DOI:10.15986/j.1006-7930.2012.05.024

第 44 卷 第 5 期
2012 年 10 月

西 安 建 筑 科 技 大 学 学 报(自然科学版)
J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)

Vol. 44 No. 5
Oct. 2012

中央空调系统的动态参数优化研究

蒋红梅[1,2],任庆昌[1],冯增喜[1]

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院,陕西 西安 710055;
2. 兰州理工大学电气与信息工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘 要:为了降低空调系统的能量消耗,根据中央空调系统的特性,分析并提出了中央空调系统的优化目标和约束条件,建立了动态参数优化模型. 采用 BFGS 变尺度法来构造和改进序列二次规划,进行寻优计算,得到使中央空调系统能耗最小的动态参数运行值. 通过仿真与实验分析了系统动态参数优化的能量消耗,结果表明优化动态参数的方法能够有效地降低空调系统的能耗.

关键词:空调系统;参数优化;节能;变尺度算法

中图分类号:TP273 **文献标志码**:A **文章编号**:1006-7930(2012)05-0695-05

中央空调是现代建筑中的能耗大户,其耗能占整个建筑能耗的 50%~70%. 但空调系统在实际运行中,90%的时间内是处于部分负荷工况下的,空气处理设备的能力有很大的富裕,因而,运行调节也具有很大的灵活性. 在中央空调系统运行管理中,缺乏必要的引导和管理,致使中央空调系统运行效率不高,能源浪费严重,存在着巨大的节能潜力. 所以研究空调系统运行的最佳动态参数,对降低系统的能量消耗具有重大意义[1-3]. 本文根据中央空调系统的运行特点和系统设备的物理特性,提出了优化目标和约束条件,建立了系统优化模型. 采用变尺度法构造和改进序列二次规划法的海赛矩阵,通过该算法进行寻优计算,得到冷冻水供回水压差、冷冻水供回水温差和送风管道静压等动态参数的优化值并进行控制,使空调系统在满足环境舒适性的同时,达到最大的能源利用率.

1 中央空调系统组成

本文以西安建筑科技大学智能建筑环境技术实验室中央空调系统为研究对象,其组成结构如图 1 所示.

该系统主要由冷却塔、冷却塔风机、冷却水泵、冷水机组、一次泵、二次泵、空气处理单元和独立的末端区域(空调房间)组成. 包含有各种传感器、控制器和执行器等自控设备. 空调机组的送风量可通过变频风机进行调节,每个房间的送风可用末端控制器进行风量调节. 冷冻水的流量可通过冷冻水阀的开度调节. 冷冻水供回水压差由变频二次泵调节[2]. 本实验系统可以对空调系

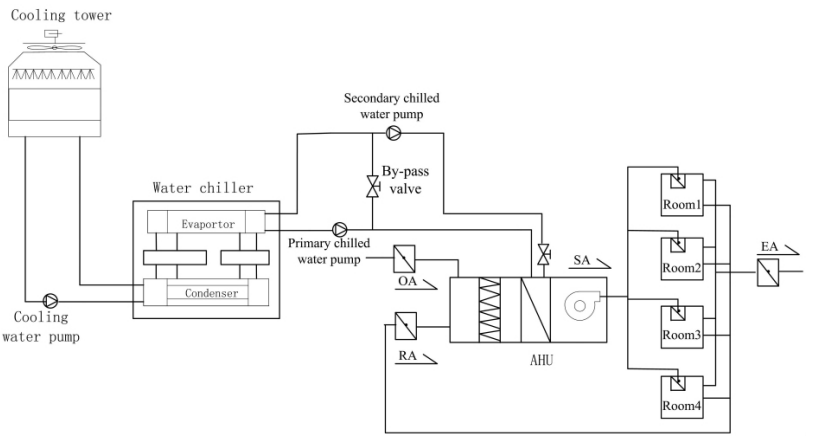

图 1 空调系统组成结构图

Fig. 1 Structure diagram of air conditioning system

收稿日期:2012-05-16 **修改稿日期**:2012-09-18
基金项目:住房和城乡建设部科学技术项目(2012-K1-35);陕西省教育厅专项科研基金项目(11JK0914)
作者简介:蒋红梅(1976-),女,博士,主要从事智能建筑环境技术、中央空调系统优化控制与仿真研究.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

统的运行状况进行检测和控制,并有若干电量采集模块对系统的能耗进行计量.

2 优化模型建立

2.1 优化目标

中央空调系统的优化目标为满足系统冷负荷及室内舒适性要求的的前提下,使所有设备的能耗最小,其数学表达式为[4]:

$$\min P = P_{ch} + P_{chwp1} + P_{chwp2} + P_{fan} + P_{cw} + P_{ctf} \tag{1}$$

其中 P、P_{ch}、P_{chwp1}、P_{chwp2}、P_{fan}、P_{cw} 和 P_{ctf} 分别为系统能耗总和、冷水机组能耗、冷冻水一次泵能耗、冷冻水二次泵能耗、空气处理机组风机能耗、冷却塔风机能耗和冷却水泵能耗. 由于本系统中对冷却塔风机及冷却水泵不采用变频控制,其能耗之和 $P_{cw} + P_{ctf}$ 认为是一固定值,在优化中可不予考虑.

冷水机组运行时,若忽略掉冷却水温度的变化,冷水机组的能耗可以表示为:

$$P_{ch} = Q_{nom} COP_{nom} (a_0 + a_1 \frac{Q_{ch}}{Q_{nom}} + a_2 \frac{Q_{ch}^2}{Q_{nom}^2})(b_0 + b_1 T_{chws} + b_2 T_{chws}^2) \tag{2}$$

式中:Q_{nom} 和 COP_{nom} 为单个机组的名义制冷量和满负荷下的能效比;Q_{ch} 为机组的实际制冷量;T_{chws} 为机组冷冻水的回水温度;a_i 和 $b_i (i = 0,1,2)$ 为常系数.

对于可变频的冷冻水泵和供风风机来说,水泵输出功率与冷冻水质量流量之间具有单调性,供风风机输出功率与空气质量流量之间也具有单调性,所以模型结构相同.

冷冻水一次泵的能耗表示为:

$$P_{chw1} = P_{chw1,nom} (c_0 + c_1 \frac{m_{chw}}{m_{chw1,nom}} + c_2 \frac{m_{chw}^2}{m_{chw1,nom}^2}) \tag{3}$$

冷冻水二次泵的能耗表示为:

$$P_{chw2} = P_{chw2,nom} (d_0 + d_1 \frac{m_{chw}}{m_{chw2,nom}} + d_2 \frac{m_{chw}^2}{m_{chw2,nom}^2}) \tag{4}$$

式中:$P_{chw1,nom}$,$P_{chw2,nom}$ 和 $m_{chw1,nom}$,$m_{chw2,nom}$ 分别为冷冻水一、二次泵的满负荷条件下的理论功耗值和冷冻水的理论流量值. m_{chw} 为冷冻水实际流量,c_i 和 $d_i (i = 0,1,2)$ 为常系数.

供风风机的能耗表示为:

$$P_{fan} = P_{fan,nom} (e_0 + e_1 \frac{m_a}{m_{a,nom}} + e_2 \frac{m_a^2}{m_{a,nom}^2}) \tag{5}$$

式中:$P_{fan,nom}$ 和 $m_{ah,nom}$ 分别为供风风机的满负荷条件下的理论功耗值和空气的理论流量值;m_a 为空气的实际流量值;$e_i (i = 0,1,2)$ 为常系数.

2.2 约束条件

在中央空调系统节能优化的过程中,需考虑系统本身的一些物理约束条件和系统的能量、质量与压力平衡的关系[5]. 中央空调系统优化的约束条件有:

(1) 冷机的冷冻水流量、供风风机的送风风量和末端房间的空气流量应满足:

$$m_{chw,min} \leqslant m_{chw} \leqslant m_{chw,max}, m_{a,min} \leqslant m_a \leqslant m_{a,max}, \ m_{ari,min} \leqslant m_{ari} \leqslant m_{ari,max} (i = 1,2,3,4)$$

其中 $m_{chw,max}$、$m_{chw,min}$ 为冷冻水流量的最大、最小值. m_a、$m_{a,max}$、$m_{a,min}$ 为送风风量及其最大、最小值. m_{ari}、$m_{ari,max}$、$m_{ari,min}$ 为末端房间的空气流量及其最大、最小值.

(2) 冷机制冷量与冷冻水流量之间的关系应满足:

$$Q_{ch} = m_{chw} C_{ahw} (T_{chws} - T_{chwr}) \tag{6}$$

其中 m_{chw}、C_{ahw} 和 T_{chwr} 分别为冷冻水流量、冷冻水比热容和冷机供水温度.

(3) 冷机回水温度与送风温度应满足:

$$T_{chws,min} \leqslant T_{chws} \leqslant T_{chws,max}; T_{a,min} \leqslant T_a \leqslant T_{a,max} \tag{7}$$

(4) 末端房间空气流量最小值应满足:

$$m_{ari,min} = \frac{W_i}{C_a (T - T_a)} \tag{8}$$

其中 W_i、T、C_a 为房间负荷、房间设定温度、空气比热.

(5) 根据质量守恒原理,送风风量近似满足:

$$m_a = \sum_{i=1}^{4} m_{ari} \tag{9}$$

(6) 根据表冷器能量稳态守恒原理,空气的失热量和冷水的得热量近似相等,即满足:

$$m_a (h_2 - h_1) = m_{chw} C_{ahw} (T_{chws} - T_{chwr}) \tag{10}$$

其中 h_2 和 h_1 经过表冷器前后的空气焓值.

(7) 根据能量守恒定律,混合后的空气总流量应等于混合前两种空气的流量之和;根据热平衡原

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

理，混合后的空气总热量应等于混合前两种空气的热量之和，满足：

$$h_2 = (1-\alpha)h_r + \alpha h_o \tag{11}$$

其中 h_r、h_o 和 α 为空气处理机组回风焓值、新风焓值和新风量占送风量的百分比.

3　优化方法

中央空调系统优化问题属于多维非线性有约束的优化问题. 可用简单的数学表达式描述出来，对其求导也很简单[6-7]. 由于 $BFGS$ 变尺度法的数值稳定性好，超线性收敛的优点，可用 $BFGS$ 算法来构造和改进序列二次规划法，从而达到更好的优化效果.

对于一般的非线性规划问题：

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t.}\ \ g_i(x) = 0, i = 1,2,\cdots,m \\ g_i(x) \leqslant 0, i = m+1,\cdots,p \end{cases} \tag{12}$$

其中 $x = (x_1, x_2, \cdots, x_n)^{\mathrm{T}}$，$f(x)$ 和 $g_i(x)$ 都是实值连续函数. m 和 p 都是正整数. 函数 $f(x)$ 为目标函数，$g_i(x)$ 为约束函数. 满足所有约束条件的点称为可行点，所有可行点组成的集合称为可行域. 求解非线性规划问题(12)，就是在可行域上寻求一个点 x，使得目标函数 $f(x)$ 达到最小. 对每一个迭代点 $x^{(k)}$，可构造一个二次规划子问题，以这个子问题的解，作为迭代的搜索方向 $d^{(k)}$，并沿该方向做一维搜索，由 $x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha_k d^{(k)}$ 得下一个迭代点 $x^{(k+1)}$，其中 α_k 为步长. 重复上述迭代过程，直至获得(12)所需的近似最优解为止. 对(12)，可以构造相应的确定搜索方向 $d^{(k)}$ 的二次规划子问题，为式(13)：

$$\begin{cases} \min Q(d) = \dfrac{1}{2} d^{\mathrm{T}} G_k d + \nabla f(x^{(k)})^{\mathrm{T}} d \\ s.t.\ \ \nabla g_i(x^{(k)})^{\mathrm{T}} d + g_i(x^{(k)}) = 0, i \in E = 1,2,\cdots,m \\ \nabla g_i(x^{(k)})^{\mathrm{T}} d + g_i(x^{(k)}) \leqslant 0, i \in I = m+1,\cdots,p \end{cases} \tag{13}$$

可按如下计算步骤进行优化：

(1) 令 $k = l$，选取初始点 $x^{(1)}$，确定初始正定对称矩阵 G_1 及计算精度 $\varepsilon(\varepsilon > 0)$.

(2) 解最优 $d^{(k)}$ 及相应的乘子向量 $\delta^{(k)}$，若 $d^{(k)} = 0$，则取 $x^{(k+1)} = x^{(k)} + d^{(k)}$ 为近似最优解，计算结束；否则转(4).

(3) 从 $x^{(k)}$ 出发，沿方向 $d^{(k)}$，对目标函数 $\psi(\alpha) = \omega(x^{(k)} + \alpha d^{(k)}, \lambda^{(k)})$ 进行一维搜索，确定步长 α_k. 其中：$\omega(x,\lambda) = f(x) + \sum_{i\in E}\lambda_i |g_i(x)| + \sum_{i\in I}\lambda_i \max\{0, g_i(x)\}$. $\lambda^{(k)} = (\lambda_1^{(k)}, \cdots, \lambda_m^{(k)}, \lambda_{m+1}^{(k)}, \cdots, \lambda_p^{(k)})^{\mathrm{T}}$ 由 $\lambda^{(k-1)}$ 和 $\delta^{(k)}$ 根据式(14)确定.

$$\begin{cases} \lambda_i^{(1)} = |\delta_i^{(1)}|, i = 1,2,\cdots,m,\cdots,p \\ \lambda_i^{(k)} = \max\{|\delta_i^{(k)}|, \dfrac{1}{2}(\lambda_i^{(k-1)} + |\delta_i^{(k)}|)\}, i = 1,2,\cdots,m,\cdots,p; k > 1 \end{cases} \tag{14}$$

(4) 令 $x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha_k d^{(k)}$，若 $\| x^{(k+1)} - x^{(k)} \| < \varepsilon$ 则取 $x^{(k+1)}$ 为问题的近似最优解，计算结束；否则转(5).

(5) 按式(15)，即 $BFGS$ 公式将 G_k 修正为 G_{k+1}.

$$G_{k+1} = G_k - \frac{G_k s^{(k)} (s^{(k)})^{\mathrm{T}} G_k}{(s^{(k)})^{\mathrm{T}} G_k s^{(k)}} + \frac{\eta^{(k)} (\eta^{(k)})^{\mathrm{T}}}{(\eta^{(k)})^{\mathrm{T}} s^{(k)}} \tag{15}$$

其中，

$$s^{(k)} = x^{(k+1)} - x^{(k)}, \eta^{(k)} = \theta y^{(k)} + (1-\theta) G_k s^{(k)},$$

$$y^{(k)} = \nabla_x L(x^{(k+1)}, \delta^{(k)}) - \nabla_x L(x^{(k)}, \delta^{(k)}), L(x, \delta^{(k)}) = f(x) + \sum_{i=1}^{p} \delta_i^{(k)} g_i(x),$$

$$\delta^{(k)} = (\delta_1^{(k)}, \cdots, \delta_p^{(k)})^{\mathrm{T}}, \theta = \begin{cases} 1, (y^{(k)})^{\mathrm{T}} s^{(k)} \geqslant 0.2 (s^{(k)})^{\mathrm{T}} G_k s^{(k)} \\ \dfrac{0.8 (s^{(k)})^{\mathrm{T}} G_k s^{(k)}}{(s^{(k)})^{\mathrm{T}} G_k s^{(k)} - (y^{(k)})^{\mathrm{T}} s^{(k)}}, (y^{(k)})^{\mathrm{T}} s^{(k)} < 0.2 (s^{(k)})^{\mathrm{T}} G_k s^{(k)} \end{cases}$$

(6) 令 $k = k+1$，转(2).

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4 实验与结果分析

为了验证系统动态参数优化的节能效果,对中央空调的能量消耗进行仿真与实验研究.以本实验室中央空调系统为研究对象,优化目标为满足系统冷负荷及室内舒适性要求的前提下,使所有设备的能耗最小.由优化目标得可优化的变量有冷冻水回水温度 T_{chws}、冷冻水流量 m_{chw} 和空气流量 m_a,即每次优化的一个迭代点都是 $x=(T_{chws},m_{chw},m_a)$.设定初始点,按第3部分计算步骤进行优化,获得 x 的最优解.

选择夏季某日8:00~20:00,实验设定冷机供水温度与房间温度为固定值,分别为7.5 ℃和26 ℃.根据室内舒适性要求,选择最小新风百分比为15%.通过实验拟合出优化方程中的常系数值.不等式约束中的上下限值等由设备本身决定.冷机的冷冻水流量、风机的送风风量和末端房间的空气流量最大值分别为5 m^3/h、2 000 m^3/h 和500 m^3/h,最小值分别为2 m^3/h、400 m^3/h 和100 m^3/h.冷机回水温度与送风温度的最大和最小值为20 ℃和8 ℃.在空调的运行过程中,由于室内人员流动、室外温度变化、室内热源变化等引起空调区域的冷负荷是不断发生变化的,所以优化得到的参数值也不断发生变化.由于动态参数工作点变动过于频繁会影响系统运行的稳定性,所以设定60 min为一次优化过程,可得到一组优化的参数.由于优化的参数由一些动态变量来控制,即冷冻水流量由冷冻水供回水压差(DP)来控制,空气流量由送风管道静压(SP)来控制,也即每次优化后可得出一组动态变量值.其值如表1所示.

表1 空调系统优化参数表

Tab.1 The optimization parameters of air conditioning system

	Time/h												
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
T_{chws}/℃	12	12	12	12.5	12	12	12	13	13	13.5	13	12	12
DP/MPa	0.036	0.046	0.0563	0.0598	0.0621	0.065	0.066	0.069	0.066	0.063	0.059	0.046	0.041
SP/Pa	125.1	160.1	196.55	208.55	216.74	227.5	231.6	241.1	231.1	219.7	206.1	160.9	141.5

由表1可以看出优化的动态变量可随负荷的变化而变化.因此,优化的中央空调系统是能够随负荷的变化状况进行调节,不仅仅是送风量可实现变风量调节,冷冻水也可以实现变流量调节.

通过实验对空调系统各部件的能耗情况进行了测量,其结果如表2所示.

表2 空调系统优化能耗表

Tab.2 The optimization energy consumption of air conditioning system

	Time/h												
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
P_{ch}/kW	3.8103	3.9251	4.0448	4.0841	4.111	4.1462	4.1598	4.1909	4.1581	4.1205	4.076	3.9278	3.8643
P_{chwp1}/kW	0.6058	0.7754	0.9521	1.0102	1.0498	1.1019	1.122	1.1679	1.1195	1.0639	0.9981	0.7793	0.6856
P_{chwp2}/kW	0.7388	0.9456	1.161	1.2319	1.2803	1.3438	1.3683	1.4243	1.3652	1.2975	1.2172	0.9503	0.8361
P_{fan}/kW	0.7505	0.9605	1.1793	1.2513	1.3005	1.365	1.3898	1.4467	1.3867	1.3179	1.2364	0.9653	0.8492
$P_{cw}+P_{ctf}$/kW	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65
P/kW	7.5554	8.2566	8.9872	9.2275	9.3916	9.6069	9.6899	9.8798	9.6795	9.4498	9.1778	8.2727	7.8852

采用优化算法进行参数优化后的空调系统能耗与采用固定流量方法的能耗比较如图2所示.

由图2可以看出采用优化参数方法的总能耗为117.06 kWh.如采用固定参数的方法,则总能耗为124.568 kWh.可节约6.41%的系统能耗.

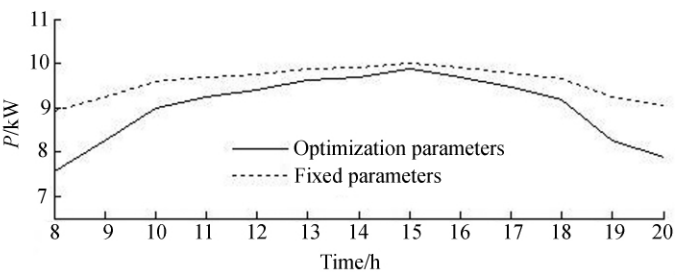

图2 空调系统能耗比较图

Fig.2 Diagram for energy consumption of air conditioning system

5 结 论

通过分析实际中央空调系统的构成与特性,本文提出了使其能耗最小的优化目标和约束条件,建立

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

了中央空调系统的优化模型. 并采用 BFGS 变尺度法来构造和改进序列二次规划,进行寻优计算,增强了序列二次规划法的数值稳定性和收敛性,找出中央空调系统的最优运行工况,得到使中央空调系统能耗最小的最优动态参数运行值. 并通过自动调节,实现中央空调系统的节能优化. 仿真与实验表明该方法有效地降低了中央空调系统的运行能耗.

参考文献　References

[1] 王建玉,任庆昌. 中央空调水系统的节能优化[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2010,42(6):850-855.
WANG Jian-yu,REN Qing-chang. Optimization for central air-conditioning water system[J]. J. Xi′an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition,2010,42(6):850-855.

[2] KUSIAK Andrew,TANG Fan,XU Guang-lin. Multi-objective optimization of HVAC system with an evolutionary computation algorithm[J]. Energy,2011(36):2440-2449.

[3] KUSIAk Andrew, LI Ming-yang,TANG Fan. Modeling and optimization of HVAC energy consumption[J]. Applied Energy,2010(87):3092-3102.

[4] WEI Zhen-tao,ZMEUREANU Radu. Energy analysis of variable air volume systems for an office building[J]. Energy Conversion and Management,2009(50):387-392.

[5] CHO Young-Hum,LIU Ming-sheng. Correlation between minimum airflow and discharge air temperature[J]. Building and Environment,2010(45):1601-1611.

[6] 甘　敏,彭　辉,王　勇. 多目标优化与自适应惩罚的混合约束优化进化算法[J]. 控制与决策,2010,25(3):378-382.
GAN Min,PENG Hui,WAN Youg. Multiobjective optimization and adaptive penalty function based constrained optimization evolutionary algorithm[J]. Control and Decision,2010,25(3):378-382.

[7] 柴天佑,丁进良,王　宏,等. 复杂工业过程运行的混合智能优化控制方法[J]. 自动化学报,2008,34(5):505-515.
CHAI Tian-You,DING Jin-liang,WANG Hong,et al. Hybrid Intelligent Optimal Control Method for Operation of Complex Industrial Processes[J]. Acta Automatica Sinica, 2008,34 (5):505-515.

Research on optimization dynamic parameters for central air conditioning system

JIANG Hong-mei[1,2], *REN Qing-chang*[1], *FENG Zeng-xi*[1]

(1. School of Civil Engineering, Xi′an Univ. of arch. & Tech., Xi′an 710055, China;
2. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to reduce the energy consumption of air conditioning system according to the characteristics of the central air conditioning system, the central air conditioning system optimization goal and constraints are pu forward to, establish the dynamic parameters optimization model. BFGS variable metric method is used to construct and improve the sequential quadratic programming. By optimization calculation, the optimal dynamic parameters of central air conditioning system for minimum energy consumption is acquired. Simulation and experimental analysis is carried out on the system energy consumption of optimal dynamic parameters, and the results show that the method of optimal dynamic parameters can effectively reduce the energy consumption of the air conditioning system.

Key words: *air conditioning system*; *parameters optimization*; *energy saving*; *variable scaling algorithm*

Biography: JIANG Hong-mei, Ph. D., Xi′an 710055, P. R. China, Tel: 0086-15102959571, E-mail: jhmxmsh@sina.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net