中国科学: 技术科学 2026 年 第 56 卷 第 9 期: 2312 ~ 2315
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
精选文章导读

三维高精度与一维实时动态仿真相结合的换热预测模型建模方法

张轩昂[1,2], 袁苹[2], 舒歌群[1*], 王轩[2], 田华[1]

1. 中国科学技术大学热科学和能源工程系, 合肥 300072
2. 天津大学先进内燃动力全国重点实验室, 天津 230027
* E-mail: shugequn@ustc.edu.cn

1 研究意义/研究背景

换热器是冷热能量传递的核心部件, 广泛应用于能源、化工、石油等领域[1]. 在实际运行过程中, 系统负荷变化导致换热器工况多变. 因此, 准确评估换热器性能对系统高效安全运行至关重要. 用于评估换热器性能的方法通常包括三维数值仿真、一维动态仿真、实验测试.

三维数值仿真是评估换热器换热性能最常用的方法[2]. 通过三维数值仿真可实现不同工况下的换热性能高精度仿真, 但三维数值仿真需调用大量计算资源, 计算时间难以满足连续工况的实时动态运行.

而实时动态仿真是模拟换热器动态运行特性的必要手段. 建立一维动态仿真模型是研究换热器动态运行特性的常用方法, 已有大量研究基于动态仿真模型对换热器动态特性进行研究[3]. 传统换热器一维动态仿真模型通常采用已有换热关联式, 对于大多数没有特定换热关联式的流体, 其他流体的换热关联式仅可以反映流体换热特性变化趋势, 却很难准确计算动态变化过程中关键参数的数值变化[4]. 因此, 通过一维动态仿真模型可以模拟换热器动态特性变化趋势, 但难以准确描述目标流道和目标流体的换热效果. 因此, 实现通过一维动态仿真模型完全取代实验测试的结果是具有挑战性的.

综上所述, 三维数值仿真具有高精度的优点, 可在换热器设计过程中准确模拟换热性能. 然而, 在实际运行场景下换热负荷变化频繁, 三维数值仿真受计算速度的限制, 难以实现动态换热过程的实时模拟. 而实时动态仿真是换热器负荷控制、硬件在环测试等的必要条件, 可大大缩短应用于各场景的换热器开发周期. 与三维数值仿真相比, 一维动态仿真实现了模型降解, 大大减少了计算单元数量. 因此, 一维动态模型具有实时动态仿真的能力, 但难以保证各种流体在在各应用场景下的准确性, 实验测试是评估换热器传热性能的最佳方法. 然而, 实验测试的时间、成本和安全性都很难估计.

近年来, 数字孪生已经应用于各个领域, 并产生了显著的效益. 数字孪生技术可以通过充分利用物理模型来映射实际的动态变化过程. 德国信息技术和新媒体协会预测数字孪生在制造业中的产值到2025年将超过780亿欧元[5]. Gartner将数字孪生视为十大战略技术趋势之一.

目前, 换热器的数字孪生研究尚处于起步阶段, 且研究多基于物理一维模型或神经网络, 应用于新工质或混合工质时精度难以保证, 因此本研究提出了三维高精度与一维实时动态仿真相结合的换热预测模型建模方法, 利用该方法可实现换热器换热特性的高精度实时预测, 以减少潜在的换热器开发成本和时间. 为

英文全文见: Zhang X A, Yuan P, Shu G Q, et al. Heat transfer prediction modeling method combining three-dimensional high-precision and one-dimensional real-time dynamic simulations. Sci China Tech Sci, 2025, 68: 1320102, https://doi.org/10.1007/s11431-024-2862-x

© 2026《中国科学》杂志社

验证该方案的可行性，利用该方法基于CO_2混合工质换热特性实验测试系统的换热通道结构构建换热预测模型. 为验证该换热预测模型的准确性, 对CO_2/R32混合工质的稳态和动态换热特性进行了数值模拟和实验测试. 根据调研结果, 目前还没有关于CO_2/R32混合工质传热特性的公开报道. 最后, 通过实时仿真机验证了该换热预测模型的实时运行能力. 本研究为开发换热器数字孪生模型提供了新的解决方案. 本研究的创新之处在于提出了一种结合三维高精度和一维实时动态仿真的换热预测模型建模方法. 该方法结合了三维仿真高精度和一维仿真计算速度快的优势，可实时高精度预测动态换热过程.

2　本文工作

本文提出了一种三维高精度与一维实时动态仿真相结合的换热预测模型建模方法. 该方法将三维仿真的高精度优势与一维仿真的实时性优势相结合，从而实现高精度实时预测换热过程. 如图1所示为该建模方法流程, 共分为三步. 第一步是利用ANSYS Fluent

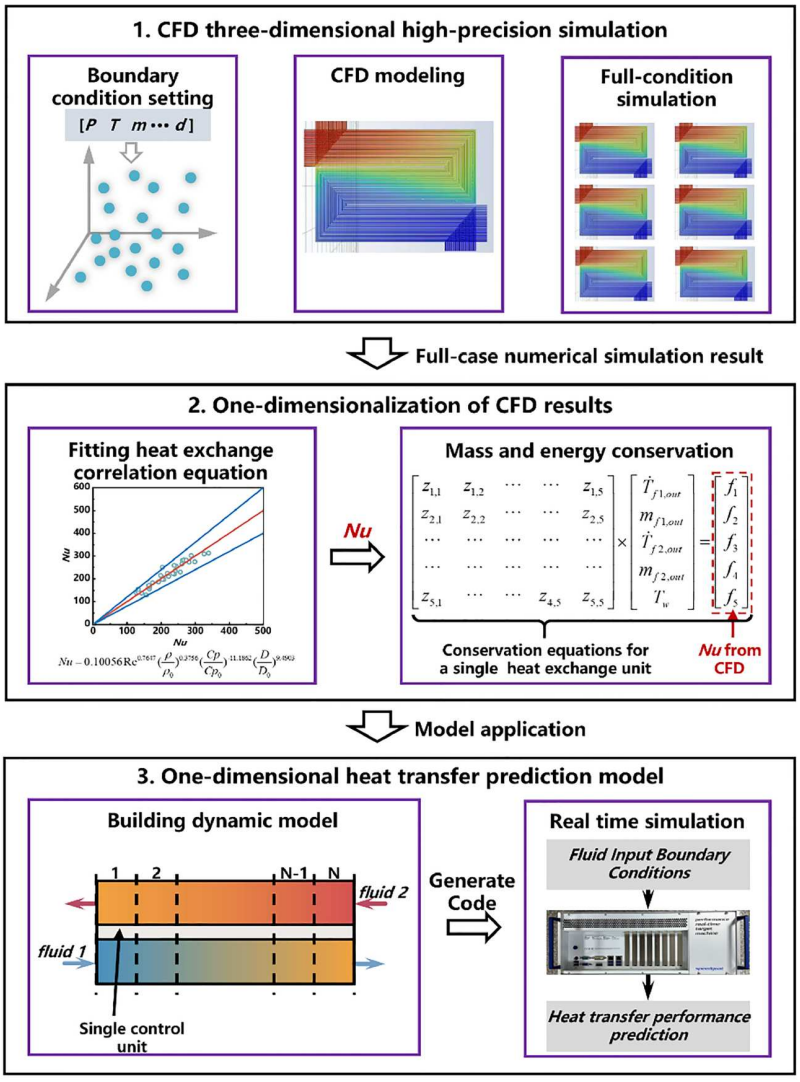


图 1　(网络版彩图)三维高精度与一维实时动态仿真相结合的换热预测模型建模方法流程图

Figure 1　(Color online) Flow chart of heat transfer prediction model combining three-dimensional high-precision and one-dimensional real-time dynamic simulations.

软件进行三维高精度全工况模拟, 在边界范围内, 基于控制变量法、拉丁超立方等方法选取不同运行参数和结构参数组合, 对所有组合进行仿真计算获取高精度数据库. 第二步是三维数值仿真结果的一维化应用, 基于三维仿真数据进行高精度的换热关联式拟合, 并将拟合的换热关联式应用于一维换热单元的质量和能量守恒计算过程. 第三步是建立可实时运行的一维换热预测模型, 整个换热模型由N个换热单元组成, 前一个换热单元的工质出口参数输入至后一个换热单元. 将建立的换热单元按照换热器结构连接, 设置初始边界条件, 完成换热器一维换热预测模型, 将最终的一维换热预测模型编译下载至控制器或实时仿真机中进行实时换热性能预测.

为了验证该方案的可行性, 利用该建模方法, 基于图2所示CO_2混合工质换热特性实验系统的传热通道结构, 建立了换热预测模型. 对CO_2/R32混合物的稳态和动态传热特性进行了模拟和实验测试, 以验证换热预测模型的准确性. 最后, 在实时仿真机中验证了换热预测模型的实时运行能力.

3 本文结论/实验结果

如图3所示, 基于本文提出了三维高精度与一维实时动态仿真相结合的换热预测模型建模方法, 所构建的换热预测模型仿真结果与换热通道实验测试的平均相对误差为0.91%~2.83%, 与传统的一维动态模型建模方法相比, 精度可提高1.75~4.64倍. 该换热预测模型对动态和稳态过程均具有较好的预测精度, 动态过程与实验结果的平均相对偏差为0.70%~3.01%, 稳态过程与实验结果的平均相对偏差为1.10%~2.59%. 此外, 该换热预测模型可实现实时运行且与非实时运行结果一致, 表明该换热预测模型具有实时运行的能力.

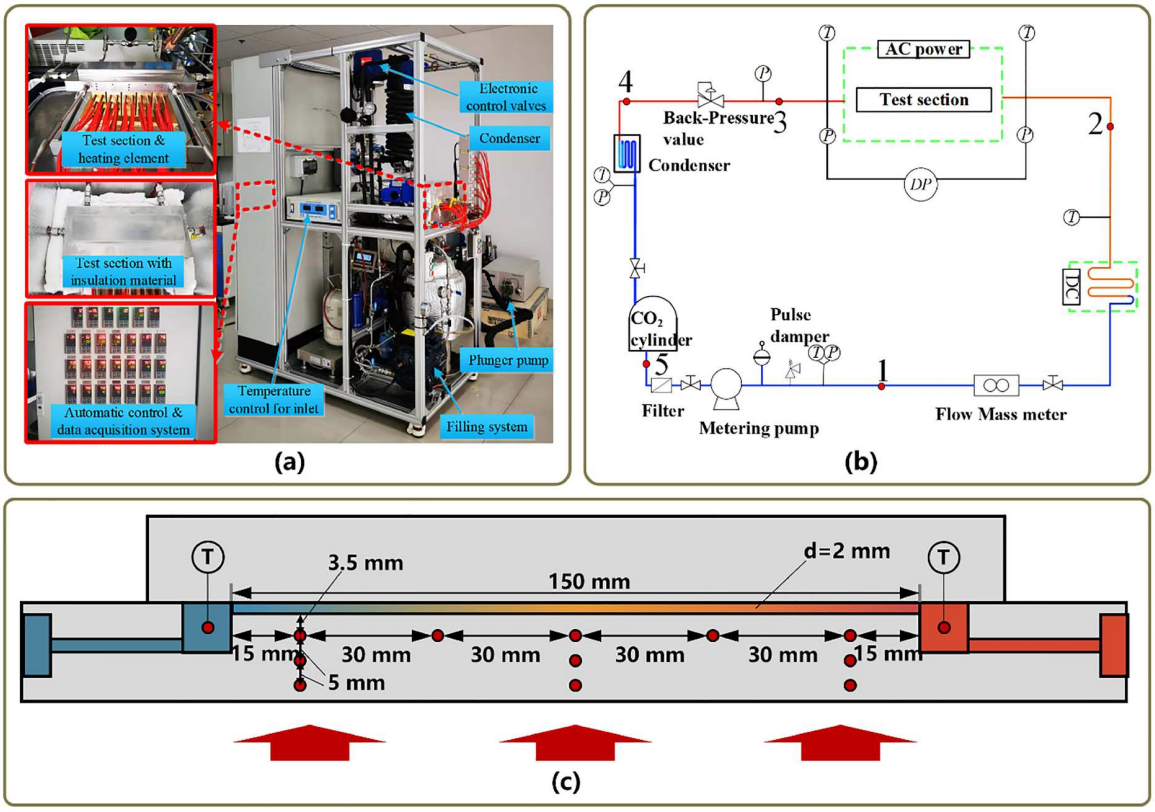


图 2 (网络版彩图) CO_2混合工质换热特性实验测试系统. (a) 实验测试系统; (b) 结构示意图; (c) 换热通道结构

Figure 2 (Color online) CO_2 mixture heat transfer characteristic experimental test system. (a) Experimental test bench; (b) bench structure; (c) heat transfer channel structure.

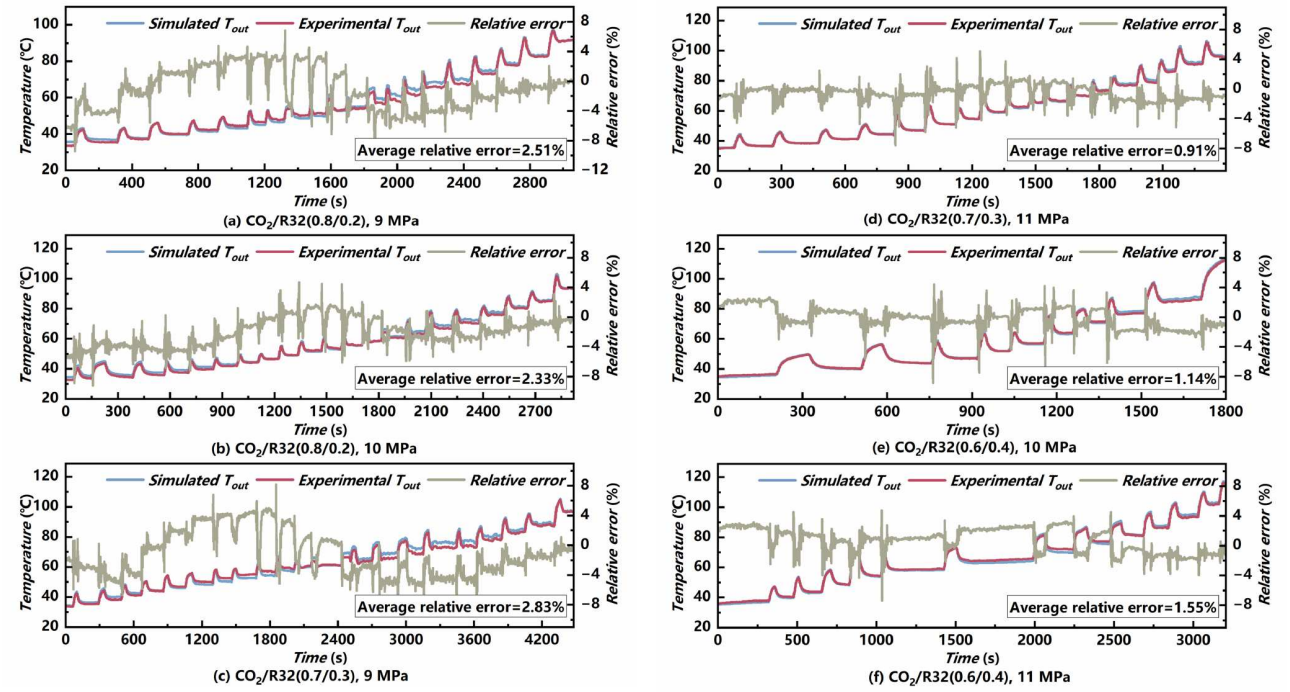


图 3　(网络版彩图)换热预测模型模拟结果与实验测试的CO_2/R32混合工质换热后温度对比. (a) CO_2/R32 (0.8/0.2), 9 MPa; (b) CO_2/R32 (0.8/0.2), 10 MPa; (c) CO_2/R32 (0.7/0.3), 9 MPa; (d) CO_2/R32 (0.7/0.3), 11 MPa; (e) CO_2/R32 (0.6/0.4), 10 MPa; (f) CO_2/R32 (0.6/0.4), 11MPa

Figure 3　(Color online) Comparison of CO_2/R32 mixture outlet temperatures between heat transfer prediction model simulation results and experimental tests. (a) CO_2/R32 (0.8/0.2), 9 MPa; (b) CO_2/R32 (0.8/0.2), 10 MPa; (c) CO_2/R32 (0.7/0.3), 9 MPa; (d) CO_2/R32 (0.7/0.3), 11 MPa; (e) CO_2/R32 (0.6/0.4), 10 MPa; (f) CO_2/R32 (0.6/0.4), 11MPa.

参考文献

1　Kwon S, Lee D, Chung J Y, et al. Performance comparison of a direct heat pump using R1234yf and indirect heat pumps using R1234yf and R290 designed for cabin heating of electric vehicles. Energy, 2024, 297: 131311

2　Cui P, Liu W, Liu Z C. Thermal-hydraulic performance analysis and multi-objective optimization of a microchannel with staggered semi-elliptical ribs. Sci China Tech Sci, 2024, 67: 3152–3167

3　Zhang X, Wang X, Cai J, et al. Achieving reasonable waste heat utilization in all truck operating conditions via a dual-pressure organic rankine cycle and its operating strategy. J Cleaner Production, 2023, 419: 138302

4　Chen X, Liu C, Li Q, et al. Dynamic analysis and control strategies of Organic Rankine Cycle system for waste heat recovery using zeotropic mixture as working fluid. Energy Convers Manage, 2019, 192: 321–334

5　Wu J, Yang Y, Cheng X, et al. The development of digital twin technology review. In: Proceedings of the Chinese Automation Congress (CAC). 2020. 4901–4906