



多热源环状空间热网 拓扑结构研究*

广东工业大学 王晓霞[☆]

哈尔滨工业大学 邹平华

摘要 提出了一种建立空间热网拓扑结构的方法,该方法在平面网络的基础上,引入热源信息矩阵和热用户信息矩阵。采用广度优先搜索生成空间热网的“树”,据此构建树枝关联矩阵、链支关联矩阵和基本回路矩阵。该方法为多热源环状热网的水力工况分析和非对称热网的计算提供了实现的手段。

关键词 多热源环状热网 空间热网 拓扑结构 水力工况

Topological structure of multi-heat source ring-shaped heat-supply network

By Wang Xiaoxia[★] and Zou Pinghua

Abstract Presents a method for establishing topological structure of spatial heat-supply network based on a plane network, and introducing the heat source information matrix and heat consuming installation information matrix. By adopting breadth-first search, makes spatial heat-supply network tree, and composes branch incidence matrix, chain incidence matrix and fundamental circuit matrix. This method affords a way to performing the calculation of multi-heat source ring-shaped heat-supply network hydrodynamic condition analysis and asymmetric heat-supply network.

Keywords multi-heat source ring-shaped heat-supply network, spatial heat-supply network, topology structure, hydrodynamic condition

★ Guangdong University of Technology, Guangzhou, China

①

包括供水管网、回水管网、热源和热用户在内的多热源环状热网已不属平面网络范畴。以往对此类型热网的研究方法是:认为供、回水管网是对称的,热源和热用户的流量均按限定流量计,然后对属于平面网络的供水管网或回水管网进行水力计算^①。该方法可以进行热源和热用户流量已知情况下的管网流量分配和压力计算,虽能解决一些问题,但有局限性。如热源和热用户流量未知时用上方法则很难处理,另外,对于管网结构不对称的情况(如加设中继泵站),需对供水管网和回水管网分别进行计算。

基于图论理论,笔者提出了一种建立空间热网拓扑结构的方法。该方法不仅适用于多热源环状热

网,对单热源、枝状管网仍然适用,同时也适用于供、回水管网不对称的情况。该方法为描述空间热网水力工况数学模型和计算机求解提供了实现的手段。

1 供、回水管网的拓扑结构

当管网的连接关系较复杂时,识别其拓扑结构就显得尤为重要。如果一个水力工况计算程序不能对管网进行自动识别,那么它只能计算特定结构的管网,而不能根据拓扑关系灵活地调用不同的算法。图论理论是研究网络的主要工具,管网计算是图论的典型应用。

①☆ 王晓霞,女,1975年2月生,博士,讲师
510006 广州大学城广东工业大学B-59信箱
(0) 13556135687
E-mail: wxxhit@sina.com
收稿日期:2007-08-02
修回日期:2007-11-26

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50378029),广东工业大学博士基金项目(编号:053025)

空间热网拓扑结构是在供水管网和回水管网拓扑结构的基础上建立的。供、回水管网均为平面网络,拓扑关系的构建方法相同,本文以供水管网为例。图 1 为由 2 个热源联合向 7 个热用户供热的热网系统供水管网示意图以及在此基础上构建的平面有向图,管网节点数 $n=9$,管段数 $b=10$ 。 n_i 为节点名称, b_i 为管段名称(在有向图中即为边的名称),括号内的数字分别为节点和管段的序号,此序号为从 1 开始的连续数字,在输入节点和管段名称后由计算机排序产生; r_i 和 u_i 分别为热源和热用户名称;管段流向和环路的方向可以任意假定。

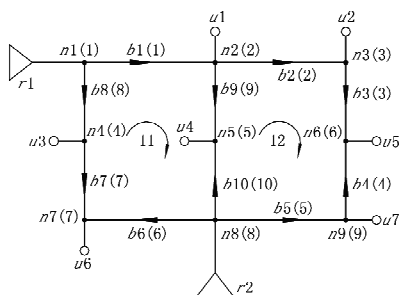


图 1 供水管网及其有向图

矩阵是研究图论的有力工具。在计算机中,图都是借助于矩阵来表示的,图的很多算法也是通过矩阵运算来实现的。

1.1 峰阵

表达图的最简便方式是峰阵^[2]。峰阵 C 是一个 b 行 2 列的矩阵,其中每一行表示一条边,第一列元素表示边的起始节点的序号,第二列元素表示边的终止节点的序号。图 1 所示有向图可用峰阵的转置矩阵表示为

$$C^T = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 9 & 8 & 8 & 4 & 1 & 2 & 8 \\ 2 & 3 & 6 & 6 & 9 & 7 & 7 & 4 & 5 & 5 \end{bmatrix}$$

峰阵以边为单位来记录图,在管网图中,峰阵可方便地将管段信息和图的信息存储在一起,最大限度地减少输入量。然而,峰阵不易于结合专业模型实现特定的算法。本文利用峰阵生成管网的关联矩阵和基本回路矩阵。

1.2 关联矩阵

管网关联矩阵 $A'_p = (a_{ij})_{n \times b}$, 其中各元素按如下规定确定:

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

图 1 所示平面网络的关联矩阵为

$$A'_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

1.3 基本回路矩阵

基本回路矩阵是基于网络树生成的。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,属于树的边称作树枝,树中不包括的边即为链支。搜索树的两种常用算法是广度优先搜索 BFS(breadth-first search)和深度优先搜索 DFS(depth-first search),本文采用 BFS 算法,该方法的基本思想是对已搜索的点的所有相邻点进行搜索。对图 1 所示的连通图,搜索从节点 1 出发,首先确定邻接于节点 1 的所有节点的集合,该集合为 $\{2, 4\}$;然后确定邻接于 $\{2, 4\}$ 的新的节点集合,该集合为 $\{3, 5, 7\}$;邻接于 $\{3, 5, 7\}$ 的节点集合为 $\{6, 8\}$;邻接于 $\{6, 8\}$ 的节点集合为 $\{9\}$ 。至此搜索到了该图的所有节点,搜索过程如图 2 所示,搜索经过的边即构成了连通图的一棵树(图 2d)。

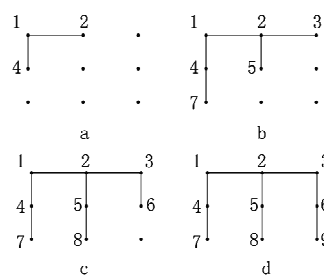


图 2 连通图的 BFS 搜索过程

所谓基本回路,是指由一条链支及一组唯一的树支所构成的回路。基本回路数 $f = b - n + 1$,管网基本回路矩阵 $B_p = (b_{ij})_{f \times b}$, 其中各元素按如下规定确定:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当管段在基本回路中,且取向与之相同;} \\ -1, & \text{当管段在基本回路中,且取向与之相反;} \\ 0, & \text{当管段不在基本回路中。} \end{cases}$$

图 1 所示平面网络的基本回路矩阵为

$$B_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

2 空间热网的拓扑结构

2.1 信息录入

空间热网除供水管网和回水管网外还包括热源和热用户所在管段的信息。采用类似峰阵的做法,如热源数为 m ,则热源信息矩阵 R 是一个 m 行 2 列的矩阵,其中每一行表示一个热源,第一列元素表示热源所在管段连接供水管网的节点序号,第二列元素表示热源所在管段连接回水管网的节点序号。图 1 所示热网系统,如供、回水管网对称,则其热源信息矩阵如下

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 8 & 8 \end{bmatrix}$$

同理,热用户信息可用矩阵 U 的转置矩阵表示

$$U^T = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 9 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 9 \end{bmatrix}$$

对于供、回水管网不对称的情况此方法也同样适用。

录入了供水管网、回水管网、热源和热用户的信息即可建立空间热网的拓扑结构。如供、回水管网的节点数分别为 n_1 和 n_2 ,则空间热网的节点数 $N=n_1+n_2$;如供、回水管网的管段数分别为 b_1 和 b_2 、热源与热用户所在管段数之和为 k ,则空间热网的管段数 $B=b_1+b_2+k$ 。

2.2 搜索树

建立空间热网的拓扑结构首先要对整个热网系统搜索树,方法如下:对供水管网和回水管网分别搜索树,然后用一个热源或一个热用户所在管段将两棵树连接起来,不妨用定压热源所在管段作为树支,定压热源所在管段与供、回水管网的树支组成的树即为空间管网的树^[3-5]。属于树的管段称作树支,树中不包括的管段即为链支。

图 1 所示热网,如供、回水管网对称,定压热源为 r_1 ,则空间热网及其搜索树如图 3 所示,其中实线为供水管,虚线为回水管,粗线表示的是树支,细线表示的是链支。

对于任一热网,如供水管网和回水管网的基本回路数分别为 f_1 和 f_2 ,则整个热网的基本回路数 $F=f_1+f_2+k-1$,可见空间热网仍然满足关系式 $F=B-N+1$ 。

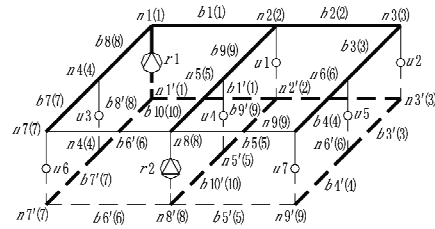


图 3 空间热网及其搜索树

2.3 关联矩阵

在环状管网水力工况模型求解中,通常需将关联矩阵写成树支矩阵和链支矩阵的分块形式。对于空间热网,关联矩阵分块如下:

$$A'_k = [A'_{kt} \quad A'_{kl}] \quad (1)$$

式中 A'_k 为空间热网的关联矩阵, $N \times B$ 阶; A'_{kt} 为空间热网的树支关联矩阵, $N \times (N-1)$ 阶; A'_{kl} 为空间热网的链支关联矩阵, $N \times F$ 阶。

空间热网的树支关联矩阵由如下几部分组成:

$$A'_{kt} = \begin{bmatrix} A_{t1} & 0 \\ 0 & A_{t2} \end{bmatrix} A_{t3} \quad (2)$$

式中 A_{t1} 为供水管网的树支关联矩阵, $n_1 \times (n_1-1)$ 阶; A_{t2} 为回水管网的树支关联矩阵, $n_2 \times (n_2-1)$ 阶; A_{t3} 为定压热源所在管段对应的关联矩阵, $N \times 1$ 阶。

热源和热用户所在管段对应的关联矩阵与供、回水管段关联矩阵的定义类似,矩阵的行数为空间管网的节点数,列数为热源和热用户所在管段数,当热源或热用户所在管段流向离开某节点,对应的元素值为 1;当管段流向指向某节点,对应的元素值为 -1;否则为 0。

空间热网的链支关联矩阵由如下几部分组成

$$A'_{kl} = \begin{bmatrix} A_{l1} & 0 \\ 0 & A_{l2} \end{bmatrix} A_{l3} \quad (3)$$

式中 A_{l1} 为供水管网的链支关联矩阵, $n_1 \times f_1$ 阶; A_{l2} 为回水管网的链支关联矩阵, $n_2 \times f_2$ 阶; A_{l3} 为非定压热源和热用户所在管段对应的关联矩阵, $N \times (k-1)$ 阶。

可以证明矩阵 A'_k 的秩为 $N-1$ ^[6],去掉其中对应参考节点的一行(对供热系统一般以定压点为参考节点),构成一个新的矩阵 A_k ,即为空间热网的基本关联矩阵。

空间热网的基本回路矩阵可写成如下形式

$$B_k = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 \\ 0 & 0 & B_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 B_k 为空间管网的基本回路矩阵, $F \times B$ 阶;

B_1 为供水管网的基本回路矩阵, $f_1 \times b_1$ 阶; B_2 为回水管网的基本回路矩阵, $f_2 \times b_2$ 阶; B_3 为非定压热源和热用户所在管段对应的基本回路矩阵, $(k-1) \times B$ 阶。

如空间热网基本关联矩阵和基本回路矩阵按相同的边序排列, 则 A_k 和 B_k 之间满足下式:

$$A_k B_k^T = 0 \quad (5)$$

矩阵 A_k 和 B_k 表述了空间管网的所有拓扑关系。

3 空间管网与平面管网的比较

图论中对平面图的定义为, 若能把网络图绘在平面上, 且除边的顶点之外, 任何两条边均不相交, 则称该图是可嵌入平面的, 简称平面图, 否则为非平面图^[6]。热网系统的供水管网和回水管网一般都是平面图, 图论中指出任何一个凸多面体都是平面图, 因此, 枝状热网和单环热网都属于平面图。对于供水管网或回水管网为多环的热网, 如两个环之间的公共管段上无热源或热用户连接, 则热网系统一定是平面图。然而, 对于大多数多热源多环热网都是非平面图。

空间热网是由供水管网、回水管网及热源和热用户所在管段组成的闭合网路系统。以往对管网水力工况的分析方法实质上是某种方法(自控系统、实测或假定)得到了一定的边界条件, 如热用户或热源的流量, 然后只计算网路系统的一部分管路: 供水管网或回水管网。

空间管网的拓扑结构与平面管网相比要复杂得多, 式(2)中的非零元素由三部分组成, 即 A_{11} , A_{12} 和 A_{13} 。 A_{13} 是联系供水管网和回水管网的“纽带”, 其中的非零元素有 2 个, 分别对应所关联的供水节点和回水节点, 即 A_{13} 的上半部分和下半部分各有 1 个非零元素, 如按定压热源的实际流向来设定该管段的流向, 则上半部分的非零元素为 1, 下半部分的非零元素为 -1。当空间热网为对称管网, 且供水管网和回水管网的节点编号和管段假定流向均相同时, 有 $A_{11} = A_{12}$, 对于非对称管网, $A_{11} \neq A_{12}$ 。

同理, 式(3)中的非零元素由三部分组成即 A_{11} , A_{12} 和 A_{13} 。其中 A_{13} 每列的上半部分和下半部分各有 1 个非零元素, 如按热源和热用户的实际流向来设定这些管段的流向, 则热源所对应的列上半部分的非零元素均为 1, 下半部分的非零元素均为 -1; 热用户所对应的列上半部分的非零元素均为

-1, 下半部分的非零元素均为 1。当空间热网为对称管网, 且节点编号和管段假定流向均相同时, 有 $A_{11} = A_{12}$, 否则 $A_{11} \neq A_{12}$ 。

4 算例

图 4 为某城市的一个多热源环状热网平面图, 由 3 座热源联合供热, 平面管网为 4 环, 共有 92 个热力站, 供、回水管网均为 265 个节点和 268 个管段。对该管网生成的空间管网共有 530 个节点、631 个管段和 102 个基本回路。采用设计阻抗进行模拟计算, 正常工况下求得管网各管段的流量和阻力损失与设计工况完全吻合。假设供水干管 24—25 发生故障, 需要维修, 关闭供水管网上的阀门 F12, F13 和 F18, 此时空间管网为非对称管网, 对该故障工况进行了模拟, 各热力站流量与正常工况的对比结果如图 5 所示。

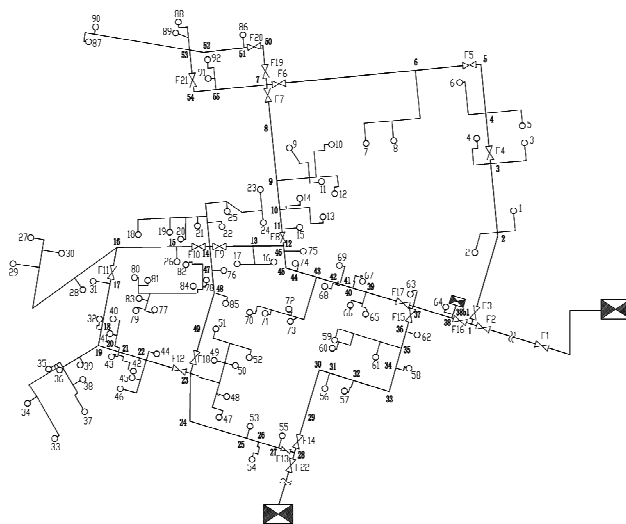


图 4 某多热源环状热网平面图

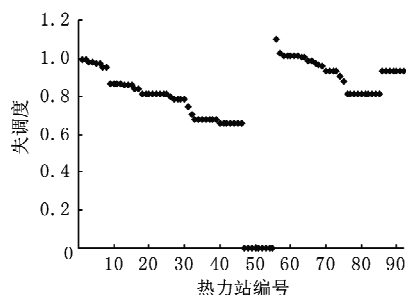


图 5 故障工况热力站的失调度

5 结论

本文提出了建立空间热网拓扑结构的方法, 包括对空间热网搜索树和构建树支关联矩阵、链支关 (下转第 18 页)

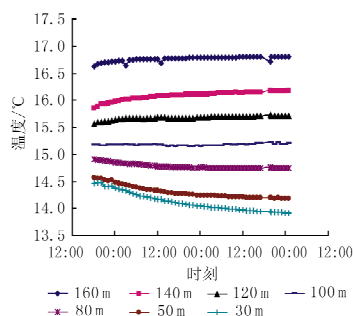


图 8 钻孔完成后土壤温度恢复实验结果

壤温度恢复性实验的结果,测试时间为 2007 年 10 月。数据记录从钻孔成孔、下管完成后 2 h 开始进行,所有传感器均为 Pt1000 型铂电阻。可以看出,不同深度处的土壤温度的恢复过程是有差异的。通常,除了受钻孔机械热量影响外,钻孔过程对土壤初始温度的扰动主要受浆液(地表水)温度的影响。在该实验中,浆液的平均温度为 15.3 °C,正好与 100 m 深的土壤温度接近,所以浆液与该深度地层的传热并不明显,即扰动作用较小。对于 20~100 m 深的土壤,由于初始温度低于浆液温度,所以钻孔过程中温度会有所升高,而且深度越小,温升越大(30, 50, 80 m 处的温升分别约为 0.5, 0.3 和 0.2 °C)。对于 100 m 以下的土壤,由于初始温度较高,故钻孔过程中出现了温度降低的情况。但是,考虑到浆液温度会随着钻孔季节而变化,对于夏季情况,浆液温度高于土壤温度,因此钻孔过程会使得恒温层和深层土壤的温度都有所升高。为了避免这种季节效应对土壤初始温度的扰动作用的影响,建议钻孔完成后土壤温度恢复时间越长越好,且不能少于 48 h。

3 结论

3.1 在地埋管换热器地下热响应实验中,存在着季节效应。实验结果表明,在相同加热功率的情况

下,冬季单井换热量略高于夏季,此差异主要与土壤初始温度、土壤导热系数的季节性变化有关系,而湿度变化的影响基本可以忽略。在地源热泵系统(尤其是大面积工程)的优化设计过程中,应该充分考虑上述季节效应的影响。此外,不同季节下,钻孔过程对于土壤初始温度的扰动作用也不一样,建议钻孔完成后保证足够长的土壤温度恢复时间。

3.2 就地下热响应实验结果而言,建议在提供单井换热量数据时,还要给出其对应的加热功率或地埋管换热器进、出口温度,以增强不同实验数据之间的可比性,更好地服务于系统优化设计。从安全角度出发,建议实际地源热泵工程应尽量选取夏季热响应实验的结果。

参考文献:

- [1] Sanner B, Burkhard W. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe[J]. Geothermics, 2003, 32(12): 579-588
- [2] Kavanaugh S P. Field tests for ground thermal properties—methods and impact on ground-source heat pumps[G]// ASHRAE Trans, 1998, 104(2): 347-355
- [3] Ingersoll L R, Plass H J. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump [J]. Heating, Piping & Air Conditioning, 1948, 20(7): 119-122
- [4] 王华军,赵军. 混合式地源热泵系统的控制策略研究[J]. 暖通空调, 2007, 37(9): 141-144
- [5] Austin. Development of an in situ system for measuring ground thermal properties[D]. Oklahoma: Oklahoma State University, 1995
- [6] 王华军,魏晋. 一种基于塔式结构的地源热泵系统设计方法[J]. 暖通空调, 2006, 36(11): 70-75
- [7] 于明志,方肇洪. 现场测量深层岩土热物性方法[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(3): 354-356

(上接第 4 页)

联矩阵和基本回路矩阵。该方法在平面网络的基础上,结合供热管网的特点,引入热源信息矩阵和热用户信息矩阵,实现了包括管路、热源支路和热用户支路在内的空间网络的拓扑关系识别。通过算例验证了该方法的正确性和实用性。该方法为多热源环状热网的水力工况分析和非对称热网的计算提供了实现的手段。

参考文献:

- [1] 孙宗宇. 热水网路水力计算软件的开发与研究[D].

哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2002

- [2] 曹立明,魏兵,周强. 图论及其在计算机科学中的应用[M]. 北京:中国矿业大学出版社, 1995
- [3] 王晓霞. 多热源环状热水管网故障工况及可靠性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2004
- [4] 王晓霞,周志刚,邹平华. 多热源多环空间热网的水力工况模拟与分析方法[J]. 暖通空调, 2004, 34(11): 131-134
- [5] 周志刚,邹平华,王晓霞. 基于阻抗辨识的复杂空间热网仿真研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(10): 19-24
- [6] 徐俊明. 图论及其应用[M]. 合肥:中国科技大学出版社, 1998