

公共建筑地源热泵供热装置超低能耗控制技术

Ultra Low Energy Consumption Control Technology for Gground Source Heat Pump Heating Devices in Public Buildings

孙毅斌, 马 壮, 王安顺, 王玉旺

(中建八局第三建设有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 当前公共建筑地源热泵供热装置低能耗控制多采用熵权分簇算法, 但该方法无法有效线性重构热能数据, 使得能耗累积频率较高, 为此, 提出多参数拟合下的公共建筑地源热泵供热装置超低能耗控制技术。根据地源热泵供热运行原理与基本结构, 对地源热泵供热装置的热能数据分布区域进行分析, 并采用传感网络组网技术采集热能数据, 引入样本相关检测方法对热能数据进行线性重构, 结合线性回归算法对多参数拟合的能效比与影响因子进行联合分析, 由此构建地源热泵供热装置的超低能耗控制方程, 基于此, 通过设计超低能耗控制决策函数计算能耗安全容量, 将装置的超低能耗控制在允许范围内, 以此实现对地源热泵供热装置的超低能耗控制。结果表明: 设计的方法能够有效降低总能耗, 得到的能耗累积频率更低。

关键词: 多参数拟合; 公共建筑; 地源热泵供热装置; 超低能耗控制

中图分类号: TU832 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 06-0143-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.026

SUN Yibin, MA Zhuang, WANG Anshun, WANG Yuwang

(The Third Construction Co., Ltd of China Construcion Eighth Engineering
Division, Nanjing 210000, China)

Abstract: The current low energy consumption control of ground source heat pump heating devices in public buildings mostly adopts entropy weight clustering algorithm, but this method cannot effectively linearly reconstruct thermal energy data, resulting in a high frequency of energy consumption accumulation. Therefore, a multi parameter fitting based ultra-low energy consumption control technology for ground source heat pump heating devices in public buildings is proposed. Based on the operating principle and basic structure of ground source heat pump heating, the thermal energy data distribution area of the ground source heat pump heating device is analyzed. Sensor network networking technology is used to mine and collect thermal energy data, and relevant detection methods are introduced to linearly reconstruct the thermal energy data. Combined with linear regression algorithm, the energy efficiency ratio and influencing factors of multi parameter fitting are jointly analyzed to construct the ultra-low energy consumption control equation of the ground source heat pump heating device. Based on this, the ultra-low energy consumption control decision function is designed to calculate the energy consumption safety capacity, and the ultra-low energy consumption of the device is controlled within the allowable range, thereby achieving ultra-low energy consumption control of the ground source heat pump heating device. The results show that the designed method can effectively reduce the total energy consumption and obtain a lower cumulative frequency of energy consumption.

Keywords: multi parameter fitting; public buildings; geothermal heat pump heating device; ultra low energy consumption control

建筑节能

0 引言

地源热泵供暖系统是一种更加清洁的能源供应系统,可以满足公共建筑的供暖需求。由于这是一种利用地面可再生资源的供暖技术,当极端温度较低时,内部地理热管可以在瞬间传递大量热量,从而导致能耗较高。

工程界对地源热泵供暖系统展开了多方面的研究。陈宁^[1]采用工业物联网技术将具有感知和监测能力的可知传感器布设在系统运行的各个环节,以此获取运行参数,并通过数据融合技术与大数据分析技术对热能数据进行处理与分析,由此建立能耗控制模型;赵宇冰等^[2]采用决策树算法以系统历史运行数据与参数为基础,对其初始能量消耗进行决策分析,再利用控制策略控制能耗;雷琪^[3]分析了典型铁路客站照明能耗特征,采用数据仿真及实测验证结合方法,对不同控制策略下照明节能情况进行了综合比较;王霞等^[4]通过实时监测冷库内部环境参数,并根据程序优化自动调整制冷、加湿或除湿等设备的运行状态,能够避免能源浪费,显著降低能耗;肖松泉^[5]设置能量消耗控制区,并抽取相应的节点数据,建立无人机能量回传节点集合,分析低能耗控制区域的能量回传节点,完成物联网无线通信低能耗控制;Mohammed等^[6]通过 TRNSYS 等软件的模拟,可以针对 Tlemcen 市的具体气候条件进行优化设计,使地源热泵供热装置更加适应当地的生物气候特点;马青有^[7]通过设想在城市郊区建设大型空调专用储电系统,提出了基于热舒适度和气温大数据的空调智能控制的方法;胡亚南等^[8]对纸机干燥部蒸汽冷凝水热力系统和通风气罩热力系统的热能资源整合并进行工艺优化,实现造纸过程的协同能耗优化控制;李青云等^[9]通过确定待激活的最佳临近网络节点等方法,在保证覆盖质量的前提下,最大程度降低了能耗;唐伟等^[10]基于 TRIZ 理论的流分析方法识别加热卷烟烟具传热过程的有效流和有害流,对烟具容纳管结构优化、气道管结构简化、加热元件温度场调整等烟具进行降能耗优化;杨光等^[11]为保障微机械传感系统的运行稳定性,研究了一种新的微机械传感节点能耗控制方法;彭见辉等^[12]针对机械臂执行重复工作时不断加减速所造

成的能耗过高问题,借助符号编程法对拉格朗日-欧拉方程进行推导,以最优化控制必要条件构建系统限制方程及能耗指标函数,建立了机械臂的最优能耗控制模型。目前常见的能耗控制方法中具有代表性的分别是:多指标自趋优的 GPU 集群能耗控制模型^[13]、基于统一多能耗模型的公路能源群落最优能耗领导-跟随控制^[14]、基于 DDPG 模型的建筑能耗控制方法^[15]等。

为了切实解决上述低能耗控制方法中存在的一系列问题,提出公共建筑地源热泵供热装置超低能耗控制技术,通过线性回归算法分析供热装置的多参数拟合能效比与影响因子的关系,量化各参数对能效比的影响,采用超低能耗控制决策函数,计算能耗安全容量,确保装置的能耗控制在允许范围内,实现对地源热泵供热装置的超低能耗控制,为类似的超低能耗控制方法设计提供参考依据。

1 公共建筑地源热泵供热装置超低能耗控制设计

1.1 地源热泵供热装置热能数据分布区域分析

地源热泵供热装置在冬季制热时为公共建筑补充热量,该装置仅消耗电能,具有清洁功能的系统,如图 1 所示。

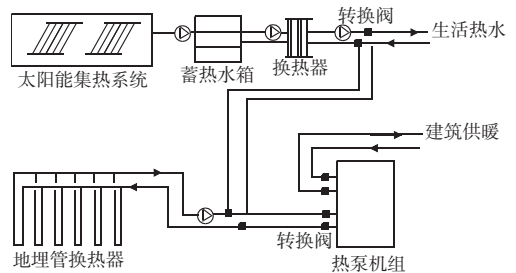


图 1 公共建筑地源热泵供热装置

Fig. 1 Ground source heat pump heating device for public buildings

地源热泵供暖装置中太阳能集热器能源效率受天气和时间的影 响,不同季节和一天中不同时间制备的热水温度不同。因此,不同季节可以赋予不同的使用功能。

以公共建筑地源热泵采暖设备为研究对象,通过物联网、传感网络等技术,收集公共建筑地源热泵采暖设备的能源消耗数据,通过内部相关性探测等手段,将其线性组合,用最小二乘拟合等方法^[16],对数据进行回归与重建,从而达到对公用建筑地源热泵采暖设备的低热能数据的智能管理。

地源热泵供热系统由两部分组成，分别是地管热交换器与热泵机间的回路和热泵机与负载间的回路。利用高、低压两种热源之间的转换实现室内热交换^[17]。假设两个环路同时工作时，将能耗采集的量化分析模型表示为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ ，其中， s_k 为第 k 个传感器模块采集到的热能数据。构建地源热泵供热装置运行能耗统计分析方程为：

$$M(k, N_0) = S + \frac{i_0 f_k t_0 f_{(k, N_0)}}{l_1} \quad (1)$$

式中： N_0 为节点数量； t_0 为节点负载； $f_{(k, N_0)}$ 为地源热泵结构非线性函数； l_1 为地源热泵供热装置运行时间； i_0 为一级负荷； f_k 为节点密度。

由于热泵机组传感层节点的能耗远低于太阳能收集系统，因此，可忽略回路更新控制包，计算系统传热过程中回路节点最大能耗：

$$Q_i = Q_p + Q_t F_i \quad (2)$$

式中： Q_p 为回路节点发送能耗； Q_t 为回路节点接收能耗； F_i 为回路节点能耗转换系数。

采用样本相关性检测方法对热能数据进行线性重构，得到能耗特征评价集为：

$$I_0 = Q_i(H_0 + H_1) \quad (3)$$

式中： H_0 为辅热设备节点加权值； H_1 为计算节点与邻近节点的聚类系数。

若两个节点的传输距离较近，则可以使用两个环路进行热量传输。设置最短传输环路的长度为 x_0 ，由此获取一条环路节点的最小能耗为：

$$P_1 = x_0 I_0 + \alpha_1 / \alpha_2 \quad (4)$$

式中： α_1 、 α_2 分别为容量输送面积与速率。

以能耗特征评价集和最小能耗为描述性统计样本，在 m 个终端上收集公共建筑地源热泵供热装置的热能数据^[18]，则输入点和输出点的热能数据流为：

$$x(k) = P_1 \sum R^n Z^n \quad (5)$$

式中： R^n 为平均热负荷； Z^n 为最大热通量。

将输入节点与输出节点的热能数据进行最小二乘拟合，得到公共建筑地源热泵供热装置热能数据分布区域为：

$$X_0 = \min[x(k)x_j w_j] \quad (6)$$

式中： x_j 为单台热泵最大供热功率； w_j 为系统回差温度。

1.2 考虑多参数拟合的能效比与影响因子联合分析

作出以下假设：忽略内部电机的畸变谐波和不规则变化的磁动势；忽略铁芯损耗和限位器的涡流损耗；考虑系统频率突然变化对电感的影响。引入多参数拟合过程，分析能效比，结合多维度影响因子，获得地源热泵供热装置能量损失参数变化范围。

计算执行阶段建筑物的历史能耗与标准状态下初始控制后的能耗之差，为：

$$r_1 = X_0(E_1 - E_0) \quad (7)$$

式中： X_0 为地源热泵供热热能数据； E_0 、 E_1 分别为控制后的供热能耗与控制前的历史供热能耗。

整合电压方程、磁链方程、转矩方程和运动方程^[19-21]，为：

$$U_0 = r_1 \begin{bmatrix} I_A & 0 & \Psi_A & 0 \\ 0 & 0 & I_C & \Psi_C \\ 0 & 0 & I_A & 0 \\ I_B & 0 & \Psi_B & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： I_A 、 I_B 、 I_C 为能耗定子相电流瞬时值； Ψ_A 、 Ψ_B 、 Ψ_C 为能耗转子相磁动势。

为了更好地拟合公共建筑地源热泵供热装置运行参数，选取热通量、布置间距、换热量以及供热效率等 4 个运行参数作为基础数据，分析各参数变化范围，见表 1。

表 1 运行参数变化范围

Table 1 Range of variation of running parameters			
装置运行参数	变化范围下限	变化范围上限	间隔时间/s
热通量 $Z^n / (A \cdot W)$	0.5	1.0	0.1
布置间距/m	5.0×10^5	5.5×10^6	10.0
换热量 W_i / J	4.5×10^5	5.0×10^5	5.0
供热效率/%	70	96	3.5

采用线性回归方法，得到地源热泵供热装置没有外部激励信号的情况下，由于非线性因素而自行产生的恒稳和持续的振动函数^[22]，描述如下：

$$G_s = K_1 \lambda_d + T_e \quad (9)$$

式中： K_1 为供热能效比波动因子； λ_d 为非线性持续供热系数； T_e 为地源热泵供热装置能量损耗。

为了减少参数拟合的复杂性，简化运行过程，计算出参数基准系数所在的扇区号，即：

$$V_s = \frac{\sqrt{2} G_s}{U_\beta} \quad (10)$$

建筑节能

式中: V_s 为运行参数基准系数扇区号; U_β 为参考电压值。

计算可控总损耗:

$$T_a = V_s / (N_1 - 1) \quad (11)$$

式中: N_1 为热能数据对象的个数。

则对能量损失影响因子进行拟合, 得到的结果为:

$$\Omega = W_a (d_{ij})^{-1} T_a \chi_i \quad (12)$$

式中: Ω 为能耗利用率; W_a 为能量损失影响因子关联性系数; d_{ij} 为能量损失影响因子关联匹配集合; χ_i 为装置第 i 个运行参数。

则地源热泵供热装置能量损失参数变化范围为:

$$Z(G) = T(s_i) f(t) / \Omega \quad (13)$$

式中: $T(s_i)$ 为能量损失参量; $f(t)$ 为负载密度换阶函数。

1.3 超低能耗控制方法

基于优化准则, 分析拟合参数与维度之间的映射关系, 获得与节点数量相对应的模糊层次能耗信息, 并结合模糊控制决策函数, 实现超低能耗控制。具体计算过程如下。

设 k_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为超低能耗的拟合节能控制参数, m' 为拟合维度, 则分级能耗信息可表示为:

$$k_i = Z(G) \sum_{i=1}^n \Omega \quad (14)$$

式中: $Z(G)$ 为低能耗分级维度。

则得到的超低能耗控制的反馈函数为:

$$\delta_r = k_i I'(\mu_g - \mu_i) \quad (15)$$

式中: $I'(\cdot)$ 为粗糙度函数; μ_g 为反馈函数的折扣率; μ_i 为反馈函数的期望回报因子。

计算各个参数对应的模糊适应度值^[23]:

$$W_i = \delta_r w_s / \mathbf{u}_s \quad (16)$$

式中: w_s 为低能耗控制的自适应学习权重; \mathbf{u}_s 为隶属度矩阵。

构建可变模糊低能耗控制的变换函数, 为:

$$\sigma_k = (1 + R_z)^2 / \alpha_q \quad (17)$$

式中: α_q 为可变距离参数; R_z 为负荷通量。

根据处理结果, 计算低能耗控制条件下的能耗输出值^[24], 即:

$$D_a = \sqrt{\sigma_k + M} + x \quad a = 1, 2, \dots, m'' \quad (18)$$

式中: M 为输出层节点个数; x 为常数项。

则设计地源热泵供热装置的超低能耗控制方程为:

$$\zeta = \text{SQRT} \left(\frac{\sum_{a=1}^{m''} (Y_{m''} - D_{m''})^2}{\Omega e_p} \right) \quad (19)$$

式中: $Y_{m''}$ 为第 m'' 个用于低能耗控制的模拟值; e_p 为控制误差; ζ 为能耗安全容量。

将能量损失影响因子代入到控制方程中, 即可在安全容量范围内, 保证地源热泵供热装置超低能耗运行。

2 试验论证

为了验证提出的在多参数拟合下公共建筑地源热泵供热装置超低能耗控制方法的整体有效性, 需要对该方法进行仿真试验分析与性能对比测试, 具体设计与实施过程如下。

2.1 试验准备

选取某市商业建筑地源热泵供热系统为试验对象, 该装置型号为 61XW-A1110A, 机组的额定功率为 100 kW, 额定制热功率为 65 kW, 其相关参数见表 2。

表 2 地源热泵供热装置相关参数
Table 2 Related parameters of ground source heat pump heating device

项目	参数	项目	参数
启动方式	$Y - \Delta$	水阻力/kPa	42
能量调节级别/%	75	接管直径/cm	15
输入功率/kW	41.6	制热量/kcal	336.7
最大运行电流/A	124	制冷量/kcal	334.1
充注量/kg	34	水侧压降/kPa	30
水量/(m^3/h)	26.3	机组质量/kg	1 632

在试验建筑地源热泵供热系统中采用传感网络组网技术对热能数据进行挖掘与提取。设计网络架构为三层分布体系, 其中最底层采用源节点网络阵列, 布设节点数为 150, 主要对热能、实际数据功率、能耗频率等数据信息进行采集; 中间层为数据融合层, 对挖掘出的热能数据进行初步处理与分析; 最顶层为信息展示层, 将热能数据以负荷分布的形式展现出来。数据挖掘与采集范围最大值设置为 200, 控制节点的折扣率为 0.8%, 热能数据采样时间为 4 800 s。基于上述仿真环境和参数设置, 进行公共建筑地源热泵供热装置超低能耗控制, 热能数据分布如图 2 所示。

将地源热泵供热装置安装于公共建筑地下, 该建筑的外墙传热系数为 $0.45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$, 供暖设

计温度为 20 ℃。以图 2 所示的建筑热泵机组热能数据为测试数据，采用文中设计的方法对该建筑地源热泵供热装置进行超低能耗控制。

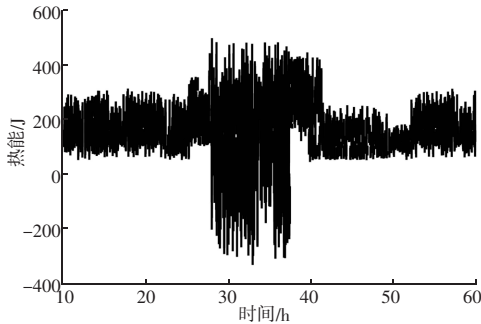


图 2 热能数据分布结果

Fig. 2 Distribution results of thermal energy data

2.2 试验说明

试验的监测数据包括室外空气温度 (℃)、室外空气相对湿度 (RH)、时间 t 的太阳辐照度 (W/m^2) 等环境变量，以及建筑自动化系统每 3 min 采样一次的空气处理装置排放温度设定值 (℃) 和建筑消耗的总能量 (J)。系统节点设置为 100 个，初始功率为 0.40 J，接收功率为 0.35 J，控制协议为 SENSOR，初始能量为 15 J，参数传输能耗为 40 bit，多参数拟合能耗为 20 bit，试验时间为 1 000 s。

将建筑地源热泵供热装置运行过程中所有能耗相加，得出能耗总和，与本文方法作对比，在 Simulink 平台完成对比试验。

2.3 超低能耗控制试验结果分析

分别采用文献 [1] 基于工业物联网 (方法 1)、文献 [2] 基于决策树算法 (方法 2) 与本文方法对试验建筑地源热泵供热装置的能耗进行控制，并统计控制后的系统总能耗，以定量评价不同方法的低能耗控制效果，对比结果如图 3 所示。

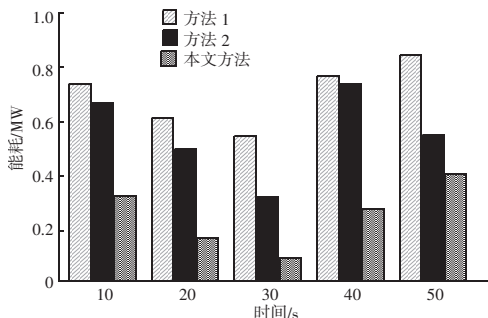


图 3 不同方法的低能耗控制结果对比

Fig. 3 Comparison of low-energy control results using different methods

由图 3 可知，本文方法控制后的能耗最低，表明本文方法对于建筑地源热泵供热装置的超低能耗控制效果更好，能够显著降低能耗总和。方法 1 的能耗总和要明显高于方法 2 与本文方法，主要是由于该方法未考虑到系统生命周期运行轮数少的问题；方法 2 的控制效果相比于方法 1 稍有改善，但整体控制性能仍不理想，主要成因是该方法缺少对系统各参数传输过程中的能耗均衡控制，导致方法 2 的最终能耗总和较高。本文方法对地源热泵能量损失影响因子进行分析，并采用线性回归算法对其进行多参数拟合，结合能量损失影响因子的关联匹配系数，控制效果最好，能够有效降低能耗。

2.4 能耗累积频率对比试验分析

为进一步体现本文方法在建筑地源热泵供热装置低能耗控制中的优越性能，对不同能耗控制方法下的能耗累积排量比进行统计，能耗累积频率越低，表明方法的控制效果越好，对比结果见表 3。

表 3 不同方法的能耗累积频率结果对比

Table 3 Comparison of energy consumption cumulative frequency results of different methods

能耗密度 EUI	能耗累积频率/%			
	原始累积频率	方法 1	方法 2	本文方法
50	80.6	68.5	58.7	20.1
100	85.4	69.1	55.6	18.5
150	78.6	52.7	59.0	19.6
200	74.2	56.9	56.4	22.6
250	65.9	60.7	50.1	18.7

采用本文所提方法对建筑地源热泵供热装置进行低能耗控制后，得到的能耗累积频率下降幅度较大，采用方法 1 与方法 2 对系统进行低能耗控制后，能耗累积频率虽然有所下降但下降幅度较小，说明这两种方法对建筑地源热泵供热装置低能耗控制效果较差，而本文方法的低能耗控制性能最佳。

3 结束语

文中提出了一种多参数拟合下的公共建筑地源热泵供热装置超低能耗控制技术，该方法通过提取热能数据，结合低能耗控制决策函数，实现对超低能耗控制，使其能耗最低，且能耗累积频率虽然有所下降但下降幅度较小。在下一步的研究中，将考虑更加复杂地源热泵供热装置控制优化方法，以提高自适应控制能力。

建筑节能

参 考 文 献

- [1] 陈宁. 基于工业物联网的煤矿巡检多机器人低能耗控制 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2023 (2): 51-56.
- [2] 赵宇冰, 刘育平, 卜小伟, 等. 基于决策树算法的园区照明系统能耗优化控制方法 [J]. 计算技术与自动化, 2023, 42 (1): 72-77.
- [3] 雷琪. 铁路客站照明能耗特征及典型节能控制策略分析 [J]. 光源与照明, 2023 (3): 30-32.
- [4] 王霞, 潘敏, 周鹏成, 等. 基于数据监测与程序优化实现冷库能耗控制 [J]. 中国港口, 2023 (增刊1): 106-109.
- [5] 肖松泉. 基于无人机协作的物联网无线通信能耗控制方法研究 [J]. 软件, 2022, 43 (6): 171-174.
- [6] MOHAMMED E A B H, RACHID L, HABIB R, et al. Thermal simulation of the ground source heat pump used for energy needs of a bioclimatic house in Tlemcen City (western ALGERIA) [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2023, 45 (2): 5425-5439.
- [7] 马青有. 基于储能和智能控制的空调系统能耗优化研究 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13 (5): 1592-1594.
- [8] 胡亚南, 宁奎伟, 李鑫. 高速卫生纸机干燥部协同能耗优化控制设计与应用 [J]. 制造业自动化, 2023, 45 (9): 49-55.
- [9] 李青云, 高宇鹏, 杨倩倩. 基于分片重传链路感知的无线传感器网络能耗控制方法 [J]. 传感技术学报, 2023, 36 (7): 1136-1142.
- [10] 唐伟, 陈昆, 陈佳琦, 等. 基于热流分析法的加热卷烟具能耗控制研究 [J]. 轻工学报, 2023, 38 (3): 119-126.
- [11] 杨光, 顾红. 基于加权分簇的微机械传感节点能耗控制研究 [J]. 传感技术学报, 2022, 35 (12): 1717-1721.
- [12] 彭见辉, 陈军杰, 李佳玉. 基于 DCNLP 的分拣机械臂最优能耗控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022 (10): 92-96.
- [13] 王海峰, 陈庆奎. 多指标自趋优的 GPU 集群能耗控制模型 [J]. 计算机研究与发展, 2015, 52 (1): 105-115.
- [14] 郭敏, 夏明超, 陈奇芳. 基于统一多能耗模型的公路能源群落最优能耗领导-跟随控制 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (24): 9384-9397.
- [15] 周鑫, 陈建平, 傅启明. 基于 DDPG 模型的建筑能耗控制方法 [J]. 计算机应用与软件, 2023, 40 (2): 40-47.
- [16] 匡银虎, 张虹波. 基于物联网的多无人机协作能耗控制算法仿真 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (2): 454-458.
- [17] 周鑫, 陈建平, 傅启明. 基于 DDPG 模型的建筑能耗控制方法 [J]. 计算机应用与软件, 2023, 40 (2): 40-47.
- [18] 杨光, 顾红. 基于加权分簇的微机械传感节点能耗控制研究 [J]. 传感技术学报, 2022, 35 (12): 1717-1721.
- [19] 成慧翔, 聂慧慧, 马艳娥. 可操纵性的冗余机械臂运动能耗控制研究 [J]. 机械设计与制造, 2023 (4): 300-304.
- [20] 彭见辉, 陈军杰, 李佳玉. 基于 DCNLP 的分拣机械臂最优能耗控制 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022 (10): 92-96.
- [21] 林彰银, 明显诚. 基于价值链的建筑建造能耗增量控制模型仿真 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (9): 293-297, 308.
- [22] 曾伟. 变流量空调水系统水泵变频控制及能耗分析 [J]. 建筑热能通风空调, 2022, 41 (6): 45-48.
- [23] 王广利. “NEW GRAND PEACE” 轮燃油管理及能耗控制 [J]. 船舶物资与市场, 2022, 30 (4): 26-28.
- [24] 刘国丹, 纪铤行, 滕润, 等. 基于熵权法的光热耦合综合能耗的百叶外遮阳控制策略 [J]. 太阳能学报, 2022, 43 (3): 236-241.

(上接第 123 页)

- 网混凝土单侧加固砌体墙的拟静力试验研究 [J]. 混凝土, 2022 (4): 56-60.
- [5] 张伟, 贺晶晶, 胡炜, 等. 高延性混凝土加固砌体墙抗震性能试验及承载力研究 [J]. 工程力学, 2024, 41: 1-13.
- [6] 敬登虎, 乔墩, 邢凯丽. 预应力钢板带加固砌体墙抗震性能试验研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2021, 48 (7): 19-27.
- [7] 邓明科, 马向琨, 张伟, 等. 高延性混凝土加固蒸压加气混凝土砌体墙抗震性能试验研究 [J]. 工程力学, 2021, 38 (7): 9-18.
- [8] 陈氏凤, 王激扬, 沈军, 等. 纤维编织网混凝土单侧加固砌体墙的拟静力试验研究 [J]. 混凝土, 2022 (4): 56-60.
- [9] 周铁钢, 张再昱. 新型机制生土砖砌体墙抗震性能试验及恢复力模型研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (2): 135-139, 126.
- [10] 寇佳亮, 张香草, 徐炎, 等. HDC 加固震损框桁式复合墙体抗震性能试验及恢复力模型研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42 (3): 122-133.
- [11] 赵浩, 刘伟, 杨涛, 等. 性能增强古建筑砌体墙抗震性能试验及有限元分析 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (2): 140-149.
- [12] 程东辉, 姚宇航, 王丽. CFRP 布对不同截面混凝土柱加固性能分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40 (3): 40-49.
- [13] 饶城, 刘叔灼, 陈俊生. 基于 ABAQUS 的新型格型地下连续墙稳定性评估 [J]. 科技通报, 2024, 40 (9): 50-55.
- [14] 宋泰宇. 基于 Abaqus 的预应力混凝土 T 梁全过程剪力滞效应 [J]. 公路交通科技, 2023, 40 (6): 103-112.