

基于 STAR-CCM+ 的 DC-DC 散热数值模拟

Numerical Simulation of Heat Transfer in DC-DC by STAR-CCM+

余小东 李义林 贾宏涛

长安汽车股份有限公司汽车工程研究院 CAE 所

摘要：本文应用流体力学计算软件 STAR-CCM+对长安某车型 DC/DC 散热组件建立物理数学模型，耦合求解其流场和温度场，得到不同空气流量下 DC/DC 散热装置的最高温度并对其散热模型进行优化设计。

关键词： STAR-CCM+ DC-DC 散热 计算流体力学

Abstract： In the paper, the three dimensional physical and mathematical models of DC-DC of a Changan vehicle were proposed by STAR-CCM+, the coupled calculation of temperature and velocity variables was completed. The maximum temperature of DC-DC was obtained at different gas flow rate and the model of DC-DC had been optimized.

Key words： STAR-CCM+ DC-DC Heat transfer CFD

1 前言

DC-DC 变换器在家用电器、工业控制、通信、国防、交通等领域都有着广泛的应用。它作为独立电源，或者是其他开关电源的一部分，正朝着高频化，高功率密度，大容量化的方向发展，其效率与可靠性也越来越高^[1]。

DC-DC 变换器也应用在长安某款混合动力汽车中，由于它的高功率密度，其散热问题一直是设计人员关注的焦点。本文应用流体力学计算软件 STAR-CCM+建立长安某款轿车 DC/DC 散热模型，生成四面体网格，应用稳态计算对比了两种不同进口流量下散热模型的流场和温度场，并通过改变散热模型结构来优化散热效果，最终确定进气流量，为设计人员提供理论支持。

2 数值计算模型

2.1 几何模型及网格划分

如图 1 示为该 DC-DC 散热模型的原始模型，空气从右侧进入经翅片从左侧流入，带走 DC-DC 高温基板的热量。严格按照原始模型建立物理模型，对进口进行了适当加长，以便于采用出口

处单向出流边界条件，保留基板原始尺寸，在底部根据相关要求划分热源矩形区域，由于散热腔体很薄，忽略其厚度，采用非结构化的四面体进行网格划分，建立网格模型如图 2 所示，网格总数为 147 万；将腔内翅片进行分段，利用入口段效应强化换热，建立网格模型如图 3 所示，网格总数 132 万。

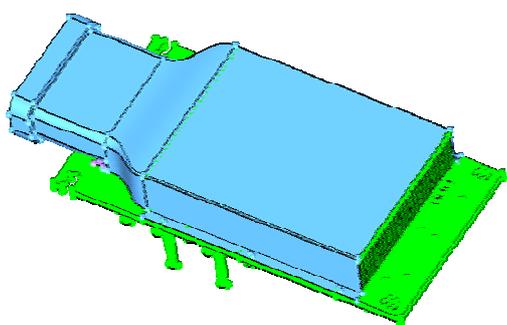


图 1 DC-DC 散热装置模型

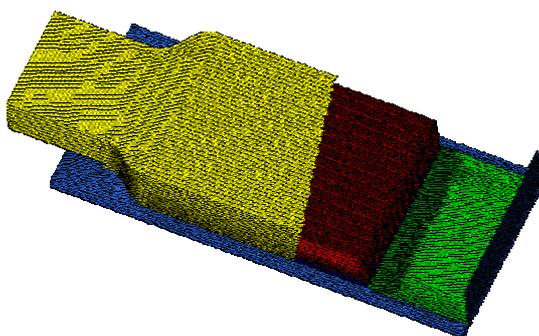


图 2 原始状态网格模型

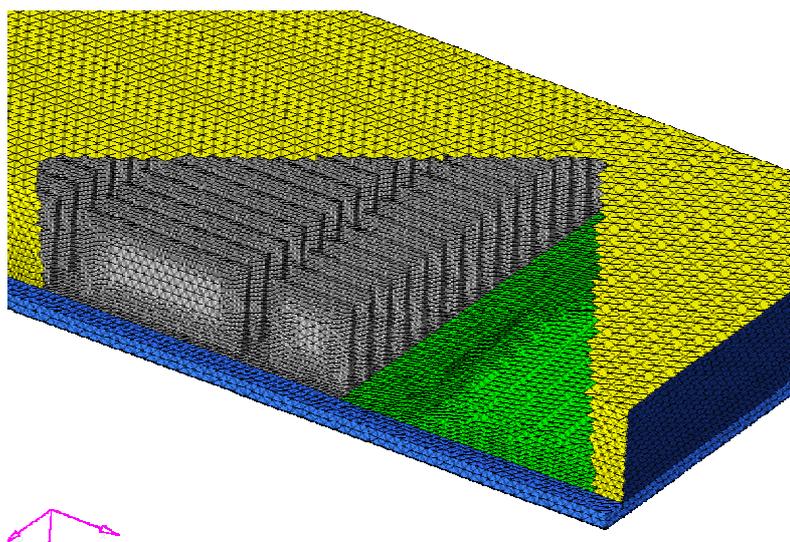


图 3 分段翅片网格模型

2.2 数值计算模型及算法

由于散热模型腔内空气流速不高，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 $k-\epsilon$ 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：

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

湍动能耗散率方程：

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

2.3 物性及边界条件

流体为空气，基本材料为铝。入口条件设置为质量进口：流量为 0.0123kg/s，出口设置为压力出口，基板上的七个矩形热源区域采用定壁温边界条件给出极限温度值分别为 94、91、96、117、117、97 和 98，其他与环境接触的固体壁面设为第二类边界条件，给定换热系数 $h = 10 \text{ w}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$ ，环境温度为 75，如图 4 所示。

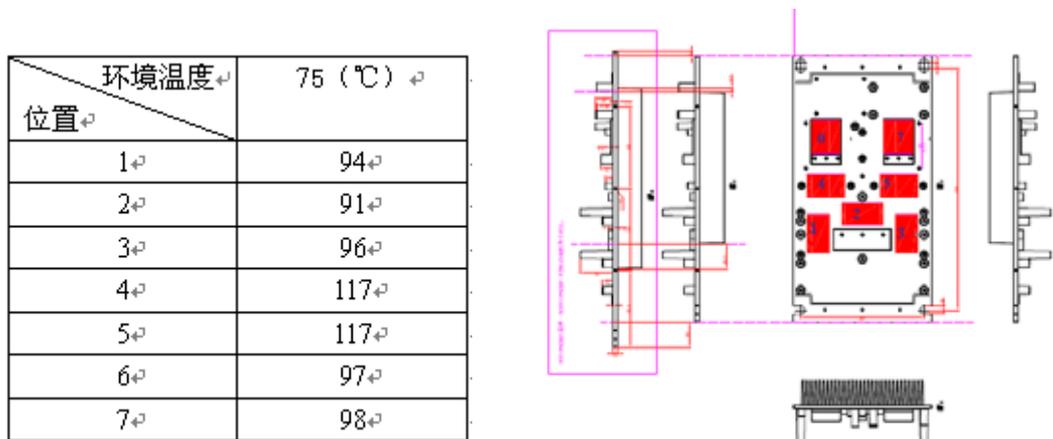
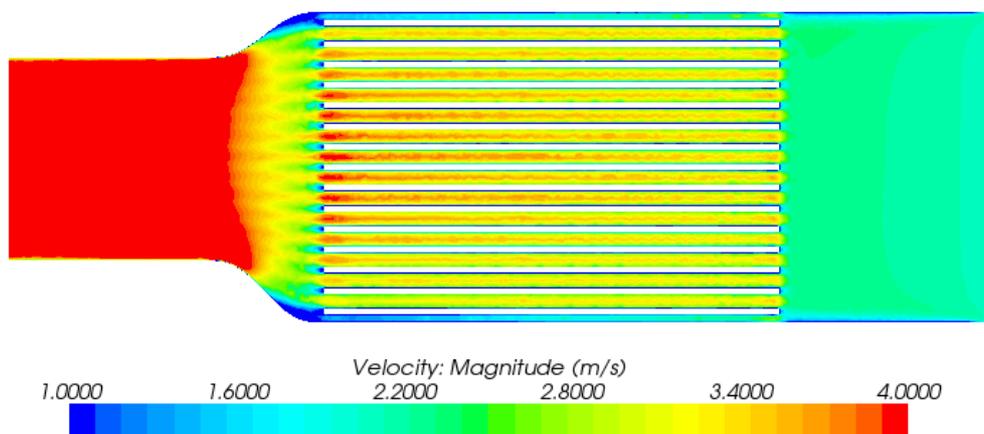
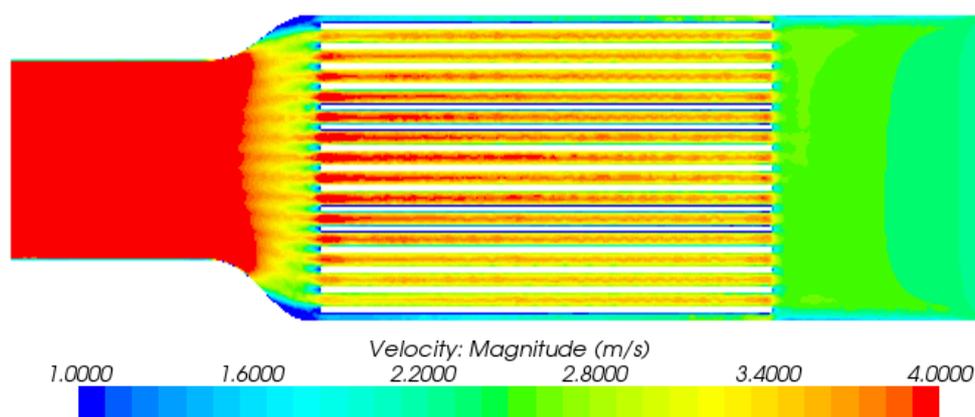


图 4 基板热源分布

3 计算结果及分析

3.1 不同流量下的计算结果比较

相同边界条件下，比较流量为 0.0123kg/s 和 0.0135kg/s (流量增大 10%) 的模拟计算结果。图 5 和图 6 分别为两种流量下 $z = -0.0165 \text{ m}$ 截面 (出口沿 z 轴方向的中心面) 的速度分布。

图 5 流量为 0.0123kg/s 时 $z = -0.0165\text{m}$ 截面速度分布图 6 流量为 0.0135kg/s 时 $z = -0.0165\text{m}$ 截面速度分布

从图中可以看出，除出口附近流速比较大以外，翅片间隙的流速在中间区域显著大于两边间隙的流速，表明流体的大部分流量从中部通过，而由于热源主要分布在基板的两侧，说明这种均匀翅片散热模型还有待改进。同时，随着流量的增大，相同截面位置的最大速度由 5.5171m/s 增大到 5.9360m/s，显然更有利与基板的散热。

图 7 和图 8 分别为两种不同流量下基板的温度分布，从图中可以看出，流量为 0.0123kg/s 时温度高于 91 的区域面积明显大于流量为 0.0135kg/s 时的情况，表面增大流量有助于强化基板散热，但散热效果的强化效果有限，温度总体下降只有 1 左右，所以仅靠增加外界驱动力来强化换热效果的做法并不理想。

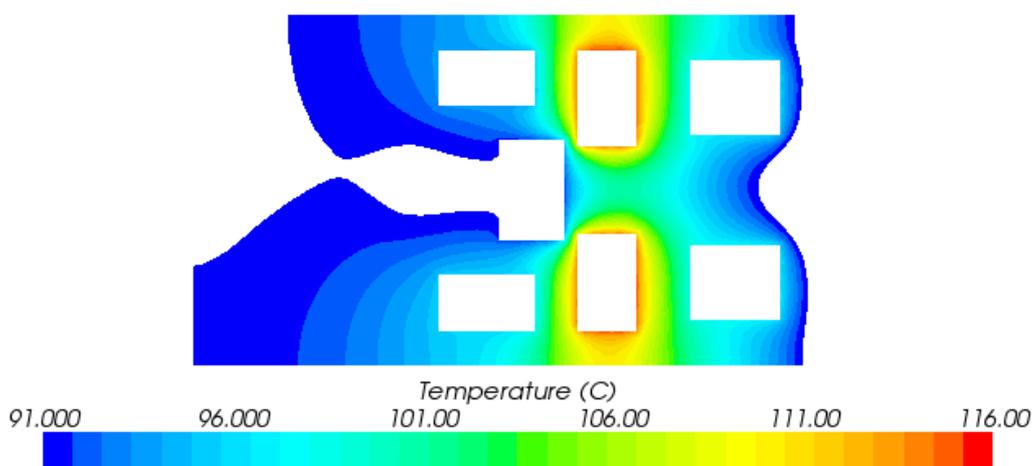


图 7 流量为 0.0123kg/s 时基板表面的温度分布

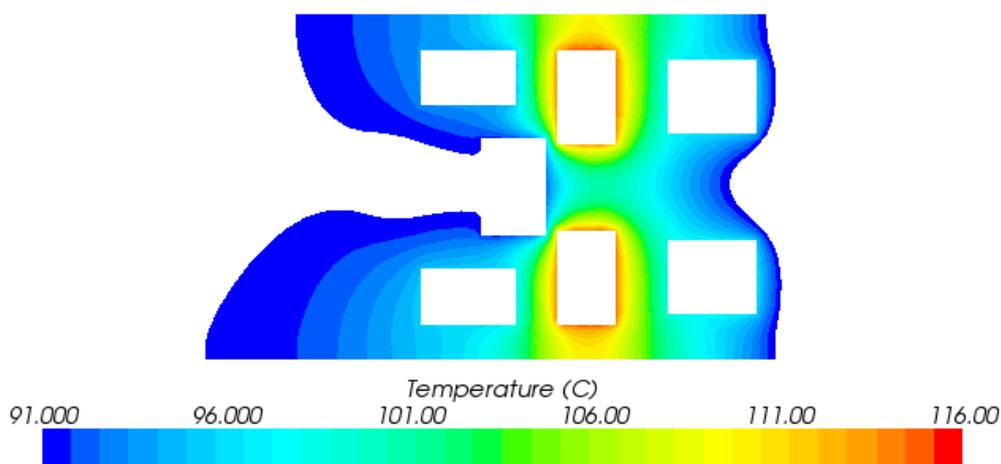


图 8 流量为 0.0135kg/s 时基板表面的温度分布

3.2 相同流量下原始模型与分段模型计算结果比较

由于通过增大流量强化换热效果有限，根据实际情况提出通过改变散热模型结构来强化换热。原始模型的翅片为横截面为梯形的水坝状结构（如图 9），由于长度很长（相对于截面尺寸）空气流动容易形成边界层，不利于基板的散热，故建立分段翅片模型（如图 10），开口位置根据热源位置而定（网格面为热源位置），从而破坏流动边界层，利用入口段效应强化换热。

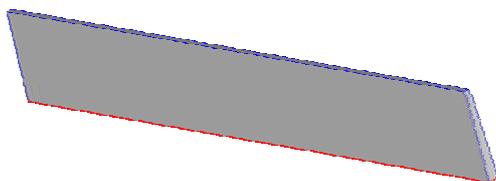


图 9 原始翅片模型

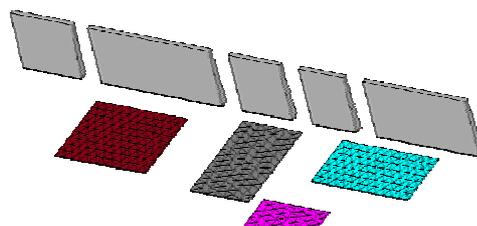


图 10 分段翅片模型

图 11 和图 12 分别为两种模型的 $z = -0.0165\text{m}$ 截面（出口沿 z 轴方向的中心面）的速度分布。从图中可以看出，分段模型的速度较原始模型的速度变化更加剧烈，最高速度由 5.5171m/s 增大到 5.6374m/s ，靠近基板两侧的空气流速得到很大的提高，散热区流量分布更为合理，消除了原始模型在两侧位置的散热死角，提高了翅片的换热效率，有利于基板的散热。

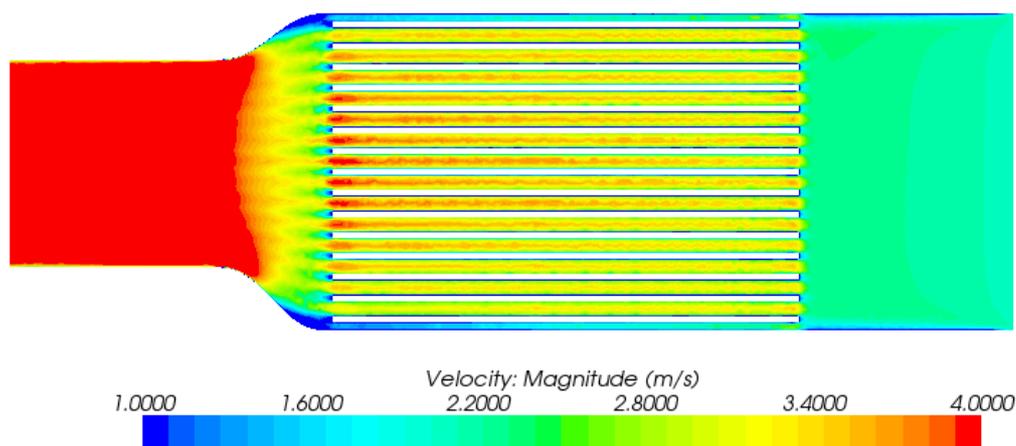


图 11 原始模型 $z = -0.0165\text{m}$ 截面速度分布

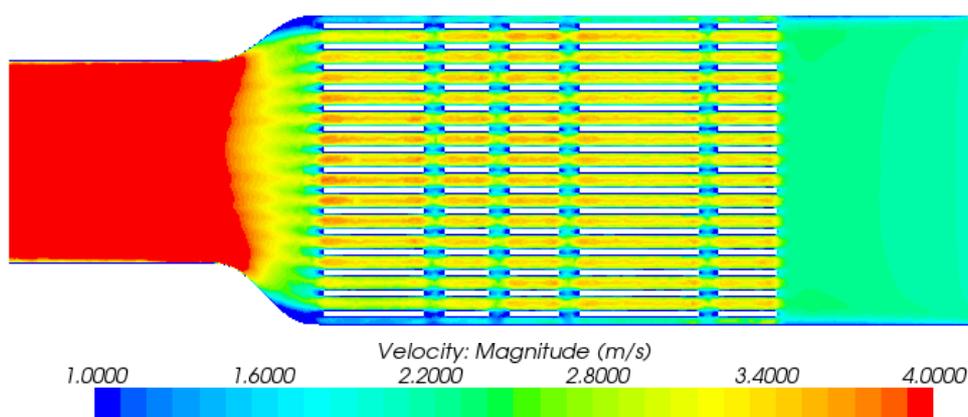


图 12 分段翅片模型 $z = -0.0165\text{m}$ 截面速度分布

图 13 和图 14 分别为两种不同模型基板的温度分布，从图中可以看出，原始模型基板温度高于 91°C 的区域面积明显大于分段翅片模型的情况。特别是基板两侧的温度显著下降，翅片散热效率得到很大的提高，这对热源分布更接近于两侧的基板散热更有意义。

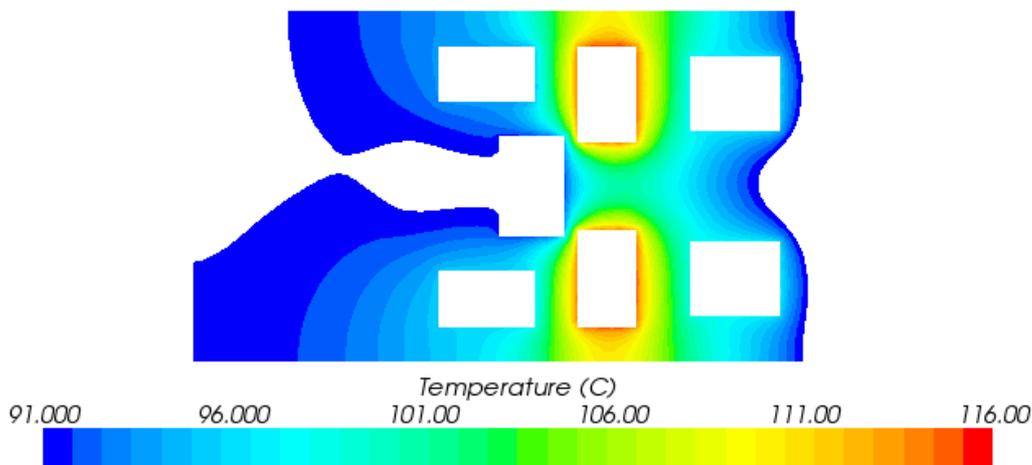


图 13 原始模型的基板表面温度分布

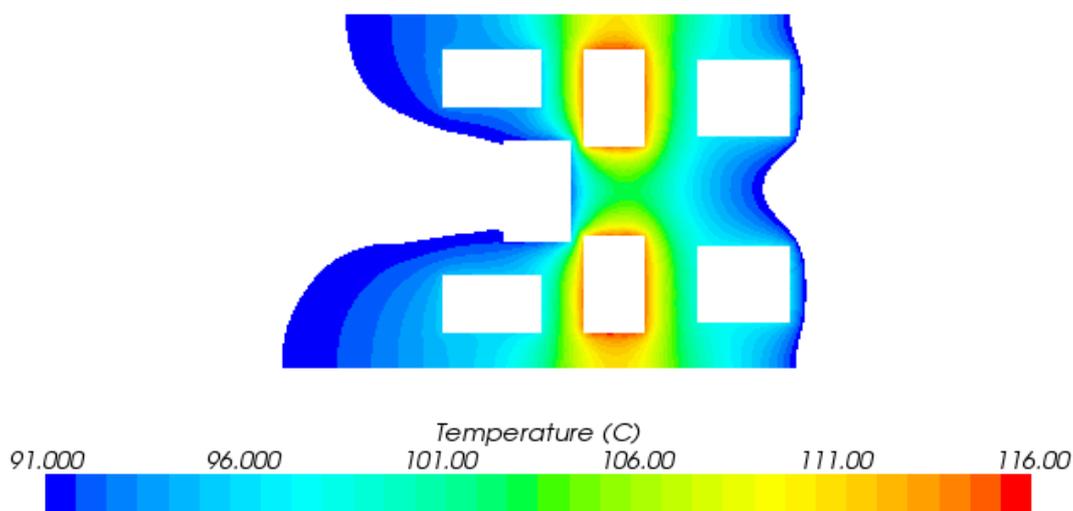


图 14 分段翅片模型的基板表面温度分布

结论

应用 STAR-CCM+ 计算流体软件模拟计算 DC-DC 基板及散热腔内的散热情况,发现只增大冷却空气流量的方法效果很不理想。根据原方案的流动和散热情况,提出了分段翅片的新设计方案,经过再次模拟计算,新方案的散热效果得到了十分明显的改善。

STAR-CCM+ 计算流体软件能准确模拟流固耦合情况,能轻松快捷的对模型进行优化设计,强大的后处理功能和可视化效果为用户提供了方便。

参考文献

- [1] 王林兵. DC-DC 模块化组合变流器的研究[J]. 浙江大学博士论文,2007.
- [2] STAR-CCM+教程.