

# 智能化技术在超高压输电线路带电作业装备中的应用与发展趋势

胡孝

中国南方电网超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650217

**摘要:**超高压输电线路作为电力系统的骨干,其带电作业的安全性与效率直接关系到能源供应稳定性。传统带电作业装备依赖人工操作,在500kV及以上高电压环境中面临安全风险高、作业精度低、复杂环境适应性弱等问题。智能化技术的融入为装备升级提供了核心路径,通过融合智能感知、自主控制、数据驱动等技术,实现作业装备的风险预判、精准执行与协同调度。本文系统梳理超高压带电作业装备的智能化基础,剖析智能感知、自主机器人等核心装备的应用机制,聚焦强电场感知、精准控制等关键技术突破方向,并展望技术融合、小型化等发展趋势。研究旨在推动带电作业装备向无人化、智能化转型,为超高压电网安全运维提供技术支撑。

**关键词:**超高压输电线路;带电作业装备;智能化技术;无人化作业

**引言:**随着新型电力系统建设提速,超高压输电线路作为跨区域能源输送的核心枢纽,其运维安全与效率直接关乎全国能源供应稳定。传统带电作业高度依赖人工操作,面临高空风险高、复杂工况适配性弱、作业精度受限等痛点。近年来,人工智能、物联网、特种机器人等智能化技术深度赋能带电作业装备,推动作业模式向无人化、精准化、自适应方向迭代。本文将梳理核心应用场景,剖析关键技术突破,展望行业发展趋势,为装备智能化升级提供思路。

## 1 超高压输电线路带电作业装备智能化基础

### 1.1 超高压带电作业核心需求与约束

超高压带电作业的核心需求围绕安全、效率、精度三大维度展开。安全方面,作业人员需直面强电场、高空坠落等风险,装备需具备可靠的绝缘防护与应急保障能力,确保“人机分离”或“远程操控”成为可能。效率方面,超高压线路覆盖范围广、故障类型复杂,装备需实现快速响应与连续作业,减少停电损失,例如绝缘子更换装备需将单支更换时间控制在30分钟以内。精度方面,导线接续、金具安装等作业对操作误差要求控制在毫米级,装备需满足精细化作业标准。同时,装备面临多重约束:强电场会干扰电子元件运行,需具备抗干扰设计;高空作业空间有限,装备体积与重量需严格控制;高海拔、低温、强风等极端环境则对装备材质与动力系统提出更高要求,需实现-30℃至40℃温度范围内稳定运行。

### 1.2 关键智能化技术体系

支撑带电作业装备智能化的技术体系涵盖感知、决

策、控制、通信四大核心模块。智能感知技术是基础,包括视觉识别、力反馈传感、电场监测等,通过高清相机与AI算法实现作业对象精准定位,力传感器实时采集操作力度数据,电场传感器监测作业环境电场强度,为决策提供数据支撑。自主决策技术依托边缘计算与AI算法,在本地完成作业路径规划、故障诊断等任务,避免云端传输延迟,例如基于强化学习的机器人可自主优化越障路径。精准控制技术采用伺服驱动与运动控制算法,实现机械臂毫米级操作,配合力位协同控制确保作业力度稳定<sup>[1]</sup>。通信保障技术采用抗干扰无线通信模块,结合5G技术实现高清图像与控制指令的低延迟传输,在强电磁环境下保障通信成功率达99%以上,构建“感知-决策-控制-反馈”的闭环技术体系。

## 2 智能化技术在带电作业装备中的核心应用

### 2.1 智能感知类装备应用

智能感知类装备通过多维度数据采集实现作业环境与对象的全面认知,已广泛应用于缺陷检测与状态评估环节。绝缘子缺陷检测装备集成高清视觉与红外热像模块,AI算法自动识别绝缘子裂纹、污秽等缺陷,识别准确率达96%以上,相比人工检测效率提升5倍,且可在夜间或恶劣天气下工作。导线状态感知装备搭载激光雷达与超声波传感器,实时测量导线弧垂、磨损程度及温度数据,结合大数据分析预判导线疲劳寿命,为预防性维护提供依据。作业环境感知装备则整合微气象传感器与电场监测单元,实时采集风速、温度、电场强度等参数,当环境超出安全阈值时立即触发预警,禁止装备启动作业。这些装备将传统“人工目视”升级为“智能感

知”，大幅提升检测精度与可靠性，为后续作业提供精准的数据支撑。

## 2.2 自主作业机器人装备应用

自主作业机器人装备是实现无人化作业的核心载体，已在导线修补、绝缘子更换等典型场景实现工程应用。导线修补机器人采用模块化设计，通过视觉导航自主爬行至损伤位置，机械臂精准完成导线清洁、打磨、缠绕等工序，整个过程无需人工干预，作业效率比人工提升3倍，且在1000kV特高压线路上已实现稳定应用。绝缘子更换机器人具备多自由度机械臂与末端执行器，可自适应不同型号绝缘子，通过力反馈控制实现绝缘子的平稳拆卸与安装，解决人工更换时的体力消耗大、安全风险高问题。巡检作业机器人则结合无人机与地面机器人优势，无人机完成大范围快速巡检，发现缺陷后引导地面机器人精准作业，形成“空地协同”作业模式。这类装备通过自主导航、精准操作能力，推动带电作业从“人机协同”向“无人自主”转型。

## 2.3 智能防护与辅助装备应用

智能防护与辅助装备通过技术创新提升作业安全性与便利性，构建全方位安全保障体系。智能绝缘装备是核心，例如智能绝缘服集成压力传感器与无线传输模块，实时监测绝缘层破损情况，当绝缘性能下降时立即发出声光报警，同时将数据上传至运维平台，解决传统绝缘服“事后检测”的弊端<sup>[2]</sup>。安全预警装备采用AI视觉识别技术，实时监控作业区域内的人员与设备位置，当人员误入危险区域或设备间距超出安全范围时，立即触发紧急停机指令，响应时间 $\leq 100\text{ms}$ 。远程操控装备则依托VR技术构建沉浸式操作场景，作业人员在地面控制中心即可完成装备的远程操作，通过力反馈手套感知作业力度，配合高清图传实现“身临其境”的作业体验，彻底避免人员直接暴露在高危环境中，大幅降低安全风险。

# 3 带电作业装备智能化关键技术突破

## 3.1 强电场环境下的智能感知技术

强电场环境下的智能感知技术突破聚焦抗干扰与数据融合两大方向，解决传统感知设备精度不足的问题。抗干扰设计方面，采用金属屏蔽罩与电磁兼容电路优化传感器结构，减少强电场对电子元件的干扰，同时开发数字滤波算法，通过小波变换消除电场噪声，使感知数据信噪比提升60%以上。多传感器融合技术是核心突破点，将视觉、红外、力传感等数据通过卡尔曼滤波算法进行融合，例如在绝缘子检测中，视觉数据识别外观缺陷，红外数据检测内部发热异常，力传感数据判断机械强度，融合后实现缺陷的全方位评估，避免单一传感器的

误判漏判。

## 3.2 装备自主控制与精准作业技术

装备自主控制与精准作业技术通过算法优化与硬件升级，实现作业过程的自主化与精细化。自主控制方面，基于改进的A\*算法与动态窗口法构建路径规划模型，机器人可根据实时感知的导线走向、障碍物位置动态调整作业路径，越障成功率达98%以上，例如遇到间隔棒时可自主抬升机械臂完成跨越。精准作业依托力位协同控制技术，通过力传感器实时反馈操作力度，结合位置传感器的定位数据，采用PID算法调节机械臂动作，使操作误差控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内，满足导线接续、金具安装等精细化作业需求。针对作业对象多样性问题，开发自适应末端执行器，通过液压驱动实现夹爪尺寸的灵活调整，可适配直径10-50mm的不同型号导线，无需更换工装即可完成多种作业任务，提升装备通用性。

## 3.3 多装备协同作业与智能调度技术

多装备协同作业与智能调度技术打破单一装备作业局限，实现复杂任务的高效完成。协同通信技术是基础，采用专用抗干扰通信协议，结合5G网络实现无人机、地面机器人、远程控制台之间的数据实时交互，传输延迟控制在50ms以内，确保多装备动作同步。智能调度系统基于任务优先级与装备状态进行动态任务分配，例如在线路巡检与缺陷修复协同作业中，系统优先调度无人机完成大范围巡检，发现缺陷后立即分配最近的地面机器人前往修复，同时协调运输无人机运送所需备件，实现“巡检-诊断-修复-补给”的全流程协同<sup>[3]</sup>。为提升调度效率，引入数字孪生技术构建作业场景虚拟模型，提前模拟多装备协同过程，优化任务分配方案，使复杂作业时间缩短30%以上，避免装备闲置或任务冲突。

## 3.4 数据驱动的装备健康管理技术

数据驱动的装备健康管理技术通过全生命周期数据监测实现装备的预防性维护，提升作业可靠性。数据采集环节，装备各部件安装振动、温度、电流等传感器，实时采集运行数据，边缘计算节点对数据进行实时处理，筛选出异常数据后上传至云端平台。健康评估模型基于机器学习算法构建，通过分析装备历史故障数据与实时运行数据，精准识别轴承磨损、电机老化等潜在故障，故障预测准确率达95%以上，例如通过振动频率变化预判机械臂关节故障，提前发出维护提醒。全生命周期管理系统整合装备设计、生产、运维、报废等全流程数据，形成装备健康档案，为装备选型、维护计划制定提供数据支撑，使装备故障率降低40%，使用寿命延长20%以上，降低运维成本。

## 4 智能化技术在超高压输电线路带电作业装备中的发展趋势

### 4.1 技术融合发展趋势

技术融合将成为带电作业装备智能化的核心方向，多领域技术的交叉应用将催生新型装备形态。人工智能与数字孪生技术深度融合，构建全场景虚拟作业系统，可实现作业流程预演、故障模拟与方案优化，在实际作业前完成风险排查。区块链技术应用用于作业数据管理，确保作业过程、设备状态等数据的不可篡改与可追溯，为安全监管提供可靠依据。机器人技术与仿生学结合，研发具有柔性操作能力的机械臂，模拟人手动完成复杂作业，提升对多元部件的适配性。此外，量子通信技术有望应用于高压环境通信，解决强电磁干扰下的绝对安全通信问题，进一步强化装备协同的可靠性。

### 4.2 装备小型化与轻量化趋势

装备小型化与轻量化是适应复杂地形作业的必然要求，将通过材料创新与结构优化实现突破。材料方面，广泛采用碳纤维复合材料替代传统金属材料，这类材料的强度与钢材相当，但重量仅为钢材的1/4，可使机器人装备重量降低50%以上。电子部件采用集成化设计，研发多功能芯片将感知、控制等功能集成于单一模块，减少部件数量与占用空间。结构上采用折叠式设计，例如无人机的机臂可折叠收纳，运输时体积缩小60%，便于在山区等交通不便区域携带。轻量化装备不仅降低运输与部署难度，还减少对线路的负载压力，适配更多类型的超高压线路作业场景<sup>[4]</sup>。

### 4.3 自主作业与智能化决策趋势

自主作业与智能化决策将推动带电作业从“远程操控”向“完全自主”跨越。装备将具备更高级的场景理解能力，通过多模态感知数据精准识别作业环境与目标状态，自主制定作业方案，无需人工干预。例如，机器人在发现导线缺陷后，可自主判断缺陷类型、制定修复方案并执行操作。AI大模型的应用将提升决策的智能化水平，通过学习海量作业数据与专家经验，实现复杂场景下的最优决策，例如在多故障同时存在时，优先处理影响电网安全的关键缺陷。自主充电技术的成熟将保障装备的持续作业能力，机器人可自主抵达充电站点完成能源补给，实现24小时不间断运维。

### 4.4 绿色环保与可持续发展趋势

在环保理念日益深入人心的当下，绿色环保与可持续发展必然成为装备研发的核心考量因素，有力推动带电作业装备朝着低碳化方向大步迈进。在能源供给环节，积极研发高效节能的动力系统是关键。采用锂电池与太阳能相结合的混合供电模式，当光照条件充足时，太阳能板能高效吸收光能并转化为电能，为装备充电，大大降低对电网电能的依赖，减少传统能源消耗；装备设计上，秉持模块化与标准化理念，各部件接口统一、结构清晰，便于维修与更换。这不仅延长了装备整体使用寿命，还减少了废弃装备的产生，有效降低环境污染；作业过程中，大力推广低噪声、低能耗的操作模式。选用静音电机替代传统电机，从源头上降低作业噪声，减少对周边居民和生态环境的干扰。同时，可降解材料也将逐步应用于装备的非核心部件，进一步减轻装备全生命周期对环境的影响，与绿色电网发展理念完美契合。

## 结束语

智能化技术正深刻变革超高压输电线路带电作业装备的发展模式，通过智能感知、自主控制等技术的应用，有效破解了传统装备安全风险高、效率低的难题。从核心需求出发构建的智能化技术体系，已在感知类、机器人类等装备中实现落地应用，强电场感知、多装备协同等关键技术的突破进一步提升了装备性能。未来，随着技术融合、小型化、自主决策与绿色环保等趋势的推进，带电作业装备将实现从“辅助人工”到“自主运维”的跨越。这一转型不仅将大幅提升超高压电网的运维水平，还将为能源安全稳定供应提供坚实保障，推动电力行业向更安全、高效、绿色的方向发展。

## 参考文献

- [1]孙宏宇.基于500kV超高压输电线路同塔线带电作业可行性的研究[J].电气技术与经济,2020(05):13-15.
- [2]王鑫,崔全磊.超高压输电线路巡视与带电检修技术优化[J].电力设备管理,2025,(06):11-13.
- [3]王学东.超高压输电线路巡视与带电检修技术应用[J].电力设备管理,2025,(06):32-34.
- [4]韩学春,宋恒东,雷兴列,等.带电更换特高压整串绝缘子工具设计与力学分析[J].电瓷避雷器,2023(04):157-164.