

# 基于阻抗辨识的复杂空间 热网仿真研究\*

哈尔滨工业大学 周志刚<sup>☆</sup> 邹平华  
广州工业大学 王晓霞

**摘要** 针对供热管网拓扑结构为空间网的特点,采用空间网水力工况计算方法代替传统的平面网计算方法,建立了复杂空间热网的仿真计算模型。应用遗传算法实现了管网阻抗的辨识,介绍了阻抗辨识模型和辨识步骤及遗传算法的实现。通过算例验证了该方法的有效性和实用性。

**关键词** 阻抗 辨识 复杂空间热网 仿真 遗传算法

## Simulation study of complex spatial heating networks based on impedance identification

By Zhou Zhigang<sup>★</sup>, Zou Pinghua and Wang Xiaoxia

**Abstract** Aiming at the characteristic of spatial topological structure of a heating network, adopts the hydrodynamic method for spatial networks to replace the traditional method for planar networks, and develops a simulation calculation model for complex spatial heating networks. Realizes the identification of impedance of pipe networks with genetic algorithm (GA). Presents the related model and steps. The validity and practicability of the method are verified by an example.

**Keywords** impedance, identification, complex spatial heating network, simulation, genetic algorithm

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

供热管网的仿真是保证供热管网安全经济运行的一种有效手段。优良的系统仿真能够实时反映系统参数的变化规律,仿真的结果也能够很好地与工程实际监测数据相吻合并指导系统的运行,要达到这一标准,除了仿真模型要符合系统运行规律外,模型中的系统参数也应与工程数据相吻合,也就是说仿真应该建立在系统参数辨识的基础之上。对于供热管网来说,管网阻抗是一个非常重要的待辨识参数,能否实现管网阻抗的准确辨识将直接决定仿真的准确性。目前国内关于供热管网阻抗辨识的研究较少,秦绪忠等人提出一种供热管道阻抗

辨识方法——RC2 法<sup>[1]</sup>,刘笑池等人提出一种蒸汽管网阻抗辨识方法——三角形递推法<sup>[2]</sup>,但是这两种方法都是针对枝状管网提出的,对工况变化的要求也较高。基于以上情况,本文提出一种基于阻抗辨识的复杂空间热网仿真方法,在仿真过程中引入空间热网水力工况计算方法,采用遗传算法实现了管网阻抗的辨识,为仿真模型在实际工程中的应

①<sup>☆</sup> 周志刚,男,1978 年 9 月生,在读博士研究生  
150090 哈尔滨南岗区海河路 202 号哈尔滨工业大学二校区  
1 公寓 417  
(0) 13936638129  
E-mail: hitzzg@tom.com  
收稿日期:2006-02-24  
修回日期:2006-09-04

用提供了条件。

## 1 复杂空间供热管网仿真计算模型

现有的供热管网仿真一般是采用平面网的计算方法,即假设供水管网与回水管网镜像对称,将系统简化为平面网络,此种方法常用于枝状热网水力工况计算。复杂的多热源环状供热管网,实质上是由热源、供水管网、回水管网以及热用户组成的空间网,另外在实际工程中,受系统结构、敷设条件、工况调节以及其他因素的影响,热网实际上是非对称的空间管网,若将管网简化为平面镜像对称,再通过平面网方法计算,经常与实际管网有较大差别,直接影响仿真计算的准确性。本文采用空间热网水力工况计算代替传统的平面网计算方法,建立了复杂空间热网的仿真模型。

### 1.1 复杂空间热网水力工况计算模型

对于空间供热管网,设其节点数为  $n$ ,管段数为  $m$ ,根据节点连续性方程有下式:

$$\mathbf{A}_k \mathbf{Q}_{pk} = \mathbf{Q}_{dk} \quad (1)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当管段 } b_i \text{ 在基本回路 } l_k \text{ 中, 并与 } l_k \text{ 取向相同} \\ -1, & \text{当管段 } b_i \text{ 在基本回路 } l_k \text{ 中, 并与 } l_k \text{ 取向相反} \\ 0, & \text{当管段 } b_i \text{ 不在基本回路 } l_k \text{ 中;} \end{cases}$$

$\Delta \mathbf{H}_{pk}$ ——空间管网管段水头损失列向量,  
 $\Delta \mathbf{H}_{pk} = (\Delta h_{pk1}, \Delta h_{pk2}, \dots, \Delta h_{pkm})^T$ , 其中  $\Delta h_{pki}$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 为空间管网第  $i$  管段的水头损失, m。

供热管道的水头损失由下式确定:

$$\Delta \mathbf{H}_{pk} = \mathbf{S}_k | \mathbf{Q}_{pk} | \mathbf{Q}_{pk} - \mathbf{DH}_k \quad (3)$$

式中  $\mathbf{S}_k$ ——管段阻抗对角阵,  $\mathbf{S}_k = \text{diag}(S_{k1}, S_{k2}, \dots, S_{km})$ , 其中  $S_{ki}$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 为空间管网第  $i$  管段的阻抗,  $\text{m} \cdot \text{h}^2 / \text{t}^2$ ;

$| \mathbf{Q}_{pk} |$ ——管段质量流量绝对值对角阵,  $| \mathbf{Q}_{pk} | = \text{diag}(|q_{pk1}|, |q_{pk2}|, \dots, |q_{pkm}|)$ ;

$\mathbf{DH}_k$ ——管段中的水泵扬程列向量,  $\mathbf{DH}_k = (dh_{k1}, dh_{k2}, \dots, dh_{km})^T$ , 其中  $dh_{ki}$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 为第  $i$  管段上水泵的扬程, m。

水泵的扬程与流量的关系可以通过多项式拟合得到。从热网常用水泵性能曲线的形状可以看出,一般都呈抛物线型,因此可采用二阶多项式拟合,即

式中  $\mathbf{A}_k$ ——空间管网的基本关联矩阵,  $\mathbf{A}_k = (a_{ij})_{(n-1) \times m}$ , 可以证明,基本关联矩阵是线性无关的或称为列满秩的,其中

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

$\mathbf{Q}_{pk}$ ——空间管网的管段质量流量列向量,  
 $\mathbf{Q}_{pk} = (q_{pk1}, q_{pk2}, \dots, q_{pkm})^T$ , 其中  $q_{pki}$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 为第  $i$  管段的质量流量, t/h;

$\mathbf{Q}_{dk}$ ——空间管网的节点入流质量流量列向量,  $\mathbf{Q}_{dk} = (q_{dk1}, q_{dk2}, \dots, q_{dk(n-1)})^T$ , 其中  $q_{dkj}$  ( $j=1, 2, \dots, n-1$ ) 为第  $j$  节点质量流量, t/h。

基本回路能量方程为

$$\mathbf{B}_k \Delta \mathbf{H}_{pk} = 0 \quad (2)$$

式中  $\mathbf{B}_k$ ——空间管网的基本回路矩阵(即空间管网由一条链支及一组惟一的树支构成的矩阵),  $\mathbf{B}_k = (b_{ij})_{(m-n+1) \times m}$ , 其中

$$dh_{ki} = a_{0i} + a_{1i} q_{pki} + a_{2i} |q_{pki}| q_{pki} \quad (4)$$

式中  $a_{0i}, a_{1i}, a_{2i}$ ——第  $i$  管段上的水泵扬程多项式拟合系数。

写成矩阵形式:

$$\mathbf{DH}_k = \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 \mathbf{Q}_{pk} + \mathbf{A}_2 | \mathbf{Q}_{pk} | \mathbf{Q}_{pk} \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{A}_0 = \text{diag}(a_{01}, a_{02}, \dots, a_{0m})$$

$$\mathbf{A}_1 = \text{diag}(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1m})$$

$$\mathbf{A}_2 = \text{diag}(a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2m})$$

另外,如设生成基本关联矩阵时参考节点为供热系统的定压点,则管网的节点水头可通过下式计算:

$$\mathbf{H}_k = (\mathbf{A}_{kt}^T)^{-1} \Delta \mathbf{H}_{pkt} + H_b \mathbf{I} \quad (6)$$

式中  $\mathbf{H}_k$ ——空间管网节点水头列向量,  $\mathbf{H}_k = (H_{k1}, H_{k2}, \dots, H_{kn})^T$ , 其中  $H_{ki}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为第  $i$  节点水头, m;

$\mathbf{A}_{kt}$ ——管网树支基本关联矩阵;

$\Delta \mathbf{H}_{pkt}$ ——管网树支管段的水头损失列向量;

$H_b$ ——系统的定压水头;

$\mathbf{I}$ ——单位矩阵。

由式(1)~(3), (5), (6)组成的空间热网水力

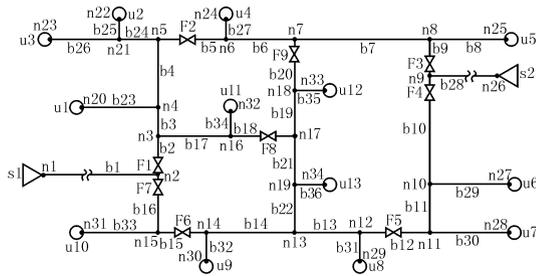
工况计算矩阵方程组是非线性的,其中,管段的结构,即长度、管径及局部阻力构成是确定的,即管段的阻抗  $S_k$  是确定的,而管段质量流量和管段压降为待求的量,共有  $2m$  个未知数,基本关联矩阵  $A_k$  为  $(n-1) \times m$  阶矩阵,基本回路矩阵  $B_k$  为  $(m-n+1) \times m$  阶矩阵,方程的个数也为  $2m$ ,因此方程组有惟一解。上述热网水力工况模拟矩阵方程组可采用基本回路分析法求解,该计算方法简单、实用,收敛速度快<sup>[3]</sup>。

### 1.2 复杂空间热网的拓扑建构

通过上述的分析可以看出,空间热网的水力工况计算模型在形式上与平面网类似,但由于两者在管网拓扑建构上的不同使得两者的内涵也不相同。平面网的拓扑建构建立的是由供水管网和回水管网构成的空间镜像管网的一部分,基本关联矩阵也只是针对供水管网或回水管网建立的,这也意味着在平面网方法相当于只计算了系统的一部分管路。而采用空间网水力工况计算时,拓扑建构建立的是由热源、供水管网、回水管网以及热用户组成的空间热网拓扑结构,所有热源和热用户所在管段也都作为待求变量参与了计算,因此,空间管网的计算方法实质上是根据管段阻抗和水泵特性曲线等系统固有参数,求解包括热源与热用户在内的整个网络的流量分配和节点压力。这也决定了与平面网水力工况计算相比,空间热网水力工况计算不仅适用于单热源枝状管网和多热源环形对称热网,而且还适用于供水网与回水管网不对称的空间热网。

供热管网在最初设计时一般按照供水管网与回水管网对称考虑,但是受管网系统结构、敷设条件以及运行调节等因素的影响,实际管网经常出现供、回水管网部分相应管段的网路附件(阀门、补偿器等)不同,管道长度、走向等参数也不相同,这就造成了热网在实际运行时,整个空间结构呈现非对称性。若想使仿真计算更加逼近实际管网的运行状态,应对非对称空间热网进行拓扑建构。

以一多热源环状管网为例说明非对称空间拓扑建构过程,该热网包括 2 个供热热源、13 个热用户,热网供水管网平面示意图如图 1 所示。供、回



s 热源 u 热用户 n 节点 b 管段 F 阀门

图 1 热水供水管网平面示意图

水管网由包括热源节点在内的 34 个节点、36 个管段、3 个环组成,管网共设有 9 个分段阀,热网空间结构示意图如图 2 所示。从图 2 可以看出,管网正常运行时,供水管网与回水管网在空间几何结构上是对称的。但是当供水网管段 b6 发生故障时,应关闭阀门 F2, F3 及 F9 进行维修,此时热用户 u4 与 u5 被停止供热,供水管网与回水管网无论是在节点数、管段数还是平面几何形状上也都将有明显的不同,空间管网呈现非对称性,变化后的供水管网的平面有向图如图 3 所示。

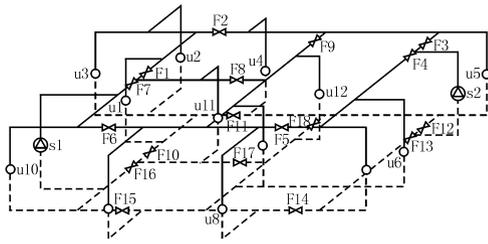


图 2 热水管网空间结构示意图

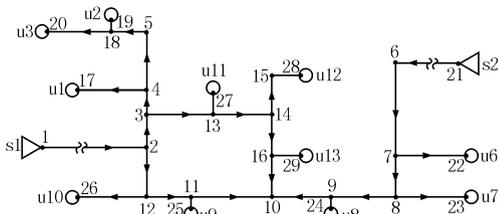


图 3 阀门关闭后供水管网平面有向图

表达平面网络最简便的方式是峰阵<sup>[4]</sup>,如网络的边数为  $m$ ,则峰阵  $C$  是一个  $m$  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。按照此定义,关闭阀门后事故工况下供、回水管网的峰阵如式(7),(8)所示。

$$C_g^T = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 12 & 2 & 3 & 13 & 14 & 14 & 16 & 4 & 5 & 18 & 18 & 21 & 7 & 8 & 9 & 11 & 12 & 13 & 15 & 16 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 10 & 17 & 18 & 19 & 20 & 6 & 22 & 23 & 24 & 25 & 26 & 27 & 28 & 29 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C_h^T = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 9 & 10 & 11 & 12 & 14 & 15 & 2 & 3 & 16 & 17 & 18 & 17 & 19 & 4 & 5 & 21 & 21 & 6 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 14 & 15 & 16 & 18 & 19 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 8 & 10 & 11 & 12 & 13 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 7 & 19 & 13 & 20 & 21 & 22 & 23 & 24 & 25 & 26 & 27 & 28 & 29 & 30 & 31 & 32 & 33 & 34 \end{bmatrix} \quad (8)$$

事故工况下热源所在管段的峰阵如式(9)所示。

$$R^T = \begin{bmatrix} 1 & 21 \\ 1 & 26 \end{bmatrix} \quad (9)$$

关断阀门 F2, F3 及 F9 后,热用户 u4 与 u5 被停止供热,此时热用户的峰阵如式(10)所示。

$$U^T = \begin{bmatrix} 17 & 19 & 20 & 22 & 23 & 24 & 25 & 26 & 27 & 28 & 29 \\ 20 & 22 & 25 & 27 & 28 & 29 & 30 & 31 & 32 & 33 & 34 \end{bmatrix} \quad (10)$$

建立空间管网的拓扑结构首先要生成树。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<sup>[4]</sup>。关闭阀门 F2, F3 及 F9 后,空间不对称热网的树如图 4 所示,粗线表示树枝,细线表示链支。

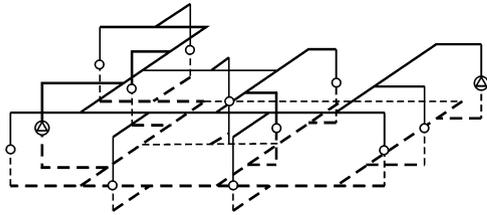


图 4 非对称空间热网生成树

## 2 基于遗传算法的复杂空间热网阻抗辨识

在管网结构已定的情况下,基本关联矩阵及基本回路矩阵都是确定的,通过对热网仿真数学模型描述可知,此时表征管段阻力特性的管道阻抗  $S$  将是决定管网水力工况仿真计算结果的关键参数。另外,在热网实际运行过程中,多种因素导致管网水力工况的变化,其中由于管路附件(如阀门)进行调节导致的,其实质是由于阀门等部件调节使相应管段的管道阻抗  $S$  发生了变化,从而引起整个管网的水力工况变化。由此可见,阻抗的辨识是热网仿真计算的基础,能否辨识管网运行时的阻抗将直接决定仿真在实际工程中的应用效果。供热管网阻抗辨识是一个十分复杂的数学反问题,采用传统的优化方法很难找到其全局最优解。遗传算法作为一种适应全局优化的概率搜索算法,具有强鲁棒性,并具有收敛至全局最优解的能力,它的出现为系统参数辨识提供了一种很好的途径和方法。

### 2.1 复杂空间热网阻抗辨识模型

建立正确、合理的数学模型是实现系统参数辨识的基础,结合现有的供热管网流量测点较少、压力测点较多的具体工程实际情况,参考城市给水管网摩擦阻力系数校核模型<sup>[5]</sup>,建立了热网阻抗辨识数学模型,见式(11),(12)。

$$\min F(S) = \sum_{i=1}^L \left( D_{pt} \sum_{i=1}^r W_{pti} \left| \frac{p_{cti} - p_{c0ti}}{p_{c0ti}} \right| \right) \quad (11)$$

约束条件:

$$\left. \begin{aligned} A_k Q_{pk} &= Q_{dk} \\ B_k \Delta H_{pk} &= 0 \\ \Delta H_{pk} &= S_k | Q_{pk} | Q_{pk} - D H_k \\ H_k &= (A_{kt}^T)^{-1} \Delta H_{pkt} + H_b I \\ S_{kmin} &< S_k < S_{kmax} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式(11),(12)中  $L$ ——用于管网阻抗辨识的热网运行工况总数;

$D_{pt}$ ——目标函数中压力的权值;

$r$ ——供热管网中测压点的个数;

$W_{pti}$ ——测压点  $i$  的压力的权值,

$$W_{pti} = f \left( \frac{| p_{cti} - p_{c0ti} |}{\sum_{i=1}^r | p_{cti} - p_{c0ti} |} \right);$$

$p_{cti}$ ——测压点  $i$  的辨识压力;

$p_{c0ti}$ ——测压点  $i$  的实测压力;

$S_{kmin}$ ——管道阻抗  $S_k$  的下限;

$S_{kmax}$ ——管道阻抗  $S_k$  的上限。

热网中的热水介质可作为不可压缩流体处理,在流动属于低速稳态流动、流动状况处于阻力平方区的前提下,该辨识模型具体的物理意义可解释为:在满足供热管网水力条件的约束下,通过辨识空间供热管网阻抗  $S$  值使压力测点的辨识压力值与实测压力值的偏差小于某一给定值。

### 2.2 基于遗传算法的复杂空间热网阻抗辨识步骤

遗传算法具体应用到供热管网阻抗辨识中时,一般按照以下步骤进行:

1) 结合管网实际情况,对待辨识的管道阻抗进行编码,形成该编码方式的遗传个体;

2) 随机生成初始遗传群体;

3) 根据解码后得到的初始遗传群体阻抗值进行管网水力工况计算, 计算目标函数值, 进而评价该群体的适应度;

4) 通过选择、交叉和变异等遗传操作获取新的群体, 进行上述循环操作, 直至满足进化要求, 找到最优解。

### 2.3 遗传算法的实现

对于供热管网阻抗辨识问题, 由于目标函数是复杂的非线性函数, 而且每个约束都是复杂的非线性方程, 如果直接应用标准遗传算法将使其计算效率和精度都下降, 甚至出现不收敛现象。因此, 本文在对基本遗传算法进行适当改进的基础上, 确定了遗传算法的参数。

1) 编码: 考虑到二进制编码方式具有编码、解码简单, 交叉、变异等遗传操作便于实现以及搜索性能强等特点, 管网阻抗采用二进制编码。

2) 选择: 与轮盘赌选择法相比, 锦标赛法选择压力较小, 适当的选取竞赛个体可以改善遗传算法的性能。确定锦标赛法作为选择算子, 每次选一定数量的竞赛个体进行竞争, 取适应度最大的个体作为父个体, 直到选出遗传算法要求的父个体数为止。同时在选择操作过程中, 应用最佳保留策略, 即当前群体中适应度最高或较高的个体不参与交叉、变异等遗传操作, 而是用它替换本代经过遗传操作后所产生的适应度最低的个体, 以保证收敛至全局最优解。

3) 交叉、变异: 遗传算法中交叉概率和变异概率的选择是影响遗传算法操作和性能的关键, 本文通过应用 Srinivas 等人提出的自适应遗传算法<sup>[6]</sup>, 根据适应度自动改变交叉概率和变异概率, 提高了算法的自适应性, 加快了收敛速度。另外, 为了防止在进化过程中出现遗传漂移现象<sup>[7]</sup>, 使新一轮的进化偏离或者不能及时按照最优方向进行, 本文在交叉算子中引入了父子竞争机制。父子竞争机制的原理来自生物进化中的优胜劣汰, 两父代交叉产生两个新子代, 当两个子代中具有最大适应值的个体值大于或等于父代中具有最大适应值的个体时, 认为子代优于父代, 用子代替换父代, 否则保留父代, 让其进入下一轮的进化, 这样一来就不会只要进行交叉算子操作子代就替换父代, 而是在父子两代中选择最优的个体进入下一代, 子代总是优于或者等于它们的父代, 使进化总是朝着最优的

方向进行。

### 3 算例分析

现以图 1 所示的多热源环状热网为例说明热网仿真与阻抗辨识的实现过程。热网的拓扑结构参数如前文所述。用户设计流量、管段长度、管径等热网基本参数均为已知量, 由于篇幅所限, 在此不一一列出。管网循环水泵的运行台数与具体的型号根据设计计算得到的热源流量与热源进出口压差确定, 设计工况下 1 号热源循环泵组为 28SA-10 型的水泵, 三用一备; 2 号热源循环泵组为 14Sh-6A 型的水泵, 三用一备。

压力测点位于热源及热用户的进口与出口, 共计 30 个, 实测压力值为压力表读数值。由于热源设有流量测点并且在进、出口设有压力测点, 其阻抗可通过实测值计算确定, 而热用户处只有压力测点, 无流量测点, 热用户所在管段的阻抗无法通过实测值计算确定, 因此辨识模型中的待求变量为供水管网各管段、回水管网各管段和热用户所在管段的阻抗, 共计  $36 \times 2 + 13 = 85$  个。通过改变两个热源的循环水泵并联运行台数组合确定 5 个不同的供热管网运行工况, 获得共计 150 个压力测量数据。

遗传算法的各项参数为: 群体规模 (popsize) = 150; 最大运行代数 (maxruns) = 100; 交叉概率与遗传概率根据自适应方法确定。

辨识计算结果的比较分析如图 5 所示, 热网阻抗辨识误差在 5% 之内, 表明该辨识方法的辨识精度是较高的。

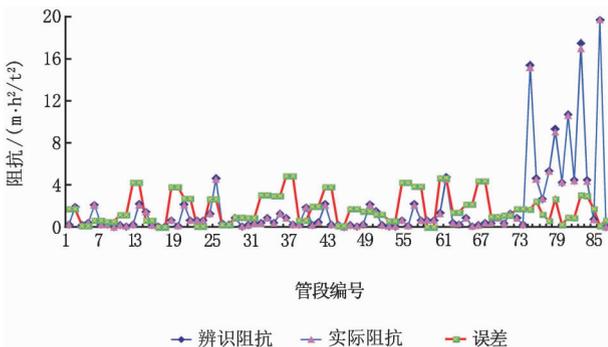


图 5 辨识结果与实测值的比较

将辨识得到的管网阻抗代入上文所述的仿真数学模型, 计算管网压力测点相对应的节点压力值, 并与压力测点的实际值进行比较, 确定仿真计算的误差, 计算结果如表 1 所示。从表中可以看

