

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.05.016

异程布置的冷冻水系统管网水力特性计算方法

刘雪峰, 刘金平, 陈星龙

(华南理工大学 电力学院; 能源高效清洁利用广东普通高校重点实验室, 广州 510640)

摘要:大型中央空调冷冻水系统管网水力特性精确计算是研究其优化设计和运行的必要条件, 简化模型因计算误差大而无法应用于大型管网拓扑结构的水力计算。以异程布置的冷冻水系统为研究对象, 在充分考虑末端支路温度调节阀调节特性的基础上, 建立了管网水力特性精确数学模型, 提出了虚拟流量的计算机逻辑算法。以 10 个 AHU 支路的异程式管网为仿真计算对象, 计算该管网最小供回水压差以及不同供回水压差条件下的各支路温度调节阀开度和实际流量, 计算结果符合异程式管网存在较大压力不平衡的固有特性。该计算方法能够确保计算收敛, 实现了利用一个逻辑程序计算管网各种水力特性, 为异程式管网水力特性研究提供了参考价值。

关键词:冷冻水系统; 异程布置; 水力特性; 计算方法

中图分类号: TB611 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)05-0090-08

Calculation Method of Hydraulic Characteristics for Direct-Return Chilled Water System

Liu Xuefeng, Liu Jinping, Chen Xinglong

(School of Electric Power; Key Laboratory of Efficient and Clean Energy Utilization of Guangdong Higher Education Institutes, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China)

Abstract: In order to optimize design and operation, it is necessary to calculate accurately hydraulic characteristics large central air-conditioning systems. Simplified Model can not be applied to hydraulic calculation of large pipe network topological structure for its large calculation error. Taking into account the regulating characteristics of terminal branch temperature regulating valve, a direct-return chilled water system is studied, an accurate mathematical model of pipe network hydraulic characteristics has been established and a computer logic algorithm with virtual flow has been given. A direct-return pipe network with ten AHU branches is used as simulation calculation object, the pipe network supply-return water pressure difference is calculated, and also the temperature regulating valve opening and actual flow of each branch are calculated in the condition of different supply-return water pressure difference. The calculated results accord with the natural characteristics of high pressure difference unbalanced for direct-return pipe network. The calculation method can ensure calculation convergence.

Key words: chilled water system; direct-return layout; hydraulic characteristics; calculation method

收稿日期: 2013-02-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2011ZM0022); 广东省重大科技专项资金(2012A010800024)

作者简介: 刘雪峰(1976-), 男, 博士, 主要从事制冷空调系统优化设计与运行研究, (E-mail) lyxfliu@scut.edu.cn.

大型中央空调冷冻水系统管网水力特性计算属于多变量耦合的非线性问题,所有末端支路水力失调、部分末端支路水力失调以及所有末端支路水力可调是不同管网供回水压差条件下的 3 种运行状态,计算模型的变量类型和数量因管网供回水压差不同而不同,传统多变量迭代求解算法很难收敛,而简化末端支路连接管类型及阻抗的简化计算模型对于大型管网拓扑结构,计算误差很大,不利于研究管网调节稳定性和可靠性的物理机理。管网稳态流动计算模型在空调系统整体性能模拟计算中的应用,为管网阻力特性计算研究提供了思路,基于流体力学一元流动连续方程、能量方程及串并联管路流动规律,可以建立冷冻水系统阻力特性的简化模型,其适合于计算稳态条件下的冷冻水系统串并联阻抗,计算循环压力结果与实测值相吻合,表明并联计算方法有一定可行性^[1-2]。回路法和道路法流量调节计算方法的原理也被应用于供热空调系统管网水力计算,将管网中各管段流量和水泵工况点作为已知参数计算管段阻力,并通过算例说明了该方法的有效性,运用迭代法对空调与热水供热管网进行数值仿真,可以有效地解决管网热压的计算^[3-5]。将冷冻水和冷却水管路不同管径下的不同流量所对应的比摩阻绘制成计算表,应用该计算表能快速、准确、方便进行空调水系统管路水力计算,并能找出管网中真正最不利环路^[6-8]。神经网络和遗传算法等数学方法为解决空调系统高度非线性问题成为可能,但往往忽略了空调系统自身的物理规律,末端设备温度调节阀的实时调节作用所引起的系统稳定性变化等诸多问题,需要充分考虑冷冻水系统不同负荷分布特性的运行调节特性^[9-10]。以管网最远端压差为反馈信号进行控制是常见的节能运行方式,假设管网阻抗为定值,通过阻抗串并联原理逐次计算支路阻抗来确定压差控制目标值,同样没有考虑末端支路的调节作用^[11]。而 Hopfield 神经网络算法(HNN)应用于异程布置管网供回水温差与管网优化运行关联性研究,其前提就是假设所以末端支路水力可调,忽略了末端调节阀的物理特性^[12-13]。超高层建筑中央空调冷冻水系统难确定最不利回路压差,因此有工程技术人员通过在管网中某一位置设定监测点来推算管网最佳供回水压差,并认为监测点压差与管网最佳供回水压差成线性关系,从而简化管网水力计算模型,但忽略了管网支路负荷分布不平衡性对其所产生的影响^[14]。

综上所述,假设两个相邻支管路连接干管压损忽略不计的简化算法,实际上简化了管网同程布置和异程布置的差异性,管网拓扑结构越复杂,计算误差越大,不利于研究大型管网变负荷调节特性。本文充分考虑末端支路调节特性,通过虚拟最远端支路流量,将复杂的管网水力计算,转换为变步长和二分法的单变量逻辑计算过程,可以得到冷冻水管网各种运行状态下支路实际流量及温度调节阀开度的近似精确解,为管网优化设计与运行提供了计算分析方法。

1 冷冻水系统异程布置形式

冷冻水系统管网异程布置是常见的一种管网结构形式,其结构简单,投资较小,拓扑结构如图 1 所示:

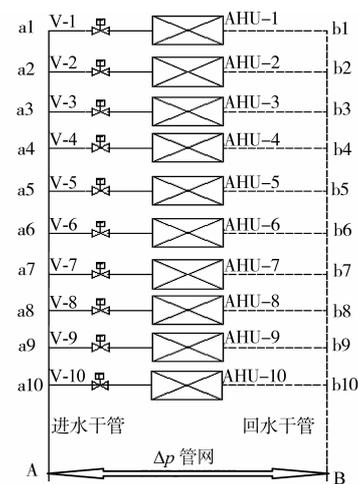


图 1 冷冻水系统管网拓扑结构

根据管网拓扑结构,管网末端支路由远端开始由 1~n 进行编号,依次标记为 $BP_{a_1-b_1}$ 、 $BP_{a_2-b_2}$ 、 $BP_{a_3-b_3}$ 、 $BP_{a_4-b_4}$ 、 $BP_{a_5-b_5}$ 、 $BP_{a_6-b_6}$ 、 $BP_{a_7-b_7}$ 、 $BP_{a_8-b_8}$ 、 $BP_{a_9-b_9}$ 和 $BP_{a_{10}-b_{10}}$,相邻支管路进水管节点的连接干管依次标记为: $MP_{a_1-a_2}$ 、 $MP_{a_2-a_3}$ 、 $MP_{a_3-a_4}$ 、 $MP_{a_4-a_5}$ 、 $MP_{a_5-a_6}$ 、 $MP_{a_6-a_7}$ 、 $MP_{a_7-a_8}$ 、 $MP_{a_8-a_9}$ 、 $MP_{a_9-a_{10}}$ 和 $MP_{a_{10}-A}$,相邻支管路回水管节点的连接干管依次标记为: $MP_{b_1-b_2}$ 、 $MP_{b_2-b_3}$ 、 $MP_{b_3-b_4}$ 、 $MP_{b_4-b_5}$ 、 $MP_{b_5-b_6}$ 、 $MP_{b_6-b_7}$ 、 $MP_{b_7-b_8}$ 、 $MP_{b_8-b_9}$ 、 $MP_{b_9-b_{10}}$ 和 $MP_{b_{10}-B}$,每个末端支管路包含了末端设备(AHU)、温度调节阀和连接支管等部件。

2 管网水力计算模型

2.1 管路阻抗计算

已知管道内壁粗糙度 Δ 和管径 d ,则相对粗糙度

可以表示为: $\epsilon_{\text{relative}} = 2\Delta/d$ 。当雷诺数满足 $Re \leq 2000$ 时,管道沿程阻力系数表示为 $\lambda = 64/Re$;当雷诺数满足 $3000 < Re < 59.7/\epsilon_{\text{relative}}^{8/7}$ 时,沿程阻力系数为 $\lambda = 0.3164/\sqrt[4]{Re}$;当雷诺数满足 $59.7/\epsilon_{\text{relative}}^{8/7} < Re < (665 - 765\lg\epsilon_{\text{relative}})/\epsilon_{\text{relative}}$ 时,管道沿程阻力系数表示为 $\frac{1}{\lambda} = -1.8\lg\left[\frac{6.8}{Re} + \left(\frac{\Delta}{3.7d}\right)^{1.11}\right]$,当雷诺数满足 $Re > (665 - 765\lg\epsilon_{\text{relative}})/\epsilon_{\text{relative}}$ 时,管道沿程阻力系数表示为 $\lambda = 1/\left(2\lg\frac{3.7d}{\Delta}\right)^2$ 。末端支管路沿程摩擦阻力可以表示为 $\Delta p_{\text{branch_tube}} = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2(0.25\pi D^2)^2 \rho} \cdot G^2$,其中 L 为管道的长度,m; D 为管道内径,m; ρ 为冷冻水密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; v 为冷冻水的动力粘度, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; ρ 为水的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; G 为冷冻水的质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。局部摩擦阻力可以表示为: $\Delta p_{\text{branch_local}} = \xi \cdot \frac{1}{2(0.25\pi D^2)^2 \rho} \cdot G^2$,其中 ξ 为局部阻力系数。根据管道阻抗串联原理,管路阻力可以统一表示为:

$$\Delta p_{\text{branch}} = S_{\text{branch}} G_{\text{branch_actual}}^2 = (S_{\text{branch_tube}} + S_{\text{branch_local}}) \cdot G_{\text{branch_actual}}^2$$

其中 $S_{\text{branch_tube}} = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{1}{2(0.25\pi D^2)^2 \rho}$ 及 $S_{\text{branch_local}} = \xi \cdot \frac{1}{2(0.25\pi D^2)^2 \rho}$ 分别为支管路沿程阻力部件阻抗和局部阻力部件阻抗,其中 $G_{\text{branch_actual}}$ 为末端支路实际质量流量^[15]。

2.2 温度调节阀调节特性

冷冻水系统管网末端支路温度调节阀常采用比例积分调节阀,本文假设温度调节阀为比例积分线性调节阀。流量与阀门开度 K 之间的关系为: $\frac{G_{\text{branch_active}}}{G_{\text{branch_max}}} = C(K_{\text{valve_temp}})$,其中 $G_{\text{branch_active}}$ 为末端支路实际质量流量, $G_{\text{branch_max}}$ 为相同压差条件下的末端支路最大流量, $K_{\text{valve_temp}}$ 为温度调节阀开度。对于线性阀门,则 $C(K_{\text{valve_temp_max}}) = 1$,已知温度调节阀两端压差($\Delta p_{\text{valve_temp}}$)、温度调节阀最大开度所对应的最小阻抗($S_{\text{valve_temp_min}}$)以及末端支路实际流量($G_{\text{branch_active}}$),则温度调节阀阀门开度可表示为

$$\frac{G_{\text{branch_actual}}}{\sqrt{\Delta p_{\text{valve_temp}}/S_{\text{valve_temp_min}}}} = K_{\text{valve_temp}} \quad [16]。当空调区$$

热湿负荷一定时,对应 AHU 冷冻水流量也是一定的,在温度调节阀水力可调条件下,末端支路实际流量满足需求,支路压差增加,温度调节阀开度减少,支路阻抗增加,但实际流量维持不变。如果末端支路实际需求流量满足条件: $G_{\text{branch_required_actual}} > \sqrt{\Delta p_{\text{valve_temp}}/S_{\text{valve_temp_min}}}$,则温度调节阀水力失调,阀门开度等于 1 且不随支路压差减少而变化,而末端支路实际流量却随支路压差减少而减少,根据支路压差就可以求解支路实际流量,以整个管网为分析对象,水力计算模型的变量类型和个数随管网供回水压差变化而变化,这就是其水力计算分析复杂性的关键所在。

2.3 计算模型

当管网供回水压差大于满足末端流量需要的最小供回水压差时,即 $\Delta p_{\text{AB}} \geq \Delta p_{\text{AB_mix}}$,所有末端支路水力可调,每个支路温度调节阀开度均为未知变量;当 $\Delta p_{\text{AB}} < \Delta p_{\text{AB_mix}}$ 时,部分或全部末端支路水力失调,末端支路流量小于实际需求流量,不能满足空调区域舒适性要求,每个支路实际流量和温度调节阀开度都是未知数。本文以异程布置的管网结构为研究对象,管网拓扑结构如图 1 所示,将 AHU、AHU 连接管、温度调节阀 3 部分作为末端支路进行水力计算,由远端到近端的编号依次为 1~ n 。管网支路压差可以表示为: $\Delta p_{\text{branch}} = (S_{\text{valve_temp}} + S_{\text{AHU}} + S_{\text{branch}}) G_{\text{branch_actual}}^2$,根据压力平衡和流量守恒原理得到异程式管网水力计算模型。

其中, S_{valve_n} 为温度调节阀阻抗, S_{AHU_n} 为末端设备 AHU 阻抗, S_{branch_n} 为支管路阻抗, $S_{\text{main_out}_n}$ 为 2 个节点之间的供水干管阻抗, $S_{\text{main_in}_n}$ 为 2 个节点之间的回水干管阻抗, $G_{\text{branch_actual}_n}$ 为末端支路(AHU)实际流量, $G_{\text{branch_ini}_n}$ 为 AHU 实际需求流量, Δp_{AB} 为管网供回水压差,下标 n 为管网中各计算点的序号,拓扑结构节点越多,传统的迭代计算越难收敛,甚至无法求解,并且当 $\Delta p_{\text{AB}} < \Delta p_{\text{AB_mix}}$ 时,管网供回水压差 Δp_{AB} 不足以保证每个末端支路水力可调,计算模型的变量类型和个数都是未知数,求解过程非常复杂,本文采用虚拟流量法进行计算,将计算转化为单变量迭代计算过程,解决了复杂管网水力计算的非线性问题。

$$\begin{aligned}
 \Delta p_{\text{branch}_1} &= (S_{\text{valve}_1} + S_{\text{AHU}_1} + S_{\text{branch}_1})G_{\text{branch_actual}_1}^2 + (S_{\text{main_out}_1} + S_{\text{main_in}_1})G_{\text{branch_actual}_1}^2 \\
 \Delta p_{\text{branch}_1} &= \Delta p_{\text{valve_temp}_1} + (S_{\text{AHU}_1} + S_{\text{branch}_1})G_{\text{branch_actual}_1}^2 + (S_{\text{main_out}_1} + S_{\text{main_in}_1})G_{\text{branch_actual}_1}^2 K_{\text{valve_temp}_1} \\
 &= \frac{G_{\text{branch_actual}_1}}{\sqrt{\Delta p_{\text{valve_temp}_1} / S_{\text{valve_temp_min}_1}}} \\
 \Delta p_{\text{branch}_1} &= (S_{\text{valve}_2} + S_{\text{AHU}_2} + S_{\text{branch}_2})G_{\text{branch_actual}_2}^2 \\
 \Delta p_{\text{branch}_1} &= \Delta p_{\text{valve_temp}_2} + (S_{\text{AHU}_2} + S_{\text{branch}_2})G_{\text{branch_actual}_2}^2 \\
 K_{\text{valve_temp}_2} &= \frac{G_{\text{branch_actual}_2}}{\sqrt{\Delta p_{\text{valve_temp}_2} / S_{\text{valve_temp_min}_2}}} \\
 \Delta p_{\text{branch}_2} &= \Delta p_{\text{branch}_1} + (S_{\text{main_out}_2} + S_{\text{main_in}_2})(G_{\text{branch_actual}_1} + G_{\text{branch_actual}_2})^2 \\
 \Delta p_{\text{branch}_2} &= (S_{\text{valve}_3} + S_{\text{AHU}_3} + S_{\text{branch}_3})G_{\text{branch_actual}_3}^2 \\
 \Delta p_{\text{branch}_2} &= \Delta p_{\text{valve_temp}_3} + (S_{\text{AHU}_3} + S_{\text{branch}_3})G_{\text{branch_actual}_3}^2 \\
 K_{\text{valve_temp}_3} &= \frac{G_{\text{branch_actual}_3}}{\sqrt{\Delta p_{\text{valve_temp}_3} / S_{\text{valve_temp_min}_3}}} \\
 &\vdots \\
 \Delta p_{\text{AB}} & \\
 \Delta p_{\text{branch}_{n-1}} &= (S_{\text{valve}_n} + S_{\text{AHU}_n} + S_{\text{branch}_n})G_{\text{branch_actual}_n}^2 \\
 K_{\text{valve_temp}_n} &= \frac{G_{\text{branch_actual}_n}}{\sqrt{\Delta p_{\text{valve_temp}_n} / S_{\text{valve_temp_min}_n}}} \\
 \Delta p_{\text{branch}_n} &= \Delta p_{\text{branch}_{n-1}} + (S_{\text{main_out}_n} + S_{\text{main_in}_n})(G_{\text{branch_actual}_1} + \dots + G_{\text{branch_actual}_n})^2 \\
 \Delta p_{\text{AB}} &= \Delta p_{\text{branch}_n}
 \end{aligned}$$

约束条件:

$$G_{\text{branch_actual}_1} \leq G_{\text{branch_ini}_1} \dots G_{\text{branch_actual}_n} \leq G_{\text{branch_ini}_n}$$

$$S_{\text{valve_temp}_1} \geq S_{\text{valve_temp_min}_1} \dots S_{\text{valve_temp}_n} \geq S_{\text{valve_temp_min}_n}$$

2.4 计算方法及逻辑

2.4.1 计算最小供回水压差 冷冻水系统管网最小供回水压差即为满足所有末端支路流量要求的最小供回水压差,至少保证有一个末端支路温度调节阀开度 $K_{\text{valve_temp}_n} = 1$,且支路实际流量等于实际需求流量,这时管网冷冻水输送的动力功耗最小。已知管网负荷分布,将管网最远端支路实际流量 ($G_{\text{branch_virtual}}$) 假设为虚拟变量进行迭代计算,利用变步长和二分法迭代计算方法进行计算机逻辑计算编程。在计算过程中,如果虚拟流量小于该支路实际需求流量,则虚拟流量等于该支路实际需求流量;如果虚拟流量大于或等于该支路实际需求流量,则该支路实际需求流量等于该支路实际流量,最远端支路虚拟流量与实际需求流量的差值则等价转换为温度调节阀两端压差,可以表示为:

$$\Delta p_{\text{branch}_1} = (S_{\text{valve}_1} + S_{\text{AHU}_1} + S_{\text{branch}_1})G_{\text{branch_virtual}}^2 + (S_{\text{main_out}_1} + S_{\text{main_in}_1})G_{\text{branch_virtual}}^2$$

其等同于最远端支路流量与管网供回水压差为单一函数关系式,由管网最远端到最近端逐次进行水力计算,根据单变量迭代求解的算法,就可以得到每个支路温度调节阀开度、支路压差、冷冻水流量以及管网供回水压差,计算逻辑如图 2 所示:

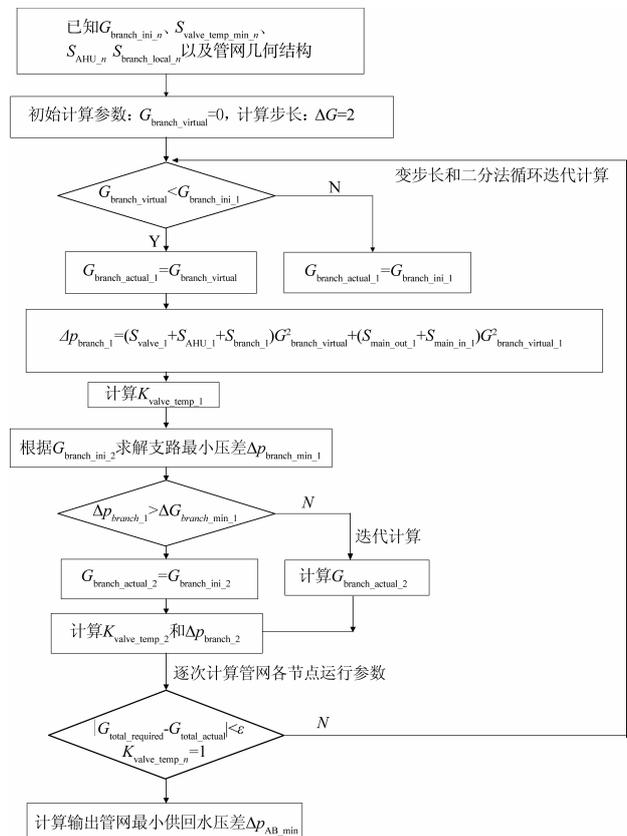


图 2 冷冻水管网最小供回水压差计算逻辑图

2.4.2 管网水力特性计算 变压差控制作为冷冻水系统节能运行的方式之一其水力特性精确求解为深入研究其调节稳定性和可调性提供理论计算方法,是管网优化设计和运行的基础。如果冷冻水管网所有末端支路水力可调,管网负荷分布与管网最小供回水压差为单值函数关系。当管网供回水压差大于最小供回水压差时,管网各支路流量在温度调节阀调节作用下维持恒定,改变的是温度调节阀的开度;当管网供回水压差小于最小供回水压差时,管网各支路流量存在部分或全部水力失调现象,水力失调的支路其温度调节阀开度始终为 1,改变的是该支路冷冻水流量。在已知管网各个支路理论需求流量条件下,根据管网实际供回水压差,利用变步长和二分法迭代计算方法,虚拟管网最远端支路实际流量 $G_{branch_virtual}$ 进行迭代计算,从而可以得到已知管网供回水压差条件下的末端支路温度调节阀开度、压差以及实际流量,计算逻辑如图 3 所示:

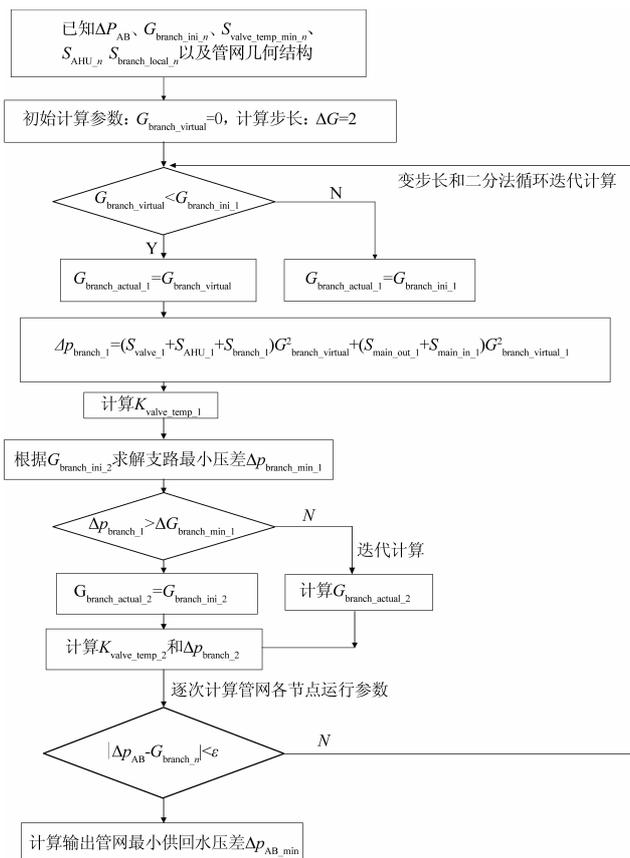


图 3 根据供回水压差求解流量的计算逻辑图

3 实例计算

3.1 计算参数与条件

以异程布置的冷冻水管网为仿真计算对象,管网共并联了 10 个 AHU 节点,每个末端支路的冷冻水实际需求流量已知,末端支路温度调节阀为比例

积分线性阀门,管网结构如图 1 所示,冷冻水管网节点的计算参数如表 1 所示。

3.2 计算结果

3.2.1 所有末端支路水力可调 根据图 2 和图 3 的计算逻辑,利用 VB 编程软件编写了计算程序。根据计算结果,该均匀负荷分布的冷冻水管网最小供回水压差为 $\Delta p_{AB_min} = 128\ 035\ \text{Pa}$,图 4 反映了最小供回水压差条件下的各末端支路温度调节阀开度变化规律,最远端支路温度调节阀开度 $K_{valve_temp_1} = 1$,越靠近管网供回水总管端,温度调节阀开度越小,由远端支路及近端支路,温度调节阀开度由急剧减少过渡至缓慢减少阶段,说明了异程布置的管网支路压差不平衡性很大,这正是异程布置形式管网的典型特点,符合异程布置的冷冻水管网变压差控制更容易引起远端 AHU 热湿处理能力急剧下降的工程现象。根据图 5 和图 6 所示,当 $\Delta p_{AB} > \Delta p_{AB_min}$ 时,管网末端支路温度调节阀开度 $K_{valve_temp_1} < 1$,末端支路冷冻水流量不变,供回水压差越大,支路温度调节阀开度的差异性越小,支路压差不平衡性减少;当 $\Delta p_{AB} < \Delta p_{AB_min}$ 时,随管网供回水压差不断减少,末端支路从最远端开始依次进入水力失调运行状态,支路水力失调运行状态下的冷冻水流量随供回水压差减少而减少。冷冻水管网总流量随管网供回水压差减少而减少,且变化幅度越来越大,如图 7 所示。以上计算分析跟异程布置管网实际运行特性吻合,反映了异程布置管网压差不平衡性特性,说明计算结果是可靠的。

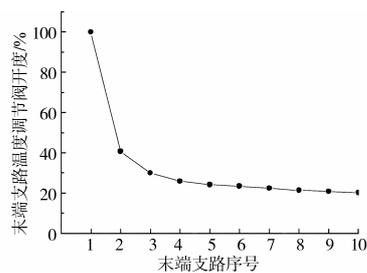
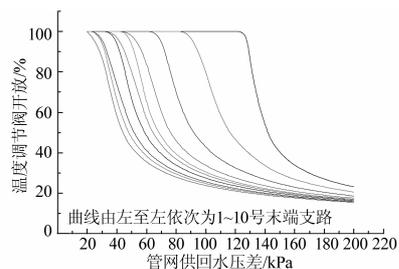


图 4 最小供回水压差条件下的末端支路温度调节



注: — AHU-1 — AHU-2 — AHU-3 — AHU-4 — AHU-5 — AHU-6 — AHU-7 — AHU-8 — AHU-9 — AHU-10

图 5 末端支路温度调节阀开度随管网供回水压差的变化规律

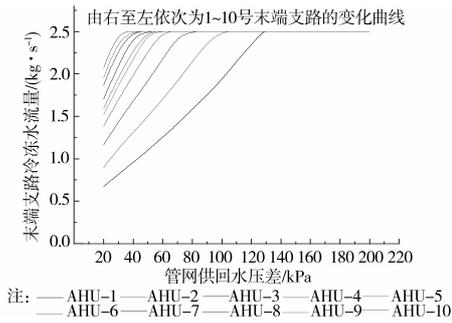


图 6 末端支路流量随管网供回水压差的变化规律

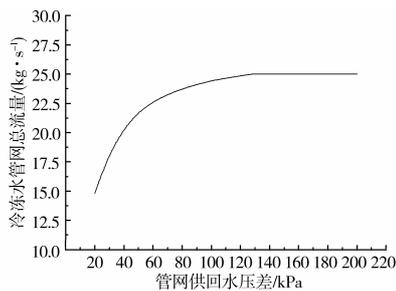


图 7 冷冻水管网总流量随供回水压差的变化规律

3.2.2 部分 AHU 关闭 现代建筑功能区域划分的多样化决定了空调系统运行调节的多样性,末端设备运行时间分布的多样性给管网水力计算带来很大不便,基于虚拟流量法的计算逻辑算法仍然可以进行精确计算。假设管网 BP_{a1-b1}、BP_{a4-b4}、BP_{a7-b7}和 BP_{a10-b10} 4 个末端支路关闭,其它计算条件不变,此时管网最小供回水压差为: $\Delta p_{AB_{min}} = 54\ 836\ \text{Pa}$, 图 8 和图 9 反映了 3 种管网供回水压差条件下管网各支路温度调节阀开度和实际流量的变化规律,其中管网供回水压差分别为: $\Delta p_{AB_1} =$

40 000 Pa、 $\Delta p_{AB_{min}} = 54\ 836\ \text{Pa}$ 和 $\Delta p_{AB_2} = 70\ 000\ \text{Pa}$ 。由图可知,关闭的末端支路流量为 0,温度调节阀开度为 0,其余支路温度调节阀和实际流量也因供回水压差不同而不同,计算结果符合异程布置管网的一般特性。

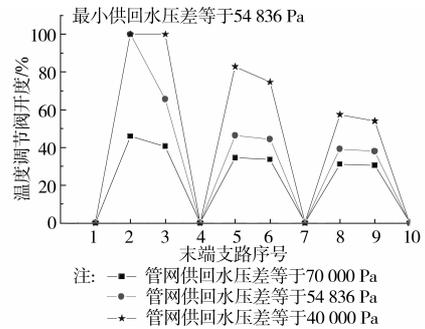


图 8 部分 AHU 关闭条件下支路温度调节阀的变化规律

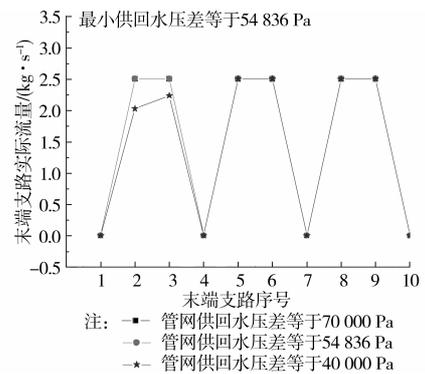


图 9 部分 AHU 关闭条件下支路实际流量的变化规律

表 1 管网计算参数

项目	$G_{branch_in,n} / (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$S_{AHU,n} / (\text{Pa} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-2})$	$S_{valve_temp_min,n} / (\text{Pa} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-2})$	$D_{branch,n} / \text{m}$	$L_{branch,n} / \text{m}$	$\xi_{branch,n}$	$\Delta p_{branch,n} / \text{m}$	$D_{main_out,n} / \text{m}$	$L_{main_out,n} / \text{m}$	$\xi_{main_out,n}$	$\Delta p_{main_out,n} / \text{m}$	$D_{main_in,n} / \text{m}$	$L_{main_in,n} / \text{m}$	$\xi_{main_in,n}$	$\Delta p_{main_in,n} / \text{m}$
AHU_1	2.5	3 200	650	0.05	2	0.5	0.000 2	0.050	20	0.5	0.000 2	0.050	20	0.5	0.000 2
AHU_2	2.5	3 200	650	0.05	2	0.5	0.000 2	0.065	20	0.5	0.000 2	0.065	20	0.5	0.000 2
AHU_3	2.5	3 200	650	0.05	2	0.5	0.000 2	0.080	20	0.5	0.000 2	0.080	20	0.5	0.000 2
AHU_4	2.5	3 200	650	0.05	2	0.5	0.000 2	0.100	20	0.5	0.000 2	0.100	20	0.5	0.000 2
AHU_5	2.5	3 200	650	0.05	2	0.5	0.000 2	0.125	20	0.5	0.000 2	0.125	20	0.5	0.000 2
AHU_6	2.5	3 200	650	0.05	2	0.5	0.000 2	0.125	20	0.5	0.000 2	0.125	20	0.5	0.000 2
AHU_7	2.5	3 200	650	0.05	2	0.5	0.000 2	0.125	20	0.5	0.000 2	0.125	20	0.5	0.000 2
AHU_8	2.5	3 200	650	0.05	2	0.5	0.000 2	0.150	20	0.5	0.000 2	0.150	20	0.5	0.000 2
AHU_9	2.5	3 200	650	0.05	2	0.5	0.000 2	0.150	20	0.5	0.000 2	0.150	20	0.5	0.000 2
AHU_10	2.5	3 200	650	0.05	2	0.5	0.000 2	0.150	20	0.5	0.000 2	0.150	20	0.5	0.000 2

3.2.3 部分 AHU 调节失灵

实际工程中,冷冻水系统管网支路温度调节阀

常常存在调节失灵的情况,即该支路冷冻水流量不可调,如果调节失灵的支路靠近冷源侧,则可能因管

网支路旁通效应而导致低温差现象,造成系统运行状况的评估不确定性的主要原因。假设管网 BP_{a1-b1} 、 BP_{a4-b4} 、 BP_{a7-b7} 和 $BP_{a10-b10}$ 4 个末端支路调节失灵,其它计算条件不变,图 10 和图 11 反映了三种管网供回水压差条件下管网各支路温度调节阀开度和实际流量的变化规律,其中管网供回水压差分别为: $\Delta p_{AB_min} = 128\ 035\ \text{Pa}$ 、 $\Delta p_{AB_1} = 100\ 000\ \text{Pa}$ 和 $\Delta p_{AB_2} = 140\ 000\ \text{Pa}$ 。根据计算结果,调节失灵的末端支路实际流量随供回水压差增加而增加,由于调节失灵所导致的支路旁通效应,最远端支路实际流量小于理论需求流量,调节失灵的支路其实际流量却大于理论需求流量,从而影响管网的热力学特性,空调区域温湿度控制无法保证,而异程布置管网的压力不平衡特性,加剧了其影响效应,也反映了管网变压差控制和变温差控制节能控制模式在实际工程中往往达不到理想效果的主要原因所在,计算结果符合异程布置管网的一般特性。

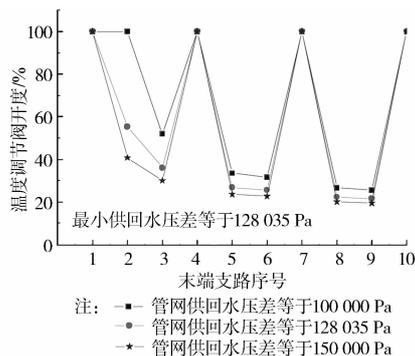


图 10 部分 AHU 调节失灵条件下温度调节阀的变化规律

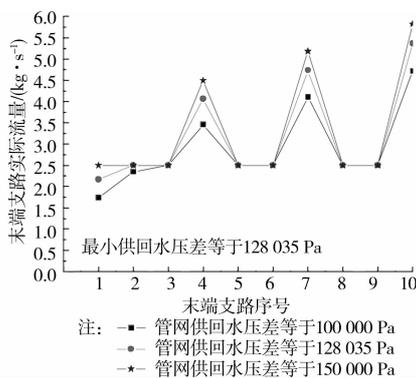


图 11 部分 AHU 调节失灵条件下支路实际流量的变化规律

4 结论

1) 大型冷冻水系统管网水力特性计算属于多变量耦合的非线性问题,由于末端支路调节作用,管网水力特性计算模型的变量类型和个数随管网供回水

压差变化而变化,计算过程非常复杂。忽略温度调节阀调节特性以及假设两支管间的干管阻力损失忽略不计的简化计算模型不适宜拓扑结构复杂的管网水力计算。

2) 本文在充分考虑末端支路温度调节阀调节特性的基础上,建立了异程布置的冷冻水系统管网拓扑结构的水力特性的精确计算机计算模型。

3) 大型冷冻水系统管网中支路温度调节阀和支路冷冻水流量随管网供回水变化而单向变化,利用传统的变步长和二分法相结合的计算机算法,以管网最远端支路实际流量为虚拟变量进行迭代计算,将复杂的多变量求解转换为单变量求解,在确保计算收敛性的基础上,实现一个计算逻辑程序计算管网支路全部水力失调、部分水力失调以及水力可调等不同运行状态的管网水力特性,为管网变压差控制提供了分析方法。

参考文献:

- [1] 孙金鹏,王树刚. 变水量空调冷冻水系统整体特性的模拟研究[J]. 建筑科学,2008,24(8): 90-93.
Sun J P, Wang S G. Simulation study on general characteristics of variable chilled water volume in airconditioning system [J]. Building Science, 2008, 24 (8): 90-93.
- [2] 刘涓娟,李立人,王新,等. 大厦冷冻水系统运行工况下循环压力的理论计算[J]. 上海理工大学学报, 2004, 26 (6): 533-541.
Liu J J, Li L R, Wang X, et al. Theoretical calculations of circulating pressure of chilled water system in operating mode [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2004, 26 (6): 533-541.
- [3] 冯小平,龙惟定. 供热空调系统水力管网流量调节的计算方法[J]. 流体机械, 2005, 33(2): 66-69.
Feng X P, Long W D. Computational methods of water flow regulation for central heating and air-conditioning system [J]. Fluid Machinery, 2005, 33(2): 66-69.
- [4] 冯小平. 供热空调系统运行管网管段阻力数测算新方法[J]. 建筑热能通风空调, 2004, 23(4): 53-56.
Feng X P. A new method to calculate the pipe resident value of pipeline of heating and air-conditioning system [J]. Building and Energy and Environment, 2004, 23 (4): 53-56.
- [5] 余跃进. 空调与热水供热管网数值仿真[J]. 南京师范大学学报:工程技术版, 2002, 2(2): 84-92.
Yu Y J. Numerical simulation for air conditioning and hot-water heating network [J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology, 2002,

- 2(2): 84-92.
- [6] 许淑惠,罗文斌. 空调冷冻水和冷却水循环系统水力计算简便方法[J]. 北京建筑工程学院学报,2004,20(3): 1-7.
Xu S H, Luo W B. Simple hydraulic calculation of the air conditioning chilled water and cooling water systems [J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2004, 20(3): 1-7.
- [7] 董哲生. 空调水系统阻力计算及水泵选型若干问题[J]. 暖通空调, 2006, 36(9): 45-47.
Dong Z S. Some problems about resistance calculation and circulating pump selection in air conditioning water systems [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2006, 36(9): 45-47.
- [8] 孙多斌,王树刚,韩俊,等. 商业建筑空调水系统中环路阻力分布模拟分析[J]. 大连大学学报, 2006, 27(4): 92-96.
Sun D B, Wang S G, Han J, et al. Simulation analysis of loop resistance distribution of air conditioning water systems in commercial buildings [J]. Journal of Dalian University, 2006, 27(4): 92-96.
- [9] Chang Y C, Chen W H. Optimal chilled water temperature calculation of multiple chiller systems using Hopfield neural network for saving energy [J]. Energy, 2009, 34: 448-456.
- [10] Yu F W, Chan K T. Optimum load sharing strategy for multiple-chiller systems serving air-conditioned buildings [J]. Building and Environment, 2007, 42: 1581-1593.
- [11] Ma Z J, Wang S W. Energy efficient control of variable speed pumps in complex building central air-conditioning systems [J]. Energy and Buildings, 2009, 41: 197-205.
- [12] Chang Y C. Application of Hopfield neural network to the optimal chilled water supply temperature calculation of air-conditioning systems for saving energy [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48: 1649-1657.
- [13] Chang Y C, Chen W H. Optimal chilled water temperature calculation of multiple chiller systems using Hopfield neural network for saving energy [J]. Energy, 2009, 34: 448-456.
- [14] Gao D C, Wang S W, Sun Y J. A fault-tolerant and energy efficient control strategy for primary-secondary chilled water systems in buildings [J]. Energy and Buildings, 2011, 43: 3646-3656.
- [15] 路延魁. 空气调节设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [16] 陆培文. 节阀实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

(编辑 郭 飞)