

# 纯电动汽车高低温快充仿真及试验验证

徐人鹤<sup>1</sup>, 王伟民<sup>1</sup>, 李斌<sup>2</sup>, 王小碧<sup>1</sup>, 石琳<sup>1</sup>, 余劲鹏<sup>1</sup>, 汪毛毛<sup>1</sup>

(1. 东风汽车集团有限公司汽车技术中心, 湖北武汉, 430058

2. 艾迪捷信息科技(上海)有限公司, 上海, 200122)

**摘要:**本文首先使用 GT-SUITE 软件搭建了基于等效电路的电池发热模型, 通过与电池台架试验对比, 验证了模型有效性。在此基础上进一步集成了热管理各子系统形成完整的整车热管理系统模型, 将高、低温快充工况下的热仿真结果与试验结果进行对比, 证实了模型的合理性。

**关键词:** 纯电动汽车, 热管理系统, GT-SUITE

**Abstract:** Firstly, a battery heating model based on equivalent circuit is built by using GT-SUITE software. It has been confirmed that the model is effective by comparing simulation results and the results of bench test. The thermal management system was integrated to the model in order to form a complete model of the EV vehicle. Thermal simulation results and the test results of high and low temperature fast charging conditions were compared, and it has been confirmed that the complete model is reasonable.

**Key words:** EV, thermal management system, GT-SUITE

## 1. 前言

随着电动汽车的发展和快速普及, 充电等待时间过长逐渐成为消费者在日常使用纯电动汽车时的重要痛点, 尤其在高温和低温环境中, 充电时间会成倍增长, 严重制约了车辆的使用便利性。动力电池包作为纯电动汽车的储能部件, 是纯电动汽车中的核心总成。由于动力电池的固有特性, 在大电流充放电时会产生大量热, 过高或过低的温度均会对电池的使用性能产生很大的负面影响, 如加速寿命衰减、甚至发生热失控等。在整车开发过程中, 必须采取热管理措施在充电过程中将电池温度控制在合适的温度区间内, 消除温度对电池性能产生的不利影响, 从而提高充电速度<sup>[1] [2]</sup>。

本文通过 GT-SUITE 软件搭建了动力电池包的拟三维模型, 用等效电路模型描述电池的发热机理, 可以同时考虑电池充放电倍率、温度、SOC 等影响电池发热的诸多因素, 并与整车热管理系统进行耦合仿真, 评估车辆在高温、低温工况下的充电表现, 通过与试验对比验证了仿真精度, 为以后的电池包热管理系统开发提供了性能预测工具。

## 2. 动力电池及热特性介绍

### 2.1 动力电池结构

纯电动汽车的动力源装置称作电池包, 其主要构成可以分为三个层级, 若干电芯的串联并联形成模组, 模组的串联构成电池包。电芯外壳为铝质材料, 卷芯是电池生热的主体部分, 由正极材料、隔膜、负极材料、电解质等几部分组成, 将电芯材料按电池化学反应机理卷绕堆叠成方形电池。

电池模组是电池包的重要组成部分, 模组的支架是一个用绝缘材料和导热材料组成的盒子, 将多个电池单体通过串并联的方式有序的排列在盒子内部, 电芯单体之间通过导热板间隔开。图 1 是某电池模组的结构分解图。

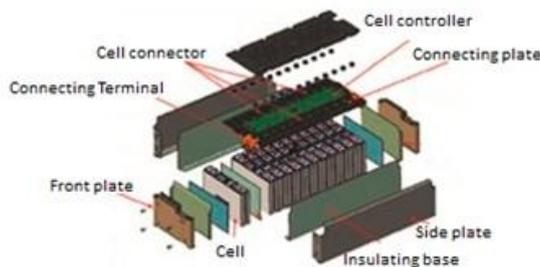


图 1 电池模组结构分解图

图 2 是某电动汽车的电池包结构图，电池包内有电池模组、电池控制系统、线束等。水冷装置作为水冷电池包中的重要组成部分，当电池包温度过高或过低时，分别为电池散热和加热，保证电池包内温度处于正常工作温度区间。

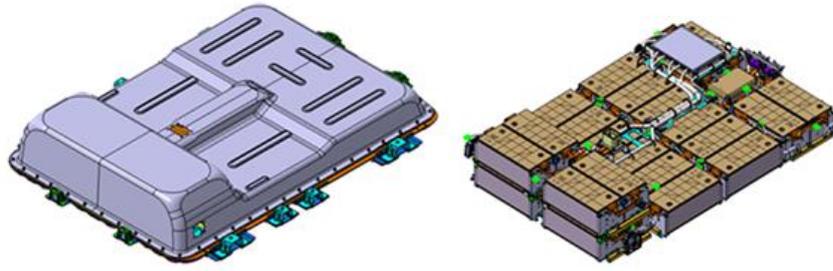


图 2 动力电池包结构图

## 2.2 动力电池热特性介绍

工程中很难准确获取电池单体生热速率  $q$  的表达式，目前获取  $q$  的表达式主要有理论计算和实验测定。实验测定对实验条件有很高的要求，直接测定是很困难的。在估算电池的生热速率时，传统分析方法常用加州大学伯克利分校 D. Bernardi 的电池生热速率模型，生热速率  $q$  的数学模型如式 (1) 所示。

$$q = \frac{I}{V_b} [(V_0 - V_1) - T \frac{dV_0}{dT}] (1)$$

其中， $V_b$  为电池的体积， $I$  是电池充放电电流， $V_0$  为电池的开路电压， $V_1$  是电池的端电压， $T$  是电池温度， $I*(V_0-V_1)$  表示焦耳热部分， $I*T(dV_0)/dT$  表可逆反应热部分，是电化学反应的相关量，对特定的电池，可认为是常量，由于其值与焦耳热部分相比很小，仿真过程中可忽略不计。

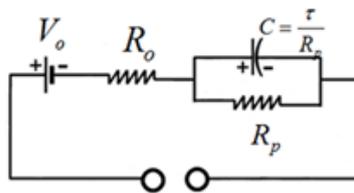


图 3 等效电路模型

本文采用基于 RC 等效电路模型计算电芯的发热功率，如图 3 所示， $V_0$  为开路电压， $R_0$  为电池欧姆内阻， $R_p$  与电容  $C$  组成电池的极化内阻。通过标定等效电路中不同温度不同 SOC(State of Charge) 下四个参数  $V_0$ 、 $R_0$ 、 $R_p$ 、 $\tau$ ，建立电芯发热模型。

结合电池包具体的运行工况，采用这种方法时电芯发热功率与电池包热流场实时交互，可准确获取不同温度不同 SOC 下的电芯发热功率。本文运用 HPPC 测试数据和电芯运行工况在 BDS 软件中建立电芯发热功率模型和描述运行工况的电路文件，在进行仿真之前，对单电芯进行了 HPPC 测试，以便拟合等效电路参数，同时进行了产热功率的测试，用于判断等效数据的准确性。以  $20^\circ\text{C}$  为例，100%SOC 状态下的 HPPC 曲线如图 4 所示。1C 充电下的产热功率如图 5 所示。

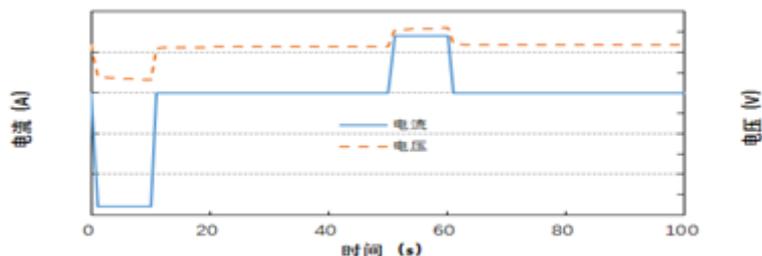


图 4  $20^\circ\text{C}$  100%SOC HPPC 测试

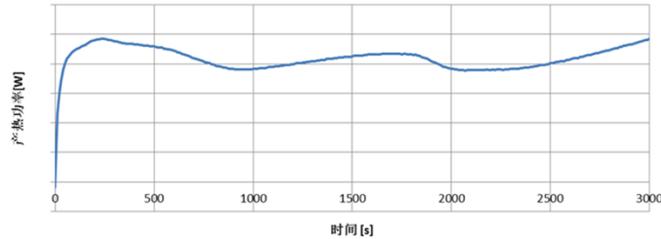


图 5 20°C 1C 充电产热功率

### 3. 基于 GT-SUITE 的电池包拟三维仿真及试验对标

本文的研究目的是通过仿真手段预测高低温下整车快充时间，需要进行电池包发热与周边热管理系统之间的耦合仿真，传统的三维 CFD 仿真手段由于计算时间和计算资源的限制，并不适用于该工况的研究。因此作者使用 GT-SUITE 软件，通过拟三维的方法，将电池包内的主要热容和传热构件用参数化的质量单元代替，将主要的传热路径进行抽象描述，搭建了一个简化的电池包模型，并与试验进行对标。

#### 3.1 电池包的拟三维模型介绍

如前所述，动力电池整包的主要构成可以分为电池模组、水冷板、线束、BMS、电池包外壳等，通过适当简化，仿真只保留对整包热性能影响较大的部分，在此基础上即可通过 GT-SPACECLAIM 完成电池包基础模型搭建，其结构图如图 6 所示。

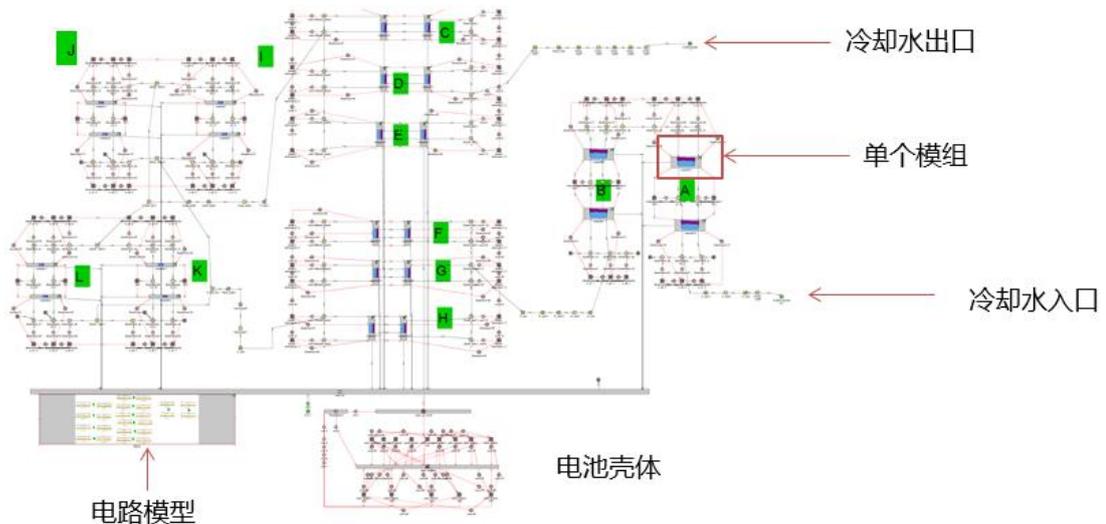


图 6 电池包拟三维模型示意图

电池包可以分为 4 个部分：

- 1) 电池模组：如图 6 中 A-L 所示为构成电池包的 24 个电池模组，由于各模组结构相同，为便于建模，此处可以建立一个典型模组模型，然后复用；
- 2) 水冷板：电池包水冷板铺设于各模组下方，结构形式为典型口琴管，建模过程中用等效质量和流通面积等代替；
- 3) 电路模型：该电池包模组的串并联关系在电路模型中集中描述；
- 4) 电池壳体：主要用于描述电池壳体、结构和非发热件的热容和传热过程，以及电池包与环境的对流换热。

电池包主要质量构成和热源为 24 个模组，各模组的拟三维模型如图 7 所示。各模组的主要构成包括电芯、导热硅胶、水冷板、冷却液、模组盖板、导热硅胶、绝缘胶等，建模过程中考虑了各组

成部分之间的热传导和对流换热，以及热容、导热系数等主要物性参数，其中电芯由于其自身的结构特点，导热系数体现出典型的各项异性。各电芯的发热模型采用前文所述的 RC 等效电路模型。

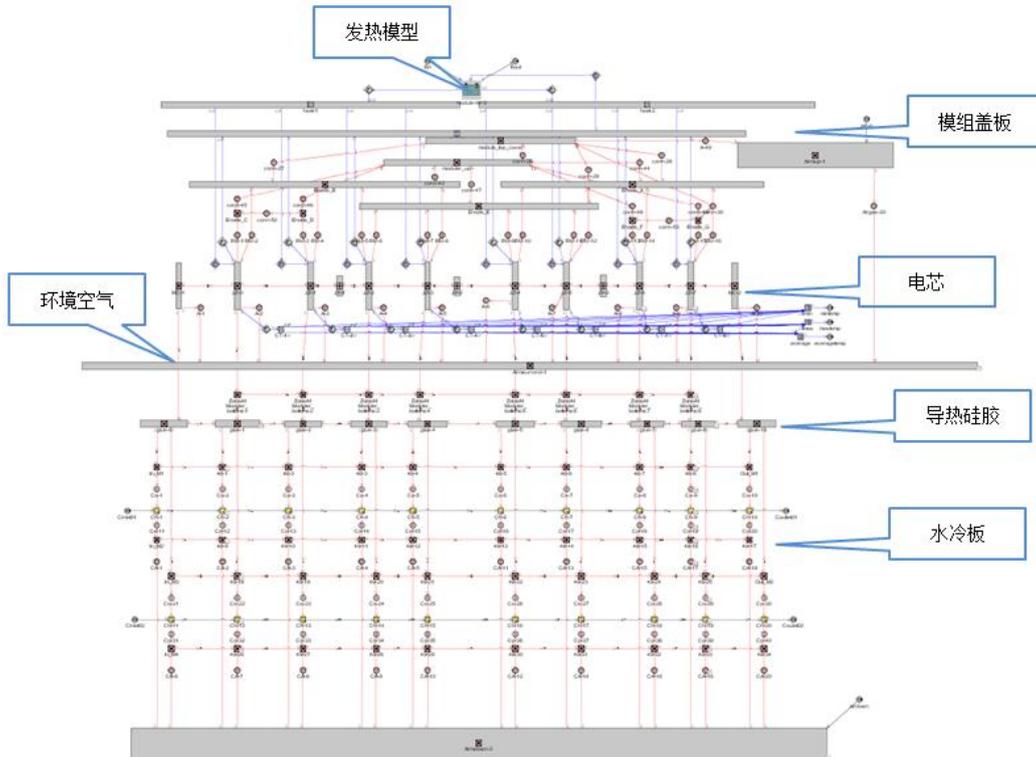


图 7 电池模组的拟三维模型

### 3.2 电池包拟三维模型的仿真和试验对标

为验证电池包单体模型的准确性，本文与电池包台架试验进行了仿真和试验对标。试验工况为环境温度  $45^{\circ}\text{C}$  的电池充放电试验，电池初始条件为  $\text{SOC}=1$ ，事先在  $45^{\circ}\text{C}$  环境舱中静置以保证整包温度一致性，试验过程中先对电池包进行 NEDC 工况放电，然后进行 1C 快充，充放电电流如图 8 所示。同时水冷机组在试验中对电池包持续通入  $20^{\circ}\text{C}$  的冷却液，流量为  $10\text{L}/\text{min}$ ，通过电池包各电芯上设置的传感器读取各电芯的温度变化情况，并记录电池包出口水温。

电池包各电芯的最高最低温度和电池进出口水温的仿真试验对比如图 9 和图 10 所示。电池包的温度误差为  $1.7^{\circ}\text{C}$ ，电池包出口水温误差小于  $1^{\circ}\text{C}$ ，表明该模型精度能够满足系统仿真需求。

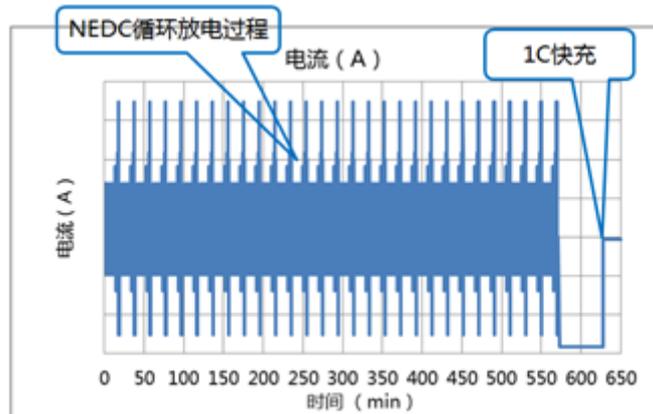


图 8 电池包充放电电流

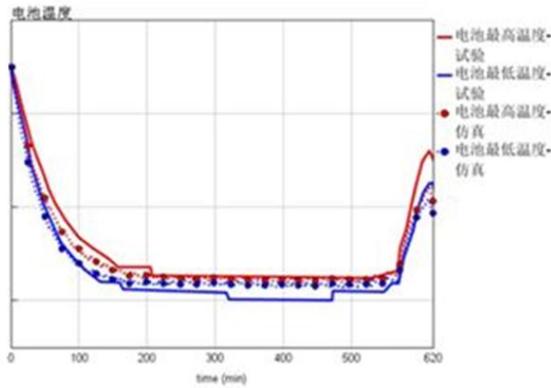


图 9 电池包温度仿真实验对比

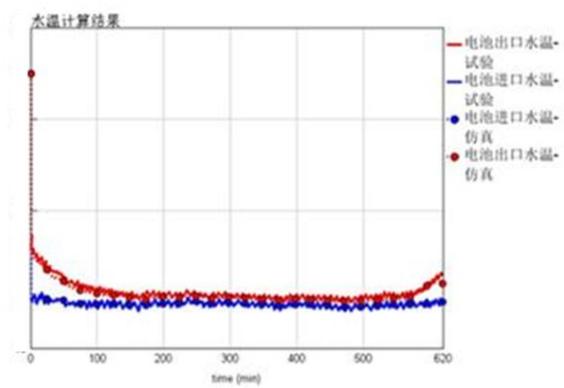


图 10 电池包进出口水温仿真实验对比

## 4. 整车高低温快充工况仿真

### 4.1 快充工况模型介绍

本文以风神某款纯电动汽车为例，重点仿真分析了高温（40° C）和低温（-20° C）工况下，车辆的快充时间和电池温度变化等主要性能指标。同时为了重要测温点温度和电池包冷却液流量的仿真和试验对标，试验测量时，在重要的测温点处布置了 5 个热电偶，也布置了电池包回路的流量传感器。

该车型采用水冷散热，制冷剂侧与空调系统共用一套压缩机和冷凝器，分别使用 chiller 和蒸发器完成电池包、空调系统水侧和制冷剂侧的热交换，各支路都配有独立的膨胀阀和电子水泵。在冷却模式下制冷剂经过压缩机压缩为高温高压状态，经冷凝器散热降温分别输送至空调支路和电池热管理系统支路，各支路制冷剂由独立膨胀阀节流并通过蒸发器和 chiller 完成与空气和冷却水的换热，冷却水通过水冷板与模组热交换散热。在加热模式下，空调和电池包热管理系统采用共用 PTC 进行加热，分别通过 chiller 和暖风芯体完成对乘员舱和电池包的加热。

基于以上硬件结构，一维仿真模型应当包括以下几个部分：电池包模型，电池包冷却回路，PTC 回路，空调回路，动力舱及前端模块系统，控制系统等，模型结构如图 11 所示。

- 1) 电池包模块：电池包使用前文所述的拟三维模型，能准确描述电池包的容量，发热功率，电池温度以及热传导过程；
- 2) 电池包冷却回路：主要包括冷却管路，电子水泵，板式换热器冷侧等，用以描述电池包加热冷却过程的水流量、压降、以及与水冷板和板式换热器 1 的热侧、板式换热器 2 的制冷剂侧的对流换热过程；
- 3) PTC 回路：主要包括管路，电子水泵，PTC 加热器，板式换热器热侧等，用以描述加热过程的水流量、压降、以及与板式换热器冷侧的对流换热过程；
- 4) 空调回路：主要包括高压、低压管路，压缩机，膨胀阀，冷凝器，蒸发器，板式换热器 2 冷侧等，用以描述电池包冷却液过程中的制冷循环，及与板式换热器 2 热侧的对流换热过程；
- 5) 动力舱及前端模块：主要包括冷凝器，散热器，风扇，及相关管路，动力舱部分由 COOL3D 功能模块搭建，用以仿真不同工况及风扇转速下的机舱流场，为各热交换器提供进风量仿真数据；
- 6) 控制系统：该模型的控制系统由 Matlab-Simulink 搭建，主要控制对象包括，压缩机转速，各水泵占空比、压缩机转速、PTC 加热功率等，控制目标为电池平均温度、温差和电池包进出口冷却液温度等<sup>[3]</sup>。

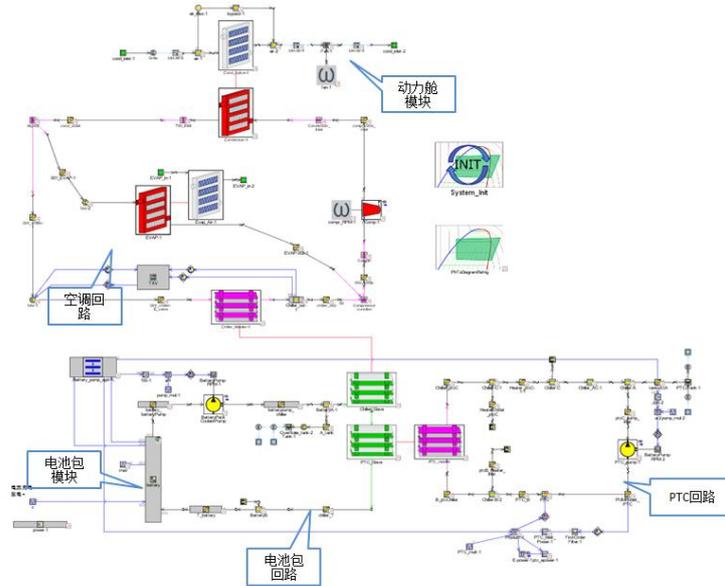


图 11 快充工况仿真一维模型示意图

#### 4.2 高低温快充工况的仿真和试验结果对比

本文选取了高温 40° C 和低温-20° C 两个环境温度作为试验工况分别进行了仿真试验对标，为保证试验精度，两组试验均在环境舱中进行，并在试验之前充分静置。

##### 1) 高温（40° C）快充工况仿真和试验结果对比

高温快充工况主要对比了充电时间，电池温度，电池进出口水温，电池包水流量等参数，并统计了热管理系统的能耗情况，对比情况如图 12~15 所示。

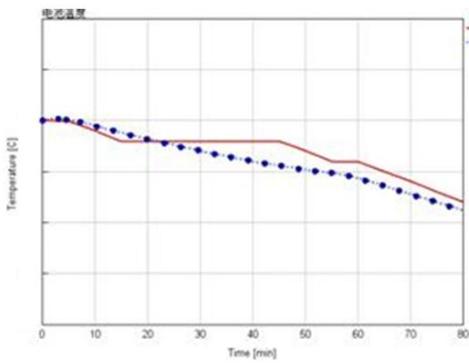


图 12 电池平均温度仿真试验对比

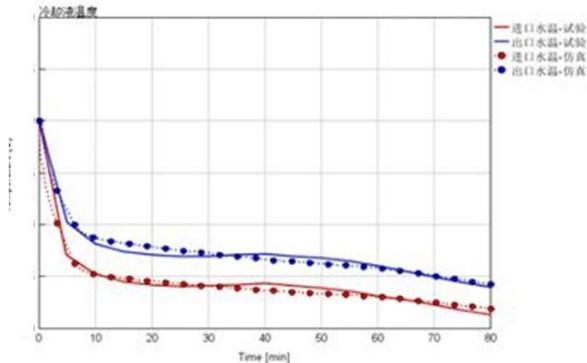


图 13 电池进出口水温仿真试验对比

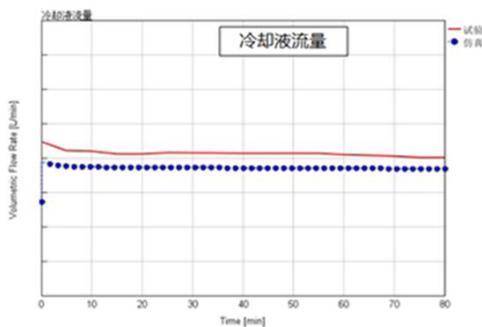


图 14 电池水流量仿真试验对比

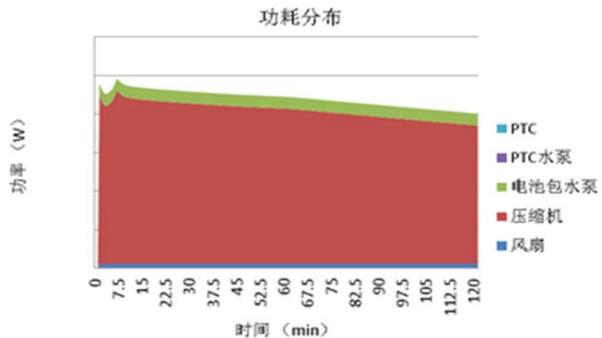


图 15 热管理系统能耗分布

从对比结果看，仿真和试验结果基本吻合，其中电池包平均温度误差稍大，主要原因是电池包平均

温度试验数据采集来源为电池包自带的热电偶，测量精度为  $1^{\circ}\text{C}$ ，测量误差较大，不能完全反映温度变化过程。从热管理系统能耗分布图看，压缩机功率达到约  $400\text{W}$ ，为主要耗能原件，为提高整车能耗表现，在后续车辆改进优化中应着重考虑提高压缩机效率。

## 2) 低温 ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) 快充工况的仿真和试验结果对比

低温快充时间过长是困扰用户使用电动车的主要因素，其主要原因是电池包的低温敏感性，在低温状态下采用大电流充电会对电池的寿命产生较大影响，因此普遍采用的充电策略是先将电池包加热至热舒适区再采用大电流充电。低温工况下本文主要与试验对比了电池 SOC，电池温度，电池进出口水温，电池包水流量等参数，并统计了热管理系统的能耗情况，对比情况如图 16~19 所示。

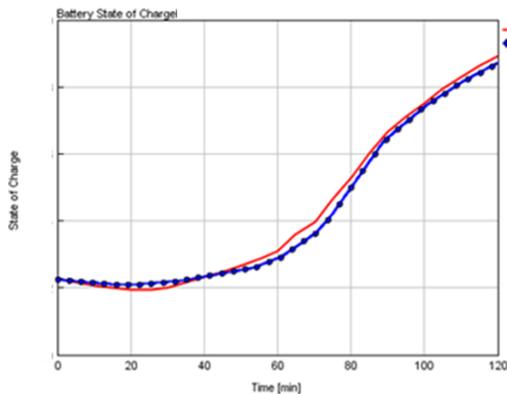


图 16 电池 SOC 仿真和试验对比

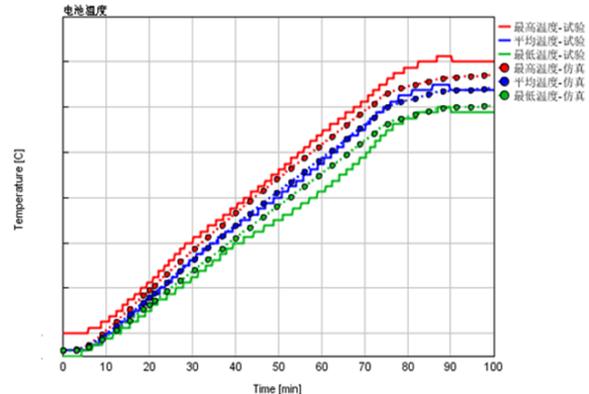


图 17 电池温度仿真和试验对比

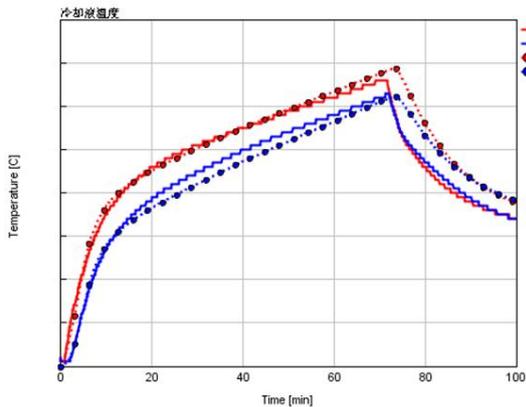


图 18 电池进出口水温仿真和试验对比

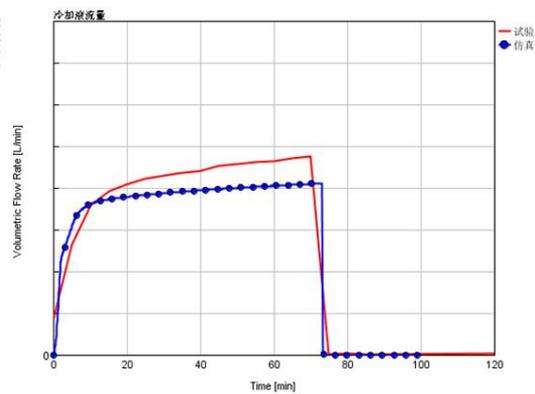


图 19 电池回路水流量仿真和试验对比

从对比结果看，仿真结果与试验趋势基本吻合。但是，图 19 所示的电池包水回路水流量的仿真试验结果有一定差异，主要原因是冷却液粘度在低温情况下受温度影响加大，相应的水泵 P-Q 曲线与常温不同，水泵扬程降低，仿真所使用的输入为经验值，后续需要对水泵输入参数继续完善。

从图 16 和图 17 可以看出，在充电开始前 40 分钟，由于电池温度低于舒适区，充电控制策略禁止充电机使用大电流对电池充电，在后续的改进过程中，应尽量缩短该过程时间，提高充电速率。从图 20 可以看出，在充电过程中 PTC 的电功率达到  $3.5\sim 4.5\text{KW}$ ，占到整个热管理系统能耗的 95% 以上，为提高能量利用率，如何改进热管理系统结构和控制策略，也是后期优化的重要方向。

从以上仿真和试验的对标结果来看，精度已经保证能用于高低温快充性能的预测。具备了 this 预测工具以后，可以找出缩短高低温充电时间、减少能量损耗的技术措施。

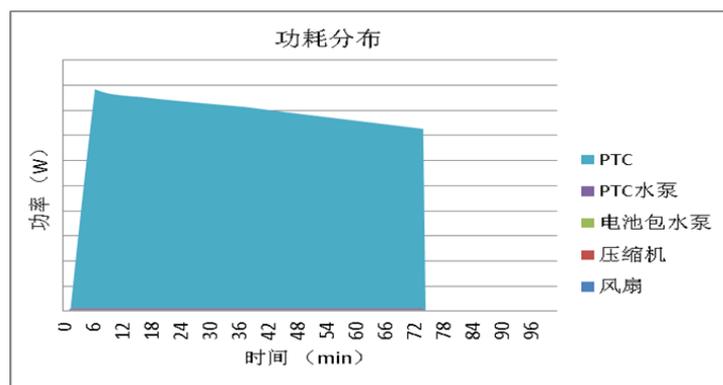


图 20 低温快充热管理系统能耗分布

## 5. 总结

本文首先介绍了纯电动车热管理系统仿真分析的重要性，并对典型的动力电池包结构做了简单介绍，用等效电路的方法建立了一种电池发热模型，然后采用 GT-SUITE 建立了电池包的拟三维仿真模型，并与台架试验结果进行了对比，证明了电池包单体仿真模型的精度。然后以风神某款纯电动汽车为基础，搭建了整车热管理系统的一维仿真模型，与高低温快充试验结果进行对比，分析了仿真结果的误差，证明了该仿真方法的实用性，为今后的高低温快充性能改善和控制策略优化打下了坚实的技术基础<sup>[4]</sup>。

## 6. 参考文献

- [1] 窦昊、梁长裘、朱贞英、门永新，基于 GT-SUITE 的乘用车冷却系统匹配仿真分析与试验验证，2013 年 IDAJ 中国区年会，2013。
- [2] Z Guo, B Song. Optimization of vehicle control strategy based on GT-SUITE and mode frontier [J] Society of Instrument & Control Engineers of Japan, 2015.
- [3] 侯广永，基于 GT-SUITE 混合动力控制策略开发，2013 年 IDAJ 中国区年会，2013。
- [4] 王伟民，徐人鹤，王希诚，王小碧，周坤，李洪涛等，纯电动汽车整车热管理系统集成仿真技术研究及展望，2017 年 IDAJ 中国 CAE/CFD 技术大会论文集，2017。