

承担冷负荷的热水网水力工况模拟计算及应用

(清华大学热能系) 付林 江亿

摘要: 阐述了一种承担冷负荷的热水网水力工况逐时模拟计算的基本原理,以及热负荷的确定方法,并给出在泵的工作点和能耗等方面的应用。

关键词: 热水网; 水力工况; 热负荷; 泵; 模拟计算

中图分类号: TK212; TV 131.4

1 引言

近年来,我国许多城市的空调和采暖负荷增长迅速,尤其长江及黄河流域,气候冬寒夏暑,一些城市开始酝酿建设冷热联供热网,在满足大面积采暖和空调负荷的同时,解决城市能源和环境问题。冷热联供热网的形式之一是高温水通过热网输送到各建筑物,提供吸收式制冷机所需热量,还可通过热交换器提供采暖和生活热水。对不宜修建蒸汽热网的市区,这是可行的方案之一。然而,这种冷热联供热网与北方以采暖为主的热网有很大差别,主要表现在:

1.1 负荷变化频繁

空调冷负荷的分布既与运行期间当地气象参数变化有关,更与建筑物的运行使用方式有关,影响因素要比单纯供暖复杂得多。

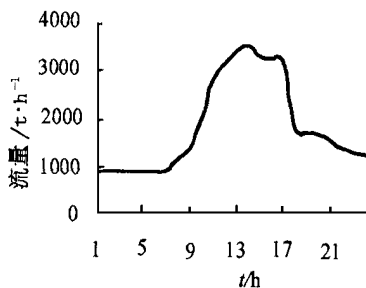


图 1 杭州热网空调期某天流量分布

1.2 热网流量调整幅度大

为保证吸收式制冷机的出力及运行效率,不降低供水温度,故热网运行基本上依靠量调节。由于用户热负荷变化频繁,热网水流量在很大范围内变化。在图 1 中,杭州某热

网夏季一天内要求的流量变化范围相当大,且大部分时间在低于 50% 的负荷下运行。

2 冷热联供热网水力工况计算

水力工况计算是热网设计和运行方案分析的重要依据。通常工程上对热网水力工况的分析仅计算典型工况的水压图,往往手算即可完成。但对于冷热联供热网,其水力工况的复杂性,借助计算机进行模拟计算。

2.1 支状网

以 n 个管路组成的供水管网或回水管网为研究对象,若去掉一个参考节点,可用 $n \times n$ 阶可逆矩阵 A 表示其拓扑结构。该矩阵的元素 a_{ij} 为:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 的流体直接进入支路 } j \\ -1 & \text{支路 } j \text{ 的流体流向节点 } i \\ 0 & \text{支路 } j \text{ 与节点 } i \text{ 不直接连接} \end{cases}$$

各支路流量用 n 阶列向量 G 表示。支路流量在 n 个节点所形成的汇点,即各支路流量矢量在各节点的可用 n 阶列向量 Q 表示,其中的元素 q_i :

$$q_i = \begin{cases} q_{user,j} & \text{节点 } i \text{ 与用户 } j \text{ 相连} \\ 0 & \text{节点 } i \text{ 不与用户相连} \end{cases}$$

上式中的 $q_{user,j}$ 为用户 j 所需的热水量。

各节点相对于参考节点的压差用 n 阶列向量 ΔP (对于供水管网为 ΔP_s ,回水管网为 ΔP_r) 表示,

则由质量守恒得: $AG = Q$ (1)

由动量守恒得: $A^t \Delta P = S | G - \Delta H + \Delta Z$ (2)

式(2)中 $S | G$ 分别表示各支路阻力特性系数和流量绝对值的 $n \times n$ 阶对角矩阵, ΔH 为表示各支路上泵扬程的 n 阶列向量,若支路上无泵时,相应元素为零, ΔZ 表示各支路两端节点位能差的 n 阶列向量。若参考点压力为 P_0 ,则

$$P = \Delta P + IP_0 \quad (3)$$

P 为表示各节点压力的 n 阶列向量, I 为元素均为 1 的 n 阶列向量,即 $I = [1, 1, \dots, 1]^T$ 。由式(1)(2)(3)

收稿日期: 1998-08-19; 修订日期: 1999-06-04

作者简介: 付林(1968-),男,山东微山县人,博士研究生,研究热电联产、区域供热供冷、空调工程以及吸收式制冷等。通讯处: 100084 北京清华大学 1# 楼 381室

可求得供水或回水管网各节点压力或各管路流量

2.2 环形网

若具有 m 个环路的环形网有 $n+1$ 个节点,则表示供水或回水管网拓扑结果的矩阵 A 为 $n \times (n+m)$ 阶,因而是不可逆的。将该矩阵划分为 $A = (A_1 A_2)$, A_1 是 $n \times n$ 阶可逆阵,表示去掉 m 个支路后所形成的支状网思维拓扑结构。 A_2 为 $n \times m$ 阶矩阵,相应于所去掉的 m 个支路。同样由质量守恒和动量守恒得:

$$A_1 G_1 + A_2 G_2 = Q \tag{4}$$

$$A_1 \Delta P = S_1 | G_1 | G_1 - \Delta H_1 + \Delta Z_1 \tag{5}$$

$$A_2 \Delta P = S_2 | G_2 | G_2 - \Delta H_2 + \Delta Z_2 \tag{6}$$

由式(5)(6)联立消去 ΔP 得: $A_2^T A_2^{-1} (S_1 | G_1 | G_1 - \Delta H_1 + \Delta Z_1) = S_2 | G_2 | G_2 - \Delta H_2 + \Delta Z_2$ (7)

其中 G_1, G_2 是相应于 A_1, A_2 的支路流量列向量。由式(4)(7)联立可得供水或回水管网各支路流量。由式(5)可求得各节点相对于参考节点的压差 ΔP ,进而可由式(3)获得各节点的压力 P 。

2.3 热负荷的确定

如果已知各用户所需热水量的逐时需求,可通过上述水力计算获得热网各处压力、流量的逐时值。因此,首先应确定各用户的热负荷。区域冷热联供热网中热用户众多,与负荷计算有关的具体参数难以获得。详细计算各用户建筑物内的热负荷是不现实的。故热负荷的计算需作简化处理。

2.3.1 空调热负荷 空调负荷不仅受气候条件、建筑结构等因素的影响,更取决于建筑物的使用方式。根据建筑物的使用方式将一天中的空调负荷分

为峰期和谷期。峰期空调负荷由建筑负荷和内热源负荷组成。建筑空调负荷可近似地认为与室内外温差成正比。即

$$Q_{c,b}(f) = \frac{t_0(f) - t_i}{t_{0,max} - t_i} k Q_{c,max} \tag{8}$$

其中, $Q_{c,b}(f)$ 为某用户逐时建筑空调负荷, $Q_{c,max}$ 为该用户设计空调负荷, $t_{0,max}, t_i, t_0(f)$ 分别为该用户设计室外、室内和逐时室外温度, k 为建筑空调负荷系数,即建筑空调负荷占空调负荷的比例。其值取决于建筑物的使用性质(见表1)。谷期空调负荷用以满足建筑物最低冷量要求,等于谷期空调负荷系数 λ 与设计空调负荷之积,可认为不随时间变化。

2.3.2 采暖热负荷 对于常规的采暖系统,采暖负荷呈季节性变化,而一天之中变化很少。故可认为采暖负荷一天内保持不变,其值与室温和该天平均外温之差成正比。即

$$Q_h(f) = \frac{t_i - \bar{t}_0(f)}{t_i - t_{0,min}} Q_{h,max} \tag{9}$$

其中, $Q_h(f)$ 为某用户逐时采暖负荷, $Q_{h,max}$ 为该用户设计空调负荷, $t_{0,min}, t_i, \bar{t}_0(f)$ 分别为该用户设计室外温度、室内温度和该天的室外平均温度。

对于冷热联供系统,各建筑物内采暖往往与空调共同使用,诸如风机盘管等调节灵活的空调系统,而无需再安装传热惰性大的暖气片。同时,这种采暖负荷在很大程度上依赖建筑物的使用状况,一天内会有较大幅度的变化,故其计算方法与空调负荷一样,将负荷分为峰期和谷期。峰期采暖负荷的计算与常规采暖负荷计算相同,而谷期采暖负荷值由谷期采暖负荷系数 Γ 与设计采暖负荷之积获得。

表 1 杭州冷热联供热负荷计算的有关参数取值

	写字楼	旅馆	住宅	商场	娱乐场所
K	0.33	0.67	0.6	0.25	0.5
$\lambda(\Gamma)$	0.1	-	0.3	0.1	0.1
负荷峰期时间	8:00~12:00 14:00~18:00	0:00~24:00	8:00~12:00 18:00~24:00	12:00~14:00 9:00~22:00	19:00~24:00
假期	无	0:00~24:00	0:00~24:00	9:00~22:00	8:00~24:00

表1给出了杭州冷热联供热水网热负荷计算的有关参数的取值。用上述方法可计算出冷热联供热水网各用户的逐时热负荷分布,进而可获得各用户所需热水流量的逐时值,得到各时刻 Q 矩阵。

2.4 冷热联供热水网运行方式

不同运行方式的热网,其水力工况会有很大差别。只有运行方式确定后,才可以计算热网的水力工

况。以下引入两种冷热联供热水网的运行方式,即常规热水网的运行方式和回水加压泵运行方式,并给出其中的三个方案。

2.4.1 常规热水网

设置在热力首站的主循环泵保证所有用户所需的资用压头,各用户的负荷调节依靠串接在制冷机或换热器的电动阀门节流实现(见图2)。根据主循

环泵运行方式的不同,主要有两种方案

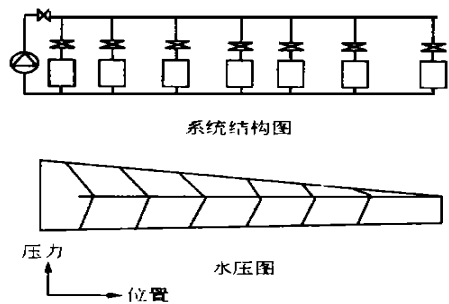


图 2 常规水网示意图

方案 1, 多台主循环泵定速并联运行。在负荷变化时, 这种运行方式可以根据要求的流量改变泵的运行

台数。主循环泵入口位置为热网定压点, 并作为计算回水管网各节点压力 P_r 的参考点, 则由式 (3) 得 P_r , 即: $P_r = \Delta P_r + IP_0$ (10)

计算供水管网各节点压力 P_s 时, 取泵出口作为参考点, 则: $P_s = \Delta P_s + \Delta H + IP_0$ (11)

其中 ΔH 为主循环泵的扬程, 取决于泵的型号。泵的选择依据为: 热网最大负荷下泵的扬程 ΔH_0 能满足此时所有用户所要求的资用压头。第 i 用户与主循环泵之间供、回水管路的压力损失分别为 $-\Delta P_{s,i}$, $\Delta P_{r,i}$, 第 i 用户所需压头为 R_i , 则泵选型依据即为:

$$\Delta H_0 \geq \max_i (\Delta P_{r,i} - \Delta P_{s,i} + R_i) \quad (12)$$

方案 2, 主循环泵变转速调节。在负荷变化时, 调节主循环泵转速以保证各用户所需压头。对于这种运行方式的水力计算, 需要确定主循环泵的工作点, 即任一工况下泵的扬程 ΔH 分别选取主循环泵出口、入口作为供水管网和回水管网水力计算的参考点, 相应于该工况流量下的主循环泵扬程应为:

$$\Delta H = \max_i (\Delta P_{r,i} - \Delta P_{s,i} + R_i) \quad (13)$$

供水管网和回水管网各点压力由式 (10) (11) 获得

2.4.2 回水加压泵方式^[1]

对于上述常规热网运行方式, 主循环泵能耗的相当部分被用户调节阀白白消耗掉。为此, 可在各用户安装回水加压泵, 代替调节阀。同时, 减小主循环泵扬程, 使其只承担热源及部分干管的压降, 其余部分干管及用户的压降由各用户内的回水加压泵提供。图 3 是热网的回水加压泵运行方式。由于无调节阀, 主循环泵耗不会被调节阀消耗。所以此运行方式的泵耗应会比常规热网运行方式减小。本方式的主循环泵的运行可采用如下方案

方案 3, 采用变频器调速器调节主循环泵变速运行

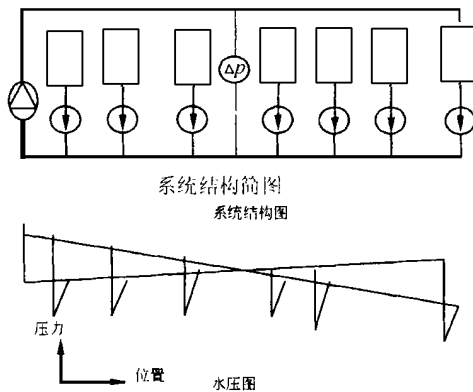


图 3 回水加压泵方式的水网示意图

当工况改变时, 采用变频器调节主循环泵的转速, 保持热网干管某一位置供回水压力相等 (如图 3 中 ΔP 为零),

该位置称为零压点, 同时也取该点为热网的定压点。以零压点作为供水管网和回水管网的参考点, 由式 (10) (11) 可分别

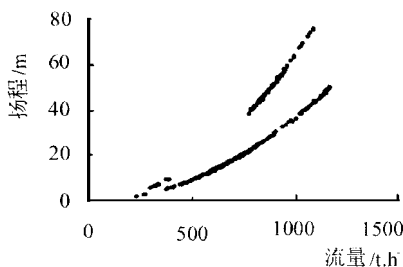


图 4 方案 3 主循环泵工作点分布

计算供、回水管网各点压力值。此时式 (11) 中的

ΔH 为零压点处供回水管路间的压差, 其值为零。

3 应用

与通常工程设计中的仅有几种典型工况的水压图相比, 水力工况的逐时模拟计算能够更加全面的指导冷热联供热水网的设计和运行。泵工作点分布和能耗, 对于设计阶段运行方案的分析, 泵的选型以及项目的技术经济分析具有重要的指导作用。下面以杭州冷热联供热水网为例, 阐述以上水力模拟计算的应用。

杭州冷热联供热水网承担市区 68 个用户共 80 万平方米面积的夏季空调和冬季供热负荷, 并承担全年生活热水负荷, 热网供水温度为 120°C , 回水温度为 80°C , 热电厂的蒸汽在热力首站经换热器向热网提供热量。

3.1 泵的工作点分布

对于方案 1, 根据式 (12) 对主循环泵进行选型后, 该泵的工作点则可根据热网水流量的变化由泵扬程特性曲线确定。由于热网流量变化幅度大, 某天其流量在 26% ~ 100% 之间变化, 随热网流量的变

化,可调节泵运行台数,以使其工作点更集中,泵更加高效稳定运行。各方案某时段循环泵的工作点分布可由逐时模拟计算得到的该时段热网的流量以及相应流量下循环泵进出口压力差获得。图4为方案3三台循环泵并联运行时全年循环泵的工作点分布。可以看出:采暖季、空调季和过渡季泵的工作点在图中分布成三段。由于各段中泵的扬程和流量的平方近似成正比,且各工作点的分布没有出现较大的发散,如果泵的选型合理,将始终保持较高的效率。以上模拟计算得出的泵工作点分布,对于水力工况复杂的冷热联供热水网设计阶段泵更加合理的选型,具有主要的指导作用。

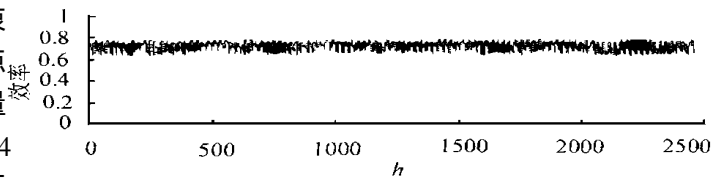


图5 空调期方案2主循环泵效率逐时变化

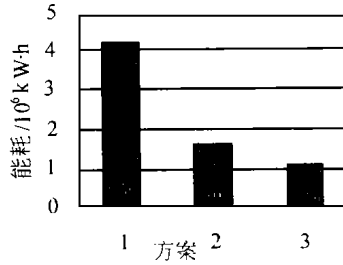


图6 各方案泵耗比较

4 结束语

对于流量变化频繁,调整幅度大的冷热联供热水网,水力工况变化复杂,即使对应于同一个热网总流量,也会有不同的

水力工况。因此,水力工况模拟计算对于冷热联供热水网的技术经济分析、设计及运行方案的选择等是很有必要的。同时,主循环泵一天内流量变化幅度很大,扬程以及效率亦随之变化,其能耗通过逐时计算才能获得较为准确的结果。

参考文献

[1] 江 亿. 冷热联供热水网的用户回水加压泵方案. 区域供热, 1996(2): 12~ 16.

(挥 编)

3.2 泵的能耗

众所周知,常规采暖热水网的输送能耗占整个热网能耗的比例很大,而冷热联供热水网流量在很大范围内调整,使得循环水泵的效率变化较大。同时,由于空调期热网大部分时间在部分工况下运行,各用户调节阀消耗的能能量大。因而这种热网的输送能耗比常规热网更大。所以,输送能耗的精确计算是对一个冷热联供热水网进行技术经济分析的重要环节。

在获得泵的工作点逐时分布后,根据泵的特性方程可以计算出泵的逐时效率(如图5),进而得出泵的能耗。图6为杭州冷热联供热水网全年方案1、方案2主循环泵能耗以及方案3主循环泵和各用户回水加压泵能耗之和的模拟计算结果。

(上接 381页)

同时应该指出的是:DEB系统仅仅使用了一种简单的乘法补偿对象的非线性,这种补偿是不彻底的,它仅仅消除了对象的增益随工况的变化,而不能消除由非线性造成对象时间常数随机组工况的变化,在不同负荷下机组的动态特性还是有一定变化。因此,如图3和图4中所示,当机组在部分工况下工作时,系统的过渡过程时间比在额定负荷下有所延长,性能还是有所降低。

5 结论

单元机组动态特性随负荷不同而变化的根本原因在于系统的非线性,而DEB系统根据单元机组的特点,以能量平衡信号为锅炉的给定信号,实现了增益调度的思想,消除了由对象的非线性特性造成的对象的增益随负荷的变化,明显改善了单元机组不

同负荷下动态特性,提高了部分负荷下控制的品质。这是对DEB系统的一种新的认识。同时对DEB系统调试中的参数整定也有重要意义。

对于一些较复杂的非线性对象,如果能根据对象的特点,采用类似于DEB系统的设计思想进行控制系统的设计,将能简化控制系统的设计并改善系统的控制质量。

参考文献

[1] Cheres E. Small and medium size drum boiler models suitable for long term dynamic Response. IEEE Transaction on Energy Conversion, Dec 1990, 5(4): 686~ 692.
 [2] 陈来九. 单元机组协调控制系统策略——兼议 I&N公司协调控制的发展. 火电厂热工自动化, 1993(1).
 [3] 陈允济,易凡. DEBIV——协调控制系统的特点及分析. 华东电力, 1996(4).
 [4] 郑昶,曹在基. DEB协调控制系统. 动力工程, 1989(4).

(何静芳 编辑)

itability. The foregoing can be conducive to an enhancement of the failure diagnosis automation level. **Key words** symptom acquisition, vibration, fault diagnosis

风机转子的振动与临界转速计算分析 = **Calculation and Analysis of Fan Rotor Vibrations and Critical Speeds** [刊,中] / Gao Chunshan, et al (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 385~ 386

The forced draft fans of a certain power station suffered repeated failures because of blade ruptures, seriously disrupting the normal operation of the power station. Calculations were conducted of the fan rotor natural frequency, vibration modes and critical speeds. On the basis of a contrast analysis of the calculation results, the assumption that an irrational rotor construction caused the failure has been ruled out. This made it possible to avoid the unnecessary work relating to the modification of the fan rotor structure. **Key words** fan rotor, vibration, critical speed, calculation

电厂旋风分离器计算机仿真与优化 = **Computer-based Simulation and Optimization of a Power Plant Cyclone Separator** [刊,中] / Yang Weihong, Xiao Zeqiang (South China Industrial University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 387~ 389

With the help of a computational fluid mechanics CFX4.2 software a three-dimensional numerical simulation was performed of the gas-solid two-phase flow of a power plant cyclone separator for pulverized-coal following its modification. The rotational flow of its gas-phase flow field was calculated by the use of a differential Reynolds stress model with the particle movement being computed in Lagrangian coordinates. To attain an optimized solution, employed is a multi-block grid with appropriate-shaped meshes. Discrete equations were solved by a SIMPLE algorithm. The velocity distribution at various sections and particle trajectory within the modified cyclone separator were presented. It is demonstrated that the modified cyclone separator enjoys a higher efficiency as compared with conventional cyclone separators. **Key words** cyclone separator, numerical calculation, rotational flow

基于知识与模糊神经网络的故障诊断技术 = **Knowledge and Fuzzy Neural Network-Based Fault Diagnostic Techniques** [刊,中] / Qiu Zhongyu, et al, (Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 390~ 392

Discussed in this paper are the theory and method of constructing a rule-based fuzzy neural network (FNN). With respect to a large-sized rotating machine the authors have come up with a fault diagnostic technique, which employs a multi-layer rule base and intelligent reasoning approach. With the rule-type fuzzy association memory device serving as a classification and synthesis algorithm of the diagnostic system the knowledge-based symbol processing method is organically integrated with the FNN. Discussed are the issues of FNN input and output vectors. This paper has provided a new approach for setting up a fault-diagnosis expert system suitable for power plant turbogenerators. **Key words** rotating machinery, fault diagnosis, fuzzy neural network, expert system

承担冷负荷的热水网水力工况模拟计算及应用 = **Simulated Calculation on an Hourly Basis of Hydraulic Operating Conditions for a District Heating and Cooling water Network and its Applications** [刊,中] / Fu Lin, Jiang Yi (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 393~ 396

The basic principles are described of a simulated calculation on an hourly basis of the hydraulic operating conditions for a district heating and cooling (DHC) water network. The method for determining heat loads of this kind of network is given and specific examples of calculating pump working points and energy consumption in the DHC project are provided to explain the above-mentioned principles. **Key words** DHC network, hydraulic operating conditions, heat load, pump, simulated calculation

供热机组特性分析的循环函数法 = **Cycle Function Method for the Analysis of Heat Supply Unit Character-**