

[输电线路]

高压输电线路巡线机器人的研究与设计

文/云南电网有限责任公司昆明供电局 周自更 王胜伟 赵小萌 解建华 曹家军 李正佳

我国的高压输电线路通常建设于地形复杂，蜿蜒曲折的地域，同时环境条件也时常极端恶劣。以高压输电线路巡线机器人为研究对象，将智能巡线机器人应用于电力系统领域，改善高压输电线路的智能化巡线水平，从而进一步保障电力系统的安全稳定运行。

随着我国电力建设进程的加快，高压输电线路的分布范围越来越广，输电电压等级也越来越高，社会用电的急剧增加对电力系统供电的稳定性和可靠性提出了更高的要求。然而，高压输电线路通常覆盖于地形复杂的区域，同时部分线路与地面距离大，线径相对小，线路存在污秽物或微小破损不易发现。这种不易发现的微小缺陷极易发展成导致线路故障的安全隐患，从而严重影响输电线路的安全性。巡线工作中及时发现线路锈蚀、磨损和断股等缺陷，从而采取有效应对措施对保障输电线路的稳定运行有着重要的实际意义。因此，为保证巡线工作的准确性和有效性，提高输电线路的智能化水平，将集机械、自动控制和传感器技术于一体的智能巡线机器人应用于电力系统输电线路巡线工作的必要性不言而喻。

目前电网的巡线方式概述

目前电网的巡线方式主要包括人工巡线、无人机巡线和机器人巡线三种。其中，人工巡线是通过现场巡线人员用肉眼对一定范围内的输电线路进行观测。然而，输电线路覆盖范围极广，地形极为复杂，极大地增加了巡线人员的工作强度，降低了巡线的工作效率和可靠性。无人机巡线在一定程度上满足了巡线效率高，范围广的要

求，能够监测巡线人员难以到达的复杂地形。与此同时，为保证输电线路的可靠性，无人机常常需要与输电线路保持较大的安全距离，无疑降低了巡线的准确度，而无人机的续航能力问题也在一定程度上限制了这种巡线方式的发展。同时，无人机工作受恶劣天气、电磁波影响大，成本较高，这些弊端都亟待解决。

相比于人工巡线和无人机巡线，机器人巡线有效地避免了上述弊端，可以实现对输电线路的常规监测和预警。巡线机器人集合了机械设计、电源技术、通信技术、自动控制技术和传感器，其巡线系统如图1所示，能够实现在复杂环境下对输电线路按预定程序设计进行监测，判断线路的运行状态，通过状态监测将现场的特征信息反馈至后台，提醒后台工作人员及时处理并采取有效措施。

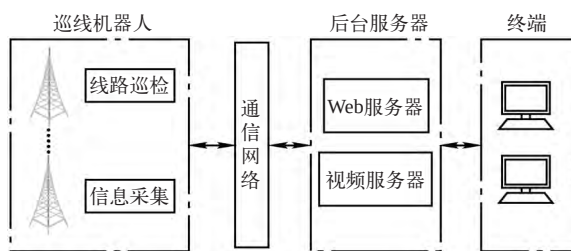


图1 机器人巡线系统图

巡线机器人系统设计及关键技术

1. 系统概述

巡线机器人的巡检系统以灵活的机械结构为基础,能够实现障碍物的有效跨越,搭载可见光摄像机、红外摄像仪和激光雷达系统,可以实现对输电线路周围障碍物的有效识别和测距,同时将障碍物的特征信息反馈至后台。巡线机器人工作系统如图2所示。机器人基于激光雷达的距离信息,对障碍物信息进行分析,调动可见光摄像机拍摄线路周围的环境信息,同时调动红外摄像仪采集线路周围的热量信息,将各项数据传输至机器人内置处理器,分析处理后的数据传输至通信模块,通信模块将数据传输至后台服务器和终端。

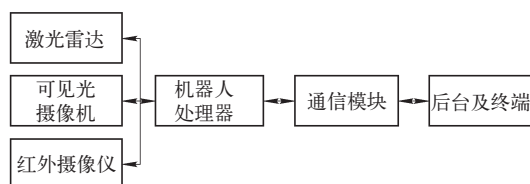


图2 工作系统图

2. 总体设计

巡线机器人总体设计如图3所示。巡线机器人在高压输电线路上的行走通过双电动机及其连接的滚轮控制,能够实现机器人在线路上的平稳行进。机器人采用直流电动机差动驱动方式获得动力,完成机器人在输电线路上的前进和后退。同时直流电动机的控制方式选用PWM控制技术,即一种调节脉宽的技术,通过逆变电路开关装置的开关控制输出电压,从而在输出端获得一系列所需的脉宽。直流电动机电枢上电压的“占空比”被PWM技术改变,通过改变平均电压大小的方式控制转速。

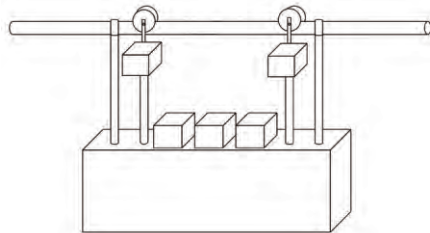


图3 巡线机器人总体设计

3. 激光雷达系统设计

激光雷达系统是目前应用较广泛的一种测距系统,较常用的雷达系统有着更好的定向性和分辨率。系统通过激光对输电线路范围内的目标进行探测,从反射光中获取目标物体的距离和位置等信息,该方法实现的距离探测相较于微波雷达

还有着抗干扰能力强、体积小等优点。

针对高压输电线路环境下的物体检测,如图4所示。该系统主要由反射模块、接收模块、扫描模块及测距模块组成。发射模块、接收模块由激光发射机、探测镜及光电信号接收器构成,光电信号的采集和接收通过同轴光路采集发射信号脉冲和回波信号脉冲来触发。扫描模块和测距模块通过内置的微处理器分析并处理激光信号,基于内置的算法判断物体的位置、速度和距离等信息,传输至机器人的处理器。

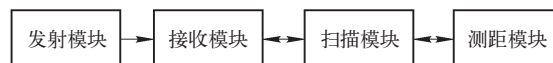


图4 激光雷达系统图

4. 可见光摄像机设计

可见光摄像机常用装置包括枪机和球机,基于枪机监控范围较小,而输电线路监控需要对线路附近进行多方位监控,故选择球机作为视频采集单元主要部件。采集单元主要由智能云台高速球机实现,能够完成视频信号的采集功能,支持远程进行实时或者触发式视频查看和现场照相。前端视频采集设备的工作模式均可通过后台进行远程操作。基于上述功能要求,智能云台球机选择鹰视眼公司生产的YSY-WX5810N型产品。相

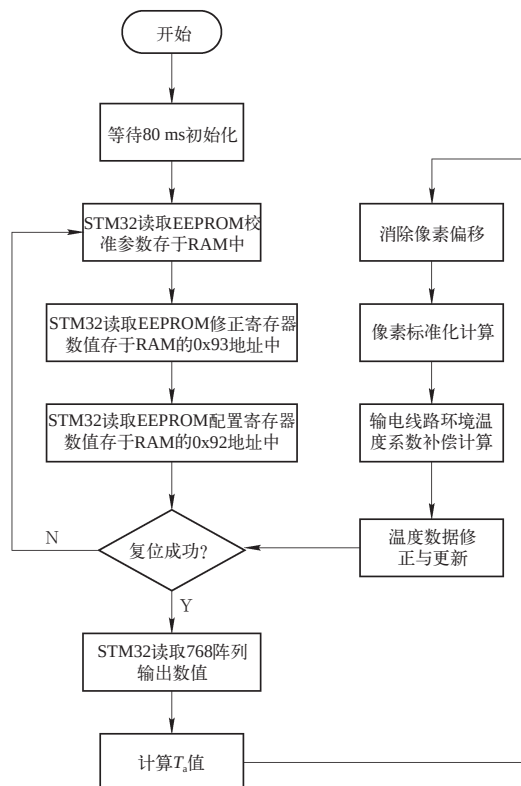


图5 红外摄像仪工作流程图

应参数包括：摄像机图像分辨率：1280×720；图像压缩格式：H.264；球机预置位数量：250个；摄像头监测范围：水平角度为0°~360°，垂直角度为-90°~+90°；正常时工作功耗<10 W；设备待机时功耗<0.2 W。

5. 红外摄像仪设计

输电线路的电力设备及电力电缆的绝大部分故障，如过载、压接点接触不良、短路及绝缘老化等，都会以热量的形式表现出来。为了提高供电的可靠性，需要有效地监测和预测故障的发生，因此需对输电线路环境进行红外温度检测。由于线路设备及电缆不能使用接触式测温工具，故选择使用红外线非接触测温工具。红外线测温模块选择Melexis MLX90640 32×24模块，该模块是一种32像素×24像素红外阵列。模块选用STM32作为主控MCU，传感器使用MLX90640ESF-BAB，相应参数包括：分辨率为32×24；刷新率为4 Hz；波

特率为11 5200；工作温度为-40~85℃；测量温度为-40~300℃；测量准确度为±2℃；视场角为55°×35°。红外摄像仪的工作流程如图5所示。

结束语

基于巡线机器人的输电线路巡检装置是伴随人工智能及电网发展的关键技术，对保证电力系统的安全、稳定和可靠性有着重大意义。为提高输电线路的智能化水平，保障电力公司巡线工作的高效性和可靠性，本文提出了以灵活的机械结构为基础，搭载可见光摄像机、红外摄像仪和激光雷达系统的智能巡线机器人，能够实现对高压输电线路的巡视与监测，发现线路锈蚀、磨损和断股等缺陷，提醒工作人员及时采取应对措施，从而维护电网健康、持续和稳定的运行。EA

(收稿日期：2019.11.07)

(编辑：朱金凤)

(上接第79页)

所有绝缘件均应粘牢，不得有裂缝和起层现象；铁轭绝缘、端圈上垫块均匀分布，位置偏差控制在工艺守则规定的范围内。套装中重点保证上段与下段器身间绝缘件的垂直度。

(4) 引线结构

样机联接组别为D(±7.5°)d0y11，高压引线所有的出头连接均在器身外部，简化操作，避免隐蔽节点，方便工序检查。高压基本线圈与移相线圈引线均为同一相的相邻线圈首末出头连接，避免了因异相线圈引线连接的电位差导致的线圈纵绝缘隐患，减少引线交叉。

4. 相关试验及实施效果

(1) 外施耐压试验

外施耐压试验数据及结论如下表所示。

表1 外施耐压试验数据及结论

加压部位	电压/kV	频率/Hz	持续时间/s	结论
高压线端	70	50	60	合格
低压线端	10	50	60	合格
低压组间	10	50	60	合格

(2) 雷电冲击试验

高压线端：全波170 kV合格；

低压线端：全波40 kV合格。

该项目突破的关键技术及创新点

1) 采用组合式双分裂线圈结构，高压四个线

圈轴向排列，简化了器身与引线结构，器身紧凑简洁。

2) 高压移相线圈与基本线圈沿轴向排列，与辐向排列相比，降低了冲击电压下线圈端部电位幅值，避免了冲击振荡，提高了绝缘裕度。

结束语

该项目研究成果已在西藏ABB驱龙矿业项目的ZSSS-10500/35移相整流变压器上进行了实施应用，产品一次性通过了全部试验，各项技术指标达到或者优于技术协议和相关标准要求。产品最大的优点在于通过结构的改进，提高了变压器器身内部绝缘裕度，具有器身结构紧凑、接线简单、绝缘性能优越及运行可靠等优点。

该项目已经于2019年12月通过了河北省科学技术成果鉴定，所涉关键技术填补了国内空白，对35 kV高压外延三角形移相的技术推进具有重要意义。这一研究成果的实施，使得这一系列移相整流变压器产品的应用技术变得更加成熟，定会在各个工业领域创造出更多更大的经济效益和社会效益。EA

(收稿日期：2020.01.08)

(编辑：朱金凤)