

考虑三相电压不平衡的光伏并网逆变器稳态误差自动化控制方法

邱桂华^{1†}, 汤志锐¹, 黄俊贤²

(1. 南方电网广东佛山供电局, 广东 佛山 528000; 2. 烟台海颐软件股份有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要:为改善光伏并网逆变器稳态控制效果,设计了考虑三相电压不平衡的光伏并网逆变器稳态误差自动化控制方法。利用数据采集系统对逆变器的运行数据进行平滑处理,构建光伏并网逆变器稳态函数,确定输出电压稳态误差和输电电流稳态误差两个控制目标,通过计算控制参数及控制器的预测结果,设计逆变器稳态误差自动化控制器,并生成相应的控制算法,利用控制算法对控制参数进行调整,实现对逆变器稳态误差的自动化控制。实验测试发现,设计的方法鲁棒性较高,且稳态误差的数值变小,控制效果较好。

关键词:三相电压不平衡;光伏并网;逆变器;稳态误差;自动化控制;控制方法

中图分类号:G642

文献标识码:A

Automatic Control Method for Steady-State Error of Photovoltaic Grid Connected Inverters Considering Three-Phase Voltage Imbalance

QIU Guihua^{1†}, TANG Zhirui¹, HUANG Junxian²

(1. Guangdong Foshan Power Supply Bureau of China Southern Power Grid, Foshan, Guangdong 528000, China;

2. Yantai Haiyi Software Limited Company, Yantai, Shandong 264000, China)

Abstract: To improve the steady-state control effect of photovoltaic grid connected inverters, an automated control method for steady-state error of photovoltaic grid connected inverters considering three-phase voltage imbalance was designed. Using a data acquisition system to smooth the operating data of the inverter, constructing a steady-state function for photovoltaic grid connected inverters, determining two control objectives: steady-state error of output voltage and steady-state error of transmission current. By calculating control parameters and predicting the results of the controller, an automatic controller for steady-state error of the inverter is designed, and corresponding control algorithms are generated. Utilize control algorithms to adjust control parameters and achieve automated control of inverter steady-state errors. Experimental tests have found that the method designed in this article has high robustness, and the steady-state error value decreases, resulting in better control performance.

Key words: three-phase voltage imbalance; photovoltaic grid connection; inverter; steady-state error; automation control; control methods

随着可再生能源的日益重视和广泛应用,光伏并网逆变器在电力系统中的地位愈发重要。然而,

在实际运行中,由于各种因素的影响,三相电压往往会出现不平衡的情况^[1]。为此,引入光伏并网逆

变器稳态误差自动化控制方法。现存的自动化控制方法虽然能够起到一定作用,但在三相电压不平衡条件下的稳态误差控制方法仍然存在诸多不足,如现存的控制方法往往只考虑单相或两相的平衡情况,而忽略了三相电压不平衡对逆变器运行的影响,从而导致控制方法的控制效果不佳。因此,在上述背景下,不少研究学者针对控制方法展开了研究,并提出了自己的想法。

文献[2]先通过高精度时间同步确保各舱段之间的协同工作,再通过优化数据传输路径,减少数据处理时间和误差,由此构建误差控制机制实现对嫦娥五号探测器多舱段的误差控制。实验结果表明,该方法的控制效果不佳。文献[3]先建立数字下变频的数学模型,并分析其不同采样率和量化精度条件下的性能,在 GPU 的作用下,生成相应的误差补偿算法,并利用该算法对数字变频下的累积误差进行实时估计,并将估计结果进行量化,实现对累积误差的控制。实验结果表明,该方法的控制时间较长。文献[4]根据传感器性能进行建模,模拟传感器在不同参数条件下的性能表现,并在模型中输入装配和调试的相关参数,根据模型预测的结果,调整传感器结构、优化装配流程和选择合适的调试参数,实现对传感器装调检测的误差控制。实验结果表明,该方法的控制成本较高。

在以往研究的基础上,设计了考虑三相电压不平衡的光伏并网逆变器稳态误差自动化控制方法^[1]。在考虑三相电压不平衡的前提下,构建相应的光伏并网逆变器稳态函数,设计相应的逆变器稳态误差自动化控制器,从而输出逆变器稳态误差自动化控制策略。本文设计的控制方法可以有效地改善光伏并网逆变器在三相电压不平衡条件下的运行性能和稳定性,保证电力系统的稳定性和电能质量^[5]。同时,本文设计的控制方法可以广泛应用于各种类型的三相光伏并网逆变器,有助于推动可再生能源的发展和运用,对相关行业的发展和促进具有一定的借鉴价值。

1 光伏并网逆变器稳态误差自动化控制方法设计

1.1 考虑三相电压不平衡的光伏并网逆变器稳态函数

三相电压不平衡是光伏并网逆变器运行过程中普遍存在的问题,对逆变器的运行性能和稳定性产生不利影响。在三相电压不平衡条件下,逆变器

的输出电压会出现不平衡,从而导致电网电流的波形畸变和电能质量下降,同时,不平衡电压还会导致逆变器中的电力电子器件过载,缩短其使用寿命。在上述背景下,构建光伏并网逆变器稳态函数^[6]。在构建的过程中,利用相关设备采集逆变器运行数据,并对采集的数据进行分析,为保证数据分析的结果,需要在数据分析前,对数据进行平滑处理。其平滑处理的具体过程如下所示:

$$\begin{cases} \xi_1 = \psi \times \xi \\ E(p) = \begin{cases} (1 - |p|^3)^3, p < 1 \\ 0, \text{else} \end{cases} \\ s = t + kr + \lambda r^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, ξ_1 表示采集的运行数据的实际数值, ψ 表示随机参数, ξ 表示采集的运行参数的观测数值, $E(p)$ 表示运行数据的加权函数, p 表示加权函数的自变量, s 表示数据光滑处理的曲线, t 、 k 、 λ 分别表示运行数据的拟合程度, r 表示运行数据点。通过上述公式,完成对数据的平滑处理,以此为基础,完成后续模型的构建。在本文的设计中,需要在考虑三相电压不平衡的前提下,构建逆变器稳态函数。三相电压不平衡是指在电力系统中,三相交流电压的幅值或相位不完全相等,存在一定的偏差。这种不平衡现象可能由多种因素引起,如电源电压不平衡、负荷不平衡、线路阻抗不平衡等^[7]。三相电压不平衡在控制光伏并网逆变器的稳态误差中发挥着巨大的作用。由此构建的光伏并网逆变器稳态函数如下所示:

$$\begin{cases} k = \frac{|U_a - U_b| + |U_b - U_c| + |U_c - U_a|}{3 |U_a|} \\ M = \sum_{i=1}^3 k \frac{I_i^2}{I_1} \end{cases} \quad (2)$$

式中, k 表示三相电压不平衡度, U_a 、 U_b 、 U_c 表示逆变器在运行过程中的 A、B、C 三相的电压值, M 表示构建的逆变器稳态函数, I_i 表示逆变器运行过程中的三相电流, I_1 表示逆变器在运行过程中的输出电流。通过上述公式,完成对逆变器稳态函数的构建。将构建的模型作为基础,为后续设计的逆变器稳态误差自动化控制器提供数据支持^[8]。至此,考虑三相电压不平衡的光伏并网逆变器稳态函数的构建完成。

1.2 逆变器稳态误差自动化控制器

利用上述构建的逆变器稳态函数,确定逆变器

稳态误差控制的目标。在确定控制目标的过程中,稳态误差控制目标主要分为两种,分别为输出电压稳态误差控制、输出电流稳态电流控制^[9]。其中,逆变器的输出电压应跟踪参考电压的变化,以减小与参考电压之间的误差。逆变器的输出电流应跟踪参考电流的变化,以减小与参考电流之间的误差。在进行控制的过程中,上述两个误差的数值越小,说明控制效果越好。在确定上述控制目标后,设计逆变器稳态误差自动化控制器^[10]。设计的控制器结构如图 1 所示。

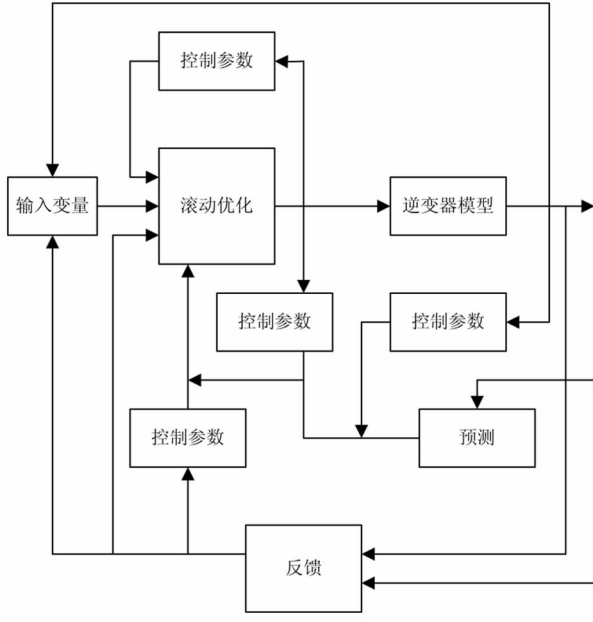


图 1 逆变器稳态误差自动化控制器

如图 1 所示,在上述控制器结构中,通过输入相关变量,对逆变器稳态函数进行控制。同时,利用控制参数对输入的变量进行优化处理,从而保证对逆变器稳态误差的控制效果^[11]。在上述过程中,对控制参数进行计算,计算时,需要先计算控制参数的特征量和偏差量,由此构建对应的控制参数。其具体计算过程如下所示:

$$\begin{cases} \beta_{ij} = \frac{\beta_{i|j} + \beta_{j|i}}{2n} \\ \eta_{ij} = \frac{(1 + y_i - y_j^2)^{-1}}{\sum_{k \neq i} (1 + y_k - y_j^2)^{-1}} \\ \beta_{i|j} = \frac{\exp\left(-x_i - x_j \frac{1}{2\sigma_i^2}\right)}{\sum_{k \neq i} \exp\left(-x_i - x_k \frac{1}{2\sigma_i^2}\right)} \end{cases} \quad (3)$$

式中, β_{ij} 表示控制参数的特征量, $\beta_{i|j}$ 、 $\beta_{j|i}$ 表示控制参数对不同输入变量的控制情况, n 表示

输入变量的数量, η_{ij} 表示控制参数的偏差量, y_i 、 y_j 、 y_k 、 x_i 、 x_j 、 x_k 表示不同的输入变量, σ_i 表示输入变量的方差。由此,计算出对应的控制参数。其具体计算结果如下所示:

$$z = \sum_i \sum_j \beta_{ij} \lg \frac{\beta_{ij}}{\eta_{ij}} \quad (4)$$

式中, z 表示计算的控制参数。通过上述公式,完成控制参数的计算。在设计的自动化控制器中,将输入的变量作为基础,利用各种控制参数对控制目标进行处理,具体的控制过程主要分为优化、预测和反馈三个部分^[12]。其中,优化部分主要通过控制参数完成。预测是通过当前的输出结果来预测未来的输出结果,在实际应用中,需要利用输入变量的实际数值,在控制参数的作用下进行预测。得到预测结果后,再通过反馈,对输出的预测结果进行校正,减少输出误差^[13]。在上述过程中,控制器的预测结果如下所示:

$$G = \frac{z [\omega(s+h) - y_0(s+h)]^2}{2} \quad (5)$$

式中, G 表示控制器的预测结果, ω 表示当前时刻输出的数值, y_0 表示输入变量的数值, s 表示随机常数, h 表示距离下一时刻的时间。通过上述公式,得到控制器的预测结果,由此完成对控制器的设计。设计的光伏并网逆变器稳态误差自动化控制器的具体描述如下所示:

$$\begin{cases} H = G + \frac{2\lambda_1 \beta_{ij} \eta_{ij}}{z^2 + 2\lambda_2 z + h_1^2} \\ h_1 = G + \frac{\lambda_3 z}{z + h_2} \end{cases} \quad (6)$$

式中, H 表示设计的光伏并网逆变器稳态误差自动化控制器, λ_1 、 λ_2 分别表示在不同运行情况下控制参数的权重参数, h_1 表示逆变器的控制目标, λ_3 表示逆变器稳态函数的随机参数, h_2 表示输入变量的传递函数。通过上述公式,得到相应的逆变器稳态误差控制器。利用该自动化控制器,通过调整相应的控制参数,对逆变器的稳态误差进行控制,为后续输出相应的控制策略奠定基础^[14]。至此,光伏并网逆变器稳态误差自动化控制器的设计完成。

1.3 输出逆变器稳态误差自动化控制策略

输出相应的逆变器稳态误差自动化控制策略。其具体控制过程如图 2 所示。

在上述控制过程中,生成的控制算法如下所示:

$$u(t)=\frac{k_1\cdot e(t)+k_2\cdot\sum e(t)+k_3\cdot de(t)}{dt}$$

(7)

式中， $u(t)$ 表示控制算法中的控制信号， $e(t)$ 表示当前变量的误差值， $\sum e(t)$ 表示逆变器稳态误差的累积值， k_1 表示稳态误差的权重参数， k_2 表示稳态误差的累积参数， k_3 表示稳态误差的微分参数。通过上述公式，得到相应的控制算法，通过该控制算法，输出相应的控制策略。利用上述算法的控制信号，对逆变器的稳态误差进行控制，当控制结果符合设定的标准时，则完成控制，若不符合，则需要调整控制参数，对其进行重新控制，保证控制的效果^[15]。

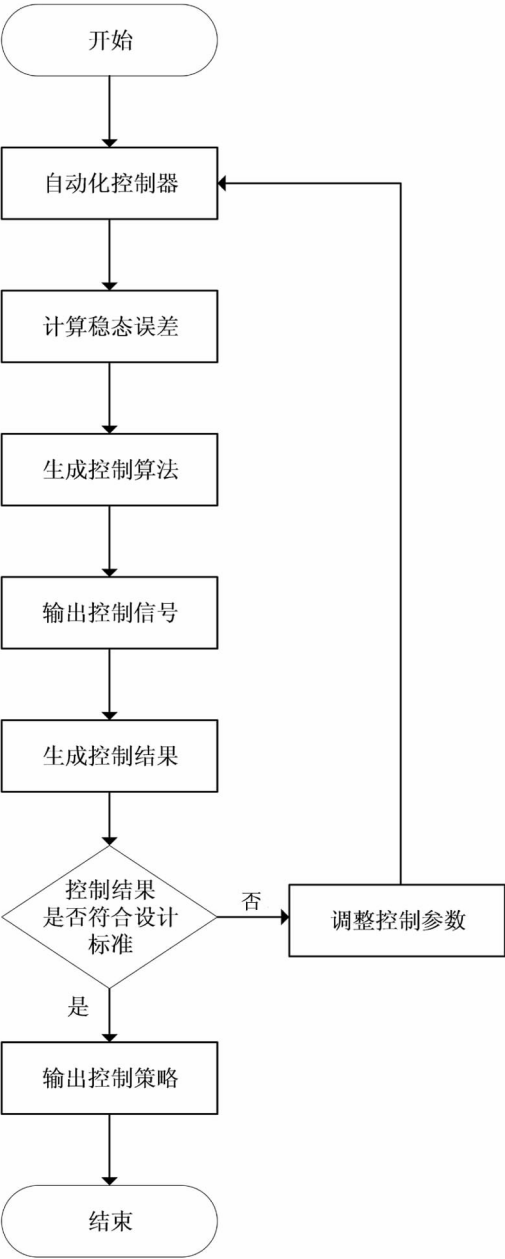


图2 光伏并网逆变器稳态误差自动化控制过程

如图 2 所示，生成相应的控制算法，并对控制参数进行修订，至此，考虑三相电压不平衡的光伏并网逆变器稳态误差自动化控制方法的设计完成。

2 实验测试

为提高本次实验结果的可靠性，设置对照实验。其中，本文设计的考虑三相电压不平衡的光伏并网逆变器稳态误差自动化控制方法为方法 1，基于自适应反馈算法的光伏并网逆变器稳态误差自动化控制方法为方法 2，基于跨层设计和滤波技术的光伏并网逆变器稳态误差自动化控制方法为方法 3。设计相应的实验，对比上述三种控制方法在实际应用中的效果。设计的实验具体如下。

2.1 实验准备

为验证本文设计的考虑三相电压不平衡的光伏并网逆变器稳态误差自动化控制方法在实际应用中的效果，进行相关实验测试。本次实验在某光伏并网逆变器实验室中进行，具体的实验环境如图 3 所示。



图3 实验环境

如图 3 所示，在上述实验环境中，配备了数据采集系统、控制器、示波器、三相电压不平衡发生器、功率源等多个设备。其中，数据采集系统能够采集逆变器运行过程中的相关数据，三相电压不平衡发生器能够设置不同情况下的三相电压值。利用上述设备，构建相应的实验环境。为保证本次实验的顺利进行，实验中，需要设置相应的实验参数。其设置的实验参数具体如表 1 所示。

如表 1 所示，根据上述设置的实验参数，进行实验测试。实验中，利用数据采集系统实时采集逆变器的运行数据，其采集的具体数据变化如图 4 所示。

表 1 实验参数

序号	实验参数	参数设置
1	逆变器额定功率	1000 W
2	逆变器额定电压	22 V
3	逆变器额定电流	42.3 A
4	三相电压不平衡发生器的额定电压	22 V
5	三相电压不平衡发生器的额定电流	42.3 A
6	三相不平衡度	1 : 1 : 1
7	不平衡相位	不同相位间相差 90 度
8	三相电压不平衡发生器的输出功率	50 Hz
9	控制器的采样频率	15 kHz
10	控制算法的权重参数	0.5
11	控制算法的累积参数	0.01
12	控制算法的微分参数	0.001

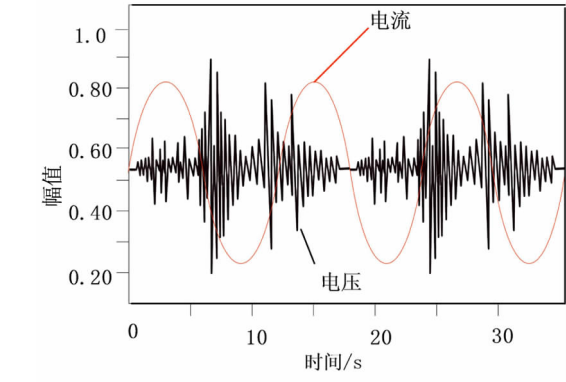


图 4 实验数据

如图 4 所示,上述采集到的实验数据包括逆变器的电压和电流变化,其中,逆变器的电流变化较为规律,电压变化的波动幅度较大。将上述数据作为本次实验数据,用于后续的实验测试。

2.2 实验结果讨论

为验证上述三种方法在实际应用中的效果,实验中,先记录逆变器的初始稳态误差,再利用三种方法对逆变器进行控制,记录控制后的逆变器误差,对比应用控制方法前后的稳态误差变化。其具体的对比结果如表 2 所示。

如表 2 所示,在上述对比结果中,将初始稳态误差作为初始值,应用三种控制方法后,方法 1 的稳态误差数值减小较多,远高于方法 2 和方法 3,由此可见,方法 1 的控制效果较好。因此,本文设计的方法在实际应用中的效果较好。

为进一步验证三种方法在实际应用中的效果,以方法的鲁棒性为评价指标,对比三种方法的性能。实验中,利用三相电压不平衡发生器设置不同

的三相电压不平衡度,记录在不同情况下三种方法的鲁棒性变化。其具体统计结果如图 5 所示。

表 2 三种方法的对比结果

逆变器编号	初始稳态误差/V	三种方法的稳态误差/V		
		方法 1	方法 2	方法 3
#01	0.42	0.12	0.31	0.38
#02	0.43	0.13	0.32	0.39
#03	0.45	0.14	0.28	0.38
#04	0.44	0.14	0.31	0.39
#05	0.51	0.13	0.33	0.37
#06	0.48	0.12	0.34	0.39
#07	0.48	0.13	0.35	0.36
#08	0.47	0.12	0.36	0.38
#09	0.46	0.11	0.32	0.39
#10	0.42	0.12	0.31	0.38

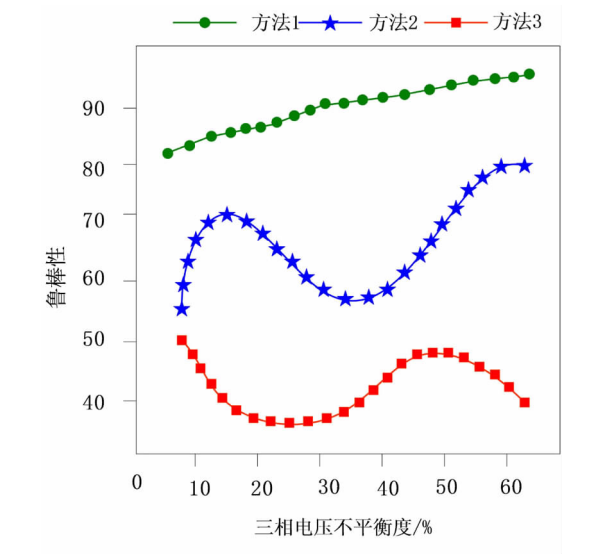


图 5 三种方法的对比结果

如图 5 所示,在上述结果中,随着三相电压不平衡度的变化,方法 1 的鲁棒性变化幅度不大,且保持上升趋势,而方法 2 和方法 3 的波动较大,且鲁棒性数值普遍较低,由此可见,方法 1 的控制效果较好。

3 结 论

针对三相电压不平衡的光伏并网逆变器稳态误差自动化控制方法进行了深入研究,能够有效地减小逆变器输出电压与参考电压之间的误差,在实际应用中具有较高的可靠性和稳定性,为相关领域的研究提供一定的参考和借鉴。

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] 兰天,程慧霞,郭坚,等. 嫦娥五号探测器多舱段间接力式校时及误差控制方法[J]. 宇航学报,2021,42(8):1027—1035.

[3] 李超,焦义文,傅诗媛,等. 基于 GPU 的数字下变频累积误差控制方法[J]. 系统工程与电子技术,2023,45(4):965—972.

[4] 王哲,于源华,孟祥凯,等. 体外凝血动态检测传感器装调检测误差控制方法[J]. 机械工程学报,2021,57(20):57—67.

[5] 远方,李东,单新文,等. 基于功率分层的微电网母线电压稳定自动化控制方法[J]. 制造业自动化,2022,44(8):140—143.

[6] 姚伟伟,王昭,林惠,等. 电动护理床升降机构的模糊 PID 自动化控制方法[J]. 机械制造与自动化,2022,51(3):236—239.

[7] 熊锐,程文峰,李世杰,等. 基于时延 Elman 神经网络的火电机组低负荷煤量平衡自动化控制方法[J]. 现代信息科技,2022,6(11):126—129+132.

[8] 王志钢,姚强,袁守彬. 应用门循环神经网络的电力铁塔机器

人攀爬速度自动化控制方法[J]. 制造业自动化,2022,44(4):150—153.

[9] 车颜泽. 基于有线通信反向传输的光纤信号系统复杂度自动化控制方法[J]. 制造业自动化,2021,43(8):109—113.

[10] 董诗绘,牛彩雯,戴琨. 基于深度强化学习的变电站巡检机器人自动化控制方法研究[J]. 高压电器,2021,57(2):172—177.

[11] 王超范,王涛,刘如帆,等. 基于粒子群算法的交直流配电网潮流优化控制方法[J]. 自动化应用,2023,64(11):211—213.

[12] 张仲勋,袁冬根,胡军. 基于自适应神经 PID 的炼铁用连续烧结点火炉温度控制方法[J]. 自动化应用,2023,64(9):54—56.

[13] 杨杰,秦耀,汪永壮,等. 永磁铁磁混合型磁浮球的改进滑模控制方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2023,50(4):200—209.

[14] 钱东升,田汉,邓加东. 面向极大尺度环件径一轴向稳定轧制的环件匀速长大状态精准闭环控制方法[J]. 机械工程学报,2023,59(10):85—95.

[15] 段玉玮,赵婉茹,陆萍,等. 基于 SMDP 强化学习的太阳能供电信息容侵控制方法[J]. 电网与清洁能源,2023,39(2):69—74.

(上接第 64 页)

3 结 论

研究了通过引入蒙特卡罗算法,为水上移动漂浮物的定位提供了一种高效的方法。还研究了通过构建漂浮物的运动模型,结合实时的海洋环境数据,利用蒙特卡罗算法进行随机模拟实现了对漂浮物位置的动态预测和定位。在实验和仿真过程中,验证了该方法的有效性和准确性。与传统的定位方法相比,基于蒙特卡罗算法的定位方法无论是在 x 向还是 y 向,定位误差都保持在一个相对稳定的低水平范围内,且整体误差水平较低。当然,研究也存在一些局限性和未来的改进方向。例如,如何进一步优化蒙特卡罗算法的变量设置,以提高定位效率和精度;如何结合其他传感器信息和数据处理技术,以实现更精确、实时的漂浮物定位等。这些问题将是我们未来研究的重要方向。

参考文献

[1] 任英杰,李传奇,王薇,等. 改进 YOLOv3 的轻量化漂浮物检测算法[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(10):170—179.

[2] 陈任飞,彭勇,李忠文. 基于持续无监督域适应策略的水面漂浮物目标检测方法[J]. 系统工程与电子技术,2023,45(11):3391—3401.

[3] 付诗文,韩星程,王黎明,等. 基于 YOLOv5-DeepSORT 融合的低帧率水面航行多目标跟踪算法[J]. 大连海事大学学报,

2024,50(1):94—101.

[4] 邢博闻,张昭夷,王世明,等. 基于深度强化学习的多无人艇协同目标搜索算法[J]. 兵器装备工程学报,2023,44(11):118—125.

[5] 宋子壮,杨嘉伟,张东方,等. 基于无锚框的红外多类别多目标实时跟踪网络[J]. 系统工程与电子技术,2022,44(2):401—409.

[6] LI J H, CHENG J X, ZHANG Y F. Underwater laser positioning of targets outside the field of view based on a binocular vision[J]. Applied Optics, 2023, 62(28): 7354—7361.

[7] 徐楼喆,李婷. 生物组织光子传输蒙特卡罗仿真加速技术研究综述[J]. 中国激光,2024,51(21):58—69.

[8] 冯辉,郭俊东,徐海洋. 面向精准目标定位的水面目标检测算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(10):38—43.

[9] 栾庆磊,常昕昱,吴叶,等. PAW-YOLOv7:河道微小漂浮物检测算法[J]. 光电工程,2024,51(4):103—116.

[10] 谭文群,曾祥君,包学才,等. 基于改进 YOLOX 的水库水面漂浮物目标检测算法[J]. 人民长江,2024,55(3):249—256.

[11] 陈铭,张淑芳,缪长蔚,等. 自恢复蒙特卡罗定位算法[J]. 光电子·激光,2023,34(1):43—51.

[12] 夏传安,樊秀峰,王浩,等. 耦合变密度地下水流降阶模型与高斯过程的蒙特卡罗模拟[J]. 水文地质工程地质,2024,51(5):1—13.

[13] 张孝春,陈林杰,周舸尧,等. 耦合烟气与蒙特卡罗的隧道火灾疏散及其优化[J]. 中国安全科学学报,2023,33(12):167—175.

[14] 上官丹骅,闫威华,魏军侠,等. 多物理耦合计算中动态输运问题高效蒙特卡罗模拟方法[J]. 物理学报,2022,71(9):16—22.

[15] 陈辉,王荆宇,张文旭,等. 基于蒙特卡罗策略梯度的雷达观测器轨迹规划[J]. 兰州理工大学学报,2024,50(5):77—85.