

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.04.028

基于Modelica/Dymola的间壁式换热器仿真研究

程超军¹, 郝兴军¹, 李朝伟¹, 张建华², 张 杰², 李国建³

(1. 温州市燃气有限公司, 浙江 温州 325000; 2. 浙江工业大学 能源与动力工程研究所, 浙江 杭州 310014; 3. 浙江理工大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 间壁式换热器以高效的换热效率、热损失小、结构紧凑轻巧、经济性好、使用寿命长等优点, 广泛应用在分布式供能系统、石油化工等领域。为了研究换热器在不同温度的冷热流体共同作用下的动态特性, 采用了面向对象的方法, 将换热器分解成了几何参数模块、换热单元模块、流动模块、物性参数等模块, 根据质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒方程, 采用支持面向对象、非因果和支持多领域物理系统建模的Modelica语言, 在Dymola平台下建立了换热器各模块的仿真模型库HeatExchanger。以简单的平行流为例, 搭建了系统仿真模型, 验证了模型的准确性, 分析了冷热流体在不同温度下共同扰动的动态特性。结果表明: Modelica语言简单, 易于理解, 建好的模型库易于维护和升级, 仿真误差较小, 具有很好的重用性和扩展性。

关键词: Modelica/Dymola; 换热器; 仿真

中图分类号: TP121 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)04-0537-04

Modeling and performance simulation for recuperator heat exchangers based on Modelica/Dymola

CHENG Chao-jun¹, HAO Xing-jun¹, LI Chao-wei¹, ZHANG Jian-hua², ZHANG Jie², LI Guo-jian³

(1. Wenzhou Gas Group Co., Ltd., Wenzhou 325000, China;

2. Institute of Energy and Power Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Recuperative heat exchanger was widely used in the distributed power system, petrochemical and other fields with the advantages of efficient in heat efficiency, economy, compact and lightweight Structure and long service life. Aiming at researching the dynamic characteristic of the heat exchanger with the hot and cold fluid of different temperatures, an object-oriented method was employed to decompose the heat exchanger into the geometric parameters module, heat transfer module, flow module and physical property parameters module, and on the basis of the law of the conservation of mass, momentum and energy, Modelica and Dymola with multi-domain language, which is an object-oriented and incausal, were used to build the simulation model library of heat exchanger. Taking a simple parallel flow as an example, the system simulation model was set up and the accuracy of the model was verified, then the dynamic characteristic of the heat exchanger with the hot and cold fluid of different temperatures was analyzed. The research results indicate that, the modelica language was simple and more easily understandable, also the built model library easy to maintain and upgrade and the errors was small enough, so it has the very good reusability and extensibility.

Key words: Modelica/Dymola; heat-exchanger; simulation

0 引 言

间壁式换热器是实现多种流体进行换热的一种间接接触式换热设备, 具有经济性好、传热温差小和

较大的温度变化范围等优点, 被广泛应用在分布式供能系统、机动运输、石油化工等领域, 实现对多股不同温度的流体进行加热和冷却^[1-4]。由于间壁式换热器的结构比较复杂, 通流流体的温度变化会受众多因素

收稿日期: 2013-12-03

作者简介: 程超军(1975-), 男, 湖北天门人, 高级工程师, 主要从事燃气工程建设运营与管理方面的研究。E-mail: 347089271@qq.com

的制约,为了实现具有优良性能且控制精确、运行节能的高效间壁式换热器,计算机仿真已成为人们解决工程实际问题的重要辅助手段。常用的商业CFD软件有Fluent, CFX, STAR, CD, FIDAP, ADINA等。Muhammad Mahmood Aslam Bhutta等^[5]对不同类型的换热器所在的平台下做了全面的综述,针对换热过程中采取的不同计算格式做了详细的介绍。Ye Yao等^[6]根据能量守恒方程、质量守恒建立了水-空气平板式换热器的空间模型,将其视为一个多输入-多输出系统,并且分析了2种工况下,制冷机开机、停机换热器的动态特性。Mohd Shariq Khan^[7]采用人工神经网络的办法建立了多蒸汽换热器模型,用于预测在不同的工况下换热器的动态特性。M. R. Ansari^[8]建立了逆流式平板换热器的动态仿真模型,分析了热流体温度、流量变化时换热器的性能。Alireza Asgharpour^[9]采用实验的手段研究了某分布式供能系统中燃气轮机尾气流经某逆流式换热器的动态特性。Flavio C. C. Galeazzo^[10]利用CFD软件建立了平板式换热器的仿真模型,并通过实验验证了模型的准确性。可以看出,大部分软件仅仅局限于本学科领域,并且具有该学科独特的“格式”,但是复杂产品的整体性能往往是多个领域软件共同作用的结果,是系统层面的建模仿真,因此,单一的学科仿真软件很难满足工程实际的要求。

目前已有的多领域物理系统的建模软件有Matlab/Simulink, Dymola等。Matlab/Simulink建模时需要用户有相关的数学功底对公式进行变换,以此来确定因果关系,这不仅耗时,还会失去方程原有的、特定的物理表示。更重要的是模型不具备扩展性,很难应用到类似模型的建模中^[11]。

Modelica基于非因果建模思想,采用数学方程(组)和面向对象结构来促进模型知识的重用,是一种面向对象的结构化数学建模语言,支持类、继承、方程、组件、连接器和连接。它采用基于广义基尔霍夫原理的连接机制进行统一建模,可以满足多领域需求^[12-14]。笔者利用Modelica/Dymola建立换热器模型库HeatExchanger,以验证模型的准确性和可靠性。

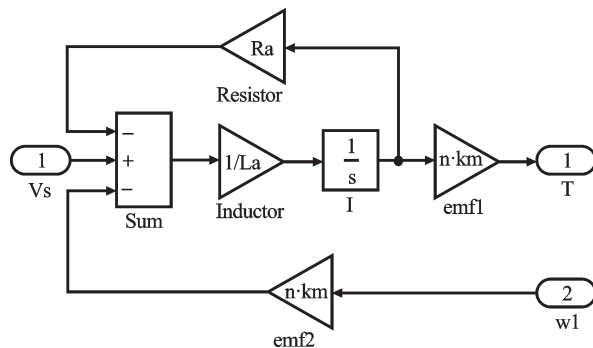
1 Modelica语言简介

1996年9月,欧洲仿真界的一群专家开始致力于物理系统建模语言的标准化工作,在归纳和统一多种语言的基础上,于1997年提出了一种全新的基于方程的多领域统一建模语言Modelica。在2002年,Modelica语言规范发布了第二版,2007年,推出第三版。每

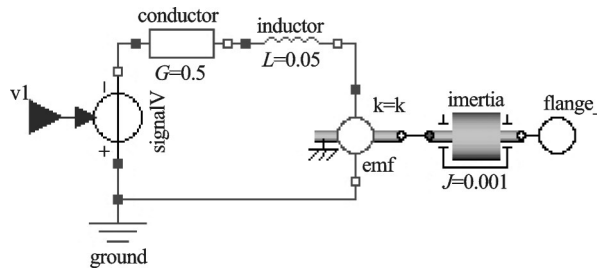
一次更新,对有关语法规则做了更简洁、更准确、更快地改进,大大加快了Modelica语言的发展,此外,Modelica协会还每两年定期召开一次设计会议(Design Meeting),讨论多领域统一建模语言Modelica的改进,交流最新进展。

基于Modelica语言的多领域物理系统建模的特点主要有:建模方便,模型重用性高,无需符号处理,开放的模型库,建模与仿真相对独立等^[15]。

本研究以电机为例,分别在Matlab/Simulink和Dymola软件中建立各自的仿真模型,电机模型如图1所示。从图1中可以看出在Matlab/Simulink建模时需要确定相应的输入、输出,丧失了原来的物理特性,另外当电机内的设备扩展时,Matlab/Simulink需要再次确定因果关系,而Dymola只需在原有的库中拖移即可,大大减少了建模时间,降低了建模门槛和成本。



(a) Matlab/Simulink中电机模型



(b) Dymola中电机模型

图1 Matlab/Simulink和Dymola软件中电机模型

2 换热器建模及仿真

2.1 数学模型

以平行流间壁式换热器为实体,根据传热机理,为简化计算,作以下假设:

- (1) 流动仅仅沿管轴方向存在不稳定性;
- (2) 忽略管轴轴向的导热;
- (3) 忽略外界环境的影响;
- (4) 无内热源。

这样,本研究就可以用一维的“交错网格法”来描述管内受迫流动。换热器数学模型如图2所示,建立

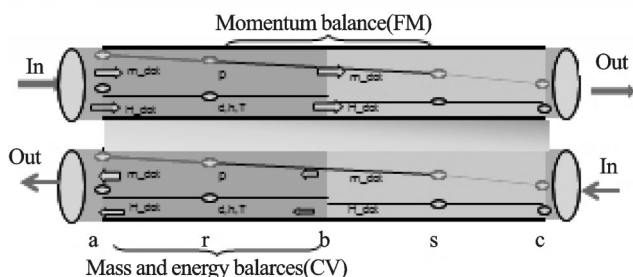


图2 换热器数学模型

的数学模型如下:

质量守恒:

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho A v)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

动量守恒:

$$\frac{\partial(\rho v A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2 A)}{\partial x} + A \frac{\partial p}{\partial x} + F_f + A \rho g \frac{\partial z}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

能量平衡:

$$\begin{aligned} \rho_1 C_{p1} V_1 \frac{dT_{12}}{dt} &= \rho_{11} C_{p1} Q_{11} T_{11} - \rho_{11} C_{p1} Q_{11} T_{11} + Q_{w1} \\ \rho_2 C_{p2} V_2 \frac{dT_{22}}{dt} &= \rho_{21} C_{p2} Q_{21} T_{21} - \rho_{22} C_{p2} Q_{22} T_{22} + Q_{2w} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:

$$\begin{aligned} Q_{w1} &= (T_{w1} - T_1) \alpha_1 A_1 \\ Q_{2w} &= (T_2 - T_{w2}) \alpha_2 A_2 \end{aligned} \quad (4)$$

流动及传热方程:

$$Nu_f = C Re_f^n Pr_f^m \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^Z \quad (5)$$

其中: $C=0.15 \sim 0.4$, $n=0.65 \sim 0.85$, $m=0.3 \sim 0.45$, $Z=0.05 \sim 0.2$ 。与换热器类型有关。

管的当量直径:

$$d_e = \frac{4A}{U} = \frac{4Lb}{2(L+b)} \quad (6)$$

式(1~6)中: ρ —密度, C_p —比热容, A —换热面积, v —流速, F_f —单位管长摩擦力, P —压力, α —换热系数, 下标 w —管壁。

2.2 单管传热模型

本研究对长度为 L 的管道, 沿流动方向, 划分为 n 等份, 对 n 个节点列传热及流动方程并联立进行求解, 分析每一点温度值及热流变化。

2.3 其它部件模型

基于现有的标准库, 本研究建立气源、管道、温度传感器等部件模块, 作为输入参数和测试某点的温度、流量等热力学参数。

2.4 系统仿真模型

基于上述部件模型, 本研究将其组成的换热器仿真模型如图3所示。冷、热流体分别流经 HotPipe 和 ColdPipe, 由于管壁的导热及对流换热作用, 在该过程中进行换热, 完成对冷、热流体的加热及冷却。

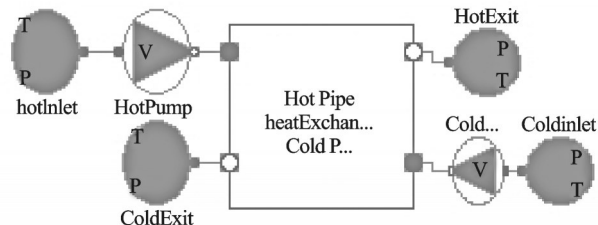


图3 换热器仿真模型

3 换热器的仿真

笔者在图3的基础上仿真水-水换热器的工作性能, 换热器长度 2 m, 节点数 30, 水的物性参数调用 Modelica.Media 标准库的 WaterIF97_ph 模块。换热器初始条件如表1所示。换热器的管壁 $\rho=900 \text{ kg/m}^3$, 比热系数 $C=500 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$, 导热系数 $\lambda=400 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 。

表1 换热器初始参数

	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	进口温度/ $^{\circ}\text{C}$	当量直径/mm
高温水	0.003	96.85	22
低温水	0.005	26.85	24

3.1 换热器稳态仿真结果

根据上述条件及模型, 本研究将换热器差分为 30 个节点, 仿真 100 s 内单管换热器的情况, 换热器冷流体温度随时间变化如图4所示。从图4中可以看出热流体从 96.85 $^{\circ}\text{C}$ 降低到 82.19 $^{\circ}\text{C}$, 冷流体从 26.85 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 27.72 $^{\circ}\text{C}$ 。

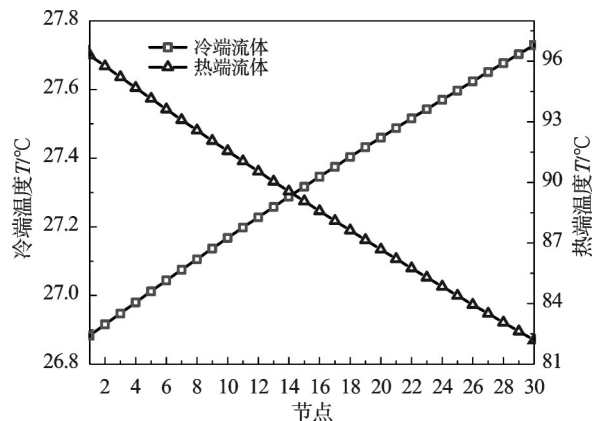


图4 冷热流体沿流动换热方向各节点的温度

沿传热流动方向, 热流体温度逐渐降低, 而冷流体温度逐渐升高。这与理论计算基本吻合, 说明了换热器的模型是正确的。同时也可以看出各节点的温

度并不是线性减少,这是由于换热器污垢热阻的影响和管壁材料的影响所致。

3.2 换热器动态仿真结果

本研究在稳态仿真的基础上,改变冷、热流体的流量,流量的变化如图5中折线所示,都是先增大后减小。从图5中可以看出热流流量增大时,首尾节点温度的节点的温度随之升高;冷流体节点的温度变化图如图6所示,由于冷流体的流量也增加了,冷流体首尾节点流量增加和与热流体换热的共同作用下表现出下降后缓慢上升的趋势。

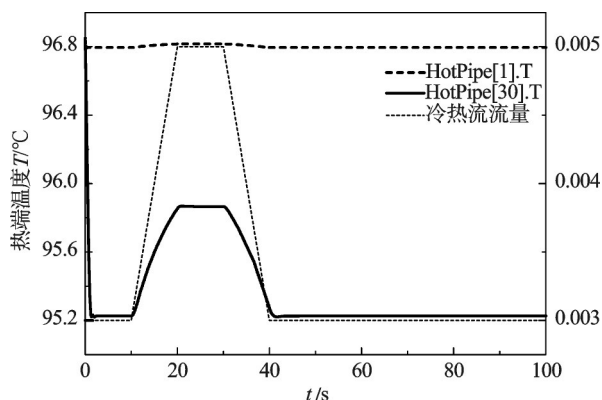


图5 冷热流流量输入和热流体管内温度随时间的变化

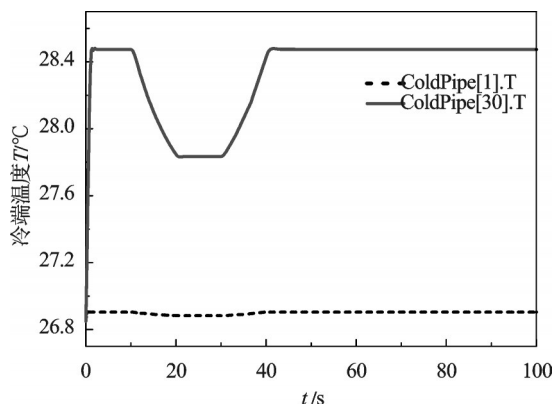


图6 冷流体管内温度随时间的变化

4 结束语

本研究以平行流间壁式换热器为例,根据基本守恒定律,建立了仿真模型库,对换热器进行了稳态验证和动态模拟仿真。研究表明,模拟结果和计算误差较小,证明了该模型库的准确性和扩展性,具有一定的推广价值。

参考文献(References):

- [1] 钱颂文. 换热器设计手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2002.
- [2] 杨崇麟. 板式换热器工程设计手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1994.
- [3] 胡 涛. 板式换热器在流体系统的应用与分析[J]. 液压气动与密封, 2011(1):24-26.
- [4] 刘敏珊, 杜应飞, 白彩鹏, 等. 基于三维实体模型的纵流程换热器数值研究[J]. 流体机械, 2013, 41(1):21-25.
- [5] BHUTTA M M A, HAYAT N, BASHIR M H, et al. CFD applications in various heat exchangers design [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2012, 1(32):1-12.
- [6] YAO Ye, HUANG Meng-wei, MO Jin-qiu, et al. State-space model for transient behavior of water-to-air surface heat exchanger [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2013, 9(64):173-192.
- [7] KHAN M S, HUSNIL Y A, GETU M, et al. Modeling and simulation of multi-stream heat exchanger using artificial neural network [J]. **Computer Aided Chemical Engineering**, 2012(31):1196-1200.
- [8] ANSARI M R, MORTAZAVI V. Simulation of dynamical response of a countercurrent heat exchanger to inlet temperature or mass flow rate change [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2006, 26(17-18):2401-2408.
- [9] ASGHARPOUR A, HAJIDAVALLUO E, TAHERI M. Experimental and analytical investigation of transient behavior of coupled heat exchangers [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2013, 60(1-2):172-181.
- [10] GALEAZZO F C C, MIURA R Y. Experimental and numerical heat transfer in a plate heat exchanger [J]. **Chemical Engineering Science**, 2006, 21(61):7133-7138.
- [11] 于 涛, 曾庆良. 基于仿真建模语言 Modelica 的多领域仿真实现 [J]. 山东科技大学学报:自然科学版, 2004, 24(4):12-16.
- [12] FRITZSON P A. Principles of object-oriented modeling and simulation with Modelica 2.1 [M]. Wiley-IEEE Press, 2004.
- [13] TILLER M. Introduction to physical modeling with Modelica [M]. Springer Netherlands, 2001.
- [14] ELMQVIST H, MATTSON S E. An introduction to the physical modeling language Modelica [M]. Citeseer, 1997.
- [15] 赵建军, 丁建完, 周凡利, 等. Modelica 语言及其多领域统一建模与仿真机理 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(12):570-573.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

程超军, 郝兴军, 李朝伟, 等. 基于 Modelica/Dymola 的间壁式换热器仿真研究 [J]. 机电工程, 2014, 31(4):537-540.

CHENG Chao-jun, HAO Xing-jun, LI Chao-wei, et al. Modeling and performance simulation for recuperator heat exchangers based on Modelica/Dymola [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2014, 31(4):537-540.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>