

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.008



异程管网热湿负荷分配次优解群及适应性

门玉葵,刘雪峰,杨鹏,刘金平

(华南理工大学 电力学院;广东省能源高效清洁利用重点实验室,广州 510640)

摘要:提出了一种基于次优解群统计分析的异程管网热湿负荷分配方法,采用变步长+随机走步的寻优计算方法,获得空调季不同负荷率下热湿负荷再分配的次优解群,分析次优解群的随机行为和统计规律,以此探索复杂变量约束下的冷冻水系统负荷分配的优化控制策略及其适应性。根据计算结果,在40%、60%、80%、100%这4种负荷率下末端次数次优解重叠率最高达到24%。研究表明,次优解群随机行为与管网热湿负荷分配策略存在相关性,离冷源侧越近,末端次数次优解重叠率越高,分配策略的负荷适应性越好,其权重越大。

关键词:冷冻水系统;异程布置;热湿负荷重构;适应性

中图分类号:TK01.8 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2017)01-0051-09

Suboptimal group and adaptability analysis of thermal-humidity load distribution of direct-return chilled water system

Men Yuikui, Liu Xuefeng, Yang Peng, Liu Jinping

(School of Electric Power; Key Laboratory of Efficient and Clean Energy

Utilization of Guangdong Higher Education Institutes, Guangzhou 510640, P. R. China)

Abstract: A way of thermal-humidity load distribution of direct-return chilled water system based on the suboptimal group was proposed. And the sub-optimization method of variable step size combined with the random walking was adopted. After obtaining suboptimal group of thermal-humidity load distribution in different load rate in the air-conditioning season, it would analyze random behavior and statistical law of the suboptimal group. So that the optimal control strategy and adaptability of chilled water system could be explored in constraint of complex variable. The results showed that the most overlapped ratio of the suboptimal solution of terminal numbers reached 24 percent under the four load rate, for example, 40%, 60%, 80%, 100%. A correlation between random behavior of suboptimal group and strategy of heat and moisture load distribution for chilled water system was found, and the optimal solution of terminal numbers

收稿日期:2016-05-25

基金项目:国家科技支撑计划(2012BAJ06B06);广东省自然科学基金(2015A030310303);中央高校基本科研业务费专项资金(B6150170)

作者简介:门玉葵(1993-),女,主要从事制冷空调系统优化设计与运行研究,(E-mail)1103253973@qq.com。

刘雪峰(通信作者),男,副教授,硕士生导师,(E-mail)lyxfliu@scut.edu.cn。

Received:2016-05-25

Foundation item: Project Funds Plan Supported by National Science and Technology (No. 2012BAJ06B06); Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2015A030310303); Fundamental Research Funds for the Central University (No. B6150170)

Author brief: Men Yukui(1993-), main research interests: optimal design and operational research of the refrigeration and air-conditioning system, (E-mail)1103253973@qq.com.

Liu Xuefeng(corresponding author), associate professor, master supervisor, (E-mail)lyxfliu@scut.edu.cn.

nearer cold sources had the higher overlapped ratio, better adaptability of distribution strategy, larger weight.

Keywords: chilled water system; direct-return layout; thermal-humidity load reconstruction; adaptability

中央空调系统耗电量占社会总用电量 20% 左右, 占建筑总能耗的 30%~60%^[1], 而在实际运行过程中冷冻水和冷却水系统的水泵耗电量占空调系统总电量的 20%~30%^[2]。空调系统一般是按照最大负荷设计的, 大多数情况下空调系统是在部分负荷下运行的。所以, 在前期设计时应该对冷冻水系统进行综合设计, 使得管网在各种负荷率下运行都具有好的适应性, 同时, 应该为冷冻水系统运行提供合理的运行控制策略与解决方案。

目前, 学者们针对水系统部分负荷运行情况提出的优化设计与控制策略, 大多只考虑到冷水机组和冷冻水泵, 对冷水系统进行能耗预测实时控制冷水机组及冷冻水泵的运行。闫唯嘉等^[3]、Chang 等^[4]、Lee 等^[5]用传统的最优化算法根据冷水机组出水温度, 模拟计算冷冻水系统输送的最低能耗, 实现冷水机组负荷分配的优化。赵天怡等^[6]利用了传统的最优化计算方法实现在线优化配置变频水泵的台数。Liu 等^[7]提出了变压差控制与变频泵相结合的节能控制策略应用于空调系统, 而 Gao 等^[8]提出将容错控制和压差控制相结合实时控制一次泵与二次泵的启停。Kusiak 等^[9]则提出了基于神经网络与粒子群算法相结合的冷水系统的能耗模型, 模型包括了冷水机组、冷冻水泵、风机及再热装置, 同时对冷冻水泵与冷水机组进行在线模拟优化, 实时控制冷冻水泵与冷水机组的运行。Ma 等^[10-11]针对二次泵水系统的变负荷运行的问题, 把能耗预测、最优化技术与管理策略、控制策略相结合, 综合考虑系统与子系统之间的特点与交互效应, 同时还提出了使用旁通截止阀来降低二次泵水系统的能耗。Ali 等^[12]认为暖通空调系统的各变量是耦合的, 必须进行整体优化配置才能使得冷冻水系统达到最节能, 但没有具体针对部分负荷率时管网前期优化设计。有少部分学者针对水系统部分负荷运行时在设计初期考虑到管网的能耗问题而进行优化设计, 但是没有结合后期部分负荷运行对冷冻水系统进行优化设计并提出相应的控制策略^[13]。本文提出了采用变步长+随机走步的次优化求解方法对多变量、强耦合的冷水系统进行负荷重新分配的优化计算, 使得

水系统对各末端负荷变化时管网有良好的适应性, 同时变步长+随机走步法的次优化求解方法通过有限次的随机走步计算基础上获得稍次于最优解的次优解群。与传统的最优化方法相比避免了传统最优化方法计算次数极大甚至不收敛的问题, 当初初始值改变时对最终的结果不会有太大的差异^[14-16], 而且对多个工况下的次优解中各变量分布规律进行分析, 可以寻求管网能耗最低的负荷搭配组合, 对各末端进行权重分析, 使得各末端有良好的适应性, 为冷水系统随机运行行为提供控制策略。

1 热湿负荷分配模型

1.1 次优解群模型

在实际工程中, 工程技术人员参照管网时间分布特性设计最优方案, 在负荷率变化或建筑功能改变时, 可能导致最优设计方案失效, 即设计方案的适应性不强。因此, 笔者选择采用变步长+随机走步法的次优化求解方法获得次优解群, 抛弃了最优解寻求次优解, 对次优解群取一定的能耗差控制裕度(规定能耗差控制裕度为经筛选后次优解群中最大能耗比最小能耗高出的百分比)对各末端人数分布规律进行统计, 可以得到末端人数分布的解群带。多个负荷率工况下的解群带有一定的重叠率, 在冷冻水管网的前期设计与后期改造时, 根据解群带的重叠率选择合适的末端人数, 使得各末端人数在每一个工况下都接近于最优解, 在不同负荷率运行条件下都有好的适应性。

本文以一次回风系统进行计算, 采用次优化求解方法对异程式管网计算模型在多个工况下进行热湿负荷重构的次优化求解计算, 对获得的次优解群进行统计分析, 计算模型所采用的变步长+随机走步次优化计算方法的计算逻辑图如图 1 所示。

1.2 水力计算模型

计算涉及到的异程布置管网计算的拓扑结构型如图 2 所示, 离冷源侧最远端为 AHU_1, 最近端为 AHU_16, 每个 AHU 的支路管路包含了 AHU、阀门及连接管道等元件。

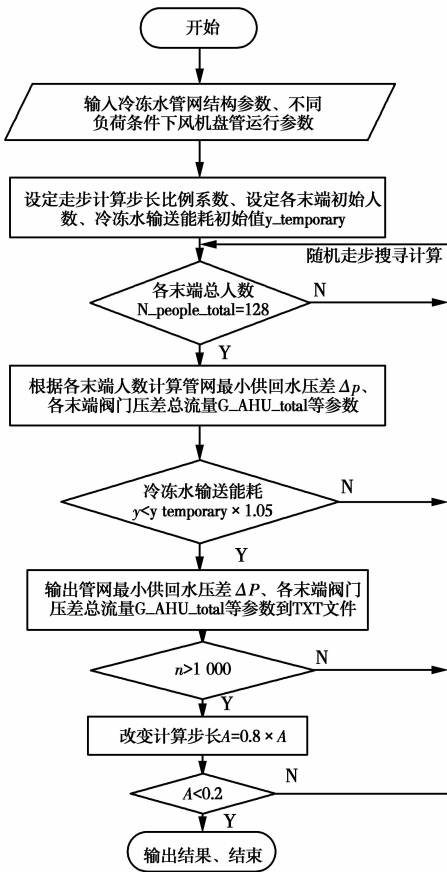


图 1 冷冻水系统热湿负荷分配计算逻辑图

Fig. 1 The distribution calculation logic of thermal and moisture load of chilled water system

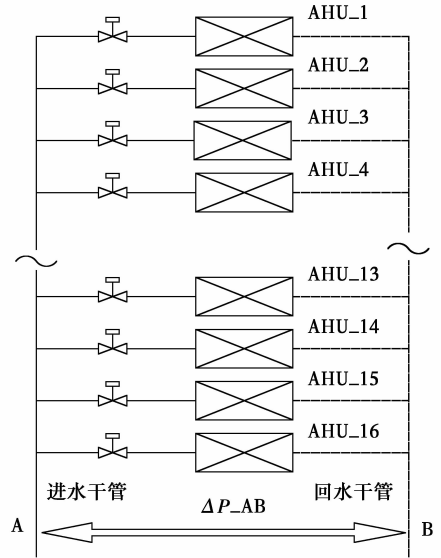


图 2 冷冻水系统管网拓扑结构

Fig. 2 Topology of chilled water system

对异程布置冷水系统管网水力特性计算分析^[17],根据压力平衡和流量守恒原理,假设所有末端支路的阀门在水力可调的情况下,算出各支管路的平衡压差,比较出各支管路中的最大的平衡压差,即管网的供回水压差,由压力平衡原理可计算出各支管路的阀门压降。中央空调冷水系统管网最小供回水压差的水力计算模型方程组如式(1)所示。

$$\begin{cases}
 \Delta P_{branch_b_1} = (S_{AHU_1} + S_{branch_1})G_{branch_1}^2 + S_{main_in_1} (G_{branch_1} + \dots + G_{branch_n})^2 + \\
 (S_{main_out_1}G_{branch_1}^2 + S_{main_out_2} (G_{branch_1} + G_{branch_2})^2 + \dots + \\
 S_{main_out_n} (G_{branch_1} + \dots + G_{branch_n})^2) \\
 \Delta P_{branch_b_2} = (S_{AHU_2} + S_{branch_2})G_{branch_2}^2 + (S_{main_in_1} (G_{branch_1} + \dots + G_{branch_n})^2 + \\
 S_{main_in_2} (G_{branch_2} + \dots + G_{branch_n})^2) + (S_{main_out_2} (G_{branch_1} + G_{branch_2})^2 + \\
 \dots + S_{main_out_n} (G_{branch_1} + \dots + G_{branch_n})^2) \\
 \dots \dots \\
 \Delta P_{branch_b_n} = (S_{AHU_n} + S_{branch_n})G_{branch_n}^2 + (S_{main_in_1} (G_{branch_1} + \dots + G_{branch_n})^2 + \\
 S_{main_in_2} (G_{branch_2} + \dots + G_{branch_n})^2 + \dots + S_{main_in_n}G_{branch_n}^2) + \\
 S_{main_out_n} (G_{branch_1} + \dots + G_{branch_n})^2 \\
 \Delta P_{AB} = \max\{\Delta P_{branch_b_1}, \dots, \Delta P_{branch_b_n}\} \\
 \Delta P_{valve_1} = \Delta P_{AB} - \Delta P_{branch_b_1} \\
 \dots \dots \\
 \Delta P_{valve_n} = \Delta P_{AB} - \Delta P_{branch_b_n}
 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta P_{branch_b_n}$ 为支管路的平衡压降; S_{AHU_n} 为末端设备 AHU 的阻抗; S_{branch_n} 为支管路阻抗; $S_{main_in_n}$ 为两个节点之间的供水干管阻抗; $S_{main_out_n}$ 为两个节点之间的回水干管阻抗; ΔP_{AB} 为管网的最小供回水压差; 下标 n 为管网中各计算节点的序号。

2 热湿负荷次优化分配

2.1 基本计算条件

现代的写字楼,一般有会议室、招待室、一般办公室、高级办公室等房间。由于各种原因,写字楼的

办公性质常有改变,这时物业管理处就应该考虑在既有的管网条件下对新入住的公司重新规划各个办公室的使用功能,使得管网的能耗在整个空调季下都有良好的适应性和较低的能耗。所以,本文针对写字楼做研究,建立了一个包含 16 个空气处理末端,每一个末端限制人数为 3 到 13 人的异程式管网计算模型,以冷冻水输送能耗作为目标函数进行热湿负荷重构。以广州为例,按照广州空调季的负荷率分布假设 4 个运行工况,分别为 100% 负荷率、80% 负荷率、60% 负荷率、40% 负荷率进行次优化计算。热湿负荷重构过程中所有末端承担总人数保持 128 人不变,采用次优化的计算方法取一定的能耗

差控制欲度计算获得各种负荷率下的解群,综合考虑各个负荷率下的解群带的重叠率,可以得到每个末端人数限制范围,在这个范围内安排人数可以控制管网的能耗在一定的范围内^[18]。

冷冻水系统中各个末端的负荷由围护结构传入的热量、新风冷负荷、人体散热量、照明及设备散热组成,通过改变了室外气象条件计算房间在不同负荷率条件下的负荷(即动态负荷)。冷冻水系统的异程式管网从离冷源侧最远端开始由 1~ n 进行编号,并联了 16 个 AHU 节点,管网的节点计算参数如表 1 所示。

表 1 异程式管网计算参数

Table 1 Calculation parameters of direct-return chilled water system

节点	$D_{branch,n}$	$L_{branch,n}$	$\xi_{branch,n}$	$\Delta_{branch,n}$	$D_{branch,n}$	$L_{branch,n}$	$\xi_{branch,n}$	$\Delta_{branch,n}$	$D_{branch,n}$	$L_{branch,n}$	$\xi_{branch,n}$	$\Delta_{branch,n}$
AHU_1	0.04	5	3	0.000 2	0.04	10	3	0.000 2	0.04	10	3	0.000 2
AHU_2	0.04	5	3	0.000 2	0.05	10	3	0.000 2	0.05	10	3	0.000 2
AHU_3	0.04	5	3	0.000 2	0.065	10	3	0.000 2	0.065	10	3	0.000 2
AHU_4	0.04	5	3	0.000 2	0.065	10	3	0.000 2	0.065	10	3	0.000 2
AHU_5	0.04	5	3	0.000 2	0.065	10	3	0.000 2	0.065	10	3	0.000 2
AHU_6	0.04	5	3	0.000 2	0.065	10	3	0.000 2	0.065	10	3	0.000 2
AHU_7	0.04	5	3	0.000 2	0.08	10	3	0.000 2	0.08	10	3	0.000 2
AHU_8	0.04	5	3	0.000 2	0.08	10	3	0.000 2	0.08	10	3	0.000 2
AHU_9	0.04	5	3	0.000 2	0.08	10	3	0.000 2	0.08	10	3	0.000 2
AHU_10	0.04	5	3	0.000 2	0.08	10	3	0.000 2	0.08	10	3	0.000 2
AHU_11	0.04	5	3	0.000 2	0.1	10	3	0.000 2	0.1	10	3	0.000 2
AHU_12	0.04	5	3	0.000 2	0.1	10	3	0.000 2	0.1	10	3	0.000 2
AHU_13	0.04	5	3	0.000 2	0.1	10	3	0.000 2	0.1	10	3	0.000 2
AHU_14	0.04	5	3	0.000 2	0.1	10	3	0.000 2	0.1	10	3	0.000 2
AHU_15	0.04	5	3	0.000 2	0.1	10	3	0.000 2	0.1	10	3	0.000 2
AHU_16	0.04	5	3	0.000 2	0.1	10	3	0.000 2	0.1	10	3	0.000 2

2.2 能耗控制裕度对解群特性的影响

为某负荷率解群做次优化,引入了能耗差控制裕度这一概念,能耗差控制裕度为经过删选后的次优解群中最大能耗比最小能耗高出的百分比,定义为

$$G_{sub,M} \subset G_{all,M}$$

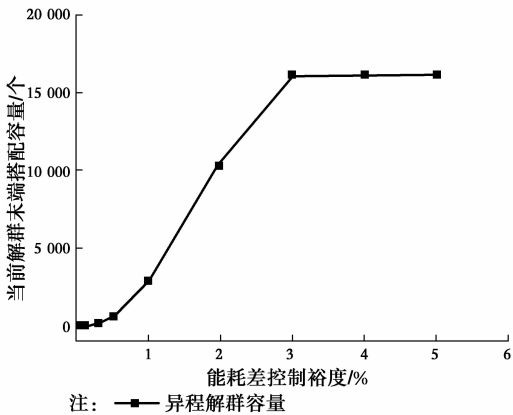
$$\max(G_{sub,M}) = (1 + M_x)G_{cal,M}$$

式中: $G_{sub,M}$ 为负荷率为 x 时的次优解群; $G_{all,M}$ 为负荷率为 x 时计算输出的所有解群; M_x 为求解次

优解群所取得能耗差控制欲度; $G_{cal,M}$ 为负荷率为 x 时次优化计算得到的最终结果,即所有解群中的最小值^[18]。

图 3 为在 100% 负荷率的计算条件下,一次次优化计算的解群中末端搭配容量随着能耗差控制裕度变化的规律。图中反映了解群末端搭配容量随着能耗差控制裕度的增大而增大,能耗差控制裕度达到一定大后解群容量将不再增加,所以,为了实现实际工程前期设计与后期改造中的房间功能灵活设置

与使用期间的适应性必须充分考虑能耗差控制裕度的取值。



注：—■— 异程解群容量

图 3 当前计算条件下结群容量随着能耗差控制裕度的变化规律图

Fig. 3 The group capacity variation with scope of controlled energy consumption in the current calculation conditions

2.3 单工况下次优化解群适应性分析

2.3.1 次优化求解方法的可行性 在 100% 负荷率条件下对一次回风系统管网末端热湿负荷分配优化计算使用变步长 + 随机走步次优化计算方法,以管网的冷冻水输送能耗作为目标函数进行优化计算,图 4 记录了求解过程的解群记录情况。在计算的初始阶段,解群的解在冷冻水输送能耗较高的位置带比较密集,逐渐的优化后,其能耗值随着优化过程计算步长的减小逐渐减小,在 100% 负荷率条件下的 30 次次优化计算过程中,完成优化计算的时间最长不超过 15 min,而遗传算法和模拟退火算法等传统的最优化方法计算时间达到几小时甚至更长,有可能陷入局部最优或不收敛,相比之下次优化计算的解群很快达到收敛并且不会陷入局部最优^[14-16]。

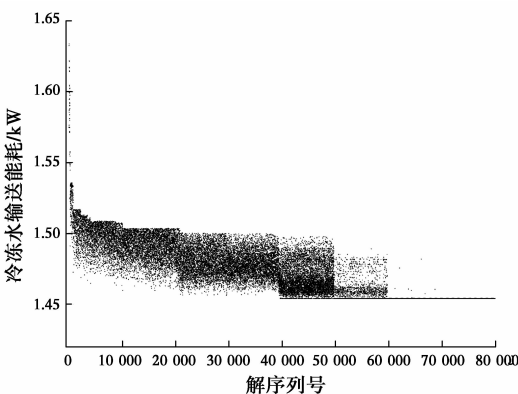


图 4 求解过程云图

Fig. 4 The solution process nephogram

对异程管网次优化问题进行了 30 次运算,任取其中的 10 次结果,得到总的优化逼近过程如图 5 所示,优化的最终末端人数分布如图 6 所示。由于计算初始变量的随机性,10 次运算的初始值不一样,异程管网优化的最终结果冷冻水输送能耗最大值是 1.45 kW,最小值是 1.46 kW,10 次的结果差异总体上不超过 0.46%,优化的最终末端人数分布也差异不大,与使用神经网络优化算法初始值位置不同导致优化结果有很大的差异相比,变步长 + 随机走步优化计算方法在计算结果上有很大的收敛性和复现性^[15]。

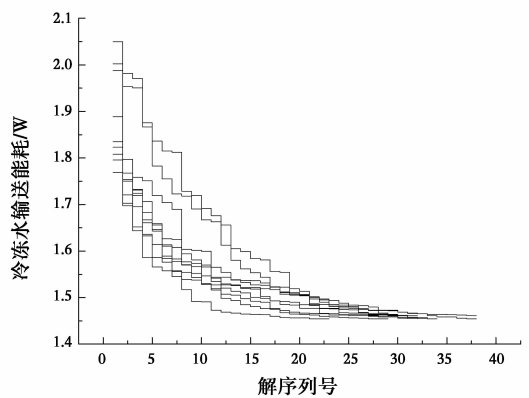


图 5 优化结果逼近过程

Fig. 5 Optimizegraduallyprocess

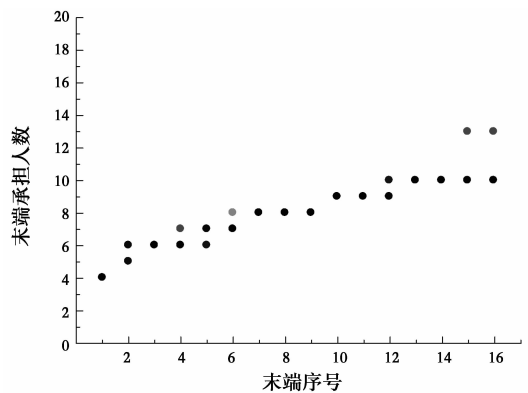


图 6 多次优化运算结果末端人数分布

Fig. 6 The distribution of the terminal numbers after multiple operators

图 7 所示为异程管网 10 次次优化计算结果各末端流量,冷冻水流量离冷源侧由远及近依次增大。图 8 所示为异程管网 10 次次优化计算结果各末端阀门压差,阀门压差越大代表了开度越小,末端阀门压差离冷源侧由远及近依次增大,离冷源侧最近的末端压差达到最大。以上结论在周辰的研究中已经得到验证^[19]。

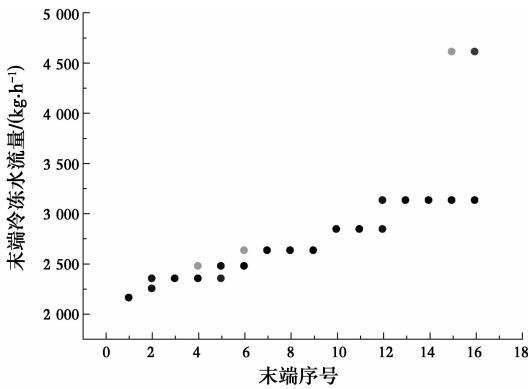


图 7 10 次优化计算结果各末端流量

Fig. 7 Each terminal traffic of ten times sub-optimization

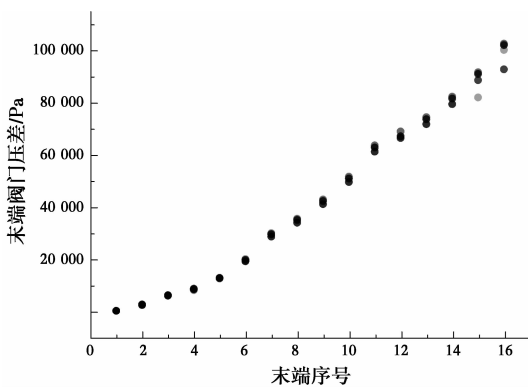


图 8 异程管网 10 次优化运算结果各末端阀门压差

Fig. 8 Each terminal valve pressure of ten times sub-optimization

2.3.2 单工况下的次优解群 任取 30 次优化计算中的一次优化计算,将优化计算过程中输出的所有解群各末端人数出现频率分布做统计如图 9 所示,图 10 统计了图 9 中的各曲线的顶点,显示了异程管网末端的人数频率分布的峰值人数由远及近呈现递增趋势,并且每个末端的人数分布概率都呈现正态分布,对多工况下的次优解群的重叠性判据提供很好的基础。

2.3.3 AHU 人数固定不变对管网的适应性影响 现在,因为各种原因,写字楼办公性质常有变化,中央空调系统的各末端负荷相应的发生改变,各末端房间的功能要重新规划。当有特殊功能区域的负荷与其他区域的负荷相比较低的情况下,例如,当高级办公室只有一个使用者时,这对改造提出了更高的要求。所以,利用基于次优解群的计算机逻辑算法,对某些末端进行精确的热湿负荷分配,寻找合理的改造方案。在 100% 负荷率的条件下,当 AHU_1、AHU_4、AHU_7、AHU_10、AHU_13、AHU_16 的末端人数都分别固定为 1 人,其他的计算条件不变

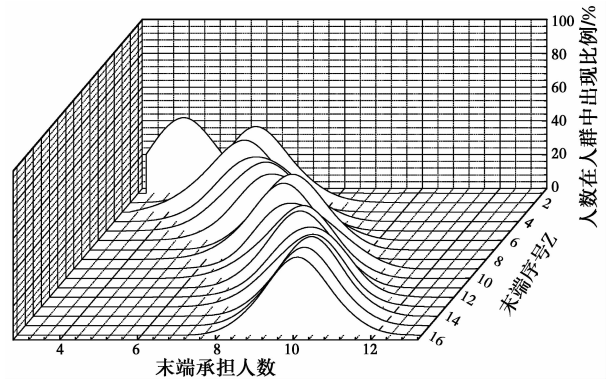
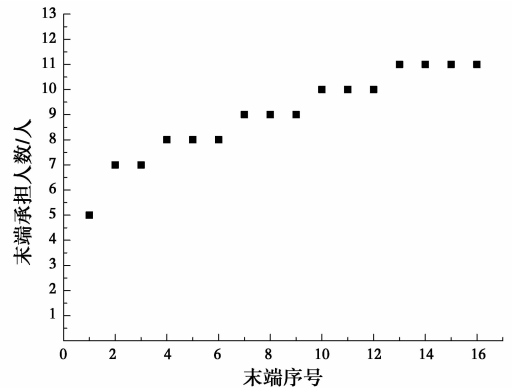


图 9 求解过程末端人数分布频率

Fig. 9 The distribution frequency with terminal numbers in solving process



注: ■ 异程管网末端分布频率最大人数

图 10 求解过程末端人数分布频率峰值

Fig. 10 The distribution peak frequency with terminal numbers of solving process

时,在这 6 种情况下分别进行热湿负荷重构的次优化计算,如图 11 所示总体上人数分布各末端离冷源侧由远及近呈现人数递增的趋势,结果仍符合异程管网布置的管网水力特性^[19]。

图 12 显示了异程管网各末端人数固定位置不同时整个冷冻水管网的冷冻水输送能耗的差别。为了便于分析,在考虑计算模型时,风量的变化仅体现在新风量的变化,当 AHU_1 的人数固定在 1 人时,AHU_1 末端的负荷为 7.78 kW,风量 1 980 m³/h,通过计算得到的整个管网的冷冻水输送能耗为 1.44 kW,而固定人数在 AHU_16 时能耗值达到 1.59 kW,比固定人数在 AHU_1 时能耗高了 0.15 kW。在实际中央空调系统工程改造方案中,针对既定的管网若是异程管网布置形式则把人数相对较少的房间设置在管网的最远端,参照图 11、图 12 可以妥善安排对末端人数控制有严格要求的房间,使得管网依旧有良好的适应性。

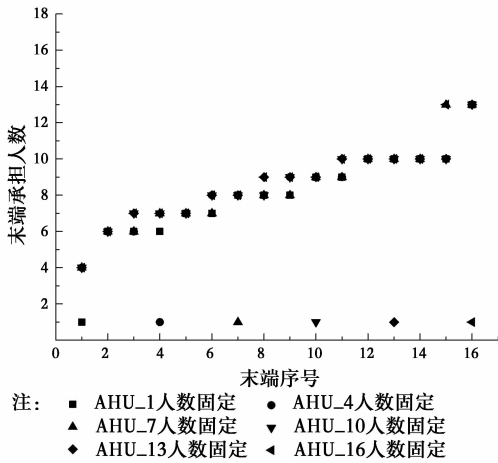


图 11 各末端人数固定不变的优化结果

Fig. 11 Optimal results with fixed terminal numbers

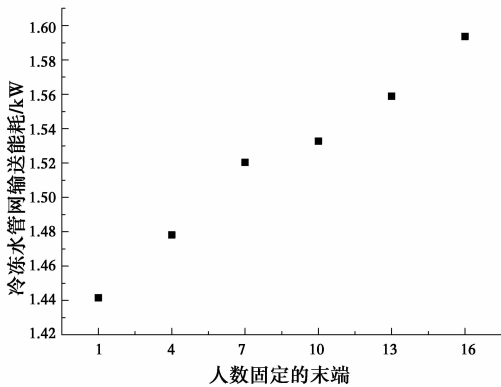


图 12 各末端人数固定不变的冷冻水输送能耗

Fig. 12 The energy consumption for conveying chilled water with fixed terminal numbers

2.4 单工况下冷冻水系统能效分析

以冷冻水管网为研究对象,对整个管网进行能效分析。冷冻水系统的能效定义为

$$E = \frac{W_{冷}}{W_{末端}} = \frac{G_{冷} \times \Delta P_{冷}}{Q_{末端} + W_{加热器}}$$

式中: $W_{冷}$ 为冷冻水输送所需能耗; $W_{末端}$ 为管网末端总能耗; $G_{冷}$ 为冷冻水流量; $\Delta P_{冷}$ 为冷冻水供回水压差; $Q_{末端}$ 为末端所承担负荷; $W_{加热器}$ 为加热器输出功率。

对 100% 负荷率下管网优化人数分布方案的水系统能效和管网人数均匀分布的水系统能效进行了比较,如图 13 所示。管网优化结果的能效为 0.7, 管网人数均匀分布的能效为 1.3, 相比低了 46%。在管网次优化解群的各个位置中随机抽取一些解,得到的管网能效如图 14 所示,异程管网初始能效值为 0.97,解群中各末端人数随机搭配的能效随着解

群的不断优化,管网能效总体趋势是逐渐减小的。

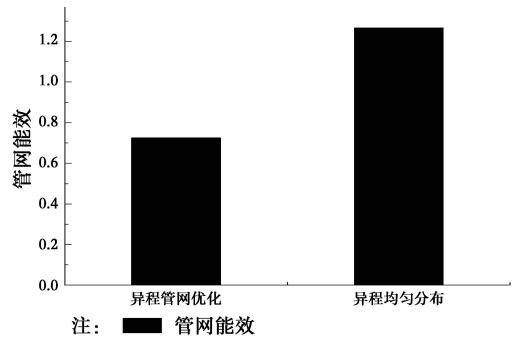


图 13 次优化结果与人数均匀分布结果能效比较

Fig. 13 Optimal result comparison with the uniform numbers energy efficiency

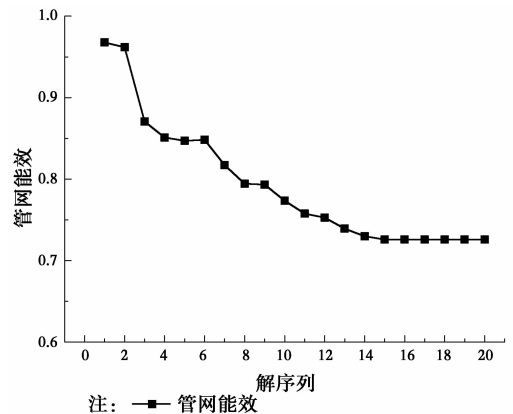


图 14 次优化结果能效统计

Fig. 14 Statistics of sub-optimal energy efficiency

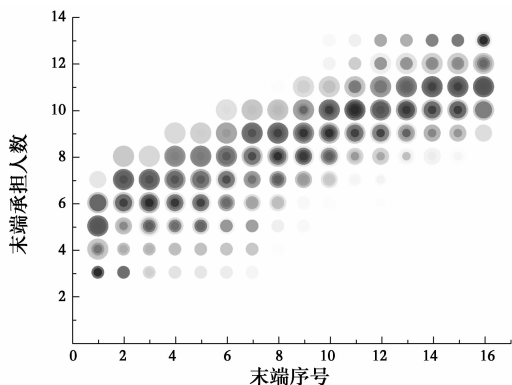
2.5 多工况下次优化解群适应性分析

在中央空调系统的建造中,对冷冻水管网的布置往往是一次性的,不能像末端风量、末端流量等变量一样可以进行多次重复的调节。同时,中央空调系统大部分时间是在部分负荷下运行的,不同的负荷率分布会造成全年总能耗差异可达到 55% 以上,所以,热湿负荷分配必须综合考虑各个负荷率下的各种工况,采用次优化求解的方法对每种工况进行次优化计算都可以获得一个次优的解群带,综合分析各个工况次优化计算解群中变量统计分布规律与解群带重叠区域,对各变量进行权重分析,为冷冻水系统前期设计提供基础。

对以上设计的 4 种工况,分别进行次优化计算,分别从 30 次次优化计算中取一次次优化运算过程,把能耗差控制裕度为 5% 的所有搭配进行保留,对所有各末端人数搭配进行统计分析,如图 15 所示,图上圆的大小代表负荷率的大小,面积最大的圆代表 100% 负荷率,圆面积依次减小代表的负荷率也

依次减小,而显示的区域颜色越深代表出现的概率越大。各个负荷率下的解群带的重叠率越大则稳定性越好,符永正^[20]做了关于管网稳定性研究得出结论表明:在异程系统中离冷源越近的支路稳定性越好。综合考虑 4 种工况寻求最优解的时候,离冷源侧比较近的这些末端 AHU_8、AHU_9、AHU_10、AHU_11、AHU_13、AHU_14、AHU_15 的最大重叠区在 4 种工况下的概率都大于 20%,而 AHU_10 的最大重叠区在 4 种工况下的概率都大于 24%。所以,在前期设计时将这些人数的设置在这些重叠区域范围内时,可以使各末端在不同负荷下有好的适应性,而对于重叠概率相对较小的末端,则应综合考虑各个负荷率条件下优化的结果合理设计。

权重的大小体现了各末端对冷冻水系统热力学特性影响大小,在重叠区中变量的重叠概率越小体现了末端的权重越小,相反则越大。如图 15 所示,分析解群带的重叠率可得离冷源侧近的末端权重相对比较大,在解群带重叠区中离冷源远的 AHU_1、AHU_2、AHU_4、AHU_5、AHU_6、AHU_7 等末端的综合重叠概率相对其他末端较小,则权重比较低,而 AHU_1 最大重叠区在 4 个工况中最小概率仅 3%,对于权重较小的末端在不同负荷率下次优化的结果相差很大,说明这些末端的可选择人数的范围较广,所以在前期设计及后期改造过程中这些权重小的末端设计相对较灵活^[20]。



注: ●—40%负荷率 ●—60%负荷率 ●—80%负荷率 ●—100%负荷率

图 15 各负荷率下解群各末端人数分布概率图

Fig. 15 The probability graph with terminal numbers distribution of group on different load rate

3 结论

1)充分考虑了中央空调冷冻水管网的水

力特性和热力特性,提出了基于次优理论以冷冻水管网输送能耗为评价指标的冷冻水系统热湿负荷分配设计方案。

2)对次优化计算中输出的所有解群加以一定的能耗差控制,可以得到满足设计需求的解群,参考解群进行设计可以使冷冻水管网具有一定的适应性。

3)在末端管网人数固定位置不同时,用次优的计算方法得到的解群符合管网运行的固有特性,反映了该方法的可行性。

4)综合分析多个工况下的次优解群中变量的统计规律,可得出在多个工况下适应性较强的各末端人数分布与各末端权重大小,为冷水系统前期设计及后期改造与提供依据。

参考文献:

- [1] 徐莉君,张胜. 中央空调系统节能技术研究[J]. 科技尚品, 2016(1):197-198.
XU L J, ZHANG S. The saving technology research of central air conditioning system energy [J]. Premiere, 2016(1):197-198. (in Chinese)
- [2] 徐建. 某商场空调冷冻水系统水温温差系统分析[J]. 建筑热能通风空调, 2015(3):63-66.
XU J. A nalysis of large chilled water temperature difference of air conditioning system of an emporium [J]. Building Energy & Environment, 2015(3):63-66. (in Chinese)
- [3] 闫唯嘉,任庆昌,闫秀英. 基于遗传算法的冷水机组负荷分配与出水温度的优化[J]. 制冷与空调, 2011(2):37-40.
YAN W J, REN Q C, YAN X Y. Load distribution of chillers and the optimum of its outlet water based on genetic algorithm [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2011(2):37-40. (in Chinese)
- [4] 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(4):448-456.
- [5] LEE K P, CHENG T A. A simulation-optimization approach for energy efficiency of chilled water system [J]. Energy & Buildings, 2012, 54(6):290-296.
- [6] 赵天怡,张吉礼,马良栋,等. 并联变频水泵在线优化控制方法[J]. 暖通空调, 2011(4):96-100.
ZHAO T Y, ZHANG J L, MA L D, et al. Online optimal control scheme of variable speed parallel water pumps [J]. HVAC, 2011(4):96-100. (in Chinese)

- [7] LIU X F, LIU J P, LU Z T, et al. Diversity of energy-saving control strategy for a parallel chilled water pump based on variable differential pressure control in an air-conditioning system [J]. *Energy*, 2015, 88 :718-733.
- [8] GAO D C, WANG S, SUN Y. A fault-tolerant and energy efficient control strategy for primary-secondary chilled water systems in buildings [J]. *Energy & Buildings*, 2011, 43(12):3646-3656.
- [9] KUSIAK A, LI M, TANG F. Modeling and optimization of HVAC energy consumption [J]. *Applied Energy*, 2010, 87(10):3092-3102.
- [10] MA Z, WANG S. An optimal control strategy for complex building central chilled water systems for practical and real-time applications [J]. *Building & Environment*, 2009, 44(6):1188-1198.
- [11] MA Z, WANG S. Enhancing the performance of large primary-secondary chilled water systems by using bypass check valve [J]. *Energy*, 2011, 36 (1): 268-276.
- [12] ALI M, VUKOVIC V, SAHIR M H, et al. Energy analysis of chilled water system configurations using simulation-based optimization [J]. *Energy & Buildings*, 2013, 59:111-122.
- [13] 冯小平,龙惟定. 基于遗传算法的集中空调水系统管网优化设计[J]. *流体机械*, 2007(3):80-88.
FENG X P, LONG W D. Optimal design of central air conditioning water system using genetic algorithm [J]. *Fluid Machinery*, 2007(3):80-88. (in Chinese)
- [14] 马永杰,云文霞. 遗传算法研究进展[J]. *计算机应用研究*, 2012(4):1201-1210.
MA Y J, YUN W X. Research progress of genetic algorithm [J]. *Application Research of Computers*, 2012(4):1201-1210. (in Chinese)
- [15] 牛向阳. 神经网络优化问题研究进展[J]. *阜阳师范学院学报(自然科学版)*, 2008(4):34-38.
NIU X Y. The research of neural network optimization [J]. *Journal of Fuyang Teachers College (Natural Science)*, 2008(4):34-38. (in Chinese)
- [16] 陈得宝,魏华,邹锋,等. 模拟退火教学式优化算法[J]. *计算机应用研究*, 2014(12):3355-3356.
CHEN D B, WEI H, ZOU F, et al. Simulated annealing teaching-learning-based optimization algorithm [J]. *Application Research of Computers*, 2014(12):3355-3356. (in Chinese)
- [17] 刘雪峰,刘金平,陈星龙. 异程布置的冷冻水系统管网水力特性计算方法[J]. *土木建筑与环境工程*, 2013, 35 (5):90-97.
LIU X F, LIU J P, CHEN X L. Calculation method of hydraulic characteristic for direct-return chilled water system [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2013, 35 (5):90-97. (in Chinese)
- [18] 卢智涛. 次优解群分析法在复杂变量的冷源系统优化控制中的研究[D]. 广州:华南理工大学, 2015.
LU Z T. Application research of second best solution group analysis method in chilled source system with complex variables [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [19] 周辰,孙多斌,王珏. 冷冻水管网环路动态平衡探究[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2016, 35 (9):968-972.
ZHOU C, SUN D B, WANG J. The study of chilled pipeline network's dynamic equilibrium [J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2016, 35(9):968-972. (in Chinese)
- [20] 符永正,吴克启. 闭式水循环系统的稳定性分析[J]. *流体机械*, 2005(12):45-48, 15.
FU Y Z, WU K Q. Stability analysis of closed-loop water system [J]. *Fluid Machinery*, 2005(12):45-48, 15. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)