DOI:10.19659/j.issn.1008-5300.2018.06.006

计及热辐射的电动汽车电池包散热与改进研究

宋亚豪1,谷正气1,2,石佳琦1

2. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南长沙 410082)

摘 要:为研究计入外部环境热辐射因素后,电池包的布置位置对整车气动阻力和其自身散热的影响,计 及高温时地面辐射和太阳辐射,采用可实现 k-ε 湍流模型进行了 CFD 数值模拟,通过实车道路实验验证仿 真方案的准确性。在此基础上,对电池包前置、中置和后置的整车气动阻力进行了对比分析,以整车气动 阻力最小的前置式电动汽车为研究对象,通过电池包高温工况下的温度场数值分析,提出了该布置下的电 池包散热改进方案。结果表明,前置式电池包改进后,单体电池表面最高温度降幅为 14.5 ℃,表面最低温 度降幅为 11.5 ℃,抑制了温差过大,降低了局部高温,提高了电池包的散热性能。

关键词:电池包;气动阻力;地面辐射;太阳辐射;实车道路实验 中图分类号:U469.72⁺2 文献标识码:A 文章编号:1008-5300(2018)06-0022-05

Research on Heat Dissipation and Improvement of Electric Vehicle Battery Pack Considering Thermal Radiation

SONG Ya-hao¹, GU Zheng-qi^{1,2}, SHI Jia-qi¹

 Department of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;
 State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to study the influence of the battery pack arrangement on the vehicle aerodynamic drag and its own heat dissipation when the environment thermal radiation is considered, the CFD numerical simulation is carried out by using the Realizable k- ε turbulence model with high temperature ground radiation and solar radiation considered, the simulation scheme is verified through the real vehicle road test. On this basis, the vehicle aerodynamic drags of front, center and rear battery pack arrangement are compared. The electric car with front-arranged battery pack has smallest vehicle aerodynamic drag, the numerical analysis of the temperature distribution of the battery pack under high temperature is carried out, and the heat dissipation improvement scheme for this battery pack arrangement is proposed. The results show that the highest surface temperature of the batteries of the improved front-arranged battery pack decreases by 14.5 °C, the lowest decreases by 11.5 °C. It suppresses the big temperature difference, reduces the local high temperature, and improves the heat dissipation of the battery pack.

Key words: battery pack; aerodynamic drag; ground radiation; solar radiation; real vehicle road test

引 言

电池包作为电动汽车的"发动机",其工作温度过 高或过低,各电池模块及单体电池间温差较大,不仅不 利于电池性能的发挥,还会加快电池性能的衰减速度, 缩短电池的使用寿命,严重时还会造成热失控,影响电池组的安全性和可靠性。有研究表明,磷酸铁锂电池的最佳工作温度区间为 18 ℃ ~43 ℃,电池组温差在 5 ℃ 内,且在 30 ℃时,放电效率高达 90%,此时性能达到最优^[1]。为了让电池包在最佳的温度区间内运行,文献

^{(1.} 湖南工业大学机械工程学院, 湖南 株州 412007;

^{*} 收稿日期:2018-07-06

[2]建立了二维锂离子聚合物电池内部3种细分结构模型,分析了不同结构下电池的热性能并提出了改进措施,同时建立了恒流放电条件下的二维与三维动力电池 热模型^[3-4]。文献[5-7]对电动汽车电池单元模块、电 池包从系统热管理角度进行了散热研究。文献[8]对比 分析了串行与并行通风冷却效果,指出并行通风方式优 于串行,实际应用中也更为常用。文献[9]通过对 MH/ Ni 电池包外壳加设高翅化比铝套,增大散热结构面积, 使得电池包表面温度降低2℃~4℃。文献[10]研究 了电池包出风口位置对其散热性能的影响,发现将出风 口设置在电池箱底部时,能够有效降低电池温度,并且 使温度均衡性得到改善。文献[11]研究了一种新型相 变材料/风冷综合热管理,其性能优于纯风冷系统。

以上研究表明,结合 CFD 仿真和实验方法,改进 电池包内部冷却气流出入口和风道的位置、形状、大 小、结构以及电池单元排列方式,多种冷却方式相结 合,均可对电池包的散热与保温性能有较大改善效果。 然而,在 CFD 仿真研究中,当前大部分研究仅考虑了 电池自身的生热,没有考虑到外部环境因素对电池组 温度的影响,如太阳辐射、地面辐射等;同时,研究中未 考虑电池包布置位置对整车气动阻力的影响。

当前全球变暖,极端气候频现,夏季高强度的热辐 射使得城市路面温度高达 60 ℃ ~70 ℃^[12],远超电池 的最佳工作温度范围,因此,热辐射对电池包散热的影 响将不容忽视。

本文以某款实际在用的后置式纯电动汽车为研究 对象,对同一型号且单体电池个数相同的磷酸铁锂离 子电池在高温工况下,考虑地面辐射和太阳辐射环境 影响因素,进行数值仿真研究,并开展实车道路实验验 证。在此基础上对电池包前置、中置和后置3种布置 位置的整车气动阻力进行了对比分析,以阻力最小的 前置式电动汽车为研究对象,开展电池包内部结构改 进研究,以提高其散热性能。

1 仿真实验

1.1 电池模型

常见电池包的三维数字模型如图1所示。

以图 1(c)为例进行模拟仿真,电池包布置在备 胎槽中,底部部分裸露在空气中,可以通过底部的气 流实现较好的空气散热。单体电池成组放置,组间 距为 20 mm,单体间距 10 mm,电池单体距电池包壁 面 10 mm,封装在立方箱体内。此电池包电池单体 数量较多,且正负极柱的生热量可忽略^[13]。



(6) 肩直式电池包仰直力式

图 1 电动汽车及其电池包 3D 模型

1.2 太阳辐射与地面辐射

1.2.1 太阳辐射

目前 CFD 仿真中太阳辐射普适性较强的模型为 包含水平地面月平均太阳总辐射因素的日照类模型, 最初的日照类模型由文献[14]于 1923 年提出,经过 Angstrom 与 Page 等人修正改进后,用于 CFD 计算的 水平面总太阳辐射模型如下^[15]:

$$H/H_0 = a + b(S/S_0)$$
 (1)

式中: \overline{H} 为水平地面月平均太阳总辐射; \overline{H}_0 为大气层外 水平面月平均太阳总辐射; \overline{S} 为月平均日照时数; \overline{S}_0 为 月平均日长;a、b为 Angstrom 系数; \overline{H}_0 与 \overline{S}_0 相关计算 公式详见文献[15]。

1.2.2 地面辐射

夏季温度高,车辆正常行驶吸收的热量主要来源 于太阳辐射、天空散射、大气逆辐射、路面辐射和对流 换热,车身表面热量释放主要通过反射辐射和对流换 热进行,计及热辐射的车身热交换可由式(2)表示,换 热量的单位为 W。

$$Q = (1 - \alpha) (Q_{\rm s} + Q_{\rm d} + Q_{\rm a} + Q_{\rm g}) - Q_{\rm c} \pm Q_{\rm h} (2)$$

式中:Q 为车身表面单元的换热量; α 为车身对热辐射 的反射率; Q_a 为太阳对车身的直接太阳辐射热量; Q_a 为天空对车身的天空散射辐射热量; Q_a 为大气对车身 的大气逆辐射热量; Q_g 为路面对车身的路面辐射热 量; Q_c 为车身对外辐射热量; Q_h 为车身与外界的对流 换热热量。

1.3 湍流模型与电池温度场

由于可实现 k-e 模型能更准确地模拟有边界层和

气流分离的三维流动,因此已被广泛应用于汽车车身 外流场分析研究中^[16]。本文以 ANSYS-Fluent 14.0 为 求解器,按100 km/h的速度行驶,计算域和求解边界 条件按照文献[17]设置。此时,电池以1C的标准放 电倍率放电,环境温度为38℃。太阳辐射采用离散坐 标系(Discrete Ordinates, DO)辐射模型,模拟太阳辐 射传热过程需要设置计算区域经纬度、时区、日期和时 间等参数。为和后继道路实验验证一致,仿真中测试 地区以湖南株洲市区为例,经纬度分别为东经113.16° 和北纬27.83°,时区为东八区。根据气象文献资料,大 暑节气为7月份,15点左右为一年中最热的时间,此时 太阳辐射强度约为750 W/m²。当激活辐射模型后,Fluent 将 自 动 激 活 能 量 方 程 的 计 算。路 面 材 质 定义为沥青路面,其密度为2 445 kg/m³,比热容为 1 300 J/(kg・℃),导热系数为0.7 W/(m・K)^[18]。在 仿真中,采用 Mixed 混合传热模型(对流、传导和外部辐 射组合模型);电池表面设置为铝材料,汽车和电池包为 钢铁材料,并设置相应的传热系数、自由流温度、外部辐 射率等参数。

采用压力速度耦合 SIMPLE 算法, 二阶迎风格式。 计算收敛后, 得到在该结构布置下, 整车气动阻力系数 为0.3716, 电池组表面温度场如图2所示。电池组最 高温度为57.0℃, 最低温度为39.0℃, 单体电池间最 大温差为18.0℃, 最低温度区域主要分布在靠近人风 口处的电池组表面, 而在远离电池包入风口的若干个 电池单体处, 出现了局部高温现象, 说明这种电池包的 设计存在问题。



图 2 电池组温度场

2 实车道路实验

为验证数值仿真的可靠性,开展该后置式电动汽 车的电池包发热的道路实验。

2.1 实验器材

本次试验所用设备如图3所示。

图 3 中逆变器将 12 V 车载直流电转换为 220 V 交流电;温度传感器贴片粘贴在电池包表面并连接至

数据采集仪,通过数据采集仪读取电池包表面温度。



(e) 电池包传感器布置位置

图 3 实车道路实验设备

2.2 **实验步骤**

(d) 某款电动汽车

对怠速与高速两种工况进行实车道路实验,时间 为7月份某晴天13点~15点。实验过程如下:

1) 怠速工况:车速0 km/h,电池包散热风扇启动,抽吸空气实现电池包内部空气散热,分别记录16 个采样点温度,每10 s记录一次,采集5组温度后求 平均值。

2)高速工况:车速110 km/h,每5 s 记录一次读数,受限于道路长度和实验安全性,采集3组温度后求 平均值。

2.3 实验结果分析

怠速与高速工况下,采样点的温度数据如图 4 所示。高速工况下电池包表面温度普遍比怠速工况下低,这是因为怠速工况下,进入电池包的冷却空气较少,冷却空气的流速与流量偏低,而车辆在高速行驶时,由于电池包下部裸露在空气中,高速气流对电池包表面具有较好的散热作用。



图 4 温度对比折线图

实验结果表明,远离入风口的电池包表面温度高 于边缘电池的温度,这与本文仿真得出的电池组温度 分布趋势一致,说明仿真结果的准确度较高。

3 电池包不同布置下整车气动阻力评价

纯电动汽车电池包不同的布置位置,会导致整车 气动阻力变化,也会影响到其自身的散热方式和效果。 因此,在车型和电池包内部结构不变的条件下,采用最 低整车气动阻力的布置方式,将有效提高电池的续航 能力。从电池包布置位置对整车气动阻力影响角度出 发,评价后置、前置、中置3种布置位置的气动特性和 散热特性。

3.1 不同位置的外流场对比

如图 1(a)、1(b)所示,将电池包放置在前舱和车 身底部的中部位置,形成前置式和中置式的布置结构。

不考虑电池组的生热和热辐射,使用可实现 k-e 湍流模型分别对前置、中置与后置 3 种工况进行外流 场计算,入口风速设定为 30 m/s,计算得到各布置工 况阻力系数 C_a如表 1 所示。其中,前置工况阻力系数 值最小,后置工况最大,而中置工况介于两者之间。故 选择阻力最小的前置式电动汽车为研究对象。

秋1 西方示劾	
电池包布置工况	$C_{ m d}$
前置	0.343 9
中置	0.350 5
后置	0.371 6

表1 阳力玄数对比

图 5 为 3 种布置工况下汽车尾部三维流线图。图 5(a)与 5(c)分别为前置和后置时的尾部流线图,可以 看出尾部形成了两个大小基本一致且相互对称的完整 的马蹄涡。图 5(b)为中置方式,尾部形成两个不完整 的马蹄涡,这是因为电池包放置在底盘,底盘离地距离 减小,导致气流速度提高,减少了底盘气流向上的卷绕 运动,抑制了马蹄涡的形成。



图 5 尾部二维流线图

3.2 前置式电池组温度场分析

对前置式电池包进行仿真计算,具体设置与1.3 节相同,冷却方式为自然风冷。仿真计算后的电池组





图 6 电池组高温工况下的温度场

由图6可以看出,高温工况下,电池组最高温度为 59.2 ℃,最低温度为49.8 ℃,最大温升21.2 ℃,电池 单体间最大温差为9.4 ℃。电池组由于热量累积效 应,高温区域集中在电池组中部,温度分布不均匀,电 池单体间温差大,散热性能不佳,影响电池续航能力和 使用寿命。

3.3 高温工况散热性能改进

改进方案如图 7 所示。在电池包迎风面开设进风口,进风口高度与电池包高度一致,宽度为 10 mm,其位置与电池单体间排列缝隙对齐。出风口设置在电池包的背风面,其尺寸与进风口一致,位置与进风口对齐。由于来流方向平行于 X 轴,电池组在 Y 方向上属于并行通风方式,而在 X 方向上则属于串行通风方式,热量在该方向上的后排电池处累积较为严重,因此,为了进一步降低温度,使电池处于最佳工作温度,在电池包两侧靠近出口处分别加装两个直径为 120 mm 的风扇,为了更好地展示电池包结构,图中已将部分电池隐藏。



图 7 强制风冷结构设计

使用强制风冷后,前舱内流场与电池组温度场如 图 8 所示。电池包周围涡旋的尺度明显减小,气流更 加顺畅,电池包内的热环境及电池组的温度均匀性得 到显著改善,具体温度情况和改善前后对比见表2。

表 2 改进前后温度对比			$^{\circ}\mathrm{C}$
参数	自然冷	强冷	降幅
最高温度	59.25	44.75	14.5
最低温度	50.35	38.85	11.5
温差	8.90	5.90	





图 8 强制风冷措施下的流场图

以上分析计算表明,纯电动车在夏季高温工况下行 驶,电池包前舱放置时,由于单体电池数量较多导致生 热量大,电池包内热量累积严重,不利于电池组发挥良 好性能。通过合理安排散热风扇位置与设计电池包结 构的进风口和出风口,运用强制风冷方式可以使电池组 在适宜的温度区间内工作,改善了单体间温度均匀性, 延长了电池的使用寿命,提高了电池的续航能力。

4 结束语

文中对实车车型的电池包在高温辐射下的温度场 进行仿真分析研究,并与实车道路实验结果进行比较, 验证了仿真结果的准确性,同时也证明了原车型电池 包设计存在缺陷。

将电池包放置在前舱、底盘和备胎槽中3个位置的整车气动阻力的仿真结果对比表明,放置在前舱时, 整车的气动阻力系数最小,并以此为基础,研究分析在 自然冷却方式下电池包的温度分布情况。

最后对电池包结构进行改进,改进后电池组表面 高温区域面积明显减小,最高温度显著降低,降幅为 14.5℃,最低温度降幅为11.5℃,同时也改善了单体 电池间的温度不均匀性。

参 考 文 献

- [1] 辛乃龙. 纯电动汽车锂离子动力电池组热特性分析及仿 真研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [2] CHEN Y F, EVANS J W. Heat transfer phenomena in lithium/polymer-electrolyte batteries for electric vehicle application[J]. Journal of The Electrochemical Society, 1993, 140 (7): 1833-1838.
- [3] CHEN Y F, EVANS J W. Thermal analysis of lithium polymer electrolyte batteries by a two dimensional model-thermal behaviour and design optimization [J]. Electrochimica Acta, 1994, 39(4): 517-526.
- [4] CHEN Y F, EVANS J W. Three dimensional thermal modeling of lithium-polymer batteries under galvanostatic dis 26 •

charge and dynamic power profile [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1994, 141(11): 2947-2955.

- [5] PESARAN A A, VLAHINOS A, BURCH S D. Thermal performance of EV and HEV battery modules and packs[C]// Proceedings of the 14th International Electric Vehicle Symposium, [S. l.]: [s. n.]: 1997.
- [6] PESARAN A A, BURCH S, KEYSER M. An approach for designing thermal management systems for electric and hybrid vehicle battery packs[C]//The Fourth Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition, Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 1999.
- [7] PESARAN A A, KEYSER M. Thermal characteristics of selected EV and HEV batteries [C]//Proceedings of the Sixteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances, [S. l.]: IEEE Press, 2001.
- [8] 付正阳,林成涛,陈全世.电动汽车电池组热管理系统的关键技术[J].公路交通科技,2005,22(3):119-123.
- [9] 崔威,王文,娄豫皖,等. 条形 MH/Ni 电池模块风冷散 热结构的优化[J]. 电池, 2009, 39(5): 260-262.
- [10] 姬芬竹,刘丽君,杨世春,等.电动汽车动力电池生热 模型和散热特性[J].北京航空航天大学学报,2014, 40(1):18-24.
- [11] 施尚,余建祖,谢永奇,等. 锂电池相变材料/风冷综 合热管理系统温升特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2017,43(6):1278-1286.
- [12] 曹久林. 沥青路面温度场及应力场的数值模拟研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [13] 陈燕虹,吴伟静,刘宏伟,等. 纯电动汽车电池箱的热
 特性[J]. 吉林大学学报:工学版, 2014, 44(4): 925-932.
- [14] KIMBALL H H. Variations in the total and luminous solar radiation with geographical position in the united states [J]. Monthly Weather Review, 1919, 47(11): 769-793.
- [15] 贾友见.水平地面月平均太阳总辐射的日照类模型[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 1997, 13(3): 48-52.
- [16] 杨易,郑萌,黄剑锋,等.基于非光滑表面与涡流干扰 的车身气动减阻方法[J].中国机械工程,2016,4 (27):982-988.
- [17] 梁敏,谷正气,张勇,等. 基于硬点-骨架约束的汽车 低阻曲面优化研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学 与工程版, 2015, 39(4): 852-856.
- [18] 邹玲. 沥青混合料热物性参数研究[D]. 西安: 长安大 学, 2011.

宋亚豪(1989-),男,硕士,主要从事汽车空气动 力学及电动汽车热管理研究工作。