

# 多台冷水机组联合运行优化控制策略

闫秀英<sup>1</sup>, 王乐唯<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 西安 710055)

**摘要:** 冷水机组通常占建筑物系统总能耗的主要部分, 因此冷水机组运行数量控制在实现空调系统节能方面起着重要作用; 针对多台冷水机组联合运行时台数选择和负荷分配不合理的问题, 文章将通过 TRNSYS 模拟得出的负荷值聚类分析, 确定不同负荷值对应的冷水机组运行台数, 并提出一种冷水机组排序优化控制方法改善顺序控制方式以实现其合理运行与节能; 以某大型办公建筑为例, 将优化控制前后冷水机组进行总能耗对比; 实验结果表明: 与顺序控制相比, 冷水机组优化控制后两个工作日总能耗分别节约 126.1 kW 和 342.5 kW, 节能率分别为 4.15% 和 5.22%; 通过利用冷水机组顺序优化控制可满足建筑的冷负荷需求, 同时降低系统能耗, 在空调系统节能方面具有工程实际应用价值。

**关键词:** 冷水机组; K-means; 优化控制; 节能

## Optimal Control Strategy for Combined Operation of Multiple Chillers

Yan Xiuying<sup>1</sup>, Wang Lewei<sup>2</sup>

(1. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology,

Xi'an 710055, China; 2. School of Information and Control Engineering, Xi'an University

of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Chillers usually account for the main part of the total energy consumption of building systems, the control of the number of chiller operations plays an important role in achieving energy savings in air conditioning systems. Aiming at the problem of unreasonable number of chillers and load distribution of the combined operation of multiple chillers, the article used cluster analysis of load values obtained from TRNSYS simulation to determine the number of chillers corresponding to different load values, and propose a chiller sequencing optimization control method to improve the sequencing control method to achieve the reasonable operation and energy saving of chillers. Take a large office building as an example, the total energy consumption of the chillers operation before and after the optimization control is compared. The experimental results show that compared with the sequential control, the total energy consumption of the chillers after the optimal control of the two working days is 126.1 kW and 342.5 kW, respectively, and the energy saving rates are 4.15% and 5.22%, respectively. By using the chiller sequencing optimization control, can meet the cold load demand of the building and reduce the energy consumption of the system, which has practical application value in energy saving of the air conditioning system.

**Keywords:** chiller; K-means; optimal control; energy saving

## 0 引言

在大型办公建筑中, 空调系统占能源消耗的很大部分, 其中冷水机组占空调系统能耗的近 50%~60%<sup>[1]</sup>。影响冷水机组运行能耗的主要原因之一是其控制方法, 为了提高其运行效率和节约能耗, 需要优化冷水机组的运行控制, 实现保持多台冷水机组联合运行的系统稳定性和合理性以及减少由于开关动作频繁造成设备损耗。

顺序控制方法对于具有多个冷水机组联合运行的空调系统可实现运行能效的同时保持办公建筑室内热舒适性至关重要。国内外学者已对中央空调冷水机组控制进行了大

量研究, 为冷水机组台数控制奠定了基础。王盛卫<sup>[2]</sup>提出了可应用于大型商业建筑中多台制冷机系统的在线优化控制策略, 对冷冻水供水温度、制冷机时序控制、启动控制和建筑峰值负荷控制的优化。林秀军等<sup>[3]</sup>通过对比中央空调系统主机房冷水机组运行在 3 种负载率下的综合能耗, 提出对于多台联用的冷水机组系统, 建议按满载运行模式逐台开启冷水机组。Yongjun Sun 等<sup>[4]</sup>提出应用先进的数据融合技术在线计算冷水机组最大制冷量, 可以消除传感器测量不确定性的负面影响, 可以显着提高冷水机组排序控制的性能。Zhaohui Liu 等<sup>[5]</sup>研究了冷水机组最大冷却能力对冷水机组排序策略的影响, 提出了最优的冷水机组排序控制策略。

上述研究大多是通过总冷却负荷的排序控制优化中央空调系统冷水机组运行数量降低系统能耗。然而对于中央空调系统节能控制, 冷水机组的早晨启动控制也是重要且必不可少的。适当的冷水机组数量可以帮助将系统能耗降

收稿日期: 2019-12-03; 修回日期: 2019-12-30。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508446); 陕西省重点研发计划项目(2017DXM-GY-025)。

作者简介: 闫秀英(1980-), 女, 河北新乐人, 博士, 副教授, 主要从事建筑智能化与节能方向的研究。

低到最低程度，以将建筑的室内温度冷却达到用户所需。Yongjun Sun 等<sup>[6]</sup>提出了一种在线冷却负荷预测方法以确定冷水机组早晨开启台数与预冷却时间。同时，建筑物的负荷值随天气等因素变化影响到冷水机组运行，Sundar Raj Thangavelu 等<sup>[7]</sup>提出了一种可根据建筑物的热负荷和天气状况，定期得出冷水机组的最佳运行决策的能源优化方法。上述研究是根据大量复杂计算分析负荷值对冷水机组运行的影响，耗费大量时间与人力，负荷值并没有得到充分利用。通过供水回水温度测量值判断冷水机组运行台数会因为不能精确测量温度差产生误差，基于总冷却负荷的排序控制在实际应用中并不总是能正常运行。

因此，文章以西安某办公建筑的中央空调系统为研究对象，搭建空调系统仿真平台可快速模拟出冷负荷值，以三台联合运行冷水机组的运行台数控制为目标，将模拟得出的负荷值聚类分析后获得不同时刻冷水机组运行台数，并提出一种优化的顺序控制方法，在满足用户侧冷量需求的前提下获得冷水机组最优运行模式，为冷水机组运行台数提供最佳运行控制策略。并对比优化前后冷水机组的总能耗。

### 1 研究对象

文章研究对象为西安某高层综合办公建筑的中央空调系统。该建筑地上二十四层，地下两层，建筑高度 99.95 m，总建筑面积：70 374 m<sup>2</sup>。地上二十四层制冷由中央空调系统提供，图 1 为该办公建筑中央空调系统示意图。

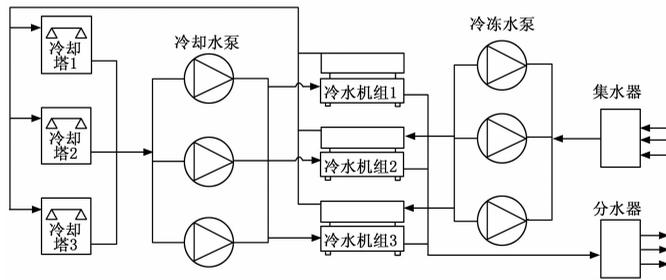


图 1 中央空调冷源系统示意图

如图 1 所示，该中央空调冷源系统由 3 台冷水机组、3 台冷却水泵、3 台冷冻水泵、3 台冷却塔组成，其中冷水机组为三台制冷量相同的 1 519 kW 的螺杆式电制冷机组。将中央空调冷水机组运行优化控制策略实施于 3 台冷水机组系统。

在 TRNSYS 中搭建该中央空调模型，其中空调室内温度设计参数为 26℃，相对湿度为 55%，工作时间为 8:00~18:00。气象参数为 TRNSYS 气象包中西安典型气象年的室外气象参数，经模拟计算得到该办公建筑的最大冷负荷为 4 166 kW。

#### 1.1 冷水机组顺序控制策略

根据具有不同复杂度的控制参数和不同设备的建筑物，有不同的冷水机组顺序控制策略：常用的有基于回水温度的顺序控制，基于旁路流量的顺序控制，基于直接功率的顺序控制和基于总冷负荷的顺序控制 4 种方法。在这些方

法中，由于基于冷负荷的控制采用了冷却负荷的直接指标，是顺序控制中的最佳方法<sup>[8]</sup>。

基于总冷负荷的顺序控制是通过获取的建筑用户侧对负荷的需求结合冷水机组额定制冷量，判断在不同负荷值下冷水机组的开启台数及运行方式。实际工程中在冷冻水回水总管上安装流量传感器和温度传感器，根据检测到的流量和温度数值，利用负荷公式计算出实际冷负荷（近似等于空调系统末端设备总的实际冷负荷）。负荷计算方法如式 (1)<sup>[9]</sup>：

$$Q = C_p G (t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中，Q 为冷负荷；C<sub>p</sub> 为水的比热；G 为水管内流量；t<sub>2</sub> 为回水温度；t<sub>1</sub> 为供水温度。

通过 TRNSYS 搭建中央空调系统仿真平台，将仿真模拟得到的冷负荷值进行聚类分析，通过对负荷值划分区间可确定每个负荷区间对应的冷水机组运行台数，同时仿真模拟出的负荷值可为冷水机组早晨启动控制提供判断条件。

冷水机组顺序控制方法可分为两种：冷水机组负荷分配方法和冷水机组运行数量的方法<sup>[10]</sup>。实际上，在大多数多台冷水机组联合运行系统中，在当前运行的冷水机组达到各自的额定容量之前，不会打开其他冷水机组。为了保证系统运行的稳定性，对冷水机组的启/停时间间隔进行约束，设计多台冷水机组联合运行时的部分负荷率的范围为 0.3 ≤ PLR ≤ 1<sup>[11]</sup>。利用建筑物瞬时冷却负荷值来确定建筑物自动化系统中的冷水机组顺序控制，系统框图如图 2 所示。投入运行的冷水机组数量主要由建筑物的冷负荷值和冷水机组的最大制冷量决定。控制逻辑为：检查冷负荷值是否超出冷水机组最大额定制冷量范围。当 Q > 0.3 × CL<sub>1</sub> 时开启一台冷水机组，当 CL<sub>1</sub> + CL<sub>2</sub> > Q > CL<sub>1</sub> 时，则再打开一台冷水机组；否则，不采取任何行动；如果满足约束条件 CL<sub>1</sub> + CL<sub>2</sub> + CL<sub>3</sub> > Q > CL<sub>1</sub> + CL<sub>2</sub> 时开启三台冷水机组。其中 Q 为实时负荷 (kW)，CL 为冷水机组额定制冷量。

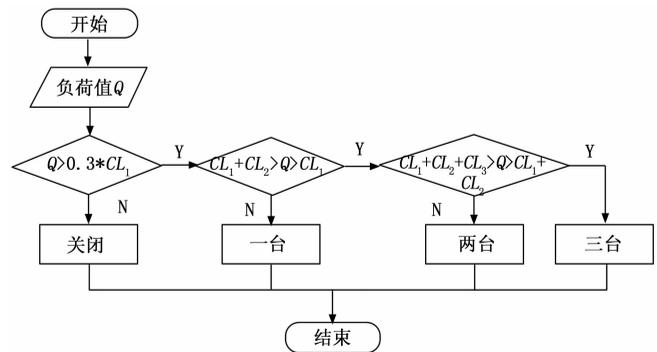


图 2 负荷法控制

#### 1.2 冷水机组运行优化控制策略

顺序控制方法给出的冷水机组运行数量仍然可能由于不正确使用冷水机组最大制冷量，导致顺序控制不合适。结果，运行数量小于必要数量（制冷量不足，影响用户的舒适度），或者大于必要数量（制冷量过多，导致能量浪

费)。针对以上问题文章提出了一种顺序优化控制方法, 其原理为: 在顺序控制中加入负荷平均分配控制使冷水机组运行更加合理。控制步骤如图 3 所示, 当负荷值增/减后, 冷水机组运行台数随之增/减但冷水机组负荷率低于 0.3 时, 所有开启的冷水机组采用负荷率平均分配的控制策略, 否则不改变当前状态。

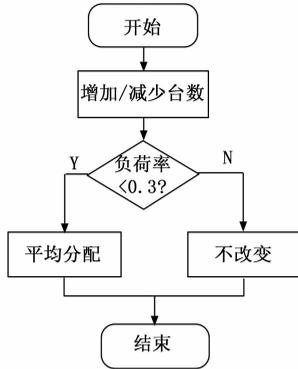


图 3 排序优化控制策略

### 1.3 冷水机组能耗方程

中央空调系统冷水机组总能耗为所有冷水机组运行时的总能耗累加值:

$$P_{total} = \sum_{n=1}^N \frac{PLR_n Q_{ch}}{COP_n} \quad (2)$$

其中: 冷水机组性能系数  $COP$  和制冷量  $Q$  分别定义为:

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (3)$$

$$Q = cM(t_1 - t_2) = PLR \cdot Q_{ch} \quad (4)$$

式中,  $P_{total}$  为冷水机组运行总能耗, kW;  $W$  为冷水机组输入功率, kW;  $c$  为冷水的比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $M$  为冷水质量流量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $t_1$  为冷水机组冷水回水温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_2$  为冷水机组冷水供水温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $PLR$  为机组供冷负荷率;  $Q_{ch}$  为机组额定制冷量, kW。

## 2 聚类算法

聚类作为数据分析技术, 在识别目标数据集的自然结构中发挥重要作用。聚类算法可以将数据集中相似的样本划分到单个簇中, 聚类效果取决于簇内样本的相似程度, 样本越相似则效果越好。聚类在不同领域有多种应用, 例如模式识别, 数据挖掘等等。

### 2.1 K-means 算法

K-means 算法是一种用于无监督分析数据的聚类算法, 具有不确定性和重复性<sup>[12]</sup>。

K-means 聚类原理是将  $i$  个样本划分到  $n$  个簇中  $C_j$  ( $j=1, 2, \dots, n; n \leq i$ ), 具体操作步骤如下:

1) 随机的在个样本中选择个数据点作为每个簇的质心。

2) 计算其余样本与个质心的距离, 根据结果将其余样本划分到距离与之最近的簇中。

3) 重新计算各簇中全部样本的均值, 将其作为各簇的新质心。

循环此过程, 直到误差平方和函数达到收敛状态, 误差平方和函数  $SSE$  由式 (5) 表示<sup>[12]</sup>:

$$SSE = \sum_{j=1}^k \sum_{x \in C_j} x - C_j^2 \quad (5)$$

$$c_j = \frac{1}{m} \sum_{x \in C_j} x \quad (6)$$

式中,  $k$  代表选择的簇的数量;  $C_j$  代表第  $j$  ( $1, 2, \dots, k; k \leq n$ ) 个簇;  $x$  代表簇  $C_j$  中的任意一个数据点;  $c_j$  是簇  $C_j$  的均值;  $m_j$  代表簇  $C_j$  中数据点的个数。

### 2.2 相似性度量

聚类算法采用相似性度量作为数据聚类划分的依据, 相似性度量通常用于衡量变量间相互联系紧密程度, 以此作为度量标准, 可表示两个样本之间的差异程度, 样本越相似距离越小, 设两个样本  $x$  和  $y$ , 相似度用  $d(x, y)$  表示, 当  $x$  和  $y$  越相似, 则  $d(x, y)$  值越小, 否则越大, 当两样本之间的距离越小表示相似度越高。常用相似性度量如下。

1) 明可夫斯基距离:

已知数据集包含  $N$  个样本, 明可夫斯基距离计算形式如下:

$$d(x, y) = \left( \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^r \right)^{\frac{1}{r}} \quad (7)$$

式中,  $n$  为维数。

根据不同的  $r$  值, 明可夫斯基距离可演变为特殊的距离计算形式。

①  $r=1$ , 演变为曼哈顿距离计算形式如下:

$$d(x, y) = \left( \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \right) \quad (8)$$

②  $r=2$ , 演变为欧氏距离用作样本间相似性度量标准, 计算形式如下:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^2} \quad (9)$$

2) 二次型距离:

二次型距离度量形式如下:

$$d(x, y) = ((x - y)^T \mathbf{A} (x - y))^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

其中:  $\mathbf{A}$  为非负矩阵。

3) 余弦距离:

余弦距离的计算形式为:

$$d(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad (11)$$

### 2.3 K-means 算法步骤

K-means 算法是以距离为相似度进行分类<sup>[13]</sup>。首先从样本数据集中随机抽取  $k$  个元素作为  $k$  个簇的各个中心。然后分别计算  $k$  个簇的其余样本与聚类中心之间的距离。在此基础上, 重新计算  $k$  个簇的各个中心。循环此过程, 直到  $k$  个簇的各个中心不再发生新的变化。最后输出结果即是 k-means 聚类结果<sup>[14]</sup>。K-means 算法具体流程如图 4。

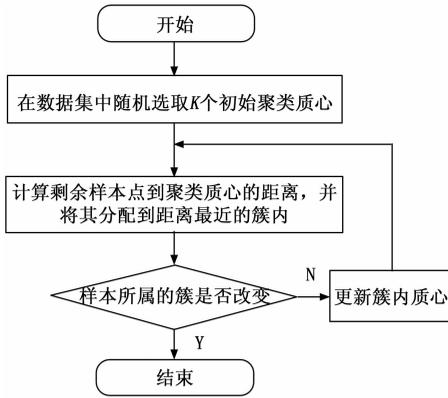


图 4 K-means 算法流程图

算法具体步骤如下:

1) 初始化: 确定所需分类的数目  $K=3$ , 随机选择  $K$  个初始聚类中心  $Z=(Z_1, Z_2, \dots, Z_k)$ 。

2) 类划分: 采用欧氏距离计算样本与初始聚类中心之间的距离, 如果样本  $s$  与  $Z_i$  的距离小于  $s$  与其它聚类中心的距离, 那么  $s$  归为  $Z_i$  类:

$$L_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (Z_{ik} - Z_{jk})^2} \quad \sum \quad (12)$$

3) 求聚类中心点: 计算每类中距离的平均值, 作为新的  $K$  个聚类中心:

$$Z_i = \frac{\sum_{s \in Z_i} s}{\|Z_i\|} \quad (13)$$

收敛判断, 计算公式:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{s \in R} (s - Z_i)^2 \quad (14)$$

其中:  $s$  为样本,  $Z_i$  为  $i$  类的聚类中心。若  $E$  满足条件则聚类结束, 否则重复步骤 (2)、(3), 直到满足条件为止。

### 3 实验结果与分析

三台冷水机组联合运行时, 顺序优化控制策略需要根据实时负荷值的变化控制冷机运行台数, 控制逻辑为: 冷负荷值小于 1 519 kW 时, 只需开启一台冷水机组; 当冷负荷值处于 1 519~3 038 kW 时, 需增加一台冷水机组; 冷负荷超出 3 038 kW 时, 三台冷水机组全开时的制冷量才能满足用户侧需求。反之, 实时负荷值下降时, 需逐台关闭冷水机组。

文章通过 K-means 算法将 TRNSYS 中模拟出的冷负荷值进行聚类分析如图 5 所示, 可为冷水机组运行台数控制提供依据, 从而判断当前负荷值下是否需要控制冷水机组加减载。

由图 5 可以看出, 开启一台冷水机组对应的负荷值保持在 1 500 kW 以下; 开启两台冷水机组对应的负荷值区间为 1 500~3 000 kW; 三台冷水机组全开时对应的负荷值保持在 3 000 kW 以上。聚类结果与顺序控制冷水机组运行台数一致。表 1 为负荷值聚类分析后与冷水机组运行台数及负荷率的关系。

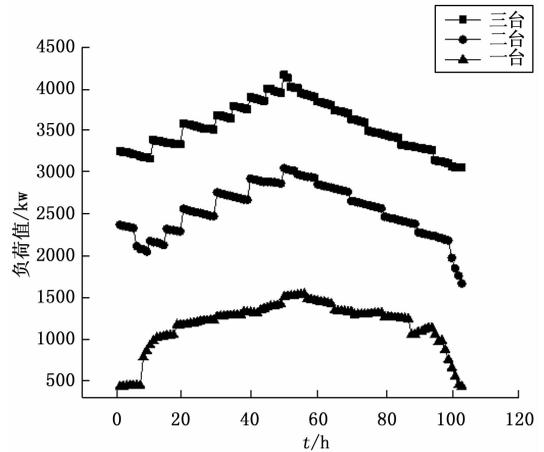


图 5 负荷值聚类结果

表 1 负荷值—负荷率关系

负荷值/ kW	负荷率 (第一台)	负荷值/ kW	负荷率 (第二台)	负荷值/ kW	负荷率 (第三台)
400~415	0.26~ 0.27	1 644~ 1 737	0~0.2	3 039~ 3 184	0~0.1
832~898	0.55~ 0.59	2 288~ 2 430	0.51~ 0.6	3 504~ 3 650	0.31~ 0.4
939~ 1061	0.62~0.7	2 440~ 2 580	0.61~ 0.7	3 660~ 3 800	0.41~ 0.5
1 093~ 1 222	0.72~0.8	2 590~ 2 730	0.71~ 0.8	3 810~ 3 951	0.51~ 0.6
1 223~ 1 370	0.81~0.9	2 744~ 2 891	0.81~ 0.9	3 960~ 4 018	0.61~ 0.7
1 380~ 1 517	0.91~1.0	2 901~ 3 037	0.91~ 1.0	4 126~ 4 165	0.71~ 0.8

夏季工况下冷负荷值较为集中, 冷水机组无法随负荷值全部逐台开启及关闭, 文章以全年中某两个工作日的运行工况为例, 将冷负荷值聚类分析, 对冷水机组运行优化控制。其中工作日 1 冷负荷值最大时需开启两台冷水机组, 工作日 2 冷负荷值最大时需开启三台冷水机组。表 2 为工作日 1 逐时冷负荷值。

表 2 工作日 1 逐时冷负荷值

时间/h	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
负荷值/ kW	1220	1241	1301	1358	1460	1563	1597	1580	1493	1402	1356

表 3 为经 K-means 聚类分析后工作日 1 逐时负荷值与冷机运行台数及负荷率变化情况, 可以看出聚类分析后各个时间点冷水机组开启的台数。在工作日 1 中早晨启动台数为 1 台, 8~12 和 16~18 点时间段内一台冷机的制冷量就可以满足, 在 13~15 时随负荷值增加冷水机组开启数量增加一台, 但增加后冷水机组的负荷率仅为 0.03, 0.05 和 0.04 小于设定值 0.3, 此时间段对冷水机组运行采用排序优化控制。

表3 工作日1逐时负荷值一开启台数关系

时间/h	负荷值/kW	运行台数	负荷率(顺序)	能耗/kW	负荷率(优化)	能耗/kW
8	1 220	1	0.80	215.9	0.80	215.9
9	1 241	1	0.82	222.1	0.82	222.1
10	1 301	1	0.86	235.4	0.86	235.4
11	1 358	1	0.89	246.4	0.89	246.4
12	1 460	1	0.96	276.3	0.96	276.3
13	1 563	2	1+0.03	341.8	0.52+0.52	306.4
14	1 597	2	1+0.05	356.8	0.53+0.53	309.8
15	1 580	2	1+0.04	350.1	0.52+0.52	306.4
16	1 493	1	0.98	286.1	0.98	286.1
17	1 402	1	0.92	258.4	0.92	258.4
18	1 356	1	0.89	246.4	0.89	246.4

由表3计算得工作日1采用传统顺序开启冷水机组总能耗为3 035.7 kW,采用优化控制后总能耗为2 909.6 kW,相较于优化前总能耗减少了126.1 kW,节能率为4.15%。

表4为工作日2建筑逐时冷负荷值,将工作日2的逐时负荷值进行聚类分析,结果如表5所示,早晨开启台数为两台,8~10和16~18时间段内两台冷机的制冷量就可以满足建筑所需,在11~15时随负荷值增加一台冷水机组,但增加后冷水机组的负荷率仅为0.03,0.06,0.04和0.01小于设定值0.3,此时间段对冷水机组运行控制优化。

表4 工作日2逐时冷负荷值

时间/h	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
负荷/kW	2891	2948	3003	3037	3086	3129	3092	3050	3020	2969	2916

表5 工作日2逐时负荷值一开启台数关系

时间/h	负荷值/kW	运行台数	负荷率(顺序)	能耗/kW	负荷率(优化)	能耗/kW
8	2 891	2	1+0.90	546.9	1+0.90	546.9
9	2 948	2	1+0.94	563.8	1+0.94	563.8
10	3 003	2	1+0.98	582.8	1+0.98	582.8
11	3 037	3	2.00	593.4	2.00	593.4
12	3 086	3	2+0.03	638.5	2+0.03	553.8
13	3 129	3	2+0.06	659.1	2+0.06	560.7
14	3 092	3	2+0.04	646.8	2+0.04	553.8
15	3 050	3	2+0.01	613.6	2+0.01	547.2
16	3 020	2	1+0.99	588	1+0.99	588
17	2 969	2	1+0.95	568.3	1+0.95	568.3
18	2 916	2	1+0.92	555.1	1+0.92	555.1

由表5计算得工作日2采用传统顺序开启冷水机组总能耗为6 556.3 kW,采用优化控制后总能耗为6 213.8 kW,相较于优化前总能耗减少342.5 kW,节能率为5.22%。

#### 4 结束语

文章针对冷水机组运行台数和负荷的分配不合理导致系统整体效率低、能耗高以及能源浪费的现象,采用聚类

算法分析逐时冷负荷值确定当前时刻冷水机组运行台数,提出了一种排序优化控制策略应用于冷水机组运行控制,实现了冷水机组合理运行及降低能耗。结果表明:1)通过对夏季工况下建筑冷负荷值仿真得到的模拟值可为冷水机组早晨启动台数提供策略。2)采用K-means算法对冷负荷值聚类分析后得到不同负荷值下冷机运行台数,提供更加合理的冷水机组运行控制策略。3)与顺序控制策略相比,工作日1与工作日2采用顺序优化控制策略冷水机组总能耗分别节约126.1 kW和342.5 kW,节能率分别为4.15%和5.22%,可以节省更多的冷水机组运行能耗。同时可避免不必要的冷水机组开/关动作,降低冷水机使用损耗。

#### 参考文献:

- [1] 邵凡,张艳,鲁燕. 中央空调冷水机组群控优化方法研究[J]. 电力需求侧管理, 2016, 18(4): 6-10.
- [2] 王盛卫,孙勇军,马贞俊. 多机制冷系统在线优化控制策略[J]. 化工学报, 2010, 61(S2): 86-92.
- [3] 林秀军,吴延奎. 中央空调冷水机组运行模式对系统综合能耗的影响与分析[J]. 建筑节能, 2018, 46(10): 33-36.
- [4] Sun Y, Wang S, Xiao F. In situ performance comparison and evaluation of three chiller sequencing control strategies in a super high-rise building [J]. Energy and Buildings, 2013, 61: 333-343.
- [5] Liu Z, Tan H, Luo D, et al. Optimal chiller sequencing control in an office building considering the variation of chiller maximum cooling capacity [J]. Energy and Buildings, 2017, 140: 430-442.
- [6] Sun Yongjun, Wang Shengwei, Xiao Fu. Development and validation of a simplified online cooling load prediction strategy for a super high-rise building in Hong Kong [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 68: 20-27.
- [7] Sundar Raj Thangavelu, Aung Myat, Ashwin Khambadkone. Energy optimization methodology of multi-chiller plant in commercial buildings, Energy, 2017, 123: 64-76.
- [8] Sun Yongjun, Wang Shengwei, Huang Gongsheng. Chiller sequencing control with enhanced robustness for energy efficient operation, Energy and Buildings [J]. 2009, 41(11): 1246-1255.
- [9] 滕明岐,任庆昌,何毅,等. 某产业园中央空调冷机群控系统的设计[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(5): 71-72.
- [10] Huang S, Zuo W, Sohn M D. Amelioration of the cooling load based chiller sequencing control [J]. Applied Energy, 2016, 168: 204-215.
- [11] 张旭豪,晋欣桥,杜志敏,等. 基于遗传算法的冷水机组运行优化策略研究[J]. 建筑热能通风空调, 2011, 30(3): 15-18.
- [12] 江友华,王润超,王林,等. 引入改进的K-means算法的电缆监测数据优化技术的研究[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(12): 3969-3971.
- [13] 龚运鸿,周新志,雷印杰. 基于滑动门中心点计算的K均值聚类并行算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(2): 273-275.
- [14] 王海霞,李凯勇. 基于遥测参数建模的无人飞行器发动机故障诊断[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(10): 13-17.