

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.053

基于机器学习的配电网带电作业绝缘斗臂车远程智能控制方法

李海波,刘卫明,赵亮,戴佳明

(国网内蒙古东部电力有限公司 赤峰供电公司,内蒙古自治区 赤峰 024000)

摘要:带电作业对绝缘斗臂车的操作精度要求极高,需要准确控制斗臂的伸展、旋转、升降等动作,以确保作业人员能够安全、准确地到达指定位置进行作业。设计一种基于机器学习的配电网带电作业绝缘斗臂车远程智能控制方法。结合机器学习算法,采集绝缘斗臂车在带电作业过程中的各种数据;利用人工神经网络对这些数据进行训练和处理,生成工作臂运行中的位移数据;以上述位移数值为基础,构建绝缘斗臂车数学模型,计算出绝缘斗臂车理想轨迹的控制量,以提升带电作业对绝缘斗臂车的操作精度。将控制量设置为一程序,设计一远程控制器,将该程序输入至控制器中,实现配电网带电作业绝缘斗臂车远程智能控制的整体设计。实验结果表明:基于机器学习的配电网带电作业绝缘斗臂车远程智能控制方法相较于其余两种方法,能够准确预测绝缘斗臂车的运动轨迹和状态,误差在可接受范围内,实现了对绝缘斗臂车的精确控制。

关键词:绝缘斗臂车;带电作业;远程控制;配电网;机器学习算法

中图分类号:TP273 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)04-0281-06

Remote Intelligent Control Method for Insulated Aerial Bucket Trucks in Live Distribution Network Work Based on Machine Learning

Li Haibo, Liu Weiming, Zhao Liang, Dai Jiaming

(Chifeng Power Supply Company, State Grid Inner Mongolia Eastern Power Co., Ltd., Chifeng 024000, China)

Abstract: Live working demands extremely high operational precision for insulated aerial bucket trucks, requiring accurate control of the bucket arm's extension, rotation, lifting movements to ensure that operators can safely and accurately reach the designated position. A remote intelligent control method for insulated aerial bucket trucks used in live distribution network work based on machine learning is designed. Firstly, by incorporating machine learning algorithms, various data during the live working process of the insulated aerial bucket truck are collected; an artificial neural network is used to train and process this data to generate displacement data during the operation of the work arm. Then, based on the displacement values mentioned above, a mathematical model of the insulated aerial bucket truck is constructed to calculate the control quantities for its ideal trajectory, thereby improving the operational precision of the truck during live work. Finally, the control quantities are set as a program, and a remote controller is designed. This program is input into the controller to achieve the overall design of the remote intelligent control for the insulated aerial bucket truck in live distribution network work. Experimental results show that compared with the other two methods, the remote intelligent control method for insulated aerial bucket trucks based on machine learning can accurately predict the motion trajectory and state of the truck, with errors within an acceptable range, achieving precise control of the insulated aerial bucket truck.

Keywords: insulated aerial bucket truck; live working; remote control; distribution network; machine learning algorithm

0 引言

随着电力行业的持续发展和居民生活水平的不断提升,对于供电可靠性和供电质量的要求也越来越高。配电网作为电力供电的末端环节,直接肩负着这两项任务。带电作业方式相比于停电作业方式能极大提高供电可靠性和供电质量,因此它在配电网的检修和维护中得到了广泛应用。

绝缘斗臂车作为配电网带电作业中的重要工具,其操作复杂性和危险性不容忽视。绝缘斗臂车作为配电网带电作业的重要工具,主要用于将带电作业人员送到配网高空线路进行作业。然而,传统的绝缘斗臂车操作存在诸多难点,如人工控制主导、控制过程直接、定位精度受限等问题。为了提升作业效率和安全性,需对绝缘斗臂车远程智能控制进行设计。

第一作者简介:李海波(1974—),男,内蒙古自治区赤峰人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统及其自动化, qyj121588@163.com。

胡松华等^[1]通过测量仿生机械臂的参数,创建了其有限元模型,使便携式仿生机械臂的动态变形过程得以更直观地展现。虽然该研究结合了近似逆动力学模型和CMAC控制技术来控制带电作业机械臂的运动轨迹,但存在控制精度不足的问题。张树欣等^[2]则基于机械臂的运动学模型分析和波变量遥操作结构优化,通过设计视觉和分段力反馈机制,让操作者能够感知机械臂的作业状态。然而,该方案的控制效率有待提高。

针对以上问题,本文方法采集绝缘斗臂车在带电作业过程的多源数据,利用机器学习算法对数据进行训练和处理,拟合得到工作臂运行中的位移数据,以提升带电作业对绝缘斗臂车的操作精度,实现了对绝缘斗臂车的远程精确控制和智能监测。

1 基于机器学习采集图像与数据

配电网带电作业的绝缘斗臂车,作为一种特种高空作业车,其结构主要包括车辆底盘、工作臂、绝缘斗、操控系统等,各部分之间相互配合、协同工作,以确保带电作业的安全性和高效性。绝缘斗臂车结构如图1所示。

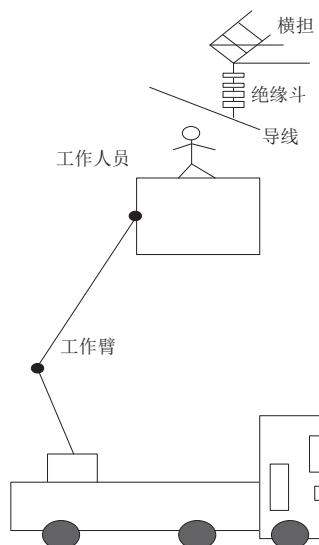


图1 绝缘斗臂车结构

由图1可知,当工作人员进行作业时需要在绝缘斗中进行具体操作,而此时工作人员的安全易受到威胁。因此,通过智能远程控制,作业人员可以在地面或安全距离外对绝缘斗臂车进行操作,避免了直接接触高压电带来的安全风险。由此可以推断,对工作臂的控制是绝缘斗臂车设计的核心要素^[3]。因此,本文聚焦于利用机器学习

算法,针对配网带电作业场景,设计绝缘斗臂车工作臂的远程智能控制方法。

安装工作臂的相机后,使用双目视觉系统收集其位置信息 (x, y, z) ,并依据标定信息完成图像存储与标记^[4]。图像校正处理是训练后的必要步骤。同时,利用神经网络建立图像三维坐标与采集位置 (x, y, r) 的关系,收集数据集样本。经过处理,选择最优数据集作为训练样本,依据初始图像采集,驱动工作臂进入运动状态以构建数据集^[5]。

本文采用激活函数与误差损失函数联合构建人工神经网络。基于给定的数据传输规格及训练样本收集,确定网络传输层的神经元数量。输入层神经元由三维坐标数据构成,而输出层神经元则对应于工作臂的位置与姿态 (x, y, z) 的输出(结果见图2)。为此,定义 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为训练集样本,在0~1之间随机生成样本数据,网络输出为 y' 。利用反向传播算法,可以计算出神经网络第 j 层某个神经元的阈值 δ_{gh}^j 的调整量

$$\Delta \delta_{gh}^j = \omega \times x_{gh}^j y_{gh}^j (y - 1) (r - z_{gh}^j) \quad (1)$$

式中: δ 为旋转角度; ω 为网络初始化时的权重参数; g 为学习率; h 为标准值。

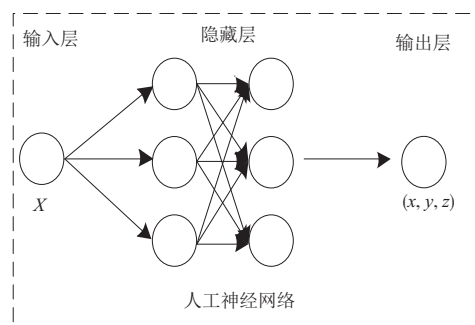


图2 人工神经网络结构

利用上述公式,可以更新神经网络中的参数。当预测值接近极端值时,参数调整量将为0或1^[6]。对于交叉熵损失函数,可求解工作臂运行中的位移 Δd_{gh}^j ,其计算公式如下

$$\Delta d_{gh}^j = \omega (1 - y') x_{gh}^j \quad (2)$$

依据计算所得的调整量,实施网络参数的更新步骤,随后转入下一数据的学习。当整个训练样本集学习结束后,确定了多层前馈神经网络的连接权重和阈值^[7]。选取样本数据进行单次训练循环,此过程重复5次。在训练期间,累积每次更新得到的数据,最终整合成最优位移数据并予以保存。

2 计算绝缘斗臂车理想轨迹的控制量

基于上述分析,位移的变化会导致工作臂系统产生相应的变化,因此选取恰当的坐标系作为运动参照至关重要。首要步骤是确定坐标,进而构建工作臂系统的有限维模型。通过计算连杆的运动速率,可获取其角速度和加速度等信息。连杆由电机驱动,为确保在各角度下自由运动,将主干与底座电机连接^[8]。监测伺服电机编码器,可以测量连杆在运动期间产生的弹性变形,从而得出相应的位移偏转角度。

设定两根连杆绕水平面上的点 O 旋转,其中 m_1 和 m_2 代表它们的质量, T_1 和 T_2 则是电机逆时针转动时产生的力矩,角度用特定符号表示。在旋转过程中, l_1 和 l_2 分别表示两根连杆的偏转角度,这类偏转能够通过振动特性反映系统的特征^[9-10]。随后,建立一个地面参考坐标系,并依据拉格朗日能量函数的定义,推导出二连杆工作臂系统的动能势能关系

$$l = T - v \quad (3)$$

式中: l 为工作臂转动产生的能量系数; v 、 T 分别为系统产生的总体势能、总体动力能。

则连杆工作臂系统的数学模型如下

$$\begin{cases} S_1 = \frac{x}{xt} \left(\frac{\omega l}{\omega \partial} \right) - \frac{\omega l}{\omega \partial} \\ S_2 = \frac{x}{xt} \left(\frac{\omega l}{\omega y'} \right) - \frac{\omega l}{\omega y'} \end{cases} \quad (4)$$

式中: S 为二连杆工作臂中的非保守作用力; t 为连杆工作臂的运行时间。

电机持续输出力矩以获取相应的向量值,并在克服电力阻力后,计算控制轨迹对象的两个关节。 c_1 、 c_2 的电机实际输出轨迹与理想轨迹间的误差,计算公式如下

$$\begin{cases} c_1 = \left| \frac{\mathbf{W}(\partial) - \mathbf{R}(y')}{S_1} \right| - \left| j \left(e_1 \frac{\omega l}{\omega y'} \right) \right| \\ c_2 = \left| \frac{\mathbf{W}(\partial) + \mathbf{R}(y')}{S_2} \right| - \left| j \left(e_2 \frac{\omega l}{\omega y'} \right) \right| \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{R}$ 为满足离心力等行动后完成的向量; $\mathbf{W}$ 为惯性向量; j 为刚度; e 为连杆产生的势能^[11]。

通过在上述章节中的人工神经网络输入二连杆工作臂两关节的理想追踪路径,获取理想的运动轨迹 C ,随后将这些误差数据传送到控制部分进行计算,以确定控制量 $\Delta(F_1 + F_2)$,使工作臂能按理想轨迹运动^[12]。

3 带电作业时绝缘斗臂车的智能远程操控

将上述计算后的控制量 $\Delta(F_1 + F_2)$ 设置为一个程序,同时,本文设计一款远程控制器 Q_{control} ,将该程序输入至控制器中,实现工作臂的远程智能操控^[13]。该控制器的设计规则如下所述。

此控制器驱动主工作臂移动,向远端发送轨迹或速度指令,远端工作臂依据这些指令进行运动或执行任务。同时,远端作业环境中的摄像头捕捉工作臂的运动状态,并将视频、图像等视觉资料传回控制中心供人员评估^[14-16]。此外,远端工作臂上的绝缘斗力传感器信息及算法计算的力反馈被送回主工作臂,使操作人员能通过主臂感知远端的接触力和轨迹跟踪状况,从而适时调整操作。

在机器人与环境互动的过程中,末端执行器的坐标空间被划分为两个相互独立的部分:位置子空间和力子空间。通过对两个子空间分别实施力控制和位置控制,实现了柔顺控制的目标。如图3的控制框图所示,选择矩阵 S 在此过程中起到了关键作用,它将机器人末端的位置空间进行分解,把末端接触问题转化为几何约束问题。

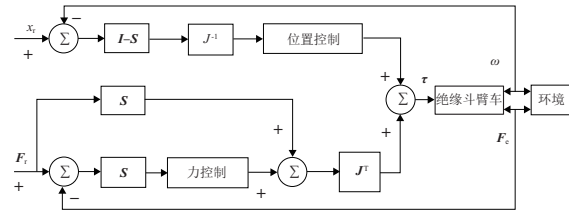


图3 力/位混合控制框架

根据以上力/位混合控制框架,采用计算从端跟踪误差来生成力反馈信息的方法^[17],其表达式如下

$$\begin{cases} z_{\Delta(F_1+F_2)} = \begin{cases} Q_{\text{control}}, & f_0 \neq 0 \\ f_0, & f_0 = 0 \end{cases} \\ Q_{\text{control}} = \varepsilon \left(\frac{1}{1+e^{c_2}} - 0.5 \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: f_0 为末端绝缘斗的力觉传感器的测量信号; ε 为用于调整未接触作业目标时力反馈信号大小的参数。

根据上述公式,远程控制器 Q_{control} 能表示从端跟踪误差 (c_2) 的大小与方向,且其输出最大值为 0.5ε 。在从端误差较小时 Q_{control} 的幅值小且反应灵敏,误差较大时 Q_{control} 则维持较高的数值。因此, Q_{control} 可向工作人员反馈包含大小和方向信息

的从端跟踪状态^[18]。

综合上述控制器的设计步骤,即可及时调整操作行为,提高了远程操控的准确度,完成配电网带电作业绝缘斗臂车的远程智能控制。

4 实验测试与分析

4.1 实验准备

本次实验旨在通过机器学习技术,实现对配电网带电作业绝缘斗臂车的远程智能控制,提高作业效率,降低人员风险,并验证该方法的有效性和可靠性。本文测试以某电力公司中的一绝缘斗臂车为研究对象,并将该斗臂车的各项参数输入至本文基于 MATLAB 软件构建的测试平台中。在测试过程中,模拟真实的配电网带电作业场景,选定本文方法与文献 1、文献 2 方法分别进行工作臂运行轨迹方向角跟踪控制精度与控制效率实验分析,首先选取的绝缘斗臂车如图 4 所示。



图 4 实验场景

其次,该绝缘斗臂车的各项技术参数如表 1 所示。

表 1 绝缘斗臂车技术参数

参数	数值
额定工作高度/m	25.2
最大工作半径/m	13.3
最大起质量/kg	454
额定载荷/kg	360
回转速度/(r/min)	0~2
回转角度/(°)	±360(连续)
支腿跨距/mm	4 110(横向),4 565(纵向)

实验平台的具体设计参数如表 2 所示。

表 2 实验参数

参数	取值
操作系统	i7 处理器、Windows10 系统
仿真软件	MATLAB2020a
数据库	numpy1.11.5
深度学习库	gensim3.6.1
内存	32 GB

为了实现配电网带电作业绝缘斗臂车远程智能控制方法,设计了绝缘斗臂车远程智能控制流程,并在 MATLAB/Simulink 中完成对各控制器算法的编写并进行封装,具体绝缘斗臂车远程智能控制模块如图 5 所示。

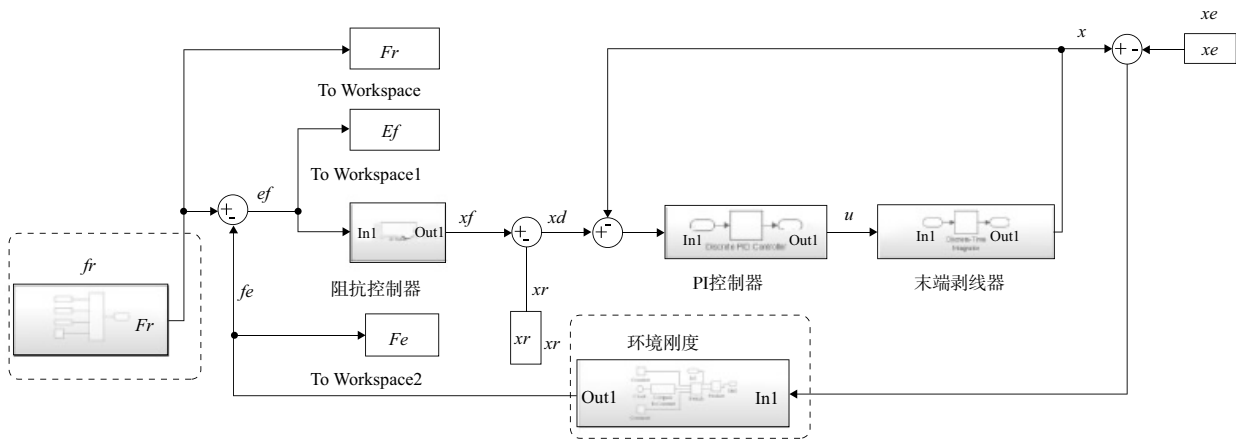


图 5 绝缘斗臂车远程智能控制

4.2 实验结果与分析

基于上述实验设定,利用本文方法与文献1、文献2方法对工作臂的轨迹跟踪控制,为避免实验的误差,故进行3次实验过程相同的测试,取3次实验的平均数值,其测试结果如下图6所示。

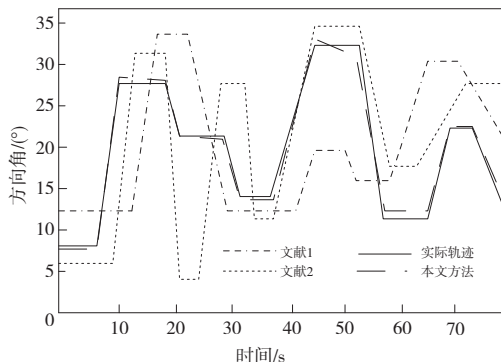


图6 轨迹跟踪控制测试结果

由图6可以看出,本文设计的基于机器学习的配电网带电作业绝缘斗臂车远程智能控制方法相较于其余两种方法,能够准确预测绝缘斗臂车的运动轨迹和状态,整体误差在可接受范围内,实现绝缘斗臂车的精确控制。

其次,为进一步保障本次测试的精准性,针对3种方法的控制效率进行测试分析,其所需时间为该工作臂从原始位置至所设定的位置,其测试结果如图7所示。

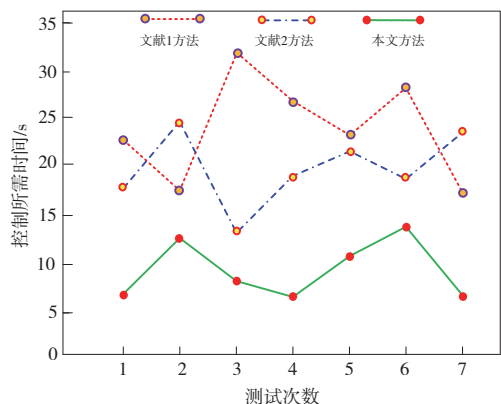


图7 控制效率测试结果

此测试结果表明本文方法能够显著提高作业效率,减少人工干预和作业时间,同时保障作业人员和设备的安全。

综上所述,随着机器学习技术的不断发展和完善,基于机器学习的配电网带电作业绝缘斗臂车远程智能控制方法,有望在更多领域得到应用

和推广。同时,也需要进一步研究和优化算法模型,提高模型的准确性和鲁棒性,以适应更复杂和多变的作业环境。

5 结语

通过集成先进的机器学习算法与远程控制控制技术,为绝缘斗臂车的操作带来了前所未有的智能化水平,实现了作业过程的精准控制、高效执行与风险降低。本研究不仅展示了机器学习在复杂作业环境中的强大应用能力,如通过深度学习模型对作业场景的理解与预测,以及强化学习对机械臂精细动作的优化控制,还验证了远程智能控制技术在保障人员安全、扩大作业范围、提高响应速度等方面的显著优势。这不仅是对传统作业模式的一次革新,更是对未来智能电网建设与维护模式的一次前瞻性探索。随着未来物联网、大数据、人工智能等技术的持续演进,基于机器学习的远程智能控制方法将拥有更加广阔的发展空间。期待通过不断的技术迭代与优化,进一步提升绝缘斗臂车作业的智能化水平,实现更高效、更安全、更可靠的配电网带电作业。同时,加强跨学科合作,将人工智能技术与电力行业的实际需求紧密结合,推动构建更加智能、绿色、韧性的电力系统,为社会经济的可持续发展贡献力量。

参考文献:

- [1] 胡松华,柳明贤,于虹. 带电作业用便携式仿生机械臂作业路径的自动化控制方法[J]. 自动化应用, 2023,64(17):15-17.
- [2] 张树欣,黄晨宏,郑真,等. 应用于远程带电作业机械臂的遥操作控制方案研究[J]. 电网与清洁能源, 2022,38(10):11-16,34.
- [3] 余光凯,刘庭,刘凯,等. 面向协作机械臂的10 kV配网带电作业安全距离研究及绝缘设计[J]. 高电压技术, 2023,49(9):3936-3945.
- [4] Chen J, Lu Y Z, Jiang H, et al. Twin model-based fault detection and tolerance approach for in-core self-powered neutron detectors[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023,34(8):117.
- [5] 杨健鸿. 绝缘斗臂车短杆作业法配网带电作业技术应用研究[J]. 电气技术与经济, 2024(2):101-103.
- [6] Guo S H, Tang M Z, Huang D R, et al. State estimation and finite-frequency fault detection for interconnected switched cyber-physical systems[J]. Science China Information Sciences, 2023,66(9):192204.
- [7] 田子建,吴佳奇,张文琪,等. 基于二阶段目标增强网络的低照度复杂环境下绝缘子故障检测方法[J]. 电

- 网技术,2024,48(3):1331-1340.
- [8] Xue L W, Hu W S, Liu G P. Learning with remote laboratories: Designing control algorithms with both block diagrams and customized C code schemes[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2022, 30(5): 1561-1576.
- [9] Fan Y D, Xu B, Wang J G, et al. Transport vibration and shock characteristics of A110 kV/40MVAVehicular mobile transformer[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2022, 17(8): 1110-1120.
- [10] Burkard J, Biela J. Design of a protection concept for a 100-kVA hybrid transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3543-3557.
- [11] 夏炳森,李翠,林文钦,等. 基于相关矩阵和动态集合覆盖的配电网故障诊断方法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2022, 34(3): 535-542.
- [12] 董杰,赵宇,李省,等. 考虑可控负荷参与的主动配电网故障分场景恢复策略[J]. 燕山大学学报, 2022, 46(2): 166-176.
- [13] 宫宇,张莲,李涛,等. ACP SO 和分层定位模型在含 PV 配电网故障定位中的应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(4): 213-221.
- [14] Fan Y D, Xu B, Wang J G, et al. Transport vibration and shock characteristics of A110 kV/40MVAVehicular mobile transformer[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2022, 17(8): 1110-1120.
- [15] Burkard J, Biela J. Design of a protection concept for a 100-kVA hybrid transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3543-3557.
- [16] 夏炳森,李翠,林文钦,等. 基于相关矩阵和动态集合覆盖的配电网故障诊断方法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2022, 34(3): 535-542.
- [17] Maharjan L, Tajyuta T, Maruyama K, et al. Development and verification test of the 6.6 kV 200 kVA transformerless SDBC-based STATCOM using SiC-MOSFET modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(12): 13687-13696.
- [18] 邓志祥,潘建兵,黄灿英,等. 基于傅里叶变换与最大关联距离相结合的配电网故障选线新方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(4): 95-103.

收稿日期:2025-03-06

(上接第 162 页)

- [17] 伍权. 超临界二氧化碳增压流化床燃煤发电系统方案及特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6698-6708.
- [18] 徐进良,田贺,孙恩慧,等. 小容量超临界二氧化碳燃煤发电系统的一维设计及回热器紧凑性分析[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 438-451.
- [19] 韩中合,郭董阳,陈东旭,等. 部分冷却二氧化碳循环燃煤发电系统热力学性能分析[J]. 热力发电, 2023, 52(10): 63-70.
- [20] 郭源东,孙恩慧,徐进良,等. 冷却器热量回收在 S-CO₂燃煤发电系统中的优化方案研究[J]. 中国科学:技术科学, 2024, 54(2): 225-235.
- [21] 杨名,段立强,佟勇婧,等. 超超临界二次再热燃煤发电系统空预器传热优化及系统性能分析[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(4): 889-897.
- [22] 张军亮,高过斌,贾树旺,等. 汽轮机高位布置燃煤发电系统调频动态特性模拟研究[J]. 汽轮机技术, 2024, 66(1): 38-44.
- [23] 扶禹,刘明,张顺奇,等. 耦合蒸汽储能的燃煤发电系统调频能力研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(10): 2986-2994.
- [24] 邢刚,郑毫楠,徐进良,等. 超临界二氧化碳燃煤发电系统锅炉耐热钢选材分析[J]. 热力发电, 2023, 52(6): 157-164.

收稿日期:2024-12-20