



多热源多环空间热网水力工况模拟与分析方法*

哈尔滨工业大学 王晓霞 周志刚 邹平华

摘要 提出了基于空间管网平差的水力工况模拟与分析方法,应用图论理论描述了空间管网的拓扑结构,分别阐述了多热源多环热网热用户或热源无流量调节装置和有流量调节装置时的计算方法。该方法既可用于正常水力工况的模拟与分析,也可用于故障工况。

关键词 热网 多热源多环 空间管网 水力工况 模拟

Simulation and analysis method for hydrodynamic conditions of three dimensional heating networks with multiple heat sources and multi-loops

By Wang Xiaoxia, Zhou Zhigang and Zou Pinghua

Abstract Puts forward a method for simulating and analysing the hydrodynamic conditions based on three dimensional heating network balancing. Describes the topological structure of the heat networks by way of the graph theory. Presents the calculation method for the heating networks with and without flux regulating devices either at heat sources side or user's side. The method can be used to simulate and analyse both normal hydrodynamic conditions and fault conditions.

Keywords heating network, multiple heat source and multi-loop, three dimensional network, hydrodynamic condition, simulation

Harbin Institute of Technology, Harbin, China

多热源环形集中热网与单一热源、枝状管网相比,具有多连通性质,管网结构和拓扑关系复杂,其水力工况模拟与分析存在一定的难度。目前对多热源多环热网的水力工况分析方法是:热用户和热源的流量均按限定流量计,从最不利热用户算起,分别计算供回水管网的节点压力,从而求出各热源所在节点的压差,据此检验循环水泵的扬程是否满足要求^[1]。该方法可以计算热用户和热源在流量已知情况下的管网压力,但不能实现管网的流量模拟。热网的流量模拟需同时对供回水管网以及热源和热用户所在的支路进行计算,以往对单热源枝状管网模拟的方法均局限于平面网络,而多热源多环供热管网已不属平面网络范畴,因此,笔者提出

基于空间管网的分析方法。

另外,当管网局部发生故障时,需关闭一定数量的阀门,以便对故障元件进行维修或更换,此时计算网络的拓扑结构将发生变化。当环形管网环线上发生故障时,隔离故障管段较好的方案是:关闭故障点所在的供水或回水管上与故障点相邻的数量最少的阀门。故障工况下管网的对称性被打破,用平面网方法很难对该故障工况进行模拟和分析。

本文从供热系统的角度出发,将供水管网、回

王晓霞,女,1975年2月生,在读博士研究生
150090 哈尔滨工业大学二校区研究生公寓 285 信箱
(0451) 86283342

E-mail: wxxhit@sina.com

收稿日期:2003-11-18

修回日期:2004-09-20

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50378029);哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金资助项目(编号:HIT.MD2002.23)

水管网、热源和热用户作为一个整体进行分析,应用图论理论建立了空间管网的拓扑结构,提出了基于空间管网平差的水力工况模拟方法。

1 空间管网拓扑结构的建立

1.1 空间管网生成树的方法

以一个 2 热源 4 环热网为例,图 1 为该管网的供水侧示意图,包括 2 个热源和 8 个热用户,供水干管形成 4 环。图 2 为图 1 的空间管网图,供、回水管分别用实线和虚线表示,供水管网和回水管网节点编号分别为 x, x' ;环线管段编号由其两端的节点编号组合而成,如 2,3 节点之间的管段编号为 2-3;热源或热用户及其所连接的供、回水管段可组合为一个支路,分别用 r_x 和 u_x 表示,F 代表阀门。

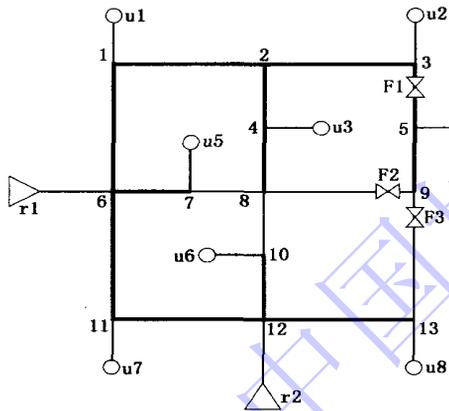


图 1 二热源四环热网供水侧示意图

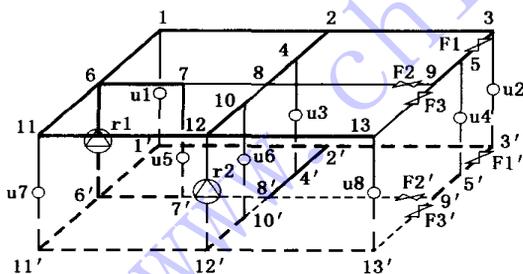


图 2 空间管网示意图

不难看出,对于供水管网和回水管网完全对称的热网,如供水网的节点数为 n ,则空间管网的节点数 $N = 2n$;供水网的管段数为 b ,热源数和热用户数之和为 k ,则空间管网的管段数 $B = 2b + k$ 。

建立环形管网的拓扑结构,首先要生成树。在图论中,树是指连通图中不包括任何环路的最大子图,即连接所有节点而不成环的图^[2]。借鉴这一概念,空间管网生成树的方法为:对供水管网和回

水管网分别生成树,然后用一个热源或一个热用户所在的支路将两棵树连起来,即生成空间管网的树。属于树的管段称作树支,树中不包括的管段即为链支。

对图 1 和图 2 所示管网,采用广度优先搜索的方法生成树,其中粗线表示的管段为树支,细线表示的管段为链支。图 2 所示的空间管网基本回路数为 17。所谓基本回路,是指由一条链支及一组惟一的树支所构成的回路。如供水管网的基本回路数为 f ,则空间管网的基本回路数 $F = 2f + k - 1$,可见空间管网仍然满足关系式 $F = B - N + 1$ 。

1.2 基本关联矩阵和基本回路矩阵

空间管网是由若干个热源和热用户所在的支路将供、回水管网对应的节点连接起来而形成的。显然,如把空间管网的一个节点及其关联的边或一个基本回路从中分离出来,都是一个子平面图,因此基本关联矩阵和基本回路矩阵完全可以表达空间管网的拓扑结构。空间管网的基本关联矩阵和基本回路矩阵可作如下定义:若空间网络的节点数为 N ,管段数为 B ,任取一节点作为参考点,对供热管网一般将定压点作为参考节点,则基本关联矩阵 $A_k = (a_{ij})_{(N-1) \times B}$,其中

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当支路与节点关联,且流向离开节点;} \\ -1, & \text{当支路与节点关联,且流向指向节点;} \\ 0, & \text{当支路与节点不关联。} \end{cases}$$

基本回路矩阵 $B_k = (b_{cj})_{(B-N+1) \times B}$,其中

$$b_{cj} = \begin{cases} 1, & \text{当 } b_j \text{ 在基本回路 } l_c \text{ 中,并与 } l_c \text{ 取向相同;} \\ -1, & \text{当 } b_j \text{ 在基本回路 } l_c \text{ 中,并与 } l_c \text{ 取向相反;} \\ 0, & \text{当 } b_j \text{ 不在基本回路 } l_c \text{ 中。} \end{cases}$$

如基本关联矩阵和基本回路矩阵按相同的边序排列, A_k 和 B_k 之间满足下式

$$A_k B_k^T = 0 \quad (1)$$

矩阵 A_k 和 B_k 表述了空间管网的所有拓扑关系。

2 水力工况模拟模型的建立及其求解

对于空间管网,根据节点连续性方程和环路能量方程,有以下关系式成立:

$$A_k G_k = Q_k \quad (2)$$

$$B_k (p_k - H_{pk}) = 0 \quad (3)$$

$$p_k = (s_1 g_1 / g_1, \dots, s_j g_j / g_j, \dots, s_B g_B / g_B)^T \quad (4)$$

式中 G_k 为空间管网的管段流量列向量, $B \times 1$ 阶; Q_k 为空间管网的节点入流列向量, $(N-1) \times 1$

阶; p_k 为空间管网的管段阻力损失列向量, $B \times 1$ 阶; $H_{p,k}$ 为空间管网的水泵扬程列向量, $B \times 1$ 阶; s_j 为管段的阻力数, 为已知值, 根据初始水力计算或参数辨识得到; $|g_j|$ 为管段流量的绝对值。

水泵扬程列向量 $H_{p,k} = (H_{p,j})_{B \times 1}$, 当管段不含水泵时, 该管段 $H_{p,j} = 0$ 。当某管段设有水泵时, 可根据水泵的参数、台数和运行方式, 拟合出水泵组的工作特性曲线方程:

$$H_{p,j} = a_0 + a_1 g_j + a_2 g_j^2 + \dots + a_n g_j^n \quad (5)$$

由式(2)~(5)联立的矩阵方程组, 可实现在管路阻力数和循环水泵组特性曲线已知的情况下, 对空间管网流量和阻力损失的模拟。该数学模型可用文献[3]介绍的

法求解, 此计算方法简单、实用, 收敛速度快。

若生成基本关联矩阵时参考节点为供热系统的定压点, 则空间管网的节点水头用下式计算:

$$p_k = (A_{kt}^T)^{-1} (p_t - H_{p,t}) + p_b I \quad (6)$$

式中 A_{kt} 为树支基本关联矩阵; p_t 为树支管段的阻力损失向量; $H_{p,t}$ 为树支管段的水泵扬程向量; p_b 为系统的定压压力; I 为单位列向量。

3 水力工况分析

对于热用户有流量调节装置的系统, 存在一个与模拟过程相反的问题, 即热用户限定了一定的流量, 这时热用户所在支路流量成为已知值, 通过调节, 支路的阻力数将改变, 成为未知量。计算网络的拓扑结构也随之发生了改变, 可认为热用户支路所连接的供水管节点有一个其值为限定流量的出流流量, 回水管上的节点有一个同值的入流流量。对图2所示空间管网, 如热用户 u_2, u_6 和 u_7 对流量有要求, 则计算网络拓扑结构如图3所示^[4~5]。

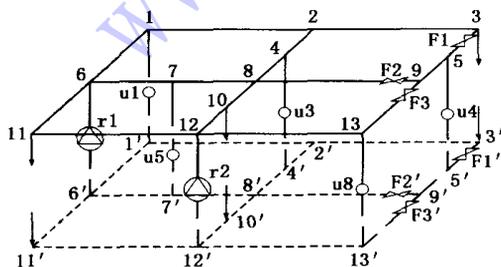


图3 部分热用户限定流量的计算网络

图3所示网络与图2相比节点数不变, 但少了热用户 u_2, u_6 和 u_7 所在的3个支路, 对应的6个

节点存在入流流量或出流流量。重新建立拓扑结构, 然后即可用上面介绍的水力工况模拟方法计算管网流量分配和压力状况。同理, 当热源限定流量时也可用该方法解决。

热用户和热源所限定的流量能否实现, 需用式(7)和式(8)作为判据:

$$H_u \leq S_{u_{\min}} G_{u,x}^2 \quad (7)$$

$$H_s \geq H_{p,s} - S_{s_{\min}} G_{s,x}^2 \quad (8)$$

式中 H_u, H_s 分别为限定流量的热用户和热源所在节点的压差, Pa; $S_{u_{\min}}, S_{s_{\min}}$ 分别为限定流量的热用户和热源在其阀门全开时的阻力数, Pa h^2/t^2 ; $G_{u,x}, G_{s,x}$ 分别为热用户和热源的限定流量, t/h 。

若热源循环水泵为调速泵, 则 $H_{p,s}$ 是限定流量为 $G_{s,x}$ 时水泵最大转速对应的扬程。

如式(7)和式(8)均满足, 则说明该工况在现有条件下是可以实现的; 否则, 需提高热源循环水泵扬程或改变热用户和热源的流量限定值。

4 故障工况模拟与分析

上述水力工况模拟与分析方法既适用于正常工况, 也可用于故障工况。热网中通常设有定数量的阀门, 若某一元件发生故障需要维修时, 关闭与之相邻的数量最少的阀门, 即可切断故障点与系统的联系。为分析问题方便, 图1和图2管网只标出了管段3-5, 8-9, 9-13以及对应的回水管上的阀门。如管段5-9发生故障, 关闭阀门 F_1, F_2 和 F_3 , 被隔离的管段在管网中将不起作用, 热用户 u_4 被停止供热, 此时计算网络变成图4所示的水力非对称网。

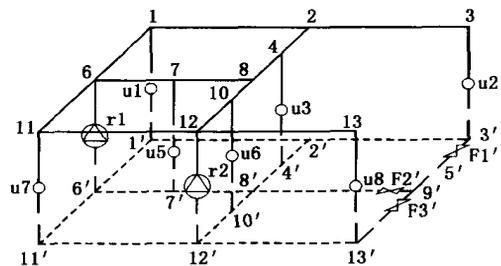


图4 故障状态下的水力非对称网

图4所示网络与图2相比, 少了2个节点和5个管段。由于管网结构的变化, 除热用户 u_4 以外其他未停止供暖的热用户也会受到不同程度的影响, 可能导致局部管网的压力和供热能力下降。通过故障工况水力模拟与分析, 可以快速、准确地了解

故障的影响范围和程度,以便采取适当的处理措施。

在模拟故障水力工况时,需对非对称网重新生成树,得到新的基本关联矩阵和基本回路矩阵,再对其进行流量和压力模拟。另外,对于热用户有流量调节装置的管网,故障工况往往会实行限额供热,即各热用户均按一定比例下调其流量,以避免距热源较远的热用户流量过小,上面介绍的水力分析方法完全适用于这种情况。

5 算例

实际管网从环线上分出的往往不止一个热用户,而是连接多个热用户的枝状网。当管网环线上发生故障时,尚可供热的分支中各热用户的失调度是相同的。图 5 为某热网简化后的平面图,该供热

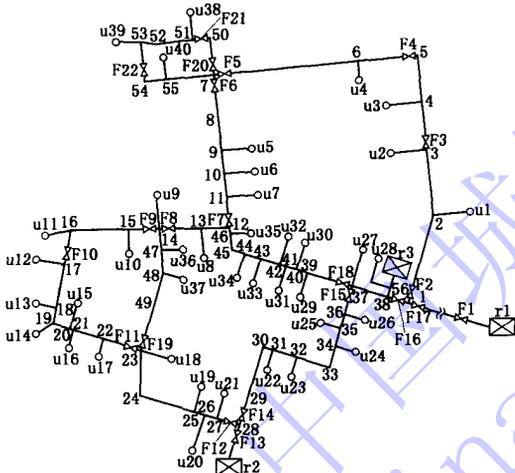


图 5 某热网简化后的平面图

系统由 3 个热源联合供热,平面管网形成 4 环,向百余座热力站输送热量。

用本文提出的方法对该管网进行了正常工况和故障工况的模拟。正常工况空间管网共有 112 个节点、161 个管段和 50 个基本回路。采用设计阻力数进行计算,正常工况下管网各管段的流量和阻力损失与设计工况完全吻合。正常工况下,环线上节点 19 和节点 53 处为汇流点。当供水干管 24-25 发生故障时,关闭阀门 F11, F12 和 F19,空间管网变成水力非对称网,供水管网变为 3 环,而回水管网仍然保持 4 环。故障工况热用户支路的模拟流量与正常工况的对比结果如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,支路 u18, u19, u20 和 u21 被停止供热,而没有被停热的支路流量变化幅度不同。关闭阀门 F11 和 F19,将其所在的供水干管环路隔断成枝状,支路 u17 处于该枝状网的最末端,

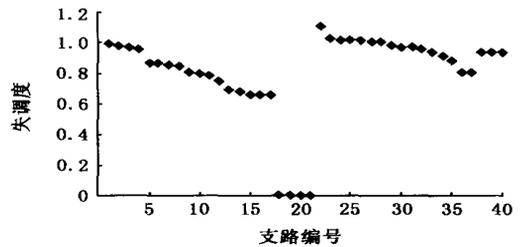


图 6 故障工况各热用户支路失调度

因此其流量减小幅度最大,故障工况流量仅为正常工况的 65.5%;距热源 r2 较近的支路 u22 出现过热的现象,流量比正常工况大 10.2%。

6 结语

随着多热源环形管网越来越广泛的应用,对该管网的理论研究显得尤为迫切。本文所建立的数学模型着重解决了多热源多环管网的流量模拟问题,对于已知热用户和热源流量的管网压力校核也同样适用。另外,还可用于故障工况水力非对称网的模拟与分析,该方法为故障工况及热网可靠性的研究提供了有力手段。

参考文献

- 1 孙宗宇. 热水网路水力计算软件的开发与研究:[硕士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2002
- 2 徐俊明. 图论及其应用. 合肥:中国科技大学出版社, 1998. 59-63
- 3 . . . 1978. 20-24
- 4 秦绪忠, 江亿. 集中供热网的可及性分析. 暖通空调, 1999, 29(1): 2-7
- 5 Qin Xuzhong, Jiang Yi, Zhu Yingxin. Optimization of hydraulic conditions in district heating networks. In: ASHRAE Trans. 2000, 106(2). 270-274

简讯

空调能效国家标准出台

2004 年 9 月 16 日,国家标准化管理委员会、国家发展与改革委员会环境与资源综合利用司在北京联合召开了 3 项空调能效国家标准新闻发布会。

《房间空气调节器能源效率限定值及能效等级》(GB 12021.3—2004)、《单元式空气调节机能源效率限定值及能效等级》(GB 19576—2004)、《冷水机组能源效率限定值及能效等级》(GB 19577—2004) 3 项空调能效国家标准已于 2004 年 8 月 23 日由国家质量监督检验检疫总局、国家标准化管理委员会正式批准,并将于 2005 年 3 月 1 日起正式实施。

(本刊特约通讯员 吴延鹏)