

集中供热管网的水力平衡优化

王建国¹, 徐文晓²

(1.洛阳北控水务集团有限公司新区热力分公司,河南 洛阳 471000;

2.代傲表计(济南)有限公司,山东 济南 250000)

摘要:为了对集中供热管网二次网进行水力平衡优化,基于质量守恒、能量守恒和图论,提出了水力数学模型,给出了数值迭代求解算法。基于粒子群优化算法,提出了阻力系数辨识优化算法,可根据用户管段流量测量值,对用户管段的实际阻力系数进行寻优。然后提出了水力平衡优化算法,基于对用户管段流量均衡加以优化的目标,找出阻力系数最优值以用于平衡阀调整。最后应用该水力平衡优化方案对洛阳某小区进行仿真模拟,仿真结果表明该方案可以实现管网水力平衡。

关键词:供热管网;水力模型;粒子群优化;水力平衡

DOI 编码:10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2023.01.008

1 引言

在建筑能源消耗中,尤其在冬季寒冷地区,供暖能耗占比较大。集中供热由热电厂或区域锅炉进行集中热量供给,可以节约单位能耗,提高用户舒适度,但常由于热力不平衡等问题造成热能浪费,有非常大的改进空间^[1]。集中供热系统的节能优化和精细化调节是供热行业未来发展的方向^[2]。

供热系统按照设计运行的各管段和节点流量、压力分布情况称为设计水力工况。但由于设计、施工和运行等多种原因,供热系统在实际运行时很难完全按照设计水力工况运行,有时甚至差别很大,这种设计水力工况和实际水力工况的不一致性称为供热系统的水力平衡失调。水力平衡失调是影响系统供热效果的重要原因,如靠近热力站区域的流量比设计流量大,导致供热过多;而远离热力站的管网末端区域的流量比设计流量小,导致供热不足。因此,水力失调问题是供热系统节能优化与精细化调节的关键问题。

传统的水力失调解决方案,如比例法、补偿法,是结合现场实际情况,由工作人员根据经验依次调整各用户的平衡阀,再根据现场流量和压力测量仪表读数,反复调整。当管网规模较大时,操作繁琐,难以解决水力失调问题。目前主要的研究方案是基于供热管网水力数学模型,根据观测流量和压力数据,计算水力平衡理想情况下各用户管段的最优阻力系数,再通过平衡阀对各用户管段的阻力系数进行调整,重新分配各用户流量,使各用户流量比(实际流量/设计流量)相等,实现水力平衡。该解决方案的核心问题为水力数学模型的建立与管网阻力系数的优化求解。

在管网的水力建模与阻力系数辨识中,市政给水管网的研究历史较长、成果较多,供热管网的水力建模与阻力系数辨识主要从市政给水管网的研究中借鉴而来。供热管网数学模型为基于质量守恒、能量守恒(伯努利方程)和图论的机理模型,该模型能

够反映管网各节点和管段的压力与流量关系。管网各管段的阻力系数在稳态运行期间视为常数,但实际管网由于管道内壁结垢、水中杂质沉积、氧化腐蚀、阻力件老化变形等原因,与设计阻力系数不同。供热管网数学模型可获取准确的管网阻力系数,供热管网的数学建模是供热系统规划建设、水力仿真、运行调节的基础性研究。1970 年以来,国外对给水管网的水力模型与参数辨识问题进行了研究。随着进化优化算法的发展,普遍采用进化算法对水力模型参数进行优化辨识,这些算法主要有遗传算法、蚁群算法、粒子群算法等。

国内研究中,刘永鑫^[3]采用矩阵论的分析方法,提出管网阻力系数辨识的理论依据,并提出了阻力系数辨识的能观性条件。王晋达^[4]对一次网供水管网做了基于遗传算法的阻力系数辨识研究。孙巍^[5]对一次供水管网进行水力建模,并基于粒子群和模拟退火算法对管网阻力系数做了优化,得到最优经济效益的管径参数。杨琪^[6]对二次网供水管网进行了阻力系数辨识研究。以上研究主要对供热管网的一次网进行阻力系数辨识,且搜索范围一般约束在设计值的±30%,其结果用于对供水主管段的直径进行辅助设计。而本题的目的着重于解决二次网的水力平衡失调问题,需要对末端用户管段进行阻力系数辨识,得到的结果再辅助工程人员现场调整用户的平衡阀开度,进行水力失调校正。

2 集中供热管网的水力数学模型

2.1 基本回路法水力模型

以供热管网的局部用户建筑为例,如图 1 所示,1 到 8 为节点,节点之间为管段。根据图论原理,可将图 1 的管网图画为图 2 所示的节点-管段图。每个管段为一条边,管段的连接点为节点。主管在节点 1 和节点 8 处假设为虚拟管段连接,由虚拟水泵提供扬程压力。该图包括 8 个节点与 10 个管段。

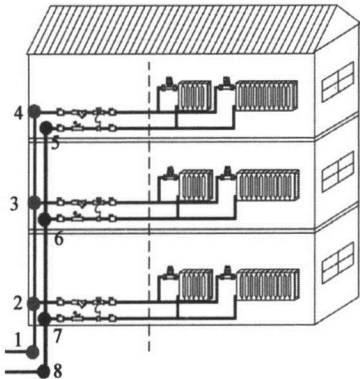


图 1 供热管网图

根据图 2,定义水力模型基本变量如下:
 c :回路,图中有 n 个回路, $c_1, c_2, \dots, c_n$;
 v :节点,有 $n+1$ 个节点, $v_1, v_2, \dots, v_{n+1}$;
 e :管段,有 b 个管段, $e_1, e_2, \dots, e_b$;
 q :节点流量;
 p :节点压力;
 g :管段流量;
 Δh :管段压差;
 s :管段阻力系数;
 z :管段高度水头;
 dh :管段水泵扬程压降。

将节点与管段的流量和压力用向量表示,有:

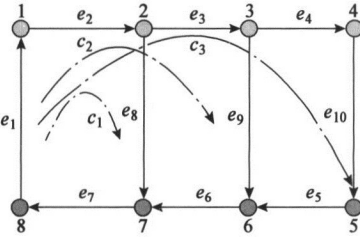


图 2 节点-管段图

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_b \end{bmatrix}$$
$$\Delta H = \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \vdots \\ \Delta h_b \end{bmatrix}$$

根据质量守恒定律,可对管网图上的节点建立流量平衡方程,即每个节点的流入流量等于流出流量,得到节点连续性方程:

$$AG=Q \tag{1}$$

A 矩阵为基本关联矩阵,定义如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 与管段 } j \text{ 相关联, } q_j \text{ 流入节点 } i \\ -1, & \text{节点 } i \text{ 与管段 } j \text{ 相关联, } q_j \text{ 流出节点 } i \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 与管段 } j \text{ 不关联} \end{cases}$$

由图 2 可知,管段的独立流量实际上只有 3 个用户流量 g_8, g_9, g_{10} ,其余管段流量均可由这 3 个流量表示。从图论理论分析,这 3 个管段为一组链支,其余管段为树枝。将关联矩阵 A 和流量 G 按照树枝-链支分块表示:

$$A = [A_t \ A_l] \quad G = [G_t \ G_l]^T$$

下标 t 表示树枝, l 表示链支。

则式(1)的节点连续性方程可以写成:

$$A_t G_t + A_l G_l = Q \tag{2}$$

树枝矩阵 A_t 为满秩可逆矩阵,可将树枝管段流量 G_t 用链支管段流量 G_l 表示:

$$G_t = A_t^{-1}(Q - A_l G_l) \tag{3}$$

则管段流量 G 可以用链支管段流量和节点流量表示:

$$G = \begin{bmatrix} G_t \\ G_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_t^{-1}A_l \\ I \end{bmatrix} G_l + \begin{bmatrix} A_t^{-1} \\ 0 \end{bmatrix} Q \tag{4}$$

节点树与每条链支可以构成一个基本回路,如图 2 所示有 3 个基本回路。根据能量守恒定律,每个回路上各个管段的压差之和等于零,可以写出如下的回路能量方程:

$$B\Delta H = 0 \tag{5}$$

式中:0—b 维零向量;

B—基本回路矩阵。该矩阵的定义如下:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{管段 } j \text{ 在回路 } c_i \text{ 中, } q_j \text{ 与回路方向相同} \\ -1, & \text{管段 } j \text{ 在回路 } c_i \text{ 中, } q_j \text{ 与回路方向相反} \\ 0, & \text{管段 } j \text{ 不在回路 } c_i \text{ 中} \end{cases}$$

根据树枝-链支管段关系,可将 B 分块表示为:

$$B = [B_t \ I]$$

式中: B_t —树枝回路矩阵。

当 A 与 B 对应管道排列次序一致时,有:

$$BA^T = AB^T = 0 \tag{6}$$

将 A 和 B 的分块表示形式代入式(6),可以得到:

$$B = [(-A_t^{-1}A_l)^T \ I] \tag{7}$$

式(7)说明,只要得到基本关联矩阵 A,根据节点树将其分块为 A_t 和 A_l ,可以直接计算基本回路矩阵 B。

将式(7)代入式(4),可以得到流量 G 的计算式:

$$G = B^T G_l + A_Q Q \tag{8}$$

$$A_Q = \begin{bmatrix} A_t^{-1} \\ 0 \end{bmatrix}$$

在后续 2.2 节的数值迭代算法中,式(8)用于取代式(4),用基本回路矩阵 B 与链支流量 G_l 来计算流量 G。

在回路能量方程(5)中,管段压降 Δh 由管段阻力压降、管段两端节点位置的高度水头压降 z 和管段内的水泵扬程压降 dh 组成,其中管段阻力压降写成阻力系数与流量平方的乘积,管段压降方程如式(9)所示:

$$\Delta h_j = s_j |g_j| g_j + z_j - dh_j \tag{9}$$

将式(9)写成矩阵形式:

$$\Delta H = S |G| G + Z - DH \tag{10}$$

将节点连续性方程(1)、回路能量方程(5)和管段压降方程(10)联立,就可以得到基本回路法水力模型:

$$\begin{cases} AG = Q \\ B\Delta H = 0 \\ \Delta H = S |G| G + Z - DH \end{cases} \tag{11}$$

在管段压降方程中存在流量的平方项,

因此该数学方程组为非线性方程组,无法直接得到解析解,需要采用数值迭代求解方法。该方程计算后可以得到各管段流量 G 和压降 ΔH ,适合观测点较少,尤其是没有节点压力数据的管网流量计算。

2.2 数值迭代求解算法

基本回路法水力模型的迭代求解特点为:利用链支流量作为求解向量,大幅减少了独立变量的个数;在计算过程中基于“最小生成树”生成基本回路矩阵,迭代的 Maxwell 矩阵不容易出现病态问题,收敛性和计算精度较高。

取 G^k 为流量 G 的第 k 次迭代值,对于式(11),当 G^k 不是方程的解时,回路方程 $B\Delta H$ 不等于零空间向量。定义函数 F 为:

$$F(G) = B\Delta H(G) \quad (12)$$

由于 ΔH 中有 G 的平方项,对 F 在 G^k 处进行泰勒展开,忽略二阶及以上高阶项,得到:

$$F(G) = B\Delta H(G^k) + 2BS | G^k | (G - G^k) \quad (13)$$

假设 G^{k+1} 为最终解,满足 $F(G^{k+1}) = 0$,令上式中的 $G = G^{k+1}$,有:

$$B\Delta H(G^k) + 2BS | G^k | (G^{k+1} - G^k) = 0 \quad (14)$$

定义 G 每次迭代的变化量为:

$$\Delta G^{k+1} = G^{k+1} - G^k \quad (15)$$

式(14)可以写成:

$$B\Delta H(G^k) + 2BS | G^k | \Delta G^{k+1} = 0 \quad (16)$$

根据式(8)可将流量 G 用链支流量 G_l 表示,将式(8)带入式(15),得到:

$$\Delta G^{k+1} = B^T (G_l^{k+1} - G_l^k) = B^T \Delta G_l^{k+1} \quad (17)$$

将式(17)代入式(16),有:

$$B\Delta H(G^k) + 2BS | G^k | B^T \Delta G_l^{k+1} = 0 \quad (18)$$

定义 Maxwell 矩阵 M :

$$M^k = 2BS | G^k | B^T \quad (19)$$

由于采用链支流量,变量数减少,根据相关证明, M^k 矩阵正定可逆,式(18)整理后可以得到:

$$\Delta G_l^{k+1} = -(M^k)^{-1} B\Delta H(G^k) \quad (20)$$

基本回路法水力模型的迭代求解步骤如下:

1)初始化参数:管网阻力系数 S 、节点流量 Q 、管段高度水头 Z 、管段水泵扬程压降 DH 。

2)根据节点-管段图确定基本关联矩阵 A 。

3)基于最小树算法确定一个节点树,将管段网络划分为树枝管段与链支管段,将关联矩阵 A 分块为树枝矩阵 A_t 与链支矩阵 A_l ,并根据式(7)计算基本回路矩阵 B 。

4)初始化链支流量 $G_l^0, k=0$ 。

5)根据链支流量 G_l^k ,带入式(8),计算流量 G^k 。

6)根据式(19),计算矩阵 M^k 。

7)根据式(10),计算管道压降 $\Delta H(G^k)$ 。

8)根据式(20)和式(15),计算链支流量增量 ΔG_l^{k+1} 和链支流量 G_l^{k+1} 。

9)判断链支流量增量 ΔG_l^{k+1} 的终止条件,如果 $\Delta G_l^{k+1} \leq \epsilon$,迭代终止;不满足则 $k = k + 1$,转(5)继续迭代循环。

3 集中供热管网的阻力系数优化辨识

在实际的供热管网中,由于安装不理想,管网运行中出现的内壁结垢、水中杂质沉积、氧化腐蚀、阻力件老化变形等原因,导致实际管段的设计阻力系数与实际运行阻力系数不同。在管网末端的用户管段还安装有平衡阀,工程人员可调整平衡阀来调整用户管段的阻力系数,用于水力平衡调整,因此实际的用户管段阻力系数与设计阻力系数相差很大。在管段阻力系数未知的情况下,应根据已知流量数据与换热站运行数据,基于供热管网数学模型,对管段阻力系数进行优化辨识。本文仅对用户管段进行阻力系数辨识,其余管段的阻力系数与用户管段阻力系数相

比很小,且变化幅度不大,假设等于设计值。

3.1 优化方案

已知管网内部分用户的流量观测数据,建立优化目标函数为:

$$J = \sum_{i=1}^m (g_{obs,i} - g_i)^2 \\ = \|G_{obs} - G\|^2 \quad (21)$$

该目标函数 J 取所有可观测管段的流量观测值 G_{obs} 与经过模型迭代计算的流量值 G 的偏差平方和最小,并写成流量向量的二次范数形式。

优化方案为对目标函数 J 取极小值,优化变量为管网中待优化辨识的用户管段阻力系数 S ,满足阻力系数自变量约束和水力平衡模型(11),优化方案如式(22)所示:

$$\min_{S^*} \|G_{obs} - G\|^2 \quad (22) \\ \text{s.t. } S_{\min} \leq S \leq S_{\max} \\ f(S, G) = 0$$

上式中的水力平衡模型 $f(S, G)$ 采用基本回路法迭代求解,因此优化算法每次迭代得到一个阻力系数 S ,要代入水力平衡模型中迭代求解 G ,再根据目标函数计算下一步 S 的方向和大小。由于约束中的水力模型为隐式约束,且需要迭代求解,导致优化算法无法直接求得 S 的解析解,并且 S 的数量也较大,因此需要采用进化优化求解算法。本文采用粒子群优化算法,该方法在进化优化算法中,具有运算速度快、自适应强、收敛精度高等优点。

3.2 阻力系数辨识的粒子群优化算法

对于本文提出的阻力系数优化辨识问题,粒子群算法定义粒子 X 为待优化的管网阻力系数 S ,粒子的维度 d 为待优化阻力系数的个数。

对于阻力系数优化辨识,粒子群优化算法的流程如下:

1) 初始化参数

① 确定粒子位置的求解空间,即阻力系数的最小值和最大值,定义为粒子位置约束

$X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 。

② 确定粒子速度的求解空间 $V_{\min}$ 和 $V_{\max}$,粒子速度为每次迭代过程中粒子的移动速度,根据位置求解空间选取合适的速度变化范围。速度变化太小,粒子更新太慢;速度变化太快,不容易找到精确的最优解。

③ 粒子数目 N :该值根据求解问题的复杂程度而定,如目标函数的复杂性和粒子维度的大小。一般的优化问题, N 取 20~40 个,复杂的问题可取至 100 个。

④ 停止条件,一般为迭代最大次数。

2) 算法初始化, $k=0$

① 根据粒子数目 N ,在位置求解空间和速度求解空间中,随机初始化各粒子的位置和速度。

$$X(0) = \{X^1(0), \dots, X^i(0), \dots, X^N(0)\} \quad (23)$$

$$V(0) = \{V^1(0), \dots, V^i(0), \dots, V^N(0)\} \quad (24)$$

$X(0)$ 和 $V(0)$ 分别为粒子位置和粒子速度在初始时刻 $k=0$ 时的集合。共有 N 个粒子, X 的上标 i 表示第 i 个粒子。 X^i 为 d 维向量,表示该粒子的位置,即管段阻力系数 S , x_j^i 代表被优化管段的阻力系数 s_j 。每个粒子的速度 V^i 也为 d 维向量,代表该粒子移动的速度。粒子 X^i 与 V^i 如式(25)和式(26)所示。

$$X^i = [x_1^i \dots x_j^i \dots x_d^i] \quad (25)$$

$$V^i = [v_1^i \dots v_j^i \dots v_d^i] \quad (26)$$

② 初始化每个粒子的个体最优解 y_{pb}^i ,该值为每个初始粒子的适应度函数值,即式(21)的目标函数值 J 。初始情况下,每个粒子的最优个体为自身,即 $X_p^i = X^i(0)$ 。

③ 初始化全局最优解 y_{gb} ,即所有粒子适应度函数值的最小值,以及对应的最优粒子 X_g 。

3) 粒子群更新

根据如下的更新公式,对粒子群中的每一个粒子进行速度与位置更新。

$$\begin{aligned} v_j^i(k+1) &= wv_j^i(k) + c_1 \text{rand}[x_{p,j}^i(k) - x_j^i(k)] \\ &\quad + c_2 \text{rand}[x_{g,j}^i(k) - x_j^i(k)] \end{aligned} \quad (27)$$

$$x_j^i(k+1) = x_j^i(k) + v_j^i(k+1) \quad (28)$$

式(27)为速度更新公式,式(28)为位置更新公式。

式中: w —惯性权重因子;
 c_1 和 c_2 —学习因子;
 rand —取 0~1 的随机函数。

4) 最优粒子更新

①根据每个粒子的位置 $X^i(k+1)$, 对应阻力系数 S 的解, 代入水力平衡模型(11), 迭代求解流量 G , 再将 G 和观测值 G_{obs} 代入目标函数 J , 得到每个粒子的适应度函数值, 与个体最优解 y_{pb}^i 比较, 更新个体最优解 y_{pb}^i 和最优个体 X_p^i 。

②根据每个粒子的更新后个体最优解 y_{pb}^i , 与全局最优解 y_{gb} 比较, 更新全局最优解 y_{gb} 和最优粒子 X_g 。

5) 搜索条件判断

满足停止条件, 如到达迭代最大次数, 搜索停止, 输出最优管网阻力系数 $S_{\text{opt}} = X_g$; 否则转(3), $k=k+1$ 。

4 集中供热管网的水力平衡优化

第3节通过对阻力系数的优化辨识, 可以得到用户管段的实际阻力系数。本节将优化方案修改, 重新定义目标函数, 如式(29)所示。该优化目标是使各用户管段的流量均衡分配, 进而得到期望的用户管段阻力系数, 该阻力系数用于工程人员进行平衡阀调整。

$$\begin{aligned} \min_{S^*} \sum_{i=1}^m (g_i - \bar{g})^2 \\ \text{s.t. } S_{\min} \leq S \leq S_{\max} \\ f(S, G) = 0 \end{aligned} \quad (29)$$

上式中, g_i 为根据水力模型(11)迭代计算得到的流量值, $\bar{g}$ 为用户管段的流量平均值。该优化方法不需要使用流量观测值, 优化方法仍使用粒子群算法, 其迭代方法与3.2节一致。需要注意的是, 该优化方案中的阻

力系数搜索范围应与现场平衡阀的工艺上下限相匹配。

5 仿真结果

取洛阳市某小区的二次网供热管网, 如图3所示。该供热管网仅包括换热站到各用户单元楼的热力入口。共有9个热力入口, 每个热力入口有热量表记录流量值。

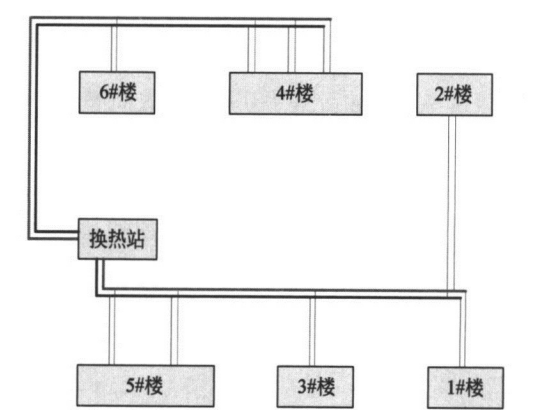


图3 某小区的供热管网图

由于热力入口距离换热站有远有近, 在供热过程中, 供热流量相差较大, 需要工程人员使用平衡阀进行水力平衡调整, 但单靠人工经验很难使9个热力入口的流量完全相等。这里采用本文提出的水力平衡优化方法, 将每个热力入口看作一个热力用户, 首先根据实际流量值对用户阻力系数进行优化辨识。之后再根据流量平衡的优化原则, 计算出最优情况下, 各用户的阻力系数最优值。最后, 根据阻力系数最优值来调整平衡阀, 使管网达到水力平衡。

图4为根据供热管网画出的节点-管段图, 注意该节点-管段图仅为供水部分, 回水部分与供水部分镜像对称。

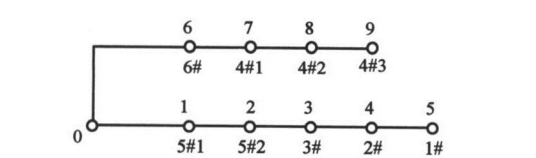


图4 供水管网的节点-管段图

该供热管网包括1个换热站, 9个热力用

户。供水管网的节点编号为 0~9,管段编号为 E1~E9。回水管网与供水管网镜像对称,节点编号为 10~19,管段编号为 E10~E18。9 个热力用户看作虚拟管段,管段编号为 E19~E28。换热站虚拟管段为 E29,其水泵扬程、资用压头等参数已知。

热力用户的流量观测数据如表 1 第 2 行所示,在粒子群优化中,阻力系数的调整范围为[100 1000],优化后得到的阻力系数列入表 1 第 3 行。同时,将表 1 中的流量观测值与阻

力系数辨识值画在图 5 中表示。如图 5 所示,靠近换热站的热力节点 1、2、6 的阻力系数较大,其他热力节点的阻力系数较小,但末端节点 5、9 的流量仍然较小,可对阻力系数进一步调整。

表 1 阻力系数优化辨识结果

热用户	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$G_{obs}/t \cdot h^{-1}$	29.7	29.0	36.5	32.4	23.0	28.1	34.4	33.3	24.9
$S_{opt}/Pa \cdot (t/h)^{-2}$	522	530	207	210	232	508	203	207	217

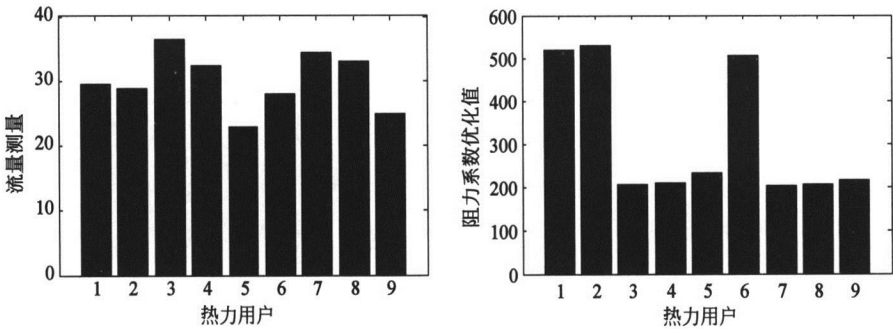


图 5 热力用户的流量观测值与阻力系数优化值

粒子群优化迭代过程如图 6 所示,粒子的个数为 $N=20$,迭代次数 $k=200$ 。从图 6 可以看到,20 个粒子的阻力系数随

迭代次数而收敛到稳态值,而最优函数值在迭代 50 次以后可以看作收敛到最优值。

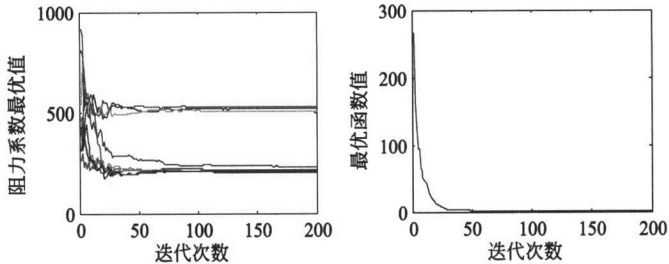


图 6 粒子群优化的迭代过程

为了进一步调整流量平衡,将表 1 中得到的阻力系数优化值作为初始值,代入优化方案(29),阻力系数调整范围仍为[100 1000],考虑流量分配均衡下阻力系数的最优值。表 2 给出了流量平衡优化后的阻力系数与流量值,可以看出,重新调整阻力系数后,可实现各热力用户的流量均衡。

表 2 流量平衡优化结果

热用户	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$G_{opt}/t \cdot h^{-1}$	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3
$S_{opt}/Pa \cdot (t/h)^{-2}$	902	877	714	641	444	850	688	667	510

6 结论

集中供热过程的水力失调问题是供热系统节能优化与精细化调节的关键问题。解决

(下转第 84 页)

实际情况切换为原运行工况,当任一系统端发生事故时,均可通过调节阀门保证另一系统正常供热,缩小停热范围,提高系统运行的安全性、可靠性。

综合运行调节难易程度,在满足条件的情况下,建议优先采用 A1 类串联运行方式; A2 类系统未能充分降低末端温度水平; A3 类系统为保证低温系统运行流量满足要求,整网流量较大,电耗量较多,可根据实际情况选用一次网串联等降温方式。此外,在实际运行中,低温系统采用高温系统回水,温度变化存在一定滞后,应根据实际需求提前进行调节。

未来将不断探讨、继续丰富串联系统的运行模式,根据换热站实际情况进一步研究

高温系统二次回水作为低温系统一次供水等串联运行模式,并可通过增设流量调节阀等自动控制设备,实现在室外温度变化等因素的影响下迅速响应,实现流量的精准调控。

参考文献

- [1] 方豪,夏建军,江亿.北方采暖新模式:低品位工业余热应用于城镇集中供热[J].建筑科学,2012,28(S2):11-14+17.
- [2] 李叶茂,夏建军.增大末端换热面积降低一次网回水温度[J].区域供热,2015(4):29-32+37.
- [3] 战乃岩,沈翔欧,赵艳萍.不同供热形式末端性能研究[J].节能,2019,38(2):65-68.
- [4] 高帅,李保国,郭晓涛,等.换热机组串联降低一次网回水温度的应用研究[J].区域供热,2020(6):52-58.

(上接第 59 页)

水力失调问题的关键要素有两点,一是建立正确的水力数学模型,二是采用有效的管段阻力系数优化算法。本文对供热系统二次网管网建立了基本回路法水力模型,并提出了数值迭代求解算法。对于用户管段的阻力系数,根据用户流量观测值,采用粒子群优化算法进行了阻力系数优化辨识。最后提出了流量均衡优化方案,得到了用户阻力系数的最优值,该结果用于平衡阀校正,表明其可以实现管网水力平衡。

参考文献

- [1] 刘贺明.中国城市供热发展与改革情况[J].区域

供热,2003(3):4-8.

- [2] 中华人民共和国国家统计局.中华人民共和国统计年鉴 2013[R].北京:中国统计出版社,2013.
- [3] 刘永鑫.基于矩阵论的供热管网阻力系数辨识研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [4] 王晋达.基于遗传算法的供热管网阻力系数优化辨识研究[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [5] 孙巍.供热管网的建模分析及水力平衡调节[M].北京:北京化工大学,2008.
- [6] 杨琪.集中供热管网优化控制方案研究[M].青岛:青岛理工大学,2019.