

电动汽车充换电站动力电池全寿命周期在线检测管理系统

连湛伟¹, 石欣², 克潇¹, 徐鹏¹

(1. 许继集团充电站产品研发部, 河南 许昌 461000; 2. 许继集团高压产品研发部, 河南 许昌 461000)

摘要: 为了提高对动力电池健康程度评估的准确性, 针对动力电池(组), 给出一种基于动力电池的全寿命周期特征参数的评估算法。以动力电池的安全使用和准确评估为切入点, 关注动力电池SOC的算法与动力电池SOH的检测方式, 引出动力电池全寿命周期在线监测管理系统的设计思想。以动力电池标称数据为基础, 基于动力电池日常充电/换电、放电数据对动力电池进行检测, 对检测中发现的隐患的动力电池统一调度, 并制定电池维护/检修计划。评估结果表明, 以电池箱(组)为分析/管理对象, 根据动力电池的电气特征量采用对应策略对电池箱进行评估, 可较为准确的评估动力电池当前的健康状态。且可预测出动力电池的使用趋势, 从而达到“提高动力电池使用的安全性, 延长电池的使用寿命, 减少运营成本”的目的。
关键词: 电动汽车充换电站; 动力电池; 全寿命周期管理; 动力电池SOC算法; 动力电池SOH检测

The whole life cycle on-line detection and management system of power battery in the electric vehicle charging and exchanging station

LIAN Zhan-wei¹, SHI Xin², KE Xiao¹, XU Peng¹

(1. XJ Group Charging Station Product Research and Development Department, Xuchang 461000, China;

2. XJ Group High Voltage Product Research and Development Department, Xuchang 461000, China)

Abstract: In order to improve the assessment accuracy of power battery health degree, this paper provides an assessment arithmetic based on power battery life cycle characteristic parameter for power battery box (group). Starting with the safe use and accurate assessment of power battery, concerning the SOC arithmetic and SOH test methods of power battery, it leads to the design concept of on-line monitoring supervision system for power battery life cycle; with the power battery nominal data as basis, it tests the power battery based on its daily charging/switching and discharging data, to conduct unified management of power battery with hidden danger during testing and make battery maintain/servicing plan. The assessment result shows that with battery box (group) as analyzing/managing object, assessing battery box with corresponding strategies according to power battery electrical features, we can assess the current health condition of power battery relatively accurately, and forecast the use tendency of power battery, thus achieving the goal of improving the security of power battery use, prolonging its serving life and reducing the operating costs.

Key words: electric vehicle charging and exchanging station; power battery; life-cycle management; SOC algorithm; method of SOH examination

中图分类号: TM714

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)12-0137-06

0 引言

自汽车出现以来的一百年间, 汽车产业逐渐成为为了促进整个社会进步和经济发展的重要角色, 同时也带动了各个与汽车相关工业支柱产业的迅速发展。然而, 随着全球汽车数量的不断增加, 汽车尾气的不断排放造成了较为严重的大气污染, 也导致能源短缺, 石油等非可再生化石燃料价格持续上涨。为了改变能源消费方式、发展低碳经济、循环经济

以及应对国际能源危机, 我国目前在大力支持发展电动汽车产业。

由于电能属二次能源, 具有绿色环保、使用方便等优点, 使得电动汽车成为了我国研究和开发绿色汽车的主流选择。电动汽车具备显著的节能减排和环保优势, 推广应用电动汽车对于减少石油对外依赖, 保障国家能源安全, 实现经济社会可持续发展具有重要意义。

目前, 电动汽车已成为未来汽车工业发展的方

向，作为电动汽车大规模推广应用的重要前提和基础，电动汽车充换电站的建设引起了国内乃至国际各方广泛关注。据国外市场研究机构最近发布的行业报告《电网上的电动车》预测，到2015年，全球电动车充换电设施将形成年销售额达19亿美元的市场规模^[1-3]。

1 动力电池的全寿命周期管理必要性分析

作为电动汽车核心组成部分，动力电池对电动汽车的安全性、经济性和可靠性都有着非常重大的影响。动力电池的安全、高效使用对电动汽车充换电站实际运行过程起到决定性作用，安全使用动力电池的结果，直接决定电动汽车充换电站乃至电动汽车领域的发展趋势。自以薛家岛电动汽车充换电站为代表的一系列充换电站正式投运以来，在动力电池实际应用中发现了一系列问题，为了保证整个电动汽车充换电站的正常运转，动力电池的全面检测和维护的必要性日趋凸显。

随着电动汽车领域的拓展及对电动汽车使用需求的激增，一套以动力电池的SOC和SOH相关指标为主并全面涵盖动力电池使用的动力电池全寿命周期在线管理系统的提出就显得尤为必要。

2 电动汽车充换电站动力电池全寿命周期在线监测管理系统

2.1 系统概述

动力电池全生命周期管理系统覆盖从动力电池生产完成到动力电池报废，涵盖动力电池“购买、登记、充电、放电、维护、检修”等各个环节。系统结构如图1所示

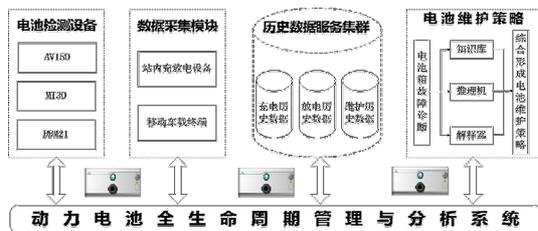


图1 动力电池全生命周期管理与分析系统结构

Fig. 1 System structure of power battery whole life cycle management

电动汽车充换电站动力电池全寿命周期在线监测管理维护系统以“提高电池的使用效率，提升电池使用的安全性，延长电池的使用寿命，减少运营成本”为目标。系统在最大程度上的保证充换电站的正常运行的同时，最大限度的保证电池的安全使用，对动力电池使用过程中出现的问题做到及时

发现，及时解决；而其中对动力电池使用影响最为关键的因素如下：

1. 动力电池 SOC(核电状态)的估算
2. 动力电池 SOH(健康程度)的检测

另外，从产品系列和市场方面而言，还能提高企业在电动汽车充换电业务领域的竞争力，丰富完善电动汽车服务相关产业链。

2.2 构建基于概率模型的动力电池电气特征量专家库

由于动力电池在使用过程中物理化学特性随具体使用环境变化的不确定性，目前尚不存在一种可精确估算动力电池特征参数的专家特征库，故而，此构建方法以“概率”为指导思想，尽可能提高估算的准确性，具体构建方式如下：

- 1) 知识定义。动力电池使用过程中的电池容量、端电压、单体压差、能量以及能量比等。
- 2) 知识设计
 - 电池健康程度检测
 - a) 电池内部单体电压压差；
 - b) 电池容量与电池能量比值；
 - c) 电池端电压变化率与电池充电时间(车辆行驶里程)比值；
 -
 - 电池未来使用参数评估
 - a) 根据标称容量百分比估算；
 - b) 电池内阻比例估算(内阻随电池使用增加)；
 - c) 根据历史使用数据的衰减量进行数据估算；
 -

3) 知识记录。动力电池在日常使用过程中由“充电、放电、维护”组成，动力电池电气特征量专家库以知识定义为基础，记录动力电池使用过程中的相关“知识”；如电池充电过程中，记录此次充电电压压差、充电电量、充电历时等。

4) 知识库形成。基于记录的知识进行筛选过滤，以标称参数为依据，以经验参数设定阈值(人工可调)，剔除阈值之外的离散知识点，对于相邻知识存在较大波动的情况采用插值法进行补充，从而形成遵照正态分布的特征曲线知识库。

5) 推理机的应用。动力电池使用过程中可全程实时采集监测动力电池“知识”，系统可从得到的知识与知识库中的知识进行比较，使用知识设计逻辑推导出电池当前状态，形成动力电池评估结果。

实例应用。以电池充电过程为例，系统根据当前电池类型，自动匹配电池特征数据知识库，根据实时检测“知识”自动比对历史数据和相邻历史数据，以知识设计为评估检测原则，实际应用过程中综合多种方法进行测试，使用加权法进行均衡计算，

从而尽可能提高评估测试结果, 同时检测结果运行人工修改, 从而直接影响评估结果, 并将此次评估结果形成知识, 更新到知识库中。

2.3 动力电池 SOC(核电状态)的估算

动力电池 SOC(核电状态)的估算是动力电池诸多电气量估算的重点和难点。由于电动汽车电池在使用过程中表现的高度非线性, 使准确估计 SOC 有很大的难度。基于目前投运的充换电站的实际使用过程中, 本文主要采用电池箱内部单体电压的方式主要作为量测电池 SOC 的依据。

SOC 的估计对单片电压精度有很高的要求, 图 2 为 LiFePO₄/C 和 LMO/LTO 电池的开路电压 (Open circuit voltage, OCV) 及每毫伏电压对应的 SOC 变化量。由图可见 LMO/LTO 电池 OCV 曲线斜率较大, 大部分范围 (除 SOC 为 60%~70%) 每毫伏电压对应最大的 SOC 变化率小于 0.4%, 因此如果单体电压采集精度在 10 毫伏, 采用 OCV 估计方法, 获得的 SOC 误差 <4%, 而目前我们的电池检测设备和检测技术对于 LMO/LTO 电池, 单体电压采集精度均达到了 5 个 mV, 很大程度上保证了 SOC 的估算的准确率。需要提出的是, LiFePO₄/C 电池的 OCV 曲线斜率较小, 大部分区域 (除了 SOC<40% 及 75%~80%) 内每毫伏电压对应最大的 SOC 变化率达 4%, 因此, 对单体电压采集精度的要求很高, 需要达到 1 mV 左右, 在 SOC 的准确性的估算还有很大的提高空间。

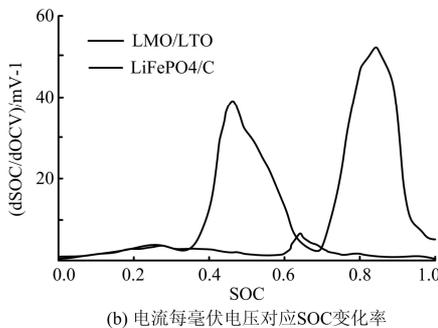
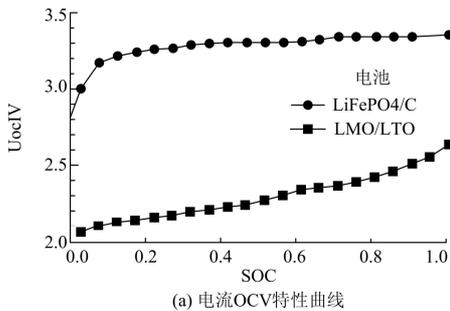


图 2 动力电池电压特征曲线图

Fig. 2 Power battery voltage characteristic curve

由于电压量测 SOC 法尚有提高的空间, 采用安时法作为补充, 通过对充电电流和放电电流积分的方法记录从动力电池输出或者输入的能量, 结合动力电池充放电的起始 SOC 状态, 对动力电池的 SOC 进行估算。

根据动力电池当前状态确定当前的维护策略, 如对新购电池的抽样检测, 使用“电池容量测试”测试电池的容量 (Capacity): 首先对电池进行放电操作, 直至电池电压达到其下限, 此时认为电池当前的容量为 0, 也就是电池里面没有电量; 以恒定电流 (C/2) 对电池进行充电, 直至电池电压达到其标称电压, 历时 T₁, 此时改为恒压充电, 直至电流将至 C/20, 历时 T₂, 至此完成电池的容量测试, 全部维护过程历时为 T₀, 期间电流与时间的积分即为电池的容量。

以某充换电站实际应用为例: 动力电池日常使用过程中可分为“充电过程(电池箱在站内充电)”和“放电过程(电池箱在车辆行驶过程中放电)”, 在动力电池的使用的过程中, 我们对电池的充放电历史记录做了详细的记录; 以动力电池平时使用过程中出现的告警及使用时间为依据, 对动力电池进行例行抽样检测, 首先用电池检测设备对电池进行充放电测试, 得到估算 SOC 的量测参数, 比对特征曲线, 估算 SOC 的特征值, 得到结果 p₁。

以目标电池箱 ID 为依据, 采用数据挖掘技术, 从海量数据信息中得到该对应电池箱的充放电详细历史数据, 以安时法为指导思想, 计算出该电池箱的 SOC 特征值 p₂。

动力电池专家决策机制根据 p₁ 和 p₂, 综合动力电池的标称参数及结合目前动力电池的历史充放电次数和充放电电量等等相关参数, 综合给出目标动力电池 SOC, 根据实际应用结果, 目前 SOC 估算的精确率达到 97%以上^[4]。动力电池 SOC 估算决策图如图 3。

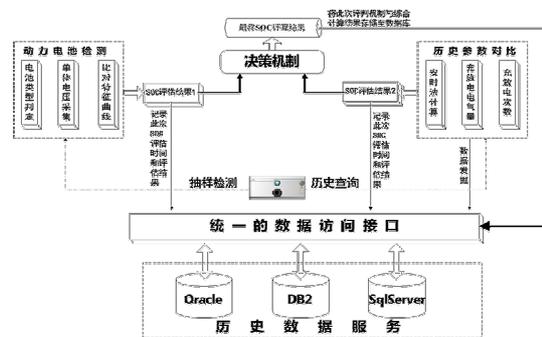


图 3 动力电池 SOC 估算决策图

Fig. 3 Power battery SOC estimation decision

2.4 动力电池 SOH(健康程度)多应力快速评价方法

目前多数 SOH 的定义只限于电池老化的范畴,表征电池老化的主要参数是容量、内阻。一般能量型电池性能衰减用容量的衰减来表征,功率型电池的性能衰减用电阻的增加来表征。从机理上分析,磷酸铁锂性能衰减主要机理为:正极金属离子与电解质产生副反应而溶解于电解质中,在循环或搁置过程中与负极产生还原反应形成固体电解质界面膜(Solid electrolyte interface, SEI),减少了活性锂离子数量。从使用条件分析,影响电池寿命和安全性的主要因素为:高温(副反应加剧);过低温(材料晶格易损、金属离子容易还原);高电位或过充(电解质容易分解并与正极产生副反应、负极锂离子易还原);过放(负极铜箔易腐蚀、正极活性材料晶格易塌陷);高倍率充放电(温升高引起副反应加剧、活性材料晶格易疲劳塌陷)。电池的衰减模型可以分为机理模型和外特性模型,其主要区别在于,前者侧重于对电池内部副反应机理的研究,并以 SEI 膜阻、离子浓度等微观量为观测对象,而后者从实验规律出发,重点关注电池循环过程中表现出来的容量衰减与内阻增加。基于电池外特性的模型,已经有较多文献涉及。最常见的是基于 Arrhenius 模型、神经网络模型等。

以上对动力电池 SOH 及寿命衰减的估算均在恒定条件下试验获得的经验模型上进行评价,未考虑实际车辆运行的多变工况,不能准确表征车用电池的性能衰减状况。还需要深入研究热应力下的电池性能演变规律,时变、非均一、多个体混联电池系统的建模理论与状态估计方法等,提高在多应用作用下对电池与电池组健康状态估算的准确性^[5]。

经过前期的数据模型分析和研究,本系统选取两类电池的相关参数可以较好的反应电池的全面特征,一类为电池使用数据,例如电池使用次数、电池放电电量、电池充电电量、电池累计放电时间等;另外一类为电池电气特征数据以及固有数据,例如电池厂家、电池容量、电池类型等。

本系统在评估动力电池 SOH 过程中,主要使用电池的内阻、电池单体电压等参数作为电池健康程度的评估指标。

1) 内阻评估:在电池使用中,每间隔 50 次充放电,需对动力电池进行电池内阻检测,一般情况下,测试过程中只用 1~2 个 Pulse 即可计算电池内阻, $R = \Delta U / \Delta I$ (单体电池模块内阻)。

2) 端电压评估:动力电池任何一次充放电完成后,系统会根据当前电池箱内部单体电池压差来确定当前电池箱是否需要电池均衡维护,若某箱

特定的电池箱在一段时间内经常出现不均衡度超限,则需要对当前动力电池进行深度充放电维护(对电池充放电的电压上下限分别略超过电池电压额定值的上限和下限,如图 2~图 3 所示);另外,若某箱电池在一段时间内,充放电时间过短,明显低于正常值,则亦需要对当前动力电池进行深度充放电维护。

3) 电池均衡性评估:动力电池的抽样检测中,对电池内的单体电池进行电压采样统计,检测当前单体电池不均衡度评估,如可针对某一批次动力电池分别在 SOC 为 95%、75%、50%进行单体电压不均衡测算,不均衡度大于设定的阈值,系统以 3%~5%为界限进行判定,作为电池 SOH 评判结果的补充。

动力电池的 SOH 判定可基于上述三种方法,综合动力电池电气特征量进行判定。实际实施过程中,在我们既有的知识库中有大量的真实数据,又有上述三种测试手段,前期我们从中选取大量的正常使用下的电池数据,作为样本。

首先对样本数据进行归一化处理,而后使用归一化后的样本数据对电池全周期神经网络进行训练。最大训练次数目前为 5000 次,要求训练精度达到 0.0001,并根据前期的数据模型选择较好的收敛函数。使用样本对系统训练之后,在训练精度达到要求的情况下,获得的各个参数即可作为最新的数据模型,对当前电池进行 SOH 的判定,而图 4 中的三个 SOH 数值可人为指定其占用的百分比,进行最终 SOH 的评估结果^[6]。

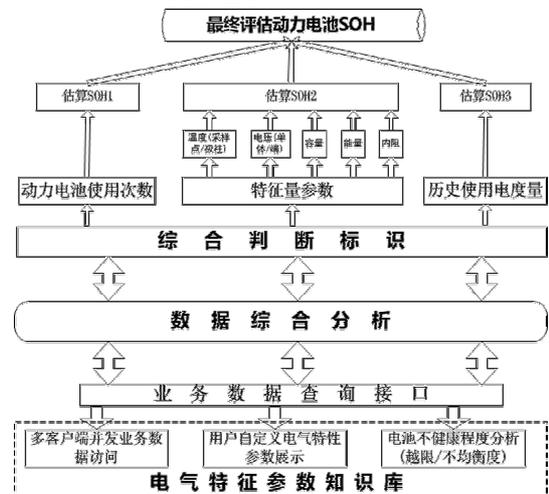


图 4 动力电池 SOH 快速评估方法示意图

Fig. 4 Rapid assessment method for power battery SOH

2.5 动力电池组重组

由于电池制造工艺和技术的影响,电池组内各

单体间存在内阻、电压、容量和温度等不一致问题, 通常也称作电池组的一致性或均匀性问题。不一致性的绝对存在使电池单体、模块和电池组的性能有显著差异, 从电池单体到模块再到电池组质量能量密度和质量功率密度方面性能有明显的衰减。动力电池组的性能与电池单体的性能既有联系又有区别, 为保证动力电池(组)在使用过程中的安全性, 在动力电池的使用过程中需对电池箱(组)的不一致性的参数越限时进行分类和标注, 对不合适再行使用的电池组以“一致性”^[7]为指导原则进行重新配组, 具体策略如图 5 所示。

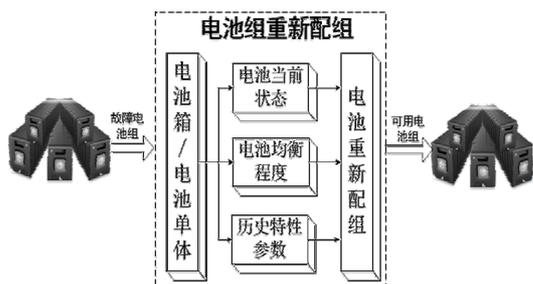


图 5 动力电池重组策略

Fig. 5 Power battery recombination strategies

2.6 预期目标

电动汽车充换电站动力电池全寿命周期在线监测管理系统的建立旨在以动力电池标称数据为参考, 基于动力电池日常充电/换电、放电数据对动力电池进行检测, 对检测中发现的隐患的动力电池统一调度, 并制定电池维护计划, 以电池箱(组)为维护对象, 根据动力电池的电气特征量采用相应的策略对电池箱进行维护; 同时系统支持在线全面检测动力电池的工况, 可定期对电池进行维护, 及时检测发现动力电池存在的隐患, 避免电池在使用过程中出现事故, 同时, 动力电池维护计划由监控系统统一调配, 最大程度上的保证充换电站的正常运行, 同时最大限度的保证电池的安全使用, 做到及时发现, 及时解决; 此外, 系统从电化学、动力学的角度建立电池模型, 由动力电池容量预估、充放电和衰老模型构成, 采用数理统计、优化算法和模糊神经网络等相关概念, 对即时输入的数据进行运算, 并调整网络权值, 使之更好地适应工程应用的现实环境; 此外, 系统基于神经网络技术实现对电池生命的预算估计, 通过对电池历史数据知识库中海量经验数据的统计学习根据既定的数据模型, 形成对不同类型动力电池的经验数据模型, 系统基于当前电池使用信息, 专家系统调用神经网络算法, 自适应准确估算出当前电池 SOH 和 SOC; 基于神

经网络的系统具备知识学习能力, 随着电池使用数据不断增加, 可自适应调整各项参数指标, 更新相应的知识库, 提高动力电池估算结果的正确性和准确性, 从而达到“提高动力电池使用的安全性, 延长电池的使用生命, 减少运营成本”的目的。

3 结论

综合各国的电动汽车研究情况, 电池是整个电动汽车研究中出问题最多的部件, 电动汽车动力电池的容量和使用寿命远不能满足电动汽车运营的要求是制约着电动汽车事业发展的瓶颈。本文从对动力电池进行全寿命周期管理的必要性入手, 着重研究了电动汽车充换电站动力电池全寿命周期在线监测管理系统的设计思路、系统结构、系统功能及实现目标。

动力电池作为电动汽车的主要储能设备, 整个电池系统的总体研究对电动汽车性能试验方案的确定、经济性能分析标准的确定具有深远的意义。通过对电池是合计运行状况的分析, 以优化电池工作环境、提高电池运行效率为目的, 进行电池管理, 探索电池管理系统研究的新方法, 将为更加实用的电池管理系统研制奠定基础^[8]。

参考文献

- [1] 周念成, 蒲松林, 王强钢, 等. 电动汽车快速充电站的储能缓冲系统控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 127-134.
ZHOU Nian-cheng, PU Song-lin, WANG Qiang-gang, et al. Control strategy of energy storage buffer system for fast charging electric vehicle station[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 127-134.
- [2] 薛松, 袁越, 傅质馨, 等. 考虑电动汽车入网技术的电力系统机组组合研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 86-92.
XUE Song, YUAN Yue, FU Zhi-xin, et al. Unit commitment in power system considering vehicle-to-grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 86-92.
- [3] 马玲玲, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 140-148.
MA Ling-ling, YANG Jun, FU Cong, et al. Electric vehicle charging and discharging study of influences on the grid[J]. Power System Protection and Control, 2013,

- 41(3): 140-148.
- [4] 张谦, 韩维健, 愈集辉. 电动汽车充电站仿真模型及其对电网谐波影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 159-164.
ZHANG Qian, HAN Wei-jian, HUI Ji-hui. Electric vehicle charging station simulation model and its impact on the harmonic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 159-164.
- [5] 王震坡, 孙逢春, 林程. 不一致性对动力电池组使用寿命影响的分析[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(7): 577-580.
WANG Zhen-po, SUN Feng-chun, LIN Cheng. Inconsistency on the dynamic analysis of the impact battery life[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(7): 577-580.
- [6] 南金瑞, 孙逢春, 王建群. 纯电动汽车电池管理系统的设计与应用[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(Z2): 1831-1834.
NAN Jin-rui, SUN Feng-chun, WANG Jian-qun. Pure electric vehicle battery management system design and application[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2007, 47(Z2): 1831-1834.
- [7] 雷肖, 陈清泉, 刘开培, 等. 电动车蓄电池荷电状态估计的神经网络方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 155-160.
LEI Xiao, CHEN Qing-quan, LIU Kai-pei, et al. Electric car battery state of charge estimation of neural networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 155-160.
- [8] 高明煜, 何志伟, 徐杰. 基于采样点卡尔曼滤波的动力电池 SOC 估计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 161-167.
GAO Ming-yu, HE Zhi-wei, XU Jie. Kalman filter based sampling points battery SOC estimation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 161-167.

收稿日期: 2013-08-21; 修回日期: 2014-04-25

作者简介:

连湛伟(1972-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究领域为电动汽车自动化控制、动力电池应用技术等; E-mail: zhanweil@xjgc.com

石欣(1983-), 女, 硕士, 工程师, 研究领域为电力系统运行与控制、电力系统自动化保护等;

克潇(1982-), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为电动汽车自动化控制、动力电池应用技术等。