

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.07.006

基于巡线机器人的输电线路状态检修技术研究现状与展望

夏云峰^{1,2}, 宋新明¹, 贾志东², 王希林²

(1. 广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞 523000; 2. 清华大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 架空输电线路在野外运行过程中, 因雷击闪络、污秽腐蚀、覆冰跳跃闪络和舞动、风振、施工等外力破坏等原因容易造成导线断股、金具损坏、绝缘子劣化等, 严重时会导致导线断裂、绝缘子掉串, 严重影响电网安全运行, 因此电力部门需对输电线路进行巡检和维修。近年来, 随着智能科技的发展和智能电网的建设, 巡线机器人以其安全、高效和准确等优点而具有良好的应用前景。文中论述了智能机器人进行输电线路状态检修的基本原理和方法, 介绍了应用智能巡线机器人平台进行输电线路状态检修的研究成果, 分析了智能巡线机器人在输电线路状态检修中存在的问题, 讨论了在输电线路状态检修中推广智能巡线机器人技术尚需解决的关键技术, 为中国进一步在输电线路状态检修中研制、应用和推广智能巡线机器人技术提供了技术参考。

关键词: 输电线路; 导线; 绝缘子; 状态检修; 巡线机器人

Technology Research Status and Prospect of Transmission Line Condition Based Maintenance by Robot

XIA Yunfeng^{1,2}, SONG Xinming¹, JIA Zhidong², WANG Xilin²

(1. Dongguan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Guangdong Dongguan 523000, China;

2. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Guangdong Shenzhen 518055, China)

Abstract: During the long-term outer door field service, transmission lines will encounter strikes of lightning, corrosion of chemical contaminants', ice-shedding, insulators' flashover, wind vibration of conductors, lines' galloping and external forces' destroy, which will generally bring a series of latent faults such as both strands to fracture, damage of hardware, deterioration of insulators and so forth. It will induce some fatal accidents such as transmission lines' broken and insulator strings failed off which have a very strong impact on the safe operation of power grids that if the latent faults cannot be recognized and restored as early as possible. In China, the common means to be used for latent faults inspection of transmission lines is manually and periodically examined by workers. Recently, with the development of both the artificial intelligence technologies and the smart grid, transmission line maintenance robot have been one of the research hotspots around the world owing to its features of safety, high efficiency and precise. In this paper, the authors will introduce the fundamental principle, methods and achievements applying the intelligent robots for the on-line maintenance of transmission lines firstly. Then some problems of applying the intelligent robots for the on-line maintenance will be proposed. At last, some key technologies need to be solved will be discussed. All in all, the achievements of this paper can be provided as technical references for developing and applying intelligent robots.

Key words: transmission line; conductor; insulator; condition-based maintenance; maintenance robot

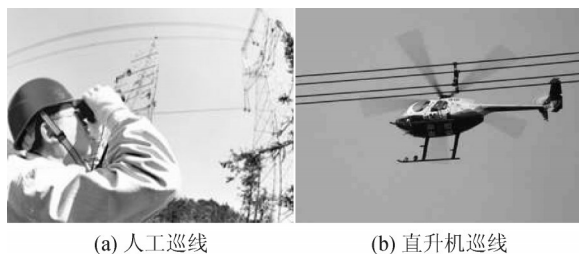
收稿日期:2018-01-06; 修回日期:2018-03-16

基金项目:国家重点研发项目(2017YFB0903205);中国博士后基金(2017M612606)。

Project Supported by National Key Research and Development Program(2017YFB0903205), China Postdoctoral Science Foundation(2017M612606).

0 引言

输电线路是电网中电能传输的主要环节,输电线路的正常、安全运行是避免电网事故的重要保障,是超特高压及智能电网建设的基础环节。野外运行的输电线路在雷击、污秽腐蚀、覆冰跳跃闪络和舞动、风振、土木施工等外力破坏作用下等原因导致的导线断股、金具损坏、绝缘子劣化等故障,若不及时发现和修复,极易进一步引发成输电线路断线及短路故障,造成非计划停运^[1-6],严重影响电力系统安全运行。因此电力部门需对输电线路的安全隐患进行巡视和维护,将事故消除在萌芽状态,对于提高电网的安全可靠性具有特别重要的工程实际意义。传统的输电线路巡视方法主要采用人工手持光学仪器沿线观测的方式,也有采用直升机巡线的,见图1。而人工巡视准确性低、劳动强度大,直升机巡线成本高,飞行作业过程中风险高^[6-8]。随着人工智能技术的发展和智能电网的建设,智能化的输电导线运行状态检修技术成为国内外研究热点之一,特别利用机器人携带工具进行巡检和维护可降低人员劳动及其作业风险,具有十分重要的现场应用价值,因此国内外均在研究基于巡线机器人的输电线路状态检修技术^[9-23]。



(a) 人工巡线

(b) 直升机巡线

图1 传统的输电线路巡检方法

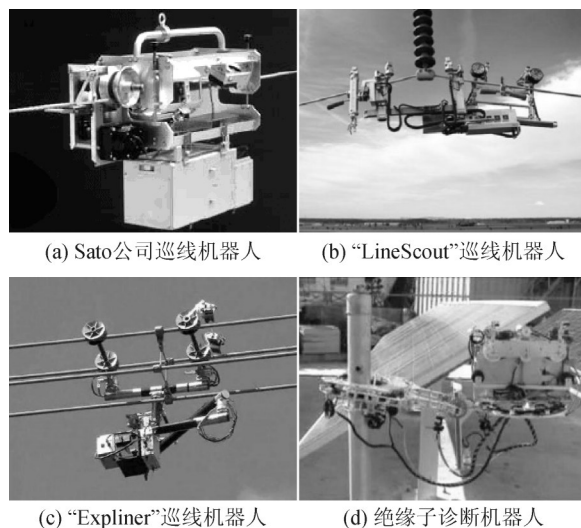
Fig. 1 Traditional inspection methods

1 巡线机器人研究现状

1.1 国内外对巡线机器人的研究现状

日本东京电力公司Sawada等人于1988年成功地开发了世界上第一台检测光纤复合架空地线的巡线机器人^[9]。随后日本Sato公司、日本法政大学的Hideo Nakamura、加拿大魁北克水电研究院(Hydro-Quebec IREQ)的Montambault等人、泰国King Mongkut's University of Technology Thonburi的S. Peungsungwal、美国TRC公司和Machtech公司也开展了机器人的研究,并制作了样机,见图2^[10-15]。这一代巡线机器人一般结构尺寸大、重量重、实用性差,只能在2个杆塔间的一个档距内工作,即不具备跨越防振锤、

线夹等金具障碍物和杆塔的功能。近年来针对巡线机器人的研究工作没有停止过,国内巡线机器人见图3。文[16-17]研制了名为“LineScout”的巡线机器人,该机器人通过地面遥控操作,沿导线行驶,既可以对导线进行巡检,又可以完成导线修补、螺栓紧固等相对简单的线路维修作业,分别通过了315 kV和715 kV线路的带电运行试验。文[18]专门为多分裂导线研制了巡线机器人“Expliner”,通过地面遥控操作,实现了跨越直线杆塔和间隔帮,并通过了500 kV线路的带电运行试验。文[19-20]开发了用于检测输电线路绝缘子劣化、损伤等故障的巡线机器人,运用巡线机器人携带红外热成像仪或信号的频谱分析,实现了机器人对输电设备绝缘子串状态检测和实时评估。



(a) Sato公司巡线机器人

(b) “LineScout”巡线机器人

(c) “Expliner”巡线机器人

(d) 绝缘子诊断机器人

图2 国外典型巡线机器人

Fig. 2 Typical foreign transmission line maintenance robot



(a) 山东大学巡线机器人

(b) 武汉大学巡线机器人

(c) 中科院巡线机器人

(d) 上海大学巡线机器人

图3 国内巡线机器人

Fig. 3 Typical domestic transmission line maintenance robot

国内的巡线机器人研究始于20世纪90年代,山东大学、武汉大学、中国科学院沈阳自动化研究所、上海大学、重庆大学等单位分别开展了基于架空输电线路的巡线机器人技术的研究。其中文[21]用于110 kV输电线路的巡线机器人采用三臂的机械结构、利用“基于知识库的自动控制”和“基于视觉的远程遥控主从控制”的混合控制系统实现了典型障碍的越障,见图3(a)。武汉大学的吴功平教授针对220 kV输电线路单分裂导线和220~500 kV多分裂导线分别研制了二臂回转式悬挂机构、用于带电作业的自主巡线机器人,见图3(b),能够避让和跨越两档线路间的防震锤、悬垂和耐张绝缘子串和跳线等各种障碍物,实现自主跨越直线杆塔和耐张杆塔,同时在机器人越障机构、智能控制、移动导航、机器视觉技术、电能在线补给等方面取得了一定的突破^[22]。中国科学院沈阳自动化研究所、上海大学等单位成功地开发了能够沿500 kV线路行走、跨越障碍物的巡线机器人,在系统电源、机器人本体、控制系统、检测设备和通讯设备,地面控制与数据后台处理等方面积累了一些经验^[23~25],该机器人可以在直线杆塔线路段自主行驶和巡检,但不能跨越耐张杆塔,见图3(c)、(d)。国内巡线机器人一般都具有50°以上的爬坡能力,能够跨越输电线路防振锤、线夹等障碍物,能携带一定的传感器对输电线路进行检测,部分机器人能够跨越引流跳线达到跨越直线杆塔或耐张杆塔进行跨档距、不间断的检测能力,因此国内研究工作虽然相对国外起步较晚,但起点高,部分已达到实用程度。

1.2 巡线机器人本体结构及关键技术

巡线机器人系统由巡线机器人本体、地面基站及配套的后台管理软件组成,见图4。其中机器人本体结构和关键技术主要包括:

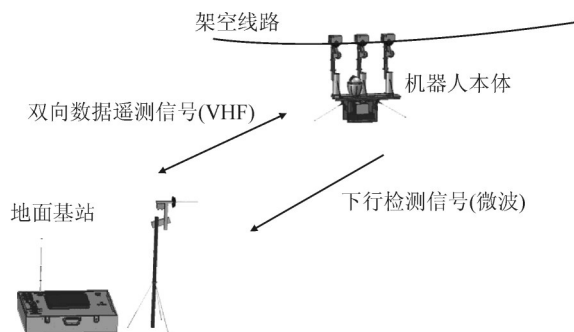


图4 架空输电线路巡线机器人系统

Fig. 4 Transmission line maintenance robot system

1)机械系统技术。提供所需的全部机械运动,在无障碍物直线导线上行驶,在引流跳线上爬行,跨越或避让防震锤、线夹、压接管等障碍物;

2)电源技术。提供机器人本体运行和检测所需的动力,其中文[22]设计了电流互感器从载流导线取电给蓄电池充电;文[26]提出了利用太阳能电池板给可充电蓄电池充电的方式获得电能;

3)导航技术。由超声波测距传感器、倾角传感器、力传感器等多传感器、机器视觉和运动规划及控制算法组成,完成巡线机器人沿导、地线自主移动和巡检的导航^[22~26];

4)巡检系统技术。由针对输电线路导线断股、绝缘子劣化、线路金具损坏等各种故障的检测传感器组成,获得检测数据;

5)通信技术。由机器人本体控制信号、探伤传感器各种检测信号数据的无线收/发装置组成,并与地面遥控/接收移动站构成数据的半双工无线传输;

6)控制系统技术。典型的控制系统结构见图5,包括机器人本体控制系统和远程控制系统,远程控制系统主要是对在野外高压线路上进行巡检工作的机器人进行监视和远程控制。机器人本体控制系统的互控机接收远程主机下发的控制命令,将其解释为各个电机的运动序列,并依次发送给执行层进行执行;在自主越障时,它根据知识库和传感器检测信息,自主进行机器人动作规划,生成电机动作。同时控制蓄电池的充电等转换工作。它还控制各种检测传感器采集导线、绝缘子、金具等各种检测数据,并实时地传输给地面远程主机或者存储在硬盘/Flash存储器中等待后续处理和评估。电机及驱动由多片基于CAN总线的伺服系统驱动器及对应控制的电机组成,用于适应多种复杂位置、速度和力矩控制方面的应用。

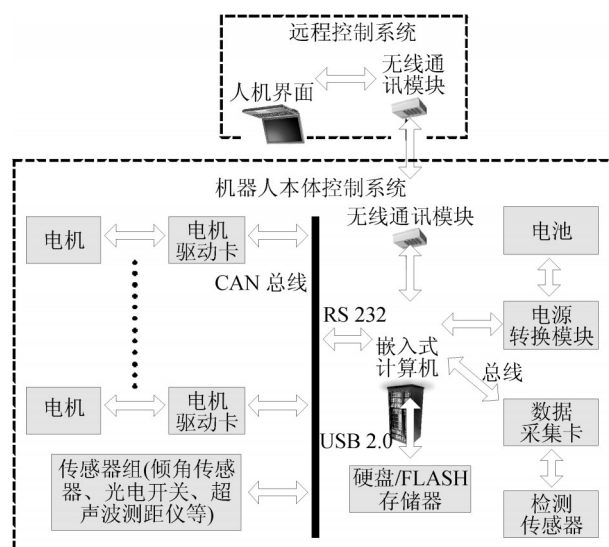


图5 巡线机器人控制系统结构

Fig. 5 Control system structure of robot

2 输电线路检测技术研究现状

对输电线路运行状态进行检测、评估是维修决策的前提,也是电力部门的主要工作之一,目前主要依靠人工在现场地面使用光学望远镜、红外热成像仪等设备对输电设备进行观测,不仅距离远、存在视觉盲区、效率低、劳动强度大,而且需回单位后进行离线分析,时效性低。机器人巡线的主要任务就是搭载各种传感器对输电线路导线断股、金具损坏及绝缘子劣化、裂纹等各种故障进行就近、实时检测,因此国内外学者对相关的检测方法进行了广泛的研究,目前适用于机器人平台对输电线路进行检测的方法主要有:

2.1 光学图像检测法

图像检测法是巡检机器人携带光学图像传感器对输电线路进行就近观测,将输电线路导线、金具和绝缘子的各种缺陷拍摄下来,再利用数字技术进行图像处理分析,是巡线机器人检测输电线路的常规方法。如文[27]提出通过图像分割和识别,利用图像的边缘检测技术,比较正常绝缘子和缺陷绝缘子的图像并进行差分,来识别缺陷信息;文[28]通过第二代小波变换提取出图像中的局部突变特征,实现了绝缘子图像的裂纹故障特征提取;文[29]从瓷瓶裂纹检测的实际情况出发,选用二阶样条双正交小波来提取主变压器瓷瓶图像边缘,并根据裂纹的几何尺寸特征,对瓷瓶进行分区扫描,提出一种瓷瓶裂纹诊断方案。光学图像检测法由于巡线机器人搭载的图像传感器像素输出的不均匀型和观测角度的限制,限制了其在输电线路检测中的应用,且光学图像传感器受天气和时间影响很大,在浓雾雨水天气下或者黑夜状况下无法正常工作,因此其工作能力有限。

2.2 超声波检测法

超声波是机械波,衰减很慢,当它在弹性介质中传播时,遇截面会产生反射、折射和模式变换。当材料存在缺陷时,就会在超声波传播的相应时间产生缺陷的反射波,通过对超声波信号反射波的大小和产生反射波的时间位置即可判断损伤情况。根据以上原理,文[30]开发了纵波斜向入射的超声探头关键技术,提出以超声纵波斜入射检测绝缘子芯棒脆断横截面上的裂纹,当芯棒脆断到出现一定大小的裂纹时,超声脉冲回波法的技术特点是能够检测到裂纹并能反映裂纹的发展过程;文[31]提出利用超声波小角度纵波探头对支柱绝缘子内部缺陷、爬波探头对瓷柱表面裂纹有很好的检测灵敏

度;文[32]提出了检测输电线路导线断股缺陷产生奇异突变超声波的关键技术,其特点是在导线上分段安装超声波传感器进行实时检测。为克服传统压电式超声传感器需耦合剂的缺点;文[33-36]提出了基于电磁超声检测的关键技术,研究了由贴在导线表面的曲折线圈和永磁体构成的电磁超声传感器,通过往线圈中加载激励电流产生交变电磁场在被测导线内部产生感应电流(涡流),同时永磁体产生的稳定磁场与导线内部涡流相互作用产生洛伦兹力,输电导线在此力和磁致伸缩力的作用下产生机械振动,产生沿导线辐射或沿表面传播的超声波。当导线存在断股缺陷时,被测导体表面有超声波自缺陷部位投射,带正电荷的晶格在偏置磁场的作用下受力产生的交变电流导致被测导体的表层出现泄漏的交变磁场,利用在被测导线上方的线圈中感应出电动势进行检测。超声波检测的特点是对运行和停电的输电线路都适用,在对检测导线断股时,容易收到压接管、防振锤等位置的导线变形的影响。

2.3 红外检测法

根据电磁辐射理论,输电线路运行中输送几百至上千安培的大电流,电阻损耗会使导线形成热流传播过程,输电线路导线断股、金具损坏或绝缘子劣化裂纹时,有缺陷部分和无缺陷部分的热传导率、表面散热率(即能量交换速率)、及红外辐射发射率不一样,导致温度不一样且红外辐射分布不连续。其关键是要利用红外热电势传感器或者红外热成像仪检测导线表面的温度场分布判断出输电线路各元件是否存在缺陷。文[20]技术特点是利用巡线机器人搭载红外热成像传感器对绝缘子进行拍摄,根据低频谐波分量和绝缘子缺陷的内在联系,并利用高阶累积量法从复合噪声中提取低频谐波分量对绝缘子绝缘状态和缺陷进行评估;文[37-38]的技术特点是以输电线路的红外图像为对象,滤波后利用边缘检测算子或者K-L变换进行边缘检测,最后对图像的边缘轮廓草图进行边缘跟踪,通过不连续边缘的连接得到了清晰连续的图像边缘,实现了输电线路红外图像目标识别及故障诊断;文[39]根据输电线断股引起辐射场变化的特点,利用热释电远红外传感器对输电线断股进行检测,并对检测信号进行二进小波分解,提取3~5尺度上的特征参数作为神经网络输入,训练后得到断股故障类型和位置信息;文[21,40]提出处理红外热电势传感器检测导线断股数据时,根据检测信号的非平稳性质和

小波基的时频特征,选用db4小波基对检测信号进行6层小波分解,引入小波能量熵作为描述输电线断股故障的特征值,利用BP神经网络实现了巡检机器人对铝绞导线断股的在线诊断。红外检测具有很高的精度,但受环境温度影响较大,导线断股检测时无法具体区别钢芯绞线断股和铝绞线断股,且只能在导线带电运行的状态下进行,因此不适用于计划停电的状态检修。

2.4 紫外检测法

文[41-43]介绍了利用高压绝缘子放电时发出的紫外线对高压输电线路运行状态进行监测的关键技术,研制了相应的紫外检测传感器。根据高压输电导线在破损绝缘子或损伤导线处会发生放电的特点,电场强度(或电压差)的不同,会产生电晕、火花放电或弧光放电等,其辐射光谱包括可见光、红外线和紫外线,不同类型放电产生的光波波长不同,利用紫外成像仪对输电线路部件进行拍摄或者利用紫外光电传感器拾取放电信号以检测缺陷。文[44]提出了劣化绝缘子检测的关键技术,其表面以及周围空间电场分布平均变化幅度超过10%,局部区域电晕放电明显加强,绝缘子表面电场的变化导致电晕放电中紫外脉冲的数量以及功率发生变化,通过检测绝缘子串一段时间内电晕放电中的紫外脉冲数量的变化,判断是否存在劣化绝缘子。文[45]提出了输电线路低值绝缘子检测的关键技术,此时绝缘子串电压分布改变,而使绝缘子串的放电脉冲数目增加,并引起放电紫外光脉冲的相应变化,通过分析紫外脉冲的变化可以发现低值零值绝缘子。文[46-48]指出输电导线架线时拖伤、导线表面或内部变形、运行过程中外部损伤、断股和散股等都可能引起其附近电场强度变强的特点,提出了在满足条件时会产生电晕、利用紫外成像技术进行检测的关键技术。由于电晕放电受天气和环境影响很大,比如天上飘落的雪花、导线上的大型颗粒物、严重的表面积污、导线表面老化和粗糙度增加也会导致较严重的电晕放电,从而干扰紫外检测法对缺陷的识别。

2.5 无线电频谱检测法

架空输电线路各种完好元件周围的电场通常呈现均匀的闭合曲线,包括一个无害的电晕场。文[49]研究得到当导线断股、输电线路与树木较近、绝缘子劣化、裂纹或污秽严重时,会导致周围电离空气层中出现不规则的强烈电子活动,不同的缺陷类型会使电磁信号的形状和强度发生变化,指出可根据以上特点对该信号进行测量和评估,同时研发了天

线装置接收交流架空线路释放无线电信号、进行频谱分析并确定缺陷类型和性质的关键技术。这种方法受到天气和周围环境电磁的影响很大,如水滴、雪花、大型颗粒等产生的干扰容易导致误判,因此这种方法灵敏度不高;识别能力有限、抗干扰能力差。

2.6 漏磁检测法

漏磁检测法主要用来检测输电导线断股,其技术特点是用一磁场沿导线轴向磁化钢芯,导线穿过磁检测传感器作相对运动时,如果钢芯存在缺陷,钢芯的断口会产生漏磁场,或者引起钢芯磁路内的磁通变化,通过磁敏感元件检测磁场畸变即可获得有关的缺陷信息。文[50]研究了钢芯铝绞线钢芯断股检测器的关键技术,该装置由初级和次级线圈组成,根据变压器原理,利用信号发生器向初级线圈提供恒定的电压信号,在传感器的次级线圈中产生感应电压,感应电压信号的大小由穿过传感器线圈的钢芯铝绞线的钢芯横截面积决定,钢芯断股数越多,感应电压越小,从而实现钢芯断股的诊断。这种传感器需将导线贯穿传感器线圈,因此限制了其在巡线机器人上的应用。文[51-53]研制了单向极间励磁的漏磁传感器,其技术特点是利用稀土永磁体作为磁源,从一个方向磁化导线钢芯,利用极间的4个霍尔元件检测磁场信号实现钢芯断股检测。这种单向极间励磁的方式可能导致输电导线钢芯磁化不均匀,且4个霍尔元件无法完全覆盖钢芯周向,即不能实现全周向检测。

2.7 电涡流检测法

电涡流传感器检测利用通过交变电流的线圈产生交变的磁场,使输电导线表面产生电涡流,该涡流又会反过来产生反向磁场作用于线圈,从而改变线圈的电参数,当输电导线铝绞线存在断股缺陷,导致电涡流发生畸变时,可以提取有关的缺陷信息。文[54]提出了基于螺线管线圈检测的关键技术,通过螺线管线圈输出阻抗的变化可以对输电导线断股、机械强度等状态进行评估;文[53,55]根据输电导线和架空地线提出了运用电涡流传感器检测的关键技术,确定了传感器探头的尺寸参数和激励频率,其技术特点是能对一根断股以上的缺陷进行检测。输电导线铝绞线断股一般从外部开始,目前的研究均以检测灵敏度作为确定激励频率的依据,达到10 kHz以上,由于输电导线的趋肤效应,输电导线钢芯磁导率和电导率较大,感应的电涡流无法渗透到钢芯铝绞线的钢芯内部,因此电涡流检测法不适于钢芯断股检测。

2.8 电阻测量检测法。

架空高压线有很多连接器(如压接管),多种因素会导致连接器老化,导致接点处电阻增加,产生局部过热,如不及时维护,会增加线路功率损耗,甚至导致断线而引发停电事故。针对该类问题,文[16]研发了基于巡线机器人的导线分段电阻检测的关键技术,具体特点是通过巡线机器人携带微欧姆计测量一段带电导线或连接器两端电阻,将测量值与正常值比较,评估该段导线或连接器件的状态。这种方法比红外测量更直接,准确度高,不受电磁辐射影响,但只能在停电状态下工作,不适合带电检修,此项技术为重要跨越的检测提供了新的解决方案。

2.9 超导量子干涉器件检测

超导量子干涉器件(SQUID)是由超导回路和约瑟夫森结构成的器件,是建立在宏观量子力学效应之上的磁电转换器件,灵敏度可达 10^{-15} T,是目前最灵敏的微弱磁场探测元件,当电磁波在导体中传播时,导体中将产生涡流,如果导体中存在缺陷,涡流在导体中流动时会绕过缺陷而重新分布,通过检测涡流产生的磁场,可得到有关缺陷的信息。文[56-59]研发了相关技术,其特点是将一激励线圈放在被测导体附近并向线圈中施加特定频率的交流电信号,或者向金属导体通入特定频率的交变电流,由于导体中会产生感应电流即涡流,利用SQUID检测涡流产生的磁信号,并利用锁相检测的方法提取磁场中与激励频率的有关信号,实现了铝绞线1根断股检测的精度。但是一般超导量子干涉器件及其附属设备体积结构和重量均较大,不方便巡线机器人携带对输电线路进行检测,因此,就目前的技术水平,还停留在实验室研究阶段。

3 巡线机器人维修技术研究现状

携带传感器对输电线路进行检测是巡线机器人主要任务,更具发展潜力的是巡线机器人携带各种设备对输电线路进行维修,国外已在这方面进行了一定的研究。

3.1 导线修补技术

导线断股是输电线路的主要缺陷,传统修补方法是人爬上输电导线进行修补,文[16]为前文介绍的“LineScout”巡线机器人设计了一种夹钳装置,提出了机器人多自由度控制、传动系统控制、多传感器信息融合和专用工具等关键技术,实现了对避雷线断股的修补,达到了维护效果,见图6。

3.2 输电线路部件更换与安装

输电线路附属金具部件的更换与安装是其状



(a) 巡线机器人夹钳 (b) 完成修补工作

图6 巡线机器人进行导线修补

Fig. 6 Conductor repaired by robot

态检修的主要内容之一,文[59-60]提出了利用巡线机器人在输电线路路上安装警示球的方法,研发了机器人和作业工具。文[16]通过在“LineScout”巡线机器人机械手臂上的夹钳和螺丝旋转工具在输电线路路上进行压接管和线路标记牌的安装与拆卸工作,避免了人员上单导线作业,降低了作业难度和风险,见图7。

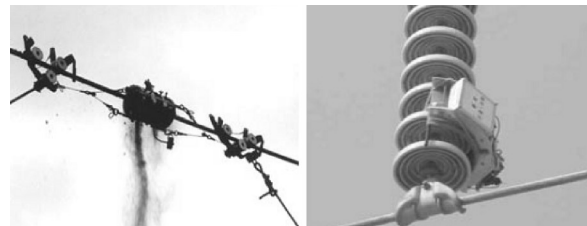


图7 巡线机器人安装导线压接管

Fig. 7 Robot retrieving a loose vibration damper

3.3 巡线机器人清扫作业

架空输电线路在运行过程中往往会积累污秽、挂上风箐、衣鞋、植物等各种影响安全运行的物体,因此清除这些污秽与垃圾也是输电线路检修的任务之一。Hydro-Quebec IREQ开发了用于清扫的巡线机器人,见图8(a),该机器人在南非完成了800 km输电线路的清扫工作,极大地减少了人工作业量,实现了人员免登塔^[61]。文[19]开发了用于输电线路绝缘子串污秽等级评定和清扫的机器人,通过高压水枪发射去离子水完成绝缘子的带电清扫作业,提高了供电可靠性,见图8(b)。



(a) 清扫导线 (b) 带电清扫绝缘子

图8 巡线机器人清扫作业

Fig. 8 Cleaning conductor and insulator by robot

4 发展趋势与建议

随着超高压输电线路和智能电网的建设发展,对供电可靠性要求进一步提高,输电网络及其运行环境越来越复杂,输电线路巡检难度加大。同时巡线机器人以其效率和安全性能而具有广阔的应用前景。总结目前巡线机器人及其对输电线路的状态检测技术,建议今后重点开展以下几个方面的工作:

1)巡线机器人本体技术。①输电线路周围环境和天气情况是复杂多变的,巡线机器人运行时的可靠性、稳定性依然是一个关键问题,其带电巡检时所处的是高压输电线路强电磁场的工作环境,因此防尘、防雨和电磁兼容是一个重要课题,需要进一步提高其安全性能,以提高巡检机器人对作业环境的适应性。②巡线机器人的电源系统需要进一步提高,输电线路档距不一,远距离巡查任务要求巡线机器人具备长时间的工作能力,因此必须在巡线机器人本体结构材料和电源系统上进一步改进,如应用太阳能技术、高效电能储存与转换技术等,并增强节能技术,减少能耗。③目前的巡线机器人具备一定的跨越分裂导线间隔棒、压接管、线夹、引流跳线的能力,但普遍还需人工爬上高压输电铁塔将巡线机器人吊装并调整至工作姿态,即不具备自动攀爬铁塔并进入工作状态的能力,因此下一代巡线机器人应该具备这种自动攀爬的能力。

2)机器人输电线路作业技术。目前国外已有部分巡线机器人可以完成一些输电线路的维护作业,如更换输电导线金具、导线修补、清扫作业等,国内现有的巡线机器人尚不具备这方面的功能。而输电线路维修与维护是输电线路状态检修基本之一,应加强开发巡线机器人在这方面的技术。

3)多传感器及其信息融合技术。由前文分析可知每种单一的检测方法皆具有自身的局限性,因此要实现输电线路各部件的全面检测,需把多种检测传感器集成到巡检机器人平台上。信息融合技术是利用多传感器的各种信息综合处理输电线路各部件故障,充分利用多个信息源,把多个信息源在空间或时间上的冗余或互补信息按照某种准则进行组合,获得对被测对象的一致性解释或描述^[62]。由于多传感器信息融合技术通过对多个传感器获得的信息进行协调、组合、互补来提高系统的有效性,形成比单一传感器更精确、可靠的估计和判决,因此可利用多传感器信息融合技术实现对输电线

路状态全面、综合评估,取得比用单一传感器更好的性能。

4)基于MAS技术的全网输电线路运行状态综合评估。空间、逻辑上的分布性是输电线路检修的特征,从数据获取到维护决策的过程是一个由多个子过程组成的复杂过程,所以基于巡线机器人的输电线路维护系统的建立和实现是一种分布式问题求解。多智能体(multi-agent system, MAS)理论是一种建立在分布式结构基础上的智能集成方法,为解决分布式环境下的交互问题提供了新的认识视角和理论框架^[63-65]。多智能体中的智能体交互与输电线路状态检测与维修决策系统所涉及的问题和对象有许多相似之处,基于巡线机器人的输电线路检修系统也可以借助智能体的思想建立。由于单个巡线机器人只能在一条输电线路工作,且每一种传感器及其检测方法获得的检测数据即输电线路的局部信息无法实现对全线路、全网输电线路运行状态的综合评估,所以很难给输电线路维护的决策人员提供辅助维修决策结论。具有分布式智能特性的MAS,利用能够利用的全局信息来实现对输电线路的全面评估,具有很好的结合点,有望取得一定的突破。基于MAS技术的全网巡线机器人系统见图9。

5)巡线机器人及其对输电线路状态检修的实用化研究。虽然巡线机器人技术取得了不少成果,但与输电线路状态检修需求之间还有一定距离,实用化也比较差。目前迫切需要争取电力企业的支持,依托科研机构的研究实力,结合电力系统的实际情况,开展基于巡线机器人的实用化研究,为运行、检修人员查找和维修输电线路提供辅助分析和决策手段,防御输电线路早期故障。

5 结论

1)国内外在巡线机器人本体结构和越障技术等方面较为成熟,部分机器人能携带传感器实现跨越直线杆塔或耐张杆塔进行跨档距、不间断检测,国内研究工作虽然相对国外起步较晚,但起点高、发展快,部分已达到实用程度。

2)巡线机器人的基本任务之一就是携带传感器对输电线路的各种缺陷进行检测,目前针对输电线路各元件的检测方法较多,各具特点,可以根据具体环境和条件选择适当的方法,而基于多传感器信息融合技术的检测方法可以实现对输电线路的全方位、高精度检测。

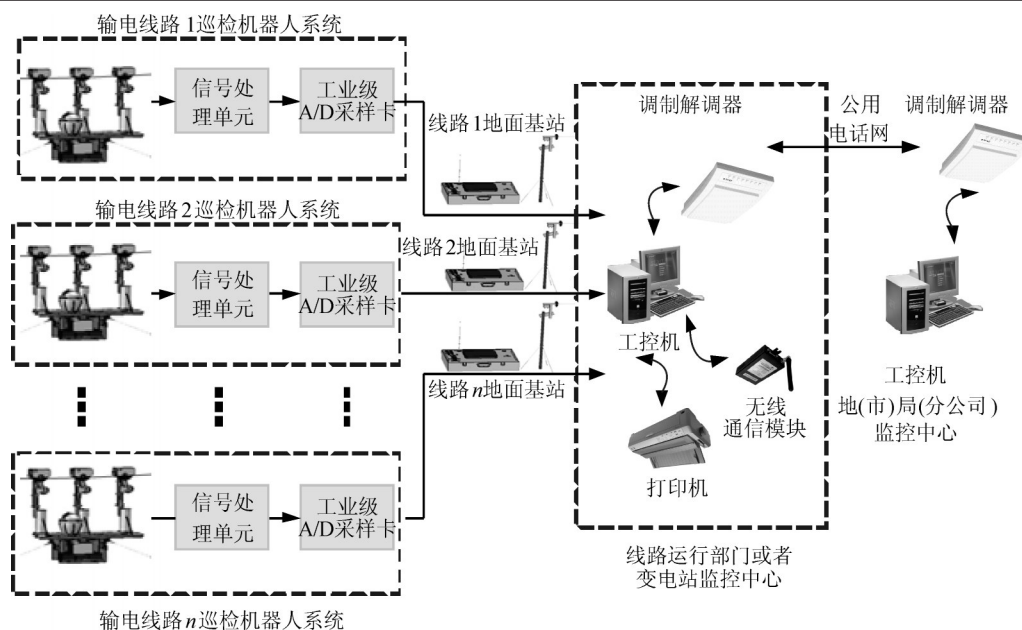


图9 基于MAS技术的全网巡线机器人系统

Fig. 9 Transmission line maintenance system based on MAS

3)巡线机器人可以携带特制工具代替人工完成对输电线路一定的维护与维修工作,国外部分巡线机器人已能够携带工具完成简单的维修作业,检修作业功能的开发是国内巡线机器人需要重点攻关的方向。

4)输电线路状态检修是关系到电力系统安全稳定运行的重要问题,基于巡线机器人技术的输电线路状态检修技术具备安全、高效的优点,具有广阔的应用前景,指出巡线机器人本体技术及基于其平台的输电线路状态检修技术具体的几个发展方向。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压交流输电维护与检测(特高压输电技术丛书)[M]. 北京:中国电力出版社,2008.
LIU Zhenya. High voltage AC transmission maintenance and detection(UHV transmission technology series)[M]. Beijing:China Electric Power Press,2008.
- [2] 蒋兴良. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
JIANG Xingliang. Transmission line icing and protection[M]. Beijing:China Electric Power Press,2002.
- [3] 胡毅. 输电线路运行分析与防治[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
HU Yi. Transmission line operation analysis and control[M]. Beijing:China Electric Power Press,2007.
- [4] BONIARDI M, CINCERA S, D'ERRICO F, et al. Fretting fatigue phenomena on an all aluminum alloy conductor[J]. Key Engineering Materials,2007(348-349):5-8.
- [5] ZHOU Z R, FISET M, CARDOU A, et al. Effect of lubri-

cant in electrical conductor fretting fatigue[J]. Wear, 1995 (189):51-57.

- [6] 张柯,李海峰,王伟. 浅谈直升机作业在我国特高压电网中的应用[J]. 高电压技术,2006,32(6):45-55.
ZHANG Ke, LI Haifeng, WANG Wei. Analysis of helicopter patrol application prospect in China's UHV grid[J]. High Voltage Engineering,2006,32(6):45-55.
- [7] 于德明,沈建,汪骏,等. 直升机在电网运行维护中的研究与应用[J]. 电网技术,2009,33(6):107-112.
YU Deming, SHEN Jian, WANG Jun, et al. Research and application of helicopter in patrol and hotline operating maintenance of power lines[J]. Power System Technology, 2009,33(6):107-112.
- [8] 全卫国,苑津莎,李宝树. 图像处理技术在直升机巡线输电线路中的应用综述[J]. 电网技术,2010,34(12):204-208.
TONG Weiguo, YUAN Jinsha, LI Baoshu. Application of image processing in patrol inspection of overhead transmission line by helicopter[J]. Power System Technology, 2010, 34(12):204-208.
- [9] SAWADA J, KUSUMOTO K, MUNAKATA T, et al. A mobile robot for inspection of power transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991,6(1):309-315.
- [10] AOSHIMA S, TSUJIMURA T, YABUTA T. A wire mobile robot with multi-unit structure[C]//IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems. Tsukuba, Japan:IEEE,1989:414-421.
- [11] TSUJIMURA T, YABUTA T, MORIMITSU T. Design of a wire-suspended mobile robot capable of avoiding path obstacles[J]. IEE Proc. -Control Theory Apply., 1996, 143(4):349-357.
- [12] HIGUCHI M, MAEDA Y, TSUTANI S, et al. Development of

- a mobile inspection robot for power transmission lines[J]. Journal of the Robotics Society of Japan, 1991, 9(4):457-463.
- [13] PEUNGSUNGWAL S, PUNGSIRI B, CHAMNONGTHAI K, et al. Autonomous robot for a power transmission line inspection[C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Sydney, Australia: IEEE, 2001: 121-124.
- [14] CAMPOS M F M, BRACATENSE A Q, PEREIRA G A S, et al. A mobile manipulator for installation and removal of aircraft warning spheres on aerial power transmission lines[C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation. San Francisco, USA: IEEE, 2002: 3559-3564.
- [15] JIANG B, MAMISHEV A. Robotic monitoring of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 912-918.
- [16] MONTAMBAULT S, POULIOT N. The HQLineROVer: Contributing to innovation in transmission line maintenance[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance. Orlando, FL: [s.n.], 2003: 33-40.
- [17] TOUSSAINT K, POULIOT N, MONTAMBAULT S. Transmission line maintenance robots capable of crossing obstacles: Stage-of-the-art review and challenges ahead[J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(5): 477-499.
- [18] DEBENEST P, GUARNIERI M, TAKITA K, et al. Explinerobot for inspection of transmission lines[C]//2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, CA, USA: IEEE, 2008: 3978-3984.
- [19] CHO B H, BYUN S H, PARK J Y, et al. Development of automatic inspection robot for live-line insulators[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance. Albuquerque, NM: [s.n.], 2006: 1-5.
- [20] 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.
- [21] 周凤余, 李贻斌, 李峰, 等. 高压输电线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.
- 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.
- [22] 吴功平, 肖晓晖, 肖华, 等. 架空高压输电线路巡线机器人样机研制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 90-93.
- WU Gongping, XIAO Xiaohui, XIAO Hua, et al. Development of a mobile inspection robot for high voltage power transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 90-93.
- [23] TANG L, FANG L J, WANG H G. Development of an inspection robot control system for 500 kV extra-high voltage power transmission line[C]//The 43rd Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers. Sapporo, Japan: [s.n.], 2004, 1819-1824.
- [24] ZHU Xinglong, ZHOU Jiping, WANG Hongguang, et al. An autonomous obstacles negotiating inspection robot for extra-high voltage power transmission lines[C]//9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. Singapore: [s.n.], 2006: 1-6.
- [25] REN Zhibin, RUAN Yi. Planning and control in inspection robot for power transmission lines[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology. Chengdu, China: IEEE, 2008: 1-5.
- [26] 徐显金, 李维峰, 吴功平, 等. 沿架空地线行驶的自主巡检机器人及应用[J]. 武汉大学学报, 2010, 43(6): 752-761.
- XU Xianjin, LI Weifeng, WU Gongping, et al. An autonomous inspection robot for transmission line along overhead ground line and its application[J]. Journal of Wuhan University, 2010, 43(6): 752-761.
- [27] LI W H, TAJBAKHS A, RATHBONE C, et al. Image processing to automate condition assessment of overhead line components[C]//2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Delta Centre-Ville, Montréal, Canada: [s.n.], 2010: 1-6.
- [28] 郑军, 诸静. 基于第二代小波变换的电力设备图像特征提取[J]. 电工技术学报, 2003, 18(6): 98-102.
- ZHENG Jun, ZHU Jing. Image feature extraction of electrical power equipment based on second generation wavelet transform[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2003, 18(6): 98-102.
- [29] 王慧燕, 诸静. 基于小波变换的边缘检测及其在绝缘瓷瓶故障诊断中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 76-79.
- WANG Huiyan, ZHU Jing. Wavelet transform based edge detection and its application in porcelain bottles fault monitoring[J]. Automation of Electric Power System, 2004, 28(15): 76-79.
- [30] 梁曦东, 戴建军. 超声法检测绝缘子用玻璃钢芯棒脆断裂纹的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 110-114.
- LIANG Xidong, DAI Jianjun. Ultrasonic detection on crack of FRP rod in brittle fracture of composite insulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 110-114.
- [31] 李晓红, 王敏, 吴敏, 等. 支柱瓷绝缘子的超声检测有效性[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 159-163.
- LI Xiaohong, WANG Min, WU Min, et al. Ultrasonic testing validity of porcelain post insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 159-163.
- [32] HAAG T, BEADLE B M, SPRENGER H, et al. Wave-based defect detection and inter-wire friction modeling for overhead transmission lines[J]. Archive of Applied Mechanics, 2009, 79(6): 517-528.

- [33] SHOURESHI R A, LIM S W, DOLEV E, et al. Electro-magnetic - acoustic transducers for automatic monitoring and health assessment of transmission lines[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2004, 126(7): 303-308.
- [34] LIM S W, RAHMAT A, SHOURESHI R A. Transducer design and neural signature analysis for diagnosis of energized transmission lines[C]//Proceeding of the 2004 American Control Conference. Boston, Massachusetts:[s.n.], 2004: 3735-3740.
- [35] LINGS R, CANNON D, HILL L, et al. Inspection & assessment of overhead line conductors[R]. USA: A State-of-the-Science Report for EPRI, 2000.
- [36] JR PINTO A V, SEBRAO M Z, REGINA C, et al. Remote detection of internal corrosion in conductor cables of power transmission lines[C]//2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Delta Centre - Ville, Montréal, Canada:[s.n.], 2010:5-7.
- [37] 肖晓晖, 杜娥, 湛青昊, 等. 高压输电线路红外图像的边缘检测[J]. 中国电力, 2005, 38(1):31-33.
XIAO Xiaohui, DU E, SHEN Qinghao, et al. Infrared image detection of high voltage transmission line[J]. Electrical Power, 2005, 38(1):31-33.
- [38] 何洪英, 姚建刚, 罗滇生, 等. 基于K-L变换的污秽绝缘子红外图像特征提取方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(17):76-80.
HE Hongying, YAO Jianggang, LUO Diansheng, et al. Characteristic extraction method of contaminated insulator infrared image based on K-L transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(17):76-80.
- [39] 吴功平, 肖晓晖, 沈瑞刚. 高压输电导线的损伤检测与故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(10):1204-1208.
WU Gongping, XIAO Xiaohui, SHEN Ruigang. Damaged detection and fault diagnosis for high-voltage transmission line[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(10):1204-1208.
- [40] 周凤余, 李贻斌, 冯国瑞. 巡检机器人对输电线断股实时在线检测与诊断的一种方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6):185-191.
ZHOU Fengyu, LI Yibin, FENG Guorui. A real-time online method for detecting and diagnosing broken strand of high-voltage transmission line with inspection robot[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2010, 25(6):185-191.
- [41] 周亮, 杨浩, 何为, 等. 高压绝缘子紫外在线检测器研制[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(1):108-113.
ZHOU Liang, YANG Hao, HE Wei, et al. Study of on line ultraviolet detector for HV insulator[J]. Chinese Journal of scientific Instrument, 2007, 28(1):108-113.
- [42] 迟殿林, 曾庆立, 孙立时. 用紫外成像检测绝缘子[J]. 高压电技术, 2006, 32(2):115-116.
CHI Dianlin, ZENG Qingli, SUN Lishi. Detecting insulator by UV imaging[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(2): 115-116.
- [43] SHONG K M, KIM Y S, KIM S G. Images detection and diagnosis of coronadischage on porcelain insulators at 22.9 kV D/L[C]//IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. Cracow:[s.n.], 2007:462-466.
- [44] 汪金刚, 何为, 陈涛, 等. 绝缘子表面电场与紫外脉冲关系以及在劣化绝缘子检测中的应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(6):137-142.
WANG Jingang, HE Wei, CHEN Tao, et al. Relationship between the electric field on the surface of insulators and ultraviolet pulse intensity and its application in detecting-faulty insulators[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2008, 23(6):137-142.
- [45] 何为, 陈涛, 刘晓明, 等. 基于紫外脉冲法的非接触式低值(零值)绝缘子在线监测系统[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10):69-74.
HE Wei, CHEN Tao, LIU Xiaoming, et al. On-line monitor system of faulty insulator based on non-touching UV pulsed method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10):69-74.
- [46] 戴利波. 紫外成像技术在高压设备带电检测中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20):97-98.
DAI Libo. Applying ultraviolet imagetechonlogy in detecting live line high voltage equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20):97-98.
- [47] TADEUSIEWICZ R, WSZOLEK T, IZWORSKI A, et al. Recognition of defects in high voltage transmission lines using the acoustic signal of corona effect[C]//Neural Networks for Signal Processing X, IEEE Signal Processing Society Workshop. Sydney, NSW, Australia:IEEE, 2000:869-875.
- [48] AGGARWAL R K, JOHNS A T, JAYASINGHE J A S B. Simulation of the partial discharge phenomena in defective overhead line conductors through an empirical approach[C]//1998 International Conference on Simulation. York, UK:[s.n.], 1998:385-389.
- [49] JAENSCH G, HOFFMANN H, MARKEES A. Locating defects in high voltage transmission lines[C]//Proceedings of the 1998 IEEE 8th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation & Live-line Maintenance. Orlando, FL USA: IEEE, 1998:179-186.
- [50] 孟庆泽, 杨洪涛, 王文杰, 等. 钢芯铝绞线钢芯缺断股测量仪:94241013.0[P]. 1996-04-17.
MENG Qingze, YANG Hongtao, WANG Wenjie, et al. Detector for deficiency and fracture of ACSR: 94241013.0[P]. 1996-04-17.
- [51] 蔡成良. 输变电设备无损检测技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2010.

- CAI Chengliang. Non - destructive testing technology for transmission and transformation equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [52] DA FROTA MOREIRA P L, LOURENCO P M, LOURENCO C R S H, et al. Internal corrosion in conductor cables of power transmission lines: Characterization of the atmosphere and techniques for faults detection[C]//The 2nd International Multi-Conference on Engineering and Technological Innovation. Orlando, Florida, USA:[s.n.], 2009: 1-6.
- [53] 蔡成良, 丁一工, 康宜华, 等. 基于涡流和漏磁检测原理的输电线路导线损伤检测[J]. 电网技术, 2000, 24(11): 18-22.
- CAI Chengliang, DING Yigong, KANG Yihua, et al. Conductor defect inspection of transmission line based on eddy current and leakage magnetic flux[J]. Power System Technology, 2000, 24(11): 18-22.
- [54] KIM S D, MORCOS M M. An application of solenoid sensor for inspecting deterioration of ACSR conductors due to forest fires[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(10): 50-53.
- [55] DALPE C, GOUDREAU S, CLOUTIER L, et al. Use of eddy current technology to assist in the evaluation of the fatigue damage of electrical conductors[J]. Research in Non-destructive Evaluation, 2008, 19(4): 181-201.
- [56] HATSUKADE Y, MIYAZAKI A, MATSUURA H, et al. Study of inspection of wire breakage in aluminum transmission line using SQUID[J]. NDT & E International, 2009(42): 170-173.
- [57] MIYAZAKI A, HATSUKADE Y, MATSUURA H, et al. Detection of wire element breakage in power transmission line using HTS-SQUID[J]. Physical C, 2009(469): 1643-1648.
- [58] 施克仁. 无损检测新技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- SHI Keren. New technology for nondestructive testing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [59] RUAUX P. Mechanization of the installation of aircraft warning spheres on overhead lines[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance. Columbus, OH: IEEE, 1995: 125-131.
- [60] CAMPOS M, PEREIRA G, VALE S, et al. A mobile manipulator for installation and removal of aircraft warning spheres on aerial power transmission lines[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington, DC: IEEE, 2002: 3559-3564.
- [61] T & D. Etecen brushes its conductors clean[EB/OL]. [2011-03-23]. http://tdworld.com/mag/power_georgia_power_upgrades/#.
- [62] 曾祥君, K K Li, W L Chan, et al. 信息融合技术在电力系统故障检测中的应用探讨[J]. 中国电力, 2003, 36(4): 8-12.
- ZENG Xiangjun, LI K K, CHAN W L, et al. Discussion on application of information fusion techniques in electric power system fault detection[J]. Electrical Power, 2003, 36(4): 8-12.
- [63] WOOLDRIDGE M J, JENNINGS N R. Intelligent agents: Theory and practice[J]. Knowledge Engineering Review, 1995, 10(2): 115-152.
- [64] MCARTHUR S D J, DAVIDSON E M, CATTERSON V M, et al. Multi-agent systems for power engineering applications-Part I: Concepts, approaches, and technical challenges[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1743-1752.
- [65] MCARTHUR S D J, DAVIDSON E M, CATTERSON V M, et al. Multi-agent systems for power engineering applications-Part II: Technologies, standards, and tools for building multi-agent systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1753-1759.

夏云峰(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为输变电设备运行与检修、高电压与绝缘技术。

宋新明(1968—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力企业经营与管理、高电压与绝缘技术。

贾志东(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为输变电设备运行与检修、高电压与绝缘技术。