

# 面向用户端的供能管网建模与仿真研究

洪超<sup>1</sup>, 汪飞<sup>1</sup>, 陈通<sup>1</sup>, 高艳霞<sup>1</sup>, 王建平<sup>2</sup>

(1. 上海大学 机电与自动化工程学院, 上海 200072;

2. 上海虹桥商务区能源服务有限公司, 上海 200335)

**摘要:** 三联供用户端供能管网因其地块结构不同、运行工况多变等原因, 使得调试周期长、调试时间成本高, 并且由于供能系统的调试受季节影响, 导致调试灵活性较差; 对该问题, 文章提出面向用户端的供能管网仿真模型, 用以模拟实际供能系统的运行工况、研究供能管网受控下的工作性能; 模型主要研究对象包括管道、换热器、阀门等器件, 通过对其建立数学模型和分析系统结构, 而后在 Matlab 仿真平台上搭建系统仿真模型; 于该模型, 研究管网阀门的控制以调节系统传输介质的流量, 达到控制供能系统二次侧供水温度、一次侧回水温度和总管压差等目的; 真结果验证了系统建模的可行性与有效性, 且模型对供能系统的调试运行、控制调节具有一定的指导意义。

**关键词:** 供能系统; 换热器; 仿真模型; Matlab

## Research on Modeling and Simulation of Client-Oriented Energy Supply Network

Hong Chao<sup>1</sup>, Wang Fei<sup>1</sup>, Chen Tong<sup>1</sup>, Gao Yanxia<sup>1</sup>, Wang Jianping<sup>2</sup>

(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Shanghai Hongqiao Business District Energy Service Corporation, Shanghai 200335, China)

**Abstract:** Considering different land parcel structures and various operation conditions existing in energy supply network for Client-Oriented combined cooling, heating and power System (CCHP), it leads to a long cycle and high cost for debugging. And the debugging of energy supply network is also affected by the season, resulting in poor flexibility. Aiming at this problem, the client-oriented energy supply network model is proposed in this paper to simulate operation conditions of real energy system and to study the working performance of controlled energy network. The models of pipelines, heat exchangers and valves are therefore created. The system model is set up in Matlab through establishing the mathematical models of the above mentioned objects and analyzing the structure of system. Based on the model, the control strategy of valves are investigated to regulate the flow of transmission medium, so as to control the secondary-side water supply temperature, the primary-side return water temperature and differential pressure. The simulation results show the feasibility and effectiveness of the proposed model, and the proposed model has a certain guiding significance for the debugging operation and control regulation of the energy supply system.

**Keywords:** energy supply system; heat exchanger; simulation model; Matlab

## 0 引言

当今世界经济飞速发展, 然而化石能源匮乏, 人们日益关注节能与环境保护问题。在这一背景下, 区域集中供能系统以其能源利用率高、良好的环保效益、能源供应安全可靠等特点, 成为能源领域的研究热点<sup>[1-2]</sup>。区域集中供能, 即由若干个能源站集中输出热能、冷能和电能, 经供能管网向某一地区内的用户供能; 系统产出的电力供该区域内用户自用, 多余电力可通过并网方式销往电网, 实现供冷、供热和发电联产<sup>[3]</sup>。供能管网是区域集中供能系统的重要组成部分。

在供能系统的调试阶段, 用户端供能管网因其地块结

构不同、运行工况多变等原因, 使得调试周期长、调试时间成本高, 并且由于供能系统的调试受季节影响, 导致调试灵活性较差。针对该问题, 本文从用户端出发, 针对供能系统的运行特性, 利用 Matlab 仿真平台, 建立基于用户端的供能管网仿真模型, 以模拟供能管网的运行工况, 监测传输介质由能源站出口至用户入口之间的流动过程。本文通过对管网、换热器、阀门等器件的建模研究, 构建供能管网的简化模型, 并进行仿真实验, 以验证仿真模型的可行性。

## 1 基于用户端的供能管网架构

区域集中供能系统由三联供系统、冷热联供管网和负荷等构成。本文重点研究了供能管网, 建立了基于用户端的供能管网仿真模型, 该模型包括一级管网、换热器、二级管网等, 其架构如图 1 所示。本文将三联供系统的输出简化为热源输出模块, 作为一级管网的输入模块, 该模块包括能源站输出传输介质的温度及出口压力; 二次侧回水

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-04-08。

基金项目: 上海市科委科研项目(15DZ1201700)。

作者简介: 洪超(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事三联供系统供能管网的建模和优化控制方向的研究。

温度和流量用以反映用户负荷的使用情况，作为二级管网的输入模块。热源输出的传输介质由一级网供水管道流向换热器一次侧；二次侧回水经二级网回水管道流向换热器二次侧，换热器一次侧供水与二次侧回水经能量交换后，二级管网输出二次侧供水，并向负荷供能，一级管网输出一次侧回水，并回流至能源站进行加热或冷却，达到循环利用的目的。

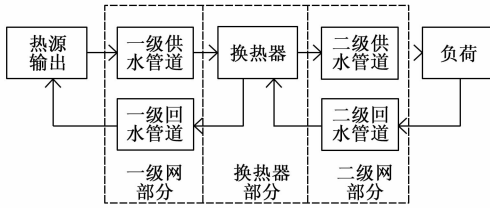


图 1 基于用户端的供能管网架构

## 2 基于用户端的供能管网建模

本节基于图 1 所示供能管网架构，通过对系统中管道、换热器、阀门的研究，分析了传输介质流经各个模块的温度变化和一级管网的压降，为后文搭建供能系统的仿真模型奠定基础。

### 2.1 管道建模

管道主要用于供能系统中流体介质的传输。管道分为一级管网和二级管网，但其结构保持一致。本文所建的管道模型，适用于由均质材料构成的管道，且仅考虑传输介质与管壁间的传热。

传输介质在管道流动过程中，传输介质与管壁存在热传导，其热平衡关系<sup>[4]</sup>如下式所示：

$$Cq(T_m - T_{out}) = k_1 A(T_m - T_{amb}) + \rho VC \frac{dT_m}{dt} \quad (1)$$

式中， $T_m$  为管道入口传输介质温度 (°C)； $T_{out}$  为管道出口传输介质温度 (°C)； $T_{amb}$  为管道表面温度 (°C)； $q$  为管道传输介质流量 (kg/s)； $A$  为管道内表面积 (m<sup>2</sup>)； $V$  为管网内传输介质的体积 (m<sup>3</sup>)； $k_1$  为管道表面传热系数 (W/(m<sup>2</sup>·°C))； $C$  为传输介质的比热 (J/(kg·°C))； $\rho$  为传输介质密度 (kg/m<sup>3</sup>)； $T_m = (T_{in} + T_{out})/2$ 。

通过式 (1) 可得流体出口温度与进口温度、环境温度等参数的对应关系。

传输介质在管网中的流动存在局部水头损失、沿程水头损失。前者主要由系统中的阀门等器件引起，该部分将在调节阀的建模中展开分析；后者主要由传输介质的摩擦作用引起，以  $h_f$  表示，具体计算如下所示：

$$h_f = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

式中， $h_f$  为沿程水头损失 (m)； $\lambda$  为沿程阻力系数； $l$  为管道长度 (m)； $d$  为管道直径 (m)； $v$  为流体流速 (m/s)； $g$  为重力加速度 (9.8 m/s<sup>2</sup>)。

其中沿程阻力系数和流体流速的计算如下：

$$\lambda = \frac{0.3086}{\left\{ \log \left[ \frac{6.9}{Re} + \left( \frac{\epsilon}{3.7d} \right)^{1.11} \right] \right\}^2} \quad (3)$$

$$Re = \frac{v \cdot d}{\mu} \quad (4)$$

$$v = \frac{q}{A_1} \quad (5)$$

式中， $Re$  为雷诺数； $\epsilon$  为管道粗糙度 (m)； $\mu$  为流体运动粘性系数 (m<sup>2</sup>/s)； $A_1$  为管道横截面积 (m<sup>2</sup>)。

流体在管道中的沿程压降计算如下：

$$\Delta P_1 = \rho \cdot g \cdot h_f \quad (6)$$

式中， $\Delta P_1$  为沿程压降 (Pa)。

### 2.2 板式换热器建模

换热器有多种结构，本文仅针对板式换热器进行建模，建模过程中忽略换热器与外部环境的热交换，并假设换热器板片绝热。换热器建模主要分析一次侧出口流体温度、二次侧出口流体温度与一次侧流量、一次侧入口流体温度及二次侧流量、二次侧入口流体温度之间的关系，如图所示。此外，本节对换热器一次侧压降进行了分析研究。本文以供热为例，设定换热器一次侧为热流体，二次侧为冷流体。

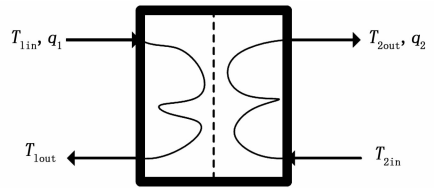


图 2 换热器的结构示意图

换热器的热平衡方程<sup>[5]</sup>如下所示：

$$Cq_1(T_{1in} - T_{1out}) = Cq_2(T_{2out} - T_{2in}) + \rho V_2 C \frac{dT_{2out}}{dt} \quad (7)$$

式中， $T_{1in}$  为换热器一次侧流体入口温度 (°C)； $T_{1out}$  为换热器一次侧流体出口温度 (°C)； $T_{2out}$  为换热器二次侧流体出口温度 (°C)； $T_{2in}$  为换热器二次侧流体入口温度 (°C)； $q_1$  为换热器一次侧流体流量 (kg/s)； $q_2$  为换热器二次侧流体流量 (kg/s)； $V_2$  为换热器二次侧流体的体积 (m<sup>3</sup>)。

基于式 (7)，通过忽略部分参数的变化，仅能求取一次侧流量和二次侧出口温度或一次侧流量和一次侧出口温度间一一对应的关系，而不能反映供能管网的动态过程，即同时获取一次侧流量和二次侧出口温度、一次侧出口温度的动态变化过程。为解决该问题，本文提出分别建立板式换热器一次侧和二次侧的热平衡方程，采用换热量作为中间桥梁以连接换热器一次侧和二次侧。

针对换热器一次侧，根据一次侧流体进、出口温度可得一次侧的总热量，该热量囊括换热器换热量以及一次侧流体温升热量，其中以一次侧出口温度表征一次侧流体温度。其具体计算如下所示：

$$\rho V_1 C \frac{dT_{1out}}{dt} = Cq_1(T_{1in} - T_{1out}) - Q \quad (8)$$

式中， $Q$  为换热器换热量 (W)； $V_1$  为换热器一次侧流体的体积 (m<sup>3</sup>)。

针对换热器二次侧，换热器换热量部分转化为二次侧

流体升温热量, 剩余部分为二次侧流体输出热量, 其中以二次侧出口温度表征二次侧内流体温度。其具体计算如下所示:

$$\rho V_2 C \frac{dT_{2out}}{dt} = Q \cdot E - Cq_2 (T_{2out} - T_{2in}) \quad (9)$$

式中,  $E$  为换热器换热效率。

可通过换热器传热系数、换热面积以及换热温差获取换热器换热量  $Q$ , 如下式所示:

$$Q = KA_2 \Delta t \quad (10)$$

式中,  $K$  为换热器传热系数 ( $W / (m^2 \cdot ^\circ C)$ );  $A_2$  为换热器换热面积 ( $m^2$ );  $\Delta t$  为换热器一二次侧换热温差 ( $^\circ C$ )。

上式中换热温差  $\Delta t$  计算如下:

$$\Delta T_1 = T_{1in} - T_{2out} \quad (11)$$

$$\Delta T_2 = T_{1out} - T_{2in} \quad (12)$$

当  $\Delta T_1 / \Delta T_2 > 1.7$  时, 选用对数平均温差<sup>[6]</sup>计算如下:

$$\Delta t = \frac{(T_{1in} - T_{2out}) - (T_{1out} - T_{2in})}{\ln \frac{T_{1in} - T_{2out}}{T_{1out} - T_{2in}}} \quad (13)$$

当  $\Delta T_1 / \Delta T_2 \leq 1.7$  时, 选用算数平均温差计算如下:

$$\Delta t = \frac{(T_{1in} - T_{2out}) + (T_{1out} - T_{2in})}{2} \quad (14)$$

将式 (10) ~ 式 (14) 中的量依次代入式 (8) 和式 (9) 即可得到换热器一次侧回水温度和二次侧供水温度的计算式。

板换一次侧的压降主要由流道压降  $\Delta p_f$ 、角孔压降  $\Delta p_c$  构成<sup>[7]</sup>:

$$\Delta p_2 = \Delta p_f + \Delta p_c \quad (15)$$

流体在换热器通道流动过程中, 因克服阻力产生流道压降, 其具体计算如下式所示, 式中  $\frac{\mu_l}{\mu_w}$  为粘度修正项, 其值近似为 1<sup>[8]</sup>。

$$\Delta P_f = 2f \frac{l'}{d_e} \rho v^2 m \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{-0.17} \quad (16)$$

式中,  $f$  为摩擦系数;  $l'$  为流道长度,  $m$ ;  $m$  为流程数。

流体通过角孔进入换热器板间通道, 因克服阻力产生角孔压降, 其具体计算如下式所示:

$$\Delta p_c = mf \frac{\rho \omega^2}{2} \left( 1 + \frac{n}{100} \right) \quad (17)$$

式中,  $n$  为一个流程中的通道数。

将式 (16)、(17) 代入式 (15) 即得到换热器压降的表达式。

### 2.3 调节阀建模

调节阀是供能系统的重要器件之一, 通过改变阀门开度以调节管网流量, 具有节流、开关等功能。调节阀建模关键在于通过阀门的流量特性确定阀门开度和流量的关系、计算流体经过调节阀造成的压降。

调节阀的流量特性为传输介质在阀门处的相对流量与阀门相对开度的数学关系, 如下式所示:

$$\frac{Q'}{Q'_{max}} = f\left(\frac{L}{L_{max}}\right) \quad (18)$$

式中,  $Q'$  为调节阀在当前开度对应的流量;  $Q'_{max}$  为调节阀全开对应的流量;  $L$  为调节阀当前开度对应的阀芯行程;  $L_{max}$  为调节阀全开对应的阀芯行程。

通过流量系数计算阀门前后压差, 流体流量系数<sup>[9-10]</sup>计算公式如下所示:

$$K_V = q \sqrt{\frac{\rho / \rho_0}{\Delta p_3}} \quad (19)$$

式中,  $K_V$  为流量系数 (无量纲);  $\rho / \rho_0$  为相对密度;  $\Delta p_3$  为控制阀出入口压差, 0.1 MPa。

将上式进行变化即可得到阀门压降的表达式, 如下式所示。

$$\Delta p_3 = \left( \frac{q}{K_V} \right)^2 \rho / \rho_0 \quad (20)$$

## 3 仿真研究

### 3.1 供能系统仿真模型

本文利用 Matlab/Simulink 在数据处理方面具有强大功能等方面的优势, 利用该软件作为仿真平台, 搭建了面向用户端的供能管网仿真模型。考虑到工程现场往往使用由多台换热器串联或并联组成的换热器机组以满足用户需求, 本文模拟了两块换热器并联运行的工况, 每台换热器分别配备调节阀, 可根据实际用户需求调节换热器的开启数量及流量分配。此外, 考虑到地块的多样性, 本文提出的系统模型支持现场调试, 可通过修正模块参数以提高模型与具体地块的匹配度, 即该系统模型具有普适性。

本文所建模型主要包括总管调节阀模块、换热器分阀模块、一次侧供水管道模块、二次侧回水管道模块、一次侧回水管道模块、二次侧供水管道模块和换热器模块等。4 个管道模块内部结构一致, 输入端口分别是流体流量、流体入口温度和入口压力, 输出端口分别是流体出口温度和出口压力, 其中考虑到模型的简洁性, 将环境温度嵌于模型内部, 不作端口处理。换热器模块的输入端口分别是流体一次侧入口温度、二次侧入口温度、一次侧流量、二次侧流量和一次侧入口压力, 输出端口分别是一次侧出口温度、二次侧出口温度和一次侧出口压力。总管调节阀模块和换热器分阀模块内部结构一致, 输入端口分别是阀门开度信号、阀前流量和阀后流量, 输出端口分别是阀后流量和阀后压力。

### 3.2 基于模型的仿真研究

为验证所建系统仿真模型的可行性, 开展仿真实验研究, 建立仿真模型如图 3 所示。具体仿真步骤如下:

步骤 1: 给定系统二次侧流量和二次侧回水温度以模拟用户负荷;

步骤 2: 给定一次侧供水温度和一次侧流量以模拟能源站能源输出情况;

步骤 3: 输入管网总阀和换热器分阀的开度信号以调节系统传输介质的流量;

步骤 4: 运行仿真模型, 观测系统二次侧供水温度、一次侧回水温度和管网压差的仿真结果。

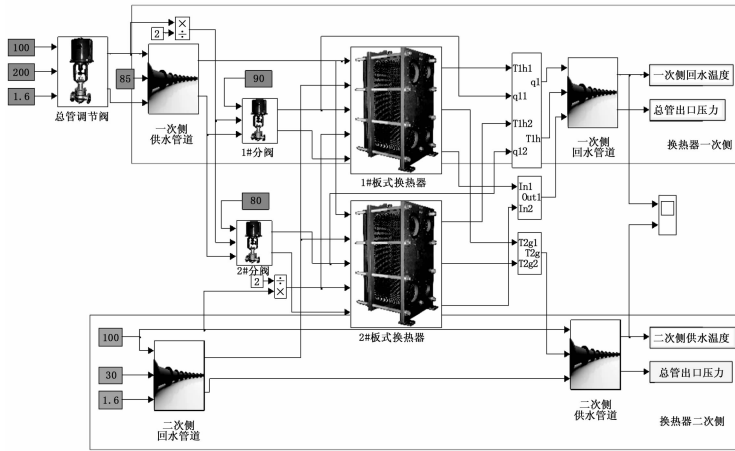


图 3 基于客户端的供能管网仿真模型

仿真实验中，模型内部主要参数设置如表 1 所示。基于某厂家提供的调节阀相关数据，使用 Matlab 曲线拟合工具箱，得到调节阀的流量特性，如图 4 所示。

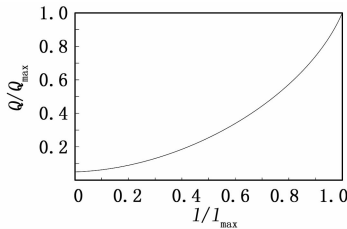


图 4 调节阀的流量特性曲线

表 1 模型输入参数

系统参数	数据
用户端设计回水温度/℃	30
能源站输出热媒温度/℃	85
能源站输出热媒流量/(kg/s)	200
换热器二次侧流量/(kg/s)	100
管道长度/m	1000
管道管径/m	0.4
环境温度/℃	5
换热器换热面积/m <sup>2</sup>	30
换热器板片厚度/m	0.0005
换热器当量直径/m	0.0082
总阀开度	100%
#1 换热器分阀开度	90%
#2 换热器分阀开度	80%

供能管网输出数据如表 2 所示，#1 换热器、#2 换热器和总管传输介质的温度变化曲线分别如图、图和图所示。当系统稳定后，#1 换热器一次侧回水温度为 69.13℃，二次侧供水温度为 50.61℃；#2 换热器一次侧回水温度为 64.42℃，二次侧供水温度为 49℃。由于#1 换热器和#2 换热器的分阀开度不同，输出数值略有差异，但输出曲线皆平滑且变化趋势保持一致，最终稳定在某一数值。#1 换热器和#2 换热器的一次侧回水汇合至总管，总管一次侧回

水温度最终稳定在 67.04℃，#1 换热器和#2 换热器的二次侧供水汇合至总管，总管二次侧供水温度最终稳定在 49.68℃。总管入口压力为 1.6 MPa，出口压力为 1.482 MPa，系统压差为 0.118 MPa，系统运行在水力平衡的状态。

表 2 模型输出数据

系统参数	数据
一次侧回水温度/℃	67.04
二次侧设计供水温度/℃	49.68
管网压差/MPa	0.118

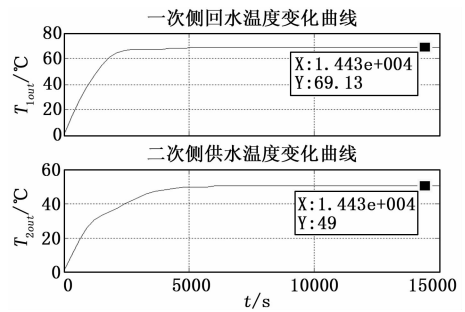


图 5 1 换热器仿真结果

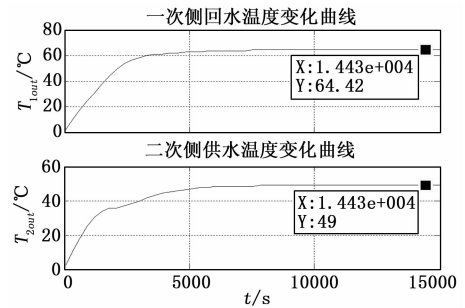


图 6 2 换热器仿真结果

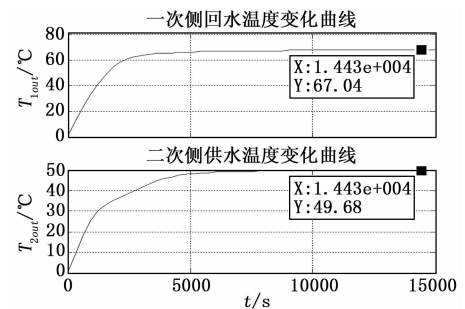


图 7 总管传输介质温度变化曲线

由仿真结果可知，本文所建仿真模型能够模拟用户侧负荷使用情况和能源站输出能源的具体情况，并通过调节总阀和分阀的开度，调控系统一次侧介质流量，有效控制二次侧供水温度、一次侧回水温度和管网压差，即该模型可用于验证分析供能系统的控制策略。并且，当两个板式换热器的分阀开度不同时，系统能够稳定运行并输出对应

(下转第 195 页)