

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.040

计及柔性负荷不确定性的电-热综合能源系统低碳优化调度

张建洲¹, 吕海涛¹, 胡圣卓², 杨凤坤³, 刘鸿鹏²(1. 国电南瑞南京控制系统有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012;
3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106)

摘 要: 柔性负荷的需求响应存在不确定性, 电-热综合能源系统中的环境成本也需要考虑。为此, 计及碳交易机制构建了考虑柔性负荷不确定性的电-热综合能源系统。考虑用户侧柔性负荷的可平移、可转移、可削减的负荷特性, 将其作为调节手段参与电网的优化调度。以系统运行成本和碳交易成本最低为优化目标, 建立低碳经济调度模型。算例分析表明: 所建立模型能明显降低系统的运行成本, 同时实现了负荷的削峰填谷。

关键词: 综合能源系统; 柔性负荷; 需求响应; 优化调度

中图分类号: TP273 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2026)01-0213-05

Low-carbon Optimization Scheduling of Electric-thermal Integrated Energy System Considering Uncertainty of Flexible Loads

ZHANG Jianzhou¹, LV Haitao¹, HU Shengzhuo², YANG Fengkun³, LIU Hongpeng²

(1. NARI Technology Nanjing Control System Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 2. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: In light of the uncertainty in the demand response of flexible loads as well as the environmental cost in the integrated electricity-heat energy system, an IES considering the uncertainty of flexible load is constructed with carbon trading mechanism. The load characteristics of the flexible load which can be translated, transferred and reduced, being taken into account on the user side, is used as a method of regulation to participate in the optimal scheduling of the power grid. With the system operation cost and carbon trading cost as the optimization goal, a low-carbon economic scheduling model is established. The example analysis shows that the proposed model can significantly reduce the operating cost of the system and smoothen the load fluctuation.

Keywords: integrated energy system; flexible load; demand response; optimal scheduling

0 引言

随着智能电网的不断扩建, 研究综合能源系统的经济调度愈发具有重要意义^[1-5]。柔性负荷通过需求响应措施可以实现负荷的合理分布, 起到电网侧负荷的削峰填谷、提供辅助服务的作用, 进而提高综合能源系统(integrated energy system, IES)的经济性^[6-10]。

减少碳排放可以通过在调度中加入碳交易机制来实现。文献[11-13]引入阶梯型碳交易机制, 实现了系统低碳化经济运行。对柔性负荷进行精细化建模是实现经济调度的基础。文献[14]基于柔性负荷的精细化模型, 提出了综合考虑电动汽车和柔性负荷等可控资源的优化调度方案。文献[15-17]在多目标优化中附加了节约

能源、减少碳排放量, 验证了家庭能源系统需求响应(demand response, DR)对节能减排具有突出效果。以上文献只针对单一的电价型需求响应, 或只对具有一种特性的柔性负荷进行优化, 未充分考虑可平移、可转移、可削减柔性负荷的特性, 且综合能源系统模型不完善。

针对柔性负荷的不确定性可能会对电网造成压力, 需要对柔性负荷的可调潜力进行评估, 以便于对电力系统合理规划, 配备相应的后备容量^[18-20]。文献[21]针对DR的不确定性提出了一种激励方式, 充分考虑不同刚性负荷和柔性负荷的约束, 基于不同时间尺度构建了不同的经济模型。文献[22]利用2阶段鲁棒优化模型应对电负荷、热负荷和电-热可转移负荷的不确定性, 但没有针对柔性负荷的响应速度、可调度潜力进行

基金项目: 国电南瑞科技股份有限公司科技项目(524609230080)

第一作者简介: 张建洲(1988—), 男, 江苏南通人, 高级工程师, 本科, 研究方向为车桩网互动关键技术研究, hu_shengzhuo@163.com。

更进一步的研究。

综上所述,本文针对不同柔性负荷的不确定性,从激励角度分析柔性负荷的可调潜力,建立用户侧可平移、可转移、可削减的负荷模型。将其引入到 IES 中,构建了日前协调调度模型。通过不同场景分析验证了柔性负荷参与电力系统调度的经济效益,实现了负荷峰值的削减和谷值的填补。

1 综合能源系统及负荷模型

1.1 负荷需求不确定性

综合能源系统模型如图 1 所示。

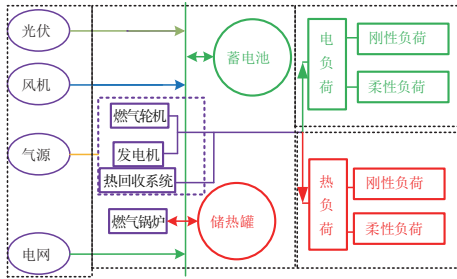


图 1 综合能源系统模型

针对负荷的可调节性能分为刚性负荷和柔性负荷,如式(1)所示:

$$P_{i,t}^L = P_{i,t}^{GX} + P_{i,t}^{RX} \quad (1)$$

式中 $P_{i,t}^L$, $P_{i,t}^{GX}$, $P_{i,t}^{RX}$ 分别为负荷、刚性负荷和柔性负荷。

1.2 碳交易成本模型

考虑碳成本对 IES 的影响,建立 IES 碳交易成本模型,如式(2)所示:

$$C^{CO_2} = C_t (E_{out} - E_{all}) \quad (2)$$

式中: C^{CO_2} 为碳交易成本; C_t 为碳交易价格; E_{out} 为 CO_2 的总排放量; E_{all} 为碳配额额度。

1.3 需求响应模型

1) 可转移负荷

将用户负荷进行拆分,转移到不连续的时段,可转移负荷的功率可由式表示:

$$\beta_i P_{min}^{ZY} \leq P_t^{ZY} \leq \beta_i P_{max}^{ZY} \quad (3)$$

式中: P_{min}^{ZY} , P_{max}^{ZY} 分别为可转移负荷功率的最小值、最大值; β_i 为表征转移状态 0~1 变量。

2) 可平移负荷

将负荷整体平移到其他时段进行充放电,可平移负荷如式所示:

$$L^{PY*} = (0, \dots, P_{t_s}^{PY}, P_{t_s+1}^{PY}, P_{t_D}^{PY}, \dots, 0) \quad (4)$$

式中: t_s 为可平移时段的起始时间; t_D 为可平移时

段的持续时间。

3) 可削减负荷

将用户某些负荷进行不同程度的削减来满足需求响应和经济调度,可削减负荷如式所示:

$$P_{\tau}^{XJ} = (1 - \theta_{\tau} \gamma_{\tau}) P_{\tau}^{XJ*} \quad (5)$$

式中: P_{τ}^{XJ*} 和 P_{τ}^{XJ} 分别为 τ 时段调度前、后的削减功率; θ_{τ} 为负荷削减系数; γ 为表征削减状态的 0~1 变量。

2 综合能源系统经济调度模型

2.1 目标函数

$$\min C^S = \sum_{t=1}^T \left(C^{NET} + C^{DG} + C^{MT} + C^{GB} + C^{ESS} + C^{HS} + C^{RX} + C^{CO_2} \right) \quad (6)$$

式中: C^{NET} 为 IES 从电网得到的电能成本; C^{GB} 为燃气锅炉运行成本; C^{DG} 为新能源发电成本; C^{ESS} 和 C^{HS} 分别为储能和储热罐的运行成本; C^{MT} 为燃气轮机运行成本; C^{RX} 为柔性负荷参与调度的总补偿成本; C^{CO_2} 为碳交易成本。

1) 与电网交互成本:

$$C^{NET} = \delta_t^{NET} P_t^{NET} \quad (7)$$

式中: δ_t^{NET} 为分时电价; P_t^{NET} 为与电网交换的功率。

2) 新能源发电成本:

$$C^{DG} = \delta_w P_t^W + \delta_{PV} P_t^{PV} \quad (8)$$

式中: δ_w 和 P_t^W 分别为风机的运行成本系数和输出功率; δ_{PV} 和 P_t^{PV} 分别为光伏的运行成本系数和输出功率。

3) 燃气轮机运行成本:

$$C^{MT} = \delta_{MT} P_t^{MT} \quad (9)$$

式中 δ_{MT} 和 P_t^{MT} 分别为燃气轮机的运行成本系数和输出功率。

4) 燃气锅炉运行成本:

$$C^{GB} = \delta_{GB} P_t^{GB} \quad (10)$$

式中 δ_{GB} 和 P_t^{GB} 分别为燃气锅炉的运行成本系数和输出功率。

5) 蓄电池折旧成本:

$$C^{BAT} = \delta_{BAT} |P_t^{BAT}| \quad (11)$$

式中 δ_{BAT} 和 P_t^{BAT} 分别为蓄电池的折旧系数和充放功率。

6) 储热罐折旧成本:

$$C^{HS} = \delta_{HS} |P_t^{HS}| \quad (12)$$

式中: δ_{HS} 为储热罐的折旧系数; P_t^{HS} 为储热罐充放的能量,吸收为正,释放为负。

7) 柔性负荷调度成本:

$$C^{\text{IDR}} = C^{\text{ZY}} + C^{\text{PY}} + C^{\text{XJ}} \quad (13)$$

转移后需要补偿用户的费用 C^{ZY} 为:

$$C^{\text{ZY}} = C_{\text{cost}}^{\text{ZY}} \sum_{t=t_{\text{tr}}-}^{t_{\text{tr}}+} (\beta_t P_t^{\text{ZY}}) \quad (14)$$

$$C^{\text{PY}} = C_{\text{cost}}^{\text{PY}} P_{\text{sum}}^{\text{PY}} \sum_{t=t_{\text{sh}}-}^{t_{\text{sh}}+ - t_{\text{D}} + 1} \alpha_t \quad (15)$$

$$C^{\text{XJ}} = C_{\text{cost}}^{\text{XJ}} \sum_{t=1}^T \gamma_t (P_t^{\text{cut}} - P_t^{\text{cut}*}) \quad (16)$$

式中: $C_{\text{cost}}^{\text{ZY}}$ 、 $C_{\text{cost}}^{\text{PY}}$ 分别为可转移负荷、可平移负荷的补偿价格; $P_{\text{sum}}^{\text{PY}}$ 为耗电总功率; C^{PY} 和 C^{XJ} 分别为平移后、削减后需补偿用户的费用; $C_{\text{cost}}^{\text{XJ}}$ 为单位功率负荷削减的补偿价格。

2.2 约束条件

1) 风机、光伏、燃气轮机和燃气锅炉的输出必须满足功率极限约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{W}} \leq P_{\text{pred}} \\ 0 \leq P_{\text{PV}} \leq P_{\text{pred}} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{MT}} \leq P_{\text{N}} \\ 0 \leq P_{\text{GB}} \leq P_{\text{N}} \end{cases} \quad (18)$$

2) 储能运行约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{s}}^{\text{dis}}(t) \leq U_{\text{s}}(t) P_{\text{s}}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{\text{s}}^{\text{ch}}(t) \leq [1 - U_{\text{s}}(t)] P_{\text{s}}^{\text{max}} \\ \eta \sum_{t=1}^{N_{\text{T}}} [P_{\text{s}}^{\text{ch}}(t) \Delta t] - \frac{1}{\eta} \sum_{t=1}^{N_{\text{T}}} [P_{\text{s}}^{\text{dis}}(t) \Delta t] = 0 \\ E_{\text{s}}^{\text{min}} \leq E_{\text{s}}(t_0) + \eta \sum_{t'=1}^t [P_{\text{s}}^{\text{ch}}(t') \Delta t] - \\ \frac{1}{\eta} \sum_{t'=1}^t [P_{\text{s}}^{\text{dis}}(t') \Delta t] \leq E_{\text{s}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_{\text{s}}^{\text{max}}$ 为储能的最大充放电功率; P_{s}^{ch} 和 $P_{\text{s}}^{\text{dis}}$ 分别为储能的充、放电功率; $U_{\text{s}}(t)$ 为充放电系数; $E_{\text{s}}(t_0)$ 为初始储能容量; N_{T} 为调度的总时间段。 $E_{\text{s}}^{\text{min}}$ 和 $E_{\text{s}}^{\text{max}}$ 分别为储能的最小、最大容量。

3) 电功率平衡约束:

$$P^{\text{NET}} + P^{\text{W}} + P^{\text{PV}} + P^{\text{MT}} - P^{\text{BAT}} = P^{\text{Load}} \quad (20)$$

4) 热功率平衡约束:

$$H^{\text{MT}} + H^{\text{GB}} - H^{\text{HS}} = H^{\text{Load}} \quad (21)$$

5) 可转移负荷的最短时间约束:

$$\sum_{\tau=t}^{t+T_{\text{min}}^{\text{ZY}}-1} \beta_{\tau} \geq T_{\text{min}}^{\text{ZY}} (\beta_t - \beta_{t-1}) \quad (22)$$

式中 $T_{\text{min}}^{\text{ZY}}$ 为最短连续运行时间, h。

6) 可削减负荷约束:

最小连续削减时间约束

$$\sum_{t=1}^{t+T_{\text{min}}^{\text{XJ}}-1} \gamma_t \geq T_{\text{min}}^{\text{XJ}} (\gamma_t - \gamma_{t-1}) \quad (23)$$

最大连续削减时间约束

$$\sum_{t=1}^{t+T_{\text{max}}^{\text{XJ}}+1} (1 - \gamma_t) \geq 1 \quad (24)$$

削减次数约束

$$\sum_{t=1}^{24} \gamma_t \leq N_{\text{max}} \quad (25)$$

式中: $T_{\text{min}}^{\text{XJ}}$ 和 $T_{\text{max}}^{\text{XJ}}$ 分别为最小、最大连续削减时间; N_{max} 为最大削减次数。

3 算例分析

本文选取某地区 IES 作为研究对象,以综合成本最低为优化目标,以各机组功率极限和容量平衡为约束条件。通过 MATLAB 调用 YALMIP 工具箱,利用 CPLEX 求解器,在 24 h 的系统调度周期内,以每小时为一个调度时段进行调度分析。电负荷、热负荷、光伏以及风机出力的功率预测如图 2 所示。电、热负荷在午时和傍晚具有较高的需求电量。

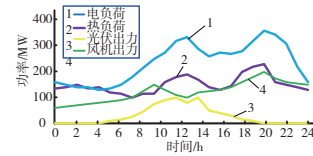


图2 负荷预测结果

设置 3 种场景进行对比分析。其中场景 1 为本文所提优化调度的场景,包含可调度的柔性电、热负荷;场景 2 仅考虑可调度的柔性电负荷;场景 3 不考虑柔性负荷对优化调度的影响。各柔性电、热负荷优化前后的分布情况如图 3、图 4 所示(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者):

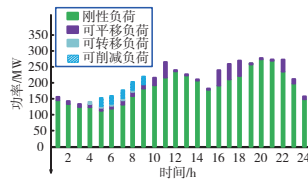


图3 场景1中调度后的电负荷

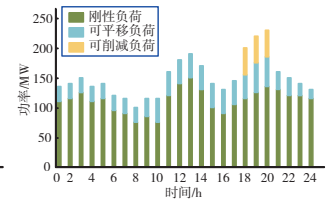


图4 场景1中调度后的热负荷

3.1 场景1调度结果分析

由场景 1 可知,风电光伏在 0:00-7:00 时无出力,而且电负荷也处在一个较低的水平,电网优先供电。燃气轮机也相应地提供一部分电能,将多余的电能存储在蓄电池中,蓄电池在电价较低的时段充电在电价较高的时段放电。如图 5 所

示,在9:00—14:00和17:00—22:00电价昂贵的时段,风光能源得到了最大程度的利用,同时蓄电池也在释放电能。可调度的柔性电负荷整体呈现出将高峰用电时段向低谷和平稳时段转移的趋势。实现了负荷峰值的削减和谷值的填补,对IES经济稳定运行提供了良好的保障。

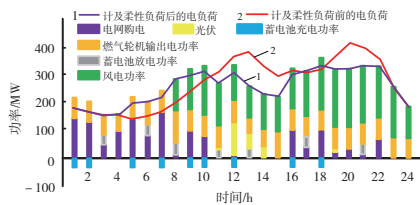


图5 场景1系统供电平衡

如图6所示,燃气轮机在热负荷高峰的9:00—14:00和17:00—22:00时间段处于满发状态补充电力缺口。燃气轮机在热负荷低谷时段通过储热罐储存热量,在热负荷高峰时期通过储热罐释放热量赚取电价差,实现功率的合理分布。负荷在7:00—10:00时间段有所增加,在11:00—21:00时段有所削减,考虑用户侧的柔性热负荷调度可以削峰填谷,进一步缓解了高峰期的供热压力。有效整合柔性电、热负荷的经济调度,可以平抑负荷的波动,维持电网稳定。

通过对比电、热负荷优化前后的图5和图6可知,可平移负荷在平移过程中,其负荷持续时间未改变,其在持续时段的用电功率也与原来相等,而可转移负荷的用电持续时段和用电功率均发生变化,与可平移负荷相比,功率分布更灵活。

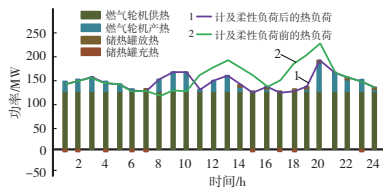


图6 场景1系统供热平衡

3.2 不同场景下柔性负荷对低碳经济调度的影响

对各场景下的IES调度模型进行求解,3种场景下的经济环境效益如表1所示。

表1 3种场景下柔性负荷对低碳经济调度的影响

场景	总成本/元	碳交易成本/元	耗气成本/元	购电成本/元	调度成本/元	储能成本/元
1	3 509.80	240.96	1 656.98	743.30	404.10	464.46
2	3 518.40	244.55	1 771.18	749.15	289.85	463.67
3	3 753.70	310.24	1 825.35	1 132.27	0.00	485.84

在对比中发现,相较于场景3,场景1和场景2的碳交易成本分别下降了22.3%和21.2%,购电成本分别降低了34.4%和33.8%,总成本分别减少了6.5%和6.27%。尽管场景1的调度成本增加,但总成本最低,这表明柔性热负荷的优化调度对综合成本的降低具有显著影响。

综上所述,柔性电负荷降低成本的效果最好,大大降低了购电成本,也有利于减少碳交易成本,提升了环境效益。

4 结语

本文考虑了用户侧可平移、可转移、可削减负荷模型,计及碳交易机制构建清洁低碳、供需协同的电-热IES经济调度模型。通过不同场景分析验证了柔性电、热负荷参与电力系统调度的经济效益,实现了负荷峰值的削减和谷值的填补。为进一步研究低碳经济的IES调度策略提供了参考。

参考文献:

- [1] 周鑫,任景,张小东. 遗传算法下的源网荷储协调优化数学建模与分析[J]. 微型电脑应用, 2023, 39(10):141-144.
- [2] 徐睿婕,任永峰,祝荣,等. 基于绿证-碳交易交互机制与合作博弈理论的IES系统低碳经济调度[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9):91-100.
- [3] 吴佳琦,张谦,黄耀宇,等. 计及电动汽车的综合能源系统多主体协同低碳经济调度[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(12):36-47.
- [4] 崔杨,姜帅,赵钰婷,等. 考虑超碳需求响应的综合能源系统低碳优化调度[J]. 电网技术, 2024, 48(5):1863-1872.
- [5] 邵振国,林勇棋,陈飞雄,等. 考虑碳-绿证耦合机制的电-气-热综合能源系统分布式鲁棒低碳经济调度[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(6):50-58, 76.
- [6] 吴继岩,张怀垠,马鑫,等. 考虑柔性负荷的光伏电网储能灵活规划模型[J]. 微型电脑应用, 2023, 39(8):68-71.
- [7] 刁涵彬,李培强,王继飞,等. 考虑电/热储能互补协调的综合能源系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2020, 35(21):114-125.
- [8] 张超,冯忠楠,邓少平,等. 考虑电热混合储能的多能互补协同削峰填谷策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊1):191-199.
- [9] 崔杨,姜涛,仲悟之,等. 电动汽车与热泵促进风电消纳的区域综合能源系统经济调度方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2):1-7.
- [10] 朱霄珣,刘占田,薛劲飞,等. 计及柔性负荷参与的综合能源系统优化调度[J]. 太阳能学报, 2023, 44(9):29-38.

- [11] 王钦,陈业夫,蔡新雷,等.考虑柔性负荷和阶梯型碳交易的低碳经济优化调度策略[J].广东电力,2024,37(1):76-85.
- [12] 余洋,吴千,霍宇航,等.计及自适应阶梯碳势-碳价与供需双响应基于主从博弈的综合能源系统低碳经济调度[J].电网技术,2024(7):2702-2714.
- [13] 周伟,孙永辉,谢东亮,等.计及改进阶梯型碳交易和热电联产机组灵活输出的园区综合能源系统低碳调度[J].电网技术,2024,48(1):61-73.
- [14] 颜湘武,王庆澳,卢俊达,等.计及电动汽车和柔性负荷的微电网能量调度[J].电力系统保护与控制,2023,51(17):69-79.
- [15] 黄逸文,黄文焘,卫卫,等.大型海港综合能源系统物流-能量协同优化调度方法[J].中国电机工程学报,2022,42(17):6184-6196.
- [16] 别朝红,胡国伟,谢海鹏,等.考虑需求响应的含风电电力系统的优化调度[J].电力系统自动化,2014,38(13):115-120,159.
- [17] 王珂,刘建涛,姚建国,等.基于多代理技术的需求响应互动调度模型[J].电力系统自动化,2014,38(13):121-127.
- [18] 殷加珏,赵冬梅.考虑源荷双侧预测误差的实时发电计划闭环控制模型[J].电力系统自动化,2018,42(6):98-105.
- [19] 薛东,段立强,高统彤,等.考虑多重特征与不确定性度量的综合能源系统负荷预测研究[J].太阳能学报,2024,45(7):379-388.
- [20] 周建力,乌云娜,董昊鑫,等.计及电动汽车随机充电的风-光-氢综合能源系统优化规划[J].电力系统自动化,2021,45(24):30-40.
- [21] 孙宇军,王岩,王蓓蓓,等.考虑需求响应不确定性的多时间尺度源荷互动决策方法[J].电力系统自动化,2018,42(2):106-113,159.
- [22] 张晓辉,刘小琰,钟嘉庆.考虑奖惩阶梯型碳交易和电-热转移负荷不确定性的综合能源系统规划[J].中国电机工程学报,2020,40(19):6132-6142.

收稿日期:2024-09-30

(上接第200页)

2) 针对空压机的变频改造,本文给出了两种具体的优化方案,能实现气量调节范围的扩展,并提高变频的响应速度,进一步保证了空压机变频节能的效果。

3) 经案例证明,本案可减少空压机运维难度,实现设备智慧托管,保证能源的高效使用,也有助于节能减排保护环境。

4) 随着新技术的应用,企业可以在产品设计、生产工艺、市场营销等方面探索新的可能性,保持竞争优势^[20]。

参考文献:

- [1] 刘成红,吕森,张静波.浅谈钢铁行业空压站节能的发展趋势[J].中国设备工程,2022(11):214-216.
- [2] 王坤.空压机稳压节能技术和余热回收方法[J].现代工业经济和信息化,2021,11(6):87-88.
- [3] 马继松,严乐荣,赵鲁苏.扬州市重点用能企业空压机能源利用状况及对策研究[J].能源研究与利用,2021(2):8-11.
- [4] 夏坤.矿用空压机的远程监测及智能联控系统的设计[J].机械管理开发,2022,37(8):287-288.
- [5] 艾佳薇.关于空压机节能减排技术的研究[J].机械管理开发,2022,37(5):195-197.
- [6] 钟仁强.提高氮气空压机组工作效率的研究[J].自动化应用,2023(7):147-149,153.
- [7] 韩中建.基于嵌入式的船用空压机智能控制系统设计[J].今日制造与升级,2023(1):76-78.
- [8] 李鸿.煤矿地面空压机集中控制研究[J].机械管理

开发,2023,38(3):179-181.

- [9] 王中卿.空气压缩机智能控制及节能技术研究与应用[J].机械研究与应用,2024,37(5):53-56.
- [10] 郭晓斌.制造业压缩空气系统节能运行应用研究[J].中国设备工程,2024(12):164-167.
- [11] 王贺彬,白锐,吕永津,等.基于PLC与触摸屏的空压站自动监控系统设计[J].制造业自动化,2023,45(10):125-128.
- [12] 雷明.空压机站智能集控系统的应用研究[J].自动化应用,2024(7):140-142.
- [13] 谢悦海,刘猛,唐伯培,等.基于WebAssembly的跨平台SCADA系统设计与实现[J].机电工程技术,2023,52(12):196-200.
- [14] 周建为.空压机系统智能控制与节能策略研究[J].中国机械,2023(24):24-27.
- [15] 吴晓坤,王庆伟.MES系统在化工安全管理中的应用[J].化工管理,2024(14):63-65,129.
- [16] 丁锦华,苗本健,李赛赛,等.基于电器实验室用气特点的压缩空气动力系统节能改造分析[J].机电工程技术,2023,52(11):279-282.
- [17] 曹克忠,乔虹.空压机械节能降耗技术研究[J].中国机械,2024(29):70-73.
- [18] 王伯轩.空压机新型节能技术应用[J].水泥,2022(8):68-69.
- [19] 王庭佛.低转速往复式(L型)空压机的振动隔离[J].噪声与振动控制,1986,6(2):39-44.
- [20] 范高原.空压机智能控制系统的应用[J].化工管理,2021(25):147-148.

收稿日期:2024-08-12