

Research on Optimization Control of Central Air Conditioning System Based on Multi-Objective Programming

Wentao Qu¹, Jing Tang², Xiao Zhang², Xinzeng Wang¹

¹College of Mathematics and System Science, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

²College of Computer Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

E-mail: sxjm_w@126.com

Received: Jan. 8th, 2018; accepted: Jan. 23rd, 2018; published: Jan. 30th, 2018

Abstract

In order to improve the efficiency of central air conditioning system and reduce energy consumption, it is necessary to study the energy-saving optimization control of the central air conditioning system. However, the current control strategy of central air conditioning system is difficult to realize real-time control, and has the problem of poor optimization control. Therefore, we propose an optimization control method for central air conditioning system based on multi-objective programming. Firstly, we study the changing rules of the variables in the central air conditioning system, and reduce the dimension of the data. Then, we used the multiple regression analysis to obtain the regression equation of the variable. On the basis of the above, we use the operating condition and speed of the equipment as the decision variables, and take the total energy consumption and the system efficiency as the objective function. Under the constraints of equipment speed, state, system stability and equipment operation, we establish the optimization control model of the central air conditioning system based on the multi-objective programming model. Finally, the optimization result shows that the optimized control effect of our proposed method is better, and it can effectively reduce the total power consumption.

Keywords

Central Air-Conditioning, Multiple Regression Analysis, Multi Variable Nonlinear Programming, Simulated Annealing Algorithm

基于多目标规划的中央空调系统优化控制研究

曲文涛¹, 唐静², 张潇², 王新赠¹

¹山东科技大学数学与系统科学院, 山东 青岛

²山东科技大学计算机科学与工程学院, 山东 青岛
E-mail: sxjm_w@126.com

收稿日期: 2018年1月8日; 录用日期: 2018年1月23日; 发布日期: 2018年1月30日

摘要

为了提高中央空调系统的工作效率, 同时降低能源消耗, 需要对中央空调系统进行节能优化控制研究。现有的中央空调系统控制策略很难实现实时控制, 且优化控制效果较差。为此, 提出了基于多目标规划的中央空调系统动态优化方法。该方法先研究了中央空调系统各变量的变化规律, 并对数据进行降维; 然后, 使用多元回归分析方法得到变量的回归方程; 在此基础上, 以设备运行状态和转速为决策变量, 以系统总耗电量和系统效率为目标函数, 在设备转速、状态、系统稳定性和设备运转等约束条件下, 建立了基于多目标规划的中央空调系统动态优化模型。优化结果显示, 所提方法优化控制效果较好, 有效地降低了系统总耗电量。

关键词

中央空调, 多元回归分析, 多目标规划, 模拟退火算法

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会经济的不断增长, 信息技术的快速发展, “智慧城市”与能源问题逐渐成为人们关注和讨论的焦点。所谓“智慧城市”[1]就是在建筑物中, 利用信息技术为人们提供舒适、便利的服务。而在智能城市中, 中央空调是其不可或缺的组成部分, 而目前大多数中央空调系统存在效率低、系统耗能高的问题。近年来, 便随着“智慧城市”的迅速发展, 能源消耗的问题已不可避免。其能耗的不断增加, 无疑给节约资源带来了巨大的阻力, 因此对中央空调系统的节能优化控制已经成为了智能城市降低能耗的重要环节。

文献[2]根据大型商场中央空调的运行原理, 在人流或室外温度在一定范围中变化的前提下, 以保持商场内部温度尽可能稳定且节能为目标, 建立多目标线性规划模型对中央空调进行优化控制。该方法使用线性规划不能很好地反映变量之间非线性变化规律, 故控制精度较低。文献[3]以控制周期内制冷机允许运行时间所占的比重为决策变量, 提出了利用高级计量体系中央空调远程周期性暂停控制的优化模型, 得到周期性暂停控制能在保持室温舒适前提下显著节能。该方法控制效果较好, 但存在复杂度较高、实用性差的问题。

针对上述问题, 本文从数学模型角度出发, 采用动态分析的方法, 提出了基于多目标规划的中央空调系统动态优化模型。

2. 数据来源及预处理

本文所使用数据来自第五届“泰迪杯”数据挖掘挑战赛 B 题“中央空调系统的数据分析与控制策略

研究” [1]。中央空调系统动态数据中共包含 88,840 条记录，每条记录有 51 个字段，包括采集信息时间、环境信息、系统状态参数、控制参数、系统采集信息和系统运行等相关信息。

通过对中央空调系统的实时数据进行审查，发现数据中存在不完整、不一致的情况。对于异常数据，采用均值替换法[4]对其进行修正。以列为单位，取原始数据中剔除异常数据后平均值，对异常数据进行修正，即：

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij} - \sum_{s=1}^m x_s}{n - m} \tag{1}$$

其中： \bar{x}_j 、 x_{ij} 、 x_s 分别表示第 j 列平均值、第 i 行 j 列数据、第 s 个异常值。

为了避免数据对度量单位选择的依赖性，使用如下公式对原始数据进行归一化处理。

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij\min}}{x_{ij\max} - x_{ij\min}} \tag{2}$$

其中， x_{ij} 表示要处理的数值， $x_{ij\min}$ 、 $x_{ij\max}$ 分别表示 x_{ij} 的最小值、最大值。

3. 数据相关性挖掘

3.1. 数据的周期规律研究

为了分析数据变化规律，本文采用图像对比法研究各变量的变化规律，即随机选取几组相同时间间隔的数据进行对比分析。首先，做出变量以周为单位的变化趋势图，如图 1 所示。

由图 1 可知，相对湿度、干球温度室外、湿球温度室外和流入流出冷却装置水温差的四周变化趋势大致相似，且波峰和波谷出现时间相同。因此可以初步判断四种变量具有周期性。

为了更好地分析这种周期性，下面选取其中一周的数据分析各变量日变化情况，如图 2 所示。

由图 2 可知，相对湿度、干球温度室外、湿球温度室外和流入流出冷却装置水温差的变化趋势基本相同，因此可以认为四种变量具有明显的周期性变化规律。此外，还可以得知一天中的干球温度的最高点出现在 15 时左右，湿球温度的最低点出现在 15 时左右，且此时的相对湿度是最低的。

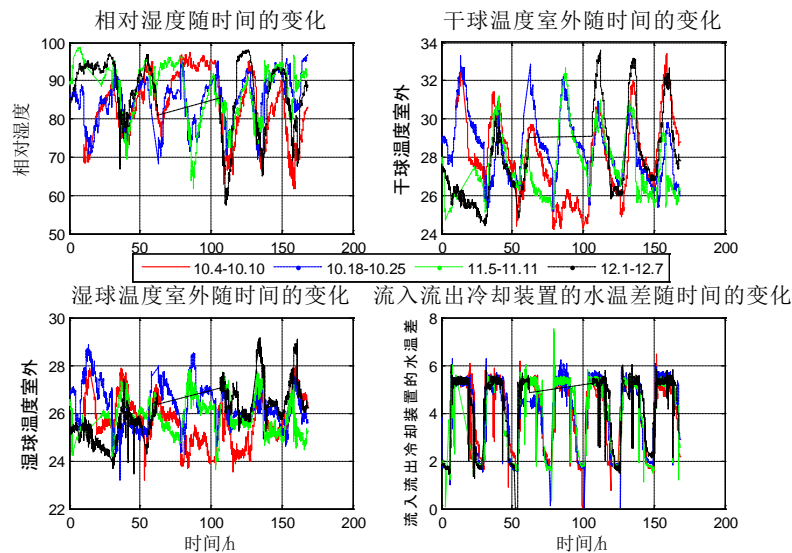


Figure 1. Curve: weekly changes

图 1. 周变化曲线

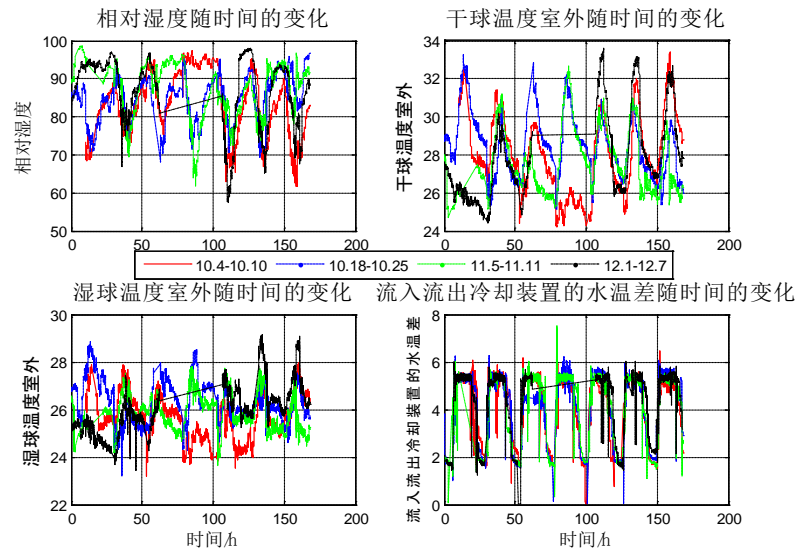


Figure 2. Curve: daily changes
图 2. 日变化曲线

由于变量具有明显的周期性变化规律，故可以运用变量间的周期性变化规律选取数据，以达到减少样本数量的目的。

3.2. 数据的相关关系挖掘

为了挖掘出变量之间的相关关系，本文通过对设备状态变量进行动态聚类分析，具体作法是：先粗略地进行预分类，然后再逐步调整，直到把类分得比较合理为止。然后，利用多元回归分析的方法得到各变量之间的相关关系。

3.2.1. 基于动态聚类的设备分类

在进行变量相关性分析时，由于设备状态是用 0-1 变量表示，而 0-1 变量会影响回归分析效果。此外，通过分析得知：不同设备的开关状态是等效的。因此，为了找出各设备的等效组合，利用动态聚类方法对设备进行分类，聚类结果如图 3 所示。

由图 3 可得 12 个设备分为 4 个类别(见表 1)，每个类别内的设备应同时开启或关闭。由于一个完整的中央空调系统需要冷却装置、冷水泵、冷凝水泵、冷却塔 4 个设备同时运转，因此 4 个类别中只有类别 1 能够独立运行，其他类别均需与其他类别共同运行，其运行组合见表 1。

由表 1 可知，4 个类别设备可以分为 11 中设备运转组合。因此，在后续研究中，只需研究 11 种设备运转组合即可。将上述设备运转组合与变量周期性规律相结合，可以实现降维的目的，从而极大的降低了问题复杂度。

3.2.2. 基于回归分析的变量相关性研究

为了清晰地描述数据之间的变化关系，以功率、冷却负载、总耗电量作为因变量，以其它可控变量作为自变量，利用多元回归分析的方法得到各变量之间的回归方程。

1) 设备功率的分析

首先，我们定义设备的平均功率[4]如下：

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (3)$$

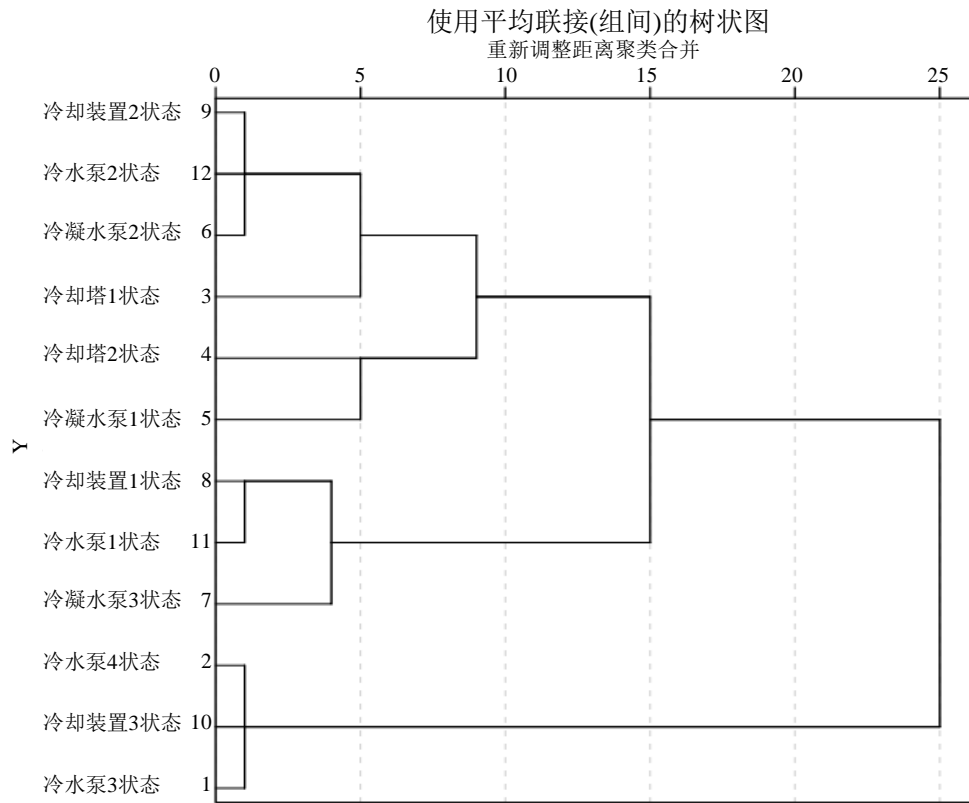


Figure 3. Dendrogram of cluster analysis
图 3. 聚类分析树状图

Table 1. Classification of equipment
表 1. 设备分类情况

类别	所含设备	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4	组合 5	组合 6	组合 7	组合 8	组合 9	组合 10	组合 11
类别 1	冷却装置 2、冷水泵 2、冷凝水泵 2、冷却塔 1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1
类别 2	冷却装置 3、冷水泵 4、冷水泵 3	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1
类别 3	冷却装置 1、冷水泵 1、冷凝水泵 3	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
类别 4	冷却塔 2、冷凝水泵 1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1

注：表中，0 表示此设备运转组合下该类别内的设备不运转，1 表示此设备运转组合下该类别内设备运转。

其中： \bar{P} 、 P_i 分别表示平均功率、设备 i 的功率； x_i 表示设备 i 的状态。

通过对冷凝水泵功率与各个自变量的进行回归分析，得到回归分析结果见表 2。

由表 2 可得冷凝水泵平均功率的回归方程为：

$$\overline{P_{cwp}} = 1.15 + 0.074 \cdot v_{cwp} + 0.012 \cdot db. \tag{4}$$

其中： $\overline{P_{cwp}}$ 、 v_{cwp} 、 db 分别表示冷凝水泵平均功率、冷凝水泵转速、干球温度。

Table 2. Regression analysis of average power of the condensate pump
表 2. 冷凝水泵平均功率的回归分析

模型	B	标准误差	t	Sig.
(常量)	1.150	0.471		
冷凝水泵转速	0.074	0.002	49.046	0.000
干球温度	0.012	0.005	2.241	0.025

表 2 还给出了回归系数的 t 检验结果，冷凝水泵转速、相对湿度、常量的显著性检验的 t 值分别为 2.440、49.046、2.241，对应的相伴概率 P 值分别为 0、0.025、0.015，在显著性水平 α 为 0.05 下，均能通过显著性检验。

同理可得，冷却塔平均功率、水泵平均功率、冷却装置平均功率的回归方程分别为：

$$\overline{P_{ct}} = 1.677 + 0.135 \cdot v_{ct} + 0.024 \cdot rh. \tag{5}$$

$$\overline{P_{chwp}} = 1.781 + 0.082 \cdot v_{chwp} + 0.010 \cdot rh. \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \overline{P_{ch}} = & -73.149 + 17.005 \cdot \Delta T + 0.958 \cdot v_{chwp} - 0.285 \cdot v_{ct} \\ & - 0.059 \cdot v_{cwp} - 2.589 \cdot db + 6.063wb. \end{aligned} \tag{7}$$

其中： $\overline{P_{ct}}$ 、 $\overline{P_{chwp}}$ 、 $\overline{P_{ch}}$ 分别表示冷却塔平均功率、冷水泵平均功率、冷却装置平均功率； v_{cwp} 、 v_{ct} 分别表示冷凝水泵转速、冷却塔风扇转速； rh 表示相对湿度； wb 表示湿球温度； ΔT 表示流入流出冷却装置的温度差。

2) 总耗电量的分析

根据系统总耗电量和功率之间的关系，可知系统总耗电量即为各设备能耗之和，因此中央空调系统的总耗电量计算公式为：

$$W = \sum_{i=1}^n P_{ct,i} \cdot x_{ct,i} + \sum_{j=1}^m P_{chwp,j} \cdot x_{chwp,j} + \sum_{k=1}^s P_{cwp,k} \cdot x_{cwp,k} + \sum_{l=1}^t P_{ch,l} \cdot x_{ch,l}. \tag{8}$$

3) 冷却负载的分析

通过对冷却负载与各个自变量的进行回归分析，可得冷却负载的回归方程为：

$$\begin{aligned} loadsys = & -232.401 + 135.375 \cdot x_{ch} + 2.287 \cdot v_{chwp} + 79.474 \cdot x_{ct} \\ & + 0.834 \cdot v_{cwp} + 0.736 \cdot v_{ct} + 26.277 \cdot x_{cwp} + 2.65 \cdot db \end{aligned} \tag{9}$$

4) 系统效率的分析

系统效率的单位是 kw/RT，kw 是功率的单位，RT 是冷却负载的单位，因此可以将系统效率定义为功率与冷却负载的商。

$$effsys = W / loadsys. \tag{10}$$

根据这系统功率与冷却负载的回归结果，可以得出系统效率与各个设备的转速、各个设备状态以及流入流出冷却装置的水温差有关。

5) 回归方程误差检验

为了检验模型的可靠性，定义如下均方误差：

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2}. \tag{11}$$

其中： y_i 为样本的观察， \hat{y}_i 为样本的实验值。

通过对剩余数据利用回归方程得到回归值，并计算回归值与真实值的均方误差，结果见表 3。

由表 3 可以知，总耗电量、系统冷却负载、系统效率的方差均小于 5%，因此，可以认为回归方程通过了误差检验。

4. 基于多目标规划的中央空调系统动态优化模型

4.1. 决策变量

本文中影响目标函数的变量是各个设备的转速和设备状态变量，以冷水泵转速、冷凝水泵转速、冷却塔风扇转速和 12 个设备状态变量为决策变量。

4.2. 目标函数

中央空调系统优化控制应本着能够保证温度适宜的前提下，应该尽可能的减少能源的消耗。因此，选取系统总耗电量最小和系统效率最低为目标函数，即：

$$\begin{aligned} \min W &= f(v_k, x_i), \\ \min \text{effsys}. \end{aligned} \tag{12}$$

其中： W 表示总耗电量，是设备状态与设备转速的函数； v_k, x_i, effsys 分别表示设备的转速，设备的状态参数，系统效率， $k=1,2,3, i=1,2,\dots,12$ 。

4.3. 约束条件

这里，从设备转速约束、设备状态约束、系统稳定约束和设备运转情况四个方面进行分析。

1) 设备转速约束

冷水泵转速、冷凝水泵转速和冷却塔风扇转速三个转速均有范围限制，因此，应有

$$0 < v_k < 100, k=1,2,3。$$

2) 设备状态约束

由于设备的状态分为开和关，我们以 0 表示设备处于关闭状态，以 1 表示设备处于工作状态，则设备状态 x_i 为 0-1 变量，应满足 $x_i = 0 \quad i=1,2,\dots,12$ 。

3) 系统稳定约束

为了能够保证设备正常工作，系统热平衡不应该过大，通过查阅相关文献，我们得出以下约束： $hbsys < 5%$ 。同时，每台设备均不能超负荷运转，即设备的实际功率应小于额定功率 $P_i \leq P_{i,max}$ 。

4) 设备运转情况约束

由于设备开关会导致能源消耗，因此在满足基本需求下，对设备运转情况提出以下要求：

- 每台设备的开/关以后两小时内不可以关/开；
- 每台设备每天最多只能开关 6 次；
- 每台设备不能超负荷运转，任何时间都至少要开启一台设备。

Table 3. Error analysis table

表 3. 误差分析表

变量	$\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2$	$\sum_{i=1}^n y_i^2$	σ^2
总耗电量	851444.66	24475166.32	0.035
系统冷却负载	955.53	19624.59	0.049
系统效率	0.03	0.86	0.035

4.4. 优化模型的建立

综上所述，可以得到如下基于多目标规划的中央空调系统动态优化模型[5]：

$$\begin{aligned}
 & \min W = f(v_k, x_i), \\
 & \min \text{effsys}, \\
 & s.t. \begin{cases} \text{effsys} \geq \text{effsys}_{\min}, \\ \Delta t = t_{i,2} - t_{i,1} > 2, i = 1, 2, \dots, 12, \\ P_i \leq P_{i,\max}, i = 1, 2, \dots, 12, \\ \sum_{i=0}^{24} x_i \leq 6, i = 1, 2, \dots, 12, \\ \sum_{i=1}^{12} x_i \geq 1, i = 1, 2, \dots, 12, \\ \text{hbsys} < 5\%, \\ 0 < v_k < 100, k = 1, 2, 3, \\ x_i = 0 \text{ 或 } 1, i = 1, 2, \dots, 12. \end{cases} \quad (13)
 \end{aligned}$$

其中： W 表示总耗电量，可由公式(8)求得； effsys 为系统效率，可由公式(10)求得； hbsys 为系统热平衡； $P_i, P_{i,\max}, x_i, t_{i,2}, t_{i,1}$ 分别表示设备*i*的实际功率、额定功率、设备的状态参数、关闭的时间和开启时间， $i = 1, 2, \dots, 12$ ； v_k 是设备的转速， $k = 1, 2, 3$ 。

4.5. 基于最速下降法改进的模拟退火算法

本文所建立的优化模型为多目标规划问题，直接求解存在极大的困难，因此我们将其转化为单目标线性规划求解。由于空调运转必然有系统效率，因此将系统效率最低这一目标函数转化为约束条件：系统效率不小于系统效率的最小值。

针对上述简化后的最优控制策略模型，采用模拟退火算法[6]进行求解，将简化后的目标函数作为内能*E*，利用Java语言编写程序，具体的算法步骤如下：

- Step1. 初始化各参数：初始温度*T*、初始解状态、每个*T*值的迭代次数*L*；
- Step2. 对于*K* = 1, 2, 3, ..., *L*。重复 Step3 到 Step5；
- Step3. 随机出各个设备的转速，满足约束条件，则对结果进行检验；
- Step4. 若初始解大于新解，并更新初始解；否则，继续下一次迭代；
- Step5. 迭代次数达到或者解满足目标函数时，输出结果；否则而转到 Step3。

5. 优化结果与分析

为了对模型进行检验，以2016年10月5日~2016年10月24日的时间、室外温度和湿度、冷却负载等数据作为已知量，并将2016年10月5日00:00作为时间原点，首先按照划分的11种设备运转情况对数据进行处理，然后利用模拟退火算法对该条件下的中央空调进行优化控制，得到各个设备开关状态和各个设备的转速(部分数据见表4)以及优化后的系统效率和功率。

由表4给出了最优控制下不同时间段各设备的开关状态以及转速。优化后的系统总耗电量和系统效率与优化前的数据的对比图见图4和图5。

由图4和图5可知，优化后的系统总耗电量和系统效率都是要明显低于优化前的数据，并且优化后的系统总耗电量更加稳定。将优化后的系统总耗电量和系统效率与原来的数值进行对比，得出系统总耗电量平均下降了41.55%，系统效率平均下降了41.56%，这说明所建立的模型显著地实现中央空调优化控制。

Table 4. Equipment status under optimal control strategy
表 4. 最优控制策略下设备状态

时间/h	冷却装置			冷却塔			冷水泵					冷凝水泵			
	1	2	3	1	2	转速	1	2	3	4	转速	1	2	3	转速
0	0	1	0	1	0	88.97	1	1	0	0	10.83	0	1	1	6.67
2.37	0	1	0	0	1	54.96	1	0	0	0	5.40	1	1	0	78.36
4.68	0	1	0	1	0	44.52	0	1	0	0	0.52	1	1	1	96.89
7.3	0	1	0	1	0	86.69	1	1	0	0	1.73	1	1	0	72.42
9.43	0	1	0	1	0	38.80	0	1	0	0	1.94	1	1	1	27.88
11.5	0	1	0	1	0	69.80	1	1	0	0	0.85	1	1	1	78.80
13.75	0	1	0	1	0	72.88	1	0	0	0	32.50	1	1	1	0.21
15.85	0	1	0	1	1	26.75	1	0	0	0	5.26	1	1	0	52.55
18.05	0	1	0	1	0	29.52	0	1	0	0	2.56	1	1	1	29.34
20.2	0	1	0	1	0	84.55	0	1	0	0	14.11	1	1	1	55.16

注：表中第二行数字代表对应设备编号。

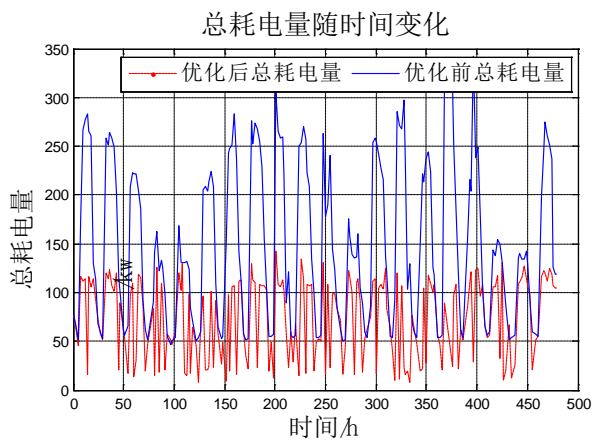


Figure 4. Change curve of total power consumption
图 4. 总耗电量变化图

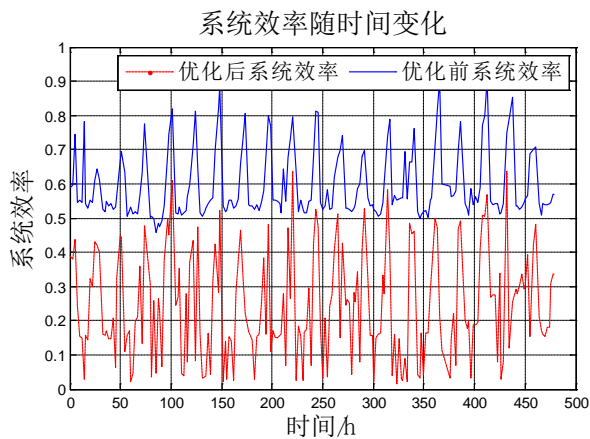


Figure 5. Change curve of system efficiency
图 5. 系统效率变化曲线

6. 讨论

6.1. 数据的周期性规律及降维

首先,采用“先剔除,后替换”的方法对数据进行预处理。为了更加具体的分析数据的变化趋势,随机选取了四个周的数据进行分析,发现不同时间的数据变化趋势相同,因此,又选取了其中一周的数据分析每一天的变化趋势,得知变量存在明显的周期变化规律。从而,可以利用数据的周期性规律,减少数据的样本量。

此外,由于各个设备的开关状态均为 0-1 变量,并且通过分析得知:不同设备组合的开关状态是等效的。因此,对各个设备的开关状态进行动态聚类分析,根据聚类分析的结果将 12 个设备运转情况分为 11 种组合,在之后研究中只需要研究这 11 种设备运转组合即可。

6.2. 多目标规划模型及改进的模拟退火算法

首先,对降维后的数据进行多元回归分析,得到冷却负载、系统效率、系统总耗电量关于各个可控变量与不可控变量之间的多元回归方程。然后,使用剩余数据检验了回归方程和回归系数的显著性,并计算了相应的均方误差。由于回归方程和回归系数均能通过显著性检验,且均方误差均小于 5%,因此,回归方程通过检验,并且回归效果较好。

其次,选取各个设备的运行状态和转速为决策变量,建立了以系统功率和系统总耗电量为目标函数的多目标规划。模型中充分考虑了中央空调实际运行过程中各因素对系统总耗电量和系统效率影响。

最后,在求解多目标规划时,先将其转化为单目标线性规划。然后,使用最速下降法对模拟退火算法进行改进,不仅提高了算法的求解效率,还提高了模型的准确度。

6.3. 中央空调优化控制效果分析

将所建立的模型运用到 2016 年 10 月 5 日~10 月 24 日中央空调的优化控制中,通过对比优化前和优化后的系统总耗电量和系统效率数据,得知优化后的系统总耗电量平均下降了 41.55%,系统效率平均下降了 41.56%。由于中央空调的设计原理会造成部分能量的浪费,再加上实际使用过程中可能会有部分设备空转,均会导致系统总耗电量和系统效率偏高,因此所优化结果在接受范围内。

6.4. 中央空调优化控制策略的推广

本文在中央空调优化控制策略中使用了多目标规划模型,充分考虑了各个因素对系统总耗电量和系统效率的影响,且所使用非线性规划较一般的线性规划更能体现各指标的非线性变化情况,从而优化结果更加精确。此模型可以推广到其他耗电设备优化控制中,如工厂生产设备优化等。

基金项目

山东科技大学优秀教学团队建设计划项目(JXTD20160507)。

参考文献 (References)

- [1] 第五届“泰迪杯”数据挖掘挑战赛[EB/OL]. http://www.tipdm.org/jingsa/1030.jhtml?cName=ral_100#sHref, 2017-4-7.
- [2] 韩希超,刘鸿雁,严明,李文松. 中央空调系统节能设计与运行控制策略研究[J]. 数学的实践与认识, 2009(16): 192-200.
- [3] 辛洁晴,吴亮. 商务楼中央空调周期性暂停分档控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013(5): 49-54.

- [4] 郭雪平. 基于能效优化中央空调节能控制系统的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2016.
- [5] 张青. 中央空调系统节能运行控制方法研究 D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [6] 杨庆之. 无约束优化问题模拟退火算法的改进[J]. 高等学校计算数学学报, 2001(2): 108-110.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7583, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: pm@hanspub.org