DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)02-0039-05.

基于运行模式划分的暖通空调能耗优化控制系统

时 晶[1]，徐至宏[2]，冯 军[1]，王成博[1]，张丙垒[1]

(1.国网浙江省电力有限公司绍兴供电公司，浙江 绍兴 312000；
2.浙江华云清洁能源有限公司，浙江 杭州 310000)

摘 要：为了降低空调能耗，设计基于运行模式划分的暖通空调能耗优化控制系统。数据采集模块利用传感器，采集暖通空调模块内空调机组运行数据；通过无线通信模块传输采集的数据至运行模式划分模块；运行模式划分模块中改进K-means聚类算法依据采集的数据，划分暖通空调运行模式；通过暖通空调监控计算机转换各运行模式对应的数据，获取二进制数据；PLC控制器根据各运行模型对应的二进制数据，建立以最低能耗为目标的暖通空调能耗优化控制模型，通过粒子群算法求解该模型，得到最低能耗对应的能耗优化控制方案，并按照控制方案，控制空调机组终端执行设备。实验证明系统可有效采集暖通空调运行数据，完成运行模式划分，可优化控制暖通空调能耗，降低各运行模式下的能耗。

关键词：运行模式划分；暖通空调能耗；优化控制；传感器；K-means聚类
中图分类号：TP273 文献标识码：A 文章编号：1003-7241(2025)02-0039-05

HVAC Energy Consumption Optimization Control System Based on Operation Mode Division

SHI Jing[1], XU Zhi-hong[2], FENG Jun[1], WANG Cheng-bo[1], ZHANG Bing-lei[1]

(1. Shaoxing Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Shaoxing 312000 China;
2. Zhejiang Huayun Clean Energy Co., Ltd., Hangzhou 310000 China)

Abstract: This paper designs the HVAC energy consumption optimization control system based on operation mode division to reduce the energy consumption of air conditioning. The data acquisition module uses sensors to collect the operation data of air conditioning units in the HVAC module, transmits the collected data to the operation mode division module through the wireless communication module. In the operation mode division module, the improved K-means clustering algorithm divides the HVAC operation mode according to the collected data, converts the data corresponding to each operation mode through the HVAC monitoring computer to obtain binary data. According to the binary data corresponding to each operation model, the PLC controller establishes the optimal control model of HVAC energy consumption with the goal of minimum energy consumption, solves the model through particle swarm optimization, obtains the optimal control scheme of energy consumption corresponding to the minimum energy consumption, and controls the terminal execution equipment of the air-conditioning unit according to the control scheme. The experiment shows that the system can effectively collect the HVAC operation data and complete the operation mode division. The system can optimize and control the energy consumption of HVAC and reduce the energy consumption under various operation modes.

Keywords: operation mode division; HVAC energy consumption; optimize control; sensor; K-means clustering

0 引言

暖通空调又叫作中央空调，其属于影响建筑能耗的主要因素。暖通空调的不合理使用，会导致暖通空调能耗提升[1]。为避免能源浪费，暖通空调自动控制系统的应用不断增加。依据先进的控制技术，以影响建筑室内环境品质为前提，合理控制暖通空调运行方案，达到节能降耗的目的[2]。然而，实际生活中，暖通空调自动控制系统的应用效果并不乐观，为此，需要设计暖通空调能耗优化控制系统，降低能耗[3]。例如，罗昊敏等人依据神经网络，设计暖通空调能耗优化控制系统，通过遗传算法优化神经网络参数，提升暖通空调能耗优化控制效果。该系统可有效缩短暖通空调冷水温度调节时间，降低暖通空调运行能耗[4]。于军琪等人设计暖通空调能耗优化控制系统，该系统中的核心算法是以运行费用、能耗损失为目标，建立能耗优化控制模型，通过改进粒子群算法，求解该模型，得到能耗优化控制方案，实现暖通空调能耗优化控制。该系统具备较高的稳定性与鲁棒性，暖通空调能耗优化控制精度较高[5]。但这两个系统均是在暖通空调运行模式不变情况下，完成能耗优化控制，实际情况中，

*基金项目：浙江省科技项目(202000450001)
收稿日期：2023-08-17

暖通空调中包含多种运行模式，切换运行模式时，会形成能耗突变与交叉问题，导致能耗优化控制效果下降。通过划分运行模式，可针对不同运行模型下的能耗进行优化控制[6]。为此，设计基于运行模式划分的暖通空调能耗优化控制系统，降低暖通空调能耗。

1 暖通空调能耗优化控制系统

以可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller，PLC)为核心，依据运行模式划分方式，设计暖通空调能耗优化控制系统，提升能耗优化控制效果，该系统的结构如图1所示。具体描述如下：

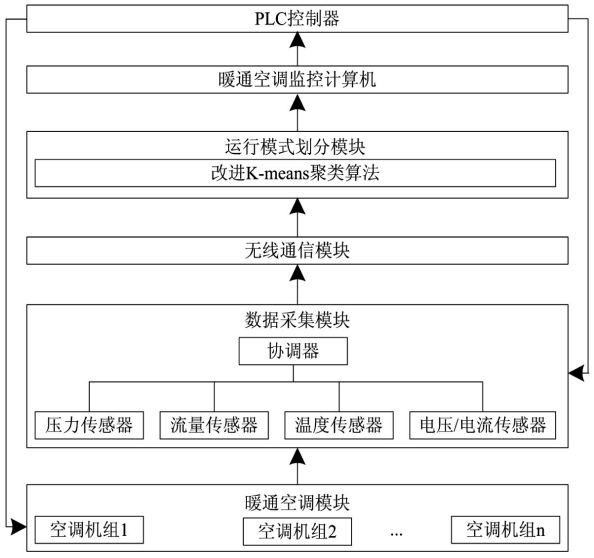


图1 暖通空调能耗优化控制系统结构图

(1) PLC控制器负责控制全部空调机组传感器和控制器的运作，PLC控制器在接收空调机组运行数据采集指令后，便会控制全部传感器采集空调机组运行数据；PLC控制器接收各运行模式对应的空调机组二进制数据后，建立以最低能耗为目标的暖通空调能耗优化控制模型，通过粒子群算法求解该模型，得到最低能耗对应的暖通空调能耗优化控制方案。同时根据暖通空调能耗优化控制方案，实时控制空调机组终端执行设备；

(2) 暖通空调模块内包含整个建筑区域内的全部空调机组；

(3) 数据采集模块利用压力与温度等传感器，采集暖通空调模块内全部空调机组的运行数据，通过协调器融合采集的空调机组运行数据；

(4) 无线通信模块利用LonWorks现场网络总线，以Lontalk数据包的形式，传输采集的空调机组运行数据至运行模式划分模块；

(5) 运行模式划分模块利用改进K−means聚类算法，聚类处理采集的空调机组运行数据，划分暖通空调的运行模式，并传输至暖通空调监控计算机内；

(6) 暖通空调监控计算机接收划分的暖通空调运行模式后，将各运行模式对应的空调机组运行数据转换成二进制数据，依据动态数据交换技术，传输至暖通空调能耗优化控制模块。

1.1 暖通空调机组运行数据采集模块

数据采集模块中，利用压力与温度等传感器，在暖通空调模块的全部空调机组内，采集空调机组的运行数据；通过协调器融合传感器采集的全部数据。协调器的结构如图2所示。

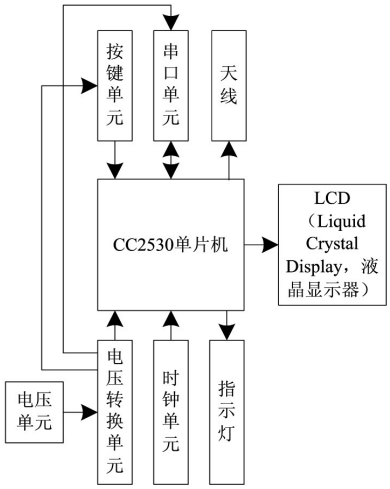


图2 协调器结构图

协调器的核心是CC2530单片机，用于控制整个协调机的工作状态。通过指示灯呈现协调机节点的网络状态。通过LCD为用户呈现暖通空调机组运行数据的融合结果。用户利用按键单元选择协调器的功能菜单[7−9]，决定融合某部分传感器采集的暖通空调机组运行数据。经过串口单元将融合的数据传输至无线通信模块内。

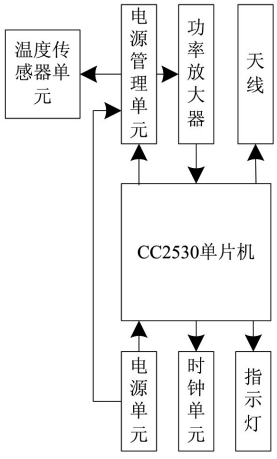


图3 温度传感器结构图

以温度传感器为例，温度传感器的结构如图3所示。温度传感器中通过指示灯呈现温度传感器的网络状态。利用电源为整个温度传感器提供电源。电源管理模块管理电压单元，为功率放大器提供电源。温度传感器单元

采集暖通空调机组的温度数据，经由功率放大器处理后，经过天线传输至协调器内。

1.2 暖通空调运行模式划分模块

运行模式划分模块，利用改进K−means聚类算法，聚类处理无线通信模块传输的暖通空调机组运行数据，划分暖通空调运行模式。改进K−means聚类算法的聚类准则函数λ为：

$$\lambda=\sum_{k=1}^{K}\frac{n_k\delta_k}{N} \tag{1}$$

式中，暖通空调机组运行数据数量是N；第k个簇内的空调机组运行数据数量是n_k；标准差是δ_k；簇的数量是K。

利用改进K−means聚类算法，划分暖通空调运行模式的具体步骤如下：

步骤1：输入暖通空调机组运行数据集$X=(x_1,x_2,\cdots,x_N)$与K个簇；

步骤2：将$X=(x_1,x_2,\cdots,x_N)$任意分配至K个簇，同时求解各簇的中心点；

步骤3：将X内各暖通空调机组运行数据样本分配至令加权距离$w_k\cdot d(c_k,x_j)$，降至最小的中心点所处的簇，得到K个新簇。其中，第k个簇的中心点是c_k；X内第j个暖通空调机组运行数据样本是x_j；c_k与x_j间的距离是$d(c_k,x_j)$；权重是w_k；

步骤4：再次求解各簇的中心点c_k，以c_k不再发生变化为止，输出聚类结果，即暖通空调运行模式划分结果。

将x_j分配至第k个簇后，λ的增量是$\triangle\lambda_k$；为提升聚类效果，需选取令$\triangle\lambda_k$降至最低的簇加入，即$\min(\triangle\lambda_k\min)$，$k=1,2,\cdots,K$。

$\triangle\lambda_k$的计算公式如下：

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_k&=\frac{n_k}{N}\left[\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{n_k}d\left(c_k,x_{k,i}\right)^2+d\left(c_k,x_j\right)^2}{n_k}}-\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{n_k}d\left(c_k,x_{k,i}\right)^2}{n_k}}\right]\\&=\frac{\sqrt{n_k}}{N}\left\{\left[\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{n_k}d\left(c_k,x_{k,i}\right)^2+d\left(c_k,x_j\right)^2\right]-\left[\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{n_k}d\left(c_k,x_{k,i}\right)^2\right]\right\}\\&=\frac{\sqrt{n_k}}{N}\cdot\frac{d\left(c_k,x_j\right)^2}{\sqrt{\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{n_k}d\left(c_k,x_{k,i}\right)^2+d\left(c_k,x_j\right)^2}+\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{n_k}d\left(c_k,x_{k,i}\right)^2}\end{aligned} \tag{2}$$

式中，n_k内第i个暖通空调机组运行数据样本是$x_{k,i}$；c_k与$x_{k,i}$间的距离是$d(c_k,x_{k,i})$。

因为$n_k\sim1$，所以$\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{n_k}d(c_k,x_{k,i})^2\sim d(c_k,x_j)^2$。

为此：

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{n_k}d\left(c_k,x_{k,i}\right)^2+d\left(c_k,x_j\right)^2\approx\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{n_k}d\left(c_k,x_{k,i}\right)^2 \tag{3}$$

于是：

$$\Delta\lambda_k\approx\frac{\sqrt{n_k}}{2N}\cdot\frac{d\left(c_k,x_j\right)^2}{\sqrt{\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{n_k}d\left(c_k,x_{k,i}\right)^2}}=\frac{\left[\frac{d\left(c_k,x_j\right)}{\sqrt{\delta_k}}\right]^2}{2N} \tag{4}$$

令$w_k=\frac{1}{\sqrt{\delta_k}}$，根据式(4)推导获取$w_k\cdot d(c_k,x_j)$。

$$w_k\cdot d\left(c_k,x_j\right)=\sqrt{2N\Delta\lambda_k} \tag{5}$$

为此，将暖通空调机组运行数据样本分配至令$w_k\cdot d(c_k,x_j)$达到最小的簇内，可提升暖通空调运行模式划分效果。

1.3 暖通空调能耗优化控制的PLC控制器

PLC控制器接收各运行模式对应的空调机组运行数据后，通过PLC控制器内置的中央处理器(Central Processing Unit，CPU)，建立以最低能耗为目标的暖通空调能耗优化控制模型，通过粒子群算法求解该模型，得到最低能耗对应的暖通空调能耗优化控制方案。PLC控制器，按照CPU得到的控制方案，控制暖通空调模块内各空调机组的终端执行设备。PLC控制器的结构如图4所示。

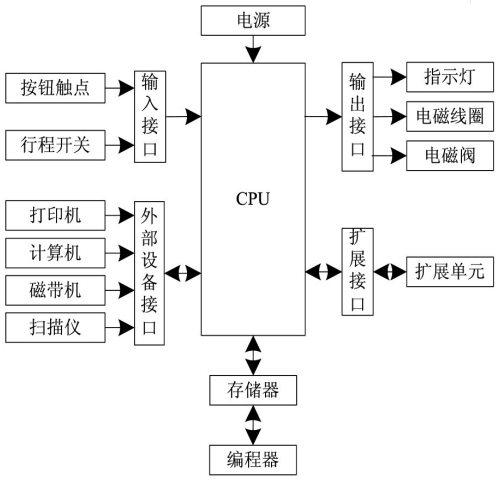


图4 PLC控制器结构图

PLC控制器的核心的CPU属于算法运算与控制枢纽。CPU得到的暖通空调能耗优化控制方案，会存储在存储器内。存储器内包含只读存储器与随机存取存储器两种类型。编程器对存储的控制方案进行编码，生成暖通空调的控制指令，作用于各个空调机组的终端执行设备。输入/输出接口负责接收各运行模式对应的空调机组二进制数据，暖通空调控制指令。

CPU内建立的以最低能耗为目标的暖通空调能耗优化控制模型为：

$$\begin{aligned}Q_t&=\min F\left(Q_{t1},Q_{t2},Q_{t3}\right)\\&=\min\left\{\left(\sum_{\hat{i}=1}^{M_1}Q_{fcm,\hat{i}}\right)+\left(\sum_{\hat{j}=1}^{M_2}Q_{ch,\hat{j}}+\sum_{l=1}^{M_2'}Q_{chw,l}\right)\right.\\&\quad\left.+\left(\sum_{h=1}^{M_3}Q_{tfcm,h}+\sum_{g=1}^{M_3'}Q_{cwp,g}\right)\right\}\end{aligned} \tag{6}$$

式中，暖通空调总能耗是Q_t；暖通空调末端能耗是Q_{t1}；冷水机组能耗是Q_{t2}；冷却塔能耗是Q_{t3}；第$\hat{i}$个风机能耗是$Q_{fan,\hat{i}}$；风机数量是M_1；第$\hat{j}$个冷水机组能耗是$Q_{ch,\hat{j}}$；冷水机组数量是M_2；第l个水泵能耗是$Q_{\mathrm{chw},l}$；水泵数量是$M_2^!$；第h个冷却塔风机功率是$Q_{tfan,h}$；冷却塔风机数量是M_3；第g个冷却水泵功率是$Q_{\mathrm{cwp},g}$；冷却水泵数量是$M_3^!$。

式(6)的温度约束条件为：

$$\begin{cases} t_{chw,\min} \le t_{chw} \le t_{chw,\max} \\ t_{cwp,\min} \le t_{cwp} \le t_{cwp,\max} \end{cases} \tag{7}$$

式中，$Q_{\mathrm{chw},l}$、$Q_{\mathrm{cwp},g}$的出水温度是t_{cwp}、t_{chw}；t_{cwp}的最大、最小值是$t_{\mathrm{chw,max}}$、$t_{\mathrm{chw,min}}$；t_{cwp}的最大、最小值是$t_{\mathrm{cwp,max}}$、$t_{\mathrm{cwp,min}}$。

流量约束条件为：

$$\begin{cases} r_{chw,\min} \le r_{chw} \le r_{chw,\max} \\ r_{cwp,\min} \le r_{cwp} \le r_{cwp,\max} \end{cases} \tag{8}$$

式中，$Q_{\mathrm{chw},l}$、$Q_{\mathrm{cwp},g}$的水流量是r_{chw}、r_{cwp}；r_{chw}的最大、最小值是$r_{\mathrm{chw,max}}$、$r_{\mathrm{chw,min}}$；r_{cwp}的最大、最小值是$r_{\mathrm{cwp,max}}$、$r_{\mathrm{cwp,min}}$。

2 实验结果与分析

以某酒店内的暖通空调为实验对象，该酒店的建筑面积在2.24 万平方米左右，楼层数为19层，其中，地上18层，地下1层，地上1至3层属于功能区，地上其余楼层属于客房。该酒店内暖通空调的基本配置如表1所示。该酒店的暖通空调内制冷机组共两个，其中一个属于备用制冷机组，该酒店暖通空调一年的能耗将近116万kWh，占整个酒店能耗的40%。

表1 暖通空调基本配置

类型	品牌	型号	台数	功率/kW
制冷机组	深创亿制冷	SCY-480D	2	1 610
冷冻循环泵	天洋水泵	ISG65-200(I)A	4	46.8
冷却循环泵	天洋水泵	ISG65-160i	5	38
冷却塔	策安	-	4	-
风机盘管	科科制冷	-	403	0.147
风机	迎春花	-	13	-

利用本系统采集该暖通空调机组的运行数据，以暖通空调流量数据为例，采集结果如图5所示。根据图5可知，系统可有效采集暖通空调的流量，该暖通空调流量的波动范围在0.2至1.4 m^3/s之间。实验表明：本系统具备暖通空调运行数据采集的可行性。

利用本系统划分该暖通空调的运行模式，运行模式划分结果如图6所示。根据图6可知，该暖通空调共包含3种运行模式，其中，运行模式1与运行模式2的负荷率较高，说明这个运行模式下，暖通空调的能耗较高；运行模式3的负荷率较低，说明该运行模式下，暖通空调的能耗较低。实验表明本系统可有效划分暖通空调运行模式。

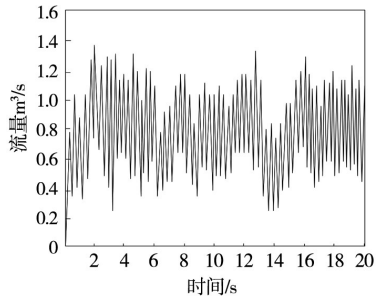


图5 暖通空调运行数据采集结果

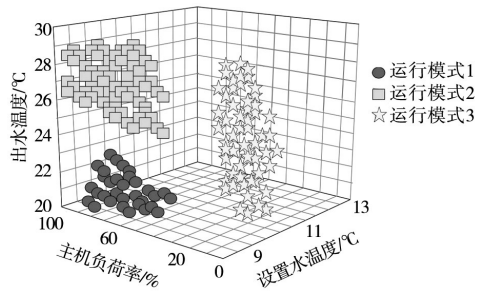


图6 暖通空调运行模式划分结果

利用本系统优化控制不同运行模式的暖通空调能耗，室内温度需控制在28℃以上，能耗需控制在140 kW以下，优化控制结果如图7所示，以运行模式1为例。根据图7可知，本系统可有效优化控制暖通空调能耗，室内温度控制在30℃处，符合室内温度优化控制需求；能耗控制在128 kW处，符合能耗优化控制需求。实验表明本系统具备暖通空调能耗优化控制的有效性。



图7 暖通空调能耗优化控制结果

分析经过本系统优化控制前后，运行模式1时暖通空调的能耗变化情况，分析结果如图8所示。根据图8可知，经过本系统优化控制后，不同时间段下暖通空调的能耗，均显著低于本系统应用前。实验表明：对于运行模式1，系统可有效降低暖通空调的能耗。

以期望误差百分比为衡量本系统能耗优化控制效果的指标，该指标代表实际控制结果和期望控制结果间的偏离程度，其值越小，优化控制效果越佳，期望误差百分比需控制在10%以下，分析结果如图9所示。根据图9可知，对于三种运行模式，本系统均可有效优化控制暖通空调能耗；运行模式1的最高期望误差百分比在7%左右；运

行模式2的最高期望误差百分比在7.5%左右；运行模式3的最高期望误差百分比在6.2%左右；三种运行模式下暖通空调能耗优化控制的期望误差百分比均未超过10%，说明本系统的暖通空调能耗优化控制效果较优。

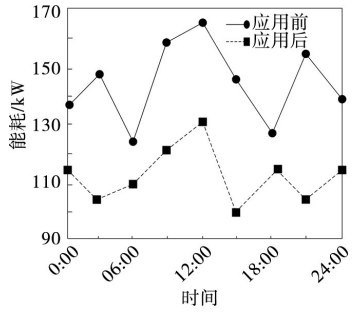


图8 本系统优化控制前后能耗变化情况

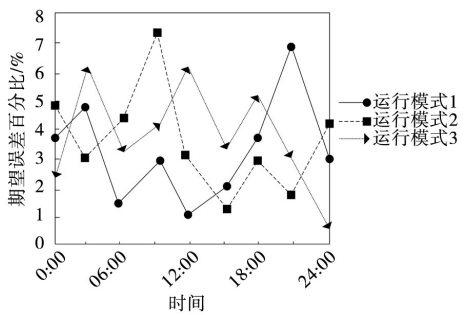


图9 本系统的能耗优化控制效果

3 结束语

暖通空调属于大型建筑中的基础设施之一，建筑中将近一半的能耗来源于暖通空调。降低暖通空调能耗属于急需解决的问题，为此，设计基于运行模式划分的暖通空调能耗优化控制系统。针对不同运行模式，设计不同能耗优化控制方案，提升暖通空调能耗优化控制精度，达到降低能耗的目的。

参考文献：

[1] 刘伟，李怀，黄巍，等.基于TRNSYS模拟的某近零能耗办公楼暖通空调系统优化配置分析[J].建筑科学，2022，38(4)：158−168.

[2] 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.

[3] 邢杉硕，张吉礼，于昊.空调冷水系统最小能耗粒子群组合优化方法研究[J].暖通空调，2021，51(1)：108−113，22.

[4] 李卓阳，靳小龙，贾宏杰，等.考虑建筑物热动态特性的暖通空调模型预测控制方法[J].中国电机工程学报，2020，40(12)：3928−3940.

[5] 于军琪，任延欢，赵安军，等.分布式PSODE算法的冰蓄冷空调系统优化控制研究[J].建筑科学，2020，36(8)：73−84，173.

[6] 闫军威，马彦喆，周璇.基于运行模式划分的复杂集中式空调控制系统逐时能耗预测方法[J].建筑科学，2020，36(2)：176−182，190.

[7] 石昌玉，丁禹程，曲文，等.定制化被动式木门窗材柔性分类智能控制系统设计[J].森林工程，2024，40(3)：162−169.

[8] 徐长赓，李彦明，刘子翔，等.基于改进滑模控制的水稻直播机路径跟踪研究[J].农机化研究，2025，47(4)：28−34.

[9] 丁瑞华，崔承刚，王逸轩，等.基于深度强化学习的数据中心空调系统优化控制[J].低温与超导，2022，50(9)：79−85，100.

作者简介：时晶(1987-)，男，硕士，高级工程师，研究方向：电力计量、综合能源系统及智能电网领域的建模、优化、分析及控制。

(上接第33页)

制备的超声换能器具有良好的效益，对系统传输效率的提升具有良好的作用。但是由于研究技术不足，效率提升不是很明显，对于换能器之间的耦合距离仅考虑了近场范围，后续研究还需要全面考虑。

参考文献：

[1] 金亮，冯时，杨庆新，等.基于改进NSGA−Ⅲ的电磁超声换能器多目标优化[J].仪器仪表学报，2021，42(1)：49−59.

[2] 翟国富，梁宝，邓超然，等.耐高温双线圈结构电磁超声换能器设计[J].中国电机工程学报，2021，41(11)：3943−3950.

[3] 戴安帮，袁懋诞，吴俊伟，等.基于双模式超声换能器的选择性激光熔化316L制件弹性常数无损表征研究[J].仪器仪表学报，2021，42(6)：95−102.

[4] 林基艳，林书玉.管柱型近周期声子晶体点缺陷结构的大尺寸压电超声换能器[J].物理学报，2023，72(9)：243−250.

[5] 翟光贤，禹胜林，王冰梅，等.恶劣气候对超声换能器声场影响的仿真分析[J].气象科技，2021，49(3)：328−335.

[6] 刘友健，雷智洪，吴俊伟，等.超快激光制备高频1−3型PIN−PMN−PT复合材料超声换能器[J].压电与声光，2023，45(2)：288−293.

[7] 杨宇辉，钟守炎，谢春晓，等.纵扭复合超声换能器的频率灵敏度及其结构优化研究[J].机械科学与技术，2021，40(10)：1567−1573.

[8] Huo Q，Fu L，Wang M，et al.The mobility of continental shale oil by gas flooding and influencing factors based on displacement−nuclear magnetic resonance instruments[J].Interpretation，2022，10(3)：SD61−SD74.

[9] 马琦，罗华，陈思平，等.基于工业机器人的超声换能器回波自动测量系统设计[J].计算机测量与控制，2020，28(11)：50−53，58.

[10] 王松.基于FPGA的核磁共振成像仪通信主控系统设计[J].微型电脑应用，2022，38(8)：116−118.

[11] 程义军，刘畅，薛晨阳，等.高效功率传输的电容参数超声换能器的设计与分析[J].传感技术学报，2022，35(9)：1182−1187.

[12] 李鹏阳，刘强，李伟，等.超磁致伸缩超声换能器结构研究[J].振动与冲击，2021，40(11)：196−201.

作者简介：张腾(1984-)，男，本科，助理工程师，研究方向：医疗设备维护，质量控制，医疗设备绩效分析。