

文章编号: 2095-2163(2022)06-0110-06

中图分类号: TP181

文献标志码: A

# 基于精准按需供能的中央空调开机调度研究

王可, 何利力

(浙江理工大学 信息学院, 杭州 310018)

**摘要:** 为满足企业节能降耗要求,解决生产车间中央空调开机调度问题,提出一种基于精准按需供能的调度方法。为获取中央空调系统的运作信息,通过分析不同季节的空调机理总结出运行工况,获取空调机组的运行参数,使用温湿度采集器采集数据,并利用加权平均计算出不同区域的温湿度。针对机器设备故障和温湿度变化两种扰动因素,采用双反馈机制重调度策略并设置预留安全值。为解决具有动态联动关系的空调机组调度问题,以调控时间和能源损耗为优化目标函数,构建以精准按需供能的调度模型。相比于原调度方法,该调度模型时间效率提升了22.08%,能源损耗降低了16.7%。

**关键词:** 中央空调; 开机调度; 动态联动关系; 能源损耗; 按需供能

## Research on central air conditioning start-up scheduling based on accurate energy supply according to the demand

WANG Ke, HE Lili

(School of Informatics Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**[Abstract]** In order to solve the start-up scheduling problem of central air conditioning in production workshops and meet the requirements of energy saving and consumption reduction in enterprises, a scheduling method based on precise energy supply is proposed. In order to acquire the operation information of the central air conditioning system, the operating conditions are summarized by analyzing the air conditioning mechanism in different seasons, and the operating parameters of the air conditioning unit are obtained. The temperature and humidity collector is used to collect data, and the temperature and humidity information of different regions is calculated by weighted average. The rescheduling strategy is proposed and the reserved safety value is set according to the two disturbance factors such as machine and equipment failure and temperature and humidity change. In order to solve the scheduling problem of air conditioning units with dynamic linkage relationship, a scheduling model with accurate energy supply according to the demand is constructed. The objective function of optimization is control time and energy loss. Compared with the original scheduling method, the scheduling model improves the time efficiency by 22.08% and reduces the energy consumption by 16.7%.

**[Key words]** central air conditioning; start-up scheduling; dynamic linkage relationship; energy loss; accurate energy supply according to the demand

## 0 引言

工业企业普遍存在能耗偏高且利用率偏低等问题,降低能源工业消耗比重等是企业首要考虑的问题<sup>[1-3]</sup>。在中央空调机组运行过程中,不同的运行策略,导致不同的能效水平。为达到生产环境的条件需求,操作空调机组有很多不同的方法手段,但用电量、蒸汽消耗量等也会存在差异。因此通过保证生产环境稳定前提下减少能耗损失,将最佳的供能作业流程进行固化,提出一种符合工业生产特点的调度方法,可为标准化作业流程提供强有力的支撑<sup>[4-5]</sup>。

由于影响空调调度的因素复杂,则需要根据具体项目的运行特点和工业标准制定对应的调度策略。文献[6]采用多种随机分布模型,基于价格时

间自动机理论系统构建了大厦空调系统调度策略模型,该模型可以在不确定环境下实现精确建模。文献[7]基于机器学习对办公建筑暖通空调进行优化调度,解决了用电高峰期用户端需求量增大冲击电网的问题。文献[8]提出一种基于有限差分热的房屋空调优化调度模型,在不违反室内允许温度限制的情况下降低了电力成本,使温度精度提高10%以上。

本文对某大型企业中央空调开机调度问题展开研究。现有调度方法为工作人员在生产开始前提前2 h启动中央空调机组,存在调控时间过长、能耗损失过大等问题。中央空调机组动态联动调控车间温湿度环境,独立空调机组之间无间隔且相互影响,甚至出现过相邻机组一冷一热的运行工况,且车间布置有大量不同的机器设备,每个位置的空调调控要

**基金项目:** 浙江省重点研发计划项目(2021C01110)。

**作者简介:** 王可(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:计算机软件与理论;何利力(1966-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:数据分析、企业智能。

**收稿日期:** 2020-12-13

求也不尽相同,同时还存在着机器故障等扰动因素影响调度结果。为解决上述问题,本文提出一种基于精准按需供能的中央空调开机调度方法,在保障产品质量、降低废品率的基础上,以最快的时间使车间环境符合生产要求。

### 1 问题分析

生产车间具有大面积无间隔特点,多台大型空调机组动态联动调控环境温湿度,为解决中央空调开机调度问题,首先要明确空调机组的工作方式,确定机组的供能参数,通过温湿度采集器获取生产区域的温湿度值,分析扰动因素,为制定调度策略打好基础。最终制定待调控区域的调度方法,做到精准按需供能。

### 1.1 空调机理分析

空调机组对空气处理方式一般分为 2 种,即:夏季的降温除湿工作方式和冬季的加温加湿工作方式,焓湿图如图 1 所示。

其中,降温除湿工作方式是通过初中效过滤器将部分回风和过热空气  $W$  过滤,利用主表冷盘管将干净空气  $H$  进行降温除湿处理,将混合空气降至露点  $L$ ;其余回风由副表冷盘进行降温处理为  $N_1$ 。再将混合空气  $S$  送至生产环境中。

加温加热工作方式是将过冷空气  $W$  与回风  $N$  通过初中效过滤器过滤为  $H$ ,利用干蒸汽加热盘管加热至  $L$ ,再利用干蒸汽加湿器进行等温加湿后的空气  $S$  送入生产环境中。

不同季节的空调机组运行参数见表 1。

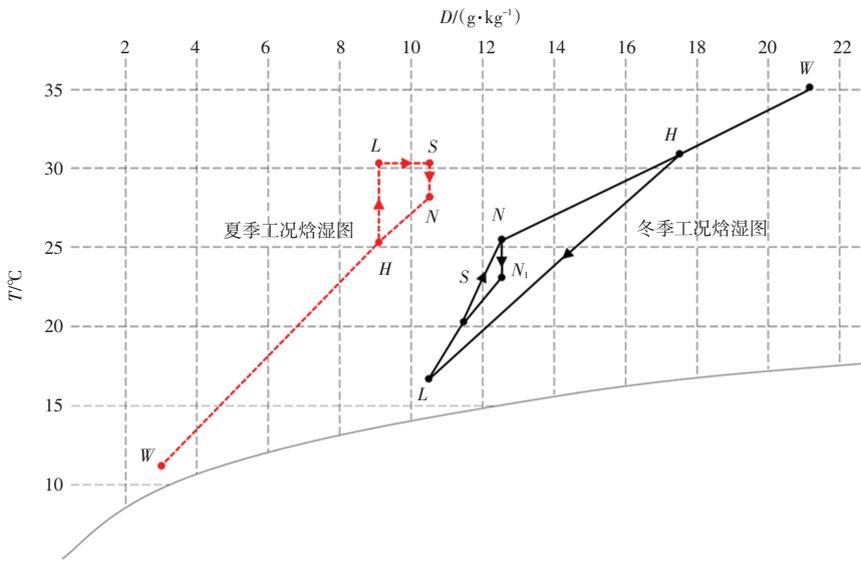


图 1 焓湿图

Fig. 1 Psychrometric chart

表 1 空调机组运行参数

Tab. 1 Operating parameters of air conditioning units

	机组状态							
	总送风量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	新风量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	新风进风 工况	室内设计 工况	冷量/ kW	热量/ kW	加湿量/ ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ )	校验加湿量/ ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ )
机组夏季工况 运行参数	120 000	18 000	DB35.1 $^\circ\text{C}$ / WB28.0 $^\circ\text{C}$	24 $\pm$ 2 $^\circ\text{C}$ / 58 $\pm$ 5%	580	-	-	-
机组冬季工况 运行参数	120 000	18 000	DB-1.5 $^\circ\text{C}$ / RH79%	24 $\pm$ 2 $^\circ\text{C}$ / 58 $\pm$ 5%	-	275	235	236
	过风量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	进风工况		出风工况	设备制冷量/ ( $\text{kW} \cdot \text{h}^{-1}$ )		设备加热量/ ( $\text{kW} \cdot \text{h}^{-1}$ )	
机组夏季工 况运行参数	主表冷器 40 800 副表冷器 79 200	28.90 $^\circ\text{C}$ / 22.56 $^\circ\text{C}$ 24.00 $^\circ\text{C}$ / 18.26 $^\circ\text{C}$		16.0 $^\circ\text{C}$ / 15.0 $^\circ\text{C}$ 16.2 $^\circ\text{C}$ / 14.8 $^\circ\text{C}$	314 271		- -	
机组冬季工 况运行参数	蒸汽加热盘管 120 000 加湿器 120 000	20.175 $^\circ\text{C}$ / 9.60 g/kg 29.500 $^\circ\text{C}$ / 10.78 g/kg		29.5 $^\circ\text{C}$ / 9.60 g/kg 29.5 $^\circ\text{C}$ / 10.78 g/kg	- -		373.1 255.0	

## 1.2 车间环境温湿度加权平均控制策略

生产车间通过温湿度采集器来收集温湿度信息,10套空调系统共同负责车间环境的温湿度调节,独立空调机组之间无隔断且相互影响,存在同一生产设备分布在2台独立空调设备调控区域之间。按照机器设备分布对生产车间进行区域划分,除边缘空调机组只作用于一个区域外,其余机组都作用于2个区域;每一区域是由2台机组共同调控环境温湿度。车间分布示意如图2所示。由图2可知,边缘空调1只作用于区域1,空调2同时作用于区域1和区域2;区域1被空调1和空调2共同调控。

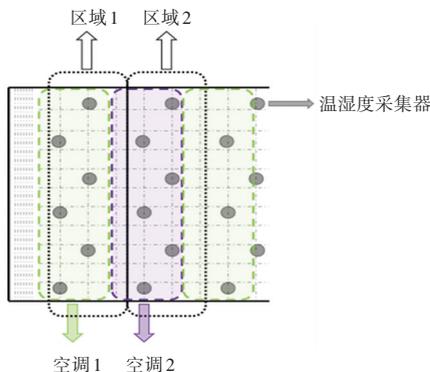


图2 车间分布示意图

Fig. 2 Workshop distribution diagram

首先构建精确调度模型的前提条件是获取真实可靠的控制环境的温湿度状况。由于生产车间空调区域面积大、且并非完全封闭,存在重点发热设备分布不均匀、门窗和入口通道受外界干扰等问题,需要针对空调环境的不同特点,用加权平均算法来计算控制环境的温湿度状况,在计算温湿度值时,对于靠近门窗、通道等容易受到干扰的采集点减少权重,对生产设备所在区域的检测点加大权重。计算公式为:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

其中,  $x_i$  为第  $i$  个采集点的数值;  $w_i$  为第  $i$  个采集点的权重;  $\bar{x}$  为加权平均值。

## 1.3 基于双反馈机制的重调度策略

在实际生产过程中,由于会出现各种扰动因素需要重调度<sup>[9]</sup>,现将扰动分为2类。一类是即时重调度,当机器设备发生故障时,在不影响相邻区域温湿度的条件下,暂停故障设备所在区域空调温湿度供应,对空调调度方案进行重调度,避免能耗损失。另一类是触发临界值重调度,在系统温湿度设定值前设置一个预留安全值,生产车间的温湿度是一个

缓慢变化的过程,若存在外界干扰,只有当温湿度偏离设定值的时候系统才开始纠正,存在较大的滞后时间,导致温湿度超调,预留安全值解决了此问题,给系统留有足够的响应时间,同时也避免了因为一次扰动就触发重调度,增强了系统稳定性。

## 2 模型构建

### 2.1 调度策略建模

为实现按需供能的目标,首先将车间按照生产设备分布划分为不同区域。将空调机组用  $K$  表示,其中  $K = \{K_1, \dots, K_{10}\}$ ,划分后的区域用  $A$  表示,这里  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_9\}$ ,每个区域  $A_i$  都有2台空调 ( $K_i, K_{i+1}$ ) 共同维护温湿度环境。本文通过构建目标函数并明确约束条件,制定了调度策略,最后使用动态规划算法求解出调度结果。本文整体调度模型如图3所示。

首先设定最佳温度区间  $T$  和湿度区间  $H$ ,通过温湿度采集器获取每个区域的真实温度值  $t = \{t_1, t_2, \dots, t_9\}$  和真实湿度值  $h = \{h_1, h_2, \dots, h_9\}$ 。以冬季车间加温加湿为例,通过算法1得到系统输入待加温区域队列  $A_1 = \{a_i, a_j, \dots, a_k\}$  和待加湿区域队列  $A_2 = \{a_m, a_n, \dots, a_o\}$ 。本文研发算法的代码设计详见如下。

#### 算法1 系统输入队列

已知最佳温度区间  $T$  和湿度区间  $H$ ,  $T_{\min}$  和  $H_{\min}$  分别为最佳温度区间和最佳湿度区间的最小值,生产车间划分后的区域  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_9\}$ ,每个区域的真实温度值  $t = \{t_1, t_2, \dots, t_9\}$  和湿度值  $h = \{h_1, h_2, \dots, h_9\}$ ,  $A_1$  为输入系统的区域编号,  $K$  为作用于每个区域空调序列组合。

```

1: Difference = t - T_min;
   // Difference = {d_1, d_2, ..., d_9}
2: for (int i = 0; i < Difference.length - 1; i++) {
3:   for (int j = 1; j < Difference.length - 1 - i; j++) {
4:     if (Difference[j] > Difference[i]) {
5:       int temp = arr[j];
6:       arr[j] = arr[i];
7:       arr[i] = temp;
8:     }
9:   }
10: }
11: Update A_1; // 按照 Difference 更新对应值更

```

```

新区域编号
12: for (int i = 0; i < Difference.length - 1;
i ++ ) {
13:   if (Difference[i] > 0) {
14:     Difference1[i] = Difference[i];
15:   }
16:   else {
17:     break;
18:   }
19: }
20: Update A1; //按照更新 Difference1 对应值
更新区域编号
21: Update K; //更新空调序列,把故障空调机
组及时剔除。
以相同步骤获取队列 A2。
    
```

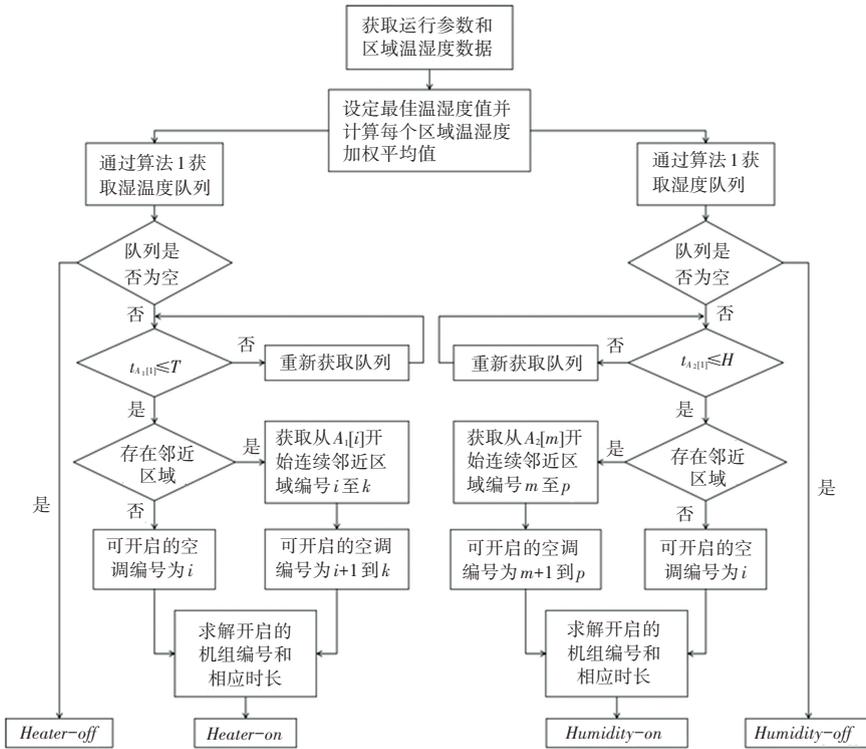


图 3 调度策略流程图

Fig. 3 Flow chart of scheduling design

2.2 调度模型的目标函数与约束条件

2.2.1 调度模型的目标函数

空调调度<sup>[10-11]</sup>过程中的主要优化目标为调控时间  $S$  和能源消耗  $E$ 。其中,调控时间即指使待调控区域尽快达到适合生产的温湿度条件的时间。推得的计算公式可写为:

$$S = \sum_{i=1}^9 (S_i^T + S_i^H) \quad (2)$$

其中,  $i$  为空调编号,  $S_i^T$  和  $S_i^H$  分别为空调  $i$  调控温度和湿度所耗费时间。

空调运行的能源消耗主要由用电量、蒸汽消耗、冷量构成,这里冷量 = 耗电量 \*  $COP$ 。电力折标煤系数为 0.123,蒸汽折标煤系数为 0.094,能耗折标 (Average Standard Energy Consumption,  $ASEC$ )<sup>[12-13]</sup> 计算公式为:

$$ASEC = \frac{0.123 \times (Q_1 + Q_2) + 0.094 \times S}{H} \quad (3)$$

其中,  $ASEC$  为折标能耗;  $Q_1$  为用电量;  $Q_2$  为冷量的耗电量;  $S$  为蒸汽用量;  $H$  为空调运行时长。总能源消耗的目标函数为:

$$E = \sum_{i=1}^9 ASEC_i \quad (4)$$

总调度目标函数可以表示为:

$$\min F = w_1 S + w_2 E \quad (5)$$

其中,  $w_1$  和  $w_2$  分别为调控时间和能源损耗目标变量的权重系数,此处  $w_1 + w_2 = 1$ 。

2.2.2 调度模型的约束条件

为避免能耗损失,不能出现相邻区域空调机组一个加热、一个降温或者一个加湿、一个除湿的情况,以区域  $A_1$  和  $A_2$  的温度调控为例,将空调机组的

工作方式数值化,升温用‘1’表示,降温用‘-1’表示,则:

$$A_1\_Heater = turn\ on$$

$$A_2\_Heater = \begin{cases} turn\ on & |value| \geq 0 \\ turn\ off & |value| < 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $value$  为相邻区域空调机组情况数值化结果。

考虑到企业效益,车间环境一定要达到温湿度标准后才能开始生产,否则就会造成原料损坏,给企业造成巨大损失,即:

$$\begin{cases} T_{\min} \leq t_i \leq T_{\max} \\ H_{\min} \leq h_i \leq H_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $t_i$  和  $h_i$  分别为区域  $A_i$  的温度和湿度;  $T_{\max}$  和  $T_{\min}$  分别为最佳温度区间  $T$  的最大、最小值;  $H_{\max}$  和  $H_{\min}$  分别为最佳湿度区间  $H$  的最大、最小值。

负责对应区域的空调机组供应能量  $I_Q$  应不少于该区域所需要的能量  $W_Q$ , 即:

$$I_Q \geq W_Q \quad (8)$$

由于空调机组负责供应的区域往往不是单一的,存在着给非待调控区域提供能源的情况。非必要能源有利于缓解车间环境波动,不属于能源损失,但也不必过分提供引起能源浪费,故非必要能源  $I_E$  越小越好。

### 2.3 基于动态规划的模型求解

动态规划的基本思想是将待求解问题分解成若干个子问题,子问题往往不是互相独立的。通过记录已解决的子问题答案,避免大量重复计算<sup>[14-15]</sup>。

由于每个区域都是由2台机组进行温湿度调控,位于区域左侧和右侧的空调机组编号表示为  $K_L$  和  $K_R$ 。空调机组所提供的能量往往也是横跨2个区域,对左、右侧区域输出能量占比表示为  $W_1$  和  $W_2$ , 具体值见表2。

表2 空调机组运行参数

区域编号	$K_L$	$W_1$	$K_R$	$W_2$
—	—	—	1	0.14
1	1	0.86	2	0.24
2	2	0.76	3	0.32
3	3	0.68	4	0.40
4	4	0.60	5	0.48
5	5	0.52	6	0.56
6	6	0.44	7	0.64
7	7	0.36	8	0.72
8	8	0.28	9	0.80
9	9	0.20	10	0.92
—	10	0.08	—	—

以冬季的加热工况为例,若区域  $A_i$  待加热量为  $Q$ , 用来调控的机组为  $K_i$  和  $K_{i+1}$ , 要尽可能在最短时间内使调控区域达到温湿度要求,同时  $K_i$  机组运行会影响区域  $A_{i-1}$ ,  $K_{i+1}$  机组运行会影响区域  $A_{i+1}$ , 每台机组的运行都有对应的时间消耗代价和能源消耗代价。因此采用动态规划计算出最佳空调机组调控时间和最小代价能源损耗。

### 3 仿真实验

以2021年11月1日冬季加热工况为例,过程中根据算法1获取待调控区域队列  $\{A_1, A_9, A_7, A_3, A_4\}$ , 根据调控策略流程图确认开启的空调机组,然后利用动态规划求解出目标函数,目标函数中的权重  $w_1$  设置为0.4,  $w_2$  设置为0.6。

首先处理待调控区域  $A_1$ , 无相邻区域,需要加热量为156.1 kw,可调配机组为  $K_1$  和  $K_2$ , 其中  $K_1$  会将86%的加热量提供给  $A_1$ ,  $K_2$  会将24%的加热量提供给  $A_1$ ,  $K_1$  和  $K_2$  的剩余加热量归为非必要能源。最终计算出  $K_1$  机组调控时间为29.2 min,  $K_2$  机组不开启。同理求解出区域  $A_9$  和  $A_7$  的调控机组及对应的调控时间。对于待调控区域  $A_3$ , 有相邻区域  $A_4$ , 故同时进行调度。可调配机组为  $K_3$ ,  $K_4$  和  $K_5$ , 其中  $K_3$  和  $K_5$  会提供非必要能源。最终求解出  $K_3$  和  $K_4$  的调控时间分别为7 min 和 15.2 min,  $K_5$  不开启。仿真运行后的计算结果见表3。

表3 调度结果

Tab. 3 Scheduling results

区域	$K_L$	$K_L$ 开启时间/min	$K_L$ 加热量/kw	$K_R$	$K_R$ 开启时间	$K_R$ 加热量	总加热量	待加热量	ASEC /kgce
1	1	29.2	156.155	2	0	0	156.155	156.1	213.333
9	9	0	0	10	21.2	121.282	121.282	121.2	213.333
7	7	0	0	8	20.9	93.573	93.573	93.5	213.333
3	3	7.0	29.599	4	15.2	37.807	67.407	67.4	213.333
4	4	15.2	56.711	5	0	0	56.711	56.7	213.333

在原调度方法中,工作人员提前2 h 开启空调机组, ASEC 值为256.098 kgce。本文调度方法的总

调控时间为93.5 min, ASEC 值为213.333 kgce, 相比于原方法, 本文调度方法时间效率提升了

22.08%, ASEC 降低了 16.7%。

## 4 结束语

本文为解决中央空调开机调度问题,提出一种基于精准按需供能的调度方法。通过分析空调机理关系,确认用能模式,使用加权平均算法计算出每个区域温湿度。针对机器设备故障和温湿度变化两种扰动因素,采用双反馈机制重调度策略,并设置一个预留安全值,增加系统稳定性。对于具有动态联动关系的空调机组调度问题,通过获取待调控区域队列,以时间和能源损耗为优化目标函数,构建以精准按需供能为目标的调度模型。相比于原调度方法,本文调度模型调控时间效率提升了 22.08%,能源损耗降低了 16.7%。

随着车间生产链不断运转,中央空调系统会继续产生大量数据,由于车间布局是大面积、无间隔,环境易有波动,需要不断补充数据集,对预留安全值等模型参数进行校正。后续将进一步对工艺蒸汽量进行预测,并制定工艺调度策略,减少能源浪费,实现企业节能降耗目的。

## 参考文献

- [1] 季晓莉. “十四五”工业绿色低碳转型方向已定[N]. 中国经济导报, 2021-12-07(006).
- [2] TRIVEDI V, BHATT N. A review on energy conservation in manufacturing industry [C]// 2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTCT). Coimbatore, India; IEEE, 2018: 1-5.
- [3] ZHOU Anhua, LI Jun. Investigate the impact of market reforms on the improvement of manufacturing energy efficiency under

China's provincial - level data [J]. Energy, 2021, 228(1): 120562.

- [4] WANG K J, DAGNE T B, LIN C J, et al. Intelligent control for energy conservation of air conditioning system in manufacturing systems [J]. Energy Reports, 2021, 7(12): 2125-2137.
- [5] 蒋爱军. 中央空调系统运行管理中的节能探讨[J]. 中国设备工程, 2020(23): 75-76.
- [6] 顾璠. 不确定环境下智能大厦空调系统调度的评估与优化研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [7] 袁玥. 基于机器学习的办公建筑暖通空调系统能耗预测及优化调度 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [8] ZHU Lin, WU Wenchuan, LI Zihao, et al. Air-conditioning optimal scheduling based on finite difference thermal model [C]// 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). Beijing, China; IEEE, 2019: 469-476.
- [9] 尹超, 李涛, 刘飞, 等. 基于反馈控制的车用空调装配车间动态调度方法 [J]. 重庆大学学报, 2011, 34(10): 8-14.
- [10] DANG J, HARLEY R G. Air conditioner optimal scheduling using best response techniques [C]// IEEE Power and Energy Society Conference and Exposition in Africa; Intelligent Grid Integration of Renewable Energy Resources (PowerAfrica). Johannesburg, South Africa; IEEE, 2012: 1-5.
- [11] SATO K, SAMEJIMA M, AKIYOSHI M, et al. A scheduling method of air conditioner operation using workers daily action plan towards energy saving and comfort at office [C]// Proceedings of 2012 IEEE 17<sup>th</sup> International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012). Krakow, Poland; IEEE, 2012: 1-6.
- [12] 工业化率. 综合能耗计算通则 [J]. 甘肃能源, 2009(03): 73-77.
- [13] 简毅文, 江亿. 住宅供暖空调能耗计算模式的研究 [J]. 暖通空调, 2005(02): 11-14.
- [14] BRANDIMARTE P. The dynamic programming principle [M]// EURO Advanced Tutorials on Operational Research. Cham; Springer, 2021: 1-34.
- [15] 王晓东. 算法设计与分析 [M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2014.

(上接第 109 页)

- [2] 崔玉洁, 张祖立, 白晓虎. 采摘机器人的研究进展与现状分析 [J]. 农机化研究, 2007(02): 4-7.
- [3] 冉玉梅, 王洪国, 杨玉会, 等. 基于自适应局部阈值的彩色图像分割 [J]. 计算机与现代化, 2010(01): 109-112.
- [4] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histogram [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9: 62-66.
- [5] ANGULO J, SERRA J. Modelling and segmentation of colour images in polar representations [J]. Image & Vision Computing, 2007, 25(4): 475-495.
- [6] LIN C, SU C H. Colour image segmentation using the relative

values of RGB [C]// Wseas International Conference on Applications of Computer Engineering. Hangzhou, China; World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2010: 46-51.

- [7] 王雪. 红外与可见光图像融合中的关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [8] 徐丽, 张建筑, 张焯. Otsu 分割与区域标记相结合的菠萝图像分割研究 [J]. 广东农业科学, 2012, 39(10): 190-191.
- [9] 戴天虹, 吴以. 基于 OTSU 算法与数学形态学的木材缺陷图像分割 [J]. 森林工程, 2014, 30(02): 52-55.