

# 热水集中供热管网泄漏故障诊断模型

周守军<sup>1,2,3</sup>, 郭敏<sup>1</sup>, 孙浩森<sup>1</sup>, 孔凡利<sup>4</sup>

- (1. 山东建筑大学热能工程学院, 山东 济南 250101;  
2. 可再生能源建筑利用技术省部共建教育部重点实验室, 山东 济南 250101;  
3. 山东省建筑节能技术重点实验室, 山东 济南 250101;  
4. 青岛海众热能股份有限公司, 山东 青岛 266314)

**摘要:**为了降低热水集中供热管网泄漏故障率及提高故障点检测效率,应用网络图论理论,建立管网节点泄漏水力工况计算模型。该模型采用供热管网平面拓扑结构,能够对管网节点泄漏工况进行模拟与预测。针对模拟管网水泵定扬程运行方式,分析供回水干管不同泄漏节点、不同泄漏量对管网水力工况的影响。结果发现:供水干管发生泄漏,会导致用户压差及流量减小;而回水干管发生泄漏,则增大。无论供水或回水干管,泄漏点之前各用户离泄漏点越近,变化程度越大;泄漏点之后各用户变化程度相同,且均大于泄漏点之前各用户。

**关键词:**集中供热;供热管网;泄漏;故障诊断;模型;水力工况

中图分类号:TU995 文献标志码:A

## Model of leakage fault diagnosis for the pipe network of hot-water district heating

ZHOU Shou-jun<sup>1,2,3</sup>, GUO Min<sup>1</sup>, SUN Hao-sen<sup>1</sup>, KONG Fan-li<sup>4</sup>

- (1. School of Thermal Energy Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;  
2. Key Laboratory of Renewable Energy Utilization Technologies in Buildings, Ministry of Education, Jinan 250101, China;  
3. Shandong Key Laboratory of Building Energy-saving Technique, Jinan 250101, China;  
4. Qindao Haizhong Boiler Co., Ltd, Qindao 266314, China )

**Abstract:** To reduce leakage faults and improve the efficiency of fault detection for hot-water district heating network, a hydraulic-condition calculation model of node leakage was established based on the network graph theory, which adopted plane topology of a heating network, and could simulate and predict its leakage conditions. Aiming to the fixed pump head of the simulated network, the hydraulic conditions of different leakage nodes and different leakage rate at supply and return water main pipelines were analyzed. Finally, it was found that users' pressure and flow decreased when the supply pipeline leaked, and the leakage of return pipeline caused opposite results. Whatever, the neighboring was influenced more than others for users before the leakage-node, the while users behind the leakage-node changed in the same and the changing extent exceeded the former.

**Key words:** district heating; heating network; leakage; fault diagnosis; model; hydraulic conditions

## 0 引言

集中供热在国外,特别是俄罗斯及北欧各国的发展应用均处于世界领先地位,亚洲的韩国、日本在集中供热方面也发展迅速<sup>[1-8]</sup>。我国随着近十年经济的快速发展,城市不断扩容以及城镇化,集中供热事业得到了长足的发展,供热管网的规模不断扩大,型式越来越复杂<sup>[9-14]</sup>。同时,供热管网发生故障的次数也越来越多,特别是一些运行多年的旧管网。一般中小管道比大直径管道因腐蚀发生故障次数多,另外,供水管道因为管内流体温度高,腐蚀速度加快,其故障次数比回水管道多<sup>[15]</sup>。无论何种故障,都容易引起管网泄露的发生。传统的人工检测方法易受到各种因素的影响,可能延误排除故障的时机,增加故障的危害和影响。本研究提出建立热水集中供热管网节点泄漏模型,模拟并分析不同节点、不同泄漏量时,供热管网压力及流量分布的变化特点与规律,以实现管网泄露的早期预测及诊断,从而做到早发现、早处理,最大限度的降低泄露故障对供热管网运行的影响,提高供热管网运行管理水平,降低能源消耗。

## 1 热水集中供热管网节点泄漏模型

由于供热管网分支处需要开孔焊接,连接分支管路,并且分支处都安装分支管路阀门,因此分支点比普通管道更易发生泄露事故。同时,泄漏点发生在节点,不改变原管网的拓扑结构,从而可以采用平面拓扑结构,简化建模<sup>[16]</sup>。

热水集中供热管网泄漏模型方程组如下<sup>[17-18]</sup>:

$$\begin{cases} \mathbf{A} \cdot \mathbf{G} = \mathbf{Q}; \\ \mathbf{B}_f \cdot \Delta \mathbf{H} = 0; \\ \Delta \mathbf{H} = \mathbf{S} \cdot |\mathbf{G}| \cdot \mathbf{G} + \mathbf{Z} - \mathbf{P}, \end{cases} \quad (1)$$

式中,对于一个具有  $n+1$  个节点,  $m$  个管段的热网,则  $\mathbf{A}$  为管网关联矩阵,为  $n \times m$  阶矩阵,它唯一代表管网的拓扑结构,其秩  $\text{Rank}(\mathbf{A}) = n$ ;  $\mathbf{B}_f$  为管网基本回路矩阵,为  $(m-n) \times m$  阶矩阵;  $\mathbf{G}$  为管段流量向量,  $\mathbf{G} = (\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \dots, \mathbf{G}_m)$ ;  $\Delta \mathbf{H}$  为管段阻力压降,  $\Delta \mathbf{H} = (\Delta \mathbf{H}_1, \Delta \mathbf{H}_2, \dots, \Delta \mathbf{H}_m)$ ;  $\mathbf{S}$  为管段阻力特性系数矩阵( $m$  阶对角矩阵),  $\mathbf{S} = \text{diag}\{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ ;  $|\mathbf{G}|$  为管段流量  $\mathbf{G}$  的绝对值  $m$  阶对角矩阵,  $|\mathbf{G}| = \text{diag}\{|\mathbf{G}_1|, |\mathbf{G}_2|, \dots, |\mathbf{G}_m|\}$ ;  $\mathbf{P}$  为管段的水泵向量,  $\mathbf{P} = (\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_m)^T$ , 当管段不含水泵时,该管段  $\mathbf{P} = 0$ ; 当有水泵时,  $\mathbf{P}$  为水泵扬程;  $\mathbf{Z}$ : 管段支路中两

节点的位能差向量,  $\mathbf{Z} = (\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \dots, \mathbf{Z}_m)^T$ ;  $\mathbf{Q}$  为节点流量。对于泄漏点,  $\mathbf{Q}$  即为泄露量  $q$ ; 管网补水定压点补水量  $\mathbf{Q} = -q$ ; 其余节点  $\mathbf{Q} = 0$ 。

式(1)对应的求解模型如下:

$$\mathbf{M}^k \Delta \mathbf{G}_i^k = -\Delta \mathbf{h}^k, \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{M}$  为马克斯威(max Well)矩阵,是以  $\mathbf{B}_f$  为基础的  $(m-n) \times (m-n)$  阶的对称正定矩阵。  $\mathbf{M}$  矩阵对应于一定的树,不同的树,相对应的  $\mathbf{M}$  矩阵也不同;  $\Delta \mathbf{G}_i$  为连枝流量 2 次迭代差值向量;  $\Delta \mathbf{h}_k$  为基本回路管段压降代数,当  $\mathbf{G}^k$  为方程组的解时,其值为 0。

## 2 改进平方根法

平方根法就是利用对称正定矩阵的三角分解而得到的求解对称正定方程组的 1 种有效方法,该方法约为一般直接 LU 分解法计算量的一半。改进平方根法与平方根法计算量差不多,但不需要开方计算<sup>[19]</sup>。

式(2)中的  $\mathbf{M}$  矩阵就是对称正定矩阵,且所有顺序主子式均不为 0,则根据改进平方根法定理,  $\mathbf{M}$  矩阵可唯一地分解为

$$\mathbf{M} = \mathbf{LDL}^T, \quad (3)$$

式中  $\mathbf{D}$  的对角元素均为正数。若设  $k = m - n$ , 则

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1k} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{k1} & m_{k2} & \cdots & m_{kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ l_{21} & 1 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ l_{k1} & l_{k2} & \cdots & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_1 & & & \\ & d_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & d_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & l_{21} & \cdots & l_{k1} \\ & 1 & & l_{k2} \\ & & \ddots & \cdots \\ & & & 1 \end{bmatrix},$$

式(2)就化为

$$(\mathbf{LDL}^T)^k \Delta \mathbf{G}_i^{k+1} = -\Delta \mathbf{h}^k \mathbf{LDL}^T, \quad (4)$$

由矩阵乘法,且  $l_{jj} = 1$ ,  $l_{jr} = 0 (j < r)$ , 得

$$a_{ij} = \sum_{r=1}^k (\mathbf{LD})_{ir} (\mathbf{L}^T)_{rj} = \sum_{r=1}^{j-1} (l_{ir} d_r l_{jr} + l_{ij} d_j l_{jj}), \quad (5)$$

为了避免重复计算,引进  $t_{ij} = l_{ij} d_j$ , 则可得按行计算  $\mathbf{L}$ 、 $\mathbf{T}$  元素的公式为

$$\begin{cases} d_1 = a_{11}; \\ t_{ij} = a_{ij} - \sum_{r=1}^{j-1} t_{ir} l_{jr}, & j = 1, 2, \dots, i-1; \\ l_{ij} = t_{ij} / d_j, & j = 1, 2, \dots, i-1; \\ d_i = a_{ii} - \sum_{r=1}^{i-1} t_{ir} l_{ir}, & i = 2, 3, \dots, k. \end{cases} \quad (6)$$

令  $y^{k+1} = (\mathbf{DL}^T)^k \Delta \mathbf{G}_i^{k+1}$ , 只须求解 2 个简单的

三角形方程组:

$$(1) \text{ 解 } \mathbf{L}^k \mathbf{y}^{k+1} = -\Delta \mathbf{h}^k, \text{ 顺代求出 } \mathbf{y}^{k+1}, \quad (7)$$

$$(2) \text{ 解 } (\mathbf{DL}^T)^k \Delta \mathbf{G}_i^{k+1} = \mathbf{y}^{k+1}, \text{ 回代求出 } \Delta \mathbf{G}_i^{k+1}. \quad (8)$$

将矩阵方程(7)展开即可得到以下关系式:

$$\begin{cases} y_1 = -\Delta h_1; \\ y_i = -\Delta h_i - \sum_{r=1}^{i-1} l_{ir} y_r; \quad i = 2, 3, \dots, k. \end{cases} \quad (9)$$

然后,由式(8),可求出以下关系式:

$$\begin{cases} \Delta G_{ik} = y_k / d_k \\ \Delta G_{li} = y_i / d_i - \sum_{r=i+1}^k l_{ri} \Delta G_{lr} \quad i = k-1, \dots, 2, 1. \end{cases} \quad (10)$$

### 3 采用模拟管网,对不同泄露工况管网水力特性模拟与分析

#### 3.1 热水集中供热模拟管网

如图1所示,模拟管网为1个单热源枝状管网,

包含10个二级换热站。该模型包含了城镇热水集中供热管网的主要特性,但在一些细节上进行了适当的简化,以方便管网建模。模拟管网共分为31个管段,22个节点。管段及节点标号见图1。模拟管网设计总流量为1000 m<sup>3</sup>/h,平均分配给10个换热站,即每个二级站用户1次侧设计流量为100 m<sup>3</sup>/h<sup>[20]</sup>。

该模拟管网取用户支路为连枝,每个树枝管段长度均为750 m,连枝管段分供回水2部分,均为50 m。靠近热源的供回水管路前7个管段管径为DN500,后3个及连枝管段管径均为DN250。管网设计压降为0.939 MPa,选用2台立式热水泵DFRG250-500,水泵转速为1450 r/min。采用变频水泵补水定压方式,选择节点12点(即水泵回水入口)作为定压点,定压点压力考虑防止管网汽化、倒灌等因素,取为0.15 MPa。各换热站调节阀可调节比R=3.5,最大流量Q<sub>max</sub>=140 m<sup>3</sup>/h。模拟管网设计工况时,供回水压力分布见图2。

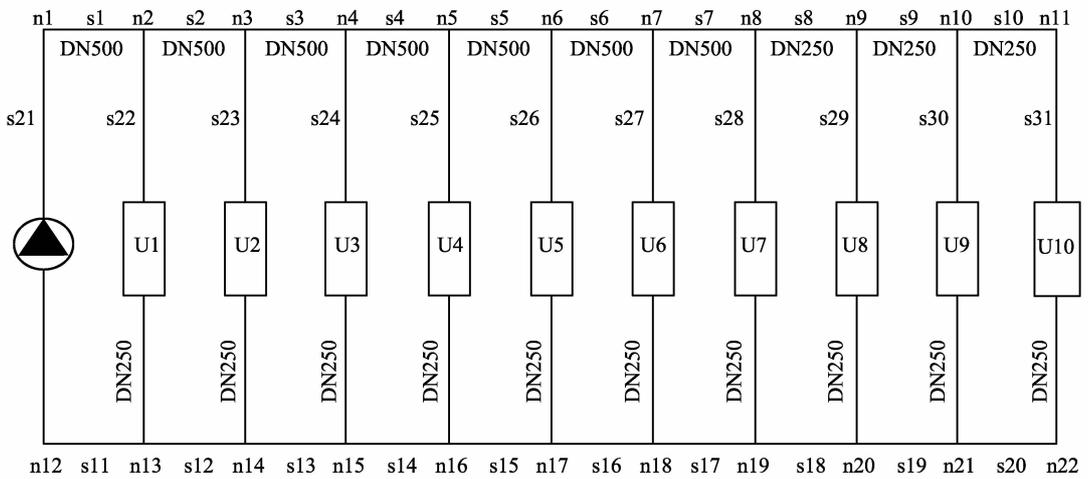


图1 热水集中供热模拟管网示意图

Fig. 1 The simulated network diagram of hot-water district heating system

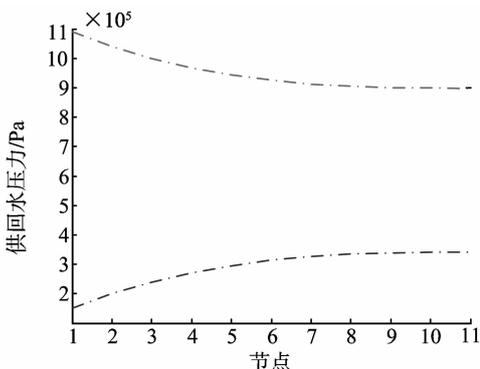


图2 设计工况时,供回水压力示意图

Fig. 2 Supply and return pressure of design condition

#### 3.2 不同泄露工况水力模拟与分析

(1)泄露工况A:供水管1个泄露点,在中间用

户U5进口节点处,泄露量为该点入口流量的10%,即60 m<sup>3</sup>/h。

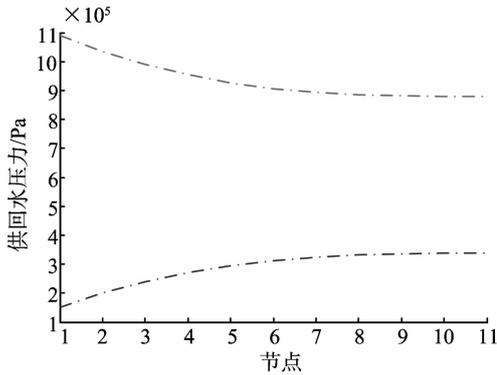
(2)泄露工况B:由于供水管发生泄露的可能性高于回水管,因此分析供水管2点泄露(中间用户U5进口节点及最末端用户U10进口节点),两点泄露量均为该点入口流量的20%,即分别为120 m<sup>3</sup>/h与20 m<sup>3</sup>/h。

(3)泄露工况C:回水管1个泄露点,在中间用户U5出口节点处,泄露量为该点入口流量的10%,即60 m<sup>3</sup>/h。

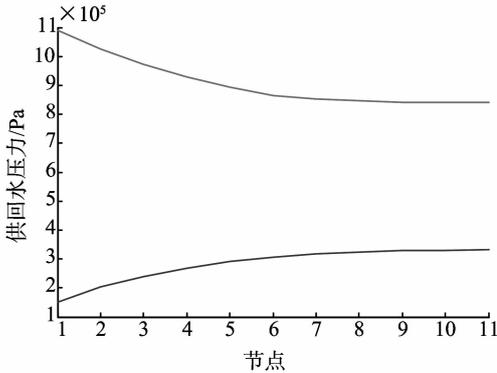
泄露工况A的总流量之差为泄露量。最近端用户流量最大,然后依次减少直至泄露点。泄露点之后各用户(包括用户U5)为等比失调,失调度一致。

若将泄露量增大至节点入口流量的30%，即 $180\text{ m}^3/\text{h}$ ，则由图3可以看出，各用户供水压力下降更多，而回水压力曲线不变，则各用户资用压差下降更多。管网总流量增大到 $1\ 136\text{ m}^3/\text{h}$ ，而各用户流量和却减至 $956\text{ m}^3/\text{h}$ 。

时的情况。用户资用压差明显降低，如表1所示，最末端用户的资用压差降低最大，达到8.42%。各用户流量均小于设计流量，最近端用户流量最大，然后依次降低，如表2所示。



(a) 泄露量为10%



(b) 泄露量为30%

图3 泄露工况A,不同泄露量时供回水压力分布

Fig. 3 Supply and return pressure of different leakage rates for leakage condition A

泄露工况B如图4所示，供水压力下降及回水压力上升的均比较明显，其程度大于只有1点泄露

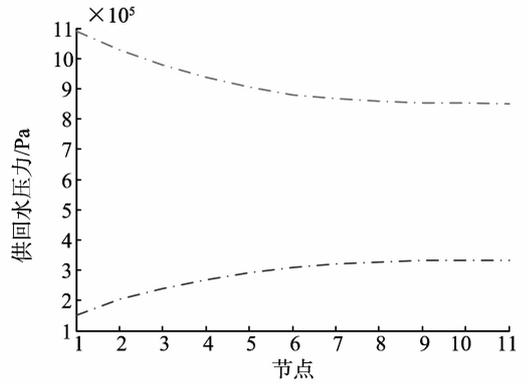


图4 泄露工况B时，供回水压力示意图

Fig. 4 Supply and return pressure diagram of leakage condition B

泄露工况C如图5所示，回水管发生泄漏，导致各用户供、回水压力均下降。

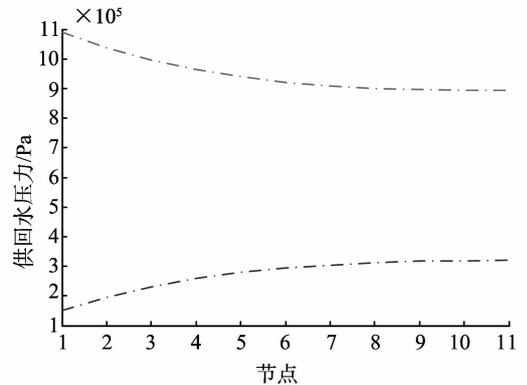


图5 泄露工况C时，供回水压力示意图

Fig. 5 Supply and return pressure diagram of leakage condition C

表1 不同泄露工况时,各用户资用压差分布

Table 1 The pressure difference distribution of users for different conditions

| 用户 | 设计工况 /MPa | 泄露工况 A /MPa | 相对降低值/% | 泄露工况 B /MPa | 相对降低值/% | 泄露工况 C /MPa | 相对降低值/% |
|----|-----------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
| 1  | 0.840     | 0.830       | 1.12    | 0.818       | 2.64    | 0.843       | -0.43   |
| 2  | 0.759     | 0.747       | 1.63    | 0.730       | 3.85    | 0.766       | -0.92   |
| 3  | 0.696     | 0.681       | 2.20    | 0.660       | 5.18    | 0.706       | -1.44   |
| 4  | 0.647     | 0.629       | 2.78    | 0.605       | 6.56    | 0.660       | -1.96   |
| 5  | 0.612     | 0.591       | 3.35    | 0.563       | 7.93    | 0.627       | -2.48   |
| 6  | 0.587     | 0.567       | 3.35    | 0.539       | 8.08    | 0.604       | -2.94   |
| 7  | 0.571     | 0.552       | 3.35    | 0.524       | 8.21    | 0.588       | -2.94   |
| 8  | 0.562     | 0.543       | 3.35    | 0.515       | 8.31    | 0.578       | -2.94   |
| 9  | 0.558     | 0.539       | 3.35    | 0.511       | 8.38    | 0.574       | -2.94   |
| 10 | 0.557     | 0.538       | 3.35    | 0.510       | 8.42    | 0.573       | -2.94   |

表2 不同泄露工况时各用户流量分布  
Table 2 The flow distribution of users under different leakage conditions

| 用户    | 设计工况<br>$/(m^3 \cdot h^{-1})$ | 泄漏工况 A(a)<br>$/(m^3 \cdot h^{-1})$ | 泄漏工况 A(b)<br>$/(m^3 \cdot h^{-1})$ | 泄漏工况 B<br>$/(m^3 \cdot h^{-1})$ | 泄漏工况 C<br>$/(m^3 \cdot h^{-1})$ |
|-------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1     | 100                           | 99.44                              | 98.27                              | 98.68                           | 100.2                           |
| 2     | 100                           | 99.18                              | 97.45                              | 98.05                           | 100.5                           |
| 3     | 100                           | 98.90                              | 96.55                              | 97.37                           | 100.7                           |
| 4     | 100                           | 98.60                              | 95.60                              | 96.66                           | 101.0                           |
| 5     | 100                           | 98.31                              | 94.64                              | 95.95                           | 101.2                           |
| 6     | 100                           | 98.31                              | 94.64                              | 95.87                           | 101.5                           |
| 7     | 100                           | 98.31                              | 94.64                              | 95.81                           | 101.5                           |
| 8     | 100                           | 98.31                              | 94.64                              | 95.75                           | 101.5                           |
| 9     | 100                           | 98.31                              | 94.64                              | 95.72                           | 101.5                           |
| 10    | 100                           | 98.31                              | 94.64                              | 95.70                           | 101.5                           |
| 用户流量和 | 1 000                         | 986.00                             | 956.00                             | 965.60                          | 1 011.1                         |
| 管网总流量 | 1 000                         | 1 046.00                           | 1 136.00                           | 1 105.60                        | 1 011.1                         |

各用户资用压差如表1所示,其相对降低百分比均为负值,即各用户资用压差均升高。泄漏点之前各用户(包括用户U5)的升高幅度,从热源开始,逐渐增大;而泄露点之后用户的资用压差升高幅度完全相同,且高于泄漏点之前各用户升高程度。管网流量增大到1 011.1 m<sup>3</sup>/h,各用户流量均大于设计流量,且各用户流量和与管网总流量正好相等,如表2所示。泄露点之前各用户(包括用户U5)为一致失调,离泄漏点越近,水力失调度越大;而泄露点之后用户,其流量高于泄露点之前用户,且各用户流量保持一致,为等比失调。

### 4 结论

本研究基于网络图论理论,建立了热水集中供热管网节点泄漏模型,并采用改进平方根法进行求解。针对1个模拟管网,模拟并分析了其不同泄漏工况时管网压力及流量分布,得到主要结论如下:

(1)当泄漏点在供水管时,管网供水压力下降,各用户压差及流量均下降,且泄漏量越大,泄漏点越多,下降程度越大。泄漏点之前用户,离泄漏点越近,压差及流量下降程度越大;泄漏点之后用户,压差及流量下降程度相同,且均大于泄漏点之前。管网回水压力变化不大,各用户流量和等于管网总流量与泄漏量之差。

(2)当泄漏点在回水管,管网供、回水压力均下降,各用户压差及流量均增大。泄漏点之前用户,离泄漏点越近,压差及流量增大程度越大;泄漏点之后用户,压差及流量增大程度相同,且均大于泄漏点之前。各用户流量之和等于管网总流量。

无论何种工况,泄漏都会导致管网流量增大,水泵电耗增加,补水量增大,从而增加供热管网的运行成本及能源消耗。本研究结果可为集中供热管网泄漏故障诊断方法的进一步深入研究打下良好的基础,并可促进城镇集中供热系统故障诊断及运行管理水平的不断提高。

### 参考文献:

[1] SVEN W. District heating in Sweden 1948-1990 [J]. Fernwaerme International, 1991, 20(11): 8.

[2] 张沈生,孙晓兵,傅卓林. 国外供暖方式现状与发展趋势[J]. 工业技术经济, 2006, 25(7):131-134.  
ZHANG Shensheng, SUN Xiaobing, FU Zhuolin. Status and development trend of heating mode in foreign[J]. Industrial Technology & Economy, 2006, 25(7):131-134.

[3] 邹平华. 借鉴俄罗斯经验积极发展我国集中供热事业[J]. 暖通空调, 2000, 30(4):33-37.  
ZOU Pinghua. Study Russian experience to advance China's central heating industry [J]. HV & AC, 2000, 30(4):33-37.

[4] 韦新东,尹军,全贞花. 日本集中供热(冷)系统的发展现状[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2001(1):28-30.  
WEI Xindong, YIN Jun, QUAN Zhenhua. Development status of central heating (cooling) system in Japan [J]. Journal of Jilin Institute Architectural & Civil, 2001(1): 28-30.

[5] STEVANOVIC V, PRICA S, MASLOVARIC B, et al. Efficient numerical method for district heating system hydraulics[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(5):1536-1543.

[6] JAN E T, HERMAN L B. Hydraulic balance in a district heating system [J]. Euroheat and Power: English Edition, 2007, 4(4):36-41.

- [7] PALSSON O, MADSEN H, SOGAARD H. Predictor-based optimal control of supply temperature in district heating systems [J]. *Control Engineering Practice*, 1993(1): 81-85.
- [8] ZHANG Z. Temperature control strategies for radiant floor heating system[D]. Canada: Concordia University, 2001:16-84.
- [9] 江亿. 我国供热节能中的问题和解决途径[J]. *暖通空调*, 2006, 36(3):37-41.  
JIANG Yi. Problems in improvement of central heating systems in China and possible solutions [J]. *HV&AC*, 2006, 36(3):37-41.
- [10] 唐卫. 热力站自动监控系统基本思路与控制模式分析[J]. *区域供热*, 2001(5): 9-13.  
TANG Wei. Analysis of basic ideas and control mode for thermal station auto-monitoring system [J]. *District Heating*, 2001(5):9-13.
- [11] 秦绪忠,江亿. 集中供热网的可及性分析[J]. *暖通空调*, 1999, 29(1): 2-7.  
QIN Xuzhong, JIANG Yi. Accessibility analysis of district heating networks [J]. *HV&AC*, 1999, 29(1):2-7.
- [12] 秦绪忠,江亿. 多热源并网供热的水力优化调度研究[J]. *暖通空调*, 2001, 31(1):11-16.  
QIN Xuzhong, JIANG Yi. Hydraulic optimization of multi heat source heating networks [J]. *HV & AC*, 2001, 31(1):11-16.
- [13] 石兆玉,赵红平,束际万. 环形供热系统模拟水力计算[J]. *区域供热*, 1992(3): 11-24.  
SHI Zhaoyu, ZHAO Hongping, SHU Jiwan. Simulation hydraulic calculation of annular heating system [J]. *District Heating*, 1992(3):11-24.
- [14] 王晓霞,周志刚,邹平华. 多热源多环空间热网水力工况模拟与分析方法[J]. *暖通空调*, 2004, 34(11):131-135.  
WANG Xiaoxia, ZHOU Zhigang, ZOU Pinghua. Simulation and analysis method for hydrodynamic conditions of three dimensional networks with multiple heat sources and multi-loops [J]. *HV&AC*, 2004, 34(11):131-134.
- [15] 邹平华,雷翠红,王威. 热网故障与提高热网可靠性的措施[J]. *暖通空调*; 2008, 38(11):7-12.  
ZOU Pinghu, LEI Cuihong, WANG Wei. Heat-supply network failure and measure for reliability improving [J]. *HV&AC*, 2008, 38(11):7-12.
- [16] 雷翠红. 供热管网泄露故障诊断的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 2010:26-27.  
LEI Cuihong. Study on leakage fault diagnosis for heating network [D]. Harbin: School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 2010:26-27.
- [17] 石兆玉,王兆霖,赵洪平,等. 热网水力工况模拟分析及其在初调节中的应用[J]. *区域供热*, 1991(1):5-9.  
SHI Zhaoyu, WANG Zhaolin, ZHAO Hongping, et al. Simulation and analysis of heating-network hydraulic conditions and its application at the beginning regulation [J]. *District Heating*, 1991(1):5-9.
- [18] 周守军,赵有恩,陈明九,等. 集中供热系统水力调节方法[J]. *山东大学学报:工学版*, 2009, 39(3):151-153.  
ZHOU Shoujun, ZHAO Youen, CHEN Mingjiu, et al. Research of the hydraulic adjustment method for a district heating system[J]. *Journal of Shandong University: Engineering Science*, 2009, 39(3):151-153.
- [19] 李庆扬. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008:156-159.
- [20] 周守军. 基于管网动态模型的集中供热系统参数预测及运行优化研究[D]. 济南: 山东大学能源与动力工程学院, 2012: 56-58.  
ZHOU Shoujun. Operational parameters prediction and optimization research of district heating system based on pipe network dynamic model [D]. Jinan: School of Energy and Power Engineering, Shandong University, 2012:56-58.

(编辑:陈燕)