

电池热管理系统散热结构的设计和仿真

李妮檣,胡广地,李雨生

(西南交通大学,四川 成都 611756)

摘要:为了更加有效地控制电动汽车电池的工作温度,研究了一种铝板/相变材料/液冷电池热管理系统散热结构,采用 CFD 软件模拟仿真。研究了铝板厚度、水管数量、质量流量、导热系数、相变温度和进水温度等因素对电池散热的影响。通过对电池温度场的模拟仿真,合理控制因素之间的相互影响,将参数取值进行优化,使电池的最高温度和最大温差能够控制在 44.19 °C 和 3.18 °C,此温度能够很好地满足电池的工作温度,表明铝板/相变材料/液冷相结合的新型散热结构能够较好地控制电池的温度均匀性和有效性。

关键词:动力电池;CFD;电池热管理;散热结构

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)03-0090-04

Design and Simulation of Heat Dissipation Structure of Battery Management System

LI Nihui, HU Guangdi, LI Yusheng

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: To control the working temperature of electric vehicle batteries more effectively, a heat dissipation structure of the thermal management system of aluminium sheet phase change material liquid-cooled batteries is studied in this paper, which is simulated by CFD software. The effects of the thickness of the aluminium plate, the number of water pipes, mass flow rate, thermal conductivity, phase change temperature and water inlet temperature on the heat dissipation of the batteries are studied. Through the simulation of the temperature field of the battery, the interaction between the reasonable control factors and the optimization of the parameters, the maximum temperature and the maximum temperature difference of the battery can be controlled at 44.19 °C and 3.18 °C which can well meet the working temperature of the battery. The results show that the new heat dissipation structure with the aluminum plate, phase change material and liquid cooling is of the temperature uniformity better controlled and the effectiveness of the batteries.

Keywords: power battery; CFD; battery thermal management; heat dissipation structure

0 引言

社会的进步在带来一定福利的同时,也对环境造成了破坏,能源的供应也出现不足,电动车的发展势在必行。动力电池作为制约电动汽车发展的关键,一直是研究的热点和重点。其中,锂离子电池的应用最为广泛。电池组的容量、功率、一致性和老化速率受工作温度的影响。为了最大限度地发挥锂离子电池的工作性能,防止电池出现热失控等安全问题^[1],就需要合理地控制其工作温度。-25 °C ~ 55 °C 是锂离子电池的安全工作温度范围,但是只有在 10 °C ~ 45 °C、温差在 5 °C 以下时,电池才能发挥最佳性能。因此,对于电池热管理系统的研究一直是一个热点。

电池热管理系统分为风冷、液冷、相变材料冷却和热管冷却,为了权衡成本、冷却效果、质量、复杂性和寄生功率等^[2-4],选择冷却策略时需要综合考虑。最近几年,相变材料(PCM)由于其高潜热,被广泛应用于电池热管理。文献[5]设计了液体和固体 PCM 包裹电池的两种散热系统,两种结构都能有效控制电池温度,但是在高温时相变

材料几乎完全融化。文献[6]制作了铜纤维/石蜡复合相变材料冷却的电池组,以提高相变材料的导热,提高了电池的性能和温度均匀性,但是却增加了材料制作要求,减少了 PCM 的潜热。文献[7]指出,金属冷却液可以用来散热,使得电池的温度得到降低,整体温度也更加均匀。所以,相变材料在降低电池的温差方面有较好的作用,但是其低导热率不利于电池的散热,需要用冷却水辅助散热。为了较好地利用相变材料的高潜热,并且能实现良好的导热,本文设计了铝板/相变材料/液冷的新型散热结构,能同时控制电池的最高温度和温度均匀性。

1 建立模型

1.1 几何模型

电池的整体结构如图 1 所示。铝板紧贴电池体,均匀插入圆形水管的相变材料贴在铝板之后,并且选用导热系数高、密度小的铝来作为水管材料。可以看出,模型具有对称性,为了缩短模拟仿真时间,本文仅仅仿真了模型的 1/4 部分。几何尺寸和物理参数参考了研究较为成熟的

电池单体,如表 1 所示。为了研究滥用条件时电池的性能,电池以放电倍率 5C 进行放电,因此仿真时间为 720 s,并且根据现有学者研究成果,此放电倍率下的电池发热功率约为 200 kW/m²。为了便于研究,本文设定冷却水是不可压缩的层流,并且由于辐射换热部分的热量相对较小,因此不考虑辐射换热。由于相变材料的性质比较稳定,忽略相变材料在融化和凝固时的各种变化。本文利用仿真软件 ANSYS FLUENT16.0 进行模拟。

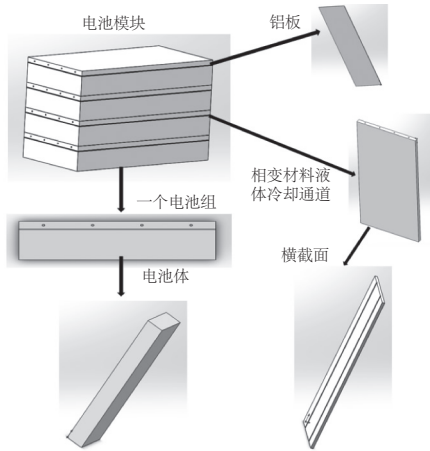


图 1 散热系统电池模块示意图

表 1 模型几何尺寸及仿真参数

参数名称	数值
电池的长度 l_B/mm	134
电池的宽度 W_B/mm	70
电池的厚度 th_B/mm	16
电池的密度 $\rho_B/(\text{kg}/\text{m}^3)$	208 6
电池的比热容 $C_B/(\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	1 106
电池的导热系数 $k_B/(\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	3.9
环境温度 T_0/K	298.15
相变材料的密度 $\rho_{PCM}/(\text{kg}/\text{m}^3)$	910
相变材料的比热 $C_{PCM}/(\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	2 100
相变材料的潜热 $H/(\text{J}/\text{g})$	190 000
相变材料的黏度 $\nu_{PCM}/(\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}))$	0.01
铝的密度 $\rho_{Al}/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 719
铝的导热 $K_{Al}/(\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	202.4
铝的比热 $C_{Al}/(\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	871

1.2 守恒方程

通常情况下,考虑电池处于绝热环境中时,电池在放电过程中的产热率 Q (单位:W)可通过下式计算得出:

$$Q = R_0 I^2 - IT_B dE_0/dT_B \quad (1)$$

其中: R_0 表示电池的电阻,Ω; I 是电池的电流大小,A; E_0 表示电池的电压,V; T_B 是电池的温度,K; $T_B dE_0/dT_B$ 完全受电池的内部化学反应影响,当电池的种类选定时,这个值的大小是确定的。

电池在放电的同时也会吸收一定的热量,这部分热量 Q_B 表示如下:

$$Q_B = m_B C_B (T_{B2} - T_{B1}) \quad (2)$$

式中: m_B 表示电池的质量,kg; T_{B1} 是电池的初始温度,K; T_{B2} 是电池放电终点的温度,K。

相变材料吸收的热量 Q_{PCM} (单位:J)的计算式:

$$Q_{PCM} = m_{PCM} C_{PCM} (T_{PCM2} - T_{PCM1}) + m_{PCM} H \quad (3)$$

式中: m_{PCM} 表示相变材料的质量,kg; T_{PCM1} 是相变材料的最低温度,K; T_{PCM2} 是相变材料的相变温度,K。

在组合模型电池热管理系统中,冷却水带走的热量 Q_W 可以通过下式表示:

$$Q_W = C_W m_W \lambda \nabla T = \rho_W \mu_W \frac{\pi d^2}{4} C_W (T_{out} - T_W) \quad (4)$$

其中: T_W 和 T_{out} 分别是水的进口温度和出口温度,K; μ_W 代表水的流速,m/s; ρ_W 是水的密度,kg/m³, C_W 表示水的比热,J/(kg·K)。

空气会产生一定的自然对流,电池产生的一部分热量会被空气带走。这部分热量 Q_{air} (单位:W)可以由下式表示:

$$Q_{air} = h_{air} A_{air} (T_{airt} - T_{air}) \quad (5)$$

式中: h_{air} 表示空气自然对流的传热系数,W/(m²·K²); A_{air} 代表电池与空气的接触面积,m²; T_{airt} 代表电池表面的平均温度,K; T_{air} 是空气的温度,K。

与电池、相变材料和水吸收的电池热量相比,铝板在导热过程中由于吸收部分热量导致自身温度升高的这部分热量可以忽略不计。

2 结果分析

2.1 铝板厚度和水管数量的影响

1) 铝板厚度的影响

研究铝板厚度 d_{Al} 的影响时,相变材料的导热系数 k_{PCM} 、冷却水的质量流量 $q \times 10^3$ kg/s、进水温度 T_W 以及相变温度 T_{PCM} 等参数设置如表 2 所示。图 2 为不同铝板厚度时电池的温度分布情况。铝板厚度增厚时,电池的最高温度和最大温差都逐渐降低,并且最大温差可以控制在 2℃ 以内。可以看出,加入铝板后的新型模型,有利于控制电池的温度有效性和均匀性,并且散热过程更加稳定。为了工艺的简便和节约材料,选取 0.4 mm 铝板厚度为较优值。

表 2 不同铝板厚度时的参数设置

参数	d_{Al}/mm	$k_{PCM}/(\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	$q \times 10^3/(\text{kg}/\text{s})$	$T_{PCM}/^\circ\text{C}$	$T_W/^\circ\text{C}$
值	0.2、0.4、0.6、0.8	0.2	0.8	35	25

2) 水管数量的影响

研究水管数量 n 时,参数的选择见表 3。图 3 是 n 个不同同时电池的温度分布情况。当 n 增加时,电池的最高温度逐渐降低,最大温差却逐渐增大。当水管数量分别是 2、4、6、8 时,电池的最大温差同样能控制在 3℃ 以下。可以看出,水管的加入,在不破坏电池温度均匀性的前提下,还能合理地控制电池的最高温度。为了得到理想的温度,同时减少热管理系统的负载,选取 4 根水管为较优值。

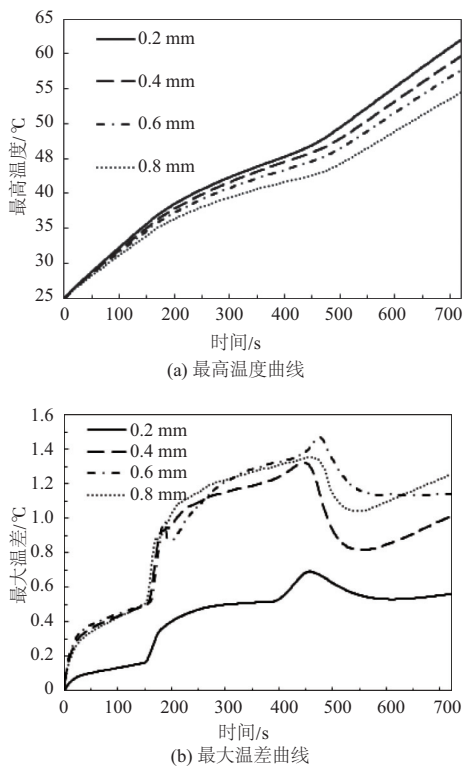


图2 不同铝板厚度的温升曲线

表3 不同水管数量时的参数设置

参数	n	$k_{PCM}/(W/(m \cdot K))$	$q \times 10^3/(kg/s)$	$T_{PCM}/^{\circ}C$	$T_w/^{\circ}C$
值	2、4、6、8	0.2	0.8	35	25

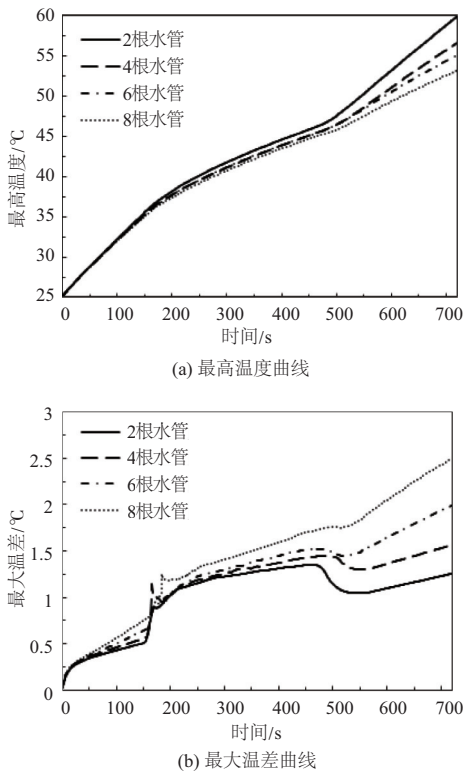


图3 不同水管数量时的温升曲线

2.2 冷却水的质量流量和相变材料的导热系数的影响

表4是分析导热系数和质量流量对电池温度影响时的参数选择情况,电池的温度分布情况如图4所示。同等变量时,电池的最高温度随着导热系数的增大而降低,随着质量流量的增大而降低。当相变材料的导热增大时,热量的传递越快,冷却水的冷却能力随质量流量的增大而增强。因此,为了得到较为均匀的温度分布,应该合理地控制导热系数和质量流量。所以,导热系数和质量流量相互制约,当匹配最好时,可以有效地降低电池的最大温差,并且考虑到制作高导热的相变材料工艺复杂性和降低负载,导热系数选择0.6 (W/(m · K)),质量流量选择0.000 5 (kg/s)为较为合理。

表4 不同导热系数和质量流量时的参数设置

参数	n	$k_{PCM}/(W/(m \cdot K))$	$q \times 10^3/(kg/s)$	$T_{PCM}/^{\circ}C$	$T_w/^{\circ}C$
值	4	0.2 0.4 0.6 0.8	0.3、0.7、1.1、1.5	35	25

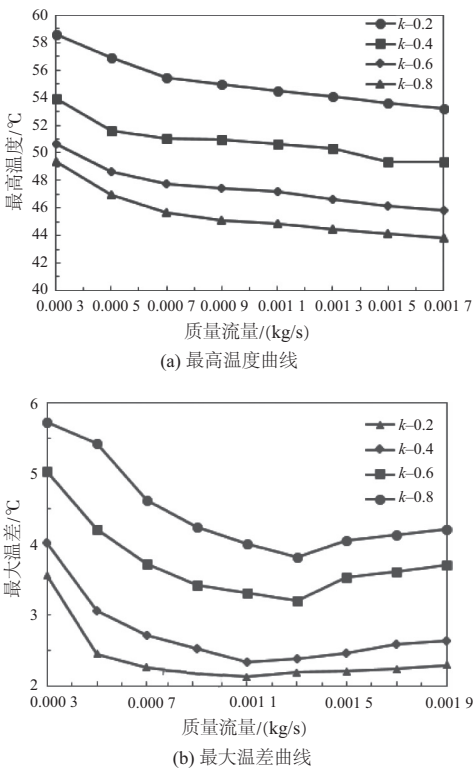


图4 不同导热系数和质量流量下的温升曲线

2.3 冷却水的进水温度和相变材料的相变温度的影响

表5是分析冷却水的进水温度和相变材料相变温度的参数选择情况,电池的温度分布情况如图5所示。同等变量时,当进水温度增大时,电池的最高温度增大。若相变温度过高,相变材料不能充分地融化,也就不能得到较

高的利用率。当进水温度过高时,不能实现快速冷却,不利于电池最大温差的控制。当相变温度为 40℃,进水温度为 18℃时,电池的最高温度可以控制在 45℃以下,最大温差在 3℃左右,都能很好地满足电池的最佳工作温度,同时相变材料也能得到较为合理的利用。

表 5 不同相变温度和进水温度时的参数设置

参数	n	$k_{\text{PCM}}/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	$q\times 10^3/(\text{kg}/\text{s})$	$T_{\text{PCM}}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{W}}/^\circ\text{C}$
值	4	0.6	0.5	35 40 45	16、19、22、25

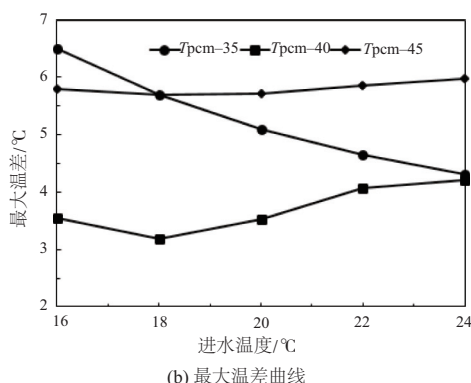
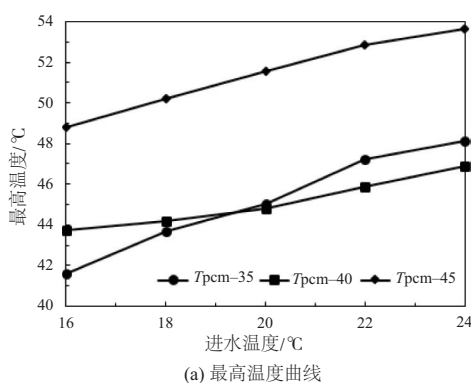


图 5 不同相变温度和进水温度时的温升曲线

3 对比与验证

本文提出了铝板/相变材料/液冷的电池热管理系统,为了验证此结构的优势,分析了在相同工况下,铝板/液冷和相变材料/液冷散热结构的温度分布。为了保证一致性,3种结构的参数设置见表6。

表 6 3种结构的参数设置

参数	n	$k_{\text{PCM}}/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	$q\times 10^3/(\text{kg}/\text{s})$	$T_{\text{PCM}}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{W}}/^\circ\text{C}$
值	4	0.6	0.5	40	18

图6是模拟常温环境、5C高倍率放电情况下,电池的最高温度和最大温差的温度曲线。从曲线图可以看出,如果只有铝/液体冷却相结合,由于铝的导热良好,使电池的最高温度能够得到较好控制。但是由于导热太快,散热不均匀,会影响电池的最大温差。当只有相变材料/液冷相

结合的热管理时,相变材料由于其良好的潜热,使电池的最大温差得到控制,但是由于相变材料的导热不好,电池不能及时散热,使电池的最高温度不能得到较好控制。所以,铝板/相变材料/液冷散热结构在控制电池的最高温度和最大温差方面都有良好的效果,控制最高温度为 44.19℃,最大温差为 3.18℃。

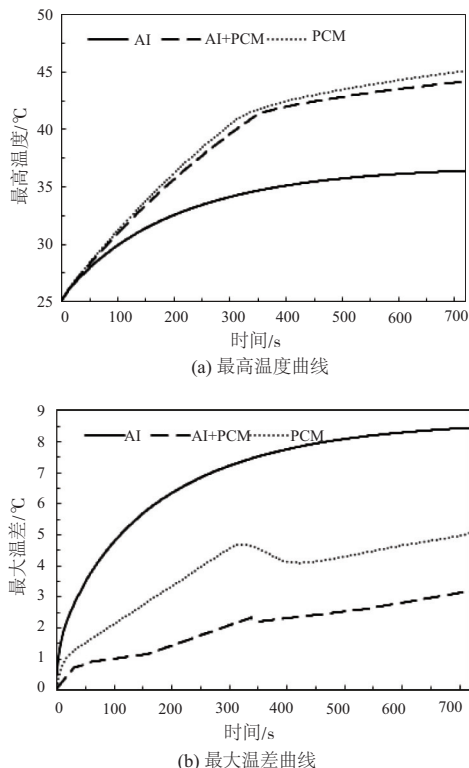


图 6 不同模型的温升曲线

4 结语

结合铝材料良好的导热性、相变材料和液体冷却可以产生均匀的温度分布,设计了一个铝板/相变材料/液冷相结合的散热结构,并且讨论了不同影响因素对电池组的最高温度、最大温差和 PCM 液体体积分数的影响。具体的结论如下:

1) 散热结构中,加入铝板后,电池的最高温度和最大温差都随着铝板厚度的增加而降低,表明此结构能够控制电池温度的有效性和均匀性。当水管数量增加时,电池的最高温度慢慢降低,温差由于散热过快而升高,因此选取 4 根水管为较优值。

2) 电池的温度会受到导热系数和质量流量的影响,随着质量流量的增加,最高温度不断降低。而为了同时控制最大温差,需要使得导热和散热的速度同步,因此,最优的导热系数和质量流量分别是 0.6 W/(m·K) 和 0.000 5 kg/s。

3) 相变温度和进水温度对电池的温度分布也会产生一定的影响。当满足以上条件,相变温度为 40℃,进水温度为 18℃时,可以有效地控制电池的最高温度为 44.19℃,最大温差为 3.18℃,此结果可以较好地满足电的工作温度,使得电池发挥较优的性能。

(下转第 97 页)

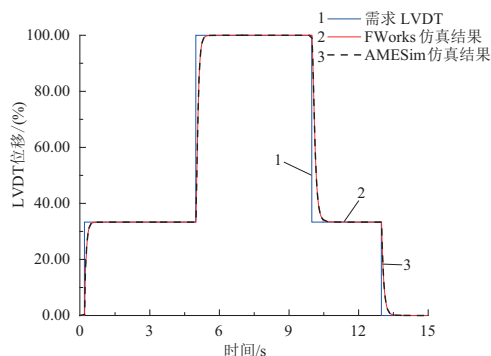


图9 燃油执行机构仿真结果对比

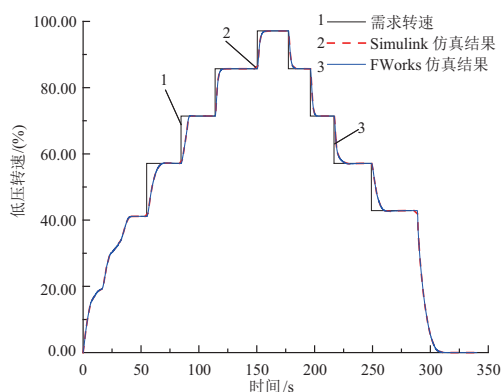


图10 控制系统闭环仿真结果对比图

4 结语

本文通过梳理文献,明确了多学科联合仿真的主要问题,提出了全权限数字仿真平台 FWorks 的改进方案,通过建立航空发动机控制系统多学科模型,并在 FWorks 平台基于 FMI 完成了多学科联合仿真,仿真结果表明:

1) FMU 的仿真结果与原仿真工具内的仿真结果一致,

二者相对误差 $<10^{-8}$,FMU 可以代表原仿真工具内的模型。

2) FWorks 成功集成 FMI 标准,并在 FWorks 平台上实现了控制系统多学科联合仿真。且 FWorks 仿真结果与 Simulink 仿真结果一致,二者相对误差 $<10^{-5}$ 。

参考文献:

- [1] CLAUS R W, EVANS A L, LYLTE J K, et al. Numerical propulsion system simulation[J]. Computing Systems in Engineering, 1991, 2(4):357-364.
- [2] CAO C, SHEN J, LUO M, et al. FWorks: An integrated digital simulation platform for FADEC systems[C]. Dalian: Chinese Control Conference, 2017.
- [3] RAJIV Sampath, RONALD Plybon, CLAYTON Mevers, et al. High fidelity system simulation of aerospace vehicles using NPSS.[C]. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004.
- [4] ARJUN Bala, VISHAL Sethi, ENRICO Lo Gatto, et al. PRO-OSIS—a collaborative venture for gas turbine performance simulation using an object oriented programming schema[C]. 18th ISABE Conference, ISABE-2007-1357, Beijing, China, 2007.
- [5] BLOCHWITZ T, OTTER M, AKESSON J, et al. Functional mockup interface 2.0: The standard for tool independent exchange of simulation models[C]. Proceedings of the 9th International MODELICA Conference. Munich; Germany: Linköping University Electronic Press, 2012 (76):173-184.
- [6] CHAPMAN J W, LAVALLE T M, MAY R, et al. Propulsion system simulation using the toolbox for the modeling and analysis of thermodynamic systems (T MATS)[C]. Cleveland, OH: 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2014.
- [7] 顾宝龙,赵振平,何泳,等. 一种应用于航空发动机测试的小型磁电式转速传感器[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(4): 44-47.
- [8] 王旭峰,郭迎清. 航空发动机转速传感器调理电路设计与仿真[J]. 电子测量技术, 2007, 30(8):150-152.
- [9] 余玲,叶志锋. 航空发动机燃油计量装置的 AMESim 建模[J]. 现代机械, 2014(5):26-29.

收稿日期:2019-03-01

(上接第 93 页)

可以发现,铝板/相变材料/液冷相结合的电池热管理系统对于电池的工作温度有着较好的控制。但是仿真和实验之间也会存在一定的偏差,在以后的学习中,可以增加实验部分的研究,以改善整个系统的整体效率。

参考文献:

- [1] WALDMANN T, WILKA M, KASPER M, et al. Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion batteries-A Post-Mortem study[J]. Journal of Power Sources, 2014, 262: 129-135.
- [2] CHEN D, JIANG J, KIM G H, et al. Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 94:846-854.
- [3] LIU R, CHEN J, XUN J, et al. Numerical investigation of thermal behaviors in lithium-ion battery stack discharge[J]. Applied Energy, 2014, 132:288-297.

- [4] KARIMI G, LI X. Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles[J]. International Journal of Energy Research, 2013, 37(1):13-24.
- [5] DUAN X, NATERER G F. Heat transfer in phase change materials for thermal management of electric vehicle battery modules[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(23):5176-5182.
- [6] PAN, MINQIANG, YUJIAN Zhong. Experimental and numerical investigation of a thermal management system for a Li-ion battery pack using cutting copper fiber sintered skeleton/paraffin composite phase change materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126:531-543.
- [7] YANG X H, TAN S C, LIU J. Thermal management of Li-ion battery with liquid metal[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 117:577-585.

收稿日期:2019-02-28