

基于新型配电网低碳目标实现的现场运维辅助机器人研究

文/韩亚轩 孙文浩 刘冠言 顾媛媛 李星举
国网鞍山供电公司

分析国内外当前主流机器人产品的优势与不足，从低碳环保、技术先进、行业前沿和典型应用四个维度进行量化评估，针对配电网现场运维辅助机器人的场景需求和潜在方向进行解读和研讨，并在作业现场进行一定规模的技术验证，尝试提出面向新型配电网需求的机器人应用可行方案，为电网相关性研究提供实例支持和有益探索。

实现“双碳”目标的关键在于能源领域。随着光伏、风电、潮汐能等新能源接入电力系统，电网公司需要加快建设新型电力系统。人形机器人作为可以显著提升电力网巡视、检修、消缺、抢修等自愈性和灵活性能力的新技术装备，越来越广泛应用于配电网作业一线。5G、北斗定位、物联网、人工智能、云计算等新型信息技术也需要一种具有融合各类信息接口，并提供统一支撑能力的平台，为人形机器人应用提供了更为广阔的前景。国内外先进制造企业，如特斯拉和小米，已经先后发布人形机器人原型机，并计划逐步投入到电动汽车（EV）的生产线中，大幅提升效率，降低总体碳排放。在电力系统中的带电作业领域，已经成功尝试在10 kV配电线路中采用机器人进行不停电作业。面向新型配电网可持续发展目标，将人形机器人作为电网信息物理融合（CPS）的重要基础，并提出一整套应用方案，成为产学研领域的前沿重点。本文针对新型配电网的低碳目标实现，提出多维度量化评估方法，进一步探索配电网现场运维辅助机器人的场景需求和潜在方向，尝试提出面向新型配电网需求的机器人应用可行方案，为新型电力系统建设提供实例支持和有益探索。

机器人技术及相关研究

1. 电力巡检机器人

在推进智能电网建设过程中，首先应用于智能变电站巡检，场景选取于相对封闭、路线固定、影响较小的封闭式无人值守变电站。相较于传统的变电运维人员进行巡检，巡检机器人不仅具有适应多种天气环境、一次性多物理量测量、数据传输分析执行节省时间和网络带宽等多种优势，而且可以有效减少人员往返于变电站的汽车燃油消耗，进而显著减少碳排放。在配电领域，目前部分地区采用无人机和巡检机器人结合方式进行，可以有效应用AI图像识别、故障点定位导航、红外成像及局部放电监测等电力监测技术，提升电网自愈性和抗外破能力。

2. 带电作业机器人

带电作业作为一种可以有效减少停电时间、满足用户多样化用电需求的新型电力作业方式，得到广泛应用。2021年，辽宁省选取某地级市实施配电带电作业试点，实现了全年不停电。新型电力系统建设目标是解决运维场景与数量激增和多业态用能需求之间的矛盾，当前主流带电作业机器人可以基于场景语义的自动作业定位方法提升作业准确度和工作效率，是基于“双碳”目标背景下，进一步

优化新型配电网能力的重要手段。有研究指出：利用带电作业机器人可以解决太阳强光直射对激光雷达致盲的影响，减少机械臂与传感器的位置校准过程，进而实现作业设备对象的自动识别，同时实现作业点选择和安全校核。带电作业机器人应急响应如图1所示。

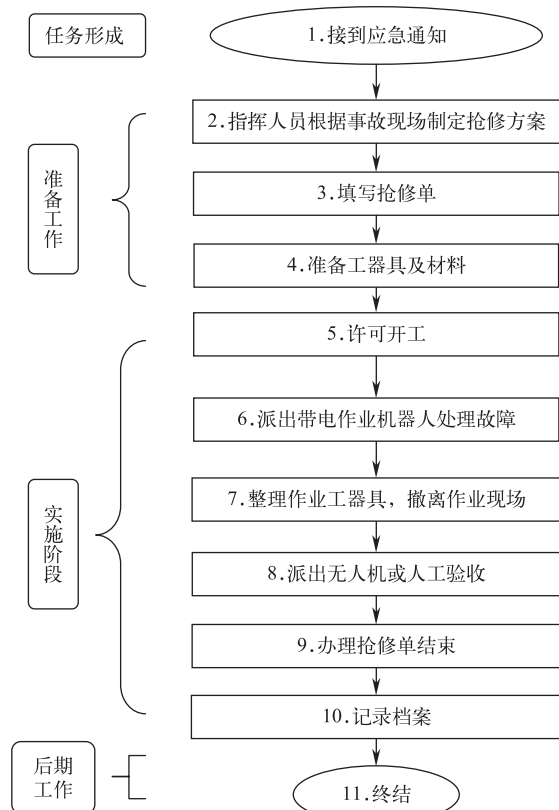


图1 带电作业机器人应急响应流程图

3. 应急抢修机器人

电网公司正在经历从传统电力系统向新型电力系统转变的关键时期。通过广泛接入物联网设备和24 h状态监测，电力系统已可以实现机器人室内外故障处理和隧道内故障抢修。减少用户停电时长，可以显著降低“发输变配用”各环节碳排放强度。在常见的10 kV应急抢修作业领域，首先需要巡检机器人和无人机定位故障点，其次需要具备自如处理现场障碍物和危险源的抢修机器人，对电力线路及设施故障情况进行评级和初步分析，为抢修人员制定抢修方案提供参考，节约时间。通过对比层次分析法、改进A*算法和梯度下降法进行抢修现场路径规划，克服多任务目标下传感器能力局限，改善应急作业现场安全性。

新型配电网低碳化趋势分析

1. 配电网碳排放现状综述

在发电侧，新型配电网的典型特征是接入的发电形式为新能源。然而受到风力发电和光伏发电的周期性制约，需要储能技术的支持提升灵活性和工业互联网、人工智能、云计算、5G等全新技术的支持提升智能性。在电网侧，实现低碳化场景更为复杂多样。以保证高压设备的绝缘和灭弧的六氟化硫（SF₆）为例，其在制造温室效应方面比二氧化碳强23 900倍。针对电网侧的碳排放强度测定，已有科学家提出利用全球变暖趋势指数（Global Warming Potential, GWP）量化分析过去100年间各类潜在温室气体的影响。而且处理SF₆耗费的能量以及产生的碳排放巨大，目前，我国SF₆的年产量在8 500 t左右，而SF₆的自然分解周期长达3 500年。在电力系统操作GIS或开关等充气设备中，SF₆在电弧、高温等作用下还将产生各类气体，成分十分复杂，其对温室效应影响尚处于初级阶段。过去100年间各类潜在温室气体GWP指数量化如图2所示。

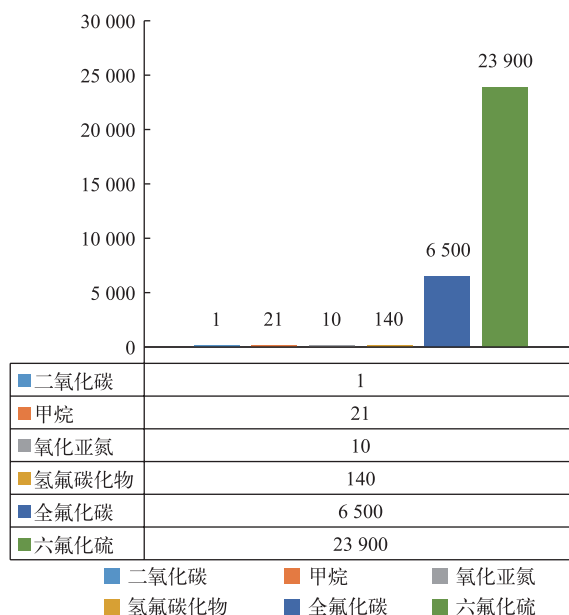


图2 过去100年间各类潜在温室气体GWP指数量化对比图

综上所述，新型配电网建设及运营中将使用和产生大量明显提高碳排放强度的气体，碳捕获、利用与封存技术（Carbon Capture Utilization and Storage, CCUS）难度较大，在考虑各类约束条件的前提下，需要充分利用现有低碳化技术，满足新

型配电网的经济性和可行性建设要求。

2. 配电网碳排放测定方法梳理

当前，测定碳排放的三种主要方式有排放因子法、碳平衡法和直接测定法，电力系统需要兼顾多种方法利弊，形成符合新型电力系统建设目标要求和行业发展特点的碳排放管理标准和规则。

1) 排放因子法根据对运行电网的影响不同，分为两种主要因子：电量边际排放因子（EFOM，又称运行边际）和容量边际排放因子（EFBM，又称建设边际）。最早由清洁发展机制（CDM）提出的电网碳排放量的经验公式计算方法。一般来说，如果新增发电厂在区域电网供需饱和前接入，则按照EFBM方法来计算，即对于往年的排放值进行加权平均，再与每年的售电量进行乘积，得到一个区域范围的排放量估计；如果新增发电厂在区域电网供需饱和前接入，则按照EFOM方法来计算，算例与EFBM类似。

2) 碳平衡法最初用于汽车工业，现常用于针对一个行业或一座城市的碳排放量进行测算。具体方法为：测量工业或排放源的烟气排放量，通过其与消耗的燃料作差值，得到CO₂等排放量的间接测量值。在主流发达国家应用较多，逐渐被各国采纳并采用。

3) 直接测定法是当前碳监测领域关注度最高的技术方法，可以对绿电交易、碳证交易等新型电力市场交易进行数据支持和量化追踪，对于拓展新型电力系统业务具有重要意义。直接测定法具体是通过物理吸附、化学反应等方式，在排放源的现场附近进行直接测定，进一步确定光伏设备生产厂区、发电厂、配电线路走廊等小区域的排放情况。目前，随着物联网、5G、大数据、云计算及AI等技术的推广，在线监测、专家分析和Chat GPT等新技术的应用，可以将实测法的准确性和覆盖的规模性结合起来，前景十分广阔。

3. 探索新型配电网各参与方预期需求

根据2022年全球碳排放数据，目前碳排放量占比排名前三的领域分别是制造业（31%）、发电（29%）、农业（19%）。电力行业作为节能减排的重点领域，需要在未来同时将可持续发展、碳排放和安全可靠等因素纳入考量。

从网架结构角度来看，通过“一张网”解决传统化石能源和新能源同步发电上网的全部问题，面

临压力较大。目前的解决思路集中在优先发展微电网、分布式电网等新型供电网架，最终演进为主干网架和分散微电网共生的状态。

从发电能源角度来看，现有火电厂等发电单元需要同时处理发电成本上升和实现碳减排目标双重压力。2022年，中国煤电价格在0.25~0.45元/（kW·h），光伏电价在0.35~0.5元/（kW·h）之间，两个价格差为0.5~1元。综合计算，度电碳成本在0.2元左右，与政府补贴差距较大。未来，预计碳市场将逐步发挥价格调节功能，而政府补贴会最终退出。

从新型电力系统低碳化发展角度看，由于处理碳排放的成本逐渐上升，传统电厂需要在低碳改造和购买碳排放权之间进行选择，尤其是化石能源价格波动日趋激烈的背景下，需要提前储备碳排放量作为持续生产的关键资产。对于分布式光伏用户以及受益于“隔墙有电”的企业，将收获所发电量的同时，获得一定的减排“积分”奖励，而这将进一步激励微电网的建设，最终导致“一张网”的分散布局。

从新能源发电环境影响角度看，不能忽视的问题是光伏板和风力发电单元的生产、运维及报废回收环节都将产生碳排放，在线监测和可靠的排放因子都是需要提前布局、配套建设的，否则无法量化短期内的碳排放激增等环境代价。

从多样化用电用户角度看，未来能源需要满足方便取用、价格低廉和安全可靠等特征。然而当前储能技术并没有提供足够支持的情况下，通常用户更加在意新能源的综合价格，而非减排意愿。

现场辅助机器人应用建议及展望

1. 机器人技术应用建议

新型电力系统实现“双碳”目标，需要在保证供电企业日常运维检修、综合能源服务及应急抢修能力的基础上，逐步加大带电作业机器人、巡检机器人、抢修机器人和人形机器人等新技术应用，应对人力资源不足的瓶颈期，东北地区显得尤为重要。目前，电网公司需要结合新型配电网实际需要，适时前瞻性地开展并试运行机器人参与新型电力系统工作探索，对于降低人力成本和减少传统作业模式造成的隐患多、设备老、准确度低和专业人

员不足等隐性碳排放有明显效果。在配电运维现场增加机器人应用，可以积累关键模型参数并进行机器学习，接续作业经验数字化链条，不断优化机器人业务能力，进一步为用户提供可视化低碳用能产品服务。新型配电网各类作业应用现场辅助机器人场景梳理统计见表1。

表1 新型配电网建设中可以应用机器人场景统计表

现场辅助机器人可承担作业项目		
1	设备 运维	架空线路设备线路专业巡视
		架空线路设备试验和检测
		架空线路设备状态评价
		架空线路设备隐患排查和处置方案制定
		架空线路风险管控治理
		线路设备数据维护
2	设备 检修	停电更换跌落式熔断器
		更换熔丝管、灭弧罩
		停电更换低压导线
		中压架空线路故障巡视
		故障抢修和工单处理
3	电缆 运检	电缆线路设备线路专业巡视
		电缆线路设备试验和检测
		电缆线路设备状态评价
		电缆线路缺陷处理
		电缆线路隐患排查治理
		电缆线路风险管控治理
		电缆终端更换

2. 机器人应用展望

新型电力系统的发展思路与各类人形机器人的产品演进有诸多重合领域。文中所提及电力现场辅助机器人可以作为工业互联网、人工智能、云计算及5G等新型信息技术载体，以人工智能技术应用为例，从发展之初就一直被电力领域的学者高度关注，专家系统、人工神经网络、模糊集理论以及启发式搜索等传统人工智能方法在电力系统中早已广泛应用。随着分布式电源、电动汽车和分布式储能元件等具有能源生产、存储及消费多种特性的新型能源终端高比例接入电网，人工智能与电网必将进一步融合，并逐步实现智能传感与物理状态相结合、数据驱动与仿真模型相结合、辅助决策与运行控制相结合，从而提高电力系统运行的经济性和安全性。

未来智能将有两个重要发展方向：一个是从机器向拟人化发展；一个是从人类向机械化方向发

展，即扩展人类的智能。具体来说，机器的拟人化就是使机器越来越像人，使它能够与未来的人类更好地交互；同时，人类也在通过延展认知能力提升自身水平，实现机械化。未来随着技术的发展，机器人将从上述两个方向逼近，向具有意识的超级智能生命体发展。

随着新基建的逐渐深入，以智慧城市、智慧医疗、智能家居、智慧医疗和工业物联网等为代表的新兴业态必将相继落地，机器人技术将作为电网的“智慧个体”，不断发挥更加重要的作用。同时，电网公司需要在机器人技术应用中注重关于同步实现物理安全、运行安全、数据安全和网络安全实际需要，提升新型电力系统的可持续发展能力。

结束语

新型电力系统的显著特征是发电端广泛接入风能、光伏等新能源发电设备，低碳化可持续发展是建设的关键。发电侧、电网侧和用户侧均提出对于明显提升信息处理效率、显著降低通信成本的长时间持续演进先进平台的需求，目的是实现改善电网运维质量，提供一致性好的用能服务，满足用户个性化需求。本文以新型配电网现场辅助机器人研究作为切入点，重点梳理电力巡检、带电作业和应急抢修三个主要智能机器人应用场景特征，并结合低碳环保、技术先进和行业前沿典型应用四个维度进行了新型配电网低碳化需求的评估，进一步探索配电网现场运维人形机器人的应用场景建议和潜在方向，为新型电力系统建设提供实例支持和有益探索。EA

参考文献

- [1] 孙智滨，常俊，等．配电线路不停电作业机器人研究[J]．电工技术，2021，24(1)：72-75．
- [2] 李星举，郭峰，等．乡村配电网供电可靠性提升研究[J]．东北电力技术，2023，44(7)：15-19．
- [3] 黄山，吴振生，等．电力智能巡检机器人研究综述[J]．电测与仪表，2020，57(2)：26-38．
- [4] 方书博，罗浩，洪晓，等．隧道机器人电缆火灾参数仿真与试验研究[J]．电气应用，2021，40(9)：41-49．