

蒸汽管网水力热力仿真系统及其应用

张增刚^{1,2},李继志¹

ZHANG Zeng-gang^{1,2},LI Ji-zhi¹

1.中国石油大学(华东)机电工程学院,山东 东营 257061

2.山东建筑大学热能工程学院,济南 250101

1.College of Mechanical and Electronic Engineering,University of Petroleum,Dongying,Shandong 257061,China

2.School of Thermal Energy Engineering,Shandong Jianzhu University,Jinan 250101,China

ZHANG Zeng-gang,LI Ji-zhi.Steam pipe networks' hydraulic and heating simulating system and its application.Computer Engineering and Applications,2010,46(10):232-234.

Abstract: The model of steam pipe networks' hydraulic and heating calculation is built.The hydraulic and heating calculation is combined together by the way of iterating pipe flow pipe average density & constant-pressure specific isobaric heat capacity repeatedly.The node pressure& temperature is solved by the method of solving nodal equation,which is the method of combining networks' hydraulic model and networks' heating model.The computation precision is increased by the method in combination with hydraulic and heating calculation.The system of steam pipe networks' hydraulic and heating simulation & calculation realizes to operate by windows,which is programmed by VC++6.0.It is proved that the system can apply in design of project and analysis of operation through comparing calculation result and the actual example.

Key words: steam pipe networks;hydraulic calculation;heating calculation;simulating system

摘要:建立了蒸汽管网水力热力计算模型,通过迭代校正管段流量、管段平均密度和定压比热的方式,采用管网水力计算模型与热力计算模型相关联的节点方程法求解节点温度与节点压力。基于该计算模型,以数据库技术、仿真技术和可视化技术为支撑,成功开发出蒸汽管网水力热力计算仿真系统,实现了管网动态仿真数字化与模块化。以济南市典型蒸汽供热管网为例,对管网的水力和热力的工况进行了模拟计算,其计算结果与实际运行结果比较表明:该系统可用于蒸汽管网的设计计算、运行调节及其数值模拟。

关键词:蒸汽管网;水力计算;热力计算;仿真系统

DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2010.10.072 文章编号:1002-8331(2010)10-0232-03 文献标识码:A 中图分类号:TP391.9;TU832.1

1 引言

蒸汽在输送过程中状态参数变化大,并伴随相变发生,存在热力学、传热学和流体力学等方面的问题。目前的计算方法对热力计算考虑较少,计算结果存在较大误差。由于蒸汽管网水力和热力工况受密度、定压比热等状态参数相互影响,如何构建出水力热力耦合计算模型是国内外当前蒸汽管网研究的难点,其中求解算法是解决蒸汽管网设计计算和运行工况分析的重点。因此,研究蒸汽管网水力与热力仿真及计算模型,并开发蒸汽管网水力与热力仿真系统已成为蒸汽管网建设和运行管理的一个重要课题。基于此,以水力与热力计算模型为研究主线,系统地开展蒸汽管网布局优化模型、蒸汽管网结构数学描述及管网计算模型、蒸汽管网水力热力数值解法、水力热力仿真系统等技术研究,实现城市蒸汽管网水力与热力计算分析的一体化,并提高大型蒸汽管网运行的经济性,从而为大型城市蒸汽管网安全运行提供全面可行的科学决策依据。

2 蒸汽管网水力热力仿真数学模型

利用计算蒸汽管网温降和压降的计算公式及相关参数的计算方法,建立稳定流蒸汽管网水力热力计算模型为:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} + g\rho v \sin\theta + \frac{\lambda v^2}{2D} \rho = 0 \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial(\rho v h)}{\partial x} + g\rho v \sin\theta + \frac{4K(T-T_0)}{D} = 0 \\ \rho = \rho(P, T) \\ h = h(P, T) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为蒸汽密度(kg/m³); v 为蒸汽流速(m/s); x 为管内轴向长度(m); P 为蒸汽压力(Pa); D 为管道内径(m); θ 为管道与水平方向的夹角; g 为重力加速度(m/s²); h 为蒸汽焓(J/kg); T_0 为地面温度(K); T 为蒸汽温度(K); K 为传热系数(W/(m²·K)); λ

基金项目:山东省教委科技开发计划项目(No.J04D12)。

作者简介:张增刚(1971-),男,博士研究生,主要研究方向为蒸汽及燃气管道输送理论与技术研究;李继志(1936-),男,教授,博士生导师,从事石油机械的教学和科研工作。

收稿日期:2009-09-08 修回日期:2009-10-23

为摩擦系数。

3 蒸汽管网结构数学描述及管网计算模型

3.1 管网结构数学描述

管网计算图采用图论^[4]的基本原理进行分析,可抽象地认为是由管段和节点构成的连通的有向图。节点关联矩阵和回路矩阵是描述管网拓扑结构的方法,也是管网水力热力计算分析实现模型与管网结构联系的桥梁,一条管网的节点关联矩阵和基本回路矩阵是唯一确定的^[4-6]。

3.2 管网水力计算模型的求解方法

解环方程法的思路是在满足节点流量连续方程的前提下,逐步修正管段流量减小环闭合差,从而最后满足环能量方程^[2,5-6]。解节点方程法的关键是如何将以管段流量为自变量的节点流量连续方程转换为以节点压力为自变量的表达式并线性化。对任意假定的节点压力都必然满足环能量方程,但计算出的管段流量却不满足节点流量连续方程,故只需反复迭代修正节点压力,同时修正管段流量以满足节点流量连续方程即可。解节点方程法的方程式不需要输入回路矩阵信息;初始流量或初始节点压力的拟定较简单;系数矩阵是一个对称正定稀疏矩阵,有多种压缩方案可供选择,计算速度快。因此,蒸汽管网的水力计算将采用解节点方程法。

4 蒸汽管网水力热力数值解法

管网水力计算满足三个方程组:(1)节点流量连续方程组 $AG+G_0=0$; (2)管段压力降方程组 $A^T P=\Delta p$; (3)管段流量方程组 $G=C_p^* \cdot \Delta p$ 。由此可求解节点压力的方程组为:

$$[A \cdot C_p^* \cdot A^T] \cdot P + G_0 = 0 \quad (2)$$

同理,管网热力计算满足三个方程组:(1)节点流量连续方程组 $AG+G_0=0$; (2)管段温度降方程组 $A^T T=\Delta t$; (3)以温降形式表现的管段流量方程组 $G=C_t^* \cdot \Delta t$ 。由此可求解节点温度的方程组为:

$$[A \cdot C_t^* \cdot A^T] \cdot T + G_0 = 0 \quad (3)$$

式中: A 为由元素 a_{ij} 组成的节点关联矩阵; C_p^* 为由元素 $1/s_j \cdot G_j^{\alpha-1}$ 组成的节点对角矩阵; C_t^* 为由元素 $1/e_j \cdot G_j^{\beta-1}$ 组成的节点对角矩阵; P 为节点压力向量; G_0 为节点流量向量; G 为管段流量向量; Δp 为管段压降向量; Δt 为管段温降向量; A^T 为矩阵的转置矩阵。

5 蒸汽管网水力热力仿真系统

5.1 系统设计

蒸汽管网水力热力仿真系统设计主要包括7个模块:输入模块、组件模块、编辑模块、观察模块、计算模块、标注模块以及仿真结果模块。

管网输入模块:人一机对话输入管网图形和属性数据,即管网图、管段和节点参数、注释等。

管网组件模块:人一机对话模式输入管网热源、管网阀门。

管网编辑模块:主要对管段编辑,包括删除管段、截断管段、改变管段流向和改变管段颜色。

管网观察模块:完成对管网的动态分析,包括窗口的放大、缩小和上下左右的平移。

管网计算模块:原始数据准备工作完成后,进行枝状或环状的蒸汽管网水力热力计算;对管网中各种管径管段的总长度进行统计。

管网标注模块:标注蒸汽管网的管段参数(包括管段编号、长度、直径、保温层厚度、流量、管段压降、温降和流速)和节点参数(包括节点编号、流量、压力和温度)。

仿真结果模块:输出水力热力仿真结果。

5.2 数据流程

为完成水力热力计算、存储及读取管网的数据,蒸汽管网水力热力计算系统采用数据库^[7]进行存储,建立清晰的数据流程^[8]。

6 实证分析

济南市从1983年开始实施集中供热,目前城市集中供热有50%的管线为高温、高压蒸汽管线,承担着济南市近70%的供热面积。选取位于济南市南部具有代表性的蒸汽供暖管网,采集了2004年~2005年采暖季的运行数据(主要包括压力、温度等参数),进行实例验证。

6.1 水力热力计算过程

济南市南部典型供暖蒸汽管网承担供热面积 $320 \times 10^4 \text{ m}^2$,已知管网数据如下:节点数20,管段数19,给定压力、流量的汽源数为1,管道敷设以直埋、管沟为主,有少量架空。计算时局部阻力系数取0.1,局部散热系数取0.4。运行蒸汽管网水力热力计算仿真系统后,人机对话输入管网示意图,其完成后的水力计算简图,如图1所示。以人机对话方式输入管网的节点参数和管段参数,如图1和图2所示。输入管网的局部阻力系数和局部热损失系数,进行水力与热力计算。蒸汽管网水力热力计算界面,如图3所示。查询蒸汽状态参数界面,如图4所示。



图1 人机对话输入节点参数



图2 人机对话输入管段参数

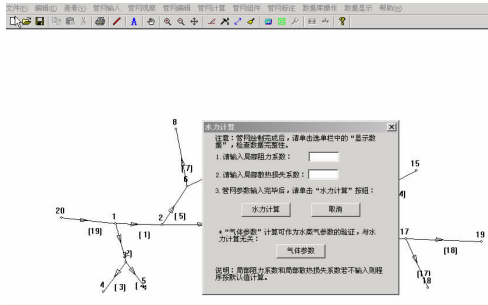


图3 蒸汽管网水力热力计算界面

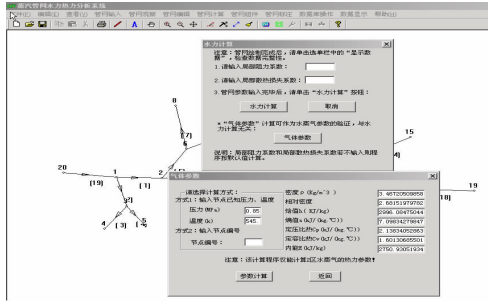


图4 查询蒸汽状态参数界面

6.2 结果对比分析

(1) 与实际运行结果相比较

对该蒸汽管网进行计算时,选取了济南市南部某蒸汽供热管网两个不同的运行工况。

①工况 1:汽源点压力为 0.90 MPa,温度 553.15 K,汽源节点流量 199 t/h。该工况为济南采暖季最冷天气的管网运行工况。

②工况 2:汽源点压力为 0.82 MPa,节点温度 543.15 K,汽源节点流量 147 t/h。该工况为济南采暖季较暖和天气的管网运行工况。

将该工况的水力热力仿真系统计算结果与管网运行结果比较可得:节点压力和节点温度相对误差大部分在 5%以内,节点压力最大相对误差为 7.459%,节点温度最大相对误差为 6.125%。在最大相对误差处,节点压力绝对偏差为 0.032 MPa,节点温度绝对偏差为 25℃,能满足工程计算精度。

(2) 与单纯水力计算结果比较分析

将蒸汽管网水力热力仿真系统的节点压力计算结果与的单纯水力计算的结果进行了比较,分别如图 5 和图 6 所示。由

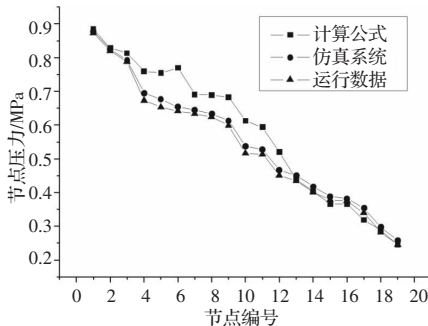


图5 工况 1 节点压力对比曲线

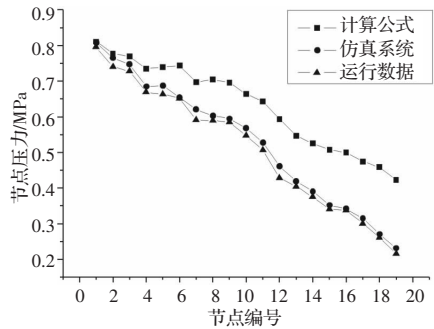


图6 工况 2 节点压力对比曲线

图 5 可知:在不同工况下,蒸汽管网仿真系统比单纯的水力的计算结果更符合管网实际运行数据,从而表明对蒸汽管网分析考虑蒸汽管网的沿途热损失是非常必要的。

7 结论

(1)建立了蒸汽管网水力热力仿真计算模型,提出了通过管段平均密度、定压比热和管段流量的联合反复迭代算法对其进行求解,进行了蒸汽管网水力热力的耦合计算。对济南市典型蒸汽供热管网进行了不同工况的水力热力分析计算,与实际运行数据进行了对比分析。节点压力、温度的相对误差基本都在 5%以内,最大误差为 7.459%,从而表明该模型可用于实际工程的设计和运行调节。

(2)通过对管段压降和温降方程线性化处理,将管网水力热力计算方程组转化为求解线性方程组,并利用高斯—赛德尔法对线性方程组进行求解,实现了管网水力热力仿真模型的求解。

(3)蒸汽管网水力热力仿真系统主要包括管网输入、管网编辑、管网观察、管网标注、管网水力热力计算、节点热力参数查询、数据读取、显示等功能模块,计算所得的节点压力与单纯水力计算的节点压力进行了比较,表明水力热力仿真结果与管网运行的实际情况吻合。

参考文献:

- [1] 王朝瑞.图论[M].北京:人民教育出版社,1981.
- [2] 赵洪宾,严煦世.给水管网系统理论与分析[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [3] 孙玉宝.蒸汽管网水力热力联合计算方法及其应用研究[D].济南:山东建筑大学,2006.
- [4] 李成乐.基于面向对象技术的城镇燃气管网水力计算系统的研究[D].济南:山东建筑工程学院,1999.
- [5] 田贯三,张增刚,江亿.城镇天然气管网水力分析数学模型与计算方法[J].天然气工业,2002(3):96-98.
- [6] 彭继军.燃气管网水力分析方法及应用的研究[D].济南:山东建筑工程学院,2003.
- [7] 李润溪,吴继刚,周学明.Visual C++6.0 数据库系统开发实例导航[M].北京:人民邮电出版社,2004.
- [8] 张增刚,李继志,李永安.城市蒸汽管道数字系统设计方法[J].微计算机信息,2006,22(22):144-146.