节电池荷电状态和电压以及温度等参数以模拟动力电池充电响应, 可以模拟不同类型、规格以及参数的动力电池。在充电过程中, 利用 CAN 总线监听技术, 接收并解析充电机与电池的充电信息, 将电池模型模拟的充电响应信息与电池的充电状态信息进行对比, 同时将充电机的充电状态信息与电池充电需求信息进行对比, 来判断充电过程是否正常。当判断出现充电异常或故障时, 及时发出故障预警信号。该方法可以识别包括 BMS 功能失效在内的 10 余种故障类型。实际充电数据验证了充电正常和异常情况下故障监测方法的可行性。

关键词: 电池模型; 电动汽车; CAN 总线监听; 充电故障; 监测与预警

Monitoring and early warning method of EV charging failure based on a battery model

ZHANG Yuanxing¹, LI Bin¹, YAN Xiangwu², WANG Ling², JIANG Linru¹, DIAO Xiaohong¹, LI Taoyong¹

(1. Beijing Electric Vehicle Charging/Battery Swap Engineering and Technology Research Center, China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China; 2. North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China)

Abstract: With the large-scale development of electric vehicles in China, fault monitoring and early warning of electric vehicles during the charging process have received attention. This paper proposes a method for monitoring and early warning of electric vehicle charging faults based on a battery model. Through online estimation of the state of charge of the power battery model and battery electromotive force, parameters such as battery state of charge, voltage, and temperature can be adjusted in real time to simulate the charging response of the power battery, and can simulate power batteries of different types, specifications, and parameters. During the charging process, CAN bus monitoring technology is used to receive and analyze the charging information of the charger and battery. The charging response information simulated by the battery model is compared with the battery charging state information, and the charging state information of the charger is compared with the battery charging demand information to determine whether the charging process is normal. When it is judged that there is an abnormal charging or fault, a fault early warning signal is sent in good time. This method can identify more than 10 types of fault, including the failure of the BMS function. The actual charging data is used to verify the feasibility of the fault monitoring method under normal and abnormal charging conditions.

This work is supported by the Science and Technology of State Grid Corporation of China “Research on Key Technologies and Operation Maintenance Service System of EV Charging/Discharging Fault Intelligent Diagnosis and Safety Warning” (No. 5418-201918159A-0-0-00).

Key words: battery model; electric vehicle; CAN bus monitoring; charging failure; monitoring and early warning

0 引言

随着全球能源危机的不断加剧和环境问题的日

益突出, 电动汽车相比于传统汽车在节能减排方面存在的巨大优势受到各国政府和汽车企业的重视^[1-5]。电动汽车产业的迅猛发展带动了电动汽车充电基础设施的建设, 世界各国实施了一系列激励措施并投入大批资金支持电动汽车充电站和充电桩的建设来满足电动汽车的充电需求^[6-7]。在我国, 随着一系列与电动汽车充电基础设施相关的国家标准的

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助“电动汽车充放电故障智能诊断与安全预警关键技术及运维服务体系研究”(5418-201918159A-0-0-00)

出台，电网公司以及能源供给企业也纷纷投入到充电站、充电桩等电动汽车充电基础设施建设中来^[8-9]。2015年到2017年，有关电动汽车充电设备技术条件和测试规范的7项国家标准陆续更新发布^[10-11]。随着一系列国家政策、国家标准、企业标准以及行业标准的出台，我国的电动汽车充电基础设施的建设取得了长足的发展。据充电联盟统计，截至2019年底，我国充电桩保有量已达121.9万台，其中公共类充电桩51.6万台，其中交流充电桩30.1万台、直流充电桩21.5万台、交直流一体充电桩488台。

随着大量电动汽车充电设备的建设与投运，其充电可靠性和安全性逐渐成为关注的重点。电动汽车充电设备的运行状态不仅会影响其自身可靠性，还会影响动力电池的使用寿命^[12-15]。不仅电动汽车充电设备的日常运维检修不容忽视，电动汽车充电设备充电过程中的故障监测同样重要。根据公开资料不完全统计，在2011年—2016年全球电动汽车典型安全事故统计数据显示，在49例典型电动汽车着火事件中，充电导致的火灾事故为次高，占比约14%；2016年8月，在我国的深圳宝安区出租房正在充电的电动车引发大火造成7死4重伤的重大事故；根据中国充电联盟报道，对近6年发生的电动汽车起火事件原因进行统计的结果显示，在正常充电过程中发生的车辆起火占事故总量的14%，有5%的起火事件是因为充电设备故障。文献[16]设计了一套电动汽车充电设备的移动监控与故障诊断系统，采用故障树方法对充电桩的故障进行分析诊断。文献[17]建立了一种基于电池荷电状态的等效数学模型，对比分析了充电过程的功率模型和SOC模型的准确性。文献[18]提出了一种电动汽车充电机性能状态综合评估方法，利用模糊综合评判理论建立评价模型，实现对充电机性能状态的综合评估。文

献[19]结合国家标准GB/T《电动汽车用电池管理系统功能安全要求及试验方法》，分析了电动汽车用电池管理系统(BMS)架构、危害分析、风险评估及功能安全要求等。文献[20]以EV300电动汽车充电系统为例，探究了充电枪插入感应信号故障和充电导通信号故障的电动汽车充电系统故障诊断方法。文献[21]基于节点电压和支路潮流的越限严重程度，定义了规模化充电站接入对配电系统潮流影响的评价指标，提出了有助于配网安全运行的充电站最优电气接入点的确定方法。文献[22]针对电动汽车充电系统模糊自适应PID控制方法的抗故障能力不突出问题，提出了一种分段式模糊自适应PID控制方法，与传统的模糊自适应PID控制方法相比，它具有更好的动静态性能和更强的抗故障能力。

以上电动汽车充电故障诊断方法仅仅侧重于发现充电机可能出现的故障，没有针对充电过程中电池管理系统可能出现的故障进行监测和预警。针对目前电动汽车充电故障监测方法存在的不足，本文提出了一种基于电池模型的电动汽车充电故障监测与预警方法，该方法可以识别包括BMS功能失效在内的10余种故障类型。

1 充电故障监测与预警方法技术方案

基于电池模型的电动汽车充电故障监测与预警方法功能结构图如图1所示。

中央控制单元根据所设置的电池参数和测量的充电电流或电压来构建模拟电池模型并模拟实际电池的充电响应，模型包括电池电压、电流、SOC(State of Charge)、温度等信息。

人机接口模块显示电池模型充电状态信息、提供设置电池参数的接口界面，可以根据电动汽车动力电池的类型、规格以及参数来手动设置，也可

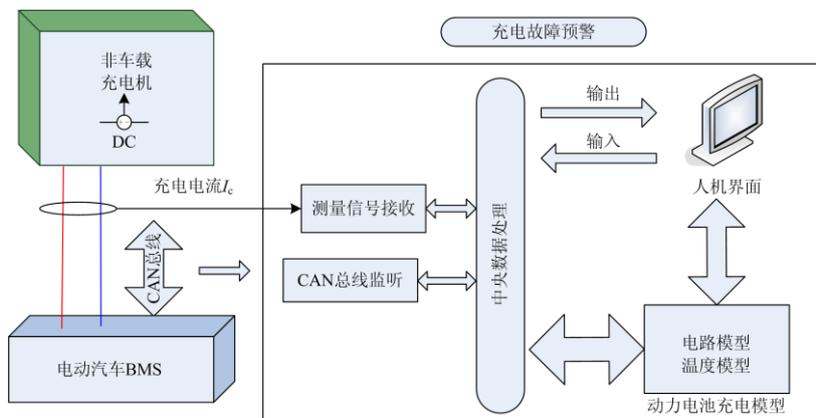


图1 基于电池模型的电动汽车充电故障监测与预警方法功能结构图

Fig. 1 Functional structure diagram of a battery model-based monitoring and early warning method for electric vehicle charging faults

以实时直观监控电池的充电状态。

测量信号接收模块将测量得到的充电电流或电压传给电池模型以模拟充电响应。

CAN 监听模块用来监听非车载充电机与 BMS 通信过程中的报文 BCS(电池充电总状态报文)、CCS(电动机充电总状态报文)及 BCL(电池充电需求报文)。

中央数据处理单元通过解析 CAN 监听模块获取的充电状态报文, 监测电动汽车充电状态和电池充电需求, 将电池模型模拟的电池充电响应与电池充电状态信息相比较, 同时将充电机充电状态信息与电池充电需求进行实时对比, 从而及时发现充电故障并发出告警提示。

2 单体动力电池模型

单体动力电池模型的构建主要可以分为两大部分: 单体电池开路电压特性和电池内阻特性^[23]。其中电池开路电压 U_{oc} 和电池的荷电状态 SOC 的关系可以采用 Gregory L. Plett 的“复合模型”^[24]来表示

$$U_{oc} = K_0 - \frac{K_1}{SOC} - K_2 SOC + K_3 \ln(SOC) + K_4 \ln(1 - SOC) \quad (1)$$

式中, $K_0 \sim K_4$ 为拟合系数, 由模型参数辨识方法^[25-26]可以得到不同电池类型下的该组拟合系数。

另外的, 电池内阻特性包含由浓差极化和电化学反应极化引起的极化内阻以及由电阻极化引起的欧姆内阻特性, 两个 RC 并联电路与欧姆内阻串联可以共同模拟电池内阻特性, 因此电池动态电路模型如图 2 所示。

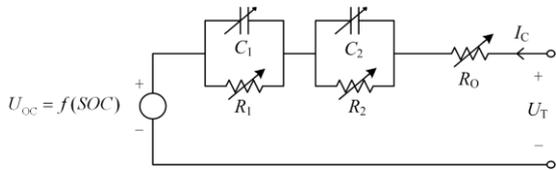


图 2 动力电池动态电路模型

Fig. 2 Dynamic battery dynamic circuit model

图 2 中, C_1R_1 、 C_2R_2 并联电路分别用于描述电池的浓差极化和电化学反应极化现象, R_0 表示电池内部欧姆电阻, I_c 、 U_T 分别表示电池充电电流和端电压。

3 模拟充电响应

模拟电池的充电响应就是以测量的充电输出为依据, 通过模拟计算得到电池的电压或电流、SOC、温度等充电响应信息。电池的 SOC 在离散时域的表达式为

$$SOC_k = SOC_{k-1} + \frac{1}{C} K_{SOC_k} K_{T_k} \eta_0 I_{C(k-1)} \Delta t \quad (2)$$

式中: C 为单体电池容量; η_0 为基准库仑效率; K_{SOC_k} 为 SOC 影响系数; K_{T_k} 为温度影响系数。

由图 2 可知, 在恒流充电方式下, 电池端电压的计算公式如下。

$$U_{T_k} = f_{U_{oc}}(SOC_k) + U_{P1k} + U_{P2k} + I_{Ck} R_{Ok} \quad (3)$$

$$U_{P1k} = I_{C(k-1)} R_{1(k-1)} + (U_{P1(k-1)} - I_{C(k-1)} R_{1(k-1)}) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{1(k-1)}}} \quad (4)$$

$$U_{P2k} = I_{C(k-1)} R_{2(k-1)} + (U_{P2(k-1)} - I_{C(k-1)} R_{2(k-1)}) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{2(k-1)}}} \quad (5)$$

式中: U_{P1k} 为单体电池在第 k 个计算周期的浓差极化电压; U_{P2k} 为单体电池在第 k 个计算周期的电化学反应极化电压; $U_{P1(k-1)}$ 为单体电池在第 $k-1$ 个计算周期的浓差极化电压; $U_{P2(k-1)}$ 为单体电池在第 $k-1$ 个计算周期的电化学反应极化电压; $f_{U_{oc}}(SOC_k)$ 为第 k 个计算周期的开路电压; I_{Ck} 为充电电流。极化内阻 R_1 、 R_2 、 R_0 以及极化时间常数 τ_1 、 τ_2 在不同 SOC 下的值可以由参数辨识模板数据通过线性插值得到。

在恒压充电方式下, 充电电流的计算公式为

$$I_{Ck} = \frac{U_{Ck} - (U_{oc_k} + U_{P1k} + U_{P2k})}{R_{Ok}} \quad (6)$$

式中, U_{Ck} 为充电电压。

电池的温度计算公式如下。

$$T_{k+1} = T_k + K_T \frac{(Q_k - \Phi_k) \Delta t}{C} \quad (7)$$

$$Q_k = -9.361 \times 10^{-6} Q_1 I_{Ck} + \frac{U_{P1k}^2}{R_{1k}} + \frac{U_{P2k}^2}{R_{2k}} + I_{Ck}^2 R_{Ok} (J/s) \quad (8)$$

$$\Phi_k = \frac{T_k - T_m}{R_k} \quad (9)$$

式中: Q_k 为电池生热; Q_1 为单位电化学反应热; Φ_k 为电池散热量; T_k 为电池温度; T_m 为环境温度; R_k 为传热过程热阻。电池模型模拟充电响应计算流程图如图 3 所示。首先设定电池额定参数、SOC 初始状态和充电参数, 判断充电方式为恒流或者恒压充电, 若为恒流充电方式, 则实时计算电池荷电状态、电池内阻、电池端电压、电池温度等充电状态信息; 若为恒压充电方式, 则实时计算电池荷电状态、电池内阻、电池电流、电池温度等充电状态信息, 最后判断充电状态是否达到要求, 若不满足要求, 则

继续实时计算电池充电状态；若达到要求，则结束计算。

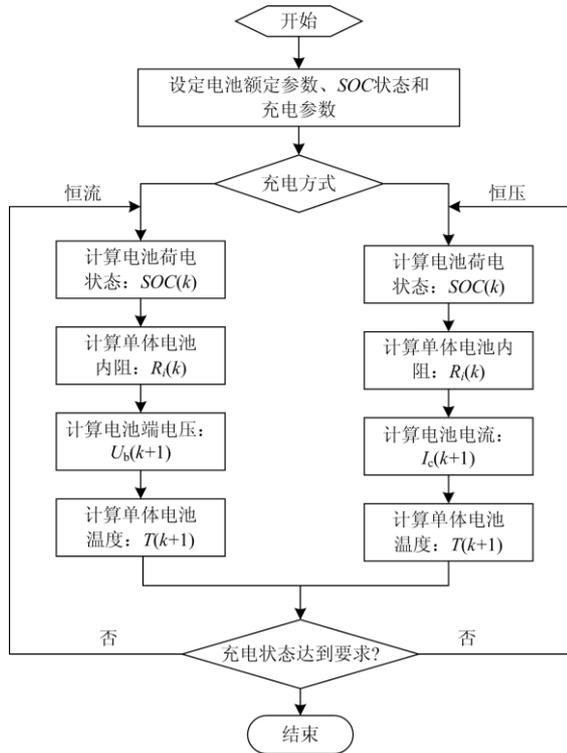


图 3 电池模型模拟充电响应计算流程图

Fig. 3 Flowchart of battery model simulation charge response calculation

4 电池模型验证

4.1 电池模型仿真

假设电池类型为 150 A/370 V 的磷酸铁锂电池, 电池模块数为 5, 每个电池模块由 20 个单体电池串联而成, 采用先恒流后恒压充电模式, 充电电流为 100 A, 额定电压为 320 V, 额定容量为 200 Ah, 单体电池最高允许电压为 3.7 V, 最高允许充电总电压为 370 V, 最高允许充电电流为 150 A, 初始温度为 25 °C, 最高允许温度为 50 °C, 初始 SOC 为 30%。在 Visual Studio 开发环境中搭建了动力电池模型, 图 4 为电池的实时状态界面, 其中包括电池电压、电流、温度以及 SOC 等的显示。

先恒流后恒压充电模式下整组电池包的电流、电压、SOC 的波形图分别如图 5(a)、5(b)、5(c)所示, 先恒流后恒压充电模式下单体电池的电压和温度曲线如图 5(d)、5(e)所示。

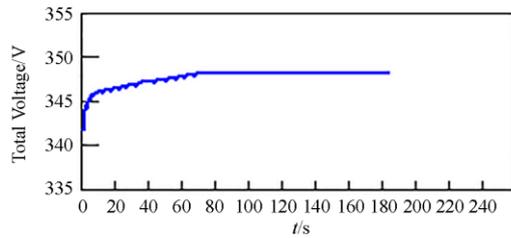
4.2 电池模型实验验证

利用磷酸铁锂实体电池进行充电实验, 与电池模型的充电模拟结果进行对比分析, 验证本电池模型的正确性和有效性。对磷酸铁锂电池组分别进行 5 A、10 A、20 A 变电流充电静置实验, 实验结果与模拟结果对比分别如图 6—图 8 所示, 磷酸铁锂实体电池先恒流后恒压充电实验结果与模拟结果对比如图 9 所示。

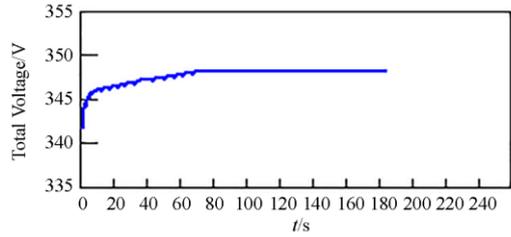


图 4 动力电池动态电路模型

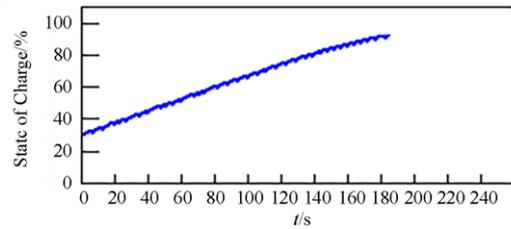
Fig. 4 Dynamic battery dynamic circuit model



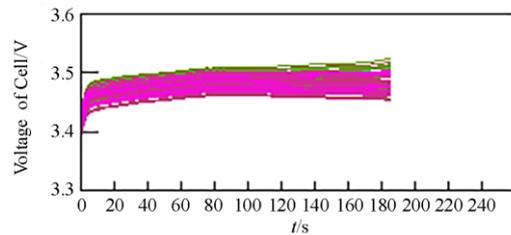
(a) 整组电池包电流波形图



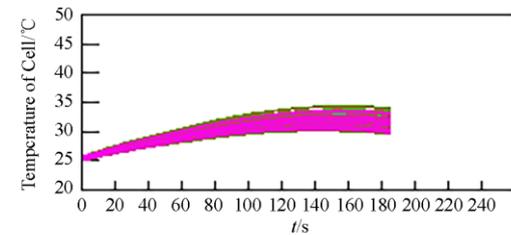
(b) 整组电池包电压波形图



(c) 整组电池包 SOC 波形图



(d) 单体电池电压波形图



(e) 单体电池温度波形图

图 5 动力电池电压、电流、SOC、温度波形图
Fig. 5 Power battery voltage, current, SOC, temperature waveform

通过实验结果对比图可以看出本文所提电池模型可以很好地模拟实际电池的充电特性, 最大电压误差不超过 0.05 V, 最大电流误差不超过 0.5 A, 可以满足电动汽车充电故障监测的需要。

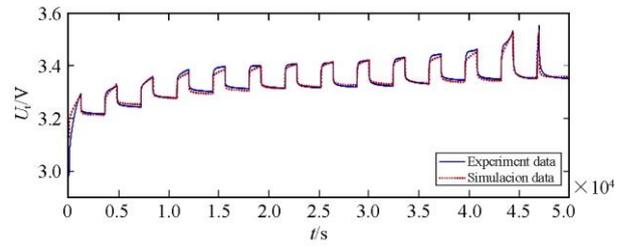


图 6 5 A 变电流充电实验结果与电池模型模拟结果对比图

Fig. 6 Comparison of 5 A variable current charging experiment results and battery model simulation results

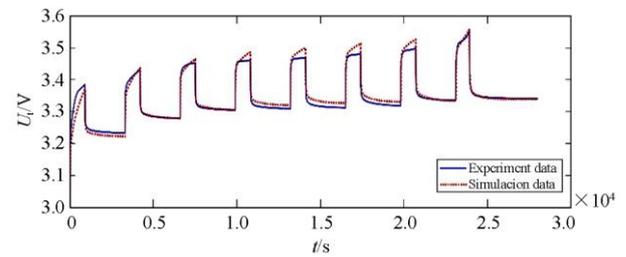


图 7 10 A 变电流充电实验结果与电池模型模拟结果对比图

Fig. 7 Comparison of 10 A variable current charging experimental results and battery model simulation results

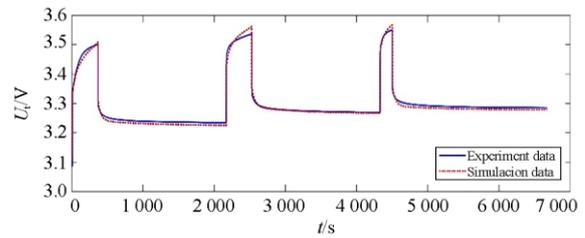


图 8 20 A 变电流充电实验结果与电池模型模拟结果对比图

Fig. 8 Comparison of 20 A variable current charging experiment results and battery model simulation results

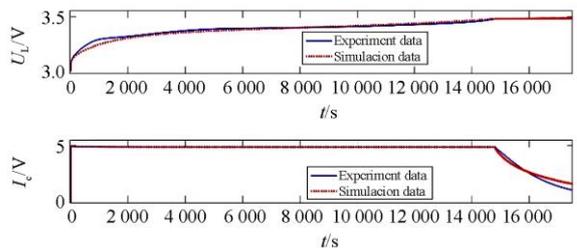


图 9 先恒流后恒压充电实验结果与电池模型模拟结果对比图

Fig. 9 Comparison of constant current first and constant voltage charging experimental results and battery model simulation results

5 故障监测方法

5.1 CAN 总线监听

CAN 总线是一种采用双绞线差分信号传输信息的串行通信总线，支持多个设备单元共享一组 CAN 总线，连接拓扑结构图如图 10 所示，两端的匹配电阻用来消除回波反射。连接在总线上的各单元不分主从，地位相同，在总线空闲时都可以通过控制两根信号线上的电位差来改变总线电平，从而达到信息传送的目的。同时，各设备单元均可以共享 CAN 总线的信息，并通过帧 ID 识别来获取各自需要的数据。在充电过程中，充电设施和电池管理系统可分别看做一个设备单元，两者会在 CAN 总线上传送丰富的充电状态数据，若设计一个独立的 CAN 设备单元接入两者通信的 CAN 总线之间，就可以监听 CAN 总线上的通信数据。

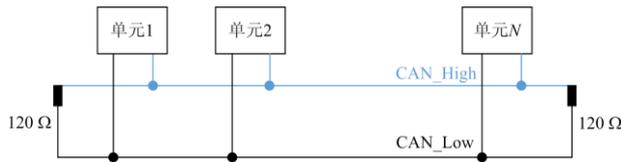


图 10 CAN 总线连接拓扑结构图

Fig.10 CAN bus connection topology diagram

本文将 USBCAN-2I 接口卡作为一个 CAN 通信节点接入非车载充电机与电池管理系统的 CAN 通信网络，该 CAN 通信节点作为第三方 CAN 监听单元，只接收并解析充电通信过程中充电机和电池管理系统之间按照通信协议相互发送的通信报文。

一个完整的充电过程包括低压辅助上电及握手阶段、参数配置阶段、充电阶段以及充电结束阶段。当任一阶段中发生通信超时、通信中断等异常情况时，充电设施都应该立即停止输出，结束充电进程，在相关故障排除后才能重新开始充电。以上各个阶段正常进行过程中，充电设施和电池管理系统都会通过 CAN 总线向彼此发送标志性的通信报文，各个阶段的报文过程如图 11 所示。

各报文代号指代的内容见表 1。

USBCAN-2I 接口卡在总线上获取的电动汽车充电机和电池管理系统之间的每个有效通信数据单元包括 29 位的帧 ID 信息和 64 位的数据信息，如图 12 所示。其中每个帧 ID 中又包括优先级信息(P)、保留位(R)、数据页(DP)、报文识别码(PF)和地址信息(PS、SA)。

当通信报文所携带数据信息多于 8 个字节，此类报文按照 SAEJ1939-21:2006 的相关规定，通过传

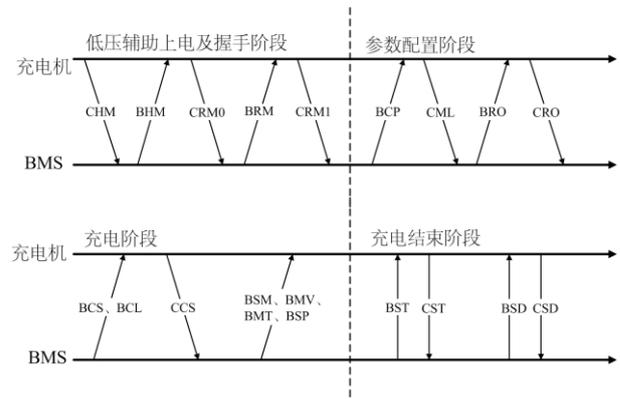


图 11 充电各阶段报文过程

Fig. 11 Message process at each stage of charging

表 1 电动汽车充电通信系统报文内容表

Table 1 Message content table of electric vehicle charging communication system

报文代号	报文内容
CHM	充电机握手报文
BHM	BMS 握手报文
CRM	充电机辨识报文
BRM	BMS 辨识报文
BCP	动力电池充电参数
CML	充电机最大输出能力
BRO	电池充电准备进程
CRO	充电机充电准备进程
BCL	电池充电需求
BCS	电池充电总状态
CCS	充电机充电状态
BSM	动力电池状态
BMV	单体电池电压
BMT	动力电池温度
BSP	动力电池预留
BST	电池中止充电
CST	充电机中止充电
BSD	BMS 充电统计数据
CSD	充电机充电统计数据



图 12 通信数据单元信息结构图

Fig. 12 Communication data unit structure diagram

输协议实现同一报文多包数据的传送功能。该传输协议主要包括多包发送请求(TCPM-RTS)，多包发送请求的应答(TCPM-CTS)，多包数据传送(TCPM-DT)，接收完成应答(TCPM-EM)四部分内容，此类报文帧 ID 中的 PF 位均为 EC(H)和 EB(H)，故无法通过 PF

位直接判断报文类型, 此时需根据报文帧 ID 中 PF 位为 EC(H)的通信数据单元所携带的数据域的倒数第二个字节来判断报文种类。

根据报文解析规则所设计的报文解析程序流程图如图 13 所示。在读取到通信数据单元 ID 帧后, 程序首先判断 ID 帧的 PF 位是否为 EC(H), 若不是则可以直接通过 PF 位的数值判断报文类型, 进而根据报文类型解析数据帧; 若是则需要读取相应数据单元的数据帧, 通过数据帧的第七个字节判断报文类型, 然后读取下一个数据单元信息, 当识别到 ID 帧 PF 位变为 EB(H)时再读取当前数据单元的数据帧, 并根据上一个数据单元传送的报文类型信息进行数据解析。

报文过程解析显示部分界面如图 14 所示, 页面中包含了电动汽车充电过程四个阶段所有的有效报文信息。通过该页面的显示信息一方面可以实时监测充电阶段的转换进程以及报文的传送进程, 另一

方面还可以掌握充电机和电池管理系统的设备基础信息、充电需求信息和充电状态信息。

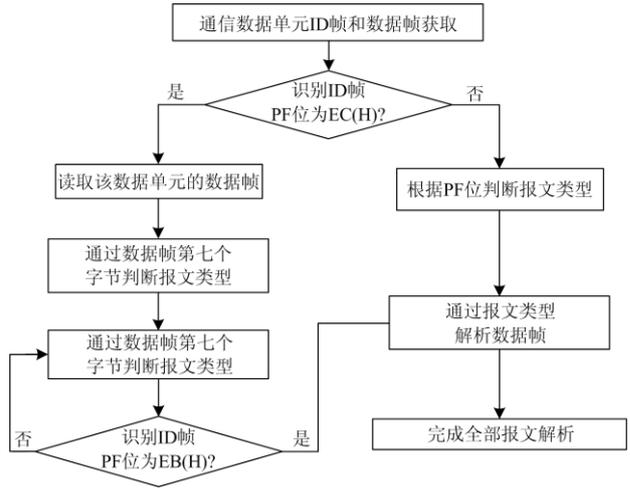


图 13 报文解析程序流程图

Fig. 13 Message analysis program flow chart



图 14 报文过程解析界面图

Fig. 14 Message analysis interface diagram

5.2 故障监测方法实施

根据电动汽车动力蓄电池的类型、规格以及参数信息构建动力电池模型, 例如电池类型、额定容

量、初始荷电状态等信息, 电池模型计算模拟动力电池充电响应。在电动汽车充电机与电池管理系统的充电通信过程中的第三阶段(充电阶段), BMS 向

充电机发送电池充电需求报文(BCL)以及电池充电总状态报文(BCS), 充电机向 BMS 发送充电机充电状态报文(CCS), 其中, BMS 发送的 BCL 报文信息如表 2 所示, BCS 报文信息如表 3 所示, 充电机发送的 CCS 报文信息如表 4 所示。

表 2 电池充电需求报文(BCL)信息

Table 2 Battery charge request message (BCL) information

起始字节或位	长度	定义	发送选项
1	2 字节	电压需求/V	必须项
3	2 字节	电流需求/A	必须项
5	1 字节	充电模式(0x01: 恒压 充电; 0x02: 恒流充电)	必须项

表 3 电池充电总状态报文(BCS)信息

Table 3 Battery charge status message (BCS) information

起始字节或位	长度	定义	发送选项
1	2 字节	充电电压测量值/V	必须项
3	2 字节	充电电流测量值/A	必须项
5	2 字节	最高单体动力电池 电压及其组号	必须项
7	2 字节	当前荷电状态 SOC/%	必须项
8	1 字节	估算剩余充电时间/min	必须项

表 4 充电机充电总状态报文(CCS)信息

Table 4 Charger charge status message (CCS) information

起始字节或位	长度	定义	发送选项
1	2 字节	充电电压测量值/V	必须项
3	2 字节	充电电流测量值/A	必须项
5	2 字节	累计充电时间/min	必须项
7.1	2 位	充电允许(<00>=暂停; <01>: =允许)	必须项

利用 CAN 总线监听技术, 解析充电过程中充电机和电池管理系统的 BCL、BCS 以及 CCS 报文, 实时获取充电机和电池充电状态信息以及电池充电需求信息, 将电池模型模拟的电池电压或电流、SOC、温度等充电响应信息与电池的充电状态信息进行对比, 同时将充电机的充电状态信息(充电电压和电流)与电池充电需求信息(电压需求和电流需求)进行对比, 来判断充电过程是否正常。如果比对信息的差异在允许范围内则说明充电过程正常, 如果比对信息存在明显差异则说明充电过程有误, 对差异信息进行具体解析, 可以明确充电故障信息, 进而实现充电故障预警。故障监测方法实施方案的流程图如图 15 所示。

5.3 故障监测方法验证

利用某充电桩监控平台提供的充电数据(包括充电事故记录), 对所提出的基于电池模型的电动汽车充电故障监测方法进行验证。

5.3.1 正常充电过程

选取电动汽车正常充电过程中的一组完整的电池状态信息数据, 其中包括充电时间、充电电流、充电电压、荷电状态等信息, 在 Matlab 环境中进行程序设计, 验证所提故障监测方法的可行性。电池模型的 SOC 计算数据与 BMS 提供的 SOC 数据对比结果如图 16 所示, 电池模型的计算数据与 BMS 提供的数据最大相对误差小于 2%。电池模型的电压计算数据与 BMS 提供的电压数据对比结果如图 17 所示, 电池模型的计算数据与 BMS 提供的数据最大相对误差小于 0.5%。以上对比结果说明, 电动汽车充电过程正常, 充电结果显示电池的初始 SOC 为 60%, 初始电压为 552 V, 历时 92 min 电池充满, 电压达到 570 V。

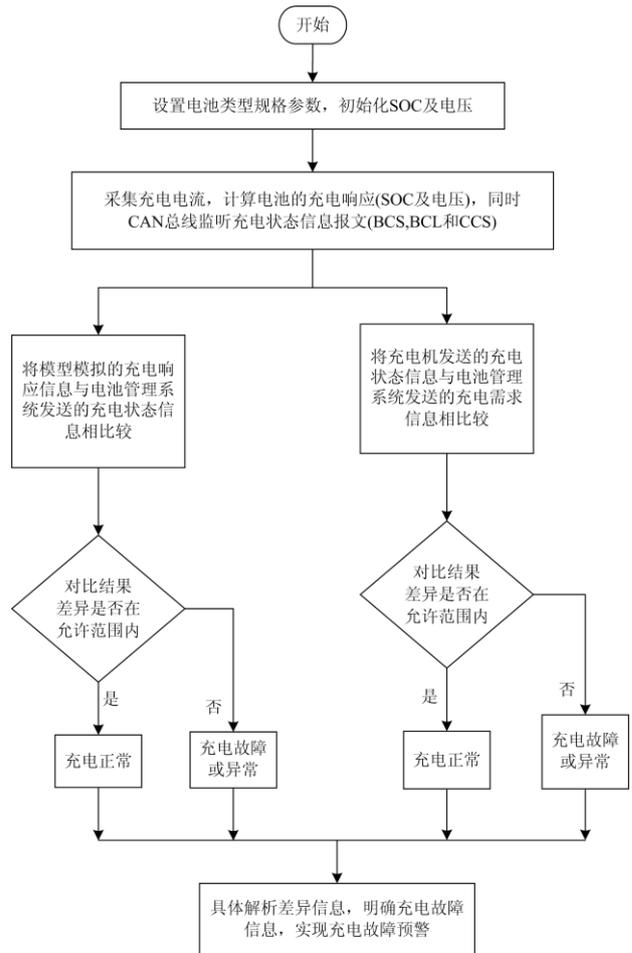


图 15 故障监测实施方案流程图

Fig. 15 Flow chart of fault monitoring implementation plan

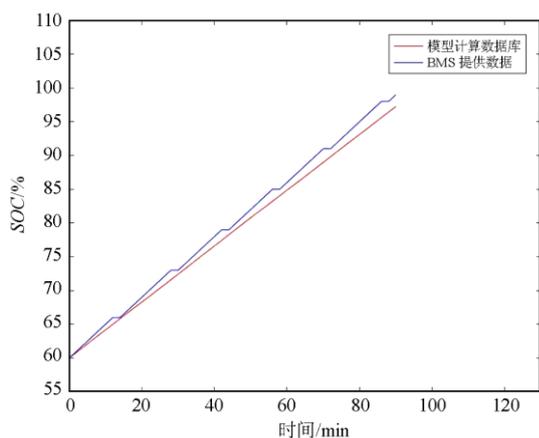


图 16 电池模型的 SOC 计算数据与 BMS 提供的 SOC 数据对比

Fig. 16 Comparison of SOC calculation data of battery model with SOC data provided by BMS

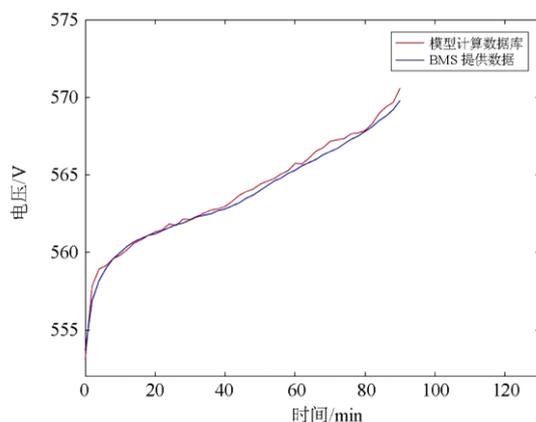


图 17 电池模型的电压计算数据与 BMS 提供的电压数据对比

Fig. 17 Comparison of voltage calculation data of battery model and voltage data provided by BMS

5.3.2 异常充电过程

选取电动汽车充电事故案例的充电数据验证所提故障监测方法在异常充电过程中的应用。电池模型的 SOC 计算数据与 BMS 提供的 SOC 数据对比结果如图 18 所示, 通过图 18 可以看出, 电池的初始 SOC 为 62%, 在充电历时 88 min 电池已经充满的情况下, BMS 没有向充电机发送中止充电指令, 电池继续充电, 在正常情况下, 充电过程应停止, 因此说明充电过程出现异常, 应当发出充电故障预警信号。充电机提供的充电电压信息与 BMS 提供的充电电压数据对比结果如图 19 所示。通过图 19 可以看出, 当充电历时 88 min 电池充满后, 充电过程继续, BMS 提供的电池电压数据并没有按照实际充电过程进行更新, 电池充电需求与充电机充电电

压存在较大差异, 差异数值超出允许范围, 可以判断由于 BMS 模块功能失效导致充电过程出现异常或故障, 而充电机由于缺少主动保护机制未及时发出故障预警信号, 没有及时中止充电过程。

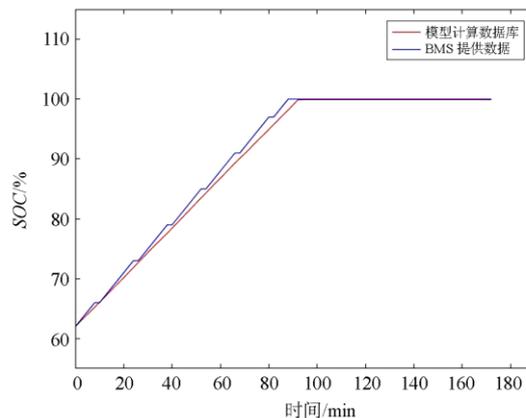


图 18 电池模型的 SOC 计算数据与 BMS 提供的 SOC 数据对比

Fig. 18 Comparison of SOC calculation data of battery model with SOC data provided by BMS

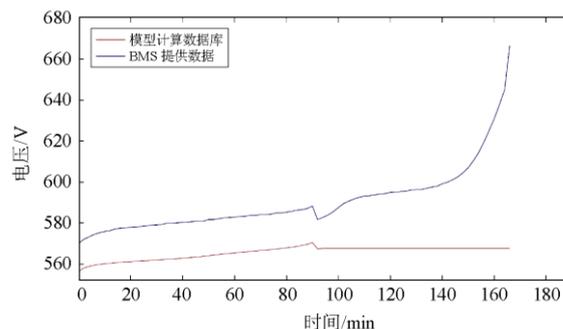


图 19 充电机提供电压数据与 BMS 提供电压数据对比

Fig. 19 Comparison of voltage data provided by charger and voltage data provided by BMS

5.4 可识别故障类型

本文所提基于电池模型的电动汽车充电故障现场监测方法可以有效发现充电过程中可能出现的故障类型, 表 5 列出可识别的故障类型和故障判别方法。

5.4.1 BMS、充电机通信失效

判断 BMS 通信失效可以通过解析 BMS 在充电过程的四个阶段发送的通信报文是否符合通信协议的规定来判断, BMS 通信功能正常时, 会按照通信协议的规定发送相应报文, 当 BMS 在充电过程中任一阶段发生通信超时、通信错误、通信中断等异常情况时, 均视为 BMS 通信功能失效。判断充电机通信失效可以通过解析充电机在充电过程的四个

表 5 故障监测方法可识别故障类型

Table 5 Fault types identified by fault monitoring methods

序号	故障类型	故障判别方法
1	BMS 通信失效	解析 BMS 是否按照通信协议发送报文
2	BMS 电压检测失效	解析电池充电状态报文, 将充电电压与电池模型计算结果比对
3	BMS 电流检测失效	解析电池充电状态报文, 将充电电流与电池模型计算结果比对
4	SOC 估算不准	解析电池充电状态报文, 将 SOC 与电池模型计算结果比对
5	BMS 主板故障	当充电异常时, 不能及时中止充电过程
6	充电机通信失效	解析充电机是否按照通信协议发送报文
7	充电机输出电压过高	比较充电机输出电压与电池充电电压需求
8	充电机输出电压过低	比较充电机输出电压与电池充电电压需求
9	充电机输出电流过大	比较充电机输出电流与电池充电电流需求
10	充电机输出电流过小	比较充电机输出电流与电池充电电流需求

阶段发送的通信报文是否符合通信协议的规定来判断, 充电机通信功能正常时, 会按照通信协议的规定发送相应报文, 当充电机在充电过程中任一阶段发生通信超时、通信错误、通信中断等异常情况时, 均视为充电机通信功能失效。

5.4.2 BMS 电压、电流检测失效, SOC 估算不准

解析电池充电状态报文(BCS), 将充电电压与电池模型计算结果比对, 当差异超出电压偏差允许范围, 即可判断出现 BMS 电压检测失效; 将充电电流与电池模型计算结果比对, 当差异超出电流偏差允许范围, 即可判断出现 BMS 电流检测失效; 将电池 SOC 与电池模型 SOC 计算结果比对, 当差异超出 SOC 偏差允许范围时, 即可判断出现 SOC 估算不准的问题。表 6 为此类故障验证数据。

表 6 故障验证数据

Table 6 Failure verification data

序号	故障类型	验证数据
1	BMS 电压检测失效	充电电压偏差超过 0.5%
2	BMS 电流检测失效	充电电流偏差超过 0.5%
3	SOC 估算不准	SOC 偏差超过 2%

5.4.3 BMS 主板故障

当出现 BMS 通信失效时, BMS 应当发出充电停止请求, 及时中止充电过程, 若 BMS 主板出现故障, 则不能及时中止充电过程, 通过监测充电异常发生后的充电过程可以判断 BMS 主板故障。

5.4.4 充电机输出电压过高、过低

解析电池充电需求报文(BCL)和充电机充电状态报文(CCS), 比较充电机输出电压与电池充电电压需求, 若充电机输出电压大于允许范围, 则说明充电机输出电压过高, 若充电机输出电压小于允许范围, 则说明充电机输出电压过低。表 7 为此类故障验证数据。

表 7 故障验证数据

Table 7 Failure verification data

序号	故障类型	验证数据
1	充电机输出电压过高	充电电压大于 115% 电池充电电压需求值
2	充电机输出电压过低	充电电压小于 85% 充电电压需求值

5.4.5 充电机输出电流过大、过小

解析电池充电需求报文(BCL)和充电机充电状态报文(CCS), 比较充电机输出电流与电池充电电流需求, 若充电机输出电流大于允许范围, 则说明充电机输出电流过大, 若充电机输出电流小于允许范围, 则说明充电机输出电流过小。表 8 为此类故障验证数据。

表 8 故障验证数据

Table 8 Failure verification data

序号	故障类型	验证数据
1	充电机输出电流过大	充电电流大于 115% 电池充电电流需求值
2	充电机输出电流过小	充电电流小于 85% 充电电流需求值

6 结语

本文提出了一种基于电池模型的电动汽车充电故障监测与预警方法。提出动力电池二阶动态电路模型模拟电池充电特性, 以磷酸铁锂电池为例对电池模型进行实验验证, 结果表明所提电池模型可以正确模拟不同类型、规格以及参数的动力电池的充电响应, 最大电压误差不超过 0.05 V, 最大电流误差不超过 0.5A, 可以满足电动汽车充电故障监测的需要。利用 CAN 总线监听技术, 接收并解析充电机充电信息以及电池充电信息和电池充电需求信

息。将电池模型模拟的充电响应信息与电池的充电状态信息进行对比, 同时将充电机的充电状态信息与电池充电需求信息进行对比, 判断充电过程是否正常, 当判断出现异常充电状况时, 及时发出故障预警信号。利用某充电桩监控平台提供的充电数据(包括充电事故数据)验证了充电正常和异常情况下故障监测方法的可行性。该方法可以识别包括 10 余种故障类型, 根据故障类型概括为包括 BMS、充电机通信失效在内的 5 大类故障, 并给出了故障验证数据。

参考文献

- [1] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10.
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10.
- [2] NICHOLAS L, DANIEL S. Regulatory adaptation: accommodating electric vehicles in a petroleum world[J]. Energy Policy, 2012, 45: 308-316.
- [3] KUNIAKI Y, YUKIO S, TOMOMICHI S, et al. Market penetration speed and effects on CO2 reduction of electric vehicles and plug-in hybrid electric vehicles in Japan[J]. Energy Policy, 2012, 45: 529-540.
- [4] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10.
WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 1-10.
- [5] 肖湘宁, 温剑锋, 陶顺, 等. 电动汽车充电基础设施规划中若干关键问题的研究与建议[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 1-10.
XIAO Xiangning, WEN Jianfeng, TAO Shun, et al. Study and recommendations of the key issues in planning of electric vehicles' charging facilities[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 1-10.
- [6] 陈良亮, 张浩, 倪峰, 等. 电动汽车能源供给设施建设现状与发展探讨[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 11-17.
CHEN Liangliang, ZHANG Hao, NI Feng, et al. Discussion on the status and development of electric vehicle energy supply facilities construction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 11-17.
- [7] EFTHYMIU D, CHRYSOSTOMOU K, MORFOULAKI M, et al. Electric vehicles charging infrastructure location: a genetic algorithm approach[J]. European Transport Research Review, 2017, 27: 1-9.
- [8] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 127-131.
GAO Ciwei, ZHANG Liang. Overview of the impact of electric vehicle charging on the power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.
- [9] 刘文霞, 张蕾蕾, 刘宗歧, 等. 城市纯电动汽车发展模式论证方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 34-40.
LIU Wenxia, ZHANG Leilei, LIU Zongqi, et al. Demonstration method of urban pure electric vehicle development model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 34-40.
- [10] 电动汽车非车载传导式充电机与电池管理系统之间的通信协议: GB/T 27930—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
Communication protocol between electric vehicle non-vehicle conductive charger and battery management system: GB/T 27930—2015[S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- [11] 电动汽车非车载传导式充电机与电池管理系统之间的通信协议一致性测试: GB/T 34658—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
Consistency test of communication protocol between non-vehicle conductive charger and battery management system for electric vehicles: GB/T 34658—2017[S]. Beijing: China Standard Press, 2017.
- [12] 李晶, 姜久春. 纯电动汽车充电机系统稳定性研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 13-17.
LI Jing, JIANG Jiuchun. Research on stability of charger system for pure electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 13-17.
- [13] CUI X, SHEN W, ZHENG J. New on-line approach for lithium iron phosphate battery pack balancing based on state of charge[C] // International Conference on Electrical Machines and Systems, 2016, Pattaya, Thailand: 762-767.
- [14] 杨月新, 车延博, 杨立勋. 电动汽车充电机运行状态多指标综合评估[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 72-79.
YANG Yuexin, CHE Yanbo, YANG Lixun. Multi-indicator comprehensive evaluation of the operating state of electric vehicle chargers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 72-79.
- [15] 侯慧, 徐焘, 柯贤彬, 等. 电动汽车快充对配电网的风险研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 87-93.

- HOU Hui, XU Tao, KE Xianbin, et al. Research on the risk of electric vehicle fast charging to the distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 87-93.
- [16] 高德欣, 梁珂, 侯俊杰, 等. 电动汽车充电桩移动监控与故障诊断系统设计[J]. 青岛科技大学学报: 自然科学版, 2019, 40(3): 107-113.
- GAO Dexin, LIANG Ke, HOU Junjie, et al. Design of mobile monitoring and fault diagnosis system for electric vehicle charging piles[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology: Natural Science, 2019, 40(3): 107-113.
- [17] 邢建旭, 王友旭, 张文杰, 等. 一种基于 SOC 的电动汽车充电过程等效电阻模型[J]. 供用电, 2019, 36(8): 61-66.
- XING Jianxu, WANG Youxu, ZHANG Wenjie, et al. An equivalent resistance model of electric vehicle charging process based on SOC[J]. Electricity Supply and Consumption, 2019, 36(8): 61-66.
- [18] 颜湘武, 赵帅帅, 董清, 等. 电动汽车充电机性能综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 164-171.
- YAN Xiangwu, ZHAO Shuashuai, DONG Qing, et al. Comprehensive evaluation of electric vehicle charger performance[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 164-171.
- [19] 李波, 付越, 周荣. 电动汽车电池管理系统(BMS)功能安全标准研究[J]. 新能源汽车供能技术, 2019, 3(1): 19-23.
- LI Bo, FU Yue, ZHOU Rong. Research on functional safety standard for battery management system (BMS) of electric vehicles[J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2019, 3(1): 19-23.
- [20] 张晶. 基于 EV300 电动汽车充电系统故障诊断方法研究[J]. 汽车实用技术, 2019(20): 178-180.
- ZHANG Jing. Research on fault diagnosis method of electric vehicle charging system based on EV300[J]. Automobile Practical Technology, 2019(20): 178-180.
- [21] 张永明, 姚志力, 李菁, 等. 基于配电网概率潮流计算的电动汽车充电站规划策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 9-16.
- ZHANG Yongming, YAO Zhili, LI Jing, et al. Planning Strategy of electric vehicle charging station based on probabilistic power flow calculation of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 9-16.
- [22] 陈磊, 黄琦, 张昌华. 考虑故障影响的电动汽车充电系统控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 117-122.
- CHEN Lei, HUANG Qi, ZHANG Changhua. Study on control strategy of EV charging system considering fault influence[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 117-122.
- [23] 何志超, 杨耕, 卢兰光, 等. 模拟电机端口特性的电力电子负载系统设计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 194-203.
- HE Zhichao, YANG Geng, LU Languang, et al. Design of power electronic load system with analog motor port characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 194-203.
- [24] GREGORY L P. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: part 2 modeling and identification[J]. Journal of Power Sources, 2004, 134(2): 262-276.
- [25] 颜湘武, 李艳艳, 李伟, 等. 电动汽车动力电池充电动态特性仿真方法研究[J]. 电源技术, 2016, 40(2): 353-357.
- YAN Xiangwu, LI Yanyan, LI Wei, et al. Research on simulation method of charging dynamic characteristics of electric vehicle power battery[J]. Power Technology, 2016, 40(2): 353-357.
- [26] 刘伟龙, 王丽芳, 廖承林, 等. 充电模式下电动汽车动力电池模型辨识[J]. 电工技术学报, 2017, 32(11): 198-207.
- LIU Weilong, WANG Lifang, LIAO Chenglin, et al. Model identification of electric vehicle power battery in charging mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(11): 198-207.

收稿日期: 2020-06-15; 修回日期: 2020-09-06

作者简介:

张元星(1988—), 男, 硕士, 通信作者, 研究方向为电动汽车充放电技术; E-mail: zhangyuanxing1988@163.com

李斌(1973—), 男, 硕士, 研究方向为电能管理及电动汽车充放电技术;

颜湘武(1963—), 男, 博士, 研究方向为电力系统及新能源电动汽车技术。

(编辑 张爱琴)