

某新能源汽车电池组液冷板热管理仿真与优化

Simulation and Optimization of the thermal management of liquid cooling panel for battery pack of a new energy vehicle

张克鹏

(浙江盾安人工环境股份有限公司 浙江 杭州 310053)

摘要: 电池的性能是新能源汽车各项性能的基本保证, 而电池对温度的要求又非常严格, 因此高效稳定的电池组热管理系统成为新能源汽车中不可或缺的部分。针对某新能源汽车电池组液冷板系统, 采用商用CFD软件ANSYS Fluent进行系统流场分析, 并对其进行散热降温计算和试验验证, 证明仿真的准确性, 最后对液冷板进行设计方案优化。结果表明: 液冷板优化方案能够满足电池组的热管理要求, 有效控制温差, 保证电池组工作处在合理温度范围内。

关键词: 新能源汽车, 电池组, 液冷板, 热管理, 仿真, ANSYS Fluent

Abstract: The performance of the battery is the basic guarantee of the performance of new energy vehicles, and the battery is very strict on the temperature requirements, so the efficient and stable battery pack thermal management system has become an indispensable part of new energy vehicles. To a liquid cooling plate system for a battery pack of a new energy vehicle, commercial CFD software ANSYS Fluent was used to analyze the flow field, and the calculation and experimental verification of heat dissipation and heating conditions were carried out to verify the accuracy of simulation. Finally, the design scheme of the liquid cooling plate was optimized. The results show that the liquid cooling plate optimization scheme can meet the thermal management requirements of the battery pack, effectively control the temperature difference, and ensure that the battery pack works within a reasonable temperature range.

Key words: New energy vehicle, battery pack, liquid cooling panel, thermal management, simulation, ANSYS Fluent

1. 引言

电池是新能源汽车的动力输出核心, 新能源汽车的驱动, 电子和控制系统的供电以及空调系统的使用均需要电池来提供能量。新能源汽车目前普遍采用锂电池作为动力电池, 锂电池的工作最佳温度在 10°C ~ 30°C 之间, 过高或过低的温度都将引起电池寿命的较快衰减。液冷板是一种高效的电池热管理系统, 通过液体对流换热, 将电池产生的热量带走, 降低电池温度。液体介质的换热系数高、热容量大、冷却速度快, 对降低最高温度、提升电池组温度场一致性的效果显著。

电池组液冷却系统相比空冷系统效率更高, 电池组内部温度分布更加均匀, 但是系统也相对复杂^[1-2]。本文利用流体力学仿真的方法对某新能源汽车电池组液冷板进行 CFD 分析, 根据分析结果判定设计方案的合理性, 并以此为基础在进行方案改进, 提高换热效率。

2. 流体力学方程

液冷板内流体流动及换热仿真计算采用三维、定常、不可压缩流动的控制方程建立数学模型, 流体流动时所有介质满足物理守恒定律: 质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。在流体流动处于湍流状态时, 整个体系还要遵循湍流运输方程。以上这些守恒定律的数学描述, 统称为控制方程。文中选用 CFD 软件中提供的

Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型进行数值计算^[3-5]。

湍流控制方程为三维不可压缩雷诺时均 Navier-Stokes 方程:

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

(2) 动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = \\ - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \end{aligned} \quad (2b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = \\ - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{aligned} \quad (2c)$$

(3) 能量方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T \quad (3)$$

其中 div 为矢量符号, $\text{div}(\mathbf{a}) = \partial a_x / \partial x + \partial a_y / \partial y + \partial a_z / \partial z$, grad 为梯度符号。

式中:

ρ ——流体密度, kg/m^3 ;

t ——时间, s ;

\mathbf{u} ——速度矢量, m/s; u 、 v 、 w 是速度矢量 \mathbf{u} 在 x 、 y 、 z 方向的分量;

x 、 y 、 z ——流体流动方向;

p ——流体微元体上的压力, N;

τ ——粘性应力, Pa;

F_x 、 F_y 、 F_z —— x 、 y 、 z 三个方向上微元体体力, N;

T ——温度, K;

k ——流体换热系数, $W/m^2 \cdot K$;

c_p ——流体比热容, $J/(kg \cdot K)$;

S_T ——流体内热源及由于粘性作用引起的流体机械能转换为热能的部分, $J^{[6-7]}$ 。

3. 模型建立及分析工况

3.1 三维模型建立

计算模型为某新能源汽车电池组液冷板模块, 散热方式为液体介质板式换热, 冷却介质为体积浓度为 50% 的乙二醇水溶液, 采用 SolidWorks 进行三维模型, 图 1 为液冷板三维几何模型, 其中电池液冷板主要由 2 根进水主管、2 根出水主管, 2 块小冷板和 8 块大冷板组成, 液冷板以并联方式排布, 几何结构整体上呈对称布置。进、出水主管的管径均为 14mm, 大、小冷板流道的厚度均为 3mm。

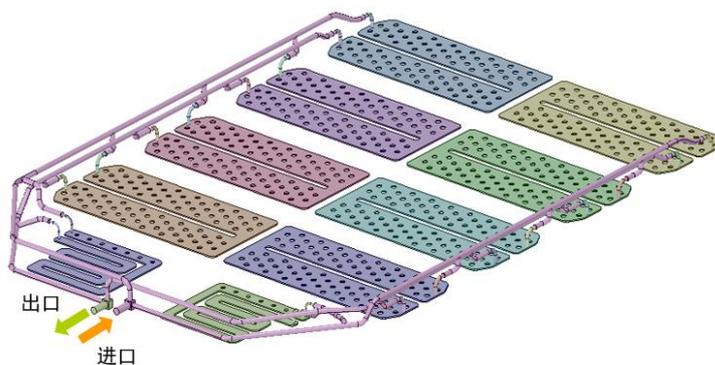


图 1 电池组液冷板三维模型

图 2 为液冷板与电芯组合图, 方形的电芯垂直布置在电池冷板上方, 其中小冷板上布置两排电芯, 大冷板上布置四排电芯, 每排均已 12 个电芯, 共有 432 个电芯; 电芯与电芯之间以串联方式连接, 电芯几何尺寸 $148mm \times 91mm \times 26.5mm$; 电芯和电池水冷板之间有 2mm 厚度的导热垫, 几何模型生成后, 为了建立 CFD 计算模型, 需要将模型从 SolidWorks 中导出为 .STP 格式。

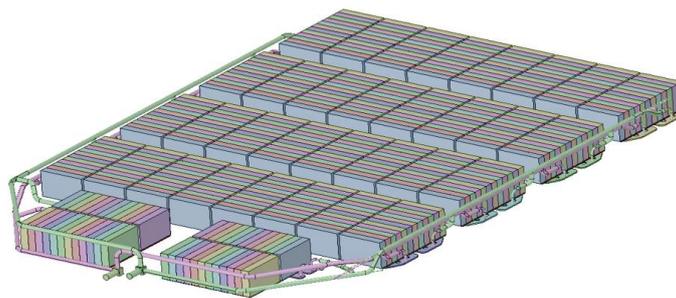


图 2 液冷板与电芯组合三维模型

3.2 网格模型建立

针对该电池组液冷板热管理系统，文章采用流体计算前处理软件进行几何清理和网格划分，由于电池液冷板和电芯几何模型在整体上呈对称布置，为了提高计算效率，减小计算周期，取一半模型进行 CFD 仿真计算，为了便于后面区分，依次对各液冷板进行从 1-5 编号，计算域如图 3 所示。

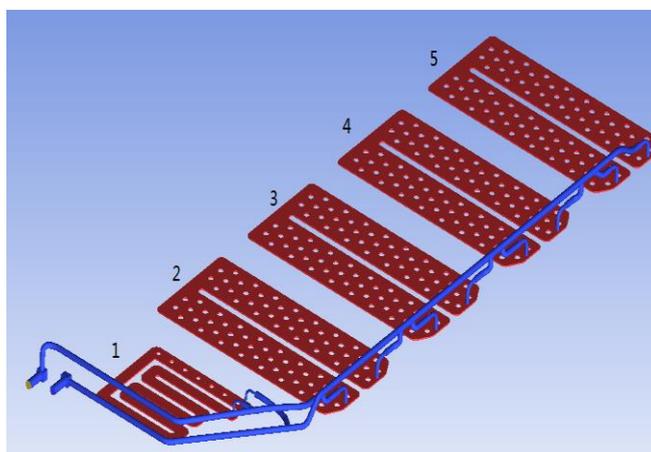


图 3 计算域

计算过程中电芯和导热垫、导热垫和水冷板之间均用 interface 面进行连接。网格处理过程中，设定电芯与导热垫为固体，冷却介质流动区域为液体，确保模型完全封闭，提取流体计算域，最终在 CFD 计算软件中进行体网格生成，整个电池组液冷板热管理系统的体网格模型如图 4 所示。

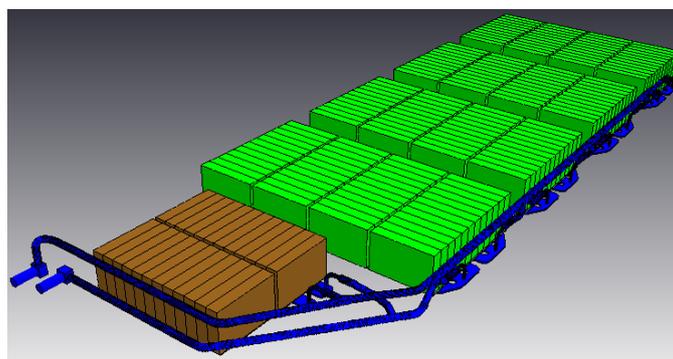


图 4 电池组液冷板的体网格模型

在体网格类型设置过程中，根据模型各自特点，分别选用不同大小的网格，电芯总单元数为 441,600 个，导热垫单元数为 50545 个，液冷板单元数为 2536496 个，图 5-7 分别为电芯、导热垫和液冷板的局部体网格模型。

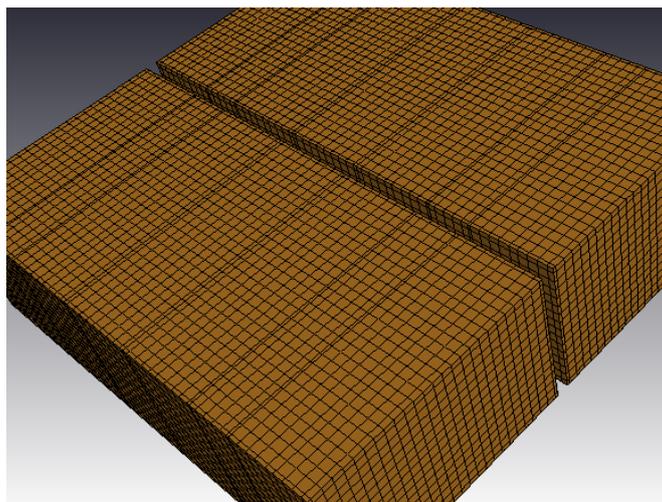


图 5 电芯局部体网格模型

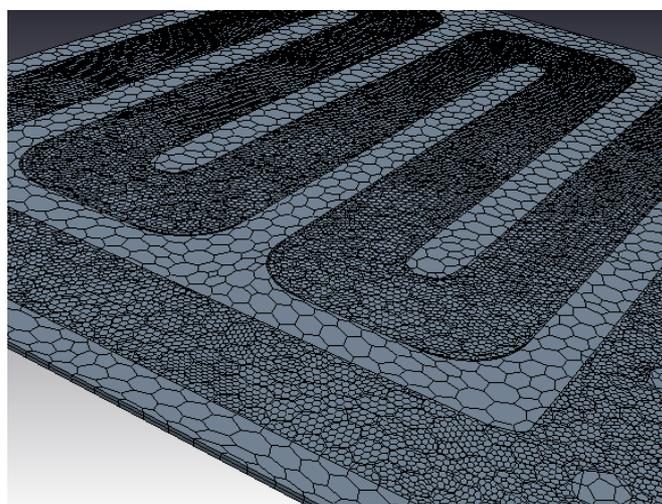


图 6 导热垫局部体网格模型

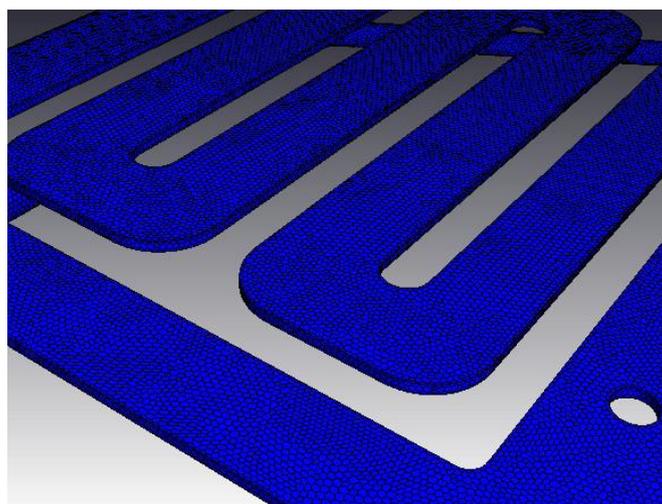


图 7 液冷板局部体网格模型

3.3 分析工况

新能源汽车电池组液冷板的性能，主要从冷却介质循环流阻、散热工况下电池的温控能力这两个方面进行考察，其中要进行相关流场及换热计算，必须了解相关换热性能参数，表 1 为电池组液冷板系统换热性能参数。

表 1 电池组液冷板系统换热性能参数

部件	密度 kg/m ³	导热系数 W/(m·K)	比热 J/(kg·K)
液冷板	2690	218	900
冷却介质	1071	0.384	3300
管路	1080	0.5	1800
导热垫	2300	2	1700
电芯	2437	X=6.78, Y=22.63, Z=16.1	900

本文根据某新能源车型匹配的液冷板进行流场和换热仿真计算, 计算软件为大型 CFD 通用商用软件 ANSYS Fluent, 采用稳态计算, 湍流模型选择标准 $k-\varepsilon$ 模型, 进出口边界条件选择流量进口、压力出口边界条件。压力速度耦合采用 SIMPLE 算法, 对流项离散格式采用二阶迎风格式, 各方程收敛标准均设置为 10^{-5} , 具体工况和性能目标设置如下:

① 流阻仿真工况: 冷板进口冷却液流量范围要求 15L/min~20L/min, 流阻不超过 20KPa, 在计算和试验过程中, 流量选取 20L/min。

② 散热工况: 环境温度 40°C, 电池包 73KW 恒功率放电; 要求电芯温度低于 50°C, 电池芯之间的温差小于 4°C; 冷却液进口温度范围 22°C~25°C, 在计算和试验过程中, 温度设定为 25°C; 冷却液流量范围要求 15L/min~20L/min, 设定为 18L/min。

由于 CFD 模型只有几何模型的一半, 故计算仿真过程中, 进口流量选取工况流量的 1/2。

4. 原方案仿真与试验分析

液冷板在工作过程中, 冷却介质从图 1 进口处主管进入, 经过各个液冷板时, 由各液冷板分管流入各个液冷板对电池进行冷却或者加热。初始方案中, 主管管径为 14mm, 冷板 1 管径为 6mm, 冷板 2-5 管径为 10mm。

4.1 液冷板流量分配与流阻计算

表 2 是各个冷板流量分配及压降仿真与试验的对比结果, 其中试验数据是同种工况重复 3 次结果的平均值。

表 2 原方案流量分配及流阻计算与试验对比

参数	仿真结果	试验结果	误差 (%)
冷板 1 流量 (L/min)	1.37	1.42	3.52
冷板 2 流量 (L/min)	3.04	3.17	4.10
冷板 3 流量 (L/min)	2.21	2.15	2.79
冷板 4 流量 (L/min)	1.72	1.66	3.61
冷板 5 流量 (L/min)	1.66	1.60	3.75
进出口压降 (Pa)	11923	12305	3.10

从表 2 可以看出, 流量分配与压降的仿真结果与试验结果, 绝对误差都在 5% 以内, 这是由于仿真计算过程中忽略了管壁摩擦等的影响。仿真与试验在各自绝对值有一定差别, 但是趋势和幅度基本一致。因此可以确定仿真结果的准确和有效性, 可以利用 CFD 仿真结果对后续设计优化提供相应支持。

4.2 散热工况

图 8 为原液冷板设计方案散热工况下, 电池组液冷板系统的温度等值线云图。其中电芯最高温度为 49.9°C,

电芯最低温度为 45.3°C，出口冷却介质平均温度为 26.3°C。

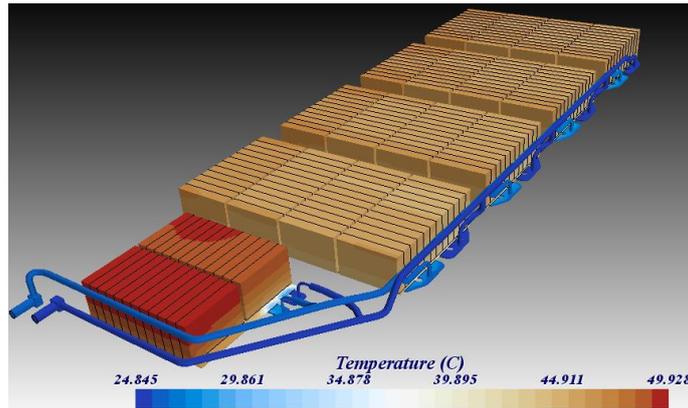


图 8 原方案散热工况电池组液冷板温度等值云图 (温度/°C)

从图 8 中可以看出：散热工况下，小液冷板 1 上方电池组大部分区域处于高温范围，且电芯最高温度已经接近温度限值 50°C，电芯之间的温差也超过小于 4°C 的要求。

经过仿真计算后，在计算结果温度较高点布置温度传感器，同样冷却介质流量和温度情况下进行试验，表 3 是散热工况下仿真与试验结果对比。

表 3 原方案散热工况计算与试验对比

参数	仿真结果	试验结果	误差 (%)
电芯最高温度 (°C)	49.9	52.3	4.59
电芯最低温度 (°C)	45.3	46.2	1.99
出口温度 (°C)	26.3	27.5	4.36

从表 3 可以看出，散热工况下，电芯最高与最低温度仿真结果与试验结果的误差绝对值都在 5% 以内，满足工程方面的要求。

鉴于系统不能满足设计要求，因此该新能源汽车电池组液冷板热管理系统方案需要优化。

5. 新方案仿真分析

由于原始方案中，电芯的高温区域主要集中在小板 1 上面，因此在优化过程中，需要对各液冷板的管径进行调整和优化，小板 1 的管径需要适当增加以增加冷却介质的流量，但是考虑到整个系统的流阻及流量分配，也不能无限制加大小板 1 的管径。经过多轮试验设计计算，确定主管管径为 14mm，冷板 1 管径为 7.9mm，冷板 2-5 管径为 6.4mm。

5.1 液冷板流量分配与流阻计算

表 4 是原方案与新方案各个冷板流量分配及压降计算的对比结果

表 4 原方案与新方案流量分配及流阻计算对比

参数	原方案	新方案	提升 (%)
冷板 1 流量 (L/min)	1.37	2.36	72.26
冷板 2 流量 (L/min)	3.04	2.20	-27.63
冷板 3 流量 (L/min)	2.21	1.94	-12.22
冷板 4 流量 (L/min)	1.72	1.77	2.91

冷板 5 流量 (L/min)	1.66	1.73	4.22
进出口压降 (Pa)	11923	9970	-16.38

从表 4 可以看出,新方案中,各个液冷板之间的流量分配更加均匀,其中小板 1 的流量较之前有了大幅提升;在保证流量分配均匀的前提下,进出口的压降比原始方案降低了 16.38%,因此新方案在流量分配和压降的性能要求方面有了较大的提升。

5.2 散热工况

图 9 分别为新液冷板设计方案散热工况下,电池组液冷板系统的温度等值线云图。其中电芯最高温度为 46.6°C,电芯最低温度为 43.1°C,出口冷却介质平均温度为 26.1°C。

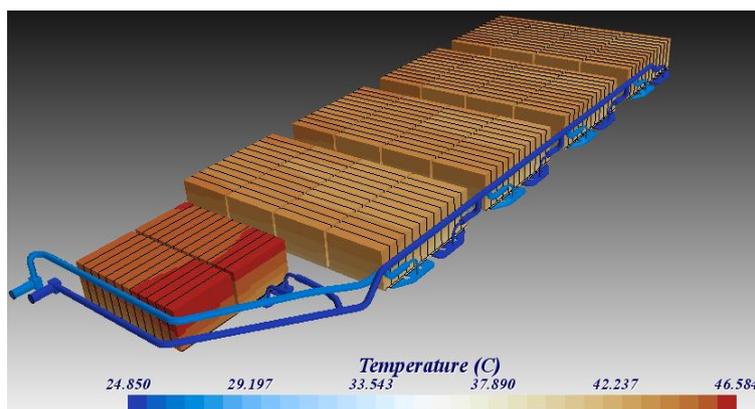


图 9 新方案散热工况电池组液冷板温度等值云图 (温度/°C)

从图 9 中可以看出:散热工况下,新方案中小液冷板 1 上方电池组的高温区域较原方案大面积减少,且最高温度没有超过温度限值 50°C,电芯之间的温差小于 4°C。因此,新方案电池组液冷板设计满足设计要求。

6. 结论

(1) 利用 CFD 仿真技术对某新能源汽车电池组液冷板流场及电池组温度场进行仿真计算,发现原设计方案不能满足电池组的设计要求,存在电芯最高温度过高,电芯间温差过大等问题。

(2) 原设计方案仿真与试验结果进行对比,误差绝对值在工程允许范围之内,确定仿真计算的准确可靠性,可以为后续方案优化提供理论支持。

(3) 根据分析和试验结果,适当加大液冷板 1 的管径,并调整其他液冷板管径,使得各板之间的流量分配更加均匀,流阻有所降低;电池组的电芯最高温度和温差最终满足设计要求。

7. 参考文献

- [1] 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
- [2] 尹振华,苏小平,王强. 新能源汽车电池组液冷板换热分析与结构优化[J]. 轻工学报, 2017, 4 (32): 93-99
- [3] 纪宏超,李耀刚. 基于 Realizable 湍流模型的弯管流动模拟分析[J]. 机械工程与自动化, 2013, (4): 46-47
- [4] 李阳,胡斐. 扩散式方形分离器数值模拟湍流模型比较研究[J]. 建筑热能通风空调, 2013, (2): 97-100
- [5] 樊盼盼. 喷射器内部流动特性建模分析研究[D]. 南京: 东南大学: 2015
- [6] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 7-10.
- [7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 1-5.