

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.049

并网下虚拟同步发电机并联频率无差协调控制

许天阳¹, 李峰²

(1. 三门峡黄河明珠(集团)有限公司, 河南 三门峡 472099;

2. 河南科技大学 机械工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 为进一步提高电网以孤岛状态运行下电力设备运行稳定性, 提出虚拟同步发电机(VSG) 并联频率的协同优化设计方案。在 VSG 的主动调节回路中设置二次调节及减振环节, 实现 VSG 的并联变频无差协同控制。在分析 VSG 频率无差控制机理的基础上, 通过对 VSG 的主动控制回路进行补偿, 提高 VSG 的瞬态阻尼性能和有功超调抑制能力。仿真验证表明: 使用该方案处理可以使网络频率恢复到给定电压等级, 3 个 VSG 输出有功功率比例是 1 : 2 : 3, 达到准确的有功分布效果, 能够在负载跳变时提高各 VSG 的出力动态性能。实验验证表明: 在突然加载下, 3 个 VSG 输出电流降低, 能够平稳过渡到稳态, 输出电流比仍保持在 1 : 2 : 3 左右, 该控制方法同样适合于有功负载突变的情况。

关键词: 虚拟同步发电机; 频率偏移; 无差调节; 有功精确分配; 有功超调

中图分类号: TM314 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)05-0252-05

Coordinated Control of Parallel Frequency of Virtual Synchronous Generator without Difference

XU Tianyang¹, LI Feng²

(1. Sanmenxia Yellow River Pearl (Group) Co., Ltd., Sanmenxia 472099, China;

2. School of Mechanical Engineering, Henan University of Science and Technology, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: A collaborative optimal design scheme of parallel frequency of virtual synchronous generator (VSG) is proposed to further improve the stability of power equipment operating in isolated island. The secondary adjustment and vibration reduction are set in VSG's active regulation loop realizing VSG's parallel frequency conversion and errorless cooperative control. According to the analysis on VSG's frequency-free control mechanism, VSG's transient damping performance and active power overshoot suppression ability are improved by compensating VSG's active control loop. Simulation results show that the proposed scheme can restore the network frequency to the given voltage level, and the ratio of active power output of three VSG is 1 : 2 : 3, achieving accurate active power distribution effect and improving the output dynamic performance of each VSG when the load jumps. Experimental verification shows that the three VSG output currents decrease under sudden loading, and can smoothly transition to steady state, and the output current ratio remains at about 1 : 2 : 3. The proposed control method is also suitable for the case of sudden change of active load.

Keywords: virtual synchronous generator; frequency shift; non-difference regulation; accurate distribution of active power; active power overshoot

0 引言

电网以孤岛状态运行的情况下, 如果没有大电网的支持, 孤岛系统表现出明显的低惯量、阻尼小等电气特性, 导致系统发生不稳定的波动现象, 尤其是频率稳定性问题变得更严重^[1-3]。为了提高海岛电力系统的惯性和减振性能, 文献[4-6]提出了基于虚拟同步发电机(VSG)的新思路。虚拟同步发电机(VSG)能够模仿同步电动机的动力

学行为, 赋予新能源逆变电源惯量、阻尼等优异性能, 对增强新能源消纳能力、提高海岛电网稳定运行具有重要意义^[7-8]。但是, 现有 VSG 仅对同步发电机组的一次调频进行仿真, 实质为差频因素, 无法实现二次调制。在大负载干扰下, 孤岛网络的频率会产生很大幅度的偏离, 出现越限的结果, 对高频负载的正常工作造成极大冲击, 甚至造成系统失稳的现象^[9-10]。

为了有效解决虚拟同步发电机系统一次调频

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(23B510012)

第一作者简介: 许天阳(1989—), 男, 河南郑州人, 工程师, 硕士, 研究方向为水电站自动化、运行管理等, xuzdlwtgzy@126.com。

中出现的频偏问题,目前已有许多研究人员以一次调频作为基础,开始研究电网二次调频的问题。罗琦等^[11]提出了一种基于脊线检测与变分非线性调频模式分解的控制方案,采用短时傅里叶变换方法分析波浪激励力,根据瞬时频率动态调整动力输出装置阻尼,可有效改善直驱式波浪发电装置性能。姚文龙等^[12]提出基于无模型自适应控制的电网二次调频控制策略,采用径向神经网络观测器对包含船舶负载扰动的非线性项进行观测,结合无模型自适应控制改进虚拟同步发电机控制策略。陆秋瑜等^[13]提出了一种适用于孤岛运行的永磁同步电机自动功率平衡控制策略,利用直流母线电压的动态特性实现电网同步和惯性响应,将直流电容器中的储备能量用于系统惯性支持和负荷需求响应,以降低风机飞车的风险。

根据以上研究结果,本文提出了 VSG 并联频率的协同优化设计方案,即在 VSG 的主动调节回路中设置二次调节及减振环节,由此实现 VSG 的并联变频无差协同控制。

1 VSG 电路拓扑及控制方法

图 1 给出了一种常见 VSG 拓扑及控制结构^[14]。其中, L_f 为滤波器电感值, C_f 为滤波器电容, L_{line} 为线路阻抗, u_{abc} 为输出电容三相电压, i_{abc} 为逆变器一侧输出三相电流, J_ω 为惯性因子, D_p 为虚拟同步机阻尼因子, D_q 为虚拟同步机无功下垂因子, P_m 为对 VSG 机械控制功率, Q_{ref} 为系统控制无功功率, K_q 为系统无功转动惯量, U_n 为标称电压, E 为电压电磁场幅度, θ 为电压相位。

$$\begin{cases} \frac{P_m - P_e}{\omega_n} + D_p(\omega_n - \omega) = J_\omega \frac{d\omega}{dt} \\ Q_{ref} - Q_e + \sqrt{2}D_q(U_n - U_o) = K_q \frac{dE}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

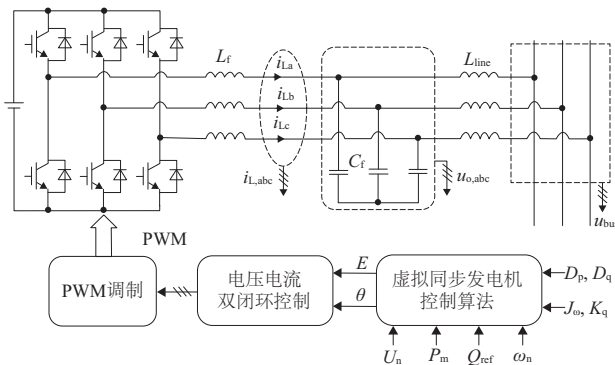


图 1 常见 VSG 拓扑及控制结构

在恒定 D_p 下,随着 J_ω 的增大,闭环极点向虚拟轴线方向移动,推断随着系统阻尼衰减后,系统的功能过调也会更大。而当 J_ω 值太小时,则对系统频率稳定性造成不利影响。但是,为了在保证系统频率稳定性满足要求的情况下,不会对整系统稳态产生不利作用,因此对 VSG 进行直接调节是不合适的。

2 VSG 并联频率无差协调控制策略

虚拟同步发电机是利用电力电子变换器和控制系统模拟同步发电机的运行特性。本文所针对模拟的发电机是用于微电网孤岛运行的,系统特性为:输出功率 7 kW~6 MW,电压功率 110 V~15 000 V,频率 50 Hz/60 Hz,固定式类型。

图 2 为所提控制策略的整体控制框,可从中看到总体控制流程^[15]。其中,总线代表了电力网络节点的角频率, u_{sec} 为 VSG 第二频率, ω_l 为标称角度频率与母线角度频率差值, v_{dcori} 为 VSG 阻尼改进项。

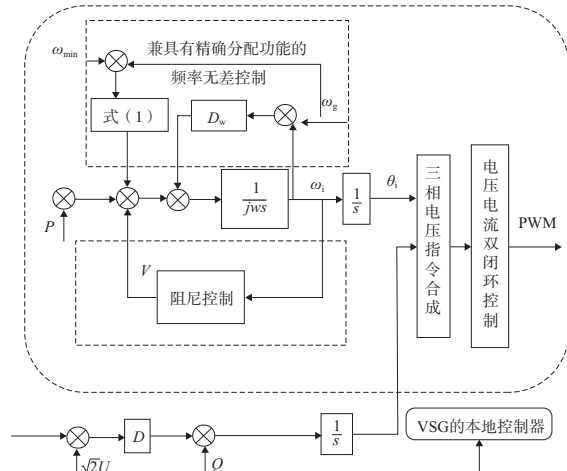


图 2 所提控制策略的整体控制框

从图 2 结果中可以看出,本文控制方案包含了两方面,一是具有准确有功功率分布的频率无差控制,二是阻尼改善控制。该方法选择分布式控制,只需在电网中共用节点频率,无需进行通信便可以实现各个 VSG 之间的独立协调控制,由此实现 VSG 的频率恢复和准确的有功分配。

2.1 VSG 频率无差控制机理

将图 2 二次调频附加项 u_{sec} 表示如下形式^[16]:

$$u_{sec} = a \int (e_\omega - b u_{sec}) dt \quad (2)$$

$$e_{\omega} = \omega_n - \omega_{bus} \quad (3)$$

式中 a 与 b 都是固定值。

在使用本文提出的控制方案时,电压同步发电机有功与频率的关系式如下:

$$\frac{P_m}{\omega_n} - \frac{P_e}{\omega_n} + D_p(\omega_n + \omega) + \frac{u_{sec}}{\omega_n} + \frac{v_{dcor}}{\omega_n} = J_{\omega} \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

由于稳定状态下的阻尼改善控制项 v_{dcor} 不发挥作用,并且在稳定状态下各 VSG 频率等于汇流排频率,通过式(5)可以得出在稳定状态下满足以下关系^[17]:

$$e_{\omega} = \frac{P_m - P_e}{J_{\omega} \omega_n s + \frac{a \omega_n}{s + ab} + D_p \omega_n} = \frac{P_m - P_e}{\omega_n (D_p + 1/b)} \quad (5)$$

当 $0 < b < 1$ 时,可以通过式(6)得到:

$$e_{\omega} = \omega_n - \omega_{bus} = \frac{P_m - P_e}{\omega_n (D_p + 1/b)} \approx \frac{P_m - P_e}{\omega_n D_p / b} \approx 0 \quad (6)$$

在稳态状态下, $e_{\omega} = 0$,说明本文方法可以使电网母线频率重新到达额定值。

2.2 改进 VSG 阻尼机理

提高 VSG 阻尼系数可以有效地降低系统的有功调节过度问题,但系统稳态性将受到一定影响。由于常规二次调频方式实质上是对各 VSG 的有功命令修正的过程,不能在负载干扰时提高系统阻尼,因而会遇到 VSG 输出有功超调的情况^[18]。

根据以上分析,本文提出了一种基于阻尼的 VSG 有功改善控制方法,该方法能够使 VSG 受到负载干扰时有效克服输出功率超调的问题。

$$v_{dcor} = \frac{\gamma s}{\beta^{-1}s + 1} \omega = \frac{\gamma}{\beta^{-1}\beta^{-1}s + 1} \omega = k_{d\omega} \frac{\beta^{-1}s}{\beta^{-1}s + 1} \omega \quad (7)$$

式中: γ 、 $k_{d\omega}$ 都为常数; β^{-1} 为时间常数。

VSG 是在控制环补偿负荷扰动期间的时间常数^[19],系统本质是在不改变 VSG 稳态性能的前提下,通过对 VSG 的主动控制回路进行补偿,从而提高 VSG 的瞬态阻尼性能,提高对有功超调的抑制能力。

3 仿真验证

通过 MATLAB/ Simulink 软件构建了 3 台 VSG 并行模拟试验,比较传统 VSG 控制过程与本文控制策略间的差异,并与所提出的控制策略进行了比较,系统主要参数如表 1 所示。

表 1 系统主要参数

参数	VSG1	VSG2	VSG3
额定容量/kVA	10	20	30
转动惯量 $J_{\omega}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1	1	1
阻尼系数 D_p	30	60	90
二次调频控制参数 a	300	600	900
二次调频控制参数 b	$10^{-5}/3$	$10^{-5}/6$	$10^{-5}/9$
阻尼改进控制参数 β	0.63	0.63	0.63
阻尼改进控制参数 $k_{d\omega}$	6 000	6 000	6 000

微电网频率在遭受系统扰动后会恢复到额定值。图 3 给出了负荷突增时控制仿真波形。根据图 3 可以看出,有功超调降低到 4.3%,3 个 VSG 的输出有功功率均能平滑过渡,表明本文控制策略在实现电网无差调频,能够抑制负载突增时的系统输出。

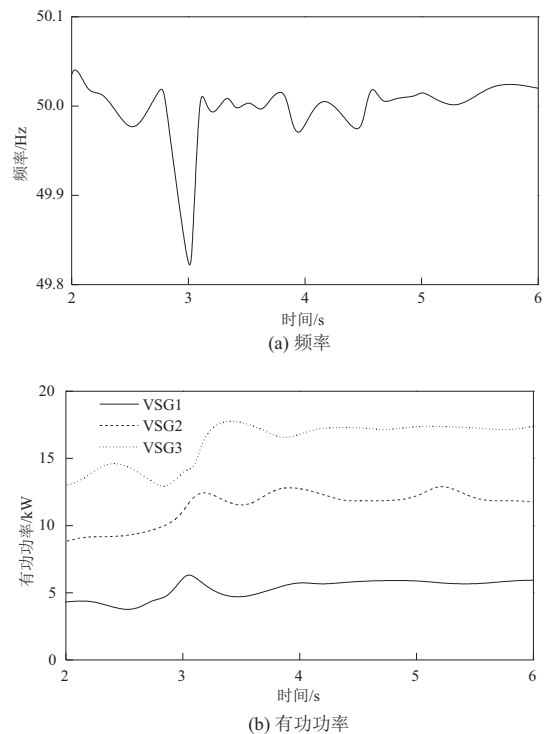


图 3 负荷突增时控制仿真波形

使用本文方案处理时,可以使网络频率回复到给定电压等级。图 4(a) 给出了负荷突减时控制仿真波形。根据图 4(b) 可以看出,3 个 VSG 的输出有功功率比例是 1 : 2 : 3,从而达到了准确的有功分布效果,而 VSG1、VSG2、VSG3 的输出均平稳完成转变,说明本文方案能够在负载跳变时提高各 VSG 的动态性能。

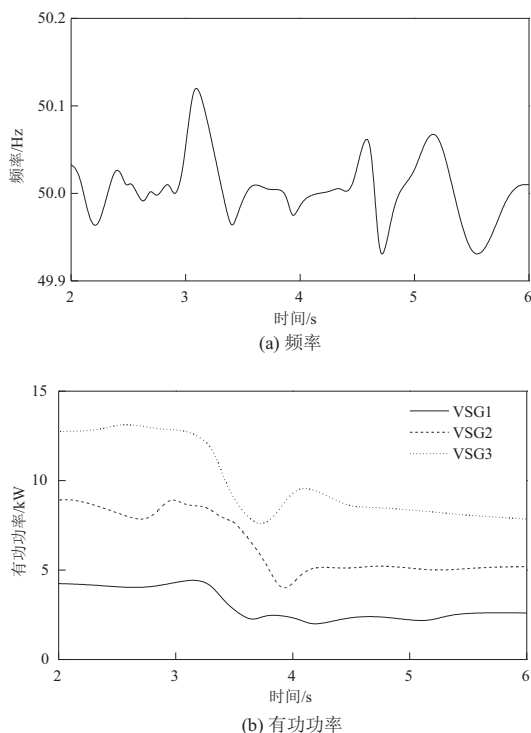


图4 负荷突减时控制仿真波形

4 实验验证

根据以上研究结果,本文构建了3台虚拟同步发电机并联试验平台,对提出的理论和算法进行验证。图5为负荷突增时输出电流实验波形。可以看到,VSG1、VSG2、VSG3可以实现稳态转换,并且3个VSG在稳定状态下的输出电流比都接近1:2:3,由此判断每个VSG都可以在二次调频的情况下额定容量承受负载作用。

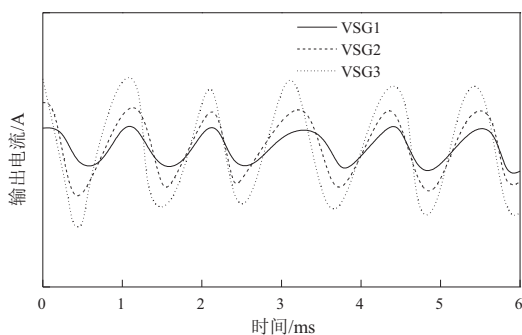


图5 负荷突增时输出电流实验波形

图6给出了负荷突减下输出电流实验波形。根据图6可知,在突然加载的状态下3个VSG的输出电流都出现了降低现象,并且能够平稳过渡到稳态,3个VSG的输出电流比仍保持在1:2:3左右,这表明该控制方法同样适合于有功负载突变的情况。

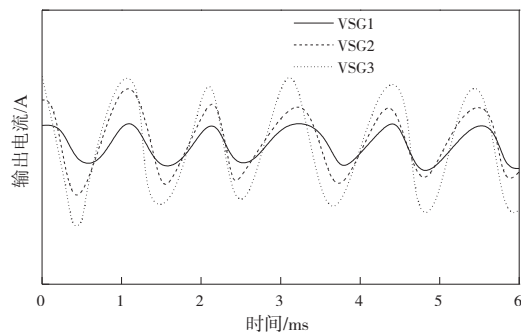


图6 负荷突减时输出电流实验波形

5 结语

本文开展并网下虚拟同步发电机并联频率无差协调控制分析,取得如下结论:

1) 仿真验证表明,使用本文方案处理可以使网络频率回复到给定电压等级,3个VSG输出有功功率比例是1:2:3,达到准确的有功分布效果,能够在负载跳变时提高各VSG的出力动态性能;

2) 实验验证表明,在突然变载下3个VSG输出电流降低,能够平稳过渡到稳态,输出电流比仍保持在1:2:3左右,该控制方法同样适合于有功负载突变的情况。

参考文献:

- [1] 王新宝,葛景,韩连山,等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023,51(5):172-179.
- [2] 张运,姜望,张超,等. 基于储能荷电状态的主从控制微电网协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022,50(4):180-187.
- [3] 马文忠,邵宇阳,王玉生,等. 面向新能源接入的电能路由器模式切换协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023,51(18):52-61.
- [4] 孙佳航,王小华,黄景光,等. 基于MPC-VSG的孤岛微电网频率和电压动态稳定控制策略[J]. 中国电力, 2023,56(6):51-60,81.
- [5] 方仍存,雷何,杨东俊,等. 变流器辅助换流的柔性切换开关拓扑与控制[J]. 电力工程技术, 2023,42(1):43-49,123.
- [6] 杨巧玲,胡方彬,张晓雨,等. 基于耦合点电压估计的多VSG无功分配控制策略[J]. 兰州理工大学学报, 2025,51(2):94-99.
- [7] 吴卓,李自成,刘江,等. 基于VSG的储能变流器JDL协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025,53(7):112-122.
- [8] 祁星强,高迪驹,吴国栋. 面向船舶微网的虚拟同步发电机并联运行功率分配控制策略[J]. 上海海事大学学报, 2025,46(1):120-127.

- [9] 和萍,王明洋,文福拴,等. 基于虚拟力矩补偿的储能虚拟同步发电机阻尼特性分析与控制[J]. 电力系统自动化,2025,49(11):102-113.
- [10] 乔宇峰,王鹏飞,杨扬,等. 具有虚拟同步机控制的大规模风电并网系统稳定性评估[J]. 电力科学与技术学报,2025,40(1):173-179.
- [11] 罗琦,杨俊华,王超凡,等. 基于变分非线性调频模式分解的直驱式波浪发电系统控制[J]. 太阳能学报,2023,44(9):476-482.
- [12] 姚文龙,裴春博,池荣虎,等. 基于无模型自适应控制的船舶微电网二次调频控制策略[J]. 电机与控制学报,2023,27(3):135-146.
- [13] 陆秋瑜,戴耀辉,杨银国,等. 适用于孤岛运行的永磁同步电机自动功率平衡控制策略研究[J]. 电工技术学报,2023,38(22):6150-6164.
- [14] 蒋小亮,李元臣,郝元钊,等. 计及新能源虚拟惯量的电力系统等效惯量评估[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(4):169-176.
- [15] 王自力,陈燕东,李雪萍,等. 孤岛微电网多虚拟同步发电机频率无差协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(7):12-23.
- [16] 葛胜升,王鹏,施凯. 基于二阶线性自抗扰的虚拟同步发电机二次调频控制[J]. 电力系统及其自动化学报,2022,34(10):81-88.
- [17] MOHAMMADI K, AZIZI E, CHOI J, et al. Asynchronous periodic distributed event-triggered voltage and frequency control of microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5):4524-4538.
- [18] 王振浩,杜成林,庞丹,等. 基于 VSG-AVDG 的多端柔性互联配电系统控制策略[J]. 智慧电力,2025,53(4):29-37.
- [19] 石荣亮,兰才华,董政,等. 基于能量重构的构网型储能 VSG 有功振荡阻尼策略[J]. 太阳能学报,2025,46(1):300-308.

收稿日期:2024-04-18

(上接第 185 页)

参考文献:

- [1] 马思远,焦佳辉,任晟岐,等. 基于注意力机制的城市多元空气质量数据缺失值填充[J]. 计算机工程与科学,2023,45(8):1354-1364.
- [2] 洪铁原,唐聃,熊攀,等. 存储系统中的局部修复阵列码模型[J]. 计算机应用研究,2024,41(1):193-199.
- [3] QIAO F. Research on wireless network transmission and building information model technologies [J]. International Journal of Information System Modeling and Design, 2024, 15(1):1-21.
- [4] 查健,陈先中,王文财,等. 基于改进的 YOLOv5s 刨花板表面小目标缺陷检测算法[J]. 计算机工程与应用,2024,60(17):158-166.
- [5] 黄虎,刘赵涵,邱庆明,等. 基于声发射检测 CSG 材料损伤演变及裂纹识别[J]. 建筑材料学报,2024,27(6):565-572.
- [6] 吴秀兰,赵雅鑫,杨晓新. 一类具有奇异项和对数源的四阶薄膜方程解的爆破和衰退估计[J]. 吉林大学学报,2024,62(3):556-564.
- [7] 李甫,戴成元,李微雨,等. 基于计算机视觉的施工现场多目标检测方法[J]. 湖北工程学院学报,2024,44(6):99-107.
- [8] 王文财,党亚光,朱翔,等. 基于 Lite-YOLOv5s 模型的刨花板表面缺陷检测方法[J]. 木材科学与技术,2023,37(3):58-67.
- [9] 何志彬,邢科家,张宏扬等. 高速铁路信号云联锁系统数据容错技术研究[J]. 铁道科学与工程学报,2024,21(7):2592-2602
- [10] 杨小琴,朱玉全. 无线传感网络误删数据匹配追踪恢复方法设计[J]. 传感技术学报,2023,36(9):1473-1477.
- [11] 张晓燕,李艳,芦碧波,等. 基于深度学习的鲕粒智能检测与特征统计[J]. 矿物学报,2024,44(1):24-32.
- [12] 李浩宇,徐平,铁瑛,等. 基于机液联合仿真模型的闸门启闭机故障注入及诊断研究[J]. 振动与冲击,2024,43(13):198-209.
- [13] 朱先远,严远亭,张燕平. 邻域信息修正的不完整数据多填充集成分类方法[J]. 计算机工程与应用,2023,59(23):125-135.
- [14] 李小青,张海博,龚先政,等. 基于级联森林的水泥熟料 f-CaO 含量预测[J]. 北京工业大学学报,2025,51(3):250-257.
- [15] 党育,何亚. 基于多尺度残差网络的隔震构造质量检测研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2025,55(1):183-193.
- [16] 周明丽. 近红外高光谱成像的建筑材料缺陷自动检测系统[J]. 自动化技术与应用,2024,43(7):30-34.
- [17] 白晓彬,吴婧姝,杨娜,等. 山西落叶松古旧木材材料性能无损检测技术研究[J]. 太原理工大学学报,2023,54(6):1101-1108.
- [18] 张枫毅,王莉华,叶文静. 基于多层级 LSTM 的铝板缺陷检测[J]. 力学学报,2023,55(11):2566-2576.
- [19] 董伟明,张兴宇. 基于计算机视觉的基坑工程关键目标识别研究[J]. 结构工程师,2024,40(6):162-172.
- [20] 林世康,侯庆文,关清尹,等. 基于巡检机器人的吊装作业场景 DPIM 算法[J]. 中国安全科学学报,2024,34(7):146-152.

收稿日期:2024-08-15