

面向低碳要求的园区楼宇空调负荷调控系统

林慧婕^{1,2}, 甘海庆³, 孙季泽^{1,2}, 杨子跃³, 杨楠⁴, 刘桂林⁴

(1. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 国电南瑞南京控制系统有限公司, 江苏 南京 211106;
3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210000; 4. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 空调设备的大范围应用使其电力负荷呈现指数级别暴增, 对配电网稳定运行造成了较大的压力, 也违背了国家低碳发展要求, 故提出面向低碳要求的园区楼宇空调负荷调控系统设计研究。应用传感器获取园区楼宇空调负荷数据, 通过 Matlab 软件处理空调负荷数据, 将其拟合为曲线形式, 并深入探究园区楼宇空调负荷特点, 以此为基础, 利用神经网络算法精准预测园区楼宇空调负荷, 结合国家低碳要求, 确定空调负荷调控目标为调控成本最小化与实际削减负荷量最大化, 构造空调负荷调控目标函数, 利用多目标粒子群算法求解目标函数, 依据求解的最小调控成本与最大实际削减负荷量调整与控制空调负荷, 实现了空调负荷的有效调控。实验数据显示, 在不同实验工况背景下, 应用设计系统获得的空调负荷调控成本最小值为 0.5 万元, 实际削减负荷量最大值为 940 kW, 表明设计系统应用性能更佳。

关键词: 园区楼宇; 负荷调控; 空调负荷; 需求响应; 低碳要求; 削峰优化

中图分类号: TP183; TP273; TM732 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)09-0164-05

Air Conditioning Load Control System for Park Buildings Facing Low-carbon Requirements

LIN Huijie^{1,2}, GAN Haiqing³, SUN Jize^{1,2}, YANG Ziyue³, YANG Nan⁴, LIU Guilin⁴

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China;
2. NARI Nanjing Control System Co., Ltd., Nanjing 211106, China;
3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China;
4. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing Power Supply Branch, Nanjing 210000, China)

Abstract: The widespread application of air conditioning equipment leads to an exponential increase in its power load, which places significant pressure on the stable operation of the distribution network and also violates the national low-carbon development requirements. Therefore, a research on the design of a park building air conditioning load control system for low-carbon requirements is proposed. Using sensors to obtain air conditioning load data for park buildings, using Matlab software to process the air conditioning load data, fitting it into a curve form, and deeply exploring the characteristics of air conditioning load in park buildings. Based on this, using neural network algorithms to accurately predict the air conditioning load of park buildings, and combining with national low-carbon requirements, the air conditioning load regulation goal is determined to minimize regulation costs and maximize actual load reduction, it constructs an objective function for air conditioning load regulation, uses multi-objective particle swarm optimization algorithm to solve the objective function, adjusts and controls the air conditioning load based on the minimum regulation cost and maximums actual load reduction, and achieves effective regulation of air conditioning load. The experimental data shows that under different experimental conditions, the minimum cost of air conditioning load regulation obtained by applying the design system is 5 000 yuan, and the maximum actual load reduction is 940 kW, indicating better application performance of the design system.

Keywords: park buildings; load regulation; air conditioning load; requirement response; low carbon requirements; peak shaving optimization

0 引言

园区楼宇是配电网用户中主要构成之一, 在用户侧负荷中占据着较大的比重, 约为 30%。对于园区楼宇来

说, 温控负荷占据着至关重要的位置, 尤其是空调设备, 其具备较为明显的使用规律性与鲜明的季节性特征^[1]。电网统计数据表明, 中国夏季空调负荷占据电网总负荷的 30%-40%, 温度较高的沿海城市比重甚至能达到 50%, 不但会对供电系统造成压力, 还会加大电力系统的供电缺口, 影响电力系统运行的稳定性^[2]。然而, 在传统的园

*基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目资助(5100-20211856 6A-0-5-SF)

收稿日期: 2024-01-05

园区楼宇空调系统中,存在着诸多问题和挑战。首先,传统空调系统以定时、常规的方式运行,无法根据实际需求进行灵活调整,导致能源大量浪费。其次,由于缺乏实时监测与反馈机制,楼宇管理者无法准确了解和掌握楼宇内部的温度、湿度等参数^[3],难以有效优化空调运行效果。此外,空调系统自身的设计和运行模式也存在着一定的局限性,无法满足不同楼宇、不同时间段的个性化需求。

由此可见,空调负荷已经成为电力系统的潜在安全隐患,必须对其进行深入的研究与有效的调控。近年来,面对逐渐恶化的生态环境,中国提出了一系列可持续发展战略,特别侧重于低碳方面,对各个行业制定了一定的低碳要求,尤其是空调行业。对此,文献[4]提出建立完善的空调负荷模型,基于改进温度优先序列的空调负荷集群内控制策略,并基于频率下垂控制,设计一种考虑功率响应偏差、电压约束及集群效应的空调负荷集群控制策略。文献[5]提出建立基于随机状态空间和条件转移的ACLs混杂系统模型,采用等容量反聚合退出策略,并提出基于辨识参数的马尔科夫链控制方法,以平抑ACLs反弹效应,实现电网中ACLs的稳定调控。

为了迎合国家可持续发展战略,满足国家制定的低碳要求,提出面向低碳要求的园区楼宇空调负荷调控系统设计研究。

1 园区楼宇空调负荷调控系统设计

1.1 园区楼宇空调负荷特点分析模块

一般情况下,园区楼宇均配置中央空调系统,装机容量大于或者等于200 kVA,应用传感器获取园区楼宇空调负荷数据,通过Matlab软件对空调负荷数据处理,将其拟合为曲线形式,方便后续园区楼宇空调负荷特点的分析^[6]。园区楼宇空调负荷曲线如图1所示。

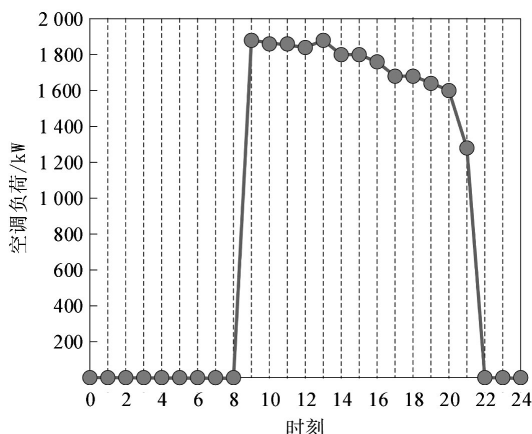


图1 园区楼宇空调负荷曲线示例图

在图1中,园区楼宇工作时间一般为8:00—22:00,则中央空调系统8:00开启制冷,9:00达到空调负荷的峰值

1 880 kW,9:00—12:00时段内空调负荷基本保持稳定,12:00—14:00时段内由于午后气温升高,中央空调系统加大制冷强度,使得空调负荷曲线出现了一定程度的小凸起,14:00—20:00时段内由于气温逐渐下降,中央空调系统制冷强度逐渐减小,空调负荷也呈现稳定下降的趋势,从20:00开始,园区楼宇开始逐步关停中央空调系统,空调负荷出现明显下降,到22:00空调负荷降为0 kW(需要注意的是,一般园区楼宇会在工作时间结束前1~2小时关停中央空调系统)^[7]。

上述过程完成了园区楼宇空调负荷曲线的绘制与特点分析,为后续园区楼宇空调负荷预测奠定坚实的基础。

1.2 园区楼宇空调负荷预测模块

为了达到空调负荷调控最优化,此研究应用神经网络算法对园区楼宇空调负荷进行精准预测,为后续空调负荷调控目标函数确定提供依据与支撑。基于神经网络算法的园区楼宇空调负荷预测流程如图2所示。

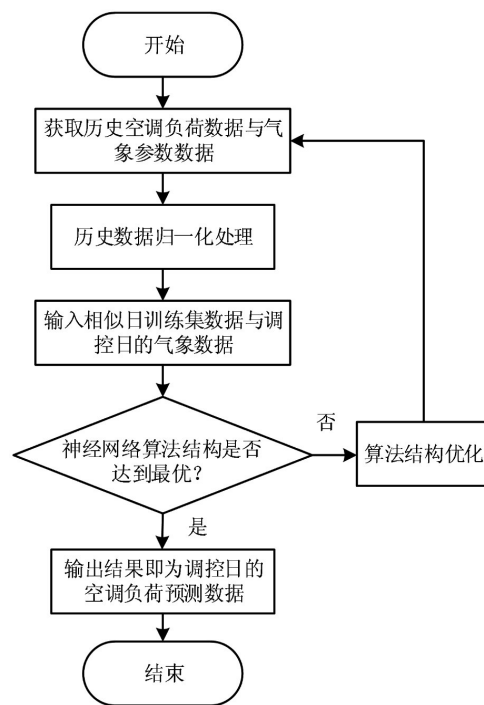


图2 园区楼宇空调负荷预测流程图

如图2所示,为了避免空调负荷与气象参数等历史数据量级差距造成的误差,在神经网络算法数据输入前,需要对历史数据进行归一化处理^[8],表达式为:

$$\begin{cases} \hat{x}_i = \frac{x_i - x_{i,\min}}{x_{i,\max} - x_{i,\min}} \\ \hat{y}_i = \frac{y_i - y_{i,\min}}{y_{i,\max} - y_{i,\min}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, x_i 与 \hat{x}_i 是归一化处理前、后的空调负荷历史数据; $x_{i,\min}$ 与 $x_{i,\max}$ 是空调负荷历史数据的最小值与最大值; y_i 与 \hat{y}_i 是归一化处理前、后的气象参数历史数据; $y_{i,\min}$ 与 $y_{i,\max}$

是气象参数历史数据的最小值与最大值。

在神经网络算法应用之前,需要对其结构进行寻优^[9]。常规情况下,输入层神经元数量根据输入数据种类确定,此研究输入数据为空调负荷历史数据与气象参数历史数据,故确定输入层神经元数量为2个;输出层神经元数量根据输出数据种类确定,此研究输出数据为空调负荷预测数据,故确定输出层神经元数量为1个。而隐含层神经元数量确定需要综合多种因素,确定难度较大^[10]。此研究采用试值法对隐含层神经元数量进行确定,其具体数据如表1所示。

表1 隐含层神经元数量确定数据表

隐含层神经元数量/个	算法迭代次数/次	算法误差/%
5	50	23
6	55	20
7	61	19
8	69	15
9	78	14
10	82	10
11	85	9
12	85	8
13	85	7
14	85	5
15	85	1
16	85	6
17	110	8
18	126	12
19	135	15
20	141	18

从表1数据可知,随着隐含层神经元数量的增加,神经网络算法迭代次数呈现先缓慢增加、后稳定,再明显增加的趋势,神经网络算法误差呈现先降低后增加的趋势^[11]。当神经网络算法误差达到最小值1%时,神经网络算法迭代次数为85次,此时算法迭代次数稳定,并输出数据精度较高,故确定隐含层神经元数量为16个^[12]。将式(1)计算结果作为神经网络算法的输入值,其输出结果就是空调负荷预测数据,表达式为

$$\tilde{x}_{i+1} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \times \hat{x}_i + \alpha^o \times \hat{y}_i}{7 \times [\beta_a]^3} + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中, \hat{x}_{i+1} 是空调负荷预测数据; ω_i 是神经网络算法神经元权重系数; α^o 是气象参数对应权重数值; β_a 是空调负荷预测辅助参量^[13-14]; ε_i 是调整项,决定着空调负荷预测结果的准确性。

上述过程完成了园区楼宇空调负荷的预测,为后续研究进展提供一定的支撑。

1.3 空调负荷调控目标函数确定模块

以上述园区楼宇空调负荷预测结果为依据,结合国

家低碳要求,确定空调负荷调控目标为调控成本最小化与实际削减负荷量最大化,并对约束条件进行确定与说明,为最终空调负荷调控的实现作好充足的准备。

其中,空调负荷调控成本最小化目标函数表达式为

$$\begin{cases} \min C_{\text{total}} = \sum D(\tilde{x}_{i+1} - x^\Delta, k) \cdot \varphi(\tilde{x}_{i+1} - x^\Delta, k) \\ 0 \leq D(\tilde{x}_{i+1} - x^\Delta, k) \leq C(\tilde{x}_{i+1} - x^\Delta, k) \\ \sum D(\tilde{x}_{i+1} - x^\Delta, k) \geq P(\tilde{x}_{i+1}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, C_{total} 是空调负荷调控总成本; $D(\tilde{x}_{i+1} - x^\Delta, k)$ 是空调负荷缺额; x^Δ 是空调负荷实际需求量; k 是园区楼宇空调数量; $\varphi(\tilde{x}_{i+1} - x^\Delta, k)$ 是供应负荷削减量单位报价; $C(\tilde{x}_{i+1} - x^\Delta, k)$ 是供应负荷削减量最大值; $P(\tilde{x}_{i+1})$ 是空调负荷总削减量^[15]。

空调负荷调控中实际削减负荷量最大化目标函数表达式为

$$\begin{cases} \max G_{\text{total}} = \sum S_f(\tilde{x}_{i+1}) \cdot P_{f,\max}(\tilde{x}_{i+1}) \\ D(\tilde{x}_{i+1} - x^\Delta, k) - G_{\text{total}} \leq E_{\max}(\tilde{x}_{i+1} - x^\Delta, k) \end{cases} \quad (4)$$

式中, G_{total} 是实际削减负荷总量; $S_f(\tilde{x}_{i+1})$ 是空调运行状态。当 $S_f(\tilde{x}_{i+1})$ 取值为0时,表明空调处于非控制状态;当 $S_f(\tilde{x}_{i+1})$ 取值为1时,表明空调处于控制状态; $P_{f,\max}(\tilde{x}_{i+1})$ 是中央空调系统可以参与调控的最大容量; $E_{\max}(\tilde{x}_{i+1} - x^\Delta, k)$ 是空调负荷调控计划中允许调控偏差最大值。

上述过程完成了空调负荷调控目标函数的确定与构造,并对其约束条件进行了说明,为后续空调负荷的调控提供便利^[12]。

1.4 空调负荷调控目标函数求解模块

根据上述确定的空调负荷调控目标函数,利用多目标粒子群算法对其进行求解,依据求解的最小调控成本与最大实际削减负荷量对空调负荷进行调整与控制,为空调稳定运行提供保障。基于多目标粒子群算法的空调负荷调控目标函数求解程序如图3所示。

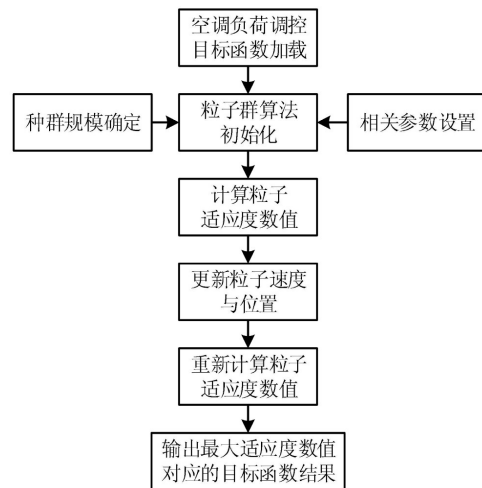


图3 空调负荷调控目标函数求解程序图

如图3所示,适应度函数对于空调负荷调控目标函数

求解至关重要,其表达式为

$$\begin{aligned} \zeta_i &= \eta_q \cdot G_{\text{total}} - \mu_q \cdot C_{\text{total}} \\ &= \eta_q \cdot \sum S_f(\tilde{x}_{i+1}) \cdot P_{f,\text{max}}(\tilde{x}_{i+1}) - \\ &\quad \mu_q \cdot \sum D(\tilde{x}_{i+1} - x^A, k) \cdot \varphi(\tilde{x}_{i+1} - x^A, k) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, ζ_i 是第 i 个粒子对应的适应度数值; η_q 与 μ_q 是适应度计算辅助参数,取值范围为 $[0, 1]$ 。

粒子速度与位置更新公式^[16]为

$$\begin{cases} V_i = V_{i-1} + A_1(P_{\text{best}} - W_{i-1}) + A_2(G_{\text{best}} - W_{i-1}) \\ W_i = W_{i-1} + B_0 V_i \end{cases} \quad (6)$$

式中, V_{i-1} 与 V_i 是更新前、后的粒子速度; A_1 与 A_2 是粒子群算法参数; P_{best} 与 G_{best} 是个体最优与全局最优适应度数值; W_{i-1} 与 W_i 是更新前、后的粒子位置; B_0 是粒子更新辅助因子,取值范围为 $(1, 10)$ 。

依据式(6)对粒子速度与位置进行不断地更新,并按照式(5)计算新粒子的适应度数值。当适应度达到最大值 $\max[\zeta_i]$ 时,其对应的目标函数数值为最小调控成本与最大实际削减负荷量,以此为依据,对园区楼宇空调负荷进行调整与控制,即实现了空调负荷的有效调控,最大限度地降低了园区楼宇空调负荷消耗,符合国家低碳要求^[13]。

2 设计系统应用性能测试

2.1 实验对象选取

选取某一园区楼宇中央空调系统作为实验对象,其实际情况如图4所示。从图4可知,园区楼宇中央空调系统外机主要设置在楼顶,而空调输送结构主要在楼宇内部,不方便对其进行展示。



图4 实验对象示意图

为了方便后续实验的顺利进行,对园区楼宇内部温度影响参数进行确定,具体如表2所示。

上述过程完成了实验对象的选取,并对其园区楼宇内部温度影响参数进行了获取,为后续实验的顺利进行提供一定的便利。

2.2 实验参数确定

设计系统在空调负荷调控目标函数求解过程中应用了多目标粒子群算法,其涉及多个参数,尤其是适应度计

算辅助参数 η_q 与 μ_q , 其取值是否合理直接关系着适应度计算精准度。因此,在实验进行之前需要对参数 η_q 与 μ_q 最佳取值进行确定。通过测试获得参数 η_q 、 μ_q 与适应度计算精准度的关系如图5所示。从图5可知,当参数 η_q 取值为0.4时,适应度计算精准度达到最大值90%。当参数 μ_q 取值为0.2时,适应度计算精准度达到最大值80%。因此,确定适应度计算辅助参数 η_q 与 μ_q 最佳取值分别为0.4与0.2。

表2 园区楼宇内部温度影响参数表

参数代码	参数名称	参数数值
R1	外墙传热系数	0.92
R2	屋面传热系数	0.38
R3	外窗传热系数	3.50
R4	窗户日射热量	524 J
R5	早高峰空调冷负荷系数	0.4
R6	晚高峰空调冷负荷系数	0.5
R7	外窗遮阳系数	0.40
R8	外窗修正系数	0.62
R9	内墙面蓄热系数	1
R10	早高峰人体冷负荷系数	0.72
R11	晚高峰人体冷负荷系数	0.93
R12	空调负荷最大值	2 000 kW

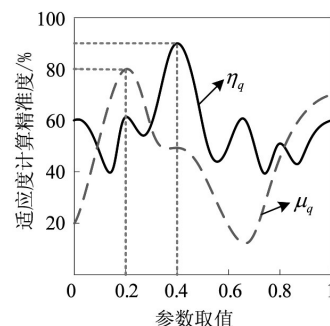


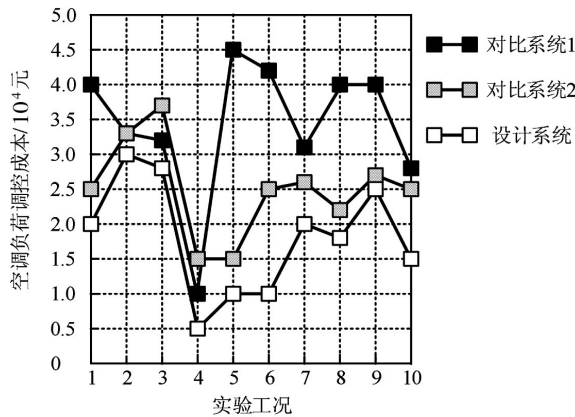
图5 参数、与适应度计算精准度关系示意图

2.3 实验结果分析

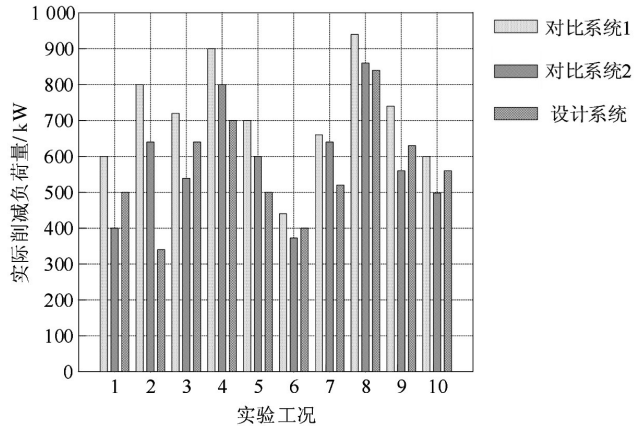
以上述选取的实验对象,确定的实验参数最佳取值为依据,选取文献[4]方法与文献[5]方法作为对比系统1与对比系统2,联合设计系统共同进行空调负荷调控对比实验,通过空调负荷调控成本与实际削减负荷量来显示设计系统的应用性能,具体实验结果如图6所示。从图6可知,在不同实验工况背景下,应用设计系统获得的空调负荷调控成本均低于对比系统1与对比系统2,实际削减负荷量均高于对比系统1与对比系统2。其中,在第4种实验工况背景下,设计系统获得空调负荷调控成本最小值0.5万元,在第8种实验工况背景下,设计系统获得实际削减负荷量最大值940 kW,表明设计系统空调负荷调控效果更佳。

3 结束语

本文提出面向低碳要求的园区楼宇空调负荷调控系



(a) 空调负荷调控成本



(b) 实际削减负荷量

图6 实验结果示意图

统设计研究。实验数据显示,设计系统应用后可以有效降低空调负荷调控成本,提升实际削减负荷量,为空调负荷调控提供更有力的系统支撑。但是不同园区的楼宇结构、热负荷特点、气候条件等有很大差异,使得通用的空调负荷调控系统无法满足所有园区的需求。因此,需要考虑不同园区的特定需求进行定制化。

参考文献:

- [1] 王瑞妙,姚欣愚,赵小娟,等.考虑温度和负荷相关性的重庆冬季空调负荷计算[J].电力科学与技术学报,2021,36(6):157-163.
- [2] 李少波,李严,林菁,等.基于实测数据的地铁车站公共区空调负荷设计指标优化[J].暖通空调,2023,53(3):61-66.
- [3] 苏宁,李笑彤,梁惠施,等.基于空调负荷数据挖掘的配电网扩展规划方法[J].电力建设,2021,42(11):100-107.
- [4] 刘志伟,苗世洪,杨炜晨,等.计及电气特性的空调负荷建模及集群控制策略[J].电力自动化设备,2022,42(1):178-184,192.
- [5] 刘凤鸣,杨秀媛,陈麒宇.一种平抑反弹效应的集群空调负荷控制方法[J].电网技术,2021,45(12):4759-4767.
- [6] 苏醒,王磊,田少宸,等.基于动态客流量模型的地铁车站空调负荷预测[J].同济大学学报:自然科学版,2022,50(1):114-120.
- [7] 马麟,梁安琪,王立永,等.公共楼宇可调负荷资源调控技术研究综述[J].电测与仪表,2023,60(5):1-10,22.
- [8] 周奇,马瑞,王铁强,等.基于多智能体的主动配电网空调负荷聚合及其降压调温削减方法[J].中国电机工程学报,2022,42(18):6668-6681.
- [9] 吴霞,田喆,田成志,等.供暖空调负荷用逐时室外计算参数的生成方法研究[J].建筑科学,2022,38(6):16-23.
- [10] 丁麒,王庆娟,卢侃,等.应用5G消息和共享风险链路组的电力需求响应系统设计[J].电子设计工程,2023,31(4):118-122.
- [11] 包宇庆,姚兹丽.空调负荷参与电力系统调频的温度设定值概率控制策略[J].电力系统自动化,2023,47(2):69-78.
- [12] 范德金,张姝,王杨,等.考虑用户调节行为多样性的空

调负荷聚合商日前调度策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(17):133-142.

[13] 曾爽,丁屹峰,李香龙,等.基于条件时序生成对抗网络的楼宇空调负荷场景生成方法[J].电网技术,2022,46(7):2448-2455.

[14] 宋良雨.基于启发式搜索法与动态负荷跟踪的中央空调能耗全局控制方法[J].自动化技术与应用,2024,43(10):18-21.

[15] 杨梓俊,丁小叶,陆晓,等.面向需求响应的变频空调负荷建模与运行控制[J].电力系统保护与控制,2021,49(15):132-140.

[16] 白雪莲,张新,金超强,等.住宅空调能耗的运行度时数评估方法[J].制冷学报,2021,42(4):35-42.

作者简介:林慧婕(1997—),女,硕士,工程师,研究方向:虚拟电厂、需求侧管理技术及综合能源系统优化控制技术。