

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208851

动力电池系统检测评价标准体系探讨与 检测关键技术分析*

江境宏¹ 明志茂¹ 赵可沧¹ 刘桂雄²

(1. 广州广电计量检测股份有限公司 广州 510656; 2. 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510640)

摘要: 针对当前动力电池系统尚未建立健全检测评价标准体系、测试技术滞后于产业发展的问题,对动力电池系统检测评价标准体系进行探讨和对检测关键技术进行分析。综合国内外现行动力电池检测相关标准,初步构建涵盖电性能参数测试、安全性能测试、寿命测试和电池管理系统测试的动力电池检测评价标准体系,并围绕动力电池动态工况关键参数测试评估、动力电池热扩散局部热失控安全性测试、电池管理系统功能安全评估等检测关键技术提供方法和思路,为实现动力电池系统测试奠定坚实的基础。

关键词: 动力电池;检测;标准体系;动态工况;热失控;电池管理系统

中图分类号: TM912.8 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 480

Discussion on testing and evaluation standard system and analysis of key testing technologies for traction battery system

Jiang Jinghong¹ Ming Zhimao¹ Zhao Kelun¹ Liu Guixiong²

(1. Guangzhou GRG Metrology and Test Co., Ltd., Guangzhou 510656, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In view of the problems that the current traction battery system has not yet established a sound testing and evaluation standard system and the testing technology lags behind the development of the industry, the traction battery system testing and evaluation standard system is discussed and the key testing technologies are analyzed. Based on the current domestic and foreign traction battery testing standards, the traction battery testing and evaluation standard system covering electrical performance parameter testing, safety performance testing, life testing and battery management system testing has been preliminarily constructed. And the methods and ideas for key testing technologies of traction battery such as the testing and evaluation of key parameters under dynamic working conditions, the safety test of local thermal runaway of thermal diffusion, and the functional safety evaluation of battery management system are also provided, laying a solid foundation to achieve traction battery system testing.

Keywords: traction battery; testing; standard system; dynamic working conditions; thermal runaway; battery management system

0 引言

当前,发展新能源汽车已成为全球共识,新能源汽车在交通出行领域占据重要战略地位^[1-3]。动力电池作为新能源汽车的关键核心部件,其性能测试与评估是保证电动汽车整车动力性能与安全性能的重要环节^[4-6]。根据工信部统计,2021年1~5月全国锂离子电池产量86.1亿只,同比增长56.0%,测量量巨大,具有庞大的市场需求。然而,近

年来随着新能源行业迅速发展,动力电池检测标准也随之不断更新迭代,动力电池检测评价体系涉及的范畴包括IEC、ISO、SAE、GB、QC等系列标准,但各系列标准都相对独立,没有形成较为健全的标准体系。另一方面,动力电池测试技术明显滞后于产业发展,尤其是真实动态工况^[7-10]、系统级热失控^[11-14]测试方面国内尚无成熟的检测技术和方法,导致新能源汽车续航里程测定值与实际值差异大^[15-16]、自燃问题频发威胁人身财产安全^[17-18]。因此,构建动力电

收稿日期:2022-01-14

* 基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2019B090908003)资助

池系统检测评价标准体系和提升动力电池系统检测关键技术能力具有重要战略意义。

本文针对目前动力电池检测评价标准体系及关键技术不足,探讨动力电池系统检测评价标准体系和分析动力电池检测关键技术,通过梳理当前国内外动力电池检测相关标准,初步构建动力电池检测评价标准体系,并且从动力电池动态工况关键参数测试评估、动力电池热扩散局部热失控安全性测试、电池管理系统功能安全评估等方面分析动力电池检测关键技术,为实现动力电池系统测试奠定坚实的基础。

1 动力电池系统检测评价标准体系探讨

1.1 国内外动力电池检测标准现状分析

1) 国外动力电池检测标准现状分析

国外动力电池系统检测标准发布机构主要包括国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)、国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)以及美国汽车工程师学会(Society of Automotive Engineers, SAE)等^[19]。

IEC 于 2010 年发布标准 IEC 62660-1^[20] 和 IEC 62660-2^[21], 分别涵盖锂离子动力蓄电池单体性能测试规程及可靠性和滥用性测试规程,并于 2018 年更新第 2 版^[22-23]; 于 2016 年发布标准 IEC 62660-3^[24], 对锂离子电池的安全性能提出要求并给出测试规范; 于 2017 年发布标准 IEC/TR 62660-4^[25], 给出 IEC 62660-3 标准中内部短路测试的候选

替代测试方法。

ISO 早期围绕高功率型电池、高能量型电池以及安全性能要求制定 12405 系列标准(依次为 ISO 12405-1:2011^[26]、ISO 12405-2:2012^[27] 及 ISO 12405-3:2014^[28]), 为整车厂提供了可选择的测试项目和对应的测试方法。后来, ISO 12405-4:2018^[29] 在 ISO 12405-1/2 基础上将安全类测试删除, 替代电性能和寿命测试项, 形成新的动力电池包和系统性能测试规范。另外, ISO 6469-1:2019^[30] 取代 ISO 6469-1:2009 和 ISO 12405-3:2014, 对包括锂离子电池在内的测试说明和要求进行修订, 该标准是针对所有可充电的储能系统的一般安全要求, 同时几乎将所有测试流程和描述修订为最新的技术规范。

SAE 于 1999 年发布标准 SAE J2464^[31] 并在 2009 年完成修订, 该标准被应用于北美乃至全球地区的车用电池滥用测试, 明确指出各测试项适用范围和需要采集的数据, 并推荐测试项目所需样品数量; 于 2011 年发布安全性标准 SAE J2929^[32] 并在 2013 年完成修订, 该标准包含电动车在行驶过程中可能出现的常规情况测试和异常情况测试两部分; 于 1998 年发布振动测试标准 SAE J2380^[33] 并在 2013 年完成修订, 该标准以电动车在实际车辆道路行驶的振动载荷谱采集统计结果为基础依据, 更符合实际工况, 具有重要参考价值。

表 1 汇总整理了目前国外常用的锂离子动力蓄电池检测标准。

表 1 国外常用的锂离子动力蓄电池检测标准

标准号	标准名称	发布日期	状态
IEC 62660-1 ed1.0	电动道路车辆用锂离子动力蓄电池单体 第 1 部分:性能测试	2010-12-16	现行
IEC 62660-1 ed2.0	电动道路车辆用锂离子动力蓄电池单体 第 1 部分:性能测试	2018-12-12	现行
IEC 62660-2 ed1.0	电动道路车辆用锂离子动力蓄电池单体 第 2 部分:可靠性和滥用性测试	2010-12-16	现行
IEC 62660-2 ed2.0	电动道路车辆用锂离子动力蓄电池单体 第 2 部分:可靠性和滥用性测试	2018-12-12	现行
IEC 62660-3 ed1.0	电动道路车辆用锂离子动力蓄电池单体 第 3 部分:安全性要求	2016-08-29	现行
IEC/TR 62660-4 ed1.0	电动道路车辆用锂离子动力蓄电池单体 第 4 部分:IEC 62660-3 内部短路测试的候选替代测试方法	2017-02-13	现行
ISO 12405-1:2011	电动道路车辆 锂离子动力电池包及系统测试规范 第 1 部分:高功率应用	2011-08-05	废止
ISO 12405-2:2012	电动道路车辆 锂离子动力电池包及系统测试规范 第 2 部分:高能量应用	2012-06-29	废止
ISO 12405-3:2014	电动道路车辆 锂离子动力电池包及系统测试规范 第 3 部分:安全性要求	2014-05-19	废止
ISO 12405-4:2018	电动道路车辆 锂离子动力电池包及系统测试规范 第 4 部分:性能测试	2018-07-25	现行
ISO 6469-1:2019	电动道路车辆 安全规范 第 1 部分:可充电储能系统 (RESS)	2019-04-16	现行
SAE J2464	电动和混合动力电动车辆可充电储能系统安全性和滥用性测试	1999-03 发布 2009-11 修订	现行
SAE J2929	采用锂基可充电电池单体的电动和混合动力车辆动力电池系统安全性标准	2011-02 发布 2013-02 修订	现行
SAE J2380	电动车辆电池的振动测试	1998-01 发布 2013-12 修订	现行

2) 国内动力电池检测标准现状分析

我国于2001年发布第1个关于电动道路车辆用锂离子蓄电池的国家标准化指导性技术文件 GB/Z 18333.1-2001^[34], 该文件对锂离子蓄电池的相关技术参数提出要求,并给出具体试验方法,对后续动力电池标准制定具有重要参考意义。2006年,国家发改委批准发布汽车行业标准 QC/T 743-2006^[35],被业内广泛参考和应用。GB/Z 18333.1-2001和 QC/T 743-2006 均为针对电池单体、模组提出的标准,应用层面较窄,随着新能源汽车行业快速发展,渐渐无法满足动力电池测试需求。为解决这一问题,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局联合中国国家标准化管理委员会于2015年共同发布了一系列国家推荐性标准,包括 GB/T 31484-2015^[36]、GB/T 31485-2015^[37]、GB/T 31486-2015^[38]、GB/T 31467.1-2015^[39]、GB/T 31467.2-2015^[40]、GB/T 31467.3-2015^[41]等,将应用层面拓展到电池单体、模组和系统,测试内容涵盖电性能参数测试、安全性能测试和寿命测试,有效地推动行业发

展。2020年,国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会联合发布强制性国家标准 GB 38031-2020^[42],替代推荐性标准 GB/T 31485-2015 和 GB/T 31467.3-2015,删除电池模组的安全要求和试验方法,并对电池单体、系统的安全要求和试验方法作出较大幅度改动。

电池管理系统是电动汽车动力电池系统的重要组成部分,其主要功能是监视蓄电池的状态(温度、电压、荷电状态等),可以为蓄电池提供通信、安全、电芯均衡及管理控制。2011年,工信部发布汽车行业标准 QC/T 897-2011^[43],规定了电动汽车用电池管理系统的术语与定义、要求、试验方法、检验规则、标志等。2016年,国家推荐性标准 GB/T 38661-2020^[44]发布,其在 QC/T 897-2011 基础上进行补充完善,包括首次给出电池功率状态(SOP)定义,对SOC估算累积误差提出更高要求,将SOC误差修正速度列为推荐性测试方法并给出详细测试过程等。

表2汇总整理了目前国内常用的锂离子动力电池检测标准。

表2 国内常用的锂离子动力电池检测标准

标准号	标准名称	发布日期	状态
GB/Z 18333.1-2001	电动道路车辆用锂离子蓄电池	2001-03-07	现行
QC/T 743-2006	电动汽车用锂离子蓄电池	2006-03-07	现行
GB/T 31484-2015	电动汽车用动力蓄电池循环寿命要求及试验方法	2015-05-15	现行
GB/T 31485-2015	电动汽车用动力蓄电池安全要求及试验方法	2015-05-15	被替代
GB/T 31486-2015	电动汽车用动力蓄电池电性能要求及试验方法	2015-05-15	现行
GB/T 31467.1-2015	电动汽车用锂离子动力蓄电池包和系统 第1部分:高功率应用测试规程	2015-05-15	现行
GB/T 31467.2-2015	电动汽车用锂离子动力蓄电池包和系统 第2部分:高能量应用测试规程	2015-05-15	现行
GB/T 31467.3-2015	电动汽车用锂离子动力蓄电池包和系统 第3部分:安全性要求与测试方法	2015-05-15	被替代
GB 38031-2020	电动汽车用动力蓄电池安全要求	2020-05-12	现行
QC/T 897-2011	电动汽车用电池管理系统技术条件	2011-12-20	现行
GB/T 38661-2020	电动汽车用电池管理系统技术条件	2020-03-31	现行

1.2 动力电池系统检测评价标准体系构建

良好健全的标准体系能够有效规范市场秩序,引导行业良性发展,促进行业技术进步^[45-46]。通过研读当前国内外现行动力电池系统检测标准内容,可将动力电池技术指标检验评估方法归纳为3大类:电性能参数测试、安全性能测试、寿命测试。电性能参数测试主要是针对动力电池单体、模组或系统在不同温度与工况下进行充放电功率、内阻、容量与能量等指标评定;安全性能测试用于评价动力电池在复杂与极端环境或线路故障状态下电池自我保护能力和危害性;寿命测试则是用于评价动力电池是否符合标准循环次数或指定车型标准工况下是否达标的重要手段。另一方面,电池管理系统作为动力电池系统的重要组成部分,其技术要求也应纳入标准体系。因此,可建立动力电池系统检测评价标准体系如下。

如图1所示,构建的动力电池系统检测评价标准体系

分为4个部分,分别为电性能参数测试、安全性能测试、寿命测试和电池管理系统测试,其中电性能参数测试涵盖 ISO 12405-4:2018、GB/T 31486-2015、GB/T 31467.1-2015、GB/T 31467.2-2015 等标准,安全性能测试涵盖 ISO 6469-1:2019、GB 38031-2020 等标准,寿命测试涵盖 GB/T 31484-2015 等标准,电池管理系统测试涵盖 QC/T 897-2011、GB/T 38661-2020 等标准,整个体系内容较为全面,覆盖到电池单体、模组、系统、电池管理系统等层面,具有实际应用价值。

2 动力电池系统检测关键技术分析

2.1 动力电池动态工况关键参数测试评估技术

研究车辆动态工况下动力电池关键参数测试评估技术,能够更加真实地反映动力电池使用性能,克服静态工况评估方法局限性^[47-48]。现有标准 GB/T 31486-2015 对

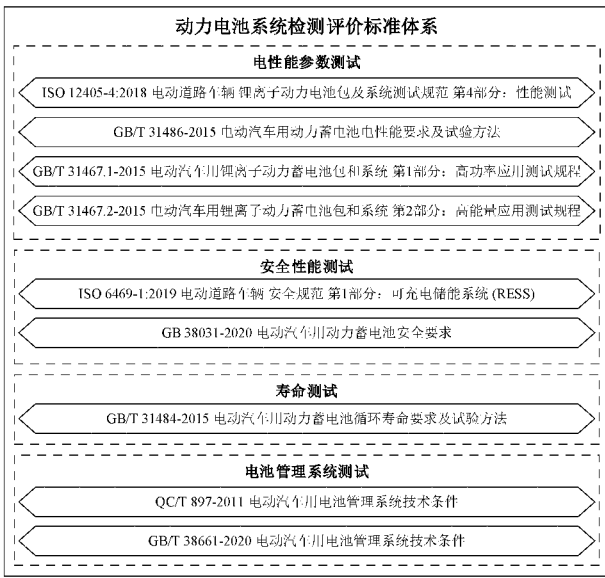


图 1 动力电池系统检测评价标准体系

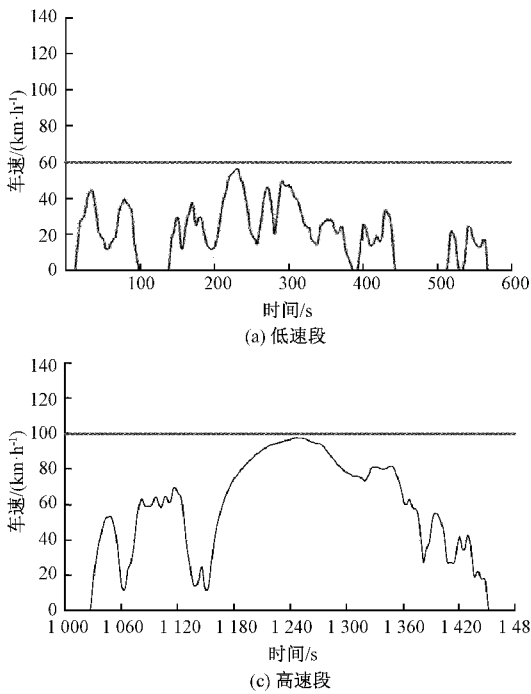


图 2 各速段示意图

动力电池性能所作的测试要求, 每一项测试均单独进行, 缺乏考虑车辆实际行驶过程中外界综合环境对电池影响。因此, 为了更真实地测试道路环境中动力电池关键性能参数, 加之道路环境中最常见为振动, 首先研究基于电流、振动控制的车辆动态工况模拟技术。

在最新国标 GB 18352.6-2016《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》^[19] 中, 车辆工况以全球轻型车统一测试循环为准, 单个循环分为低速段、中速段、高速段、超高速段, 每个速段均对速度和对应时间进行规定, 从数值上完成车辆工况定义, 图 2 为各速段示意图, 图中粗线可粗略定义各速段, 如低速段速度 < 60 km/h, 中速段速度 < 80 km/h, 高速段速度 < 100 km/h, 超高速段速度 < 140 km/h。

基于电流、振动控制的车辆动态工况模拟技术, 即将放电电流对应为速度, 振动对应为速度与加速度效果叠加, 因汽车在速度、加速度均为 0 时仍有振动。根据模型完成基于电流、振动控制的车辆动态工况定义, 单个测试

循环同样分为低速段、中速段、高速段、超高速段, 低速段动态模拟工况如图 3 所示。

在多次测试循环过程中, 计量蓄电池放电容量并绘制成曲线, 统计电池最终总放电量。

2.2 动力电池热扩散局部热失控安全性测试技术

动力电池热失控是影响动力电池系统可靠性的关键因素, 研究动力电池系统级热扩散局部热失控安全性测试技术极其重要^[50-52]。基于热扩散局部热失控的动力电池系统安全性、可靠性评估, 使用隔热材料搭建物理隔离型测试环境, 既保障外界环境安全, 亦可很好模拟动力电池

系统真实封闭环境。隔离测试箱外部设置温度传感器, 可触发外围消防联动系统采取灭火降温措施, 防止发生次生灾害, 减少安全事故发生风险。隔离测试箱内部采用可控温度的柔性发热功率单元触发动力电池系统局部热失控状态, 与此同时, 监控系统实时检测动力电池温度、电压和电流。图 4 为基于热扩散局部热失控的动力电池系统安全性可靠性评估系统示意图。

使用平面状或者棒状可控温度的柔性发热功率单元, 其表面覆盖陶瓷、金属或绝缘层。可控温度的弱性发热功率单元加热面积不大于动力电池单体的表面积, 其加热面

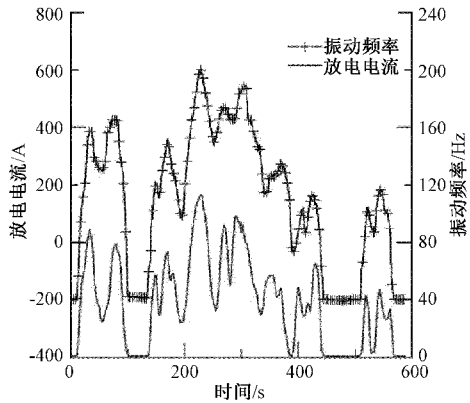


图3 低速段动态模拟工况示意图

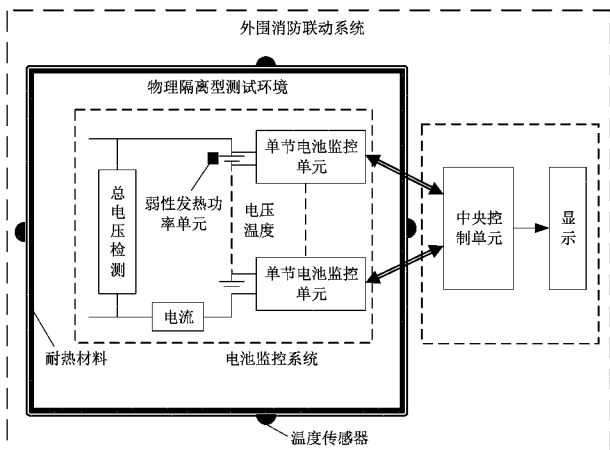


图4 基于热扩散局部热失控的动力电池系统安全性可靠性评估系统

与电池单体表面直接接触,对于尺寸与动力电池单体相同的块状可控温度的柔性发热功率单元,用该加热装置代替其中一个动力电池单体,与触发对象的表面直接接触;对于薄膜可控温度的柔性发热功率单元,则应将其始终附着在触发对象的表面。对于不同形状动力电池,可控温度的柔性发热功率单元位置布置在远离热传导的一侧,即安装在可控温度的柔性发热功率单元对侧,如图5所示。

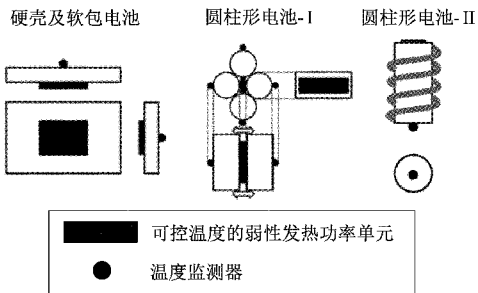


图5 对不同形状动力电池可控温度的柔性发热功率单元位置

2.3 电池管理系统功能安全评估技术

动力电池管理系统功能主要包括:实时监控电池参数

(总电压、总电流、单体电池电压检测),电池状态估计(SOC、SOE、SOH)、在线故障诊断(故障检测、故障类型判断、故障定位、故障信息输出)、充电状态控制、电池模组均衡管理(电池模组容量与单体容量均衡)、热管理(参照电池模组内温度分布,决定加热、散热的强度)、网络通讯、信息存储等^[53-54]。一套完整的电池管理系统的设计可从三方面进行:1)安全性,保护电池单体或模组免受损坏,防止出现安全事故;2)耐久性,保证动力电池工作在安全区域内,延长电池的使用寿命;3)动力性,在车辆要求的状态下,提供动力输出,图6为本文采用的电池管理系统功能指标构成。

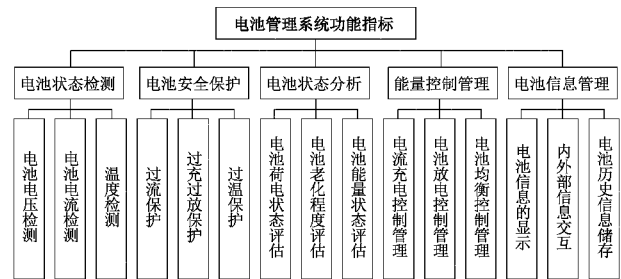


图6 本文采用的电池管理系统功能指标构成图

电池管理系统以其丰富的功能性,其功能安全性是整车安全性能的重要参考,目前国内外在电池管理系统的功能安全性研究较少,本文参照国际标准 ISO 26262,提出基于指标权重分配算法筛选的电池管理系统功能安全评估方法。

图7为基于指标权重分配算法筛选的功能安全评估方法应用到电池管理系统的示意图。在电池管理系统功能安全中,把风险(R)或危险事件描述为一个函数(F),该函数与危险事件发生频率(f),即系统及时反应避免特定伤害或损害能力;损害和损伤可控性(C),以及潜在的严重程度(S)有关。其中的潜在严重程度(S)由上述的电池管理系统功能指标中的电池状态检测(S_{detc})、电池安全保护(S_{safe})、电池状态分析(S_{state})、能量控制管理(S_{manage})参数加权构成,如式(1)所示,其中 K_i 代表权重。本文将功能安全风险(R)进行指标权重分配算法后按照数值大小划分

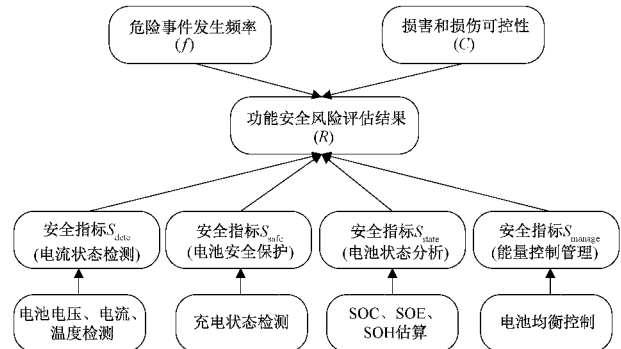


图7 基于指标权重分配算法筛选的电池管理系统功能安全评估方法

为 4 个等级 A、B、C、D,其中 A 是最低安全等级,D 是最高安全等级。

$$R = F(f, C, S)$$

$$S = K_1 S_{\text{dete}} + K_2 S_{\text{safe}} + K_3 S_{\text{state}} + K_4 S_{\text{manage}} \quad (1)$$

3 结 论

本文针对目前动力电池检测评价标准体系不足,在梳理当前国内外动力电池检测相关标准基础上,初步构建动力电池检测评价标准体系。标准体系包括电性能参数测试、安全性能测试、寿命测试和电池管理系统测试 4 个部分,覆盖到电池单体、模组、系统、电池管理系统等层面,具有实际应用价值。本文还指出当前国内在动力电池真实动态工况、系统级热失控测试方面尚无成熟的检测技术和方法,并从动力电池动态工况关键参数测试评估、动力电池热扩散局部热失控安全性测试、电池管理系统功能安全评估等方面分析动力电池检测关键技术,分别提供方法和思路,为实现动力电池系统测试奠定坚实的基础。

参考文献

- [1] ZHENG C. Technical analysis on energy conservation and emission reduction of new energy electric vehicle in China [C]. AIP Conference Proceedings, AIP Publishing LLC, 2017, 1890(1): 040027.
- [2] 王震坡,黎小慧,孙逢春. 产业融合背景下的新能源汽车技术发展趋势[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(1): 1-10.
- [3] 钟森鸣,黄坚,吴嘉健,等. 新能源汽车动态工况 EMI 测试系统构架设计与关键技术分析[J]. 中国测试, 2017, 43(8): 76-79.
- [4] MICARI S, FOTI S, TESTA A, et al. Reliability assessment and lifetime prediction of Li-ion batteries for electric vehicles[J]. Electrical Engineering, 2021: 1-13.
- [5] 骆凡,黄海宏,王海欣. 基于电化学阻抗谱的退役动力电池荷电状态和健康状态快速预测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 172-180.
- [6] 戴冬冰,冯冬梅,张军,等. 动力电池均衡充放电系统的研究和设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(11): 111-115.
- [7] ZHANG L, WANG S, ZOU C, et al. A novel streamlined particle-unscented Kalman filtering method for the available energy prediction of lithium-ion batteries considering the time-varying temperature-current influence[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(12): 17858-17877.
- [8] 王建锋,张照震,李平. 基于加权自适应递推最小二乘法与 EKF 的锂离子电池 SOC 估计[J]. 汽车技术, 2021(10): 16-22.
- [9] 李礼夫,董万里. 基于行驶工况的纯电动汽车能量消耗的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(4): 164-168.
- [10] 李杰. 计及路况信息影响机理的插电式混合动力汽车能量管理策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [11] LI Y, LUO Y, JIANG C, et al. Study of the test conditions and thermostability of an overcharge test for large capacity lithium-ion batteries [J]. Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, 2021, 18(2): 020907.
- [12] ARENDAS A, MAJUMDAR P, SCHROEDER D, et al. Experimental investigation of the thermal characteristics of Li-ion battery for use in hybrid locomotives [J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2014, 6(4): 041003.
- [13] 劳力. 高比能锂离子动力电池系统充电策略及热失控安全研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [14] 王淮斌,李阳,王钦正,等. 三元锂离子动力电池热失控及蔓延特性实验研究[J]. 工程科学学报, 2021, 43(5): 663-675.
- [15] 王莫然,董彬,梁坤峰,等. 纯电动汽车冬季冷启动阶段热管理策略影响续航里程分析[J]. 制冷学报, 2021, 42(1): 60-66,73.
- [16] 张宁,汤建林,彭发豫,等. 磷酸铁锂动力电池循环寿命预测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(1): 33-39.
- [17] 孙振宇,王震坡,刘鹏,等. 新能源汽车动力电池系统故障诊断研究综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(14): 87-104.
- [18] 陈泽宇,熊瑞,孙逢春. 电动汽车电池安全事故分析与研究现状[J]. 机械工程学报, 2019, 55(24): 93-104,116.
- [19] 陶文玉,张敏,徐霁吻,等. 动力锂离子电池测试标准比较和分析[J]. 电池, 2018, 48(2): 122-125.
- [20] International Electrotechnical Commission. Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles Part 1: Performance testing: IEC 62660-1 ed1.0[S]. Switzerland, 2010.
- [21] International Electrotechnical Commission. Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles Part 1: Performance testing: IEC 62660-1 ed2.0[S]. Switzerland, 2018.
- [22] International Electrotechnical Commission. Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles Part 2: Reliability and abuse testing: IEC 62660-2 ed1.0[S]. Switzerland, 2010.
- [23] International Electrotechnical Commission. Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road

- vehicles—Part 2: Reliability and abuse testing; IEC 62660-2 ed2.0[S]. Switzerland, 2018.
- [24] International Electrotechnical Commission. Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles—Part 3: Safety requirements; IEC 62660-3 ed1.0[S]. Switzerland, 2016.
- [25] International Electrotechnical Commission. Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles Part 4: Candidate alternative test methods for the internal short circuit test of IEC 62660-3; IEC/TR 62660-4 ed1.0[S]. Switzerland, 2017.
- [26] International Organization for Standardization. Electrically propelled road vehicles Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems—Part 1: High-power applications; ISO 12405-1:2011[S]. Switzerland, 2011.
- [27] International Organization for Standardization. Electrically propelled road vehicles—Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems—Part 2: High-energy applications; ISO 12405-2:2012[S]. Switzerland, 2012.
- [28] International Organization for Standardization. Electrically propelled road vehicles—Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems—Part 3: Safety performance requirements; ISO 12405-3: 2014[S]. Switzerland, 2014.
- [29] International Organization for Standardization. Electrically propelled road vehicles—Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems Part 4: Performance testing; ISO 12405-4:2018[S]. Switzerland, 2018.
- [30] International Organization for Standardization. Electrically propelled road vehicles Safety specifications Part 1: Rechargeable energy storage system (RESS); ISO 6469-1:2019[S]. Switzerland, 2019.
- [31] Society of Automotive Engineers. Electric and hybrid electric vehicle rechargeable energy storage system (RESS) safety and abuse testing; SAE J2464[S]. United States, 2009.
- [32] Society of Automotive Engineers. Safety standard for electric and hybrid vehicle propulsion battery systems utilizing lithium-based rechargeable cells; SAE J2929[S]. United States, 2013.
- [33] Society of Automotive Engineers. Vibration testing of electric vehicle batteries; SAE J2380 [S]. United States, 2013.
- [34] 全国碱性蓄电池标准化技术委员会. 电动道路车辆用锂离子蓄电池: GB/Z 18333.1-2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [35] 全国汽车标准化技术委员会. 电动汽车用锂离子蓄电池: QC/T 743-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [36] 全国汽车标准化技术委员会. 电动汽车用动力电池循环寿命要求及试验方法: GB/T 31484-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [37] 全国汽车标准化技术委员会. 电动汽车用动力电池安全要求及试验方法: GB/T 31485-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [38] 全国汽车标准化技术委员会. 电动汽车用动力电池电性能要求及试验方法: GB/T 31486-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [39] 全国汽车标准化技术委员会. 电动汽车用锂离子动力电池包和系统 第1部分: 高功率应用测试规程: GB/T 31467.1-2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [40] 全国汽车标准化技术委员会. 电动汽车用锂离子动力电池包和系统 第2部分: 高能量应用测试规程: GB/T 31467.2-2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [41] 全国汽车标准化技术委员会. 电动汽车用锂离子动力电池包和系统 第3部分: 安全性要求与测试方法: GB/T 31467.3-2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [42] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车用动力电池安全要求: GB 38031-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [43] 全国汽车标准化技术委员会. 电动汽车用电池管理系统技术条件: QC/T 897-2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [44] 全国汽车标准化技术委员会. 电动汽车用电池管理系统技术条件: GB/T 38661-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [45] 王莉. 构建电动汽车及充电设施标准体系[J]. 质量与标准化, 2018(8): 1-4.
- [46] 李振宇. 新能源汽车标准体系框架构建策略研究[J]. 中国标准化, 2017(24): 18-19.
- [47] 黎金科. 插电式混合动力汽车出行工况预测及自适应控制策略研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2020.
- [48] 韩乐. 车载混合储能动力系统功率最优分配策略研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(10): 94-98.
- [49] 生态环境部. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段): GB 18352.6-2016[S]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [50] 吴飞驰, 夏顺礼, 赵久志, 等. 三元动力电池的热失控安全性方法研究[J]. 中国测试, 2015, 41(5): 125-128.
- [51] 马瑞鑫, 刘吉臻, 汪双凤, 等. 锂离子电池热失控扩展特征及抑制策略研究进展[J]. 科学通报, 2021,

- 66(23): 2991-3004.
- [52] 张世超, 沈泽宇, 陆盈盈. 金属锂电池的热失控与安全性研究进展[J]. 物理化学学报, 2021, 37(1): 61-78.
- [53] 杨刘倩, 徐兴无, 张敏, 等. 电动汽车用电池管理系统硬件在环仿真测试研究[J]. 中国测试, 2018, 44(S1): 160-165.
- [54] 张照妮, 郭天滋, 高明裕, 等. 电动汽车锂离子电池

荷电状态估算方法研究综述[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(7): 1803-1815.

作者简介

江境宏, 硕士研究生, 主要研究方向为动力电池可靠性测试与分析。

E-mail:jiangjh@grgtest.com

刘桂雄, 教授, 主要研究方向为测控技术及仪器研究。

E-mail:mcgxliu@scut.edu.cn