

引用格式: 王童, 安丰柱, 李丽, 等. 基于具身智能的配网带电作业质量优化技术框架与标准化路径研究[J]. 标准化学报, 2026(5): 93-98, 123.

WANG Tong, AN Fengzhu, LI Li, et al. Research on an Embodied Intelligence-based Technical Framework for Quality Optimization and the Standardized Pathway in Live-line Distribution Work[J]. Journal of Standardization, 2026(5): 93-98, 123.

## 基于具身智能的配网带电作业质量优化技术 框架与标准化路径研究

王童<sup>1\*</sup> 安丰柱<sup>1</sup> 李丽<sup>2</sup> 刘智超<sup>2</sup> 刘雨佳<sup>1</sup> 王丽娜<sup>1</sup>

(1.山东国家标准技术审评中心; 2.国网智能科技股份有限公司)

**摘要:** 【目的】针对当前配网带电作业机器人在感知精度、自主决策、人机协同与质量闭环等方面存在的问题, 构建面向作业质量优化的具身智能技术框架并规划其标准化路径。【方法】采用“关联分析—框架设计—路径规划”的研究方法, 分析具身智能与作业质量优化的内在关联, 设计包含感知、决策、执行与反馈的闭环技术架构, 提出包括标准体系构建、关键技术标准化和实施与评估标准化在内的标准化路径。【结果】构建了一个以实时质量监测与反馈为核心的具身智能作业质量优化技术框架, 并提出了多层次协同的标准化路径。【结论】为解决配网带电作业质量优化问题提供了系统的技术体系, 从标准化层面为该技术框架落地应用提供了行动指南, 对作业质量提升具有指导意义。

**关键词:** 配网带电作业机器人; 具身智能; 质量优化; 技术框架; 标准化路径

DOI编码: 10.3969/j.issn.2097-857X.2026.05.011

### Research on an Embodied Intelligence-based Technical Framework for Quality Optimization and the Standardized Pathway in Live-line Distribution Work

WANG Tong<sup>1\*</sup> AN Fengzhu<sup>1</sup> LI Li<sup>2</sup> LIU Zhichao<sup>2</sup> LIU Yujia<sup>1</sup> WANG Lina<sup>1</sup>

(1. Shandong National Standards Technical Review and Assessment Center; 2. State Grid Intelligence Technology Co., Ltd.)

**Abstract:** [Objective] To tackle problems of perception accuracy, autonomous decision-making, human-robot interaction and no quality closed loop for live-line distribution network robots, this paper intends to construct an embodied intelligence-based technical framework for quality optimization, and propose the standardized pathway. [Methods] Using the research method of “correlation analysis - framework design - path planning”, the paper analyzes the inherent intrinsic coupling relation between embodied intelligence and quality optimization. It designs a closed-loop architecture that comprises perception, decision, execution and feedback, and puts forward the standardized pathway including the construction of standards system, standardization of key technologies, and standardization of implementation and evaluation. [Results] This paper constructs an embodied intelligence technical framework for quality optimization, and proposes its standardized pathway. [Conclusion] The paper summarizes a technical system for solving the issue of

**基金项目:** 本文受国家电网公司总部科技项目“基于具身智能的电力机器人配网带电作业关键技术研究”(项目编号: 5700-202416334A-2-1-ZX)资助。

**作者简介:** 王童, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为信息技术与自动化领域标准化。

operational quality optimization in live-line distribution work, and gives the guidelines for the application from the view of standardization, which is expected to guide the quality improvement of operation.

**Keywords:** live-line distribution network robots; embodied intelligence; quality optimization; technical framework; standardized pathway

## 0 引言

目前, 10 kV配网直接面向终端电力客户, 有点多面广、结构复杂等特点, 是保障电力“配得下、用得上”的关键基础设施。配网不停电作业作为保障供电可靠性的重要技术手段之一<sup>[1]</sup>, 经过持续发展和完善, 现已成为配网检修的常规模式。配网不停电作业方法主要有绝缘手套法和绝缘杆作业法<sup>[2]</sup>, 这些方法一定程度上保障了作业人员安全, 但人员仍处于高空、高压危险环境, 劳动强度大且具有一定的作业风险。

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》提出, 推进危险岗位机器人替代。配网智能带电作业机器人能够显著提高配网不停电作业自动化水平、降低作业劳动强度, 有效地解决了供电可靠性和人工带电作业安全性之间的矛盾<sup>[3]</sup>。但受复杂工作环境因素和水平能力的限制, 配网带电作业机器人的作业水平还难以满足配网实际工作的需要, 存在以下问题:

(1) 环境感知精度不够。机器人仅依靠视觉或激光传感器获取作业目标的位置和外形等信息, 容易受到室外复杂多变的光照条件、作业背景、振动等因素的影响<sup>[4]</sup>, 无法满足识别、定位和交互控制的需求。

(2) 自主决策能力差。当前机器人的作业动作大多靠程序直接调用实现, 而不是基于对环境理解进行的自主智能决策<sup>[5]</sup>, 作业易受影响中断、鲁棒性差。机器人不能根据感知的信息对作业过程进行实时在线重新规划与纠错, 也无法自适应调整作业动作。

(3) 人机协同效率不足。操作人员依靠手持终端向机器人发送程序化的命令来控制机器人的

行为, 交互的方式单一且只能控制某一简单地动作<sup>[6]</sup>。虽然复杂的带电作业过程需要不断地操作控制, 但机器人对于各个指令的意图不能实时理解, 导致无法实现机器人的灵活、柔顺控制。

(4) 质量闭环尚未形成。目前质量管理手段主要还是作业后的人工复查, 缺少对作业过程中关键质量要素实时、量化的在线监控和质量评估, 既不能在作业过程中发现质量风险和问题, 又不能及时加以纠正。

依靠大规模的数据、强大的算力, 多模态大模型具有强大的数据融合处理和理解能力。具身智能利用智能体在真实物理世界中的直接体验学习, 使智能体能够更加理解和适应物理世界<sup>[7]</sup>。所以, 多模态大模型与具身智能相结合是提高机器人作业质量与作业效率的关键技术手段<sup>[8]</sup>。

本文首先分析具身智能技术与配网带电作业质量的关联性, 给出面向质量优化的具身智能技术框架、所涉及的关键技术, 提出该框架和关键技术的标准化路径, 推动质量优化技术框架落地应用。

## 1 具身智能与配网带电作业质量优化的关联性

### 1.1 具身智能的特性

具身智能是指一个有实体的或者虚拟的身体, 能够对身体所处的环境进行持续的、实时的“感知—决策—执行”闭环交互, 实现智能行为的系统<sup>[9]</sup>。机器人、无人机、自动驾驶汽车等实体依靠各种传感器对作业环境进行感知, 不仅能够运用算法和数据进行智能决策, 而且将智能和身体融合起来, 使各类智能系统可以像生物体一样与

环境感知、交互、执行<sup>[10]</sup>。

## 1.2 具身智能与配网带电作业质量优化的关联性

配网带电作业是典型的具身智能行为过程。工作人员在作业现场通过视觉、听觉及触觉等多模态感知能力,获取导线的位置、作业工具的状态、安全距离等信息,大脑根据经验和规则决策,进而驱动身体和手臂进行拧螺丝、安装设备等细致动作。作业的结果通过感官反馈给大脑,提供新的信息进行下一步决策。具身智能技术与配网带电作业质量优化的关联性主要体现在以下方面:

(1) 解决环境感知精度低的问题。具身智能系统利用传感器实现多重环境感知,了解作业目标(导线、绝缘子等)的相关语义、位置信息及物体物理属性。

(2) 解决自主决策能力不强的问题。具身智能利用多模态的感知反馈,理解任务执行和环境的变化情况,结合大模型推理、规划能力把复杂任务逐级分解为执行的动作序列,从被动的程序执行升级为主动的、能应对不确定性的自主作业。

(3) 解决人机协同低效的问题。具身智能系统能同时感知理解人的自然语言、手势命令、当前作业的状况等信息,深入理解操作人员的高层级意图、任务语境,直观反馈自主决策过程与作业状态,实现双向、语义共享的柔性协同控制。

(4) 解决质量闭环缺失的问题。具身智能系统在作业过程中嵌入实时的质量评判和具身反馈机制,将结果反馈到决策层面优化行为,形成“执行—评估—学习”的作业质量优化闭环,从而实现全程自动质量管控和性能优化提升。

综上,具身智能从感知、决策、执行和反馈的维度为配网带电作业质量提升提供了框架性的解决方案。

## 2 基于具身智能的配网带电作业质量优化技术框架

### 2.1 总体框架

结合以上分析,本文从“感知—决策—执行—

反馈”维度分层构建基于具身智能的配网带电作业优化技术框架(见图1),形成包括作业“前—中—后”全流程的配网带电作业质量优化闭环。

感知层是系统的信息层,负责从多方面、多层次采集环境与交互信息,为认知和决策提供信息支撑。决策层在理解指令意图的前提下将复杂任务分解为可执行的动作序列,实现高质量的环境认知和任务决策。执行层是物理执行机构,能安全精确地执行决策层动作命令,进行作业过程控制。反馈层从视觉、力学和融合特征等维度对作业过程实现实时的监测和评估,监测数据用作即时的警报、重规划,实现作业质量的实时控制;评估数据上传至数据库,用作长期的经验积累和质量提升。

### 2.2 感知层

感知层为认知和决策行为提供信息输入,包括环境立体感知、作业目标感知和交互状态感知等关键技术。环境立体感知通常采用高清摄像头、深度相机、红外热像仪等视觉设备,以及高精度点云建模的激光雷达等传感器设备。作业目标感知通过RGB图像和点云数据精确识别出场景中的导线、绝缘子、线夹、螺栓、引流线等不同类别的目标。交互状态感知包括力/力矩感知、触觉感知及声学感知<sup>[11]</sup>等,是判断虚接、过紧等质量问题的重要依据。

### 2.3 决策层

决策层主要由人工智能代理框架、人机交互及任务规划等模块组成。

(1) 人工智能代理框架为人机交互、任务规划等提供能力框架和数据支撑,包括智能代理基础框架、智能代理构建和优化及多模态数据库等关键技术。智能代理基础框架通常以行业大模型、存储、工具技能库为基础能力层,以记忆、推理规划、工具调用、感知、执行等为核心组件层,实现对机器人自主作业能力的支撑。智能代理构建和优化主要基于大模型微调、多模态检索增强生成及多智能体协同反思等方法,实现知识、经验共同指导智能代理的自主行为优化。多模态数据库包括安全规章、专业知识、操作规范、作业数据等多

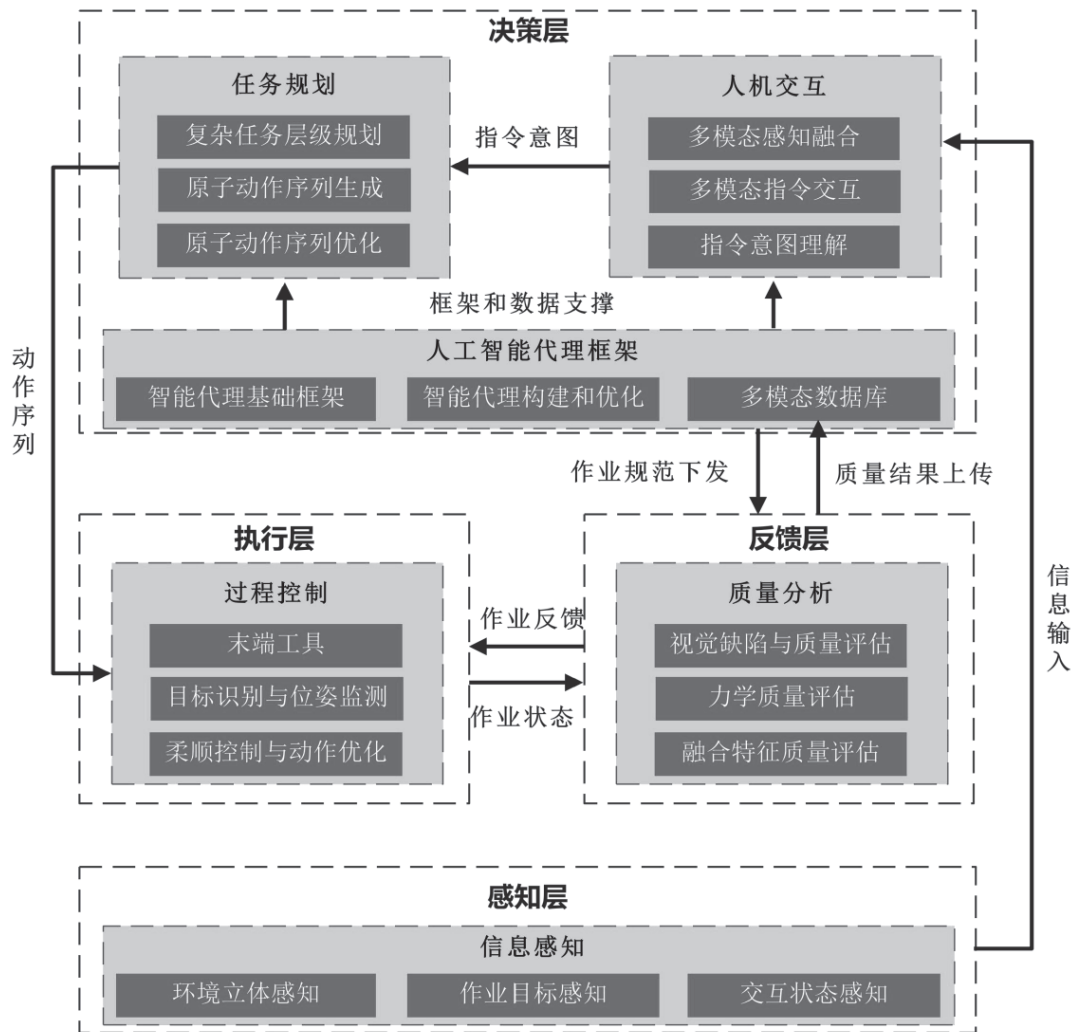


图1 基于具身智能的配网带电作业优化技术框架

模态数据知识,并通过知识图谱、深度学习等技术,提供可靠的知识检索、决策支持等服务。

(2) 人机交互模块主要包括多模态感知融合、多模态指令交互和指令意图理解等关键技术。多模态感知融合通过感知环境中的设备状态及障碍物等信息,构建带电作业场景的实体模型与关系描述,为指令的解析提供结构化、可计算的环境上下文。多模态指令交互支持语音、手势、触控、图形界面等多种输入与输出方式,为系统与用户的信息交换提供通道。指令意图理解基于大语言模型的强大语义推理与上下文理解能力,建立起从语音、手势等多模态指令到机器人任务的映射<sup>[12]</sup>。

(3) 任务规划模块包括复杂任务层级规划、原子动作序列生成和原子动作序列优化等关键技术。复杂任务层级规划将复杂任务逐层分解为元任务序列的描述与原子级任务,实现任务指令逐级细化。原子动作序列生成是在借鉴历史任务经验(来源于反馈层上传)和领域知识(来源于多模态数据库)的基础上,生成机器人可直接执行的结构化原子动作序列。原子动作序列优化(见图2)主要解决执行器误差或环境变化导致的任务失败问题,根据实时感知的状态反馈(环境、任务状态等)进行重规划判别,基于演示监督、强化学习等方法提升复杂场景中的自适应能力和执行效率。

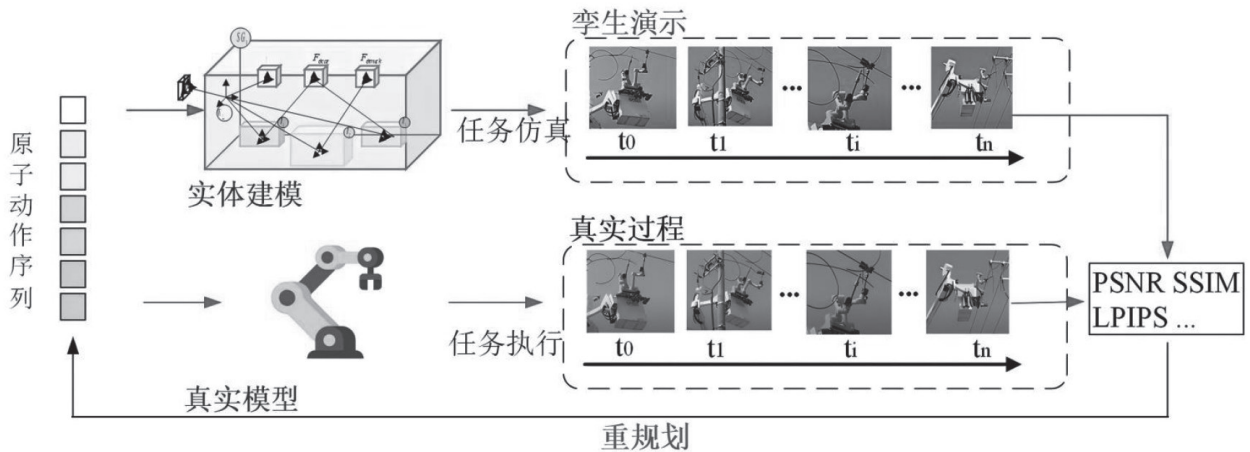


图2 原子动作序列优化的流程示意

## 2.4 执行层

执行层负责在真实环境中执行精细操作，主要包含末端工具、目标识别与位姿监测、柔顺控制与动作优化等关键技术。末端工具需适用于更换直线杆绝缘子、旁路作业和断接引流线等不同作业任务，并集成功控、电动或液压驱动接口。目标识别与位姿监测通过可见光、激光点云等数据的融合分析，确定作业目标在可行作业区域中的最优作业姿态，为机器人控制提供数据基础。柔顺控制与动作优化在获取位姿信息和作业目标信息的基础上，基于力感知与感知反馈等方法，实现机器人的高效运动和精准作业。

## 2.5 反馈层

反馈层是质量控制与优化的关键环节，包括视觉缺陷与质量评估、力学质量评估和融合特征质量评估等关键技术。视觉缺陷与质量评估对带电作业目标的位置、姿态、状态等信息进行分析，通过与质量标准对比得到基于视觉特征信息的质量评估结论。力学质量评估对带电作业目标的时频受力信息进行分析，通过与量化评估标准对比，对即将发生或正在发生的质量偏差事件进行预警。融合特征质量评估以多源信息为特征输入，结合不同任务的量化评估标准，进行综合的质量判断。例如，将视觉识别的螺栓位姿与力传感器反馈的拧紧扭矩相结合，共同判断螺栓是否已达到标准力矩。

## 3 标准化路径

为了使基于具身智能的配网带电作业质量提升技术有效落地，本文提出了渐进式的标准化路径，依次为标准体系构建、关键技术标准化、实施与评估标准化。

### 3.1 标准体系构建

标准体系是实现技术规范和推广应用的基础，主要包括以下内容：

(1) 框架和接口规范。明确“感知”“决策”“执行”“反馈”各层的任务、功能、性能范围及层间的数据、指令、控制接口协议（状态信息的表示格式、任务指令的语义、反馈数据的规范等），保证模块中的组件可基于该框架集成和交互。

(2) 质量指标具体化。把抽象的作业质量分解为具体可测、可量化的质量指标。感知精度、决策正确性、执行精度、执行效率、综合质量等指标都应界定出来。指标分为过程性指标和结果性指标，并规定每项指标的具体要求和量化方法。

(3) 安全、伦理标准的规范化。需要特别强调机器人在电网高压环境下的电磁兼容性、绝缘性、机械安全性及故障安全保护等安全性要求；对于人机协作作业，要规定人机协作权限、人机冲突化解策略、操作员任务规范等，在作业过程中时刻保

证安全可控。

### 3.2 关键技术标准化

针对技术框架的关键技术模块,制定具体的技术实施与评测标准:

(1) 多模态感知融合标准。提出视觉(可见光、红外等)、激光点云、力/力矩、声音等传感器选用的基准条件、校准方式、数据同步方式,以及多源数据融合方法性能要求(融合数据的目标识别精度、环境理解能力等)。

(2) 智能决策与任务规划标准。明确定义人工智能代理接收到自然语言或图形命令后的智能决策流程,以及关键步骤(如理解、分层、动作序列)的格式和性能要求。规定常见的典型干扰下重规划响应时间和成功率。

(3) 柔顺执行与力控标准。针对拧螺钉、接插线夹等精细动作,给出末端执行器力/力矩敏感度、控制带宽和阻抗控制参数的范围,以及在不同接触刚度环境下的自适应调整能力要求。给出标准件(如标准螺丝、线夹模型)的操作测试流程与标准。

(4) 实时质量反馈标准。规定统一的基于视觉的缺陷识别算法指标要求(如召回率、错报率)、基于力学信号的紧固质量评估模型、多特征融合质量评估的置信度计算等标准。规定质量偏离报警的触发条件、数据报送格式和联动控制指令接口等。

### 3.3 实施与评估标准化

为确保标准化技术能在实际作业中有效应用,对以下过程进行规范:

(1) 现场部署和调试操作标准化。明确作业前现场环境检查的要求、机器人的就位和标定流

程、安全围栏、人和机器人系统联调测试内容及验收要求。列出标准化的检查表,使每次作业前均处于最佳就绪状态。

(2) 作业程序(SOP)标准化。对于更换绝缘子、断接引流线等一类作业项目,编制标准化作业程序。SOP应细化到机器人要执行的每一个原子操作,并紧密结合人机交互中操作员的监督、确认、作业指令下达等环节,形成人和机器高效协作的标准操作程序。

(3) 效能评价与认证标准化。设计仿真环境测试、现场实测的多阶段测试方案。统计周期内的作业次数、平均作业时间、质量指标合格率、人工干预次数、系统故障率等数据,评估机器人整体的作业绩效,给出星级评定或者能力认证指标,为机器人设备的购置、运行、升级等提供依据。

## 4 结语与展望

针对现有配网带电作业质量优化瓶颈问题,本文给出了基于具身智能技术实现配网带电作业质量优化的技术框架及标准化路径。技术框架内的“感知—决策—执行—反馈”闭环将实时质量控制融入配网带电作业全过程,为实现自主作业的质量优化提供了一个整体性的解决方案。质量优化技术框架的标准化路径从标准体系建设、关键技术标准化、实施和评估标准化等层次为质量优化技术框架落地应用给出了指南。

随着大模型与具身智能技术的进一步发展,仍需要不断完善关键技术和标准体系,推动技术框架向自主性通用性,以及群机协同方向演进。

### 参考文献

- [1] 全国带电作业标准化技术委员会.配电网旁路作业技术导则:GB/T 34577—2024[S].北京:中国标准出版社,2024.
- [2] 牛振勇,钟晓莹,卢蓬锋,等.基于机器视觉的配网带电作业机器人障碍物识别[J].计算技术与自动化,2024,43(3):148-152.
- [3] 李长鹏,吴小钊,宋伟,等.基于主从控制技术的配网带电作业机器人研制[J].机械制造与自动化,2024,53(1):218-223.

(下转第123页)

实施的潜在风险、评估结论以及调整决策的意见建议等内容。鉴于决策后评估结论可作为决策继续实施、中止执行、终止执行或调整决策,以及决策机关推动政策落地、安排财政投入、统筹政策管理的依据,切实以评促建、以评促改,倒逼重大行政决策高质量发展。

### 3.3.3 持续改进

围绕重大行政决策全过程,开展宣贯动员、人员激励等活动,充分运用信息化系统,做好档案管

理工作。持续改进明确监督考核、自查自纠、复制推广等工作,推动重大行政决策高质量发展。

## 4 结语

标准化是科学化、民主化可操作的技术手段,标准可规定具体的操作步骤、措施和要求,可为决策机关规范高效地开展重大行政决策活动提供技术支撑,促进决策科学化、民主化、法治化。

### 参考文献

- [1] 竺乾威.公共行政学(第三版)[M].上海:复旦大学出版社,2008.
- [2] 陈益升,孔昭君.决策与科学[M].北京:科学技术文献出版社,1994.
- [3] 尚虎平,刘俊腾.公共政策全过程科学评估:逻辑体系、技术谱系与应用策略[J].学术研究,2023(3):47-57.
- [4] 席涛.美国管制:从命令控制到成本收益分析[M].中国社会科学出版社,2006.
- [5] 收益—成本分析前沿:联邦优先事项和未来研究方向[EB/OL].(2024-06-02)[2025-09-22].<https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2023/12/FINAL-SFBCA-Annual-Report-2023.pdf>.
- [6] 苏建忠,杨成韞.英国和加拿大规划监测评估的最新进展及启示[J].国际城市规划,2015(5):52-56.
- [7] 荆林波,奚祺海.国外政府制定公共政策的对比分析及其对中国的启示[J].国外社会科学,2017(6):38-46.
- [8] 尹奎杰,王箭.重大行政决策行为的性质与认定[J].当代法学,2016(1):70-78.
- [9] 习近平.在庆祝中国共产党成立100周年大会上的讲话[N].人民日报,2021-07-02(2).
- [10] 李曜坤.加快完善我国重大政策评估制度[N].中国经济时报.2022-08-25(A3).

(上接第98页)

- [4] 何成,李根,景磊,等.低光照场景下10 kV配网带电作业机器人目标识别[J].电子设计工程,2025,33(6):16-20.
- [5] 李勇鹏,王拓.基于智能控制的10 kV配网带电作业效率提升方法研究[J].中国信息化,2025(10):62-63.
- [6] 陈宇涛.配网双臂作业机器人的人机协作关键技术研究[D].合肥:中国科学技术大学,2023.
- [7] 兰泮卜,赵文博,朱凯,等.基于具身智能的移动操作机器人系统发展研究[J].中国工程科学,2024,26(1):139-148.
- [8] 李颂元,朱祥维,李玺.基座模型技术背景下的具身智能体综述[J].浙江大学学报(工学版),2025,59(2):213-226.
- [9] 许志伟,李涛.具身智能:从智能感知到生态共生的进化[J].计算,2025,1(4):20-21.
- [10] 邵宏,谢大雄.具身智能机器人技术[J].中兴通讯技术,2024,30(S1):40-44.
- [11] 王金龙.配网超声波带电检测技术及缺陷分类识别方法[J].自动化应用,2024,65(9):164-166.
- [12] 薛锦辉,苗鸿宾,贾程翔,等.制造过程中协作机器人意图理解研究[J].机械制造与自动化,2025,54(2):238-242,247.