

某水加热装置性能仿真分析

Performance Simulation of a Water-heating Device

刘永辉

(青岛海尔集团 PD 中心, 青岛, 266101)

摘 要: 将计算流体力学 (CFD) 理论分析手段引入到产品设计中, 建立了某水加热装置内部稳态流场和温度场的数学模型, 并借助于 CFD 软件 STAR-CCM+进行了性能仿真分析, 对设计方案的确定起到重要的指导作用。仿真分析结果与实验结果吻合良好, 验证了基于仿真分析的设计方法的正确性。

关键词: 家电、CFD、STAR-CCM+

Abstract: CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis is introduced into the design of home appliance products. The mathematical model of steady-state flow and heat transfer in a water-heating device is set up. Numerical performance simulation is performed by using CFD commercial software STAR-CCM+. The simulation results provide an important reference for the design choice of the water-heating device. The predicted results are in good agreement with the experimental ones, which verifies the feasibility of this 'simulation-based' design approach in the field of home electric appliances.

Keywords: Home appliances、CFD、STAR-CCM+

1 引言

国内许多制造企业仍然采用传统的产品设计方法。其主要特点是在产品设计完之后制作模具和生产样件, 然后进行温度、传热、风量等性能测试, 发现问题后再反复调整产品设计, 直到满足要求为止。这一过程涉及到多次产品改动和模具修改工作。这些修改不仅增加了开发成本, 造成工期的延长, 也影响了模具的加工质量。

计算流体力学^[1] (Computational Fluid Dynamics, CFD), 是一种重要的计算机仿真技术, 它是流体力学、数值计算方法以及计算机图形学三者相互结合的产物。借助于 CFD 仿真软件, 在完成产品的 CAD 初始模型之后, 可以立即对其进行流场、温度场等性能模拟, 预测产品是否满足设计要求。

本文将 CFD 仿真技术引入到产品设计中。建立了某水加热装置内部稳态流场和温度场的数学模型, 并借助于 CFD 软件 STAR-CCM+^[2]进行了性能仿真分析, 仿真结果对设计方案的确定起到重要的指导作用。物理试验验证了仿真设计方法的可行性和正确性。

2 数值模型

2.1 建立计算模型和网格划分

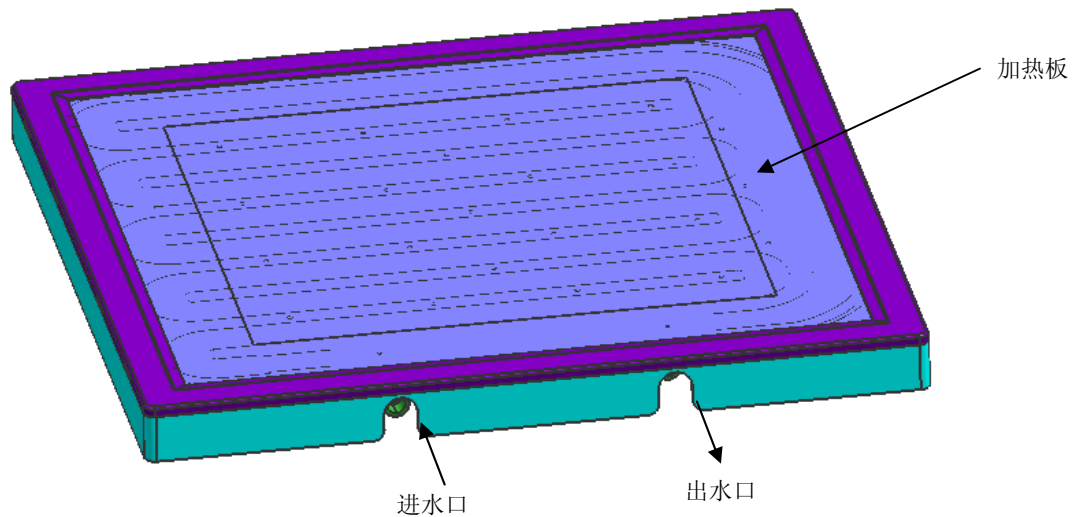
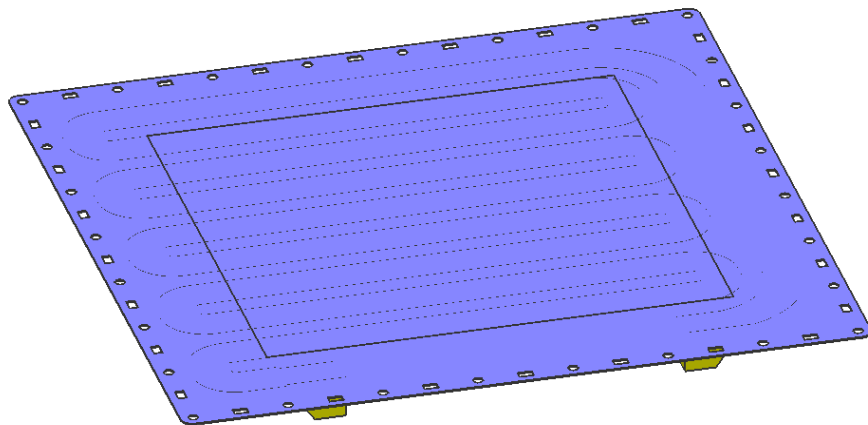


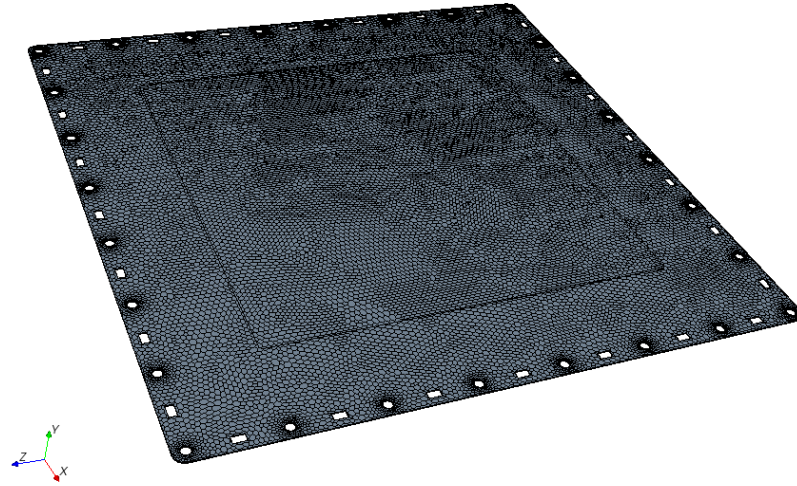
图 1 水加热装置结构图

图 1 为某水加热装置的三维 CAD 模型，包含进水口、出水口、水路和加热金属板等。其设计要求为：进水口流量为 0.05kg/s ，温度为 10 摄氏度，金属板加热表面温度为 35 摄氏度，加热区域如图 1 黑框包围区域所示，在这种情况下，要求出水口温度比入水口升高至少 10 摄氏度。

根据产品的三维 CAD 模型建立仿真分析的流体空间。首先对 CAD 模型进行前处理（几何清理），去除对分析没有影响的表面特征，而对水路、加热板等关键部件，则尽量保持原始形状。如图 2a) 所示。根据建立好的流体空间模型，采用自适应网格划分法对计算区域进行网格划分。网格采用多面体网格。划分好网格模型如图 2b) 所示。



a) 计算流体空间



b) 网格模型

图 2 计算流体空间及网格模型

2.2 控制方程

考虑到装置内部水流的速度较低，流动为不可压缩流动；采用稳态分析模式。为了完成内部流场和温度场的仿真分析，需用到以下理论方程：

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m$$

式中， t 为时间； $x_i (i=1,2,3)$ 为坐标； ρ 为密度； u_i 为气流速度在三个坐标上的分量； S_m 为质量源项。

(2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i$$

式中， p 为气体压力； S_i 为动量源项； τ_{ij} 为作用在与 i 方向相垂直的平面上的 j 方向上的应力，它的表达式为 τ_{ij} 。

(3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h + \overline{\rho u'_j h'}) = \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h$$

式中， h 为气体的比焓； S_h 为能量方程的源项。

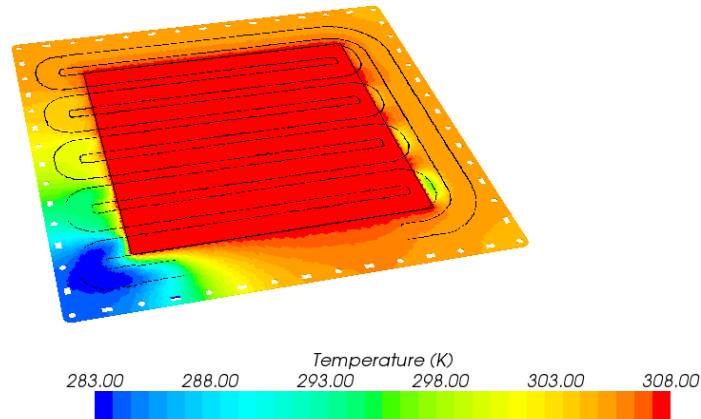
(4) 湍流模型

湍流模型选用高雷诺数 $k-\varepsilon$ 湍流模型。

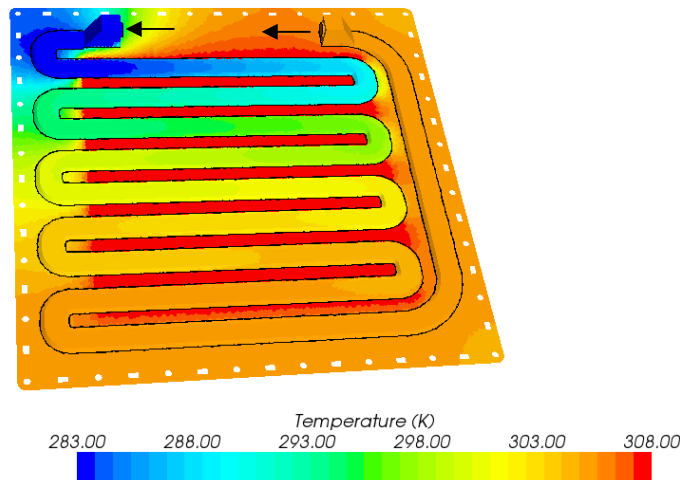
2.3 边界条件和相关设置

计算时进水口流量为 0.05kg/s ，温度为 10 摄氏度，金属板加热表面温度为 35 摄氏度。流体区域和固体区域之间通过建立 interface 面进行能量的传递。采用湍流壁面函数对边界层进行处理。对内部流场和温度场进行仿真分析，当各计算残差值小于 10^{-3} 且出水口（或进水口）流量不再变化时，本文认为计算收敛。

3 仿真结果与分析



a) 视图 1



b) 视图 2

图 3 达到稳态后的温度场分布

图 3 为达到稳态后的温度场分布。可以看出，进水口附件温度最低，在 10 摄氏度左右；随着水流的向前运动，其温度不断升高。到出水口附近水温最高，大约为 303K (30 摄氏度)，比进水口温度提高了将近 20 度。从仿真结果来看，当前设计满足了水温升高不低于 10 摄氏度的性能要求。

本文还计算得出了出水口的平均流速为 0.19m/s 。可见出水口流速较低，所以水和加热金属板能够充分换热，导致出水口温度较高。但是出水口流速又不能过低，否则可能会影响用户的实际使用。

根据仿真分析结果,该方案设计能够满足性能使用要求,因此被确定采用。后来通过快速样件进行实验验证,实际出水口温度为 27 摄氏度。考虑到实验模型和 CAD 模型存在一定的误差以及实验条件与理想情况有差异等因素,仿真分析结果与实验结果基本吻合良好。

4 结束语

将 CFD 仿真技术应用于产品设计阶段,能够及时预测流场、温度等性能是否满足设计要求,指导设计方案的更改和确定。不仅避免了产品方案的反复修改,加速了产品研发周期,而且大大节约了物理实验和改模成本。CFD 仿真技术结合理论分析和实验结果,最终可以得到安全可靠、性能良好、令用户满意的产品。

5 参考文献

- [1] 王福军. 《计算流体力学分析》. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [2] STAR-CCM+ 帮助文档