
基于具身智能的变电站倒闸操作自主作业 方法研究

目 录

1 国内外技术研究现状.....	2
2 研究目标、研究内容与关键技术.....	3
2.1 研究目标.....	3
2.2 研究内容	4
3 创新点.....	8
4 必要性和科学性.....	8
4.1 必要性.....	8
4.2 科学性.....	9
5 经济和社会效益.....	10
5.1 经济效益	10
5.2 社会效益	11
6 应用前景.....	12

1 国内外技术研究现状

随着国家“人工智能+”行动的深入推进，具身智能与电力系统的深度融合已成为能源行业数字化转型的重要方向。2025 年，“具身智能”首次写入国务院《政府工作报告》，标志着具身智能上升为国家战略层面的关键技术方向。同年，南方电网将具身智能纳入“十五五”发展规划，明确提出要推动具身智能技术在变电巡检、倒闸操作、带电作业等核心场景的规模化应用。中国电科院联合北京人形机器人创新中心共建“电力具身智能联合实验室”，行业首发全自主电力作业具身智能解决方案，标志着电力运维正式迈入“全自主、更好用”的新阶段。

在国际方面，具身智能在电力领域的应用研究整体尚处于起步阶段，欧美等发达国家的研究主要集中在通用型机器人平台开发与基础算法优化层面，缺乏针对变电站倒闸操作这一特定场景的系统性研究。美国通用电气公司曾探索将机器人技术应用于变电站在线监测，但主要停留在数据采集与远程控制层面，未涉及自主操作。德国西门子公司在工业机器人控制领域积累了丰富经验，但其研究更多面向工业制造场景，针对电力开关柜操作的高精度、高可靠性要求尚未形成成熟解决方案。日本东京电力公司在电力设备巡检机器人方面有一定积累，其开发的巡检机器人可在变电站内自主导航并采集设备状态信息，但操作类机器人的自主决策能力和精细操作水平仍有较大提升空间，难以完成倒闸操作这类对精度和安全性要求极高的复杂任务。整体而言，国际相关研究呈现出“重硬件轻决策”的特点，在电力领域知识驱动的自主作业方法方面存在明显短板。

在国内方面，具身智能技术在电力场景的应用已取得突破性进展，形成了一批具有示范意义的标志性成果。在大模型层面，中国电科院研发的“光明电力具身智能大模型”是能源行业首个通过中国信通院测评并达到最高级“卓越级”的行业大模型，构建了覆盖“感知-决策-行动”全链条的高效协同方法，已在多个省级电网开展试点应用。南方电网研发的国内首款电力具身智能大脑“大瓦特”，采用分层大模型架构，目前已实现变电自主巡检和倒闸操作等核心任务，累计完成上万条电力操作数据的采集和 5 类典型任务规划能力的建设。在机器人装备层面，优艾智合自主研发的全球首台双臂协作巡操机器人“钧仪”，已成功进入南方电网 220

千伏变电站高压室，在实际环境中完成了开关柜巡检、按钮操作、手柄切换等复杂任务，验证了双臂机器人在狭窄空间内完成多样化操作的技术可行性。北京人形机器人创新中心发布的 XR-1 VLA（视觉-语言-动作）大模型驱动的通用人形机器人，已在电力场景中展示了面向倒闸操作的自主作业能力。

在倒闸操作技术演进方面，倒闸操作经历了从“人工逐项操作”到“一键顺控程序化操作”的第一次跃升，目前正在向“具身智能自主操作”的第二次跃升迈进。传统“一键顺控”技术通过预设逻辑和程序实现操作自动化，但仍高度依赖人工确认与干预，本质上是“预设轨迹执行”，难以应对设备状态变化、环境干扰等复杂场景。银川供电公司开发的智能成票微应用，基于倒闸操作智能成票专家模型和变电站设备运行知识图谱，实现了操作票的智能生成，开票时间缩短 80%以上，这一成果证明了知识图谱与人工智能技术在倒闸操作前序环节中的应用潜力，但该技术尚未与具身操作执行环节打通，“生票”与“操作”之间仍存在断点。南瑞继远研发的综合智能防误系统，实现了“一次设备五防、二次设备三防”的双向融合防误体系，为倒闸操作提供了全方位的安全校验能力，但同样尚未与具身智能操作机器人实现深度融合。

总之，当前变电站倒闸操作仍面临以下核心技术瓶颈：其一，现有操作机器人多依赖预设轨迹运行，环境适应性和泛化能力弱，人工干预频繁，难以应对实际场景中设备状态多样、环境条件复杂等挑战；其二，“感知-决策-行动”的端到端实时协同闭环尚未完全打通，各模块之间的信息传递存在延迟和断点，缺乏专门面向倒闸操作的完整自主作业方法体系；其三，倒闸操作特有的防误校验逻辑与具身操作过程的实时融合不足，操作过程中的安全自纠错机制有待完善，难以实现对异常情况的自主感知、判断与修正。本项目正是针对上述三大瓶颈，系统开展基于具身智能的倒闸操作自主作业方法研究，力求在方法层面实现突破。

2 研究目标、研究内容与关键技术

2.1 研究目标

变电站倒闸操作是保障电网安全稳定运行的关键环节，涉及将电气设备从一种运行状态转换为另一种运行状态，以满足负荷调度、设备检修或故障处理等需求。

按照操作目的的不同，倒闸操作可分为母线倒闸、线路停送电、主变压器投退、电容器投切等典型类别；按照操作方式的不同，可分为逐项操作、程序化操作和智能化操作等不同层级。当前，传统人工倒闸操作存在高风险、高强度、低效率等突出痛点，以 110 千伏变电站为例，一条线路的停（送）电操作需操作人员不断重复发令、复诵、操作、现场检查等步骤，平均耗时 1.5 小时以上，且操作人员需直面高压设备，安全风险始终存在。现有“一键顺控”技术虽实现了程序化的自动操作，但其本质仍是“预设轨迹+人工确认”的模式，一旦设备状态与预设条件不符或场景出现变化，操作便无法正常进行。

本项目面向变电站倒闸操作场景，以具身智能理论为指导，研究基于具身智能的自主作业方法，实现倒闸操作从“人工逐项操作”向“机器人自主作业”的能力跃升。具体研究目标如下：

（1）**构建面向倒闸操作的变电站环境多模态感知与场景理解方法**，实现对操作目标设备的精准识别、状态感知与环境建模，解决“在复杂环境中精准感知目标”的问题；

（2）**研究基于具身智能大模型的倒闸操作任务规划与自主决策机制**，实现从“理解操作任务语义”到“规划合理操作序列”再到“生成可执行动作指令”的端到端闭环，解决“让机器理解要做什么”的问题；

（3）**突破面向开关柜倒闸操作的高精度双臂协同操作技术**，实现按钮按压、旋钮旋拧、手柄切换、开关柜门开合等典型操作工序的自主、精准、连贯执行，解决“让机器精准做到”的问题；

（4）**建立融合防误逻辑的倒闸操作安全自纠错机制**，将变电站成熟的防误体系嵌入自主作业全流程，确保操作过程安全可控、结果准确可靠，解决“如何确保做得对”的问题。

上述四个目标之间形成“感知→规划→执行→校验”的完整逻辑链条，环环相扣、层层递进，共同支撑倒闸操作自主作业方法的整体实现。

2.2 研究内容

2.2.1 面向倒闸操作的变电站环境多模态感知与场景理解

针对变电站倒闸操作场景中设备密集排列、光照条件变化剧烈、操作视角受

限等复杂环境条件，研究基于多模态融合感知的环境建模与目标识别方法，为自主操作提供实时、可靠的环境与目标状态信息。

（1）多模态感知数据融合。研究可见光相机、红外热像仪、深度相机、激光雷达等多源异构传感器的联合标定与时空同步方法，实现多模态数据在统一时空基准下的对齐与融合。在此基础上，构建变电站高压室/开关柜室的三维稠密环境模型，实现操作场景的全息感知与数字化表达。采用基于注意力机制的多模态特征对齐与融合网络，动态选择可靠模态进行互补增强，有效提升在光线不足、设备遮挡、反光干扰等复杂条件下的感知鲁棒性。

（2）操作目标检测与状态判别。针对开关柜面板上按钮、旋钮、手柄、空气开关、指示灯等多样化操作元件尺寸小、外观相似、状态差异细微等特点，研究基于深度学习的目标检测与细粒度状态判别方法。通过构建包含多种光照条件、多种拍摄角度、多种设备型号的倒闸操作专用目标检测数据集，训练适用于电力场景的轻量化目标检测模型，重点突破小目标检测精度低、相似目标区分困难、状态变化微弱难以捕捉等核心难题。同时，研究基于时序特征的状态变化捕捉方法，实现对指示灯颜色切换、开关位置变化等动态状态的实时感知。

（3）操作场景动态理解与状态验证。研究基于时序感知的场景动态理解方法，建立“操作前状态记录—操作中过程监测—操作后结果验证”的三阶段感知框架。在操作执行前，记录目标设备的初始状态；在操作执行过程中，实时监测设备状态的变化过程；在操作完成后，通过图像比对、状态识别等手段验证操作结果是否正确。通过构建“感知-验证”的闭环机制，确保每步操作的执行效果均能被实时确认，为后续操作决策提供准确的状态反馈。

2.2.2 基于具身智能大模型的倒闸操作任务规划与自主决策

以中国电科院“光明电力具身智能大模型”和北京人形机器人创新中心 XR-1 VLA 大模型的技术路线为参照，研究面向倒闸操作的“任务级大脑”与“运动级小脑”分工协作机制，实现从任务指令到操作序列的自主转化。

（1）倒闸操作任务语义理解。研究基于大语言模型的电力操作任务语义解析方法，使系统能够接收自然语言或标准化调度指令形式的倒闸操作任务描述（如“110 千伏民能一回线由运行转检修”），自动解析操作任务的起始状态、目标状

态、操作约束和安全要求，生成结构化的操作任务表示。借鉴银川供电公司智能成票微应用的成功经验，结合电力调度术语词典和操作规则库，提升对电力行业专业术语和复杂操作逻辑的语义理解准确率。

(2) 基于电力知识图谱的操作序列规划。构建涵盖变电站主接线拓扑关系、设备参数信息、防误逻辑规则、标准操作票模板、历史操作经验等多维度知识的变电站倒闸操作知识图谱。采用自底向上的知识抽取与融合方法，从规程文档、历史操作票、专家经验等多源异构数据中提取实体、关系和属性，形成结构化的操作知识库。在此基础上，研究基于图神经网络与规则推理相结合的操作序列自动生成方法，给定操作任务后，系统自动在知识图谱中进行事理遍历，推理出符合逻辑的完整操作序列，并对每一步操作进行防误逻辑预校验，确保生成的方案在规则层面无错误。

(3) “大脑-小脑”协同的自主决策框架。借鉴电力具身智能机器人“大脑”负责任务级规划、“小脑”负责运动级控制的分层协同架构，设计倒闸操作的二层决策体系。“大脑”层基于具身大模型进行全局任务分解、操作顺序编排、路径宏观规划，输出结构化的动作序列指令；“小脑”层基于强化学习和实时传感反馈进行精细的运动控制与在线调整，将宏观动作指令转化为具体的关节运动轨迹。两层之间通过标准化的接口协议进行通信，实现“看到什么→理解做什么→精准执行”的毫秒级闭环，使系统能够在操作过程中根据实时感知到的环境变化动态调整动作策略。

2.2.3 面向倒闸操作的高精度双臂协同操作技术

针对开关柜倒闸操作中涉及多步骤、多动作、高精度、高力控要求的操作需求，研究双臂协同的自主操作方法，确保各项工序的精准、可靠执行。

(1) 双臂运动规划与协调控制。研究面向开关柜狭窄面板空间的双臂运动学建模与轨迹规划方法。双臂操作需要在有限的空间内完成按压、旋拧、平移、抓取、开合柜门等多种类型、不同力度的多样化动作，对双臂之间的协调性要求极高。重点解决以下关键问题：双臂在狭窄空间中的实时防碰撞规划、双臂之间的力位协同与阻抗匹配、动态环境下的轨迹在线重规划等。借鉴优艾智合“钧仪”机器人双臂

协作多线程并行作业的技术经验，设计适应倒闸操作场景的双臂协调控制策略，实现双臂操作的并行化与高效化。

（2）基于视觉伺服的精确定位与精细操作。研究基于“眼在手上”视觉伺服方法，将相机安装于机械臂末端，通过视觉反馈实现操作末端相对于目标元件的高精度定位，定位精度要求优于 0.5 毫米。针对按钮按压、旋钮旋拧、手柄拔插等不同类型的精细操作，分别设计差异化的控制策略：对于按压类操作，引入力传感器进行接触力检测与阻抗控制，确保按压力度适中、触发行程到位；对于旋转类操作，研究基于力矩反馈的旋拧控制方法，确保旋转角度精确、旋钮无损伤；对于拔插类操作，研究基于力位混合控制的柔顺插入方法，避免卡滞与碰撞。

（3）多操作工序的连贯执行与平滑切换。将倒闸操作的完整工序链条进行系统化梳理与动作编码，典型工序包括但不限于：确认设备状态→打开空气开关→开启柜门→按压操作按钮→旋拧操作旋钮→切换操作手柄→关闭柜门→核对设备状态等。研究工序间的状态传递与平滑切换方法，实现各工序之间的无缝衔接。针对操作过程中可能出现的工序中断、执行失败等异常情况，设计异常恢复与断点续作机制，确保操作流程的鲁棒性和完整性。

2.2.4 面向倒闸操作的高精度双臂协同操作技术

倒闸操作的安全性要求极高，误操作可能导致设备损坏、电网停电甚至人身伤亡事故。因此，必须建立多层次的、贯穿操作全流程的安全保障与自纠错机制。

（1）防误逻辑的多层级实时校验。参考南瑞继远“一次设备五防、二次设备三防”双向融合的防误体系架构，将防误逻辑深度嵌入自主作业的全流程。具体包括三个校验层级：在任务解析层，对操作任务的合理性进行校验，判断所请求的操作在当前运行方式下是否允许执行；在序列规划层，对生成的每一步操作指令进行防误逻辑校验，判断该操作是否违反“五防”规则；在动作执行层，对即将执行的具体动作进行实时校验，判断操作目标是否正确、操作条件是否满足。通过三层校验形成“事前校验—事中监控—事后确认”的全流程安全管控链条。

（2）操作过程异常实时检测与分级纠错。研究基于多模态感知数据融合的操作异常实时检测方法，综合利用视觉、力觉、电流等多维传感信息，实时监测操作执行过程中是否出现异常状态。将异常情况分为三个等级：一级异常为轻微偏差

（如目标微小偏移），通过视觉伺服在线修正；二级异常为中度异常（如阻力异常增大），通过调整力控参数或重规划轨迹解决；三级异常为严重异常（如目标识别错误、碰撞发生），立即暂停操作并向运维人员发出声光预警，等待人工介入。通过分级纠错策略，最大限度地保障操作安全。

（3）操作结果多维度自主确认。建立基于视觉和状态感知的双重操作结果验证方法。每步操作完成后，系统自动执行以下确认流程：首先，通过图像比对判断操作目标是否已达到预期状态（如按钮已按下、旋钮已到位）；其次，通过指示灯状态识别判断设备是否已切换至目标状态；最后，通过与上位监控系统的信息交互，核对设备状态是否与调度指令要求一致。借鉴“一键顺控”双重校核的成功经验，确保每一步操作的准确性和可靠性，为操作完成的判定提供充足依据。

3 创新点

（1）提出一种面向倒闸操作的“感知-决策-行动”端到端自主作业方法。突破传统“一键顺控”技术依赖预设操作序列、无法应对复杂场景变化的核心局限，首次将多模态环境感知、具身大模型任务规划与双臂协同精准操作纳入统一的方法框架，实现了倒闸操作从“程序化自动执行”到“具身智能自主作业”的能力跃升。

（2）设计一种融合防误逻辑的倒闸操作安全自纠错机制。将变电站成熟的防误操作体系与具身智能的自主决策能力进行深度融合，在任务解析、序列规划、动作执行三个关键阶段分别嵌入防误校验节点，构建了“事前校验—事中监控—事后确认”的全链条安全闭环，有效解决了具身智能操作中“如何确保安全”的核心问题。

（3）建立基于知识图谱与具身大模型协同的倒闸操作任务规划方法。充分发挥结构化知识图谱在规则推理和事实表达方面的优势，以及大语言模型在语义理解和泛化推理方面的优势，将两类技术进行有机协同，实现了操作票的智能生成与操作序列的自主规划，解决了传统方法“知识难沉淀、规则难泛化”的难题。

4 必要性和科学性

4.1 必要性

当前我国电力系统正处于向新型电力系统加速转型的关键时期，对电网运行的安全性和可靠性提出了更高要求。与此同时，人口结构变化导致电力行业一线运维人员持续减少，招工难、留人难问题日益突出，高危岗位的人员替代需求尤为迫切。在此背景下，开展基于具身智能的变电站倒闸操作自主作业方法研究具有突出的必要性和紧迫性。

从安全需求看，倒闸操作涉及高压设备的直接操作，是变电站运行中安全风险最高的作业之一。统计数据显示，人为因素是电力系统恶性误操作事故的主要原因，占比超过 60%。任何一次误操作都可能导致设备烧毁、大面积停电甚至人员伤亡，后果不堪设想。用机器人替代人工完成倒闸操作，可以从根本上消除操作人员直面高压设备的安全风险，是提升电网本质安全水平的治本之策。

从效率需求看，倒闸操作频次高、耗时长。全国 110 千伏及以上变电站每年数百万次的倒闸操作，累计消耗的人力资源和时间成本极为可观。以一条线路停（送）电操作平均耗时 1.5 小时计算，全国每年倒闸操作耗时数百万小时。将单次操作时间压缩至 0.5 小时以内，不仅能够大幅释放运维人力资源，还能显著缩短设备检修和故障处理的等待时间，提升电网运行效率。

从技术演进趋势看，国家能源局《“十四五”能源领域科技创新规划》明确将电力机器人列为重点攻关方向，国家电网和南方电网均在战略规划中将“智能化、无人化”作为变电运维的核心转型方向。中国电科院“光明”大模型和南方电网“大瓦特”大脑的成功研发，标志着具身智能赋能电力操作的技术路线已经得到验证。当前正处于从“技术可行”到“工程可用”的关键过渡期，亟待开展系统性的方法研究，为规模化应用奠定理论基础。

从区域发展需求看，本项目研究成果可直接服务于本省及周边地区变电站的智能化升级改造。结合本省电网特点（如部分变电站设备型号老旧、改造难度大等），具身智能操作机器人不依赖于对变电站本体的大规模改造，具有更好的适应性，尤其适合存量变电站的智能化升级路线。

4.2 科学性

本项目以具身智能理论为顶层指导框架，融合计算机视觉、机器人控制、知识工程、大语言模型等多学科理论方法，研究方案具有坚实的理论基础和清晰的科学

逻辑。

理论支撑充分。具身智能的核心理论强调智能体的认知能力不能脱离其物理身体和环境交互而独立存在，智能行为是在“感知-决策-行动”的实时闭环中涌现的。本项目的研究框架恰恰体现了这一理论精髓：研究内容 1 解决“感知”问题，研究内容 2 解决“决策”问题，研究内容 3 解决“行动”问题，研究内容 4 解决“安全闭环”问题，四者构成完整的具身认知环路。每一部分均有成熟的学科理论支撑——多模态感知融合有计算机视觉和信号处理理论支撑，任务规划有知识图谱和自然语言处理理论支撑，双臂操作有机器人学和自动控制理论支撑，安全校验有形式化验证和异常检测理论支撑——项目整体具备扎实的理论根基。

方法路径清晰。研究遵循“感知建模→任务规划→操作执行→安全校验”的递进式技术路线，每一阶段的研究输出成为下一阶段的研究输入，同时又通过反馈机制形成闭环优化。具体的，感知层的输出（设备状态、场景语义）输入决策层用于任务规划和操作序列生成；决策层的输出（操作工序列表）输入执行层用于运动控制；执行层的执行结果通过感知层的状态验证反馈至决策层用于判断是否进入下一步工序；安全校验机制贯穿全流程，在各阶段设置校验节点。各研究内容之间接口明确、逻辑严密，不存在模糊地带或冗余交叉。

技术基础扎实。本项目团队在多模态感知、知识图谱构建、智能决策等方向有良好的前期积累，已完成了面向电力设备的知识图谱原型系统开发和基础感知算法验证。合作单位在双臂机器人运动控制和具身大模型部署方面具备实验条件和技术储备。国内外已有电力具身智能机器人在倒闸操作场景的初步验证，证明技术路线具备可行性。这些前期基础为本项目的顺利实施提供了可靠保障。

5 经济和社会效益

5.1 经济效益

（1）大幅降低人力成本，优化运维投入。变电站倒闸操作频次高、消耗人力大。根据行业统计数据，一座常规 110 千伏变电站年均倒闸操作次数可达数百次，单次操作平均耗时 1.5 小时，需要至少 2 名操作人员和 1 名监护人同时在岗。具身智能机器人实现自主倒闸操作后，单次操作时间可缩短至 0.5 小时以

内，操作过程仅需 1 名远程监护人员，人力投入可压缩至原来的五分之一以下。以全省范围估算，若 30%的变电站部署本系统，每年可节省的人力成本达数千万元量级，经济效益十分显著。

（2）减少误操作损失，降低设备故障成本。人为误操作导致的设备损坏、电量损失、停电赔偿等直接经济损失巨大，单次恶性误操作的综合经济损失可高达数百万元。通过融合防误逻辑的实时校验和自主纠错机制，本项目成果可有效降低倒闸操作中的人为误操作风险。即使仅避免少数恶性误操作事件，其经济价值已足以覆盖项目研发投入。

（3）延长设备使用寿命，优化资产全生命周期管理。科学规范的倒闸操作对设备健康状态影响显著。机器人操作具有高度一致性和规范性，可避免人工操作中因经验差异或操作不当导致的设备机械损伤和电气冲击。长期来看，规范化的机器人操作有助于延长开关设备的使用寿命，降低设备更换频次，提升电网资产的保值增值能力。

（4）推动无人值守变电站建设，释放集约化效益。自主倒闸操作能力是实现变电站真正“无人值守”的关键支撑技术之一。本研究成果可与变电站智能化改造工程深度融合，推动传统变电站向“远程监控+自主操作”的模式转型，减少偏远地区变电站的人员驻守需求，带动运维组织模式的根本性变革和成本的持续优化。

5.2 社会效益

（1）提升供电可靠性，增强民生保障能力。倒闸操作时间的缩短直接意味着设备检修和故障处理停电时间的减少。以计划检修场景为例，若单次倒闸操作时间从 1.5 小时缩短至 0.5 小时，可减少停电时间 1 小时以上。对于重要用户（医院、学校、交通枢纽、大型工业企业等），这 1 小时的停电缩减具有显著的社会价值。同时，自主操作降低了误操作风险，从根本上减少了因操作失误导致的非计划停电事件，提升了电网供电的连续性和可靠性。

（2）保障操作人员生命安全，践行以人为本理念。倒闸操作是电力行业公认的高危作业，操作人员在高压设备区域面临的触电、电弧灼伤、机械伤害等风险客观存在。用机器人替代人工完成倒闸操作，将操作人员从危险区域物理隔

离，使人员从“直面高压风险的操作者”转变为“远程安全的监护者”，是“机器替人”社会价值最直观的体现。

（3）赋能电力人才培养，推动知识传承模式革新。当前电力行业面临一线运维人员老龄化与年轻人员经验不足的双重挑战，传统的“师带徒”经验传承模式周期长、效率低。本项目的技术方法可通过机器人操作的知识沉淀和标准化，将倒闸操作经验固化为可复用、可传播的知识体系，辅助新员工培训和技能认证。同时，自主操作系统的引入可使运维人员从繁重的重复性操作中解放出来，将精力集中于更高价值的故障分析、异常处置和技术管理等工作，推动运维人员的技能结构向更高层次转型。

（4）支撑“双碳”目标实现，服务新型电力系统建设。随着新能源的大规模接入，电网的调度操作频次和复杂性持续上升。具身智能操作机器人的推广应用可增强电网对频繁操作场景的适应能力，支撑新能源的灵活并网与优化调度，间接服务于清洁能源消纳和“双碳”目标的实现。本项目的研究成果也将为电力行业智能化转型提供示范样板，推动人工智能等前沿技术与能源行业的深度融合，为“数字中国、智慧能源”战略贡献行业力量。

6 应用前景

本研究成果具有明确的应用场景和广阔的推广空间。从近期的直接应用来看，项目成果可首先应用于 110 千伏及以上变电站的倒闸操作场景，覆盖日常负荷调度操作、设备计划检修倒闸、故障处理应急操作等典型业务类型。在技术成熟后，可进一步拓展至配电开关柜操作、GIS 设备操作、高压隔离开关操作等其他操作类场景，形成面向电力系统多元化操作需求的完整技术谱系。

从行业需求侧来看，市场空间广阔、需求迫切。国家电网和南方电网均在大力推动变电运维的“智能化、无人化”转型，“十四五”期间规划了大量变电站的智能化改造项目。中国电科院与北京人形共建的“电力具身智能联合实验室”已启动实训推广计划，南方电网“大瓦特”具身操作机器人已完成实际场景验证，均表明电网企业对具身智能操作机器人存在迫切且真实的需求。据行业分析预测，未来五年电力具身智能相关设备和解决方案的市场规模可达百亿元级别。

本项目的技术成果可与企业的现有产品体系无缝对接，形成从“核心算法→软件平台→机器人系统”的完整技术栈，具有良好的产业化前景和商业转化价值。

从技术可迁移性来看，本项目的核心方法具有跨场景、跨行业的通用潜力。倒闸操作自主作业所突破的多模态场景理解技术，可迁移至设备巡检、状态监测等感知类任务；基于大模型的任务规划方法，可推广至调度指令解析、操作票生成等决策类任务；双臂协同操作技术，可应用于配网带电作业、应急抢修等高难度操作任务；防误安全校验框架，可为其他高危工业场景（如化工、矿山等）的机器人自主作业提供安全设计范式。因此，本项目不仅在电力行业内部具备全场景推广价值，还有望为更广泛的工业机器人自主作业领域提供关键技术支撑。

综上所述，本项目的顺利实施将为推动变电站倒闸操作从“有人操作”向“无人操作”转变提供系统的理论方法和关键技术支撑，具有良好的经济效益、社会效益和广阔的应用前景。