

某锂离子电池包的热管理系统模拟分析

Simulation of the thermal management system for a lithium-ion battery packs

余小东 李宗华 周安健 苏琳珂 钟海兵

重庆长安新能源汽车有限公司

摘要: 本文应用流体力学计算软件 STAR-CCM+对重庆长安新能源汽车某纯电动车锂离子电池包热管理系统建立物理数学模型, 通过对其电池包的热管理系统进行 CFD 分析, 得出热管理系统的流场和温度场分布, 提出相应的优化方案。

关键词: STAR-CCM+ 模拟 锂离子电池包

Abstract: In the paper, the three dimensional physical and mathematical models of the thermal management system for a lithium-ion battery packs of a Changan Electric Vehicle were proposed by STAR-CCM+, the velocity and temperature field of the thermal management system was firstly calculated, then optimizations been proposed.

Key words: STAR-CCM+ Simulation lithium-ion battery packs

1 前言

锂离子电池由于工作电压高、功率密度和能量密度高、充放电寿命长、无记忆效应、无污染等优点, 在电动汽车上的应用有很好的前景^[1]。锂离子动力电池的性能对温度变化较敏感, 特别是车辆上运用的大容量、高功率锂离子电池。当车辆在高速、低速、加减速等交替变换的不同行驶状况下运行时, 电池会以不同倍率放电, 以不同生热速率产生大量热量, 加上时间累积以及空间影响会产生不均匀热量聚集, 从而导致电池包运行环境温度复杂多变。由于发热电池体的密集摆放, 中间区域必然热量聚集较多, 边缘区域较少, 增加了电池包中各单体之间的温度不均衡, 加剧各电池模块、单体内阻和容量不一致性。如果长时间积累, 会造成部分电池过充电和过放电, 进而影响电池的寿命与性能, 并造成安全隐患。如果电动汽车电池包在高温下得不到及时通风散热, 将会导致电池包系统温度过高或温度分布不均匀, 最终将降低电池充放电循环效率, 影响电池的功率和能量发挥, 严重时还将导致热失控, 影响电池的安全性与可靠性。因此为了使电池包发挥出最佳性能和寿命, 需要优化电池包的结构, 对它进行热管理, 增加散热加热设施, 控制电池运行的温度环境^[2]。

电池包内每个电池模块位置, 外部条件以及加热和冷却方式都会造成电池包温度分布的不均匀。一个电池包的温度不均匀分布将会造成所有模块的电能不平衡从而降低电池包和整车的性能。铅酸电池, 镍氢电池和锂离子电池为了达到更好性能和使用寿命, 最佳工作温度范围在 25℃~40℃, 并且

理想的电池模块之间温度差低于 5°C 范围内。因此，车辆上的热管理系统应该具有以下功能：（1）保持电池工作在最佳工作温度范围内；（2）减小温度分布不均匀性。研究表明并联结构的散热效果明显优于串联结构形式^[3]。

2 数值计算模型

2.1 几何模型及网格划分

如下图 1 为某款纯电动动力电池的结构示意图，冷却方式为风冷，冷却空气从电池包中间的正上方进入电池包，主要分为两股气流，绝大部分对前排电池模组进行散热，同时，另一股冷却气体从上部管道直接对后排模组进行散热，最后分别汇合到左右两侧的出风管道内。前后排模组均对称分布于电池包左右两侧，每个模组从上到下叠放在一起，中间形成冷却流道。针对模组而言，该系统的结构设计为并联结构散热，但对单体电池而言，局部却存在不利于电池温度均匀分布的串行结构存在。

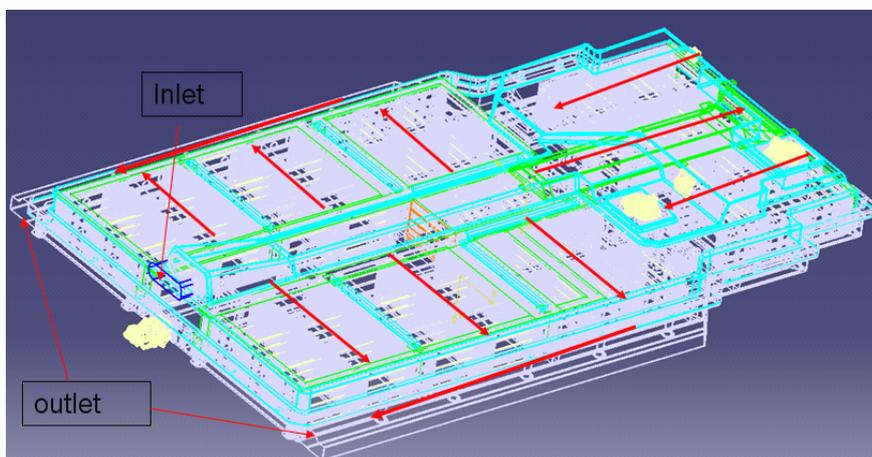


图 1 电池包结构框线图

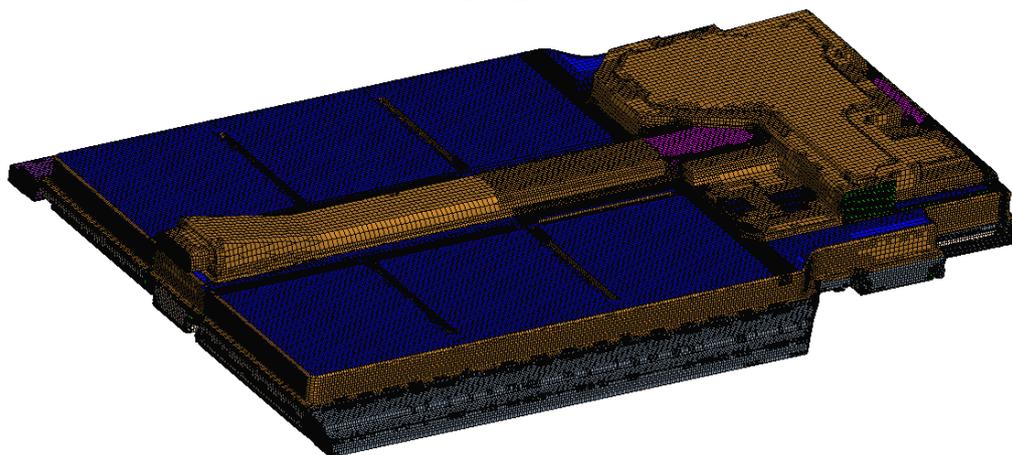


图 2 电池包网格划分

为提高分析精度，消除建模误差，考虑动力电池的实际散热情况，将计算域分成三部分：分别为流体域、电池域和塑料域，计算三者间的换热关系。生成 trimmer 网格，共计 1634 万，如图 2。

2.2 数值计算模型及算法

由于电池包内空气流速不高，视为不可压流体进行模拟计算，除了描述流动特性的连续性方程、动量方程和 $k-\varepsilon$ 方程外，还包括一个能量平衡方程。在三维笛卡尔坐标系中，以张量形式表示的湍流对流换热控制微分方程如下：

连续方程：

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

能量方程：

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_j c_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_T (\mu_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j}) \right] + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (3)$$

湍动能方程：

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i}) \right] + \mu_i S^2 - \rho \varepsilon \quad (4)$$

湍动能耗散率方程：

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}) \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \mu_i S^2 - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (5)$$

2.3 边界条件及计算策略

由于冷却空气流速较低，将空气视为不可压流体进行计算，并将电池单体当作均匀热源来处理。入口条件设置为速度进口，出口设置为压力出口，其他地方设置为壁面边界条件。计算工况为常温下 30 分钟最高车速工况，先用稳态模型对流场进行求解，待稳定后重新选取非稳态模型对温度场进行求解。

3 计算结果及优化分析

3.1 流场分析结果对比

通过对原始模型的分析计算，发现该动力电池系统在该工况下电池的最高温度在锂离子动力电池的最佳使用范围以内，但温差偏大，不满足该动力电池系统的温差要求，会影响整个电池包的使用效率、寿命、甚至安全。通过与产品工程师充分沟通，结合工程实际共同提出了相应的优化方案，并进行了相同工况下的模拟计算，结果对比如下：

该动力电池热管理系统采用冷却方式是风冷，并采用的是并联冷却结构。流场结构直接影响动力电池的温度场分布，图 3 为优化前后动力电池包模型流线图。优化前，相当大部分的冷却空气从第二、三排电池间的空隙通过，导致前排和后排的冷却风量均明显不足，流场的均匀性比较差，无法及时将前排和后排电池的热量带着，导致前后排电池的温度偏高；优化后，前排电池间的流体速度明显得到提高，有效改善了流场均匀性，不过由结构等客观原因，后排电池的流动有所加强，但没有从根本上得到提高。

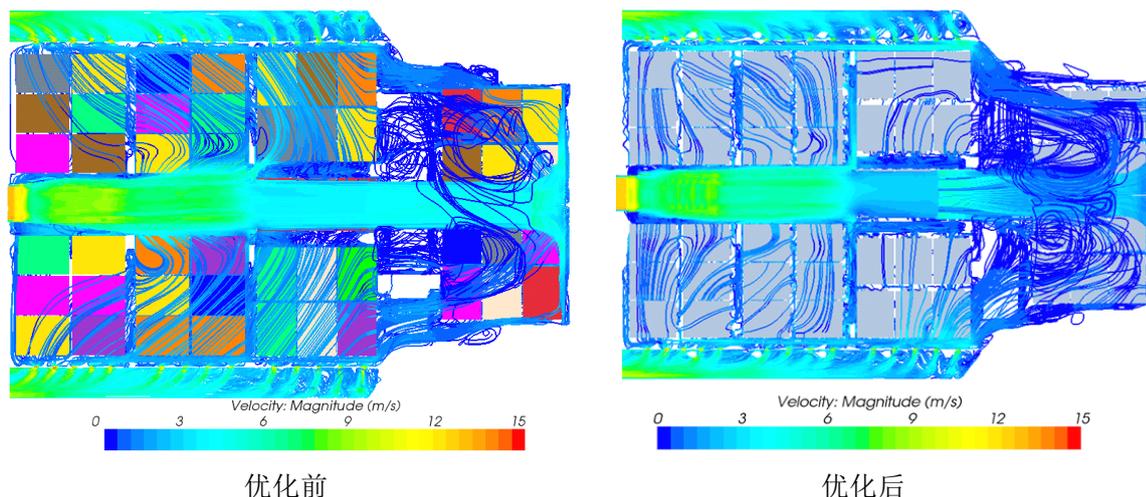


图 3 优化前后流线图对比

图 4 为某截面优化前后的速度分布云图。其中，上图为优化前云图，下图为优化后云图，对比两图可以看到，优化后，通过前排和后排电池空隙间的冷却空气速度在对应位置均有不同程度的提高，提高了流动的均匀性。

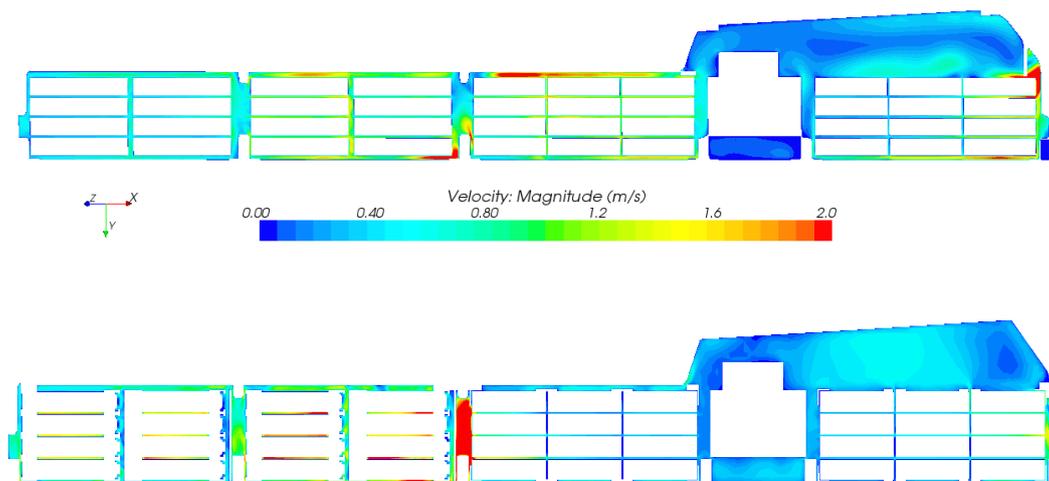


图 4 优化前后某截面速度云图对比

3.2 温度场计算结果对比

图 5 为优化前动力电池温度分布云图，图 6 为优化后动力电池温度分布云图。比较两图，优化前，前排电池由于冷却风量不足，形成“死角”，在两个角落处的温度为整个电池包的最高温度，温差约为 7°C ，不满足锂离子动力电池的最佳使用范围；优化后的最高温度有所下降，而最低温度有所提高，均匀性显著提高，温差约减小为 4.8°C ，达到了该动力电池热管理系统设计的最高温度和最大温度的要求^[3]。

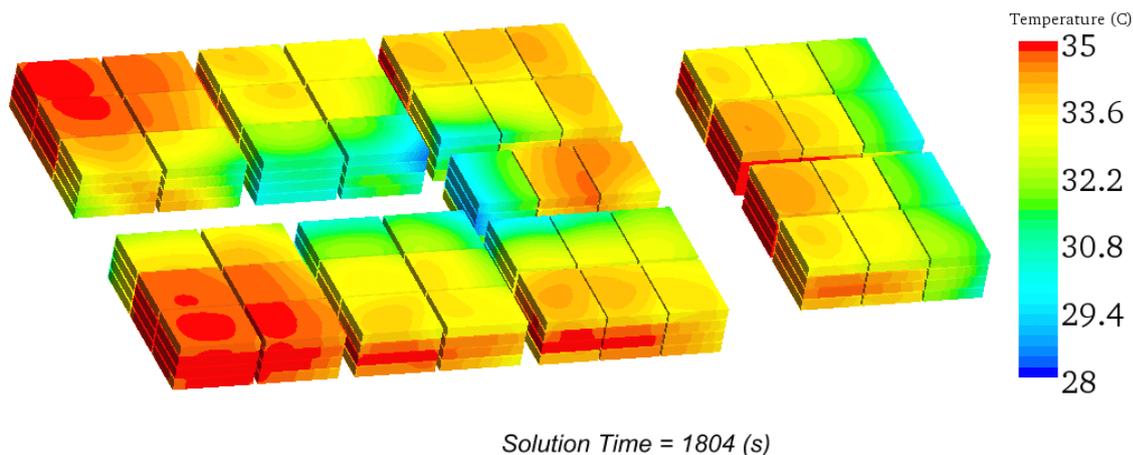


图 5 优化前动力电池温度分布云图

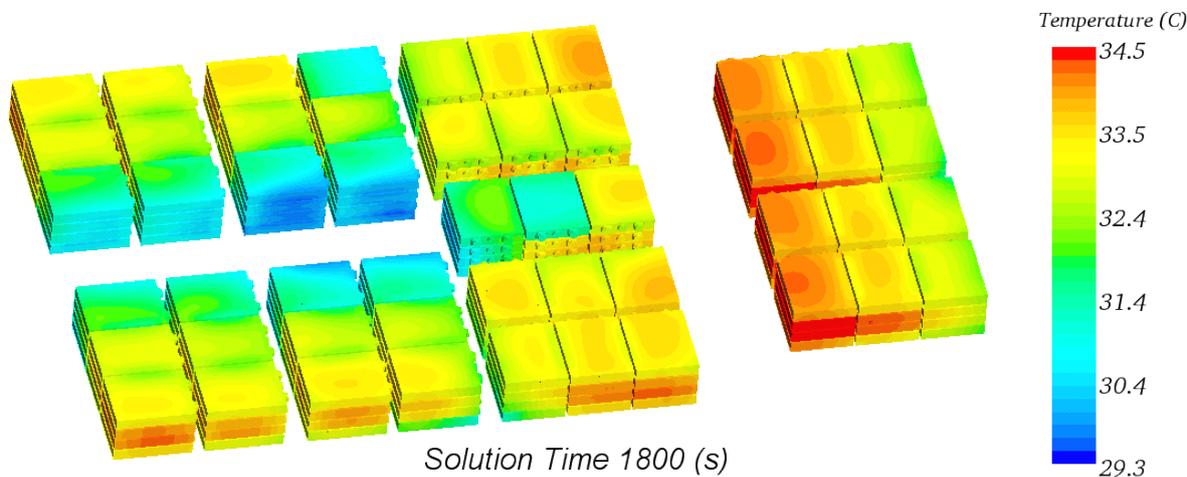


图 6 优化后动力电池温度分布云图

结论

应用 STAR-CCM+计算流体软件模拟某纯电动锂离子电池在强制风冷下的换热情况，发现原始热管理系统的设计方案采用并联散热思路，为动力电池均匀性满足要求提供了可能性，但存在流场分布不均匀的问题，通过优化设计，经过再次模拟计算，发现优化方案的可以有效提高流场的均匀性，从而保证整个电池包的温差达到设计要求。

本例主要应用 STAR-CCM+计算流体软件的自动 interface 功能^[4]，结合包面功能的使用极大的缩短了计算周期，为优化动力电池热管理机构设计提供了很大的方便，进一步体现出 CFD 分析方法的优势。

参考文献

- [1] 李腾等. 锂离子电池热模型研究进展.2009.
- [2] 车杜兰等. 电动汽车电池包散热加热设计.2010.
- [3] Ahmad A. Pesaran Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. Journal of Power Sources
- [4] Starccm+帮助文档.