

输电线路智能带电检修关键技术研究综述

郝艳捧¹, 梁 苇¹, 潘锐健¹, 罗 兵², 李立涅^{1,2}, 张福增², 王婷婷²

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510080)

摘要:采用智能装备代替人工进行带电检修,可保障带电作业人员安全,如何在不同应用场景下安全、可靠、高效地完成带电检修是其关键问题。首先介绍了架空线路、电力电缆、气体绝缘输电线路(GIL)这3类线路的运行环境和带电检修需求,分析了电力无人机、架空线路机器人、绝缘子机器人、车载机器人、电缆机器人、GIL检修机器人6种智能装备的应用环境、结构和功能。然后,从取能、控制、传感、导航、防护、人机交互6个方面对输电线路智能带电检修的关键技术进行了梳理。最后,分析了智能化带电检修设备和技术存在的问题,并展望了其发展趋势。

关键词:输电线路;智能装备;带电检修;带电检修机器人;综述

中图分类号:TM 755

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202110015

0 引言

现阶段,电网形态与功能正发生深刻的改变,电网规模逐步扩大,设备容量不断提升,区域互联程度持续加强。截至2019年,我国35 kV及以上电压等级的输电线路回路长度超过 1.89×10^6 km,其中220 kV及以上电压等级的架空线路总长接近 7.5×10^5 km,220 kV及以上电压等级的电力电缆及气体绝缘输电线路GIL(Gas-Insulated transmission Line)超过4 000 km^[1]。由于输电线路运行环境复杂恶劣、设备材料潜在缺陷等问题长期存在,输电线路设备故障易引起电网停电事故与经济损失。随着高电压、长距离、大容量的区域输电网不断发展,输电线路运行维护需求逐渐提高。

输电线路缺陷指使用中的线路设备发生的异常或存在的隐患^[2],缺陷积累诱发故障,影响输电线路的安全稳定。定期检修主要为线路运行状态的检查及其组件的维修,有助于提高设备利用效率,延长设备寿命,预防事故发生。带电检修指直接接触带电部分或在其周围的带电区域开展检查、测试、维护和修理工作^[3],可以及时发现并处置带电设备的缺陷,避免因设备检修造成的频繁停电,对保障电网的安全、稳定、经济运行具有重要意义。然而,传统的人工带电检修受地理、天气、工器具、防护设施、资质、成本等限制^[4],存在风险高、劳动强度大、效率低、维护周期长等问题,已不能满足现代输电需求。

智能装备搭载传感器、执行机构和控制系统可

替代人进入危险的输电线路运行环境中开展带电检修。相关技术的研究始于20世纪80年代,近年来随着机器人技术的发展与智能电网的建设,智能带电检修已涵盖电力系统多个环节,包括仪表读数、温度检测、局部放电检测^[5]、设备密封性检测、带电水冲洗^[6]、外观检查、运行环境监测、接线检查、带电搭接导线、线路除冰、设备更换、树枝修剪等^[7]。智能装备对输电线路带电检修能够在带电环境下进行,克服和弥补了人工检修存在的技术缺陷和不足,同时也具备灵活性和智能性,适应智能电网的发展需求,具有广阔的应用前景,契合智能电网的运行维护需要。

如何安全、可靠、高效地在跨度大、组件多、环境复杂的输电线路开展带电检修,是当前智能装备研发与应用面临的关键问题。本文分析了架空线路、电力电缆和GIL的运行环境与带电检修需求,总结了目前国内外智能带电检修装备的结构和功能,梳理了取能、控制、传感、导航、防护和人机交互6种智能带电检修的关键技术,最后结合这6种技术讨论了有待深入研究的方向,展望了智能电网时代下输电线路带电检修的研究前景与趋势。

1 输电线路带电检修需求

输电线路具有点多、线长、面广、危险源复杂、运行环境存在差异等特点。电力部门需根据架空线路、电力电缆、GIL的运行环境与维护需求定期开展带电检修。

1.1 架空线路运行环境及带电检修需求

架空线路直接暴露于大气环境,导线、绝缘子和杆塔应有足够的机械和电气强度,以避免在洪水、雷电、大风、雨淋、覆冰、鸟害、湿雾、山火、树障、污秽以及外力作用下造成停电事故^[8]。架空线路带电检修需求包括:安全距离测量,杆塔及拉线修补调整,覆

收稿日期:2021-02-02;修回日期:2021-08-17

基金项目:特高压工程技术(昆明、广州)国家工程实验室开放基金资助项目(NEL201807)

Project supported by the National Engineering Laboratory for Ultra High Voltage Engineering Technology(Kunming, Guangzhou) Foundation(NEL201807)

冰、鸟巢和飘挂物清理,金具修补和更换,螺栓紧固,以及绝缘子调整和更换等^[9-11]。架空线路常见缺陷及带电检修需求见附录A表A1。

1.2 电力电缆运行环境及带电检修需求

与架空线路不同,电力电缆常用于城市地下电网、发电站引出线路、工矿企业内部供电以及过江海水下输电,多埋设于地下或水底,散热条件较差,运行状态难以检查^[12]。由于生产质量、外力破坏、环境侵害、动物咬蚀以及电缆本体温度过高、应力分布不均、接线错误等原因,电力电缆易发生绝缘击穿、漏油、断裂、短路、开路、接头放电等故障^[13]。电力电缆带电检修需求包括:外观及密封性检查,位置调整,接地状态检查,电气连接检查,破损检测,绝缘电阻测量,电缆附件检查、修复或更换,测温,气体含量检测及隧道勘察与灭火等^[14-16]。电力电缆常见缺陷及带电检修需求见附录A表A2。

1.3 GIL运行环境及带电检修需求

GIL采用全封闭的金属管道结构^[17],敷设环境更为紧凑,多用于高落差的水电厂、核电站或跨江、穿山线路的连接,以地面摆放、支架支撑、垂直竖井安装、桥梁架设、地理、管廊及隧道等方式敷设^[18]。气压异常、机械负荷、过电压等因素易引起GIL的金属腐蚀、连接松动、封闭性能下降、部件变形或机械损伤等缺陷,进而导致局部放电、损坏和短路等故障^[19]。在GIL外壳带电检测声、光、热、电、磁、气压、气体含量等,可实现故障诊断。GIL常见带电检修

需求包括:受力检查,外壳及防腐系统修复,测温,局部放电检测,内部探伤,法兰面螺栓紧固,密封检查,振动测量,气体测量等^[20-21]。GIL常见缺陷及带电检修需求见附录A表A3。

2 输电线路智能带电检修装备

智能装备能够自动感知、自主运动与定点作业,可打破输电线路运行环境对带电检修的限制。为了适应多种线路设备结构,智能带电检修装备在输电线路的运行位置主要有线路表面、轨道、线路周围环境,各运行位置的特点及应用场景见表1。面向上述3类输电线路,现有智能带电检修装备主要有电力无人机UAV(Unmanned Aerial Vehicle)、导线机器人、绝缘子机器人、车载式机器人、陆地电缆机器人、水下电缆机器人和GIL机器人等。

以架空线路为例,人工与智能带电检修技术对比见图1。由图可知,利用智能装备开展带电检修可降低天气、高空、高温、高电压、强电场和累积电荷对作业人员的威胁,减轻人工劳动强度,提高输电线路带电检修的安全性、可靠性与效率,是今后的必然趋势。

2.1 电力无人机

电力无人机由机翼、螺旋桨和控制舱体组成,能自主飞行与快速起降,具有运动范围广、机动性强等优势,对长距离、大高差的架空线路及其运行环境有较强的适应能力。

表1 智能带电检修装备运行位置特点与应用场景

Table 1 Characteristics of operation locations and application scenes for intelligent live-line maintenance equipment

运行位置	优点	缺点	应用场景
设备表面	直接接触线路设备,在裸导体处可在线取能	装备尺寸和动作需适应线路设备结构,路径不易调整	陆上线路的带电检修
轨道	利用轨道承载与导向,检修安全性高,可长期在线,适应多障碍物的检修场景	需改造输电线路及其环境,费用高昂,轨道维护难度大,装备通用性差	杆塔、隧道或管廊内的长距离巡检
线路周围	装备通用性强,能适应复杂的自然环境	续航时间有限,需考虑安全距离	短距离带电巡检与作业

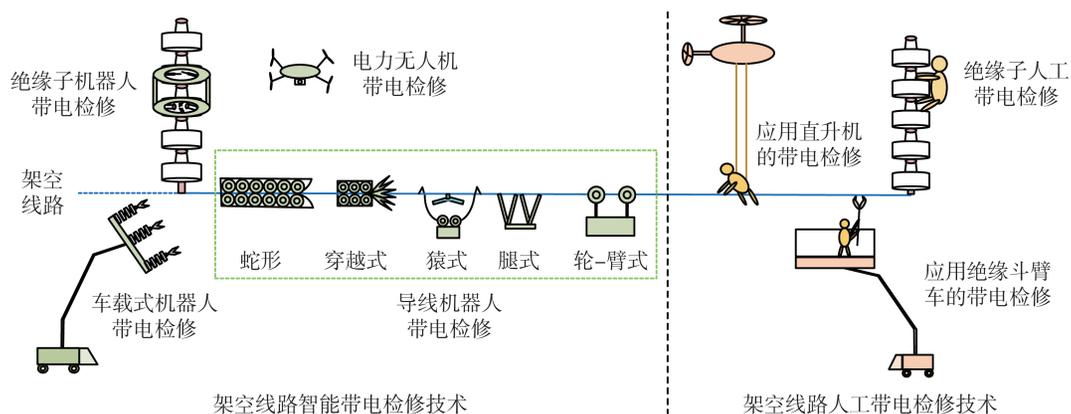


图1 架空线路人工与智能带电检修技术对比示意图

Fig.1 Schematic diagram of comparison between manual and intelligent live-line maintenance technologies for overhead power lines

电力无人机按结构分为无人直升机、固定翼无人机和多旋翼无人机^[22],如附录 A 图 A1 所示。无人直升机荷载达 50~60 kg,可搭载多个传感器,续航时间超过 2 h,可悬停并实现 50 km 以上线路的精细巡检^[23],但其体积大,飞行空域受限,需考虑安全距离和地形。固定翼无人机飞行速度达 80~100 km/h,飞行高度超过 300 m,勘察面积广,但其不可悬停,巡检精度有限,多用于灾后架空线路运行状态巡检。多旋翼无人机价格低廉、体积小,可垂直起降,不受地形、高差的影响,但其载荷、续航及飞行范围有限,尤其适用于低空、低速、近距离的毫米级带电检修。

在输电线路智能带电检修中,电力无人机主要用于带电检测、测绘、处理异物及辅助人工作业等。例如:在带电检测方面,电力无人机搭载可见光、红外、紫外、激光雷达等成像系统识别组件缺陷^[24];在带电测绘方面,电力无人机融合激光点云、高程、地图等数据测量导线与地物间的交叉跨越距离,形成输电线路通道的三维模型及信息库^[25]。得益于易携带、强兼容性、可悬停、路径可调等特点,搭载喷火或激光装置的多旋翼无人机在带电清除覆冰、鸟巢、长飘挂物等非接触式作业中呈现出较大优势。

“无人机+机械臂+智能决策”使电力无人机的接触式带电检修成为可能。在辅助人工作业方面,电力无人机可用于组件安装、监护、照明、工器具运送、救援等;在线路设备维修方面,电力无人机可用于导线修补、设备清扫、绝缘喷涂、测零等;小型无人机还可用于户内输电线路设备的状态感知和维护。

2.2 架空线路机器人

架空线路机器人包括导线机器人、绝缘子机器人和车载式机器人。与电力无人机相比,架空线路机器人能直接在线路设备表面运动并开展接触式带电检修,安全性和动作准确性更高。该类机器人可长时间在线且无需频繁进出等电位,其行驶轨迹受地形地貌和空气湍流的影响较小,尤其适用于穿越禁飞区及跨越林区、水域、山地等复杂地理环境的架空线路。

2.2.1 导线机器人

导线机器人有巡检和作业 2 种模式:巡检模式下,导线机器人利用传感器检查架空线路运行状态;作业模式下,机器人利用末端执行器维修组件。该类机器人直接运行于架空线路,需符合线路安全距离要求、适应高空环境,以及行驶安全平稳、动作可靠。

为了实现在架空线路上的运动,早期的导线机器人多采用仿生设计,如蛇形机器人、猿式机器人、腿式机器人等,示意图见附录 A 图 A2。蛇形机器人利用多对电机控制相邻关节的依序开合来爬行和越障^[26];猿式机器人利用机械手爪和滑轨翻越杆塔^[27];

腿式机器人利用机械腿伸缩和关节交替转动实现导线行走与越障^[28]。上述仿生机器人适用范围广,但大多结构复杂、尺寸及重量较大,因此难以建立合适的运动学模型,控制难度高,实用性较差。

近年来,针对机器人动作的平稳性问题,导线机器人多被设计为结构更为紧凑的单体机器人和轮-臂式机器人。单体机器人沿穿过其机体的导线运动^[29],其结构简单、体积小,可在沿导线行驶时稳定重心,但其无法越障且安装繁琐,不适用于常规架空导线的带电检修。为了兼容多种检修装置,轮-臂式机器人将机箱、运动机构和末端执行器分开,通过机械臂悬挂于导线,利用关节的转动、末端的抓握和机械臂的摆动来动作。由于智能带电检修需兼顾适用性与灵活性,近年来该类机器人逐渐向精细化、轻量化等方向发展。例如,机器人 LineScout 能根据检修任务重组功能模块,降低其单次运行的控制难度^[30]。多单元串联机器人通过改变挂线机械臂数目和机箱连接方式翻越双悬垂金具、转角塔等横向尺寸较大的障碍物^[31]。然而,多个机械臂的同时动作导致控制难度增大,多机箱串联也提高了运动空间需求,因此,该类机器人的实用性低。机器人 Expliner 将轮臂复合,实现在 500 kV 分裂导线上的运动,越障过程中,机械臂可充当平衡棒,维持机身稳定^[32]。机器人 LineRanger 用桨叶替代行走轮抓线,仅需小幅抬动机身便可以直接行走于障碍物表面,该机器人能平稳运行于 735 kV 分裂导线^[33],适用于长距离架空线路的近距离检查。

导线机器人不仅能够柔性、长距离架空线缆上行驶,还能开展针对性的设备维修作业。在导线修补方面,现有的机器人通过贴合导线滑动来将补修管压接于断股处^[34],用夹钳避免导线滑移脱落^[30],实现稳定动作。但是,导线智能带电修补还应结合人工带电检修方法,根据导线尺寸与损伤程度采取不同的处理方法,提高导线修补质量。

在异物清除方面,导线机器人主要采用熔断法、切割法和清扫法。相比电力无人机,用机器人清除导线异物对其他架空线路设备的影响较小。例如,利用旋转刀片机构,机器人在沿导线表面行走的同时能够完成异物切割^[34]。文献[35]设计了电加热和电锯机构,通过近距离熔断和压紧切割实现导线异物带电清除。文献[36]研制了用于导线除垢的伸缩转刷,但该机构无法清除缠绕导线的长飘挂物。及时处理异物以免对运行环境造成二次污染是下一步研发需要考虑的问题。

在除冰方面,导线机器人多采用冲击、铣削、敲击、激励等接触式机械除冰方式。其中,冲击除冰是将除冰刀沿导线对称安装,通过刀片高速旋转粉碎导线冰层^[37]。针对冲击除冰机器人无法越障及刀片

尖端易引起局部放电的问题,铣削除冰是将刀片复合于行走轮,机器人行走时碾压覆冰导线并转动刀架来切割冰层^[38],但该方式在清除轻微覆冰时易损伤导线。敲击除冰是利用刚性结构击打冰层^[39],对厚冰层有较好的清除效果。激励除冰是用局部高频信号产生交变应力震碎冰层^[40],但该作用力可能引起金具相对导线滑移。此外,由于覆冰脱落会引起导线扭转,改变机器人的运动状态,机身平衡控制与速度自适应调整仍为现阶段智能带电除冰的主要难题。

在螺栓修复方面,导线机器人主要使用套筒扳手调整螺栓。由于螺栓目标较小且其金属材质易受光照影响,需要建立可靠的螺栓识别、追踪及维修方法^[41]。例如:文献[42]研发了可装配于机器人的智能螺栓更换系统,可以实现螺栓的定位、夹持、插拔、松紧等功能;文献[43]提出了一种复合了夹持机构、Z型扳手和云台的单机械臂结构,其作业范围大、控制难度低,且能够结合螺栓位置调整位姿。为适应不同线路设备的螺栓修复,导线机器人装配多用套筒扳手,可适应不同尺寸的螺栓,但也需要自适应地调整输出力矩,以避免松紧螺栓时对其他设备组件的影响。

现有的导线机器人大多无法实现自主上下线路与故障自愈。为了实现机器人的全自主运动,文献[44]通过改造架空线路结构、加装自主上下线装置、构建主站专家系统等,降低导线机器人的控制难度。针对机器人故障自动处置的问题,救援机器人可利用牵引夹爪将故障机器人拖拽至安全位置^[45],但是该方法只适用于单档无障碍线路。

为了提高导线机器人的可用性,装配执行器的导线机器人可辅助绝缘子检修,包括检查高压端绝缘子缺陷^[46]、更换绝缘子与线夹连接的螺栓^[47]等。

2.2.2 绝缘子机器人

受运行位置的局限,导线机器人无法对整串绝缘子开展检修。绝缘子机器人可适应间隙小且曲率大的作业空间,实现对高电压长串绝缘子的带电检修。

为保障安全,绝缘子机器人的尺寸与动作幅度不宜过大,以免摔落或误触放电。现有的绝缘子机器人的构型主要有尺蠖式、轮-腿式、夹爪式和履带式,如附录A图A3所示。尺蠖式和轮-腿式机器人主要用于悬垂绝缘子串的带电检修。尺蠖式机器人呈“工”形,利用丝杆的伸缩实现沿绝缘子串的轴向屈伸运动^[48]。轮-腿式机器人呈半环型,通过X型轮-腿的联轴旋转跨越绝缘子,相比尺蠖式机器人,该构型下机器人的运动速度较快,但平稳性稍差^[49]。耐张绝缘子串的带电检修主要采用夹爪式和履带式机器人。夹爪式机器人通过交替抓握铁帽攀爬绝缘

子^[50]。履带式机器人通过履带引导机器人沿绝缘子串上表面行驶,该构型下机器人的重心更稳定,运行速率更高^[51]。

绝缘子智能带电检修主要有状态检测与清洁。在绝缘子状态检测方面,机器人利用探针、电流计、摄像机、电场仪等检测绝缘电阻、泄漏电流、附盐密度、疏水性能、放电痕迹、材质缺陷和电场分布。例如,机器人可通过电阻与电压分布判断绝缘子串的劣化程度^[52],利用表面电场分布和憎水性图像来分析绝缘性能^[53]。在绝缘子清洁方面,机器人携清洁剂或清扫工具沿绝缘子表面移动以清除污秽,包括冲洗法和清扫法。其中,冲洗法是利用安装于机器人执行器的喷嘴对称地冲洗绝缘子表面^[5]。为避免水流引起的绝缘子污秽闪络^[54],减轻机器人荷重,清扫法使用干式清洁器沿绝缘子表面摆动^[55]或旋转^[56]。相比摆动式清扫,旋转式清洁作用面积小,但能避免电位跨越。

为满足不同绝缘子的检修需求,机器人的结构需进行适应性优化。例如:文献[57]将绝缘子机器人分为内、外两部分,外层用于沿瓷绝缘子串爬行,内层相对外层转动以开展清扫与测零;文献[58]采用双翼结构,通过调整翼间张角来契合不同尺寸的双I型绝缘子串;文献[59]采用单电机同步驱动的双轮-腿架构,解决了机器人在悬垂绝缘子串的稳定停靠问题。

2.2.3 车载式机器人

导线机器人与绝缘子机器人直接运行于架空线路,其尺寸、荷载量与动作范围有限。车载式机器人运行于地面,其执行机构安装于吊杆起重机车,具有关节多、可伸缩、绝缘性强等特点,可用于对架空线路开展远超人力的高风险带电检修^[60]。

车载式机器人分为三爪式和单爪式。三爪式机构可以支撑、抓取同侧三相导线,而单爪式机构则用于操作大重量的单导线^[61],如附录A图A4所示。车载式机器人可用于带电接续长距离导线、更换绝缘子串、临时支撑导线等,可以辅助输电线路重建与回路切换,进而降低架空线路架设成本,提高塔上电工检修安全性^[62]。但是,车载式机器人运动依赖于重型机车,经济性和灵活性较差,且其受限于地形条件和线路安全距离,不适用于环境复杂、步骤繁多的带电检修场景。

2.3 电力电缆机器人

电力电缆机器人运动于电缆表面及其周围环境,能够检查电缆外观、运行状态与敷设环境,并实现组件维修与防灾。电力电缆机器人按检修对象可分为陆地电缆机器人和 underwater 电缆机器人。

2.3.1 陆地电缆机器人

陆地电缆机器人主要用于电缆运行状态参数采

集、有害气体含量监测、隧道防火与防爆等。该类机器人需适应狭窄、潮湿、高温、弱光、通信差、通风不佳的隧道环境。

陆地电缆机器人主要包括轨道式、轮式和履带式。

1) 轨道式机器人运动于隧道内壁,利用轨道内缆线取能和通信,通过云台的转动及升降对电力电缆开展带电检修。轨道式机器人需额外架设轨道,灵活性差,载荷有限,功能较难拓展,且受隧道内耦合磁场的影响^[63],仅适用于带电巡检。

2) 相比轨道式机器人,轮式和履带式机器人可自由行走,示意图见附录 A 图 A5。轮式机器人可爬行于电缆上方,贴合电缆测量温度、局部放电、介电损耗等^[64]。履带式机器人能跨越阶梯、爬坡及转向,适用于宽仅 1 m 且存在障碍、沟槽和水坑的地下电缆隧道及电缆桥架^[65]。上述机器人均需要充足的运动空间,因此仍无法对埋敷于排管、桥梁的电力电缆开展带电检修。

2.3.2 水下电缆机器人

水下电缆机器人主要用于水下电缆定位识别、运行环境勘察、缺陷识别与故障预警等^[66]。该类机器人与水体直接接触,需要适应压强大、地形复杂、能见度低、扰动频繁、存在地球磁场干扰的水下环境^[67]。

水下电缆机器人可以分为遥控式机器人 ROV (Remotely Operated Vehicle) 和自主式机器人 AUV (Autonomous Underwater Vehicle)。其中,ROV 通过脐带电缆与水上母船联系,载荷大,可实时操控,可用于海底电缆的带电敷设^[68],如附录 A 图 A6 所示。相比 ROV,AUV 具有无人无缆与自主控制等优点,可用于检测深水区的电力电缆。但是,在电缆电流和地球磁场的耦合作用下,AUV 控制难度更大、检测数据质量相对较低^[69]。

现有水下电缆机器人的航行及动作需考虑复杂的流体环境,其所受阻力受行驶速度、载重、形状、尺寸、洋流等影响,传感可靠性和控制准确性要求较高。相比陆地电缆机器人,水下电缆机器人的运行成本高,不适用于日常带电检修。

2.4 GIL 机器人

GIL 机器人运动于密闭、水土压力大,存在飞虫和带电粉尘的管廊,主要用于监控 GIL 运行状态、读取仪表示数、监测气体环境等。

我国研发的轨道式 GIL 智能巡检系统由机器人本体、轨道、通信、配电和监控等系统组成,可长期运行于水下 60 m、全长 6 km 的江底管廊^[4]。自走式 GIL 巡检机器人可紧密贴合 GIL 壳体,利用超声法检测局部放电^[70]。由于 GIL 投运时间较短,智能带电检修方案尚未健全。

3 输电线路智能带电检修的关键技术

基于电力物联网的输电线路智能带电检修系统如图 2 所示,其包括智能装备(终端层)、通信网络(网络层)、基站(平台层)和专家系统(应用层)^[71]。在该架构中,智能装备运动于输电线路及其周围带电环境开展检修,通信网络支撑智能装备与基站间的数据传输,基站用于存储、管理数据,后台专家系统用于监控并评估智能装备和输电线路运行状态。其中,智能装备是输电线路状态全面感知与故障高效处理的关键环节。

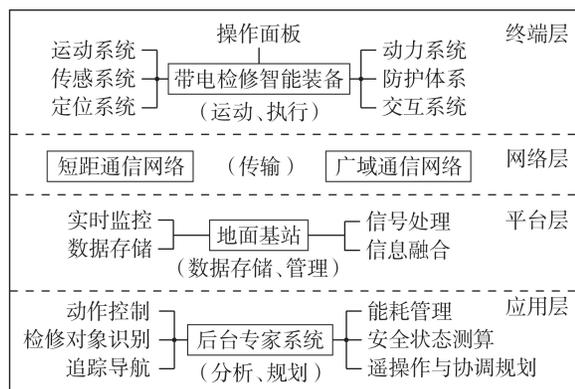


图 2 输电线路智能带电检修系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of intelligent live-line maintenance system for power transmission lines

为满足安全、可靠、灵活、便于操作等要求,智能装备需具备如下功能。①取能:持久、稳定地获取动力。②控制:结合外界条件自主控制运动。③传感:准确识别输电线路设备的运行状态和环境条件。④导航:定位检修对象,规划运动路径。⑤防护:保证输电线路和自身的安全稳定。⑥人机交互:传输状态参数,实现人-机配合等。

3.1 智能带电检修装备的取能技术

可靠的动力供给可保障智能装备大范围、长时间的带电检修。智能带电检修装备的能量应方便获取、转化效率高、状态可控,相应地,蓄能元件也应满足容量大、寿命长、重量轻、体积小等要求。

智能带电检修装备动力来源与特点对比如表 2 所示。在能量来源方面,传统的动力源主要为燃油,对智能装备的荷载需求大,需定期补充^[72],且燃油会增大智能带电检修装备剧烈碰撞与意外坠落后爆炸的风险。蓄电池可减小智能带电检修装备的体积和重量,但由于电池容量与寿命有限,需人工定期充电或更换电池^[73]。光电池直接从野外环境下取能,便于拆装维护,然而,受限于环境光照条件、智能装备的荷载量、光电池的尺寸、能量转化率及控制难度,直接采用光电池对长时间野外作业的检修装备供能的可行性较低^[74]。充电基站的应用打破了电池对智能带电检修装备的制约,智能装备运动至充电座对

接即可自主取能,但该取能方式同时也增加了智能带电检修装备开展带电检修过程中的无效路径^[45]。在线取能技术实现了输电线路的智能带电检修装备的动力持续供给,例如,电力无人机和架空线路机器人通过电磁感应线圈从裸导体表面取能^[75],轨道式机器人则通过导轨内滑触线取能。直接从带电裸导体取能存在输出功率小、效率低、电能质量差等缺点,匹配电磁感应线圈与磁芯参数、优化能量传输方式、建立保护电路等可以解决上述问题^[76]。

表2 智能带电检修装备动力来源与特点

Table 2 Characteristics and type of energy for intelligent live-line maintenance equipment

类型	优点	缺点
燃油	技术成熟	荷载需求大,需补充燃料,碳排放量大,爆炸风险高
蓄电池	体积和重量小	需定期充电与更换电池
光电池	易装卸,便于野外取能	取能受限于光电池性能、尺寸与环境条件
充电基站	装备可自主充电	智能装备无效路程增多
感应线圈	重量轻、成本低	输出功率低,输出电压不稳

为了提升能量的利用率,智能装备的动力系统可以通过能量监管以合理地分配能耗^[77]。例如:文献[78]用H_α观测器研究不同位置和速度下智能装备蓄电池的温度和电流,以评估其荷电状态;文献[79]基于杆塔的档距、高差、导线比载、应力等建立导线机器人的能耗模型,有助于电源选型和巡检方案的制定。

3.2 智能带电检修装备的控制技术

有效的控制是智能带电检修装备在输电线路可靠动作的核心。智能带电检修装备执行带电检修任务的过程由其机械执行机构的动作组合而成。智能带电检修装备的控制需结合环境、检修对象,按照

指令调整电机的电流、转速、转矩和输出功率,使实到姿符合指令位姿。针对不同类型的输电线路,智能带电检修装备的运动及控制需满足如下要求:①在高空环境中平稳自主运动,保持安全距离,避越障碍,避免打滑、偏转、侧倾、摔落和误触^[80];②在管廊或隧道环境中避免剧烈碰撞,能灵活通过狭小空间^[81];③在水下环境中克服水压和粘滞阻力^[82]。

运动学和动力学模型描述了智能带电检修装备的运动和驱动单元运动、输入力及力矩之间的关系。智能带电检修装备是一个非完整约束的多刚体系统,其运动学与动力学建模应充分考虑输电线路设备的结构、柔性、阻尼特性及其与智能带电检修装备各部件的耦合动力学关系,以实现关节电机的合理布局^[83]。

基于运动学与动力学模型,控制算法通过修正电机输出提高智能装备动作的准确性。例如,在路径规划方面,文献[84]通过多维、多级、多模态融合的自适应控制方法提高机器人的暂态响应速度。在重心调整方面,文献[85]采用零力矩点算法来控制路径曲率突变时导线机器人关节的位置、转角和速率,保障机器人在架空线路的越障过程中的平衡。在动作控制方面,文献[86]基于牛顿-欧拉法建立多轴、多关节联动机制来节省控制时间和步骤。此外,采用K-最近邻分类^[87]、模糊逻辑控制^[88]、神经网络^[89]、非线性策略^[90]等智能算法可取得全局最优,减少驱动电机数量,提升偏差收敛速度,增强智能装备在不确定条件下自主动作和学习能力,实现带电检修的精确控制。

3.3 智能带电检修装备的传感技术

准确地感知并判断内部与环境态势是智能带电检修装备动作与导航的前提。智能带电检修装备通过传感器获取并转换内、外部状态信息,以适应检修场景的变化。智能带电检修装备传感技术对比如表3所示。

表3 智能带电检修装备传感技术对比

Table 3 Sensing technology comparison of intelligent live-line maintenance equipment

传感器	测量对象	应用场景	局限性
可见光相机	设备表面反射的可见光	再现输电线路设备结构及运行环境	二维成像,环境干扰因素多
红外传感器	设备表面局部温度或温度场分布	带电设备的温度异常检测	穿透力较差,受环境中温度、光照、热气流、射频辐射等影响
紫外传感器	放电处空气电离产生的紫外线光子数	存在明显局部放电现象的设备缺陷识别	检测结果受观测角度、紫外成像仪增益、环境中紫外线、导电微粒干扰
电场传感器	传感器两电极间的电容变化	带电设备结构变化识别、设备绝缘性能诊断	电容边缘效应引起传感器灵敏度下降
超声传感器	发射并接收回传超声波信号	非接触地感知输电线路设备内部结构、机器人避障导航	受低频设备振动与高频局部放电噪声影响
射线成像装置	射线在设备内部的散射程度	非接触地识别输电线路设备内部损伤	需搭配成像板
气体传感器	检测隧道或管廊内气体含量	敷设于隧道或管廊的电缆及GIL密封性检测及局部放电、过热程度评估	传感器灵敏度受限于环境中的气体浓度
三维激光雷达	发射并接收目标表面反射的激光回波	再现输电线路运行空间,架空线路走廊勘察	检测结果受限于动态采集的激光点云配准
声呐	发射并接收在环境中传播的声波信号	水下电缆运行环境勘察与缺陷检测	清晰度低,受环境噪声干扰

1)内部传感器用于测量智能装备的运动状态,包括限位传感器、码盘、陀螺仪、位移传感器、测速发电机、加速度计、应力计、力矩传感器、倾角传感器等,分别用于获取智能带电检修装备的位置、角位移、直线位移、速度、角速度、加速度、受力、力矩、侧倾角、俯仰角等信息^[91],智能带电检修装备结合上述运动参数控制输出。

2)外部状态传感器测量输电线路设备及其运行环境的状态,智能带电检修装备可根据缺陷特征规划带电检修方案。针对带电输电线路设备的状态感知方法主要有红外、紫外、边缘电场等传感技术。

(1)在输电线路设备异常温度检测方面,红外传感器通过检测局部温度或表面温度场分布确定缺陷位置和程度。例如:文献[92]通过连续的红外检测数据分析断股导线的位置、区域与数目;文献[93]通过对比正常绝缘子红外图像诊断其劣化程度。红外测温不依赖可见光,在能见度较低的隧道和 underwater 环境中,载红外热像仪的智能带电检修装备可实现隧道火情侦查和 underwater 电缆涡流损耗检测^[94]。

(2)紫外传感器通过对紫外脉冲计数与对设备表面紫外光子进行分析识别缺陷及其分布。例如:文献[95]利用搭载紫外摄像机的无人机检测架空线路的局部放电;文献[96]通过比较瓷绝缘子紫外成像图谱上的像素点分布确定局部放电的位置及程度,实现污秽智能分级。由于环境中紫外线和导电微粒的干扰,紫外传感技术多用于局部放电现象明显的缺陷检测。

(3)边缘电场传感器的两端电极位于同侧,利用穿透绝缘层的边缘电场测量绝缘薄膜的厚度。该传感技术无需将被测的输电线路设备放置在极板中间,多用于检测异常电缆介电参数,以诊断电缆绝缘层的老化。例如,文献[97]利用搭载弧形叉指型边缘电场传感器的机器人运动于电缆表面,以检测电缆水树放电现象。

3)针对输电线路设备的内部损伤,无损探伤利用材料缺陷引起的热、声、光、电、磁等物理量的变化,对试件内部异常的性质、尺寸、数量与分布进行检测。无损探伤技术主要有射线和超声检测,分别利用穿透射线的强度和反射声波的幅值、频率、传播时间等评估输电线路设备内部缺陷^[98]。

智能带电检修装备对输电线路运行环境条件的感知方法主要有气体检测、场景再现与测距。

1)气体检测是采用气体传感器分析隧道或管廊内的气体含量。例如,文献[5]利用搭载多种气体传感器的机器人分析管廊内有害气体,以评估隧道环境状态并及时预警。

2)场景再现主要采用成像技术,用轮廓、距离、方位、反射率等信息展现输电线路场景,主要方法包

括光成像和声成像。光成像方法通过图像感知设备,广泛应用于架空线路、隧道、管廊及水下环境^[99]。声成像利用立体声波分辨输电线路的表面状态,在陆地环境中可用于架空线路通道环境测绘以及导线与交叉跨越物的安全距离诊断^[100],在水下环境中常用于水下电缆的定位、追踪和环境勘察^[101]。

3)测距是用距离传感器识别目标、感应智能装备与输电线路设备间的距离。例如:文献[102]利用架空线路的电磁场强度和分布识别机器人与金具的相对位置;文献[103]利用反射激光点的离散度识别障碍物的距离、数目和尺寸。超声测距不受电磁波和可见光的影响,尤其适用于隧道及管廊环境^[65]。此外,行程开关、接近开关、限位开关等传感器同样适用于测距。

事实上,传感效果受天气、温度、光照、材质、磁场、振动和测量角度等干扰。为提高传感质量,可采用多源信息融合和信号处理技术来降低噪声,实现智能带电检修装备对输电线路设备的准确识别和诊断。

3.4 智能带电检修装备的导航技术

导航技术融合传感信息,依据定位和地图,实现智能带电检修装备对可通行区域及运动方向的判断与选择。导航决定智能带电检修装备的运行,使其快速到达指定位置,主要有局部导航和全局导航2类方式^[91]。

局部导航是在环境信息未知或部分已知的条件下,根据智能带电检修装备与参考点之间的信息差决策路径的方法。例如:文献[104]基于图像信息实现电力无人机对架空导线的自主追踪;文献[105]基于带电导线与金具磁场分布差异来实现导线机器人的越障导航;文献[106]利用磁导航技术规划智能装备在电缆隧道的路径;文献[107]提出级联磁感应导航方法,AUV能自动跟踪水下电缆并保持指定距离。上述电磁导航方法仅适用于带电线路,针对不带电的架空地线,文献[108]提出融合超声测距、霍尔效应和机器视觉的多传感定位及导航方法。

在环境信息已知的条件下,全局导航基于卫星遥感地图或三维场景规划智能装备长距离行驶路径。例如:文献[109]基于遥感系统规划无人直升机路径,利用动态补偿算法降低导航误差;文献[110]基于激光雷达点云数据重构架空线路的三维场景,利用视觉伺服控制和几何场景理解来规划无人机的动作和路径。

导航技术是检修装备自主巡检的关键技术之一,传感技术的发展为检修装备导航提供了新的思路和工具。同时,将局部导航与全局导航结合的方式也是未来智能检修装备发展的方向。

3.5 智能带电检修装备的防护技术

处于高电压、强电磁环境中的智能带电检修装备可引起电场畸变甚至局部放电,进而干扰带电检修和输电线路的安全稳定^[111]。为提高智能带电检修装备对输电线路的适应性,应加强其对高电压和强电流的耐受性能,主要体现在装备绝缘与电磁防护两方面。其中,绝缘须根据输电线路的运行电压等级,选取合适的机体结构和材料,并合理规划智能装备的运行轨迹和进出等电位的方式;电磁防护须结合输电线路的电流大小与类型,选取合适的屏蔽、滤波及接地方式。

面向智能带电检修装备的绝缘与电磁防护设计主要包括安全参数测算和防护硬件加装。安全距离校核是安全参数测算的主要内容。智能带电检修时不仅应满足输电线路的安全距离要求,还需预留充足的作业空间以保证其动作不引起组合间隙放电。例如,文献[112]通过架空线路的三维激光雷达点云模型,测算智能带电检修装备与带电导线的距离,实现安全距离校核。

防护硬件包括机械防护、屏蔽和绝缘等机构,其设计与加装方式可参照人工带电检修的安全防范措施。其中,机械防护用于减轻潮湿、曝晒、撞击等影响;屏蔽防护用于抑制环境电磁干扰,主要采用金属屏蔽网包覆智能装备的机身或主体部件;绝缘防护用于避免局部放电对智能带电检修过程的干扰。此外,加装等电位夹持机构和改进接触部位的材质可降低智能带电检修装备与带电体的电位差,提升智能带电检修的安全性^[113]。

3.6 智能带电检修装备的人机交互技术

由于输电线路运行环境复杂且难以控制,以及智能带电检修装备与环境交互能力差、动作可靠性不佳等原因,智能带电检修装备大多局限于一些简单且重复的检修任务。人机交互结合了人的自主性与智能带电检修装备的环境适应能力,扩展了智能带电检修的智能化水平与操作方式。在人机交互过程中,操作人员和智能带电检修装备通过用户接口交流信息,操作人员在基站引导远端的智能带电检修装备动作,处于检修现场的智能带电检修装备向基站发送状态参数并接收来自基站的控制指令,在人工干预下执行检修任务^[114]。

早期人机交互多采用主从控制策略,即操作人员结合检修现场中智能带电检修装备回传的音视频、位置、受力等信息,制定并发送操作方案;智能带电检修装备直接复现操作人员的指令^[115]。

近年来,人机交互基于虚拟现实技术,采用双向反馈策略,操作人员可通过虚拟界面与智能带电检修装备交互^[116]。在主设备端,计算机通过仿真及动画技术重构带电检修场景;操作人员预演智能带电

检修流程;同时,通信系统将控制指令发送至智能带电检修装备,引导其动作,并实时反馈现场参数至主设备端。智能装备在双向控制模式下对比位姿的模拟值和实际值,从而不断修正运动参数,提高动作精度^[117]。

智能带电检修对人机交互技术的即时性、准确性和稳定性有较高的要求,如何完善人机控制任务分配策略,减轻检修人员的操作负担,实现友好、安全的人机交互,仍有待深入研究。

4 总结及展望

本文介绍和分析了近年来架空线路、电力电缆、GIL 3类线路上,电力无人机、架空线路机器人、绝缘子机器人、车载机器人、电缆机器人、GIL检修机器人这6种智能设备的应用环境、结构和功能;从取能、控制、传感、导航、防护、人机交互6个方面对输电线路智能带电检修的关键技术进行了梳理。现有装备的智能化水平较低,依赖于人工协助和遥控,其安全性、灵活性、自主性仍需提高。智能带电检修技术尚处于初步应用阶段,未形成健全的技术与管理标准体系。

限制智能带电检修技术发展的主要挑战总结如下,以供未来研究进行参考。

1)取能技术方面,围绕现阶段智能带电检修装备取能效率低、能量利用率不高等问题,未来研究可以着重优化取能装置结构、改善能量管理方案和研发小型化、轻型化储能装置,实现智能装备的自主能量补给。

2)控制技术方面,为提升智能带电检修装备在非结构环境中的自主作业能力,一方面可以采用模块化、可重构的机械结构与控制体系,研发装配智能柔性执行器,采用轻质高强度材料,以此降低智能带电检修设备的负重,提高智能带电检修设备应对多检修任务的灵活性;另一方面可以研究智能带电检修装备的目标跟踪与稳定控制的方法,增加运动模式、强化控制逻辑、建立精确运动学模型并实时调整参数,实现机身位姿准确判断,避免误触与剧烈碰撞,提高智能带电检修设备的动作响应速度与检修效率。

3)传感技术方面,针对传感器类型复杂、运行环境多变、检修目标繁多的问题,可以从信息采集和处理2个角度着手。信息采集方式的改进包括增加传感类型,融合多源异构传感数据,准确、全面感知输电线路设备的运行态势;信息处理方法的优化包括建立基于大数据与人工智能的多维信息处理平台,实现装备智能决策和输电线路故障就地处置等。

4)导航技术方面,自然环境中输电线路具有交叉跨越、跨度大、地物多变等特点;而隧道与管廊存

在光照不均匀、环境相似性高、转角多等干扰因素。为了适应上述工作环境,需要提高带电检修目标定位精度,强化智能带电检修设备的追踪能力,从而实现作业环境的三维动态建模与行驶路径无轨自主规划。未来的研究一方面需要实现准确定位,即环境信息组合、坐标系转换与配准,增加环境约束条件,非接触准确测量与障碍的距离等;另一方面需要实现精确导航,即克服光线变化的影响,过滤环境噪声,标记特殊位点,理解地图语义信息,提升对非结构化环境的建图精度,根据环境变化动态实时选择路径与调整方位等。

5)防护技术方面,当前智能带电检修设备在带电检修中存在出现故障难以解决、日常维护费用高、故障波及范围广等问题。在后续研究中,提升装备故障恢复能力、强化防护机制、建立标准体系是主要的技术点。其中,提升故障恢复能力主要为提高智能装备故障自诊与急停的能力。强化防护机制包括增设防坠落、防打滑等安全保障机构,面向具体的带电检修场景优化绝缘匹配与电磁兼容参数,研发并应用绝缘与屏蔽新材料,设立限位空间,增强智能带电检修装备对恶劣天气的应对能力等。建立标准体系用于规范智能带电检修装备的生产安装工艺,从而全方位、多阶段把控智能带电检修装备质量。

6)交互技术方面,聚合人的经验、技能与智能带电检修装备的强度、精确度可以提升智能带电检修装备进行复杂操作的能力,释放更高效的生产力。在后续研究中,可以增加人机协作场景,提高交互的便捷性,用人的逻辑推理方式与真实感官体验指导智能带电检修装备作业。

综上所述,未来的智能带电检修技术应加快“机器替代人”的进程,结合人工带电检修经验完善智能带电检修功能。随着云-边协同的人工智能大数据技术的发展,需要充分运用集约的信息监控和管理,为安全、快速和准确的带电检修提供技术支撑。此外,建立协同分布式智能装备群,联结多个智能装备开展带电检修,可以实现数据与信息共享、任务合理分工与协同控制,从而降低单个装备的结构复杂性、控制难度与荷载需求,具有广阔的发展与应用前景。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 《中国电力年鉴》编辑委员会. 2019中国电力年鉴[M]. 北京:中国电力出版社,2019:690-711.
- [2] MENENDEZ O, AUAT CHEEIN F A, PEREZ M, et al. Robotics in power systems: enabling a more reliable and safe grid [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2017, 11(2): 22-34.
- [3] IEC. Electrotechnical vocabulary part 651: live working: IEC 60050-651: 2014[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2014.
- [4] IEEE. National electrical safety code: C2-2017[S]. Piscataway, USA: IEEE Standard Association, 2017.

- [5] 腾云, 陈双, 邓洁清, 等. 智能巡检机器人系统在苏通 GIL 综合管廊工程中的应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 393-401. TENG Yun, CHEN Shuang, DENG Jieqing, et al. Application of intelligent inspection robot system in Sutong GIL utility tunnel project[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 393-401.
- [6] HIROSE S, AOKI S. Development of the insulator washer robot[C]//Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nagoya, Japan: IEEE, 1995: 1783-1789.
- [7] 中国南方电网有限责任公司. 输变电设备缺陷管理标准: Q/CSG 10701—2007[S]. 广州: 中国南方电网有限责任公司, 2017.
- [8] 国家质量技术监督局. 电工术语架空线路: GB/T 2900.51—1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 110 kV~750 kV 架空输电线路施工及验收规范: GB 50233—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [10] 国家能源局. 架空输电线路运行规程: DL/T 741—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [11] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 架空输电线路巡检系统: DL/T 1006—2006[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电工术语电缆: GB/T 2900.10—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [13] KULAGIN D, MAUSETH F, ILDSTAD E. Review of condition assessment methods for subsea high voltage components[J]. Proceedings of the Nordic Insulation Symposium, 2017(24): 26-31.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 电力工程电缆设计标准: GB 50217—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 电气装置安装工程电缆线路施工及验收标准: GB 50168—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [16] 国家能源局. 城市电力电缆线路设计技术规定: DL/T 5221—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [17] 肖登明, 阎究敦. 气体绝缘输电线路(GIL)的应用及发展[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 699-707. XIAO Dengming, YAN Jiudun. Application and development of Gas Insulated transmission Line(GIL)[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 699-707.
- [18] KOCH H. Gas-Insulated transmission Lines(GIL)[M]. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2012: 279-280.
- [19] 陈轩毅, 胡毅, 辛耀中, 等. 高压长距离压缩空气绝缘输电线路的发展前景[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 3137-3142. CHEN Xuanshu, HU Yi, XIN Yaozhong, et al. Prospect of high voltage long distance compressed-air insulated transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 3137-3142.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 额定电压 72.5 kV 及以上刚性气体绝缘输电线路: GB/T 22383—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [21] 李鹏, 颜湘莲, 王浩, 等. 特高压交流 GIL 输电技术研究及应用[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3161-3167. LI Peng, YAN Xianglian, WANG Hao, et al. Research and application of UHVAC gas-insulated transmission line[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3161-3167.
- [22] TOTH J, GILPIN-JACKSON A. Smart view for a smart grid: unmanned aerial vehicles for transmission lines[C]//2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2010: 1-6.
- [23] ALHASSAN A B, ZHANG X D, SHEN H M, et al. Power transmission line inspection robots: a review, trends and challenges for future research[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 118: 105862.

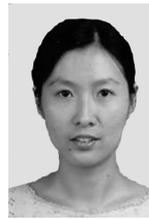
- [24] SHAKHATREH H, SAWALMEH A H, AL-FUQAHA A, et al. Unmanned Aerial Vehicles(UAVs): a survey on civil applications and key research challenges[J]. IEEE Access, 2019, 7: 48572-48634.
- [25] CHEN Chi, YANG Bisheng, SONG Shuang, et al. Automatic clearance anomaly detection for transmission line corridors utilizing UAV-borne LIDAR data[J]. Remote Sensing, 2018, 10(4):613.
- [26] NAKAMURA H, SHIMADA T, KOBAYASHI H. An inspection robot for feeder cables-snake like motion control[C]// Proceedings of the 1992 International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation. San Diego, CA, USA: IEEE, 1992: 849-852.
- [27] SAWADA J, KUSUMOTO K, MAIKAWA Y, et al. A mobile robot for inspection of power transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(1):309-315.
- [28] GONÇALVES R S, CARVALHO J C M. A mobile robot to be applied in high-voltage power lines[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2015, 37(1):349-359.
- [29] MONTAMBAULT S, POULIOT N. The HQ LineROVer: contributing to innovation in transmission line maintenance[C]// 2003 IEEE 10th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance. Orlando, FL, USA: IEEE, 2003: 33-40.
- [30] POULIOT N, RICHARD P L, MONTAMBAULT S. LineScout technology opens the way to robotic inspection and maintenance of high-voltage power lines[J]. IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, 2015, 2(1):1-11.
- [31] TAO Guanghong, FANG Lijun, LIN Xuxin. Optimization design of the multi-unit serial inspection robot for power transmission line[C]// 2016 4th International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Jinan, China: IEEE, 2016: 1-6.
- [32] DEBENEST P, GUARNIERI M. Expliner: from prototype towards a practical robot for inspection of high-voltage lines[C]// 2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2010: 1-6.
- [33] RICHARD P L, POULIOT N, MORIN F, et al. LineRanger: analysis and field testing of an innovative robot for efficient assessment of bundled high-voltage powerlines[C]// 2019 International Conference on Robotics and Automation. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2019: 9130-9136.
- [34] ZHANG Yongdong, WANG Tao, LI Jinbin, et al. Research on new type of live working robot system for overhead transmission lines[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1074:012040.
- [35] CAO Yanjun, WANG Hongguang, CHANG Yong, et al. An entanglement-clearing robot for power transmission line with composite clearing tool[C]// 2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. Shenyang, China: IEEE, 2015: 591-596.
- [36] MILLER R, ABBASI F, MOHAMMADPOUR J. Power line robotic device for overhead line inspection and maintenance[J]. Industrial Robot: an International Journal, 2017, 44(1):75-84.
- [37] ZHAO Jinlong, GUO Rui, CAO Lei, et al. Improvement of LineROVer: a mobile robot for de-icing of transmission lines [C]// 2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2010: 1-4.
- [38] 魏书宁, 王耀南, 印峰, 等. 高压输电线路除冰机器人的除冰机构设计[J]. 中国机械工程, 2012, 23(7): 771-776
WEI Shuning, WANG Yaonan, YIN Feng, et al. Design of de-icing mechanism of de-icing robot for high voltage power transmission line[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(7): 771-776.
- [39] ZHANG Bo, WANG Qiaochu, WANG Tao. Research on the deicing robot and motion characteristic of the four divisions high-voltage line[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 417:012008.
- [40] 何青, 吕锡锋, 赵晓彤. 激励条件下高压输电线路除冰技术应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(18): 2997-3003
HE Qing, LÜ Xifeng, ZHAO Xiaotong. Research on application of de-icing technology on high voltage transmission line under the condition of incentive[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(18): 2997-3003.
- [41] CAMPOS M F M, PEREIRA G A S, VALE S R C, et al. A robot for installation and removal of aircraft warning spheres on aerial power transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1581-1582.
- [42] TANI E, YAMADA H, KATO R, et al. Development of the tightening nut task skill using a power distribution line maintenance experimental robot[C]// 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration. Nagoya, Japan: IEEE, 2015: 558-563.
- [43] CAO Lei, GUO Rui, WU Pinghong, et al. Screwing manipulation on power transmission lines with a robotic system[C]// 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Tianjin, China: IEEE, 2014: 1294-1299.
- [44] 彭向阳, 钱金菊, 吴功平, 等. 架空输电线路机器人全自主巡检系统及示范应用[J]. 高电压技术, 2017, 43(8): 2582-2591.
PENG Xiangyang, QIAN Jinju, WU Gongping, et al. Full automatic inspection system and its demonstration application based on robot for overhead transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8): 2582-2591.
- [45] 闫寒, 吴功平, 曹琪, 等. 高压输电线路救援机器人结构设计与分析[J]. 机械设计与制造, 2019(1): 20-23, 28.
YAN Han, WU Gongping, CAO Qi, et al. The structure design and analysis of high-voltage transmission line rescue robot[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(1): 20-23, 28.
- [46] PEUNGSUNGWAL S, PUNGSIRI B, CHAMNONGTHAI K, et al. Autonomous robot for a power transmission line inspection [C]// The 2001 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Sydney, Australia: IEEE, 2001: 121-124.
- [47] 于娜, 吴功平, 江维, 等. 高压线路绝缘子带电更换作业机器人构型与轨迹规划[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(7): 640-645, 653.
YU Na, WU Gongping, JIANG Wei, et al. Configuration and trajectory planning of insulator charged replacement operation robot for high-voltage transmission line[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(7): 640-645, 653.
- [48] WANG Lin, WANG Hongguang, CHANG Yong, et al. Mechanism design of an insulator cleaning robot for suspension insulator strings[C]// 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Zhuhai, China: IEEE, 2015: 2217-2222.
- [49] PARK J Y, CHO B H, LEE J K. Development of robot mechanism for inspection of live-line suspension insulator string in 345 kV power lines[C]// 2008 International Conference on Control, Automation and Systems. Seoul, Korea: IEEE, 2008: 2062-2065.
- [50] LI Wen, ZOU Dehua, ZOU Ming, et al. Study on insulator deterioration mechanism of ± 800 kV transmission lines and live detection method of faulty insulator [C]// 2016 International Conference on Computer, Mechatronics and Electronic Engineering. Beijing, China: DEStech Publications, 2016: 1-9.
- [51] WANG Hongguang, JIANG Yong, LIU Aihua, et al. Research

- of power transmission line maintenance robots in SIACAS [C]//2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Montreal, QC, Canada:IEEE,2010:1-7.
- [52] PARK J Y, LEE J K, CHO B H, et al. An inspection robot for live-line suspension insulator strings in 345 kV power lines [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, 27(2):632-639.
- [53] ZHONG Liang, JIA Juan, GUO Rui, et al. Mobile robot for inspection of porcelain insulator strings [C]//Proceedings of the 2014 3rd International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Foz do Iguacu, Brazil:IEEE,2014:1-4.
- [54] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 电力设备带电水冲洗导则:GB/T 13395—2008 [S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [55] ZHANG Xin, WU Guoxin, WANG Peng, et al. The research and design of automatic sweeping device of substation post insulator [C]//2016 4th International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Jinan, China:IEEE,2016:1-4.
- [56] PARK J Y, CHO B H, BYUN S H, et al. Development of cleaning robot system for live-line suspension insulator strings [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2009, 7(2):211-220.
- [57] CHENG Zhiyong, JIA Juan, ZHONG Liang, et al. Development of insulator cleaning robot [C]//2016 4th International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Jinan, China:IEEE,2016:1-3.
- [58] PARK J Y, CHO B H, BYUN S H. Development of automatic cleaning robot for live-line insulators [C]//2006 IEEE 11th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-line Maintenance. Albuquerque, NM, USA:IEEE,2006:1-7.
- [59] LI Shujun, WANG Hongguang, XIU Shicao, et al. Moving mechanism design and analysis of suspension insulator inspection robot [M]//CECCARELLI M, GLAZUNOV V. *Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2014:93-101.
- [60] TAKAOKA K, YOKOYAMA K, WAKISAKO H, et al. Development of the fully-automatic live-line maintenance robot-Phase III [C]//Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP2001). Fukuoka, Japan:IEEE,2001:423-428.
- [61] ELIZONDO D, GENTILE T, CANDIA H, et al. Ground based robots for energized transmission line work-technology description, field projects and technical-economical justification of their application [C]//2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. Sao Paulo, Brazil: IEEE, 2010:700-705.
- [62] ELIZONDO D, GENTILE T, CANDIA H, et al. Overview of robotic applications for energized transmission line work: technologies, field projects and future developments [C]//2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Montreal, QC, Canada:IEEE,2010:1-7.
- [63] 吴华,张晔,杨国田,等. 巡检机器人用漏泄通信线路在高压电缆隧道中的感性耦合影响[J]. *高电压技术*, 2015, 41(8):2697-2705.
- WU Hua, ZHANG Ye, YANG Guotian, et al. Impact of inductive coupling effects on communication feeder for inspection robot in high-voltage power cable tunnel [J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(8):2697-2705.
- [64] JIANG Bing, SAMPLE A P, WISTORT R M, et al. Autonomous robotic monitoring of underground cable systems [C]//12th International Conference on Advanced Robotics. Seattle, WA, USA:IEEE,2005:673-679.
- [65] FU Zhuang, CHEN Zupan, ZHENG Chao, et al. A cable-tunnel inspecting robot for dangerous environment [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2008, 5(3):32.
- [66] BALASURIYA A, URA T. Autonomous underwater vehicles for submarine cable inspection: experimental results [C]//2001 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Tucson, AZ, USA:IEEE,2001:377-382.
- [67] TAORMINA B, BALD J, WANT A, et al. A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: knowledge gaps, recommendations and future directions [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 96:380-391.
- [68] CHOI J K, YOKOBIKI T, KAWAGUCHI K. ROV-based automated cable-laying system: application to DONET2 installation [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, 43(3):665-676.
- [69] KOJIMA J, KATO Y, ASAKAWA K, et al. Experimental results of autonomous underwater vehicle 'AQUA EXPLORER 2' for inspection of underwater cables [C]//IEEE Oceanic Engineering Society. Nice, France:IEEE,1998:113-117.
- [70] WEI Xu, TENG Yun, LIU Zuquan, et al. Application research of the partial discharge automatic detection device and diagnostic method based on the ultrasonic in long distance GIL equipment [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1213:052088.
- [71] SALEEM Y, CRESPI N, REHMANI M H, et al. Internet of Things-aided smart grid: technologies, architectures, applications, prototypes, and future research directions [J]. *IEEE Access*, 2019, 7:62962-63003.
- [72] LI Hongmei, WANG Binhao, LIU Liang, et al. The design and application of SmartCopter: an unmanned helicopter based robot for transmission line inspection [C]//2013 Chinese Automation Congress. Changsha, China:IEEE,2013:697-702.
- [73] WANG Han, LI En, YANG Guodong, et al. Design of an inspection robot system with hybrid operation modes for power transmission lines [C]//2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Tianjin, China:IEEE,2019:2571-2576.
- [74] YANG Chuankai, HE Yuanjian, QU Haoyue, et al. Analysis, design and implement of asymmetric coupled wireless power transfer systems for unmanned aerial vehicles [J]. *AIP Advances*, 2019, 9(2):025206.
- [75] JUNAID A B, LEE Y, KIM Y. Design and implementation of autonomous wireless charging station for rotary-wing UAVs [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 54:253-266.
- [76] WANG Wei, HUANG Xuelian, GUO Jinpeng, et al. Power stabilization based on efficiency optimization for WPT systems with single relay by frequency configuration and distribution design of receivers [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(9):7011-7024.
- [77] KIM H, KIM B K. Online minimum-energy trajectory planning and control on a straight-line path for three-wheeled omnidirectional mobile robots [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(9):4771-4779.
- [78] ZHANG Fei, LIU Guangjun, FANG Lijin, et al. Estimation of battery state of charge with H_{∞} observer: applied to a robot for inspecting power transmission lines [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(2):1086-1095.
- [79] 付兴伟,景辉,吴功平,等. 沿地线穿越越障巡线机器人能耗模型的研究 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2014, 47(4):565-570.
- FU Xingwei, JING Hui, WU Gongping, et al. Research on energy consumption model of autonomous inspection robot for grounding wire of overhead transmission line [J]. *Engineering*

- Journal of Wuhan University, 2014, 47(4):565-570.
- [80] GONÇALVES R S, CARVALHO J C M. Review and latest trends in mobile robots used on power transmission lines[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10(12):408.
- [81] MONTERO R, VICTORES J G, MARTÍNEZ S, et al. Past, present and future of robotic tunnel inspection[J]. Automation in Construction, 2015, 59:99-112.
- [82] SIVČEV S, COLEMAN J, OMERDIĆ E, et al. Underwater manipulators: a review[J]. Ocean Engineering, 2018, 163:431-450.
- [83] 王耀南, 魏书宁, 印峰, 等. 输电线路除冰机器人关键技术综述[J]. 机械工程学报, 2011, 47(23):30-38.
WANG Yaonan, WEI Shuning, YIN Feng, et al. Review on key technology of de-icing robot running on overhead transmission line[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(23):30-38.
- [84] ONAT A, OZKAN M. Dynamic adaptive trajectory tracking control of nonholonomic mobile robots using multiple models approach[J]. Advanced Robotics, 2015, 29(14):913-928.
- [85] WANG Weijie, HE Tao, WANG Hesheng, et al. Balance control of a novel power transmission line inspection robot[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Zhuhai, China: IEEE, 2015:1882-1887.
- [86] YAN Yu, ZOU Dehua, LIU Xiaqing, et al. Study on control of two axis linkage of live-working robot for power transmission lines[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 224(1):012026.
- [87] WEI Shuning, WANG Yaonan, TANG Yong. KNN-Q(λ) algorithm-based line-grasping control of a de-icing robot[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2012, 226(7):936-946.
- [88] WU Hua, WU Yanxiong, MENG Lingzhi, et al. Hybrid velocity switching and fuzzy logic control scheme for cable tunnel inspection robot[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2015, 29(6):2619-2627.
- [89] YANG Yimin, WANG Yaonan, YUAN Xiaofang, et al. Neural network-based self-learning control for power transmission line deicing robot[J]. Neural Computing and Applications, 2013, 22(5):969-986.
- [90] ABDULLAH A M, ZAKARIA N I, JALIL K A A, et al. Review of the control system for an unmanned underwater remotely operated vehicle[M]//ÖCHSNER A. Engineering Applications for New Materials and Technologies. Cham, Switzerland: Springer, 2018:609-631.
- [91] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 机器人与机器人装备 词汇: GB/T 12643—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [92] 周凤余, 李贻斌, 李峰, 等. 高压输电线路巡检机器人在线断股检测与诊断系统[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14):77-81, 107.
ZHOU Fengyu, LI Yibin, LI Feng, et al. An on-line broken strand detection and diagnosis system for high-voltage transmission line inspection robots[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14):77-81, 107.
- [93] HAN S, HAO R, LEE J. Inspection of insulators on high-voltage power transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4):2319-2327.
- [94] KARUNAKARAN P, OSMAN M S, LAU A K S, et al. Underwater electricity transmission using electric cables suspended within carbon steel pipes[C]//2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication. Mysore, India: IEEE, 2017:1247-1253.
- [95] MOORE A J, SCHUBERT M, RYMER N. Technologies and operations for high voltage corona detection with UAVs[C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Portland, OR, USA: IEEE, 2018:1-5.
- [96] JIN Lijun, ZHANG Da. Contamination grades recognition of ceramic insulators using fused features of infrared and ultraviolet images[J]. Energies, 2015, 8(2):837-858.
- [97] LIANG Mengyu, DIAN Songyi, LIU Tao. Insulation status mobile monitoring for power cable based on a novel fringing electric field method[C]//2011 Conference on Electrical, Information Engineering and Mechatronics. London, UK: Springer, 2012:987-994.
- [98] MIRALLÈS F, POULIOT N, MONTAMBAULT S. State-of-the-art review of computer vision for the management of power transmission lines[C]//Proceedings of the 2014 3rd International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Foz do Iguacu, Brazil: IEEE, 2014:1-6.
- [99] ZHAO Jingjing, SUN Jixiang, ZHOU Shilin, et al. A novel method for detecting encroachments on transmission lines based on visual attention[C]//2011 Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation. Zhangjiajie, China: IEEE, 2011:93-96.
- [100] MAI Xiaoming, PAN Ziyu, QIAN Jinju, et al. Anomaly detection of power transmission line using stereo vision-based multirotor UAV[C]//2018 Chinese Automation Congress. Xi'an, China: IEEE, 2018:2440-2445.
- [101] 黄小卫, 吴聪, 郭强, 等. 海南联网工程 500 kV 海底电缆检测水下遥控机器人的关键功能设计[J]. 南方电网技术, 2018, 12(7):52-59.
HUANG Xiaowei, WU Cong, GUO Qiang, et al. Key functions design of remotely operated vehicle used for the inspection of 500 kV submarine cable in Hainan interconnection project[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(7):52-59.
- [102] WU Gongping, ZHENG Tuo, XIAO Hua, et al. Navigation, location and non-collision obstacles overcoming for high-voltage power transmission-line inspection robot[C]//2009 International Conference on Mechatronics and Automation. Changchun, China: IEEE, 2009:2014-2020.
- [103] RICHARD P L, POULIOT N, MONTAMBAULT S. Introduction of a LIDAR-based obstacle detection system on the LineScout power line robot[C]//2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Besacon, France: IEEE, 2014:1734-1740.
- [104] CERÓN A, MONDRAGÓN I, PRIETO F. Onboard visual-based navigation system for power line following with UAV[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2018, 15(2):172988141876345.
- [105] WU Gongping, ZHENG Tuo, HUANG Zhenglie, et al. Navigation strategy for local autonomous obstacles-overcoming based on magnetic density detection for inspection robot of single split high voltage transmission line[C]//2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation. Jinan, China: IEEE, 2010:6555-6561.
- [106] HUANG Shuangde, ZHOU Zigeng, XU Baoyu, et al. Path planning and positioning technology of intelligent inspection robot in cable tunnel[J]. International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, 2019, 1(5):81-86.
- [107] YU Caiyang, XIANG Xianbo, ZUO Mingjiu, et al. Underwater cable tracking control of under-actuated AUV[C]//2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV). Tokyo, Japan: IEEE, 2016:324-329.
- [108] 李维峰, 付兴伟, 徐显金, 等. 沿输电线路地线行驶巡检机器人定位方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(4):511-515.
LI Weifeng, FU Xingwei, XU Xianjin, et al. Positioning inspec-

- tion robot along ground wire of high-voltage transmission lines[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2011, 44(4):511-515.
- [109] LIU Zhanchao, ZHU Zhuangsheng, MAI Xiaoming, et al. Dynamic error compensation of POS in power transmission line inspection[C]//2013 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA). Toronto, ON, Canada: IEEE, 2013:408-411.
- [110] CERÓN A, MONDRAGÓN I, PRIETO F. Research on power line inspection by visual based navigation[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. San Francisco, USA: [s.n.], 2015: 8-12.
- [111] PU Ziheng, XIONG Yuyao, WANG Haitao, et al. Design and construction of a new insulator detection robot for application in 500 kV strings: electric field analysis and field testing [J]. *Electric Power Systems Research*, 2019, 173:48-55.
- [112] 彭向阳, 陈驰, 饶章权, 等. 基于无人机多传感器数据采集的电力线路安全巡检及智能诊断[J]. *高电压技术*, 2015, 41(1): 159-166.
- PENG Xiangyang, CHEN Chi, RAO Zhangquan, et al. Safety inspection and intelligent diagnosis of transmission line based on unmanned helicopter of multi sensor data acquisition[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(1):159-166.
- [113] ZHOU Qing, ZHOU Xiaolong, LI Xinping, et al. Mechanical design and research of a novel power lines inspection robot [C]//2016 International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICIM). Chengdu, China: IEEE, 2016:363-366.
- [114] MAI Xiaoming, CHEN Jiangcheng, WANG Yang, et al. A teleoperation framework of hot line work robot[C]//2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Changchun, China: IEEE, 2018:1872-1876.
- [115] PENIN L F, ARACIL R, FERRE M, et al. Telerobotic system for live power lines maintenance: ROBTET[C]//Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Leuven, Belgium: IEEE, 1998:2110-2115.
- [116] POULIOT N, LATULIPPE P, MONTAMBAULT S. Reliable and intuitive teleoperation of LineScout: a mobile robot for live transmission line maintenance[C]//2009 IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. St. Louis, MO, USA: IEEE, 2009:1703-1710.
- [117] WANG Yang, CHEN Jiacheng, MAI Xiaoming, et al. Event-based planning and control for teleoperation of hot line work robot [C]//2018 IEEE 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. Tianjin, China: IEEE, 2018:339-343.

作者简介:



郝艳捧

郝艳捧(1974—),女,河北晋州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为输电设备状态感知技术,污秽、覆冰、暴雨、雷电下输变电设备外绝缘安全以及介质阻挡放电、沿面放电、空气间隙放电、局部放电等气体放电理论(E-mail:yphao@scut.edu.cn);

梁 芾(1997—),女,广东惠州人,博士研究生,主要研究方向为输变电设备状态智能感知与预警技术(E-mail:epwliang@mail.

scut.edu.cn);

潘锐健(1993—),男,广东汕头人,硕士研究生,从事复合绝缘子温升状态光纤传感技术方面的研究工作(E-mail:201821013920@mail.scut.edu.cn)。

罗 兵(1966—),男,重庆人,教授级高级工程师,博士,主要从事高电压与绝缘技术、新型传感技术方面的研究工作(E-mail:luobing@csg.cn)。

(编辑 任思思)

Review on intelligent live-line maintenance technology applied on power transmission lines

HAO Yanpeng¹, LIANG Wei¹, PAN Ruijian¹, LUO Bing², LI Licheng^{1,2}, ZHANG Fuzeng², WANG Tingting²

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Intelligent equipment instead of manual live-line maintenance can ensure the safety of live working personnel and the security and stability of power grid. However, how to complete live-line maintenance safely, reliably and efficiently in multiple application scenarios is still a key issue. The operation environment and live-line maintenance requirements of overhead power line, power cable and GIL (Gas Insulated transmission Line) are introduced, and the application environment, structure and function of six kinds of intelligent equipment, including power UAV (Unmanned Aerial Vehicle), overhead line robot, insulator robot, vehicle mounted robot, cable robot and GIL maintenance robot are analyzed. Then, the key technologies of intelligent live-line maintenance of transmission lines are summarized from six aspects of energy acquisition, control, sensing, navigation, protection and human-computer interaction. Finally, the existing problems of intelligent live-line maintenance equipment and technologies are analyzed, and its development trend is prospected.

Key words: power transmission lines; intelligent equipment; live-line maintenance; live-line maintenance robot; review

附录 A

表 A1 架空线路常见缺陷及带电检修需求

Table A1 Common defects and live-line maintenance requirements for overhead power lines

部件	缺陷	带电检修需求
杆塔及拉线	塔材变形、锈蚀或开裂	修补塔材、螺栓
	塔身、横担倾斜	调整塔身、横担
	拉线锈蚀、损伤、松弛或断裂	调整修补拉线
	UT 型线夹缺失、锈蚀、损伤	更换拉线金具
	塔身螺栓松动或缺失	调整或修补螺栓
	塔上有鸟巢等异物	清除杆塔异物
基础	鼓胀、缺土、下沉、缺损	检查杆塔运行状态
	异物堆积	
导线	线上悬挂长异物	清除导/地线异物
	断股、散股、锈蚀、断线	修补导线、调整金具
	覆冰	导/地线除冰
	弛度不平衡、弧垂异常	调整导线
	安全距离不足	测量距离
金具	变形、蚀损、开裂	金具更换
	线夹内橡胶部分窜动或缺失	
	销钉、螺栓松动或缺失	螺栓修补
	带销螺栓的螺帽缺针	
	金具发热	无损探伤
		紧固螺栓
		降低接触面电阻
		更换金具
	金具移位、松脱	调整金具
	预绞丝、补修管、接续条蚀损或断裂	修补导线
绝缘子	玻璃绝缘子自爆	更换绝缘子
	瓷绝缘子炸裂	
	存在多片零值绝缘子	
	存在局部放电痕迹	调整绝缘子串
	钢脚或钢帽变形、锈蚀、开裂	
	复合绝缘子伞裙破裂	
	连接滑移	
覆冰或存在异物	绝缘子除异物	
污秽	清扫/清洗绝缘子	
倾斜	调整绝缘子串	
接地装置	接地带锈蚀、断裂	接地带修补、更换
		检测接地电阻
	连接螺丝松动	螺栓调整或更换

表 A2 电力电缆常见缺陷及带电检修需求

Table A2 Common defects and live-line maintenance requirements for power cables

部位	缺陷	带电检修需求
电缆本体	护层破损、腐蚀、变形	可见光检查、绝缘电阻测量
	拉伸、盘绕、移位、摆动	检查外部负荷、调整电缆位置
	局部弯曲半径过小	
	绝缘材料存在杂质、气隙、突起、凹坑、划痕	可见光检查、无损探伤
	主绝缘受潮、受损	绝缘电阻测量
	绝缘屏蔽层突起	可见光检查、无损探伤
	过热、温升异常	测温、局部放电检测、气体检测
	充油电缆的油压异常	油压检测
	终端、接头处有渗漏现象	可见光检查、油压检测、绝缘电阻测量
	存在放电痕迹	局部放电检测
	屏蔽接触不良	检查电气连接
	护层接地不良	检查电气连接、环流测量、感应电压检测、接地电流测量、更换接地
	接线有误	装置
电缆附件	终端、接头处连接松动	红外测温、金具紧固检测
	电缆附件材料缺陷	无损探伤
	固定装置失效	修复、更换或增加固定装置
	标志牌破损或移位	修复、更换或增加标志牌
	密封受潮	局部放电检测、检查短路故障
	金属外壳破损、腐蚀、变形	修补、更换、安装金属外壳
	金属外壳接地不良	电缆附属设施接地联通性测量
	附件与电缆本体连接不良	测温、检查接线、局部放电检测
	中间接头异常发热	
	中间接头击穿	
附属设备	连接界面被导电微粒污染	污秽检查、电场强度检测
	应力锥缺陷	电场强度检测、局部放电检测、无损探伤
	缺失、损伤、锈蚀	可见光检查、无损探伤
	异常发热	测温、无损探伤、检查接线
	电缆通道	排水系统异常
防火设施异常		更换或修复防火设施
受损、破坏、击穿、渗漏		修复电缆隧道
温度高、温升快、有明火		红外检测、灭火作业
有毒有害气体超出阈值		红外测温、气体含量检测
电缆支架	变形、损坏	更换或修复支架

表 A3 GIL 常见缺陷分类及带电检修需求

TableA3 Common defects and live-line maintenance requirements for GIL

部位	缺陷	带电检修需求
外壳	破损、变形、腐蚀	可见光检查、气体检测、外壳受力检查、运行环境检查、密封性
	焊缝异常	检查、外壳修复
	腐蚀	防腐系统修复或更换
	过热、温升异常	测温、局部放电检测
	法兰面连接异常	测温、法兰面螺栓紧固
支撑绝缘子	存在裂纹、气泡	无损探伤、局部放电检测
	粗糙度过大	
	存在界面气隙	
导体	导电微粒污染	导电微粒检测、局部放电检测
	振动	振动检测
	存在毛刺、裂纹	无损探伤、局部放电检测
管内气体环境	管道内存在导电微粒	导电微粒检测、局部放电检测、测温
	微水含量超出阈值	气体成分测量 气室微水测量
	气压异常	气室气压测量



(a) 无人直升机



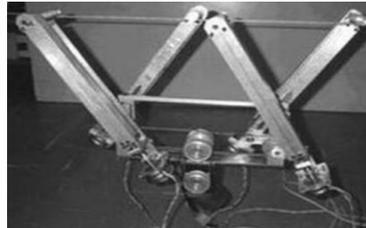
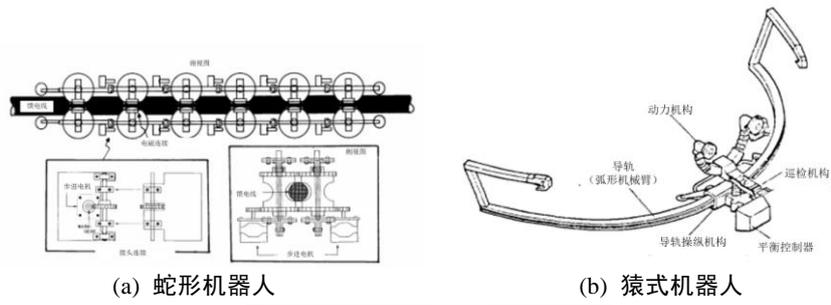
(b) 固定翼无人机



(c) 多旋翼无人机

图 A1 电力无人机示意图

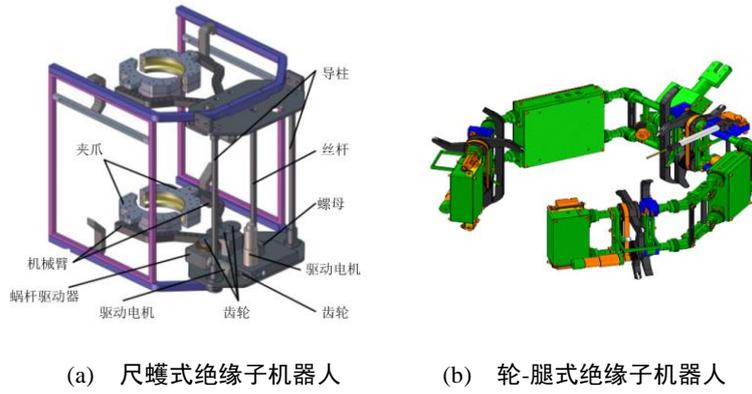
Fig.A1 Schematic diagram of UAVs



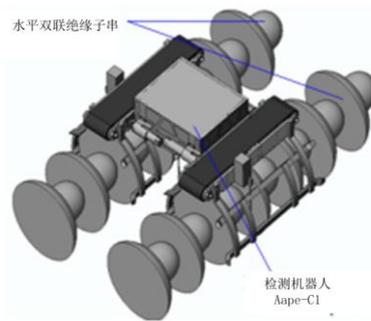
(c) 腿式机器人

图 A2 架空线路机器人

Fig.A2 Schematic diagrams of overhead line robots



(c) 夹爪式绝缘子机器人



(d) 履带式绝缘子机器人

图 A3 绝缘子机器人示意图

Fig.A3 Schematic diagram of insulator robots



图 A4 单爪式车载式机器人示意图

Fig.A4 Schematic diagram of vehicle mounted robot with single arm



(a) 轮式陆地电缆带电检修机器人



(b) 履带式陆地电缆机器人

图 A5 陆地电缆机器人

Fig.A5 Land cable live-line maintenance robot

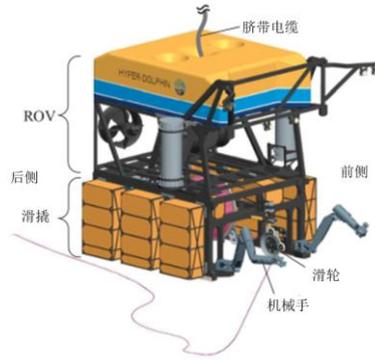


图 A6 DONET2 遥控式水下电缆机器人

Fig.A6 Underwater cable live maintenance robot DONET2