

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.02.016

# 基于用户习惯的纯电动乘用车低温续航里程变化分析

朱 成, 刘建春, 方凯正, 陈 佚, 刘 頔  
(北京卡达克科技中心有限公司, 北京 100070)

**摘要:**为研究用户习惯对整车在低温环境下的续航里程的影响,搭建了整车能耗解析测试系统,基于某上市车型进行环境仓转鼓测试,研究了纯电动乘用车在低温环境下的动力电池放电特性及整车能耗特征,分析了用户使用习惯对整车续航里程的影响。基于测试数据,精确分析了整车能量流向分配及损耗情况,并针对不同用户习惯及环境温度下整车及各部件的能耗差异、动力电池放电量差异进行了对比分析。结果表明:低温环境下整车续航里程与出行特征、环境温度均存在明显的关联;以上、下班通勤用户单次出行里程约为29 km(基于中国工况)为例,在-15℃环境下多天累计续航里程比单次行驶的极限续航里程低15.1%;环境温度降低,车辆续航里程也减小,在-25℃环境下车辆单次极限续航里程相比-15℃环境下降了16.1%。针对续航里程变化的原因和规律,分别从电池放电量差异及电驱动系统、空调系统、低压电器能耗差异等方面进行对比分析,从而精确定位了整车能耗优化的入手点,通过优化电池热管理、提升部件工作效率等技术路径以降低整车能耗,为提升车辆低温环境下的续航能力提供理论指导和数据参考。

**关键词:**汽车工程;低温续航里程;测试分析;用户习惯;纯电动乘用车;整车能耗特性

中图分类号:U469.72

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2021)02-0125-07

## Analysis on Endurance Mileage Change of Electric Passenger Vehicle at Low Temperature Based on User's Habit

ZHU Cheng, LIU Jian-chun, FANG Kai-zheng, CHEN Yi, LIU Di  
(Beijing CATARC Science and Technology Center Co., Ltd., Beijing 100070, China)

**Abstract:** In order to research the influence of user's habit on the whole vehicle endurance mileage in low temperature environment, the vehicle energy consumption test system is built, the environmental warehouse drum test based on a market vehicle model is carried out, the battery discharge characteristics and vehicle energy consumption characteristics of electric passenger vehicles in low temperature environment are studied, and the influence of user's habit on vehicle endurance mileage is analyzed. Based on the test data, the energy flow distribution and loss of the vehicle are accurately analyzed, and the energy consumption difference and battery discharge difference of the whole vehicle and its components under different users' habits and environmental temperatures are comparatively analysed. The result shows that (1) the vehicle endurance mileage in low temperature environment is obviously related to the travel characteristics and environmental temperature; (2) taking the single trip mileage of commuters about 29 km (based on Chinese working conditions) for example, the accumulated endurance mileage in multiple days at -15℃ is 15.1% lower than the limit endurance mileage of a single trip; (3) when the ambient temperature is lower, the vehicle endurance mileage also decreases, the single limit endurance mileage at -25℃ is 16.1% lower than that at

收稿日期:2020-05-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFE0104700)

作者简介:朱成(1982-),男,河北深州人,博士,高级工程师。(zhucheng@catarc.ac.cn)

-15 ℃。According to the reason and rule of endurance mileage change, the differences of battery discharge, the differences of energy consumption of electric drive system, air-conditioning and low-voltage electrical appliances are comparatively analysed, so as to accurately locate the point of vehicle energy consumption optimization, to reduce vehicle energy consumption through optimizing battery thermal management and improving the working efficiency of components, and provides theoretical guidance and data reference for improving vehicle endurance mileage in low-temperature environment.

**Key words:** automobile engineering; low-temperature endurance mileage; test analysis; user habit; electric passenger vehicle; vehicle energy consumption characteristics

## 0 引言

纯电动汽车的续航里程是用户普遍关心的技术指标,尤其是冬季低温环境下续航衰减问题更是用户的痛点。整车续航里程与多方面因素有关<sup>[1]</sup>,与工况、环境温度及用户使用习惯或出行特征等均有明显关联<sup>[2]</sup>。经用户调研及初步测试,发现电动汽车在实际使用中(一般为多天多次使用,而不是一次性将电耗完)的续航里程(以下简称“分段续航里程”)与行业内现普遍宣传的续航里程(车辆从满电状态运行至放电阈值为止的极限续航里程,以下简称“1次极限续航里程”)之间存在较大差距。基于用户实际使用习惯所造成的续航里程差异甚至高于工况不同所造成的差异,在低温环境下表现尤其明显。如何保证用户实际使用续航里程,提高纯电动汽车产品的实用性,是当前行业亟待解决的共性技术问题。

针对纯电动汽车在低温下的续航里程变化研究,当前重点企业及行业机构主要采取转鼓台架测试方法,在参考《电动汽车能量消耗率和续驶里程试验方法》(GB/T18386—2017)<sup>[3]</sup>进行不同环境、工况下的1次极限续航里程测试时,业内对基于用户实际出行习惯的分段续航里程的测试研究较少。在整车能耗方面,业内普遍基于电网端的电量计算车辆充电及行驶过程的总能耗,无法分解至动力电池的实际电量差异及各部件的真实能耗变化情况,因而对低温续航里程衰减的原因无法精准定位。在电池放电特性方面,陈德兵等<sup>[4]</sup>通过研究电池单体在不同温度下的充放电特性,利用等效计算法研究车辆在不同温度下的续航里程变化,结合实车测试结果发现该方法仅在室温下具有较高精度,在低温条件下计算结果与实测结果差异较大,该方法适用范围有限。本研究重点探讨纯电动汽车在低温环境下不同使用习惯对续航里程的影响,通过模拟纯电动乘用车用户实际使用场景进行多种环境工况下的

整车能耗及续航里程测试,研究不同工况下的整车能量流分布,分析各种场景下动力电池放电量及分配到各部件的实际耗电量与能量损耗情况<sup>[5]</sup>,从系统集成的角度分析纯电动汽车电能量的转换和传递过程,并针对车辆多天多次运行和1次耗光电量运行两种出行场景下整车及各部件的能耗差异情况进行对比分析,以期优化动力系统匹配、提升各部件的工作效率,优化热管理策略。

## 1 研究内容

导致纯电动汽车低温续航里程衰减的原因主要包括两方面:一方面,低温下电池实际放电量减少,原因在于动力电池在低温环境下内阻增大<sup>[6]</sup>,自身内耗电量增加,导致其对外放电量减少;另一方面,低温下传动系统润滑阻力、轮胎滚阻加大,电驱动系统等在低温下的工作效率降低,导致驱动能耗增加,且由于低温下空调暖风系统工作耗电量较高,导致整车能耗明显增加。这两种因素都将导致车辆在低温下续航里程降低。本研究分别对动力电池放电量及整车能耗变化对低温续航里程的影响进行分析(暂不研究低温环境下充电能量的差异,为统一充电条件,测试期间均在统一的常温环境下使用交流充电桩进行充电)。

为分析不同的用户习惯对纯电动乘用车在低温环境下工作特性的影响,分别进行不同环境温度下的分段续航里程和1次极限续航里程测试,对两种使用场景下的电池放电量及整车重点部件能耗分配情况进行解析测试,定量分析不同环境温度和运行工况下动力电池的放电特性及各电器部件的能耗特性,研究整车能耗的差异规律及关联影响因素,从而精确定位最有效优化整车能耗的着手点<sup>[7]</sup>。

## 2 实车测试方案

搭建本测试系统的目的是模拟纯电动乘用车用户实际使用场景,进行多种环境工况下的整车续航

里程、能耗及电池充、放电测试, 研究整车能量流 向分配情况, 测试规则如表 1 所示。

表 1 纯电动乘用车低温续航里程测试规则

Tab. 1 Low temperature endurance mileage test rules for electric passenger vehicles

测试内容	测试规则	测试要求
1 次极限续航里程测试	参考《电动汽车能量消耗率和续驶里程试验方法》(GBT 18386—2017), 在整车环境舱内进行中国工况 (CLTC-P) 下的极限续驶里程测试, 达到试验终止条件后继续测试至电量耗尽为止	参考纯电动乘用车使用低温环境, 分别选取 -15 ℃, -25 ℃ 2 个温度点各测试 1 轮
分段续航里程测试	在整车环境舱内进行中国工况下的分段续驶里程测试。分段规则为: 进行 2 个 CLTC-P 工况循环测试后静置 8 h, 再进行 2 个 CLTC-P 工况循环测试, 之后再静置 14 h; 重复以上测试流程直到电量耗尽为止	模拟用户实际使用习惯 (以单次出行里程取 2 个 CLTC-P 工况循环为例, 总行驶里程为 28.96 km, 出行时长共 1 h), 进行分段续航里程测试

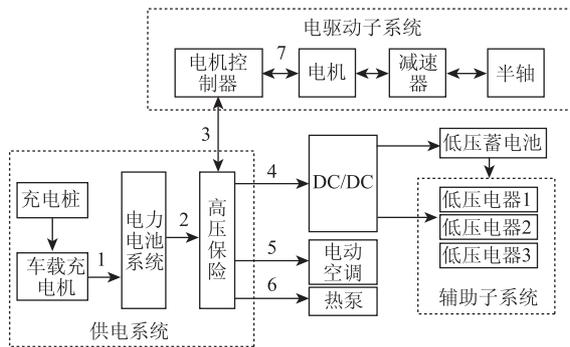
本研究以某自主品牌纯电动乘用车为测试对象, 样车主要相关参数如表 2 所示。

表 2 样车主要参数

Tab. 2 Main parameters of prototype vehicle

项目	参数
标称续航里程 (NEDC 工况)/km	420
电池总电量/(kW · h)	52.5
电池热管理配置	无
空调配置	暖风 PTC + 热泵

整车能耗测试系统<sup>[8-12]</sup>主要由高压测试模块、低压测试模块组成, 系统采用霍尔电压、电流传感器检测方案, 可实时监测从充电桩到整车所有高压用电设备的功耗, 后端采用标准高速数采模块进行数据采集。在整车上布置 7 组电流/电压传感器, 其中: 测量点 1 采集的是充入动力电池的电量, 测量点 2 采集的是动力电池放电量, 二者之差定义为电池的内耗电量, 测量点 3~7 分别采集各电器部件的耗电量, 系统结构如图 1 所示。测试完成后, 利用整车能耗解析系统内置程序分别计算各部件耗电量、平均能耗、电机系统效率、动力电池充放电效率等。



1—动力电池总输入; 2—动力电池总输出; 3—电机系统总输入; 4—低压电器总输入; 5—电空调系统输入; 6—热泵系统输入; 7—驱动电机输入。

图 1 整车能耗测试系统结构

Fig. 1 Structure of vehicle energy consumption test system

该测试方法与文献 [3] 等行业主流整车能耗测试方法的区别在于: 传统测试方法根据车辆从电桩的充电量数据及整车续航里程计算整车能量消耗率, 将充电机的效率、电池充放电效率及各部件的实际耗电量等多项参数合并计算; 本测试方法基于对充电机充入电池的电量、电池实际放出的电量及各部件的耗电量等相关参数的独立测量, 可单独分析各部件的能耗差异情况, 从而精准定位整车能耗流向及各环节能耗损失情况。

### 3 测试数据分析

#### 3.1 整车续驶里程分析

整车续航测试结果如图 2 所示。该样车在 -15 ℃ 环境下 1 次极限续航里程为 192 km (其中车速与 CLTC-P 工况曲线略有偏差的行驶里程为 32 km), 分段续航里程为 163 km (其中车速与 CLTC-P 工况曲线略有偏差的行驶里程为 21 km)。

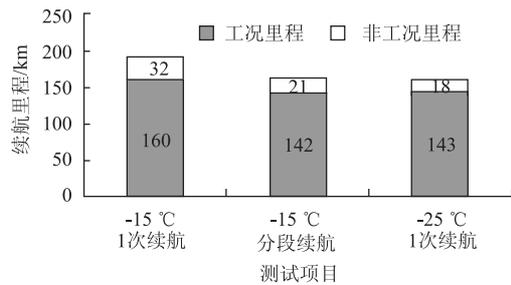


图 2 各测试条件下的续航里程

Fig. 2 Endurance mileage under each test condition

在 -15 ℃ 环境温度下, 分段续航里程比 1 次极限续航里程低 15.1%, 差异的根源在于: 分段续航测试中电池放电量降低了 10%, 而整车运行能耗高出 6.1%。而在 -25 ℃ 环境下车辆 1 次极限续航里程为 161 km, 相比 -15 ℃ 环境下 1 次极限续航里程降低了 16.1%, 其中, 电池放电量降低了 5.5%, 整车运行能耗增加了 12.7%, 如图 3、图 4 所示。

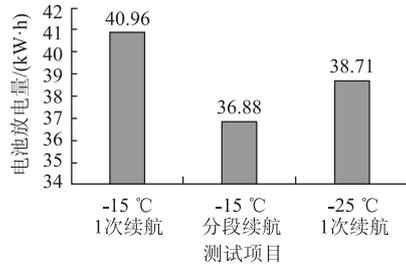


图3 各测试条件下的电池放电量

Fig. 3 Battery discharge under each test condition

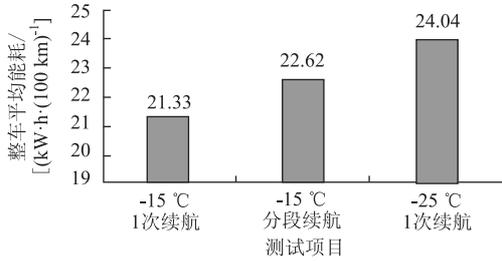


图4 各测试条件下的整车平均能耗

Fig. 4 Average energy consumption of vehicle under each test condition

### 3.2 整车能耗差异分析

整车运行能耗变化与出行特征、环境温度的变化存在明显关联。在低温环境下，增加了暖风空调、热泵等系统的能耗。环境温度降低，驱动系统能耗加大，导致整车能耗明显增加。具体测试数据如表3所示。

表3 各工况下整车及部件能耗对比 (单位: kW·h/100 km)

Tab. 3 Comparison of energy consumption of vehicle and components under different working conditions (unit: kW·h/100 km)

测试项目	续航类别		
	-15 °C 1次 极限续航	-15 °C 分段 续航	-25 °C 1次 极限续航
电机系统	12.74	12.95	14.06
部件			
暖风空调	6.19	7.41	7.52
能耗			
低压电器	2.11	2.16	2.23
热泵	0.29	0.10	0.23
整车能耗 (部件总能耗)	21.33	22.62	24.04
动力电池内耗	1.83	4.19	3.91

#### 3.2.1 环境温度对整车能耗的影响

低温环境与常温环境相比，增加了暖风空调、热泵、风机等部件的能耗。从表3可以看出，低温环境下整车能耗的增加，除了源于空调系统的能耗之外，整车驱动能耗及电器附件能耗也存在一定差异。在1次极限续航测试中，-25 °C环境条件下整

车能耗相比-15 °C环境下增加了12.7%，其中，暖风空调系统能耗增加了21.5%，电机系统能耗仅增加了10.4%，而低压电器能耗差异较小。由此可见，环境温度对暖风空调及电驱动系统能耗的影响较为明显。

#### 3.2.2 出行特征对整车能耗的影响

纯电动汽车使用场景范围较广，单次出行时长、出行里程、出行频率等因素对整车能耗存在影响。从-15 °C 1次极限续航与分段续航测试数据对比可看出，在低温短途出行场景下，整车能耗略高于长距离行驶模式，且差异主要源于暖风空调系统，原因在于车辆在长距离行驶模式下持续运行时间较长，电池、电机等部件温升效应不断积累，降低了电池内阻及传动系统阻力，电器部件工作效率提高。但限于中国工况下放电倍率较低，各部件通过自发热带来的温升效果有限，导致2种场景下电机、电器系统能耗差异不明显；而持续行驶模式下由于乘员舱温度的积累效应，相比短途出行模式，暖风空调系统能耗明显降低。

### 3.3 电池充放电特性分析

动力电池作为纯电动汽车的唯一能量来源，其特征参数直接决定整车的续航性能<sup>[13]</sup>。通过对实车动力电池运行数据（包括电压、电流、温度、荷电状态等）的分析，可以得出实际使用环节中电池组的内阻特性、温度场分布及放电容量随温度的变化情况<sup>[14]</sup>，对电池组的优化控制及能量管理具有指导意义<sup>[15]</sup>。从测试数据可以看出，在充电量基本接近的前提下，各种工况下电池总放电量相差较大，主要原因在于工作温度越低，电池内耗电越大；分段次数越多，电池内耗电也越大，从而都导致动力电池对外放出电量减小。

#### 3.3.1 环境温度对电池内耗电的影响

环境温度越低，动力电池内耗电占整车电能消耗的比例越大。在-15 °C环境温度下1次极限续航测试中，动力电池内耗电占整车电耗的比例为8%，而在-25 °C环境温度下则达到14%，原因在于动力电池在低温环境下内阻增大，放电过程中电池自身内耗电量增加，从而导致其实际对外放电量减少，这是低温环境下整车续航衰减的重要原因之一。

#### 3.3.2 出行特征对电池内耗电的影响

除了环境温度的影响，用户出行特征对电池内耗电量的影响同样明显：同样在-15 °C条件下，1次极限续航测试中电池内耗电占比为8%，分段续航测

试中内耗电占比则达到 16%。原因主要是在分段行驶模式下, 电池自发热带来的温升积累效应较差, 导致自身内耗电量较连续行驶模式增加 3.31 kW·h, 增加比例为 96%。在用户实际出行场景中, 低温环境下单次出行里程越短、分段次数越多, 电池内耗电量将进一步增加。

针对内耗电量对续航的影响, 根据动力电池内耗电量折算续航里程: -15 °C 环境下 1 次极限续航里程为 192 km, 耗电量为 40 kW·h, 如果将电池内耗电量 3.51 kW·h 按比例折算, 对应的可行行驶里程为 16.5 km, 而 -15 °C 分段续航里程测试中电池内耗电对应的可行行驶里程则达 30.1 km。如果通过合理匹配电池热管理等技术路径减小车辆运行过程中动力电池内耗电量, 将有效增加车辆的续航里程。

### 3.4 电池温升特性分析

电池在不同放电工况下的温度规律存在明显差异: 在 -15 °C 的环境仓静置 12 h 后, 电池单体最高温度为 -3.8 °C, 最低温度为 -9 °C (图 5), 与 -15 °C 的环境温度还有差距, 说明电池保温效果不错, 需要更长的静置时间电池温度才能与环境温度接近。而在分段续航测试中, 经过多天的持续静置, 电池温度基本接近环境温度。在 -15 °C 1 次极限续航里程测试时, 车辆连续行驶了 7 h, 电池发热也不断积累, 温度缓缓上升, 但限于中国工况下放电倍率, 靠电池自身发热温升有限, 全程下来平均温度仅升高了约 4 °C; 在 -15 °C 分段续航测试时, 车辆静置 12 h 后单体最低温度为 -10.5 °C, 之后每行驶 1 个循环后平均温度升高 1~1.5 °C, 之后由于停车静置 8 h, 电池温度重新降低到 -12 °C, 如此不断重复, 电池平均温度处于 -10 ~ -7 °C 之间, 如图 6 所示。

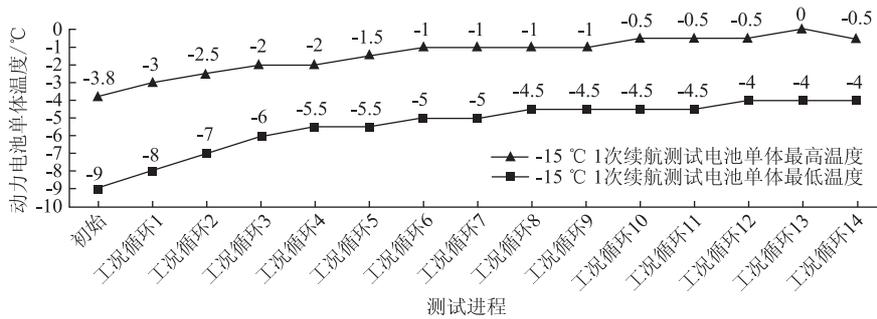


图 5 -15 °C 1次极限续航里程测试电池单体温度变化

Fig. 5 Temperature change of battery cell in one-time limit endurance mileage test at -15 °C

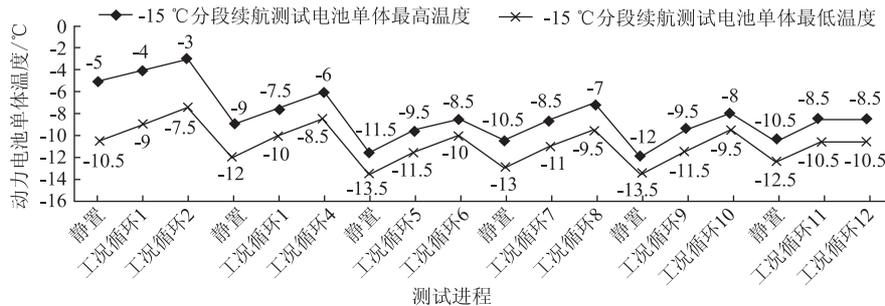


图 6 -15 °C 分段续航里程测试电池单体温度变化

Fig. 6 Temperature change of battery cell in segmented endurance mileage test at -15 °C

在冬季低温环境下, 若实际出行时单次出行里程较短, 电池温升更小, 因而动力电池长期处于接近环境温度状态。若通过启动热管理配置对动力电池加热, 则需评估电池温升速率是否与出行时长相匹配, 否则启动热管理的实用价值较低, 在热管理控制策略匹配标定时应精确计算, 减小车辆实际运行中无效的电池热管理措施。

初始环境温度越低, 电池温升速率越大。如图 7 所示, 将 -15 °C 和 -25 °C 2 个温度点下的 1 次极限续航里程测试数据对比可看出, 在 -15 °C 环境下电池单体平均温度升高了约 4 °C, 而在 -25 °C 环境下单体平均温度升高了约 11 °C。原因在于 -25 °C 初始环境温度较低, 电池内阻较大, 电池放电过程中温升速率相对较大。因此, 在电池处于较低温度时, 额

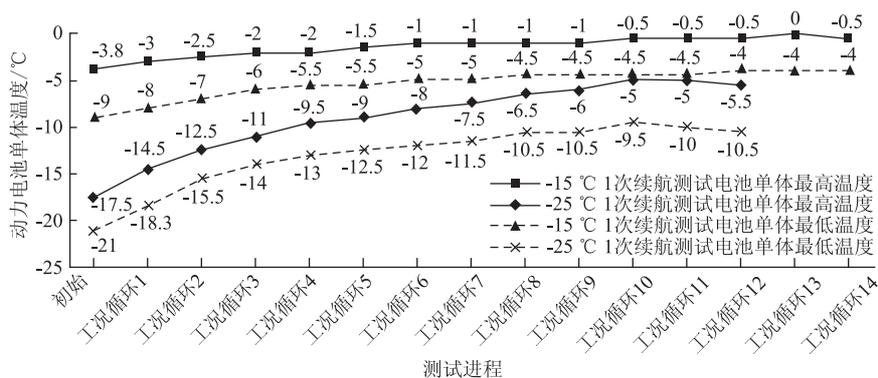


图7 -15 °C、-25 °C 1次极限续航里程测试电池单体温度变化

Fig. 7 Temperature changes of battery cell in one-time limit endurance mileage test at -15 °C and -25 °C

外辅以适当的热管理措施,可有效提升电池放电效率,减小电池自身内耗电,从而提高整车续航能力。

#### 4 结论

针对某典型纯电动车型进行了整车能耗及续航里程测试分析,针对不同运行场景下整车及各部件的能耗差异、动力电池放电情况进行了分析。结果表明,低温环境下整车续航里程与出行特征、环境温度均相关;整车能耗及电池内耗电量与车辆出行特征、环境温度的变化存在明显关联。-15 °C环境下分段续航里程比1次极限续航里程低15.1%,在-25 °C环境下车辆1次极限续航里程相比-15 °C环境下1次极限续航里程降低了16.1%。环境温度降低和分段次数增加都将导致整车能耗增大。在电池放电方面,由于不同环境、工况下电池内耗电量的差异,在-15 °C环境温度下,1次极限续航测试中电池内耗电占整车电耗的比例为8%, -25 °C环境温度下则达到14%,在-15 °C环境分段续航测试中内耗电占比则达到16%,最终导致动力电池对外放出电量存在一定差异。研究表明,针对动力电池,若通过各种技术手段(优化电池材料、热管理策略等)降低车辆运行过程中电池内耗电比例,可有效提升整车实际续航能力。在电池热管理方面<sup>[16]</sup>,热管理策略需要根据车辆运行特征(出行里程、出行时长等)进行精确匹配,要精确评估电池热管理系统为电池升温所消耗的能量与电池升温后增加的放电能量是否对等,尤其针对车辆经常处于短距离行驶模式的出行场景,需要结合具体车型开展进一步测试分析,建立动力电池热模型<sup>[17]</sup>、放电容量模型,分析各工况下电池的放电特性差异<sup>[18]</sup>。从整车的角度,可以进一步研究节能空调、高效热

泵的节能效果,以及低温下车辆传动匹配优化、系统效率提升等能耗优化路径,对降低动力电池内耗电及整车能耗的各项技术方案进行量化评估。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 余志生. 汽车理论. 第5版 [M]. 机械工业出版社, 2009.  
YU Zhi-sheng. Automobile Theory [M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [2] 李国良, 初亮, 鲁和安. 电动汽车续驶里程的影响因素 [J]. 吉林工业大学自然科学学报, 2000, 30 (3): 20-24.  
LI Guo-liang, CHU Liang, LU He-an. Analysis of Factors Affecting the Range of Electric Vehicle [J]. Natural Science Journal of Jilin University of Technology, 2000, 30 (3): 20-24.
- [3] GB/T 18386—2017, 电动汽车能量消耗率和续驶里程试验方法 [S].  
GB/T18386—2017, Electric Vehicles - Energy Consumption and Range - Test Procedures [S].
- [4] 陈德兵, 叶磊, 杨杰. 低温对纯电动汽车续驶里程的影响分析 [J]. 客车技术与研究, 2012 (2): 49-51.  
CHEN De-bing, YE Lei, YANG Jie. Analysis of Endurance Mileages of Electric Vehicle at Low Temperature [J]. Bus Technology and Research, 2012 (2): 49-51.
- [5] 王震坡, 孙逢春. 电动汽车能耗分配及影响因素分析 [J]. 北京理工大学学报, 2004, 24 (4): 306-310.  
WANG Zhen-po, SUN Feng-chun. Analysis of Energy Consumption Distribution and Factors of Influence in Electric Vehicles [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004, 24 (4): 306-310.

- [6] 林春景,李斌,常国峰,等.不同温度下磷酸铁锂电池内阻特性试验研究[J].电源技术,2015,39(1):22-25.  
LIN Chun-jing, LI Bin, CHANG Guo-feng, et al. Experimental Study on Internal Resistance of  $\text{LiFePO}_4$  Batteries under Different Ambient Temperatures [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39 (1): 22-25.
- [7] 张杭杭.纯电动汽车能效优化方法研究[D].北京:清华大学,2014.  
ZHANG Hang-hang. Study on Energy Efficiency Optimization Method of Pure Electric Vehicles [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [8] 沈天浩.电动汽车动力总成能量流测试平台开发及其应用研究[D].杭州:浙江大学,2015.  
SHEN Tian-hao. Development and Application of Energy Flow Test Bench for Electric Vehicle Powertrain [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [9] 游彬.基于NI-RIO的车载电性能测试系统[D].南昌:南昌大学,2016.  
YOU bin. Vehicle Electrical Performance Test System Based on NI-RIO [D]. Nanchang: Nanchang University, 2016.
- [10] 付翔,王红雷,黄斌,等.电动汽车驱动系统测试台架设计[J].武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2015,37(5):433-437.  
FU Xiang, WANG Hong-lei, HUANG Bin. Test Bench Design on Drive System of Electric Vehicle [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering Edition, 2015, 37 (5): 433-437.
- [11] 朱靖.纯电动汽车驱动系统测试台的研究与开发[D].上海:上海工程技术大学,2015.  
ZHU Jing. Research and Development of Pure Electric Vehicle Drive System Test Platform [D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2015.
- [12] 宋强,王志福,张承宁.电动汽车电机驱动系统效率测试方法研究[J].微特电机,2006(6):4-6.  
SONG Qiang, WANG Zhi-fu, ZHANG Cheng-ning. Research on Test Method of Electric Vehicle Driving Motor Efficiency [J]. Small & Special Electrical Machines, 2006 (6): 4-6.
- [13] QC/T 743—2006,电动汽车用锂离子蓄电池[S].  
QC/T743—2006, Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles [S].
- [14] 李哲,韩雪冰,卢兰光.动力型磷酸铁锂电池的温度特性[J].机械工程学报,2011,47(18):115-120.  
LI Zhe, HAN Xue-bing, LU Lan-guang. Temperature Characteristics of Power  $\text{LiFePO}_4$  Batteries [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (18): 115-120.
- [15] 李军求,吴朴恩,张承宁.电动汽车动力电池热管理技术的研究与实现[J].汽车工程,2016,38(1):22-27.  
LI Jun-qiu, WU Pu-en, ZHANG Cheng-ning. Study and Implementation of Thermal Management Technology for the Power Batteries of Electric Vehicles [J]. Automotive Engineering, 2016, 38 (1): 22-27.
- [16] CHEN S C, WAN C C, WANG Y Y. Thermal Analysis of Lithium-ion Batteries [J]. Journal of Power Sources, 2005, 140 (1): 111-124.
- [17] 宋丽,魏学哲,戴海峰.锂离子电池单体热模型研究动态[J].汽车工程,2013,35(3):285-291.  
SONG Li, WEI Xue-zhe, DAI Hai-feng. A Review on the Research of Thermal Models for Lithium Ion Battery Cell [J]. Automotive Engineering, 2013, 35 (3): 285-291.
- [18] 胥翼鹏,宋卫平,宁爱平.电动汽车的动力电池模型及其参数辨识[J].汽车实用技术,2016(1):135-137.  
XU Yi-peng, SONG Wei-ping, NING Ai-ping. Power Battery Model and Parameter Identification for Electric Vehicle [J]. Automobile Applied Technology, 2016 (1): 135-137.