

DOI: 10.7652/xjtuxb201912014

电动汽车锂电池模块化热管理系统的设计及实验研究

苟飘^{1,2,3}, 徐俊^{1,2,3}, 刘晓艳^{1,2,3}, 王海涛^{1,2,3}, 梅雪松^{1,2,3}

(1. 西安交通大学陕西省智能机器人重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造与系统工程国家重点实验室, 710049, 西安; 3. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对电动汽车锂电池在高温情况下极易引发电池的性能退化,甚至导致热失控的问题,提出了一种电动汽车锂电池模块化热管理系统设计方案。所设计的系统采用 20 节圆柱形电池交错排列方式,电池之间布置 6 块内含冷却液流道的冷却单体,利用冷却单体中流动的冷却液迅速带走电池在工作时产生的热量,保证锂电池工作在 25~40℃ 的适宜范围内。采用所设计系统针对冷却液流速、管道连接方式对电池模组冷却性能的影响进行仿真与优化,并根据优化结果,搭建实验平台进行实验验证。实验结果表明:增大冷却液流量可有效提高冷却效率,但流量的选取应权衡冷却效果与消耗功率的利弊;电池并联的最高温度和温差比串联分别下降了 7.55℃ 和 6.74℃,说明并联对提高整个模块化电池热管理系统的散热性能具有较好的效果,在电池包数量较大时,宜采用并联方式;并联缩短了温度大范围波动的时间,减小了过大的温度波动对电池造成的影响。

关键词: 电动汽车;锂电池;热管理系统;热失控

中图分类号: TM912.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)12-0104-07

Experimental Research on Modular Thermal Management System of Lithium Batteries for Electric Vehicles

GOU Piao^{1,2,3}, XU Jun^{1,2,3}, LIU Xiaoyan^{1,2,3}, WANG Haitao^{1,2,3}, MEI Xuesong^{1,2,3}

(1. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Intelligent Robots, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A design scheme of modular thermal management system of lithium batteries for electric vehicles is proposed to solve the problem that the lithium batteries of electric vehicles are easy to cause degradation of battery performance under high temperature conditions, and even lead to thermal runaway. The system is designed with 20 staggered cylindrical batteries. Six cooling cells with coolant channels are arranged between the batteries. The cooling fluid flowing in the cooling cells can quickly remove the heat generated by the batteries during operation and thus ensure the lithium batteries to work within the appropriate range of 25-40℃. The designed system is used to simulate and to optimize the influences of coolant flow rate and pipe connection on the cooling performance of the batteries module. An experimental platform is built for verification based on the optimization results. Experimental results show that the increase in the coolant flow rate effectively improves the cooling efficiency, but the selection of flow rate should

balance the advantages and disadvantages of cooling effect and power consumption. The maximum temperature and temperature difference in parallel connection are reduced by 7.55 °C and 6.74 °C respectively compared with those in series connection. This indicates that parallel connection can improve the heat dissipation performance of the entire modular thermal management system of batteries, and when the number of battery packs is large, parallel mode should be adopted. Parallel connection manner shortens the time of wide temperature fluctuation, and reduces the impact of excessive temperature fluctuation on the batteries.

Keywords: electric vehicle; lithium battery; thermal management system; thermal runaway

电动汽车普遍使用的锂电池对温度敏感性高,在高温下极易导致电池的性能退化,极端情况下甚至导致热失控,威胁人车安全^[1]。因此,对电池包进行冷却成为电动汽车的研究之一^[2]。

目前,电池包的冷却方式主要有空气冷却、液体冷却、相变材料冷却、热管冷却等^[3]。空气冷却结构简单、成本低,但是存在冷却效果不足、温度均匀性不好的缺点,目前的研究旨在通过风扇、流道和翅片增加其散热效率^[4-5]。相变材料冷却结构简单,温度均一性好,但是相变材料导热不足,近几年的研究主要集中在改变材料的成分以提高导热性^[6]。热管冷却效果好,且不需要额外功率,但是相关的研究还处于起始阶段,应用性不足^[7]。液体冷却具有良好的导热性,近几年的研究不断增多^[8-12]。Zhao 等人提出了一种针对圆柱电池的微型管道液体冷却结构,利用仿真研究了结构的通道数量、流速、流向、入口尺寸对冷却效果的影响^[13]。Jarrett 和 Wei 等人通过电池温度、温差和压降等参数研究了冷板的流道弯曲排列形状^[14-16]。Rao 等人提出了和圆柱电池表面贴合的冷却结构,并研究了其余电池的接触面积对冷却效果的影响,提出了变接触面的设计利于散热的结论^[17]。Zhang 和 Yeow 等人通过增加石墨片或者翅片的方式,有效地提高了电池的温度均匀性^[18-19]。

本文针对电动汽车锂电池在高温情况下极易引发电池的性能退化,甚至导致热失控的问题,提出了一种电动汽车锂电池模块化热管理系统方案;对该系统的冷却液特性进行了仿真与优化;仿真研究了冷却液流速、管道连接方式对电池模组冷却性能的影响;根据仿真优化结果,设计并搭建实验平台进行了实验验证。

1 模块化结构

模块化系统结构电池包如图 1 所示。这种结构包括多个可以自由组合的冷却单体,电池位于冷却

单体之间,并采用交叉排列方式。每个冷却单体由铝合金制成,内部为腔体结构,并与直径为 6 mm 的出入口组成流道,流道内充满可以自由流动的冷却液,利用冷却液的流动迅速带走电池在工作时产生的热量,保证电池工作在一个合适的工作范围内。为了增大电池与冷却单体之间的接触面积以提高冷却效率,每个冷却单体与电池的圆柱面之间填充导热硅胶片。在后续实验过程中,冷却液流道可以根据实验需求进行流道的串联与并联。

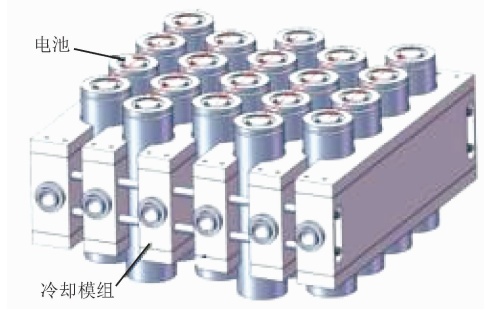


图 1 模块化系统结构电池包示意图

为了研究该结构的冷却效果,选取 6 块冷却单体和 20 节 18650 锂电池组成电池模组并进行研究。电池采用交错排列的方式,同排电池间距为 5 mm,相邻两排电池间距为 2 mm。电池详细参数如表 1 所示。

表 1 实验用 18650 锂电池参数

参数	数值
额定容量/(A·h)	2.20
额定电压/V	3.70
上限电压/V	4.20
下限电压/V	2.75

2 电池关键参数获取

2.1 电池内阻

电池内阻是电池的重要参数,其值与电池荷电

状态(SOC,用符号 ξ_{SOC} 表示)有关,受环境温度以及放电倍率的影响很小。实验中,为了获取电池的内阻与 ξ_{SOC} 的关系,在环境温度为25℃下,对电池进行0.5C倍率(C表示电池充放电时电流的比率,充放电倍率=充放电电流/额定容量)放电,完成内阻测试实验。对实验所获得的不同 ξ_{SOC} 下的内阻数据进行处理,并对实验数据进行函数拟合,即可得到电池内阻与 ξ_{SOC} 的变化关系如下

$$R_k = 0.0852 + 0.00623 \sin \frac{\pi(\xi_{\text{SOC}} - 0.23727)}{0.18} \quad (1)$$

电池内阻与 ξ_{SOC} 的关系曲线如图2所示。通过图2可知,电池的内阻随 ξ_{SOC} 的变化很大,函数拟合方差为0.8207,说明拟合度较好。

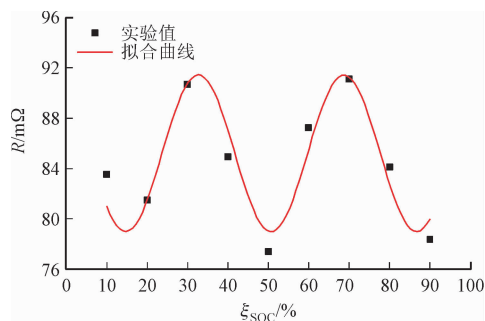


图2 电池内阻与 ξ_{SOC} 的关系曲线

2.2 熵热系数

熵热系数表示电池的开路电压(OCV)对温度 T 变化的导数,其值的大小与 ξ_{SOC} 有关,受初始环境温度以及放电倍率的影响很小。为了获取熵热系数与 ξ_{SOC} 的关系,在电池在环境温度为25℃下进行0.5C放电实验,在某个 ξ_{SOC} 下静置足够长时间得到OCV数据。在正交坐标系中,以环境温度为横轴,OCV数据为纵轴,拟合直线,其斜率即为此 ξ_{SOC} 下的熵热系数^[20]。根据实验得到电池在不同 ξ_{SOC} 下的熵热系数与 ξ_{SOC} 的关系,如图3所示。

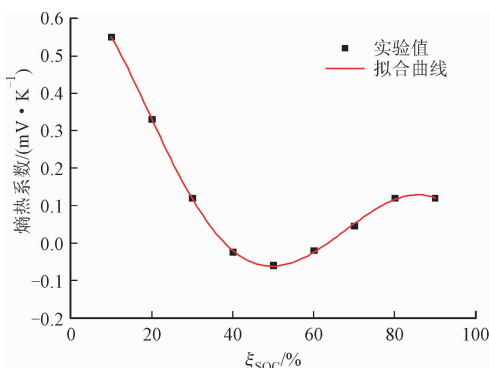


图3 电池熵热系数与 ξ_{SOC} 的关系曲线

电池熵热系数与 ξ_{SOC} 的关系曲线拟合函数为

$$\frac{dU}{dT} = b + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + a_5 x^5 \quad (2)$$

式中: x 代表 ξ_{SOC} 。根据拟合结果,方差为0.999,说明拟合度很好。由拟合结果可以看出,熵热系数与 ξ_{SOC} 的关系为5次多项式。

3 电池模型的仿真与实验验证

3.1 电池产热模型

根据 Bernardi 提出的电池产热模型,电池产热主要包括可逆热和不可逆热两部分。不可逆热包括电池产生的焦耳热和由于过电压导致的热量,可逆热的产生和电化学反应的熵变有关^[21]。电池产热的具体模型如下

$$Q = I^2 R + IT \frac{dU}{dT} \quad (3)$$

式中: Q 表示电池产热,J; I 表示电池放电电流,A; R 表示电池的内阻, Ω ; T 表示电池的实时温度,K; dU/dT 表示熵热系数,V/K。

3.2 模型的仿真与实验验证

为了保证后续电池组液冷结构研究时模型的准确性,本文先验证电池产热模型的准确性。因此,本节对电池产热模型进行仿真与实验验证。

(1)仿真实论基础。由于在电池与冷却模組的接触面紧密填充了薄层的导热硅胶片,因此可以假定电池与模組之间的接触内阻忽略不计,则仿真时需要满足如下方程。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

水是不可压流动,密度 ρ 为常数,则式(4)变为

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

动量方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (6)$$

能量方程

$$\rho_c C_{pc} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{cx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{cy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{cz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (7)$$

传热学方程

$$mC_{pc} \frac{dT_c}{dt} = \nabla(\lambda_c \nabla T_c) + Q \quad (8)$$

式中: ρ_c 、 C_{pc} 分别为电池的密度、比热容; k_{cx} 、 k_{cy} 、 k_{cz} 分别为电池在3个方向上的导热系数; λ_c 为对流传热系数。

(2)网格无关性验证。在对电池模组进行仿真之前,需要先进行网格无关性验证,以排除网格划分对结果精确度的影响。本文对电池模组进行了3种网格划分,网格单元数分别为365 040、556 512和788 771,其余设置均相同,表2为不同网格数量下的结果。以电池的平均温度为对比,其偏差分别为0.006%和0.009 9%,说明仿真结果不受网格数量的影响。因此,后续研究选取网格数为365 040。

表 2 电池模组 3 种网格划分情况

电池模组网格	单元数	平均温度/℃	偏差/%
Mesh1	365 040	58.03	0.000 0
Mesh2	556 512	58.02	0.006 0
Mesh3	788 771	57.97	0.009 9

(3)仿真参数设置与实验验证。本文使用 ANSYS Fluent16.0 进行仿真,基于压力的求解器,采用 SIMPLE 算法进行求解。时间步长设置为 0.1 s,能量方程的收敛参数为 10^{-9} 。使用 UDF 编程计算生温度随时间的变化,作为体热载荷加载到电池上。流体入口设置为速度入口,出口为自由出口,边界条件设置为对流,对流传热系数为 $5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,初始温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,放电倍率分别为 1C、2C、3C,充电倍率为 1.6C。仿真与实验对比结果如图 4 所示。

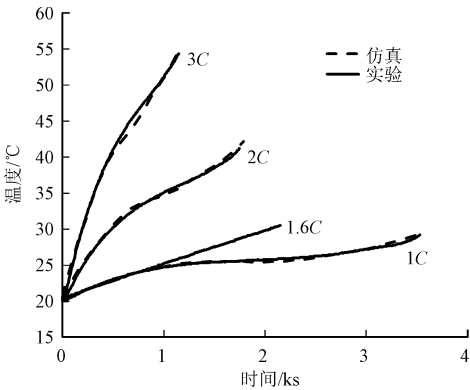


图 4 电池单体不同放电倍率下的温度变化

从图中可以看出,放电倍率分别为 1C、2C、3C 时对应的电池放电的最高温度分别为 $32.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $44.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $57\text{ }^{\circ}\text{C}$,1.6C 充电倍率下电池的最高温度为 $30.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从图 4 和表 3 可知,仿真与实验的温度趋势基本一致,最大误差为 $1.03\text{ }^{\circ}\text{C}$,仿真精度高,保证了电池产热模型的准确性。

表 3 不同放电倍率下仿真的温度误差表

放电倍率	1C	2C	3C
温度最大误差/℃	0.51	0.69	1.03

4 模块化结构的优化与实验验证

目前锂离子电池的最佳工作温度范围为 $25\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[22],而由上述实验可知,电池在环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行 2C 和 3C 倍率放电,电池的最高温度超过了电池的最佳工作温度范围。因此,为了探究本文所提出的模块化冷却结构的冷却特性并进行优化,选择电池在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、3C 放电倍率下的温度数据作为对照组,并从冷却液流量和串并联方式对温度场的影响进行研究,优化冷却特性。

4.1 流量对电池包温度场的影响

为了研究冷却模组中的冷却液流量对电池包温度场的影响,选取 $40\sim 140\text{ mL}/\text{min}$ 的流量范围,流量间隔为 $20\text{ mL}/\text{min}$ 。连接方式为串联,不同冷却液流量下的仿真结果如图 5 所示。

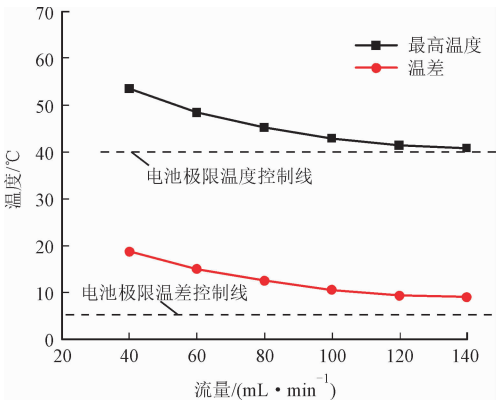


图 5 不同冷却液流量下电池包最高温度和温差

由仿真结果可知,串联情况下,电池的最高温度和温差均随流速的增大而减小,减小的趋势逐渐变缓。随着流量的增大,最高温度依次降低了 $5.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $3.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1.53\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.52\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差依次减小了 $3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2.52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1.92\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在流量为 $140\text{ mL}/\text{min}$ 时,电池包的最高温度为 $40.85\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差为 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$,不能达到电池包的温度要求。因此,增大流量只能在一定程度内有效提高冷却效率,超过某一值后,流量继续增大但冷却效果提高不再明显,反而因提高流量消耗的功率增大。流量的选取应权衡冷却效果与消耗功率的利弊。

4.2 串并联对电池温度场的影响

为了进一步探究电池冷却管道串并联对电池场温度的影响,对电池组在初始环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、放电倍率为 3C、冷却液流量为 $80\text{ mL}/\text{min}$ 情况下分别进行串并联仿真。电池编号以入口附近的电池为 1,沿着水流方向依次编号到 20。

连接方式为串联情况下的仿真云图如图 6 所

示。由仿真结果可知,电池的温度沿着冷却液流动方向逐渐升高,电池的最高温度为 45.22°C ,大于锂电池最佳工作温度范围($25\sim 40^{\circ}\text{C}$),电池的温差为 12.5°C ,大于 5°C 。

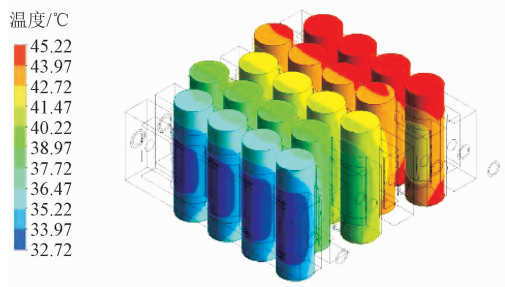


图6 25℃下3C放电串联冷却电池温度场

初始环境温度为 25°C ,放电倍率为3C,冷却液流速为 80 mL/min ,连接方式为并联情况下的仿真云图如图7所示。由仿真结果可知,并联的最高温度和温差分别为 37.67°C 和 5.76°C ,相比串联各下降了 7.55°C 和 6.74°C ,且最高温度出现在12号电池。

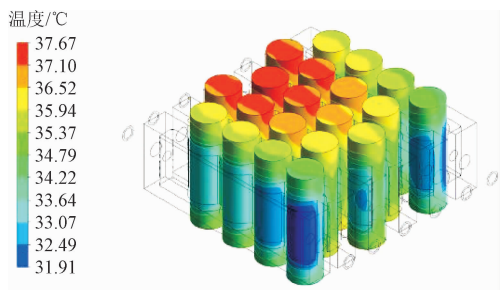


图7 25℃下3C放电并联冷却电池温度场

为了进一步对比分析串并联对电池温度场影响的差异,将两种连接方式下不同电池之间的最高温度,温差数据进行处理,得到串并联下各个电池温度对比结果,如图8所示。从图8可知:在串联情况下,同一排中的不同电池温度差异很小,排与排之间的平均温差依次为 2.85 、 2.20 、 1.1 、 0.95°C ,温差依次减少;在并联情况下,同一排中的不同电池温度差异较大,排与排之间的平均温差较小,分别为 1.13 、 1.11 、 1.52 、 1.09°C ,说明并联结构使电池包中部的热量不易积累,对降低电池包的最高温度和提高电池包的温度均匀性具有更好的效果。

4.3 模块化冷却结构的实验验证

4.3.1 实验平台搭建 电池测试平台的原理图如图9所示,主要包括5个部分:新威电池测试设备、电池包、冷却系统、温度采集仪和上位机。18650电池共20节,电池包的容量为 $44\text{ A}\cdot\text{h}$,电压为 5 V 。

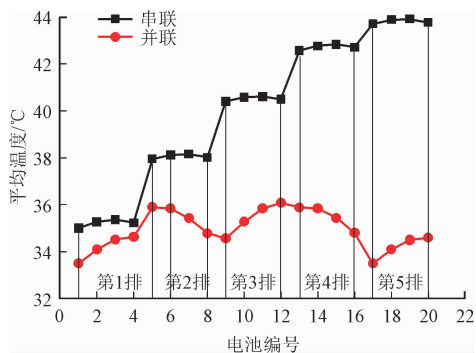


图8 流量 $80\text{ mL}\cdot\text{min}$ 并联和串联不同位置电池表面平均温度

电池正负极与新威充电设备相连,通过上位机设置电池的运行工况,并实时记录数据。安柏温度采集仪使用热电偶采集温度,并将数据实时记录在上位机的软件中。由于18650电池的体积小,电池工作时的温度分布相对均匀,因此每节电池布置一个热电偶,位于电池与冷却模组的接触面中部。冷却模组的整体高度为 40 mm ,布置于电池中部。使用水泵(量程为 $20\sim 110\text{ mL/min}$)将水送入冷却模组中的入口,配合使用玻璃转子流量计(量程 $10\sim 150\text{ mL/min}$)调节流量的大小,流经冷却模组的冷却水经过出口回流到水箱中,构成循环流动。

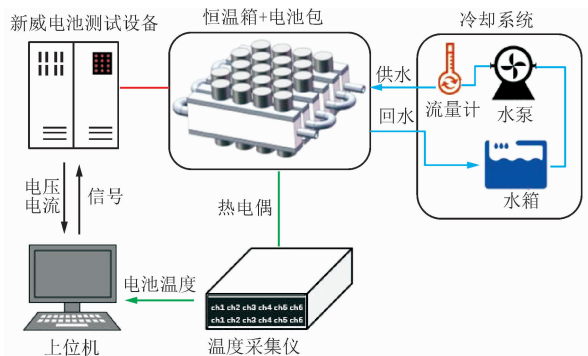


图9 电池测试平台原理图

实验的具体过程为:在保证电池充满的情况下,打开新威电池测试设备对电池进行恒流放电,同时打开水泵,并调节流量计到目标流量;在电池放电过程中,安柏温度采集仪实时获取每个电池单体的温度;最后对采集的数据进行处理。实验台实物图如图10所示。

4.3.2 实验验证 设置环境温度为 25°C ,冷却液流量为 80 mL/min 且采用并联方式,对电池进行3C放电,得到20号电池的实验温度和仿真温度如图11所示。由图11可知,实验温度和仿真温度两者最大误差为 5.5% 。仿真温度高于实验温度,原因

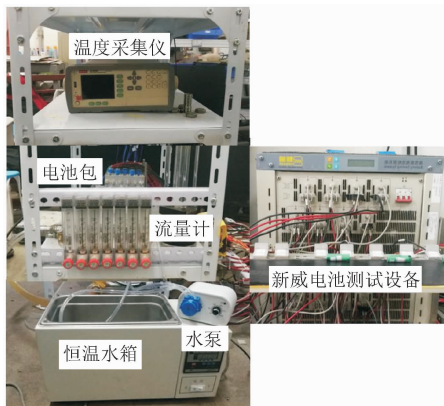


图 10 电池参数测试实验平台

是仿真中为了简化模型,忽略了电池与冷却单体之间的接触热阻,而实验中接触热阻的存在导致电池在传递热量时产生损耗,造成了实验温度较低。此外,仿真中为了简化模型,将电池整体作为发热体,而在实际中,电池中的发热体为除去电池外壳的内芯部分,因此仿真中发热体积大于实际发热体积,使仿真温度较高。

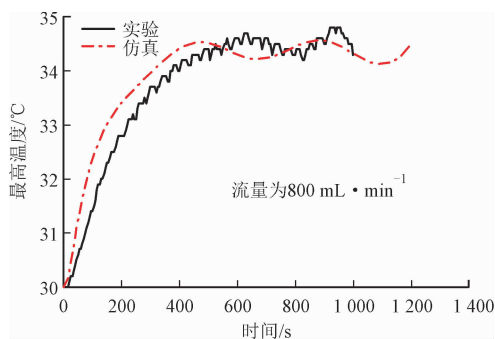


图 11 并联 25 °C 下 3C 放电最高温度实验和仿真对比图

仿真中温度最高的电池为 12 号电池,实验测试温度取对应 12 号电池的温度数据,仿真与实验的温度曲线基本一致,最大误差为 2.99%。根据并联结果可知,并联时温度在前 400 s 先上升,然后在后 800 s 基本稳定。这说明,并联下的电池包能使电池的温度在尽量短的时间后达到稳定状态,缩短了温度大范围波动的时间,大大减小了过大的温度波动对电池造成的影响。

5 结 论

本文提出了一种电动汽车锂电池模块化热管理系统方案,对该系统的冷却液特性进行仿真与优化。仿真研究了冷却液流速、管道连接方式对电池模组冷却性能的影响并进行了优化,根据仿真优化结果,设计并搭建实验平台进行实验验证,结果如下:

(1)增大流量只能在一定程度内有效的提高冷却效率,流量的选取应权衡冷却效果与消耗功率的利弊;

(2)并联的最高温度和温差比串联各下降了 7.55 °C 和 6.74 °C,并联对提高电池包的温度均匀性具有较好的效果;

(3)并联结构使电池包中部的热量不易积累,在电池包数量较大时,宜采用并联方式;

(4)并联缩短了温度大范围波动的时间,减小了过大的温度波动对电池造成的影响。

参考文献:

- [1] WANG Qingsong, PING Ping, ZHAO Xuejuan, et al. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery [J]. Journal of Power Sources, 2012, 208: 210-224.
- [2] 唐溪浩, 马骁, 邱旦峰. 电动汽车电池管理系统研究进展 [J]. 电源技术, 2018, 42(2): 308-311. TANG Xihao, MA Xiao, QIU Danfeng. Research progress in battery management systems for electric vehicles [J]. Power Technology, 2018, 42(2): 308-311.
- [3] 蔡飞龙, 许思传, 常国峰. 纯电动汽车用锂离子电池热管理综述 [J]. 电源技术, 2012, 36(9): 1410-1413. CAI Feilong, XU Sichuan, CHANG Guofeng. Overview of thermal management of lithium-ion batteries for pure electric vehicles [J]. Power Technology, 2012, 36(9): 1410-1413.
- [4] XU X M, HE R. Research on the heat dissipation performance of battery pack based on forced air cooling [J]. Journal of Power Sources, 2013, 240(1): 33-41.
- [5] SAW L H, YE Yonghuang, WEN Tongchong, et al. Computational fluid dynamic and thermal analysis of lithium-ion battery pack with air cooling [J]. Applied Energy, 2016, 177: 783-792.
- [6] RAO Zhonghao, HUO Yutao, LIU Xinjian, et al. Experimental investigation of battery thermal management system for electric vehicle based on paraffin/copper foam [J]. Journal of the Energy Institute, 2015, 88(3): 241-246.
- [7] HUSSAIN A, TSO C Y, CHAO C Y H. Experimental investigation of a passive thermal management system for high-powered lithium-ion batteries using nickel foam-paraffin composite [J]. Energy, 2016, 115: 209-218.
- [8] DENG Yuanwang, FENG Changling, ZHU Hao, et al. Effects of different coolants and cooling strategies

- on the cooling performance of the power lithium ion battery system: a review [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 142: 10-29.
- [9] LIU Huaqiang, WEI Zhongban, HE Weidong, et al. Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: a review [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 150: 304-330.
- [10] WANG Qian, JIANG Bin, LI Bo, et al. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 64: 106-128.
- [11] 张浩, 罗志明, 宋韩龙, 等. 电动车动力锂离子电池水冷系统研究 [J]. *汽车实用技术*, 2017(6): 47-50.
ZHANG Hao, LUO Zhiming, SONG Hanlong, et al. Research on water cooling system for electric vehicle power lithium ion battery [J]. *Automotive Practical Technology*, 2017(6): 47-50.
- [12] 安周建, 贾力, 杨成亮, 等. 锂离子动力电池液体冷却实验研究 [J]. *中国科学院大学学报*, 2018, 35(2): 254-260.
AN Zhoujian, JIA Li, YANG Chengliang, et al. Experimental study on liquid cooling of lithium ion power battery [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 35(2): 254-260.
- [13] ZHAO J, RAO Z, LI Y. Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 103: 157-165.
- [14] JARRETT A, KIM I Y. Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance [J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(23): 10359-10368.
- [15] JARRETT A, KIM I Y. Influence of operating conditions on the optimum design of electric vehicle battery cooling plates [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 245: 644-655.
- [16] WEI Zhongbao, ZHAO Jiyuan. Dynamic thermal hydraulic modeling and stack flow pattern analysis for all vanadium redox flow battery [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 260: 89-99.
- [17] RAO Z, QIAN Z, KUANG Y, et al. Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 123: 1514-1522.
- [18] ZHANG T, GAO Q, WANG G, et al. Investigation on the promotion of temperature uniformity for the designed battery pack with liquid flow in cooling process [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 116: 655-662.
- [19] YEOW K, TENG H, THELLIEZ M, et al. Thermal analysis of a li-ion battery system with indirect liquid cooling using finite element analysis approach [J]. *SAE International*, 2012, 1(1): 65-78.
- [20] DE VITA A, MAHESHWARI A, DESTRO M, et al. Transient thermal analysis of a lithium-ion battery pack comparing different cooling solutions for automotive applications [J]. *Applied Energy*, 2017, 206: 101-112.
- [21] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI. A general energy balance for battery systems [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1985, 132(1): 5-12.
- [22] 赵春荣, 曹文昊, 董缙, 等. 圆柱形锂离子电池模组微通道液冷热模型 [J]. *化工学报*, 2017, 68(8): 3232-3241.
ZHAO Chunrong, CAO Wenjiong, DONG Ti, et al. Microchannel liquid cooling heat model for cylindrical lithium ion battery modules [J]. *Journal of Chemical Engineering*, 2017, 68(8): 3232-3241.

[本刊相关文献链接]

- 续丹, 毛景禄, 王斌, 等. 分布式电池电源模块储能系统的荷电状态均衡控制. 2019, 53(10): 79-85. [doi:10.7652/xjtuxb201910011]
- 李玉, 徐俊, 彭程, 等. 结合变压器正反激原理的动力电池主动均衡方法. 2019, 53(8): 151-158. [doi:10.7652/xjtuxb201908020]
- 赵云飞, 徐俊, 王霄, 等. 双自适应衰减卡尔曼滤波锂电池荷电状态估计. 2018, 52(12): 99-105. [doi:10.7652/xjtuxb201812015]
- 路昭, 余小玲, 张立玉, 等. 锂电池组高温节点空气冷却方案的数值模拟. 2018, 52(7): 25-31. [doi:10.7652/xjtuxb201807004]
- 张立玉, 路昭, 韦立川, 等. 锂电池性能与温度相关性的基础研究. 2018, 52(5): 133-141. [doi:10.7652/xjtuxb201805019]
- 王霄, 徐俊, 曹秉刚, 等. 小波降噪卡尔曼滤波锂电池荷电状态估计. 2017, 51(10): 71-76. [doi:10.7652/xjtuxb201710012]
- 张立军, 程洪正, 孟德建. 锂离子电池电-热-机械耦合特性实验研究及关键参数辨识. 2017, 51(8): 142-148. [doi:10.7652/xjtuxb201708023]

(编辑 刘杨)