第 52 卷 第 7 期：2986-2997 高电压技术 Vol.52, No.7: 2986-2997
2026 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20260632

物理-知识双约束下的电力具身智能作业决策技术

谈元鹏[1,2]，宋　睿[1,2]，张　鹏[1,2]，莫文昊[1,2]，王　征[1]
（1. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192;
2. 电力系统智能认知与分析北京重点实验室，北京 102209）

摘　要：针对配电柜顺控设备状态突变易引发越级操作、无人机巡线轨迹偏移易导致安全距离不足，且现有方法多将安规作为事后检查、无法实现全过程前置防控的问题，提出物理-知识双约束下的电力具身智能作业决策技术。将空间几何、力学平衡与电气安全要求转化为可计算的物理一致性约束，将操作时序、合规标准与设备限位转化为业务安规硬约束；构建“约束校验—扰动分级—局部重规划—动作预校验—状态确认”闭环决策回路，结合动态约束提示工程实现无需重训练的自适应动作修正。经 Isaac Sim、AirSim 仿真及现场验证，配电柜顺控场景 200 次随机扰动下正确响应率达 94.5%；无人机巡检 53 次现场测试任务完成率为 98.11%、影像可用率为 92%，无需事前点云扫描或示教飞行。该方法将物理可行性与业务合规性前置至动作生成与执行环节，为电力具身智能作业提供了可校验的安全决策路径。

关键词：电力具身智能；物理一致性约束；业务安规约束；配电柜顺控；无人机巡检

Electric Power Embodied Intelligent Operation Decision-making Technology Under Dual Constraints of Physics and Knowledge

TAN Yuanpeng[1,2], SONG Rui[1,2], ZHANG Peng[1,2], MO Wenhao[1,2], WANG Zheng[1]
(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
2. Beijing Key Laboratory of Intelligent Cognition and Analysis for Power Systems, Beijing 102209, China)

Abstract: This paper proposes a physics-knowledge dual-constraint decision-making technology for power-embodied intelligent operations, targeting the prominent problems in practical scenarios. Sudden state changes of equipment during power distribution cabinet sequential control easily cause skip-level operations, and trajectory deviation in UAV line inspection may lead to insufficient safety distance. In addition, existing methods mostly implement safety specification verification in a post-event manner, which fails to realize full-process proactive safety prevention. The proposed method transforms spatial geometry, mechanical balance, and electrical safety requirements into computable physical consistency constraints, and converts operation timing, compliance criteria, and equipment limits into rigid safety specification constraints. A closed-loop decision loop consisting of constraint verification, disturbance classification, local replanning, action pre-verification, and state confirmation is constructed. Combined with dynamic constraint prompt engineering, adaptive action correction is achieved without model retraining. Verified by Isaac Sim, AirSim, and field experiments, the method obtains a correct response rate of 94.5% under 200 random disturbances in cabinet control scenarios and achieves a task completion rate of 98.11% and an image availability rate of 92% in 53 UAV field tests, without point cloud scanning or teaching flights. The proposed method pre-embeds physical feasibility and operational compliance into action generation and execution, providing verifiable safety decision support for power-embodied intelligent operations.

Key words: power embodied intelligence; physical-consistency constraint; operational-safety constraint; distribution cabinet sequential control; UAV inspection

0　引言

具身智能(embodied intelligence，EI)是指拥有物理载体的智能体，通过“感知—认知—决策—行动”闭环与物理环境动态交互，在交互中自主学习、适应环境并完成复杂任务的智能系统[1-3]。其核心是智能源于身体与物理世界的交互，而非单纯依赖抽象计算，是人工智能从“虚拟数字领域”向“物理现实领域”延伸的重要技术分支[4]。近年来，具身智能与机器人基础模型、物理仿真、强化学习和世界模型等方向深度融合，逐渐成为当前中美人工智能

基金资助项目：国家电网有限公司科技项目(520900260043-237-ZN)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (520900260043-237-ZN).

博弈的核心战略赛道与未来产业竞争制高点[5-6]。

2025 年 8 月，国务院印发《关于深入实施“人工智能+”行动的意见》，提出推动人工智能与经济社会各行业各领域广泛深度融合，加快形成新质生产力[7]。2025 年 9 月，发改委、能源局联合发布《关于推进“人工智能+”能源高质量发展的实施意见》，明确将具身智能列为能源领域人工智能技术突破的核心方向，提出 2030 年在能源关键场景落地应用[8]。2026 年 3 月，工信部、发改委、国资委等 8 部门联合印发了《关于推动具身智能产业创新发展的行动方案》，要求推动具身智能产业创新发展，加快形成新质生产力，为电力具身智能技术研究与应用提供了政策指引和方向遵循[9]。

当前电力运维检修作业的行业痛点并非单一的“自动化程度不足”，而是集中体现在动作生成后的安全闭环缺失：在配电柜顺控中，断路器、隔离开关或接地刀闸状态被扰动后，原定后续动作可能转化为越级操作或带负荷操作；在无人机巡线中，导线走向变化、杆塔接近和姿态扰动可能导致安全距离不足或影像连续性下降；在带电操作中，末端轨迹可达并不等同于电气距离合规。电网运维岗位普遍具有“苦脏险累”特性，高危、高精度作业仍较多依赖人工[10-11]。现有电力机器人应用缺少把设备状态、物理边界与强制性安规共同前置到动作生成环节的共性方法，导致不同业务场景重复开发，且难以满足电力作业低容错要求。

国内外学者已围绕电力具身智能相关技术开展大量研究。在通用具身智能向电力领域适配方面，王宏伟等人将变电站复杂的设备拓扑关系与光照、视距和视角进行融合[12]，自动获得高质量巡检点位，提升了变电站巡检机器人的效率，但未考虑电力设备状态变化对巡检点位的影响；Hui Zhang 等人则考虑无人机续航、充电巢位置等因素[13]，设计了杆塔巡检场景的最优飞行策略，保障往返巡检任务安全高效开展，但同样未考虑电力杆塔实时状态的影响；柏光瑞、Zhishuo Li 等人考虑电力线路细长、纹理弱等特点构建识别模型[14-15]，研发了复合型机器人，提高了线路带电作业的识别稳定性，但带电作业中的安全校验问题未考虑。李端姣等人提出了基于人工智能稀疏大模型的电力作业关键技术[16]，考虑了私域数据安全，但对作业本身的安全性并未深入探索；窦嘉铭等人提出电力系统具身自主智能架构初步构想[17]，通过类脑决策架构实现对物理环境的在线持续学习，但缺乏具体的实施路径；周远翔等人探索了大语言模型智能体在电力设备运维作业中的应用，但未给出智能体与具身智能装备的结合路径[18]。

在物理一致性建模领域，通过数字孪生技术，考虑了电力设备关键材料绝缘性能[19]、空间电荷分布[20]和电-磁-热-流体多物理场耦合等因素[21]，将电力设备的健康状态映射至虚拟空间，实现了物理设备与数字模型的像素级同步及物理量的实时同步，但数字空间中设备状态的变化未与具身智能决策过程形成闭环。Guo 等人利用阻抗/导纳模型、力关系、时间逻辑等约束机器人更好地遵循真实物理行为，提高了机器人在真实物理交互环境下的可控性与稳健性[22-24]，但未引入电力物理约束，难以适用于电力设备运维作业。

在业务安规融合方面，Meng 等人提出了一种基于虚拟现实的机器人远程操作系统[25]，通过在虚拟环境中提前预演操作，将部分安全规范以操作预演和流程约束的形式嵌入机器人操作流程中，但该系统主要面向虚拟现实环境下的人机交互与远程操作，尚未实现复杂行业安全规程与具身智能自主决策过程的深度融合。Ravichandran Z 等人将预定义的安全规则通过大语言模型嵌入机器人当前环境中，再基于时序逻辑控制，确保机器人作业符合安全规范，但其安全规则仍以通用机器人约束为主，尚未覆盖电力作业中强专业性、强约束性的复杂安全规程[26]。Immordino G 等人构建了专门用于无人机系统安全评估与合规检查的检索增强语言助手[27]，支持飞行步骤的合规性校验，但如何将其嵌入视觉—语言模型(vision-language model，VLM)到视觉—语言—动作模型(vision-language-action，VLA)的端到端决策流程中，仍是当前研究的难点。

上述研究虽在感知、认知、规划或执行等单一环节取得进展，但仍缺少面向具体作业风险的统一闭环。对配电柜顺控而言，需要回答“设备状态突变后，如何识别原流程失效并生成合规修正动作”；对无人机巡检而言，需要回答“无需事前点云和示教航线时，如何依据线路拓扑实时保持安全距离与巡检视场”；对带电操作而言，需要回答“如何在动作下发前同步校验空间、力学和电气边界”。现有数字孪生研究侧重状态映射[19-21]，物理引导规划研究侧重通用机器人可行性[22-24]，安规融合研究侧重预演、通用规则护栏或合规问答[25-27]，尚未形成“物理可行性校验—业务安规校验—修正动作生成—

执行后状态确认”的闭环链路。

围绕上述细化问题，本文将研究范围聚焦于配电柜顺控与无人机巡检两类代表性任务。主要贡献包括：1）在已有数字孪生状态映射和通用物理引导规划研究基础上，构建面向空间几何、力学平衡和电气安全的物理一致性约束，并将其由状态描述转化为动作下发前的可计算校验条件；2）借鉴规则护栏与合规检查思路，将步骤时序、合规度和设备操作限位转化为业务安规硬约束，设计双约束融合决策与扰动分级反思机制；3）将双约束嵌入VLM-VLA级联回路，通过动态约束提示工程(Prompt)实现“局部重规划—动作预校验—状态确认”，并在配电柜顺控和无人机巡检场景中开展仿真分析与现场验证。

1 物理—知识双约束融合技术架构

针对配电柜顺控中的状态突变风险和无人机巡线中的安全距离、视场保持问题，本文提出物理-知识双约束融合技术架构。与已有面向单一巡检点生成[12]、航线优化[13]、状态映射[19-21]或通用规则护栏[25-27]的研究不同，本文的新增环节是：将设备状态、空间几何、交互力、电气距离和安规步骤统一转化为动作级校验条件，并在指令下发前执行双约束审核；当环境扰动导致原计划失效时，校验结果继续驱动局部重规划，而非用于事后告警。

该架构采用感知层、模型层、决策层和执行层闭环协同设计，以电力具身智能模型为核心，将物理一致性约束和业务安规约束嵌入“感知输入—任务拆解—动作生成—执行反馈”链路。感知层和执行层沿用具身机器人常见的数据采集与本体控制能力；模型层与决策层之间新增双约束校验、扰动分级和反思重规划通路。整体架构如图1所示。

具体而言，感知层主要通过RGB相机、激光雷达、触觉传感器、电位采集模块、惯性测量单元等设备，实时获取电力机器人、无人机等具身智能体的位姿、设备三维坐标、电气距离、环境力/力矩、作业状态等多源数据，为约束计算提供底层状态输入[28-30]。

模型层主要包含电力具身智能模型以及其他多模态感知模型。其中，电力具身智能模型由VLM和VLA级联构成，融合多模态感知特征、本体运动机制、电力作业语义与实操先验知识，让智能体通过物理身体与电力系统环境实时互动，实现自主感知、任务编排与精准执行[28-29,31-32]。

决策层包含物理一致性约束子模块、业务安规约束子模块和融合优化求解器。已有数字孪生工作主要完成物理设备到数字模型的状态映射[19-21]；本文进一步把映射结果组织为空间几何、物理属性、安规标签和作业拓扑，并转化为可计算、可校验、可强制执行的动作约束。候选指令只有同时通过物理可行性与业务合规性校验后才能进入执行层；校验失败时，约束结果返回模型层触发局部重规划。

执行层主要负责接收合规决策指令，驱动机器人关节、无人机飞控、作业工具等电力具身智能体本体完成位姿调整、操作执行、路径跟踪等动作[28,33]。同时，实时监测动作执行结果与约束满足度，将偏差回传至决策层迭代优化，形成“感知—认知—决策—执行—反馈”的闭环管控。

在新型电力系统建设中，根据差异化的业务需求，电力具身智能的执行层本体形态呈现显著的多样性[34]。如图2所示，在电力设备运行检修中，已

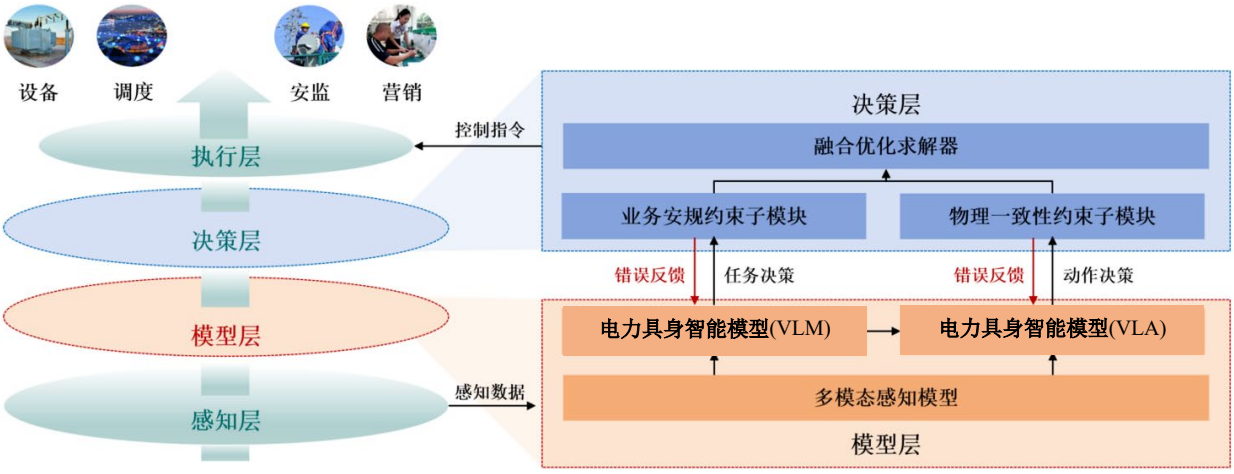


图1 物理-安规双约束融合技术架构

Fig.1 Architecture of physics-safety dual-constraint fusion

逐步采用轮式机器人(wheeled robots，WR)、履带机器人(tracked robots，TR)、固定基座机器人(fixed-base robots，FBR)、四足机器人(quadruped robots，QR)、吊轨机器人(rail-mounted robot，RMR)以及无人机(unmanned aerial vehicle，UAV)等进行设备的智能巡视、带电检修作业，极大地提升了一线作业人员的工作质效。在电网运行调度中，操作机器人(operation robots)已经可以替代人工完成表计读取、指示灯校核、开关和压板操作等工作，为新型电力系统中的一键顺控提供了技术支撑与能力补充[35]。在电力供应链管理中，自动制导车辆机器人(automated guided vehicle，AGV)则被广泛地应用在电力物资仓储管理中，使得“黑灯作业”成为可能。在营销客户服务中，人形机器人逐步在电力企业的少人化乃至无人化营业厅中使用，通过调用后台的电费电价、业扩报装、故障报修以及政策咨询等知识库，为客户提供自然、便捷的交互服务。此外，电力企业还不断推陈出新，以业务为导向，自主研发新型仿生机器人。例如，国网天津电科院刘力卿等人还采用了类鱼型的仿生机器人(biomimetic robots，BR)潜入大型变压器的绝缘油中，对其内部工况与故障隐患进行巡视分析。



图 2　电力具身智能的执行层本体形态

Fig.2　Ontological form of the execution layer for power system embodied intelligence

2　物理一致性与业务安规双约束设计

本章区分了基础约束来源与本文新增设计。空间距离、静力学映射、电气安全距离及时序规则均有相应理论或规程基础；本文贡献在于将其统一改写为可由世界模型实时计算的动作级接口，并分别形成单项硬边界、汇总评分和决策回传信号。这样既保留基础规律的可追溯性，也便于在后续仿真与现场验证中逐项检查约束是否按预期触发。

2.1　面向电力具身智能的物理一致性约束实现

面向电力具身智能的物理一致性约束，是指智能体的运动、交互和操作行为应满足空间几何、经典力学与电气绝缘等客观规律。空间距离、静力学传递和绝缘安全距离均属于机器人规划与电力作业中的基础约束[22-24,35-38]。本文并非重新定义这些基础规律，而是将其适配为电力具身智能动作生成前的统一校验接口，并按空间几何、力学平衡和电气安全 3 个维度组织约束。

2.1.1　空间几何一致性约束

空间几何一致性约束用于限制智能体与杆塔、开关柜、电缆和带电部件之间的距离，避免空间碰撞并保持最小安全间距。式(1)采用机器人避障规划中常用的欧几里得距离与非负惩罚函数表达[22-24,36]；本文的适配点在于，将电力设备关键部件集合和作业最小安全间距作为世界模型实时输入，使约束能够参与动作预校验。其表达式为：

$$C_{\mathrm{geo}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{p})=\sum_{i=1}^{N}\max((0,d_{\min}-\left\|\boldsymbol{x}_i-\boldsymbol{p}_j\right\|_2)) \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{x}$ 为智能体关节或末端执行器的三维坐标向量；$\boldsymbol{p}$ 为电力设备关键部件的三维坐标向量；$d_{\min}$ 为电力作业最小物理安全间距；$\|\cdot\|_2$ 为二范数欧几里得距离；N 为场景内设备关键部件总数[36]。当智能体与设备距离小于最小安全间距时，式(1)输出正向惩罚值，且距离越小惩罚越大；距离满足要求时惩罚值为 0。

2.1.2　力学物理一致性约束

力学物理一致性约束用于限制机器人关节力

矩和末端交互力，防止机械过载或设备形变损坏。式(2)来源于机器人静力学中的雅可比转置力映射关系[22,37]；本文将其作为配电柜操作动作下发前的力学可行性判据。其表达式为：

$$C_{\text{mesh}}(\boldsymbol{\tau},\boldsymbol{F})=\left|\boldsymbol{\tau}-\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}\right|\le\varepsilon_{\tau} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{\tau}$ 为机器人关节输出力矩向量；$\boldsymbol{J}$ 为机器人雅可比矩阵，实现关节运动与末端运动的映射；$\boldsymbol{F}$ 为末端执行器与设备的交互力向量；ε_{τ} 为力矩允许误差阈值。由式(2)可知，力学物理一致性约束可确保关节力矩与末端交互力满足静力学传递关系，保证机械输出在设计量程内，避免过载失效。

2.1.3 电气物理一致性约束

电气物理一致性约束用于校验带电作业中智能体与带电体之间的实际距离，避免因绝缘距离不足引发放电风险。式(3)依据相应电压等级下的规程安全距离设置边界[38]；本文将实测距离与规程阈值接入统一校验接口。

$$C_{\text{elec}}(\boldsymbol{U},\boldsymbol{d})=\max(0,d_{\text{req}}(\boldsymbol{U})-d_{\text{act}}) \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{U}$ 为作业点额定电压等级；$d_{\text{req}}(\boldsymbol{U})$ 为电压 $\boldsymbol{U}$ 对应的规程要求电气安全距离；d_{act} 为电力具身智能体与带电体实际测量距离。由式(3)可知，当实际距离小于规程要求距离时输出惩罚值，电气物理一致性约束可强制智能体保持电气安全间距。

2.1.4 物理一致性总约束

在单项约束分别可计算的基础上，将 3 类子约束加权融合为统一物理约束条件。式(3)属于本文为融合决策构造的汇总表达，用于形成候选动作的物理一致性评分；单项硬边界仍需逐项满足，不能由加权结果相互抵消。

$$\begin{aligned}C_{\text{phy}}(\cdot)=&\lambda_{\text{geo}}C_{\text{geo}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{p})+\\&\lambda_{\text{mesh}}C_{\text{mesh}}(\boldsymbol{\tau},\boldsymbol{F})+\lambda_{\text{elec}}C_{\text{elec}}(\boldsymbol{U},\boldsymbol{d})\end{aligned} \tag{4}$$

选取 λ_{geo}=0.4、λ_{mesh}=0.3、λ_{elec}=0.3 为空间几何、力学平衡、电气安全 3 个维度约束权重。总约束值越小，候选动作的物理一致性越高。本文采用层次分析法确定汇总评分权重，并邀请 5 位具有 10 年以上变电运维与带电作业经验的现场专家开展两两比较，构建判断矩阵并完成一致性检验。权重仅用于候选动作排序和风险侧重点配置；任一单项硬边界不满足时，动作仍判定为不可执行。

2.2 面向电力具身智能的业务安规约束实现

业务安全规程是电力作业的强制性规范。有研究已探索通过操作预演、时序逻辑护栏和检索增强助手实现规则检查[25-27]。本文的新增工作是：将电力安全工作规程、带电作业规范和设备操作流程进一步拆解为步骤时序、合规度和操作限位 3 类动作级约束，并将其作为候选指令下发前必须满足的硬约束，而非独立的事后检查工具。

2.2.1 安规步骤时序约束

电力作业必须按规定流程执行，禁止跳步、错步和逆序操作。式(5)借鉴时序逻辑和规则护栏的序列校验思想[25-27]，采用指示函数累计步骤不匹配次数；本文将该校验结果直接用于顺控任务的中止或局部重规划。其表达式为：

$$C_{\text{step}}(\boldsymbol{S}_t,\boldsymbol{S}^{*})=\sum_{t=1}^{T}(\delta(\boldsymbol{S}_t\ne\boldsymbol{S}_t^{*})) \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{S}_t$ 为 t 时刻实际执行步骤；$\boldsymbol{S}^{*}$为安规标准步骤序列；T 为作业总步骤数；$\delta(\cdot)$为指示函数，步骤不匹配时为 1，匹配时为 0。通过累计步骤违规次数，安规步骤时序约束强制智能体严格遵循安规作业流程。

2.2.2 带电作业安规合规度约束

带电作业安规合规度约束用于综合评价全流程安规满足程度。式(6)采用加权指标汇总方式，将多项安规检查结果归一化为合规度评分；本文将该评分与单项硬边界结合，用于识别需要中止或重规划的候选动作。其表达式为：

$$R_{\text{safe}}=1-\frac{1}{M}\sum_{k=1}^{M}\omega_k I(c_k<c_k^{*}) \tag{6}$$

式中：M 为安规考核指标总数；ω_k 为第 k 项指标权重；c_k 为实际指标值；c_k^{*} 为安规阈值；$I(\cdot)$为 0-1 指示函数。指标不达标时记为 1。合规度越接近 1，表示候选动作满足的安规指标比例越高；涉及强制性条款时，仍按单项硬约束处理。

2.2.3 设备操作限位约束

设备操作限位约束用于限制开关柜、刀闸等操作的角度、速度和行程。该类边界来自设备机械限位和现场操作要求；本文将其结构化为动作生成后的预校验条件，以避免语义层任务正确但连续动作越界。其约束边界如下：

$$\begin{cases}\theta_{\min}\le\theta_t\le\theta_{\max}\\ v_{\min}\le v_t\le v_{\max}\end{cases} \tag{7}$$

式中：θ_t 为 t 时刻操作角度；$\theta_{\min}\sim\theta_{\max}$ 为安规角度范围；v_t 为 t 时刻操作速度；$v_{\min}\sim v_{\max}$ 为安规速度范围。

2.2.4　业务安规总约束

融合时序、合规度和限位约束，形成式(8)所示的业务安规总约束。

式(8)是本文面向动作预校验构造的业务安规汇总接口。与仅输出合规问答或事后告警方式[25-27]不同，该接口直接决定候选指令是否有效，并将失败原因回传给局部重规划模块。

$$\begin{cases} C_{\text{safe}}(\cdot)=C_{\text{step}}(\boldsymbol{S}_t,\boldsymbol{S}^*)+(1-R_{\text{safe}}) \\ \text{s.t.}\begin{cases}\theta_{\min}\le\theta_t\le\theta_{\max}\\ v_{\min}\le v_t\le v_{\max}\end{cases}\end{cases} \tag{8}$$

式中：安规约束为硬约束，要求 $C_{\text{safe}}(\cdot)=0$，不满足则指令无效。

3　双约束融合决策与扰动反思机制

双约束融合决策机制由前述动作级约束自然推导得到：候选动作既要降低定位与操作误差，又必须满足不可违背的物理边界和业务安规。因此，本文将通用约束优化框架适配到电力具身智能决策过程，以任务误差最小为目标，将式(4)的物理一致性约束和式(8)的业务安规约束同时接入序列二次规划求解器，实时筛选合规控制指令。其总优化目标函数为：

$$\begin{cases} L(\cdot)=L_{\text{task}}(\cdot)+\lambda_1 C_{\text{phy}}(\cdot)+\lambda_2 C_{\text{safe}}(\cdot) \\ \text{s.t.}\begin{cases}C_{\text{geo}}(\cdot)\le 0\\ C_{\text{mesh}}(\cdot)\le 0\\ C_{\text{elec}}(\cdot)\le 0\\ C_{\text{step}}(\cdot)=0\\ R_{\text{safe}}\ge 0.99\end{cases}\end{cases} \tag{9}$$

式中：$L_{\text{task}}(\cdot)$为任务损失函数，表征电力具身智能体定位/操作误差；λ_1=0.3、λ_2=0.7 分别为物理、安规约束惩罚权重，安规优先级更高。目标函数在最小化作业误差的同时，强制满足物理一致性与业务安规双重约束，保障作业安全与精度。

以人形操作机器人配电柜面板操作仿真场景为验证载体，针对作业过程中的可修正偏差，本文基于动态约束提示词工程(Prompt)构建约束信息向电力具身智能模型的反向传递通路，驱动视觉—语言模型(VLM)与视觉—语言—动作模型(VLA)生成满足物理一致性与业务安规双约束的修正动作，形成“约束引导—任务重规划—动作预校验—指令执行—状态确认”的全闭环修正机制，从源头规避通用具身智能动作生成的“幻觉”问题，保障作业连续、安全、合规。其中，物理一致性约束主要用于校验空间碰撞、力学可行性和电气安全距离；业务安规约束主要用于校验操作步骤、作业合规性和设备操作限位，二者共同作用于任务重规划、动作预校验和指令执行环节。修正流程的核心实现逻辑如下所述。

1）动态约束 Prompt 结构化生成

世界模型整合双约束校验结果、设备目标修正状态、动作物理/安规边界条件，按标准化模板生成动态约束 Prompt。Prompt 核心包含 3 类关键信息：①修正目标，明确待恢复的设备运行状态，例如将 10 kV 进线断路器复位至分闸位；②物理约束边界，限定操作行程、交互力度、无碰撞运动路径等物理可行条件；③安规刚性约束，明确修正动作的时序规范、电气安全距离、状态确认流程等合规要求。图 3 展示了 10 kV 配电柜顺控异常恢复场景下，从“合闸位”重新修正至“分闸位”的子任务流程、机器人简化轨迹、关键约束与完成判据。

2）VLM 子任务重拆解与语义化编排

VLM 接收动态约束 Prompt 后，在原有配电柜顺控作业时序框架内插入修正子任务，将其拆解为符合双约束的精细化操作语义指令。以断路器复位典型场景为例，VLM 将修正任务拆解为：①机械臂移动至断路器操作位安全区域；②灵巧手精准抓握断路器操作手柄；③按规范力矩向下拨转手柄至分闸位；④松开手柄并通过视觉核验断路器分闸状态与指示灯信号，全程严格遵循约束边界执行。

3）VLA 动作生成与双约束预校验

VLA 依据 VLM 输出的语义化子任务，结合世界模型提供的物理约束参数，生成机器人关节运动轨迹、灵巧手抓握姿态与操作力度等连续动作指令。所有动作指令需经世界模型二次双约束预校验，确认无物理碰撞、无安规违规后，方可下发至机器人本体执行，杜绝修正动作引入新风险。

4）闭环状态核验与反思迭代

修正动作执行完毕后，VLM 通过机载视觉重新采集设备状态数据，与目标修正状态进行相似度比对；比对结果达标则确认修正完成，接续执行原顺控作业流程；若未达标则重新触发反思修正流程，直至状态满足要求或判定为不可恢复偏差。

该修正机制全程依托提示工程实现双约束对具身模型的轻量化引导，无须对 VLM 与 VLA 进行重新训练，可快速适配多场景配电柜顺控作业与多类型扰动，工程化推广价值显著。同时，全流程嵌

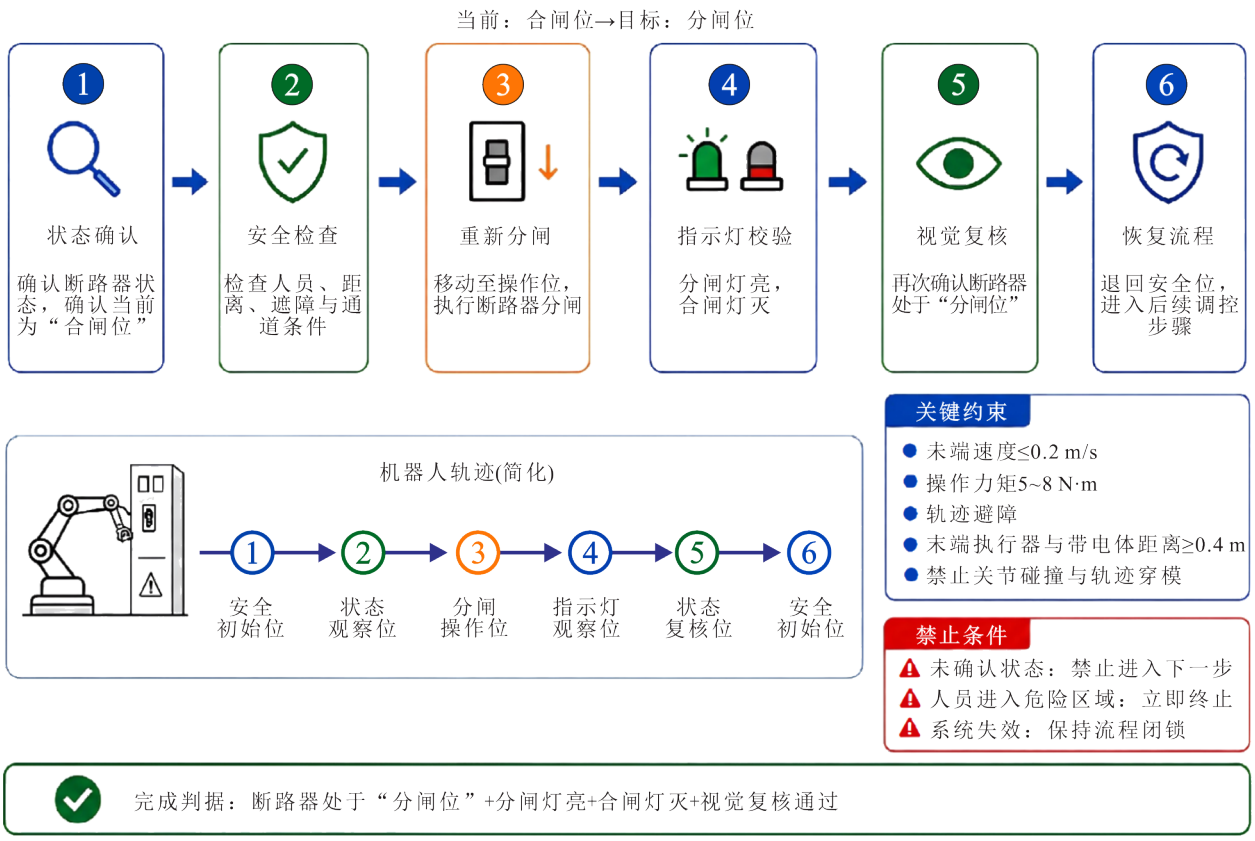


图 3 动态约束 Prompt 结构示例

Fig.3 Example of dynamic constraint Prompt structure

入的双约束校验规则，使机器人所有自主修正动作均处于物理可行、安规合规的刚性边界内，大幅提升电力具身智能作业的安全性与复杂扰动下的抗干扰能力。

4 仿真分析与现场验证

为验证所提方法的等效性与可靠性，本文在配电柜程序化顺控和配电线路无人机巡检两个场景中开展分层验证。首先，检查世界模型中的设备几何、状态变量和控制接口能否等效表达现场对象；其次，通过典型扰动和控制参数对比，验证单项约束及闭环决策是否按预期触发；最后，在现场平台统计任务级指标。仿真分析用于约束逻辑验证和参数整定，现场验证用于检验真实环境下的可用性。

4.1 配电柜程序化顺控作业仿真与现场验证

为验证本文所提出的双约束融合决策方法，整体机制如图 4 所示。

本文基于 Isaac Sim 构建操作仿真场景，并按照现场设备结构设置变电柜、分合闸按钮、指示灯、操作面板、作业空间和多视角相机，见图 5。模型中的按钮位置、操作状态和接触反馈分别对应现场的目标定位、设备状态识别与末端操作结果；仿真控制接口对应机器人目标识别、路径规划、手臂运动控制、按钮按压和结果反馈过程。该仿真用于验证约束触发逻辑和闭环流程，不替代现场平台验证。

实验以 10 kV 配电柜程序化顺控作业为核心场景，开展双约束协同驱动的电力具身作业闭环反思机制验证。基于北京人形机器人创新中心研制的天轶轮臂式机器人平台，天轶轮臂式机器人搭载移动底盘、7 自由度轻量化协作机械臂、11 自由度强脑灵巧手，头部配置高分辨率 RGB-D 相机，可实现作业场景环境感知与操作对象的局部精细化观测，动作定位精度可达±1.5 mm，满足配电柜程序化顺控操作的精度要求。实验中所述电力具身智能模型与电力设备世界模型在配有英伟达 RTX4090 GPU 的上位机上运行，机器人运控模型等则在 RISC-V 芯载具身智能终端上运行。

在顺控验证中，本文将扰动划分为 4 个等级，并依据双约束校验结果制定差异化反思决策。该分级不是一般性的状态描述，而是融合决策机制的直接输出：物理可行且安规合规时继续执行；存在可修正违规时触发局部重规划；物理不可行时暂停并

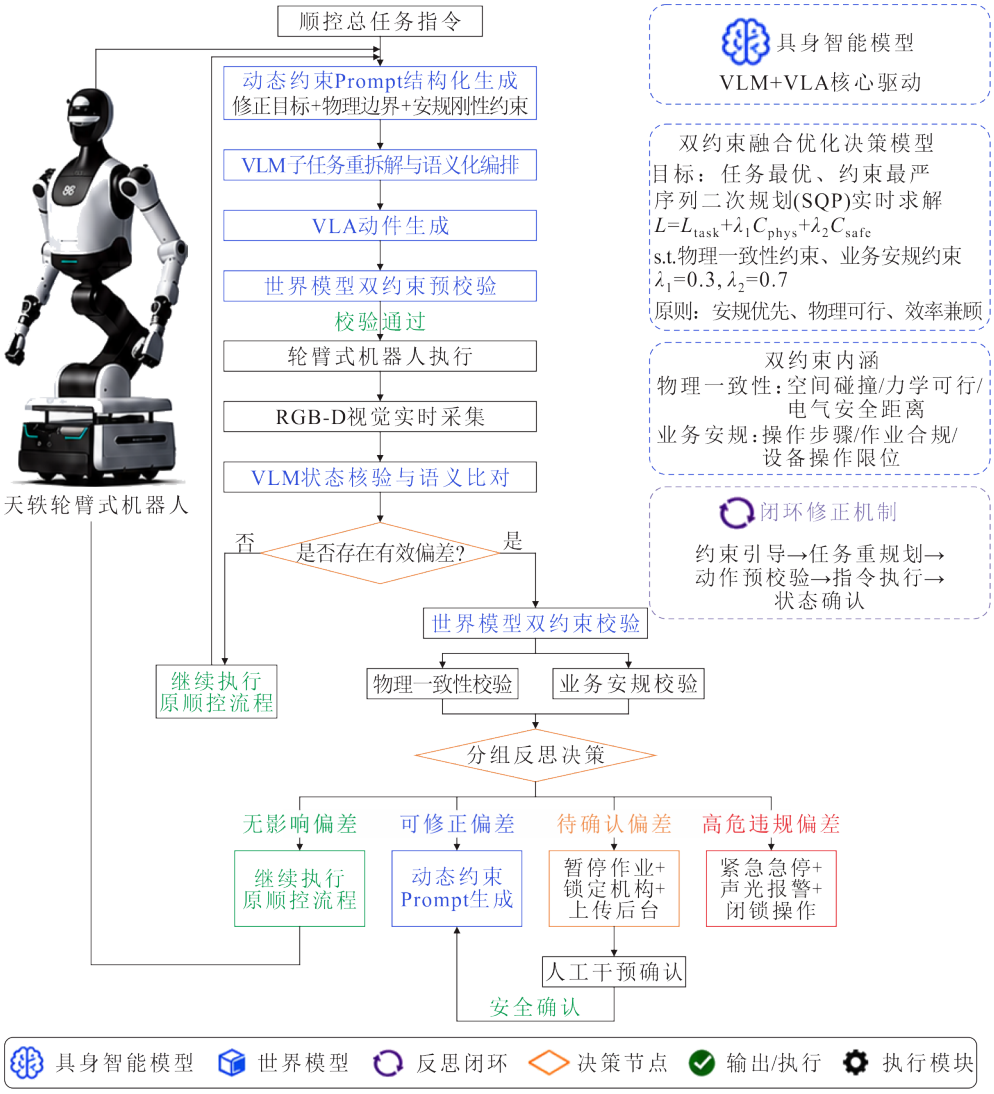


图 4　双约束融合决策机制示意图

Fig.4　Schematic diagram of the dual-constraint fusion decision-making mechanism

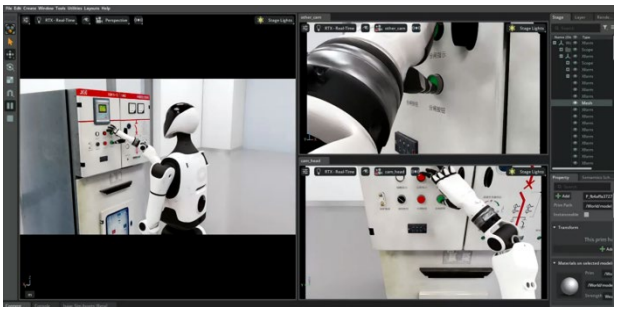


图 5　基于 Isaac Sim 的配电柜程序化顺控作业虚拟仿真

Fig.5　Isaac Sim-based virtual simulation of programmed sequential control operation for power distribution cabinets

请求确认；出现高危安规违规时立即急停和闭锁。具体如表 1 所示。

在机器人开展程序化顺控过程中，随机加入扰动，例如反复拨转开关等各等级扰动，检视机器人是否能够及时停止作业、进行修正动作等。以图 6 所示可修正偏差样例为例，断路器被人员手动复位后，世界模型物理校验判定重新分闸动作物理可行，安规校验判定原后续动作违规，但重新分闸动作符合安规要求，因此判定为可修正偏差，触发局部重规划流程。

表 2 给出了不同扰动等级下的闭环响应统计。如图 7 所示，在 200 次随机扰动中机器人输出正确行为 189 次，总体正确响应率为 94.5%。其中，无影响偏差、可修正偏差和高危违规偏差的正确响应率分别为 100%、98%和 94%；待确认偏差为 86%，说明当障碍遮挡或状态信息不足时仍需要人工确认。与“扰动后统一急停”的保守策略相比，本文机制能够区分继续执行、局部重规划、暂停确认和紧急闭锁 4 类动作；但由于两种策略的任务定义不

表 1 面向电力具身反思决策的扰动等级划分

Table 1 Disturbance level classification for power embodied reflective decision-making

扰动等级	双约束校验结果	典型场景	反思决策
无影响偏差	物理校验可行、安规校验合规，偏差不影响后续操作	人员轻微触碰柜门，柜门仍处于全开位，不影响操作路径	继续执行原顺控流程，持续监测状态变化，不触发修正
可修正偏差	物理校验可行、当前状态安规违规，但修正动作符合双约束要求	机器人完成断路器分闸后，设备因故障复位至合闸位，原后续分隔离开关动作属于带负荷操作，违规	启动局部重规划，通过动态提示词工程引导具身模型完成修正动作生成，修正后校验通过方可执行
待确认偏差	物理校验不可行、安规校验无明确违规	人员在柜内放置工具，完全遮挡操作路径，原动作物理不可行	立即暂停作业，锁定操作机构，向后台监控系统上传偏差信息与现场画面，等待运维人员确认处置
高危违规偏差	安规校验严重违规，无论物理是否可行	人员进入带电作业禁区、人为拉开接地刀闸、改动带电设备状态	立即执行急停，闭锁所有操作机构，触发现场声光报警，向后台同步紧急告警信息

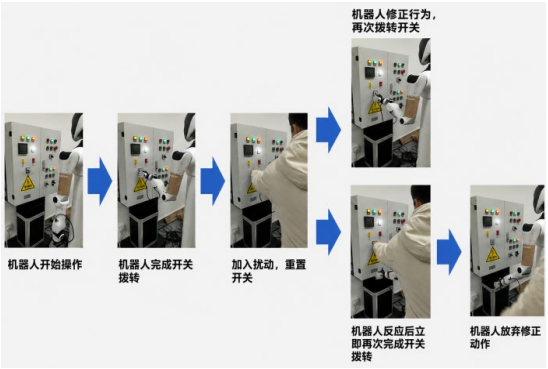


图 6 配电柜程序化顺控作业现场验证(可修正偏差样例)

Fig.6 Field validation of programmed sequential control operation for power distribution cabinets

同，本文不将其作数值优劣比较。

团队在北京、四川等地开展试点应用，将电力具身智能模型部署于芯载具身智能终端，作为机器人感知、决策与动作生成核心，实现无需预设流程的自主巡检与操作。该方案已应用于人形机器人，可替代人工完成高频、高危、复杂任务，作业成功率由 65%提升至 90%。

需要说明的是，表 2 验证的是扰动分级和反思决策是否按预期响应，现场试点指标验证的是任务级可用性；二者对应不同层级，不能仅以最终成功率替代中间环节的可靠性论证。

表 2 电力具身反思决策效果验证

Table 2 Effect verification of power embodied reflective decision-making

扰动等级	实验次数	正确响应次数	正确响应率/%
无影响偏差	50	50	100
可修正偏差	50	49	98
待确认偏差	50	43	86
高危违规偏差	50	47	94



图 7 配电柜程序化顺控作业现场验证

Fig.7 Field verification of programmed sequential control operation for power distribution cabinets

4.2 配电线路无人机巡检仿真与现场验证

为验证双约束融合决策在无人机配电线路自主巡检场景中的适用性，本文基于 AirSim 构建配电线路巡检仿真环境。场景中的配电杆塔、横担、导线、绝缘子和开阔地形分别对应现场的关键拓扑对象；无人机位姿、导线走向、杆塔相对位置和碰撞状态作为世界模型输入，用于逐项检查线路跟踪、杆塔避障和异常接近悬停逻辑。该仿真用于控制参数整定和策略预演，现场适用性另由实际线路飞行结果验证。

实验以四旋翼无人机沿配电线路自主巡航为任务目标，由感知层实时获取无人机位姿、导线空间走向、杆塔相对位置及碰撞状态等信息；模型层根据线路几何拓扑构建局部世界模型；决策层在轨迹生成过程中同步嵌入物理一致性约束与业务安全规程约束，主要包括飞行高度边界、导线及杆塔最小安全距离、横向偏差上限、姿态角变化率约束、巡检视场覆盖约束以及异常接近时的悬停退避逻辑；执行层通过 AirSim API 接管无人机飞控，输出速度、姿态和航向控制指令，形成“感知—模型—决策—执行—反馈”的闭环巡线控制过程。图 8(a)为无人机在仿真环境中的自主巡线运行状态，系统完成 API 控制权申请和无人机解锁后进入沿线飞行模式，并在接口异常或碰撞风险出现时触发悬停保

护；图 8(b)给出了配电杆塔和导线的空间拓扑关系，可为世界模型中的导线跟踪、杆塔避障和巡检视角规划提供几何基准。



(a) 无人机自主巡线运行状态



(b) 配电线路及导线空间拓扑

图 8　基于 AirSim 的配电线路无人机巡检虚拟仿真

Fig.8　AirSim-based virtual simulation for UAV inspection of distribution lines

为进一步分析控制参数对巡线稳定性的影响，设置控制求解参数 N 分别为 10、20、50 和 100 开展对比实验，结果如图 9 所示。图中，i 为目标导线索引，本算例取 i=3；θ_1 和 θ_2 在图 9(a)和图 9(d)中分别表示航向角和姿态角；d 为无人机相对目标导线的横向距离误差。由图 9(a)和图 9(b)可知，不同参数条件下，无人机航向角和横向距离误差均可在有限步数内收敛至期望值，说明所构建的线路几何约束能够有效抑制无人机偏离导线方向的趋势；由图 9(c)可知，无人机在 x-y 平面内可由初始偏离状态逐步回归线路走向，且 N 增大后轨迹回归过程更加平滑；由图 9(d)可知，姿态角在初始调整阶段出现短时超调后快速收敛，满足巡检过程中姿态稳定和影像采集连续性的要求。

综合仿真分析可知，基于世界模型与双约束校验的无人机具身智能体能够在无需事前点云扫描和示教飞行的条件下完成线路跟踪。图 9 中不同控制求解参数 N 下的收敛过程构成了参数交互验证：航向角、横向距离误差和平面轨迹均能回归期望状态，

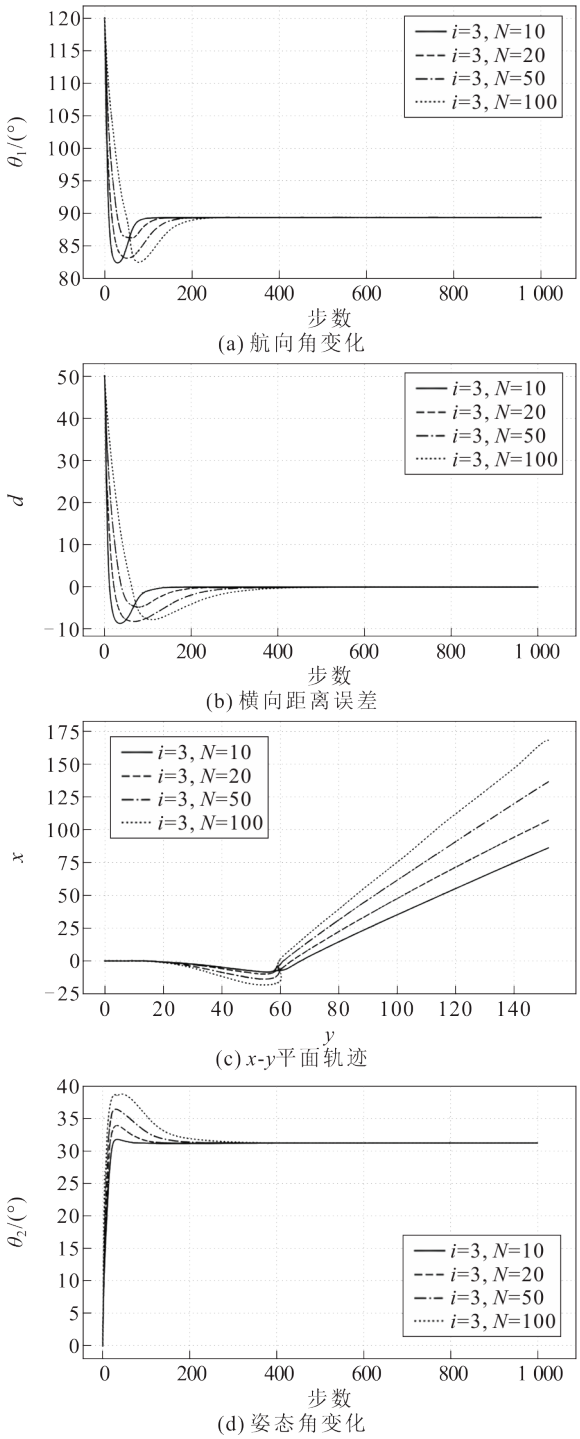


图 9　不同控制求解参数下无人机巡线控制收敛结果

Fig.9　Convergence results of UAV power-line tracking control under different control-solver parameters

N 增大后轨迹更平滑。与已有巡检点位生成[12]和基于充电巢部署的航线优化方法[13]相比，本文关注的是无预扫描条件下的在线线路跟踪与安全约束闭环。由于场景、数据集和评价指标不同，现阶段较限于技术链路层面，后续需在统一基准上开展定量对比。

如图 10，团队在江西、浙江、黑龙江等地开展

配电线路无人机具身巡检现场验证。应用验证结果表明，在 53 次实验中无人机配电线路自主巡检完成率达 98.11%，巡检影像可用率达 92%，无需事前点云扫描、示教飞行，前期准备工作降低 70%，有效提升了无人机具身智能作业质效。



图 10 配电线路无人机具身巡检现场验证

Fig.10 Field verification of UAV-enabled embodied inspection

5 结论

1）本文针对电力具身智能作业物理适配不足、业务安规融入不深的痛点，结合电力运维人力缺口大、技术应用分散等现状，提出物理－知识双约束下的电力具身智能作业决策技术，构建“感知—认知—决策—执行”闭环架构，将物理规律与安规转化为定量化约束嵌入决策环节。

2）研究通过自建数据集仿真及真机验证，配电柜顺控场景机器人正确响应率达 94.5%，试点作业成功率提升至 90%；无人机巡检完成率 98.11%、影像可用率 92%，无需事前点云扫描和示教飞行。该研究解决了“重通用、轻行业约束”问题，为行业规模化落地提供技术支撑。

3）未来，团队认为电力具身智能技术深化提升有赖于以下 4 个方面的研究：一是面向电力系统对于安全性的强要求，需要持续优化双重约束与反思决策机制，提升电力具身智能本体在复杂扰动下的自适应能力，筑牢安全红线；二是提升模型的应用场景拓展、具身本体泛化能力，构建“一脑多能”“一脑多机”协同模式；三是深化与数字孪生等技术融合，提出虚实融合的电力具身数采技术，融合无本体数据采集技术，扩大数据集提升模型泛化能力；四是依托相关工作组推动标准化建设，完善技术体系，实现电力具身智能在能源关键场景规模化落地，助力“人工智能+”能源高质量发展。

参考文献 References

[1] KOBER J, BAGNELL J A, PETERS J. Reinforcement learning in robotics: a survey[J]. The International Journal of Robotics Research, 2013, 32(11): 1238-1274.

[2] PFEIFER R, BONGARD J. How the body shapes the way we think: a new view of intelligence[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 2007.

[3] WANG Y, NIU X, BA J, et al. Navigating embodied intelligence: enabling technologies, security and privacy, and emerging trends[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2026, 13(6): 10317-10338.

[4] DUAN J, YU S, TAN H L, et al. A survey of embodied ai: from simulators to research tasks[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2022, 6(2): 230-244.

[5] 中国信息通信研究院，清华大学电子工程系. 具身智能发展报告(2025 年)[R]. 北京：中国信息通信研究院，2026.
China Academy of Information and Communications Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University. Development report on embodied intelligence (2025)[R]. Beijing: China Academy of Information and Communications Technology, 2026.

[6] 中国电子信息产业发展研究院，中国软件评测中心，产业政策研究所，等. 2026 具身智能产业创新发展趋势及路径研究报告[R]. 北京：中国电子信息产业发展研究院，2026.
China Center for Information Industry Development, China Software Testing Center, Institute of Industrial Policy, et al. Research report on innovation and development trend and path of embodied intelligence industry 2026[R]. Beijing, China: China Center for Information Industry Development, 2026.

[7] 国务院. 关于深入实施“人工智能+”行动的意见[Z]. 国发〔2025〕11 号，2025.
State Council of the People’s Republic of China. Opinions on further implementing the “Artificial Intelligence Plus” Action[Z]. No. 11[2025]issued by the State Council, 2025.

[8] 国家发展改革委，国家能源局. 关于推进“人工智能+”能源高质量发展的实施意见[Z]. 国能发科技〔2025〕73 号，2025.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Implementation opinions on promoting the high-quality development of “Artificial Intelligence Plus” energy[Z]. No. 73[2025]issued by the National Energy Administration, 2025.

[9] 工业和信息化部，中央网信办，国家发展改革委，等. “人工智能+制造”专项行动实施意见[Z]. 工信部联科〔2025〕279 号，2025.
Ministry of Industry and Information Technology, Cyberspace Administration of China, National Development and Reform Commission, et al. Implementation opinions on the special action of “Artificial Intelligence Plus Manufacturing”[Z]. No. 279[2025]jointly issued by the Ministry of Industry and Information Technology, 2025.

[10] 国家能源局. 2022 年度能源领域 5G 应用典型案例汇编[R]. 北京：国家能源局，2022.
National Energy Administration. Compilation of typical 5G application cases in energy field 2022[R]. Beijing, China: National Energy Administration, 2022.

[11] 崔兆仑，郭曼婷，叶泳钦，等. 电力装备数字孪生运维技术的发展态势、评价体系与前景展望[J]. 高电压技术，2025，51(5)：2285-2299.
CUI Zhaolun, GUO Manting, YE Yongqin, et al. Development trend, evaluation system and prospect of digital twin operation and maintenance technology for power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2285-2299.

[12] 王宏伟，刘亚东，田兵，等. 基于空间关系的变电站巡检机器人巡检点自主生成方法[J]. 高电压技术，2022，48(8)：2982-2990.
WANG Hongwei, LIU Yadong, TIAN Bing, et al. Autonomous generation method of inspection points for substation inspection robots based on spatial relationship[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 2982-2990.

[13] ZHANG H, XU Z W, CHEN B, et al. An adaptive nearest point routing method based on charging nest deployment optimization for UAVs power tower inspection[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2025, 21(10): 7881-7890.

[14] 柏光瑞，郑育祥，吴凯，等. 面向配网带电作业机器人的导线识别定位方法[J]. 电网技术，2023，47(6)：2604-2611.
BAI Guangrui, ZHENG Yuxiang, WU Kai, et al. Wire recognition and positioning method for distribution network live working robots[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2604-2611.

[15] LI Z S, TIAN Y N, YANG G D, et al. Vision-based autonomous landing of a hybrid robot on a powerline[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 3501711.

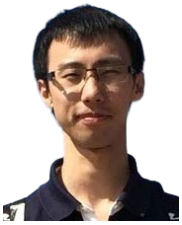
[16] 李端姣，丁宁，刘高，等. 基于人工智能稀疏大模型的电力作业关

键技术研究及工程实践[R]. 广州：广东电网有限责任公司机巡管理中心，2021.
LI Duanjiao, DING Ning, LIU Gao, et al. Research and engineering practice of key technologies for power operation based on artificial intelligence sparse large model[R]. Guangzhou, China: Aircraft Patrol Management Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., 2021.
[17] 窦嘉铭，王小君，刘翌，等. 电力系统自主智能决策范式设想：从知识数据融合、人在回路到具身自主智能[J/OL]. 中国电机工程学报，2026：1-18[2026-04-27]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.251444.
DOU Jiaming, WANG Xiaojun, LIU Zhao, et al. Vision of autonomous intelligent decision paradigm for power systems: from knowledge-data fusion, human-in-the-loop to embodied autonomous intelligence[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2026: 1-18[2026-04-27]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.251444.
[18] 周远翔，陈健宁，赵亮，等. 电力设备数智化发展历程与大语言模型智能体应用展望[J]. 高电压技术，2025，51(8)：4089-4109.
ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHAO Liang, et al. Development history of digital and intelligent power equipment and application prospect of large language model agents[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 4089-4109.
[19] DLALA E. Efficient algorithms for the inclusion of the Preisach hysteresis model in nonlinear finite-element methods[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(2): 395-408.
[20] HUANG B, XU Z, HAO M, et al. Multilayers oil and oil-impregnated pressboard electric field simulation based on space charge[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(2): 530-538.
[21] 张东东，万武艺，黄宵宁，等. 基于热-电-流耦合的芯棒碳化复合绝缘子发热特性研究[J]. 电网技术，2023，47(7)：3010-3017.
ZHANG Dongdong, WAN Wuyi, HUANG Xiaoning, et al. Research on heating characteristics of core rod carbonized composite insulators based on thermal-electric-fluid coupling[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 3010-3017.
[22] GUO Y, ZHANG J, WANG J, et al. PG-DGPRL: A physics-guided and uncertainty-aware feedforward force-admittance control method for soft-bodied operational robots[J]. Computers & Industrial Engineering, 2026, 214: 111838.
[23] MOLL M, KAVRAKI L, ROSELL J. Randomized physics-based motion planning for grasping in cluttered and uncertain environments[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 3(2): 712-719.
[24] SALEEM M S, LIKHACHEV M. Planning with selective physics-based simulation for manipulation among movable objects[C]// 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway, USA: IEEE, 2020: 6752-6758.
[25] MENG L, LIU J, CHAI W, et al. Virtual reality based robot teleoperation via human-scene interaction[J]. Procedia Computer Science, 2023, 226: 141-148.
[26] RAVICHANDRAN Z, ROBEY A, KUMAR V, et al. Safety guardrails for LLM-enabled robots[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2026, 11(4): 4649-4656.
[27] PING Y, LIANG T, DING H, et al. Multimodal large language models-enabled UAV swarm: towards efficient and intelligent autonomous aerial systems[J]. IEEE Wireless Communications, 2026, 33(1): 89-97.
[28] 史婷娜，徐奕扬，谭本慷，等. 机器人关节用伺服电机关键技术与展望[J]. 电工技术学报，2025，40(19)：6192-6212.
SHI Tingna, XU Yiyang, TAN Benkang, et al. Key technologies and prospect of servo motors for robot joints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(19): 6192-6212.
[29] 蒲天骄，赵琦，王新迎. 电力人工智能技术研究框架、应用现状及展望[J]. 电网技术，2025，49(5)：1751-1770.
PU Tianjiao, ZHAO Qi, WANG Xinying. Research framework, application status and prospect of power artificial intelligence technology[J]. Power System Technology, 2025, 49(5): 1751-1770.
[30] 季洪鑫，郑超，汤子建，等. 变压器内检机器人三维空间定位方法研究[J]. 中国电机工程学报，2026，46(06)：2601-2614.
JI Hongxin, ZHENG Chao, TANG Zijian, et al. Research on 3D spatial positioning method for transformer internal inspection robots[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(6): 2601-2614.
[31] 闫云凤，陈汐，金浩远，等. 基于计算机视觉的电力作业人员行为分析研究现状与展望[J]. 高电压技术，2024，50(5)：1842-1854.
YAN Yunfeng, CHEN Xi, JIN Haoyuan, et al. Research status and development of computer-vision-based power workers' behavior analysis[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 1842-1854.
[32] 余涛，王艺澎，罗庆全，等. 基于大语言模型的新型电力系统用户特性立体应用模式初探[J]. 高电压技术，2024，50(7)：2833-2848.
YU Tao, WANG Yipeng, LUO Qingquan, et al. Preliminary exploration for a large language model-based user characteristics stereoscopic application paradigm in new power system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 2833-2848.
[33] ZHANG Di, ZHENG Shangzhuo, REN Lizhi, et al. Research on low-latency communication routing technology for power internet of things[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2025, 23(3): 89-93.
[34] 李济伟，高德荃，冯宝，等. 基于双向融合注意力网络的数据库告警多模态关系抽取[J]. 电力信息与通信技术，2025，23(9)：42-48.
LI Jiwei, GAO Dequan, FENG Bao, et al. Multi-modal relation extraction for database alarm based on bi-direction fusion attention network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2025, 23(9): 42-48.
[35] MA Y F, LIU M, JIANG S, et al. ZUMA: Training-free zero-shot unified multimodal anomaly detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2026, 48(6): 6601-6614.
[36] TANG Y, LIU M, LI B P, et al. NAS-PED: Neural architecture search for pedestrian detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2025, 47(3): 1800-1817.
[37] JIANG H, LIU M Q, ZHANG S L, et al. ETLight: an evolution transformer for efficient traffic signal control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2026, 27(1): 1328-1337.
[38] SHI Z C, CHEN X Y, LIU Z Y, et al. Flight mastery in turbulent skies: shared control and curriculum reinforcement learning for crosswind landing[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2025, 26(10): 15546-15557.



谈元鹏(通信作者)
1987—，男，博士，教授级高工，硕导
主要从事电力多模态融合分析、具身智能、大模型训练推理等方面的研究工作
E-mail: tanyuanpeng@epri.sgcc.com.cn

TAN Yuanpeng
Ph.D., Professor
Corresponding author



宋　睿
1991—，男，博士，高工
主要从事电力具身智能、边缘计算等方面的研究工作
E-mail: songrui@epri.sgcc.com.cn

SONG Rui
Ph.D.
Senior engineer



张　鹏
1990—，男，博士，高工
主要从事电力多模态融合分析、具身智能、世界模型、电力设备智能诊断等方面的研究工作
E-mail: zhangpeng4@epri.sgcc.com.cn

ZHANG Peng
Ph.D.
Senior engineer

收稿日期　2026-04-30　修回日期　2026-06-17　　编辑　卫李静