

文章编号: 1671-6612 (2025) 03-413-06

绿色建筑中暖通空调节能优化控制方法 —以武汉工业园区项目为例

秦绪伟

(华图山鼎设计股份有限公司 成都 610065)

【摘 要】 暖通空调能耗受到建筑物朝向等多种因素的影响, 对此, 以武汉工业园区项目为例, 提出绿色建筑中暖通空调节能优化控制方法。分析暖通空调的工作原理, 计算风机的送风量, 建立风机的功率模型, 通过计算冷冻水泵的实时水流量, 构建冷冻水泵的功率模型, 通过分析制冷机的可用冷量, 构建制冷机的功率模型, 整合暖通空调不同结构的功率模型, 设定节能优化控制目标函数, 并设定相应的约束条件。在模型求解时, 利用粒子群优化算法, 对粒子的参数进行更新, 得到优化控制目标函数的求解结果。实验以武汉工业项目为例, 通过测试结果表明: 该方法的能耗降低率平均为 59.65%, 控制性能好。

【关键词】 绿色建筑; 暖通空调; 节能优化控制; 武汉工业园区; 空调能耗
中图分类号 TM925 文献标志码 A

Optimization Control Method for Energy Conservation of HVAC in Green Buildings – Taking Wuhan Industrial Park Project as an Example

Qin Xuwei

(Huatu Cendes Co., Ltd, Chengdu, 610065)

【Abstract】 The energy consumption of HVAC is influenced by various factors such as building orientation. Taking the Wuhan Industrial Park project as an example, this paper proposes an energy-saving optimization control method for HVAC in green buildings. Analyze the working principle of HVAC, calculate the supply air volume of the fan, establish a power model of the fan, calculate the real-time water flow rate of the chilled water pump, construct a power model of the chilled water pump, analyze the available cooling capacity of the refrigerator, construct a power model of the refrigerator, integrate power models of different structures of HVAC, set energy-saving optimization control objective functions, and set corresponding constraint conditions. When solving the model, the particle swarm optimization algorithm is used to update the parameters of the particles and obtain the solution result of the optimization control objective function. Taking the Wuhan Industrial Zone project as an example, the test results show that the average energy consumption reduction rate of this method is 59.65%, and the control performance is good.

【Keywords】 Green buildings; HVAC; Energy saving optimization control; Wuhan industrial park; Air conditioning energy consumption

0 引言

武汉作为华中地区的重要城市, 其工业园区作为经济发展的核心区域, 建筑能耗问题尤为突出。

在工业园区中, 暖通空调系统不仅能够实时调节室内温度, 还能对室内空气进行更新, 有效提高员工的工作效率。然而, 现有的暖通空调系统在运行时,

由于相关技术不完善,经常出现耗能高、运行效率低等问题,不符合绿色建筑的发展要求^[1]。因此,对武汉工业园区项目中暖通空调节能优化控制方法的研究,能够有效促进园区的绿色发展。

在上述背景下,国内外不少研究学者对此展开了研究,并提出了自己的观点。文献[2]先收集新风机组的历史运行数据,利用机器学习建立新风机组的动态模型,设计线性预测控制器,利用遗传算法对控制器参数优化,以最小化冷热水用能成本为控制目标,实时计算盘管调节阀的开度,实现对新风机组的节能优化控制。该方法构建的风电机组模型会受到数据噪声、时变特性等影响,模型精度较低,影响到方法的控制效果。文献[3]基于历史数据和系统特性,建立水蓄冷系统的动态模型,再将系统的最大能效比作为目标函数,设计控制策略,利用模型预测控制算法,对系统的未来负荷进行预测,根据预测结果,对设计的控制策略进行优化,完成对机房节能优化的控制。该方法应用模型预测控制算法计算量较大,需要花费较长的时间,导致方法的控制时间较长。文献[4]先分析火电厂输煤系统的复杂特性,针对皮带输送机,分析运量与系统功率之间的关系,再利用 RBF 神经网络,将其拟合到输煤系统中,再调整皮带输送机的运行速度,确定其功率消耗最小的最佳速度,引入变频技术,建立节能优化控制模型。该方法应用的 RBF 神经网络虽然能够拟合复杂的非线性关系,但其自身会受到数据质量的影响,若数据中存在较多的噪声,将会导致方法的控制效果较差。文献[5]利用 Tmsys 软件建立地下工程水环热泵系统的仿真模型,通过输入实际运行数据或设计参数,对模型进行初始化设置,在 Tmsys 软件中对模型进行运行模拟,记录模拟过程中的关键数据,分析模拟结果,寻找影响系统能耗的主要来源,并制定针对性的节能优化控制策略。地下工程水环热泵系统结构复杂,设计了多个设备和环境,该方法仅考虑单个因素的影响,导致方法的控制效果不佳。

在以往研究的基础上,本文设计了绿色建筑中暖通空调节能优化控制方法-以武汉工业园区项目为例。本研究通过深入研究绿色建筑中暖通空调节能优化控制方法,可以丰富和完善绿色建筑理论体

系,为相关领域的研究提供新的思路和方法。同时,本研究可以直接应用于武汉工业园区项目的暖通空调系统中,显著降低能耗,提高运行效率,为绿色建筑的可持续发展提供有力支撑。

1 暖通空调节能优化控制方法设计

1.1 暖通空调能耗分析

根据绿色建筑中暖通空调的工作原理,对暖通空调各个关键部分进行能耗分析^[6]。风机作为暖通空调的关键结构,其能耗与送风量相关^[7]。其送风量计算公式如式(1)所示:

$$f_s = \frac{Q_n}{\rho_d \times (t_n - t_s)} \quad (1)$$

式中: f_s 为风机的送风量; Q_n 为绿色建筑内的热能负荷量; ρ_d 为建筑内空气的比热容值; t_n 为建筑内空气的平均温度值; t_s 为送风温度。

再计算风机流量比,进一步计算出风机的功率模型^[8]。其具体计算过程如式(2)所示:

$$\begin{cases} B_f = \frac{f_s}{f_l} \\ P_f = \frac{k_p \times f_l \times \Delta P}{\lambda_f \times e_f \times \rho_f \times B_f} \end{cases} \quad (2)$$

式中: B_f 为风机流量比; f_l 为风机的标准送风量; P_f 为风机的输出功率; k_p 为风机的负荷因数; ΔP 为风机的标准压力; λ_f 为风机特性系数; e_f 为风机运行效率; ρ_f 为绿色建筑内的空气密度。

冷冻水泵作为暖通空调的关键部分,其通过冷冻水泵的实时水流量对其进行功率进行确定^[9]。其流量计算公式如式(3)所示:

$$f_w = \frac{f_s \times (t_j - t_c)}{c_k \times \Delta t_w} \quad (3)$$

式中: f_w 为冷冻水泵流量; t_j 为冷冻水泵进风口温度; t_c 为冷冻水泵出风口的温度; c_k 为水的比热容; Δt_w 为冷冻水泵的供回水温差。

计算冷冻水泵水流速度,再计算冷冻水泵的功率。其具体计算过程如式(4)所示:

$$\begin{cases} v_w = \frac{f_w}{\rho_w} \\ P_l = \left[\alpha_{p1} + \alpha_{p2} \frac{v_w}{v_w'} + \alpha_{p3} \left(\frac{v_w}{v_w'} \right)^2 \right] P_m \end{cases} \quad (4)$$

式中: v_w 为冷冻水泵的水流速度; ρ_w 为冷冻水泵中水的密度; P_l 为冷冻水泵的输出功率; α_{p1} 、 α_{p2} 、 α_{p3} 分别为冷冻水泵的特性参数; v_w' 为冷冻水泵的标准水流速度; P_m 为冷冻水泵的额定功率。

除了风机和冷冻水泵外, 制冷机也是暖通空调的关键部分^[10]。制冷机的功率模型如式(5)所示:

$$\begin{cases} C_t = \frac{f_w \times Q_z}{Z_a} \\ P_z = Q_z \times \frac{1}{C_z} \times C_t \times C_r \end{cases} \quad (5)$$

式中: C_t 为制冷机的可用冷量; Q_z 为制冷机的制冷量; Z_a 为制冷机的冷负荷; P_z 为制冷机的功率; C_z 为制冷机中压缩机的功率; C_r 为制冷机的回路负荷。

1.2 暖通空调节能优化控制模型构建

在设计暖通空调节能优化控制模型时, 根据暖通空调的结构, 结合暖通空调各个关键部分的能耗分析, 建立暖通空调节能优化控制目标函数^[11]。其建立的目标函数具体如式(6)所示:

$$\min P_t = \kappa_f P_f + \kappa_l P_l + \kappa_z P_z \quad (6)$$

式中: P_t 为暖通空调的输出总功率; κ_f 为暖通空调中风机数量; κ_l 为暖通空调中冷冻水泵的数量; κ_z 为暖通空调中制冷机的数量。

分析暖通空调关键部分的能耗情况, 设定约束条件^[12]。其中, 设定的约束条件具体如式(7)所示:

$$\begin{cases} T_f^{\min} \leq T_f \leq T_f^{\max} \\ f_s^{\min} \leq f_s \leq f_s^{\max} \\ f_w^{\min} \leq f_w \leq f_w^{\max} \\ T_c^{\min} \leq T_c \leq T_c^{\max} \\ Q_z = c_p f_s (T_o - T_i) \end{cases} \quad (7)$$

式中: T_f 为风机的送风温度; $T_f^{\min}$ 、 $T_f^{\max}$ 分

别为风机送风温度的最小值和最大值; $f_s^{\min}$ 、 $f_s^{\max}$ 分别为风机送风速度的最小值和最大值; $f_w^{\min}$ 、 $f_w^{\max}$ 分别为冷冻水泵水流速度的最小值和最大值; T_c 为制冷机的回流温度差; $T_c^{\min}$ 、 $T_c^{\max}$ 分别为制冷机回流温度差的最小值和最大值; c_p 为制冷机的能效比; T_o 为冷水泵回水温度; T_i 为冷水泵的出水温度。

1.3 节能优化控制模型求解

根据公式(6)和公式(7)中的控制目标函数和约束条件, 对节能优化控制模型进行求解。在求解过程中, 采用粒子群优化算法, 输出该控制模型的控制结果^[13]。其求解过程如图1所示。

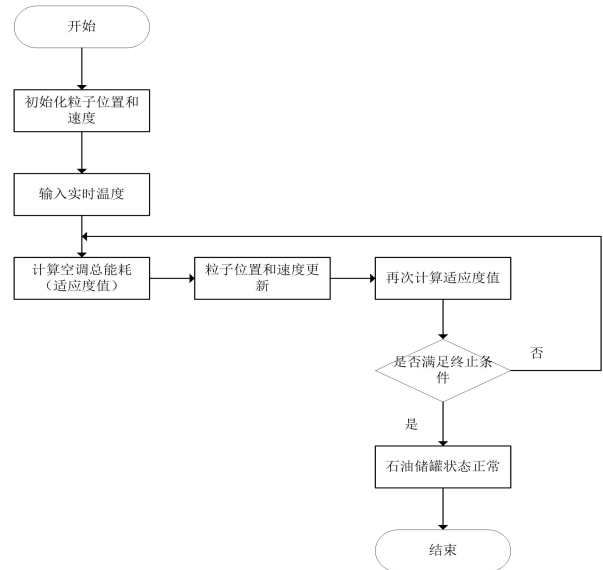


图1 节能优化控制模型求解过程

Fig.1 Solution process of energy-saving optimal control model

如图1所示, 根据暖通空调中各个设备的数据, 确定粒子群规模, 并将其初始化。输入室内实时温度, 将其作为初始变量, 利用目标函数计算暖通空调的总能耗, 再将其以适应度值的方式展现出来^[14]。设定全局最优和局部最优的粒子位置, 再利用适应度值对粒子进行更新, 并再次计算暖通空调的总能耗。判断当前迭代次数是否满足终止条件, 若满足, 则输出当前结果为最终结果, 反之, 则继续遍历, 并对粒子进行更新。由此, 输出控制模型的求解结果。

利用粒子群算法, 对粒子的速度和位置进行更新^[15]。在这个过程中, 算法会不断考虑冷机的能效

比及其与供回水温差的关系,以找到最佳的能效平衡点。其更新过程如式(8)所示:

$$\begin{cases} v_g = w_j + \delta_1 \times q_1 (P_j - x_i) + \delta_2 \times q_2 (G_j - x_i) \\ x_{i+d} = x_i + v_g \end{cases} \quad (8)$$

式中: v_g 为粒子速度的更新结果; w_j 为粒子的惯性系数; δ_1 、 δ_2 分别为粒子的加速系数; q_1 、 q_2 分别为基准常量; P_j 为粒子的局部最优位置; G_j 为粒子的全局最优位置; x_i 为初始位置; x_{i+d} 为粒子位置的更新结果。

对公式(6)中的目标函数进行求解。其求解结果如式(9)所示:

$$P_q = \frac{K(v_g \cdot x_{i+d})}{1 + C - P_i} \quad (9)$$

式中: P_q 为输出的目标函数求解结果; C 为引入的随机常数; $K(\cdot)$ 为粒子遍历函数。

2 实验测试

以武汉工业园区项目为例,其位于武汉市市区,所处位置交通发达,出行便利。在该园区内,配有多个区域,其中,生产区、研发区、物流区等为较为关键的功能区域。该项目具体情况如图2所示。



图2 武汉工业园区项目的工程概况

Fig.2 General situation of Wuhan Industrial Park project

如图2所示,该园区占地面积为250000平方米,建筑面积可达862000平方米,建设了多条主干道和次干道,配套设施完备。同时,该园区内多数建筑采用绿色环保材料,且园区内广泛种植绿化植物,从而打造了生态宜居的园区环境。

2.1 实验准备

将武汉工业园区项目中的暖通空调系统作为

研究对象,进行实验测试。该暖通空调系统中包含两组空调机组、两个冷冻水泵和一个制冷机。并在每个房间的角落、走廊、楼梯间等关键位置布置温度传感器,共计20个。这些传感器用于实时监测建筑内部的空气温度,为模型提供实时空气温度这一输入参数。在送风口和回风口布置风速传感器,共计4个。用于监测风机的送风速度和回风速度,为风机的功率模型提供数据支持。在冷冻水管路上布置流量传感器,共计2个。用于实时监测冷冻水泵的实时水流量,为冷冻水泵的功率模型提供数据。并布置1个中央控制器用于接收传感器数据,并根据节能优化控制模型的结果调整风机、冷冻水泵和制冷机的运行状态。暖通空调系统的具体结构如图3所示。

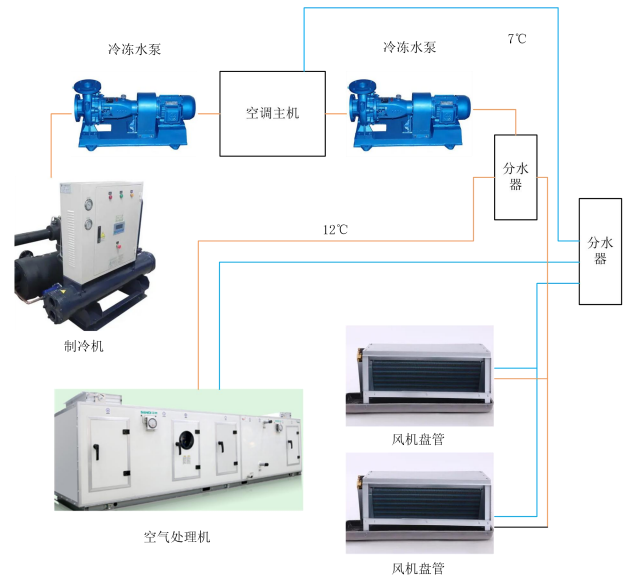


图3 暖通空调系统的具体结构

Fig.3 Specific structure of HVAC system

如图3所示,两个空调机组的风量为10000m³/h,风压为500Pa,转速为1500rpm,电机功率为3.7kW,噪声小于70dB。冷冻水泵的流量为150m³/h,电机功率为15kW,效率为85%,转速为2900rpm。制冷机的制冷量为500kW,输入功率为150kW,能效比为3.33,冷却水流量200m³/h,冷冻水流量为150m³/h。

根据武汉地区的气候特点,实验参数设定如下:环境温度为35℃,室内相对湿度为60%,自然通风占比为30%,惯性系数 w_j 为0.65,加速系数 δ_1 为1.33, δ_2 为2.65。冷冻水泵的水流速度 v_w

为 $0.0025\text{m}^3/\text{s}$ ，冷冻水泵中水的密度 ρ_w 为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ，冷冻水泵的输出功率 P_l 为 7.5kW 。风机送风温度的最小值 $T_f^{\min}$ 和最大值 $T_f^{\max}$ 分别为 15°C 和 30°C ，风机送风速度的最小值 $f_s^{\min}$ 和最大值 $f_s^{\max}$ 分别为 $0.5\text{m}/\text{s}$ 和 $10\text{m}/\text{s}$ 。

实验过程中，算法的参数设置如表 1 所示。

表 1 算法的参数设置

Table 1 Parameter settings for algorithms	
参数名称	参数值
粒子群规模	50
粒子的惯性系数	0.9
粒子的加速系数 (c1, c2)	(1.5, 1.5)
终止条件	能耗降低 $\geq 10\%$
引入的随机常数	0.1

武汉工业园区项目中的暖通空调系统 24h 内各个关键部分的运行功率如图 4 所示。

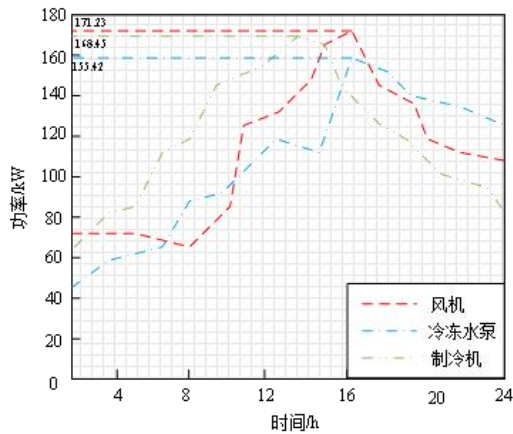


图 4 暖通空调系统 24 内运行功率

Fig.4 Operating power in HVAC system 24

如图 4 所示，在 24h，暖通空调系统各个结构的功率都呈现出先上升再下降的趋势，且均在午后时分达到最高值，总的最高运行功率可达 495.1kW 。

此外，设置对比实验。将本文设计的方法作为实验组，文献[2]基于模型预测控制的新风机组节能优化控制方法为对照组 1，文献[3]高效制冷机房水蓄冷模式节能优化控制方法研究为对照组 2。

在武汉工业园区项目的实际环境中，部署相关传感器和控制器，实时采集系统运行状态数据。将优化算法得到的最优控制策略应用于实际系统，观察并记录系统的运行效果。

2.2 实验结果讨论

利用上述三种方法对武汉工业园区项目中的暖通空调系统进行节能优化控制，统计其控制后，暖通空调下不同的运行总功率。其具体控制结果如图 5 所示。

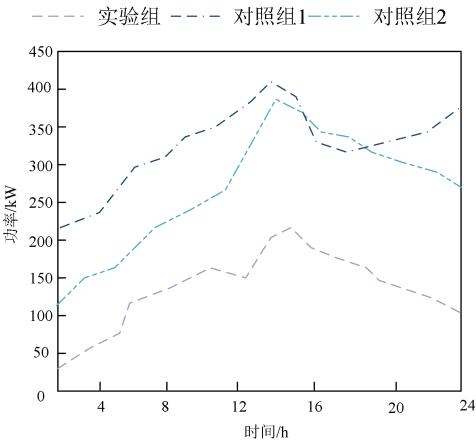


图 5 三种方法的控制结果

Fig.5 Control results of three methods

如图 5 所示，与图 4 中的运行功率相比，三种方法对暖通空调系统的运行功率进行了有效控制。其中，实验组的控制效果较好，其运行功率下降幅度较大。

为进一步验证上述三种方法在实际应用中的效果，以方法的能耗降低率为评价指标，对比三种方法的节能效果。其具体统计结果如表 2 所示。

表 2 三种方法的能耗降低率

Table 2 Energy consumption reduction rate of three methods

实验次数	实验组/%	对照组 1/%	对照组 2/%
1	56.12	32.11	19.25
2	57.88	34.56	18.44
3	63.24	36.12	16.25
4	62.15	38.15	17.45
5	59.88	34.57	13.26
6	59.36	35.15	15.48
7	60.14	36.26	16.59
8	63.25	38.15	17.48
9	61.47	34.21	15.26
10	62.54	38.25	16.25

如表 2 所示，经过多次实验，实验组的能耗降低率平均为 59.65% ，对照组 1 的能耗降低率平均为 36.77% ，对照组 2 的能耗降低率为 17.15% 。可

见,实验组的能耗降低率数值较大,表明粒子群优化控制设计中考虑冷机的能效比及其与供回水温差的关系是有效的,能够显著提高暖通空调系统的节能效果。

在不同室外气象条件下,暖通空调节能优化控制结果如表 3 所示。

表 3 暖通空调节能优化控制结果

Table 3 Energy saving optimization control results for HVAC systems

室外气象条件	优化前 能耗 /kWh	优化后 能耗 /kWh	节能 率 /%	室内温度稳定 性/℃	室内湿度稳定 性/%
晴天	1200	1020	15	±0.5	±5
阴天	1100	990	10	±0.4	±4
雨天	950	900	5	±0.3	±3
多云	1150	1000	13	±0.5	±4.5
转晴					
晴转多云	1080	940	13	±0.4	±5

实验结果表明。该方法能够显著降低系统能耗,提高能源利用效率,同时确保室内环境的舒适性和稳定性。

3 结论

在绿色建筑领域,本研究以武汉工业园区项目为例,充分展示了其在提升能源利用效率、降低环境负荷及增强建筑可持续性方面的显著价值与深远意义。通过精准的智能控制系统,结合传感器技术与大数据分析,该项目实现了对暖通空调系统的动态调节与精细化管理,大幅度提高了室内的舒适度,也大大提高了能源利用效率。此方法不仅优化了园区建筑的能耗结构,降低了运营成本,促进了园区的绿色发展。但绿色建筑中的暖通空调系统通常涉及多个子系统和复杂的控制逻辑。虽然本研究通过传感器技术和大数据分析对暖通空调系统进行了动态调节,但数据收集的范围和精度可能仍存在一定的限制。为了更准确地评估和优化暖通空调系统的性能,未来研究应扩大数据收集范围,包括更多关键环境参数和更精细的时间分辨率。同时,

应提高数据质量,确保数据的准确性和可靠性。

参考文献:

[1] 陈旭东.基于负荷预测的医院室内空调节能优化控制方法[J].江西建材,2023,31(3):312-314.

[2] 田野,杨子轩,赵长春,等.基于模型预测控制的新风机组节能优化控制方法[J].暖通空调,2023,53(S2):193-196.

[3] 胡钦,李元阳,方兴,等.高效制冷机房水蓄冷模式节能优化控制方法研究[J].制冷技术,2023,43(5):44-52.

[4] 苗荣霞,李洁馨,张洋,等.火电厂输煤系统节能优化控制方法研究[J].国外电子测量技术,2023,42(5):50-55.

[5] 郭佳全,谢超华,李宗新,等.基于 Trnsys 的某地下工程水环热泵系统节能优化控制[J].节能,2023,42(10):6-9.

[6] 林莉莉,蔡阳波,万汉兴.污水处理过程中节能优化控制方法的研究[J].皮革制作与环保科技,2021,2(17):170-171.

[7] 薛钧赢,简冬,顾江其,等.火电机组干式电除尘节能优化控制系统设计及应用研究[J].能源研究与利用,2024,14(1):8-12.

[8] 申永鹏,袁小芳,赵素娜,等.智能网联电动汽车节能优化控制研究进展与展望[J].自动化学报,2023,49(12):2437-2456.

[9] 戴柳琴,韩铠.工业废水处理过程节能优化控制方法的探究[J].城市建设理论研究(电子版),2023,(7):158-160.

[10] 杨秀,刘欣雨,孙改平,等.基于改进粒子群算法的中央空调系统节能优化控制[J].电力科学与技术学报,2023,38(3):65-75,93.

[11] 闫军威,黄琪,周璇.基于 DDPG 的冷源系统节能优化控制策略[J].控制与决策,2021,36(12):2955-2963.

[12] 张永合.城市环境污水处理过程节能优化控制方法探索[J].科技创新与应用,2022,12(32):142-145.

[13] 周初恺,林文文,方志梅.考虑舒适度的制造环境中 HVAC 节能优化控制研究[J].计算机应用与软件,2021,38(2):43-49.

[14] 高沛林,苗鑫,杨方.煤矿带式输送机节能优化控制方法研究[J].工矿自动化,2022,48(5):65-71,78.

[15] 李晓敏.基于 lingo 求解的暖通空调节能优化控制模型及策略优化研究[J].上海节能,2021,(6):598-603.