

变电站机器人智能巡检技术及应用效果

彭向阳¹, 金亮², 王锐¹, 易琳¹, 陈国强³

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广州 510080; 2. 广东电网公司研究生工作站, 广州 510080;
3. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 随着中国电网规模迅速发展,传统人工巡视已不能适应变电站运维需求,智能机器人巡检已成为变电站巡检的重要发展方向。文中以变电站机器人实用化巡检为目标,系统研发了机器人综合导航,可见光、红外及音频检测,机器人自动充电以及任务规划等智能巡检技术,在广东电网220 kV和500 kV变电站开展巡检应用,实现了电流致热型缺陷的红外检测,开关状态和表计读数的可见光检测,主变噪声的音频检测,对变电站设备进行全天候、全方位、全自主智能巡视和运行监控。变电站机器人智能巡检技术在实际应用中取得良好效果,极大提高了变电站巡检效率,降低了巡检成本,具有良好的推广应用前景。

关键词: 变电站; 机器人; 智能巡检; 综合导航; 任务规划; 可见光检测; 红外检测; 音频检测

Substation Robot Intelligent Inspection Technology and Its Application

PENG Xiangyang¹, JIN Liang², WANG Rui¹, YI Lin¹, CHEN Guoqiang³

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;
2. Graduate station of Guangdong Power Grid Co., Guangzhou 510080, China; 3. Luoyang Institute of
Electro-optical Equipment, AVIC, Henan Luoyang 471000, China)

Abstract: As electric power industry develops in high speed, traditional manual inspection can't ensure the operation safety of substation any more, intelligent robot inspection technology has become the future of substation inspection. Aiming at practical inspection of substation robot in our country, this paper proposes several key technology of substation robot intelligent inspection include comprehensive navigation, visible, infrared and audio detection, robot automatic charging and assignment programming, then carries out inspection application in 220 kV and 500 kV substation in Guangdong Power Grid, and achieves functions like infrared detection current induced thermal defect, visible light detection switch condition and meter readout, and audio detection main transformer noise. All-weather, omnidirectional and fully automatic intelligent inspection and monitoring for substation is achieved. The technology performs well in practical application, and can sharply reduce inspection cost. It has remarkable popularization and application prospect.

Key words: substation; robot; intelligent inspection; comprehensive navigation; assignment programming; visible light detection; infrared detection; audio detection

0 引言

变电站是电网的重要组成部分,保证变电站设备的正常运行至关重要^[1-3]。在变电站的日常运行中,为了保证正常供电,及时发现变电站设备安全

隐患和设备缺陷,现阶段中国大部分电网还是依靠人工对变电设备进行巡检,人工巡检存在劳动强度大、工作效率低、受人为因素影响大,容易产生误判和漏判等局限性,在超特高压以及恶劣气象条件下,对巡检人员身心也会产生较大影响^[4-8]。因此,

收稿日期:2018-09-14; 修回日期:2018-11-05

基金项目:南方电网公司科技项目(GDKJ00000026)。

Project Supported by Science and Technology of South Power Grid Company(GDKJ00000026).

变电站采用巡检机器人代替人工巡检是电力巡检的重要发展方向。国内外在机器人智能巡检方面已做了大量研究工作。

国外变电站巡检机器人研制较早,20世纪90年代,日本率先开展500 kV变电站有轨巡检机器人应用,代替人工实现基于红外传感器的设备温度自动测量^[9-10]。加拿大魁北克水电站研制的变电站巡检机器人,同样是搭载红外热像仪、可见光图像采集系统,实现了远程监控^[11]。2008年巴西圣保罗大学研制了用于变电站热点监测的移动机器人,携带红外热像仪通过在变电站内架起的高空行走轨道在站内移动^[12]。国外变电站巡检机器人的研究虽然较早,但未见大规模推广应用情况。另外,国外变电站巡检机器人在传感器和导航系统应用中也开展了一些工作。2005年A. Birk等开发的履带式变电站巡检机器人,采用红外成像仪对电气设备进行红外测温^[13]。D. A. Camegie等提出了一种基于光纤陀螺、里程仪、加速度计、激光雷达、差分GPS和导航计算机的机器人导航系统^[14],该导航系统能在巡检时为机器人提供实时连续高精度的导航定位信息。

经过多年探索,国内在变电站智能巡检系统研发领域取得了长足进展,开发的产品已在变电站得到实际应用并取得一定效果,但该技术尚处于起步阶段,仍存在探测及故障判断精度不高、环境及地形适应能力不足等技术难点。国网山东电力公司于1999年最早开始变电站巡检机器人研究,后续研制出了系列化变电站巡检机器人,实现了设备热缺陷分析预警,开关设备开合状态识别,仪表自动读数,设备外观异常和变压器声音异常检测及异常状态报警等功能^[15-16]。2012年中科院沈阳自动化研究所研制出轨道式变电站巡检机器人,实现了冬季下雪、覆冰情况下的全天候巡检。2014年浙江国自机器人公司研制的变电站巡检机器人在瑞安变电站投入使用。

目前,国内多个省市的变电站都已将巡检机器人投入到变电站设备的巡检工作中,使用变电站巡检机器人每周能够减少约26 h的人工工作量。截至2015年底,广东电网有500 kV变电站48座,220 kV变电站387座,如果变电站巡检机器人代替人工进行巡检,将取得非常可观的经济效益。文中研发了变电站机器人智能巡检所需的综合导航,可见光、红外及音频检测,机器人自动充电以及任务规划等智能巡检技术,大大提高了巡检效率和效果。研发的机器人已在广东电网实际应用,实现了变电站全

天候、全方位、全自主智能巡检和运行监控,为变电站安全运行提供了先进的技术检测手段和可靠的安全保障,具有显著的优越性。

1 变电站机器人巡检系统概述

机器人巡检系统由机器人本体、充电系统、无线传输系统、本体监控后台及其它辅助设施组成。使用无轨导航方式,实现快速部署,可方便站间调配,采用四轮独立驱动,适应于各种复杂环境。提供高清晰度红外及可见光视频图像,测温精度高,达到0.5℃;采用基于激光雷达和惯导组合的精确地形匹配的导航方案,定位精度达到1 cm。超声防撞,提供高可靠性安全保障,可原地全向运动,为巡检提供更强的易用性。

1.1 机器人本体

巡检机器人本体由外形结构部件、运动控制系统、供电系统、传感器系统和导航系统组成。

1)外形结构部件。以简洁实用、硬朗可靠为基本原则,机器人整体兼顾重量、稳定性和防护等级要求,具有较强的防腐性能,采用铝合金材料,产品总重量小于100 kg。

2)运动控制系统。由运动控制器、电机驱动器、电机、减速器、车轮、超声波避障模块、手动遥控模块、状态指示灯等组成。主要实现与监控后台的通讯以及对车体及云台的控制功能,实时接收车体、云台状态信息并上传。

3)供电系统。采用磷酸铁锂电池供电,电源管理系统(BMS)集电池组的数据采集、状态估计、充放电保护及均衡控制于一体,是供电系统的核心单元,电池供电一次充电续航能力不小于5 h,续航时间内机器人能稳定可靠工作。

4)传感器系统。包括高清可见光摄像机、红外热像仪、声音传感器,实现设备仪表指针识别、接头及设备本体温度探测、设备异常声音检查等功能。智能云台安装在巡检机器人移动平台上方,用于承载可见光、红外以及声音传感器,通过控制方位和俯仰方向的转动,可使传感器对准被测设备。

5)导航系统。采用激光雷达、惯导、里程计进行综合导航,可实现按照预先设定路线和停靠位置自主行走和停靠的功能。

机器人本体按照全国各地区变电站极端环境设计,针对暴风大雨、湿热、高海拔、寒冷等恶劣气候条件,及变电站高电场、高磁场环境,通过三防设计、防风设计、EMC电磁兼容性、抗震设计以及温度

适应性等设计,确保了机器人不同气候条件下长期可靠安全稳定运行。

1.2 充电系统

充电系统的充电房由充电柜、充电座、无线通讯设备和自动卷帘门组成。充电柜和充电座用于机器人自动对接充电,无线通讯设备选用与本地监控后台相同的无线网桥和天线。

机器人需要补充电力时,将自动驶向指定充电房,车载充电连接器与固定充电装置实现电连接并实施充电。充电完成后,机器人自动停止充电,待命或投入正常运行。整个充电过程完全实现自动化,无需人工干预。

1.3 无线传输系统

机器人通过无线网桥与本地监控后台实现双向、实时信息交互,信息交互内容包括机器人本体状态和被检测设备图像、语音和指示性数据,所有信息均可在本地监控后台存储。

1.4 本地监控后台

本地监控后台由计算机、无线通讯设备、监控分析软件和数据库等组成,安装于变电站本地用于监控机器人运行和控制指令下达的计算机系统。

监控后台硬件由服务器、无线网桥、显示器、键盘鼠标和音响等设备组成,软件采用C#语言开发,基于.NET架构,可以在Windows的各个版本操作系统跨平台运行,用户需要升级操作系统,不需要对软件进行更改。

2 变电站机器人智能巡检技术

2.1 综合导航技术

2.1.1 基本技术

机器人依靠激光雷达、惯导、里程计进行综合导航,可按照预先设定路线和停靠位置自主行走和停靠。激光雷达选用SICK公司LMS511型高性能扫描雷达,测量距离可达80 m,扫描范围190°,分辨率0.166 7°,扫描频率高达25 Hz。可在-30~+55℃恶劣环境中工作;惯导可以提供车体三轴姿态角(或角速率)以及加速度信息,分辨率0.05°,误差1.5°;里程计信息包括车体当前的坐标,由车体运动学模型和四轮转速位移等信息计算得到,误差在3%以内。对单个传感器信息,利用卡尔曼估计、中值滤波等方法使信息更加准确,在导航过程中,利用多传感器融合技术,得到车体定位信息。现场部署时,首先激光雷达扫描出完整的巡检地图,再由路径规划软件设置机器人行走路线和定位点,并与地图匹配。

采用激光雷达导航不需进行路面施工,缩短施工周期,并具有较好的扩展性和灵活性。机器人导航算法流程见图1。

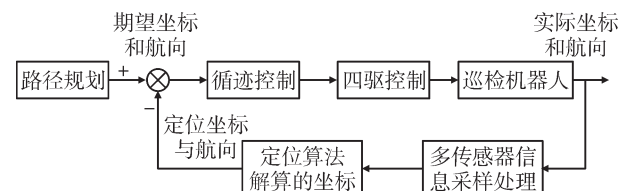


图1 导航算法流程框图

Fig. 1 Navigation algorithm flow diagram

2.1.2 红外与数字地图辅助导航

可见光图像易于获取、成本低廉且成像清晰度高,景象匹配所用的实时图与基准图绝大部分为可见光图像。但可见光图像对于光照度、气候条件等较为敏感,不仅增大了匹配算法的复杂度,而且不适合夜间巡检。研究红外图像(实时图像)与数字地图(基准图像)匹配关系,实现辅助导航功能,能有效提高机器人定位精度,保障巡检的可靠性。红外图像与数字地图匹配方法见图2。

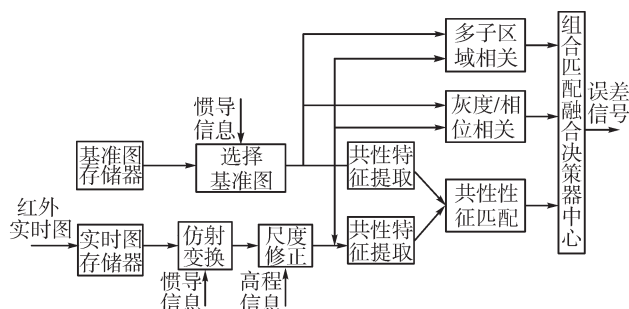


图2 红外图像与数字地图匹配技术的实现方法

Fig. 2 Realization method to match infrared photo with digital map

利用景象匹配技术,将红外探测器获取的地物景象(基准图)与巡检拍摄的实时图在嵌入式工控机中进行匹配比较,即可确定机器人的准确位置,完成定位功能,提高惯导定位精度。经过全天候条件下现场试验验证,采取该组合导航方式(景象匹配与惯导导航)系统运行稳定,定位精度明显高于未组合前精度,证明该组合导航方式具有优越性,能够保证长时间的导航精度。

2.1.3 立体视觉辅助定位

为提升现有导航技术的可靠性和抗干扰性能,期望使用红外热像仪及可见光摄像机采集的数据,根据立体视觉原理,实现机器人自身的辅助定位,其技术原理见图3。但是,红外热像仪与可见光相机的标定方式、视场存在差别,参数差异及处理误差导致图像匹配困难,目前该项技术仍需要进一步研究和改进。

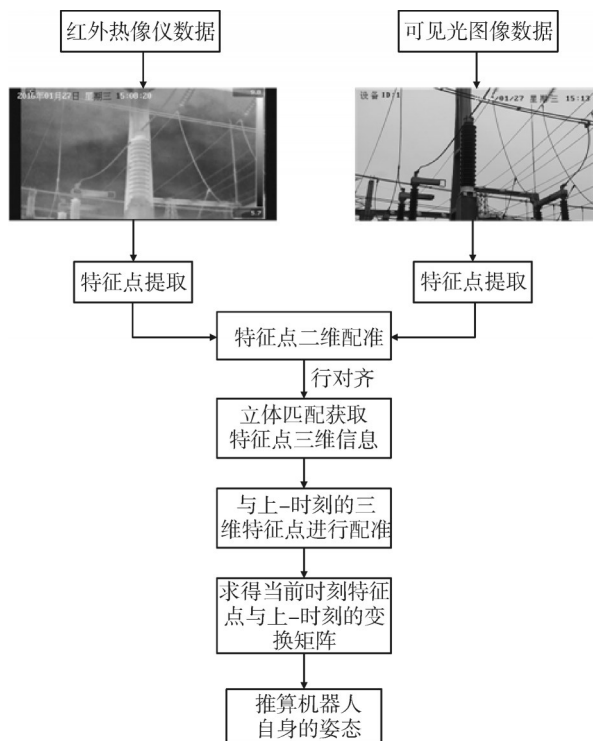


图3 基于可见光与红外成像的辅助定位

Fig. 3 Diagram of auxiliary position based on visible light and infrared imaging

2.2 可见光图像智能检测技术

可见光摄像机主要用于观察被检设备外观和读取仪表指针数值,在机器人到达指定观测点后,云台方位和俯仰按照预设角度转动对准被测目标,并先用大视场观察。智能机器人要自动实现对仪表设备的状态识别,首先必须进行仪表设备在图像中的准确定位。

为了克服车身停车位置误差带来的视场对准偏差,在云台控制软件中增加目标视场中心点校正程序,也就是采用大视场模板匹配来识别需判读目标,通过云台运动将目标校准到视场中心,再用小视场观测目标设备细节和仪表指示状态进行判读,以此来确保被测目标位于视场中心,有效提高目标判读准确率,基于大视场匹配和小视场对准过程示意图见图4。在对仪表、刀闸等设备判读前,采用曝光补偿、去模糊、色彩均衡等方法进行图像增强处理,完成原始数据预处理,见图5。

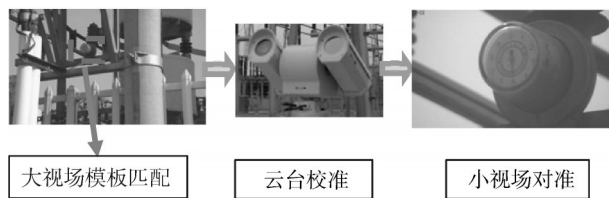


图4 目标视场中心点校正示意图

Fig. 4 Schematic diagram of target field central revise

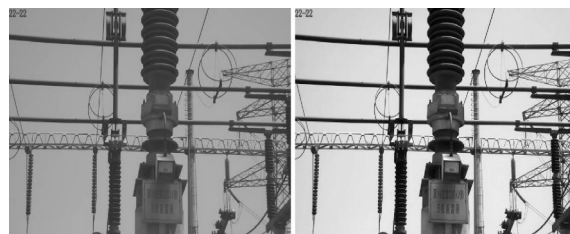


图5 图像增强处理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of image heighten dispose

变电站各种仪表观测点视场角各不相同,图像背景较为紊乱,不仅包含仪表区域,还同时囊括了其它设备。为实现高精度的识别效果,将利用仪表表盘的形状特征,通过模板匹配或椭圆拟合确定仪表表盘在图像中的基本位置及区域范围。

在指针识别方面,获取了仪表表盘的子图像后,再使用多种的图像处理方法提取仪表指针的位置及指向方向。首先,针对各个不同种类的仪表设备图像,进行设备模板化处理,并在模板库中建立各仪表的“最小刻度”和“最大刻度”位置信息。对机器人实时采集的仪表图像,在后台调取相应设备的模板图,利用尺度不变特征变换算法,在输入图像中匹配提取仪表表盘区域子图像。而后对表盘子图像进行二值化、仪表指针骨干化处理,利用快速霍夫变换检测指针直线去除噪音干扰,定位指针精确位置和指向角度,完成指针读数,仪表读取流程见图6。

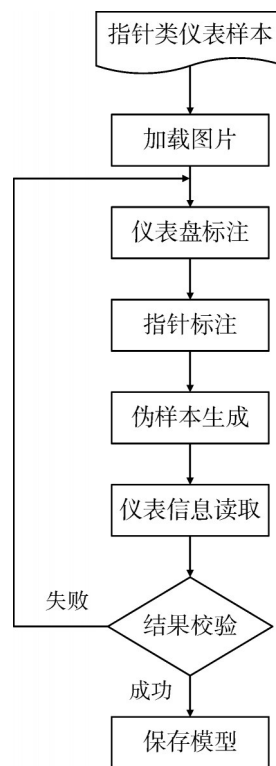


图6 指针仪表读取流程图

Fig. 6 Fetch flow diagram of indicator instrument

在实施过程中,首先利用建模工具通过手工的方式,采用多边形对仪表区域进行选择,并对表盘初始刻度、表盘终止刻度及指针的位置进行标注。通过旋转、仿射变化、以及亮度变化,实现仪表盘图像的伪样本生成,最后利用仪表模式识别软件进行仪表信息读取。对于刀闸分合状态、数字表、断路器开合状态、油位等仪表也可采用与指针类仪表类似的处理方法。

2.3 红外热像智能检测技术

机器人红外热像仪对可选区域,进行温度数据处理,包括求区域温度的最高值、最低值、平均温度、区域中心点温度,温度信息和伪彩均通过以太网接口传送到后台。

红外热像仪可检测设备的本体和接头的温度,机器人将根据用户在变电站中指定的被测设备和被测点,来控制云台指向被测点并设置测温区域,进行区域绝对温度或对三相接头相对温度的测取,然后根据用户设定的温度上升门限对超限缺陷点记录并告警。需要红外测温的设备包括变压器、断路器、隔离开关、互感器、电容器、金具等。

2.4 声音检测技术

变电设备出现缺陷或异常运行时往往会伴随发出异常声音,通过对声音的监测,能够快捷掌握设备缺陷及其性质。此外,通过长期连续在线检测,可提高判断的准确性。变电站设备声音识别流程和方法主要涉及预处理、特征提取及分类器设计3个部分,见图7。

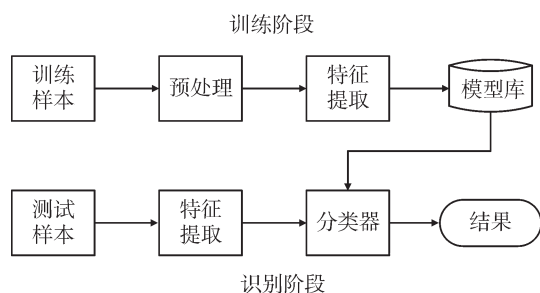


图7 声音识别流程图

Fig. 7 Flow diagram of speech recognition

预处理主要包括抑制 50 Hz 工频干扰预滤波,信号的分帧、加窗等。对于变电站背景噪声预处理有两个主要步骤:一是端点检测,即从背景噪声提取感兴趣的信号片段;二是减小变电站环境噪声对异常声音特征提取的影响。特征提取为从语音信号中提取出表现语音个性并揭示语音本质的特征,然后对其进行编码得到特征序列,从异常声音信号中找到具有有效“鉴别”能力的特征序列是关键;分类器设计就是将特征提取后得到的参数序列进行

模式匹配,分类器设计直接影响分类识别结果。

目前对声音的识别方法大多沿用传统的语音信号处理方法,但变电站异常声音包含一些典型的非语音信号。因此,对变电站异常声音特征提取及识别采用了倒谱域参数,如有感知线性预测倒谱系数、对数频率倒谱系数、梅尔频率倒谱系数等。为了增强特征参数对于语音信号的表征力,将各类特征参数进行融合。随机选取 261 组数据作为训练和识别数据,包括 87 组变压器数据、86 组互感器数据和 88 组电容器数据,其中训练使用了 70 组变压器数据、70 组互感器数据和 73 组电容器数据,剩下的 17 组变压器数据、16 组互感器数据和 15 组电容器数据用于模型识别,识别结果见表 1。从表 1 中可以看出,电网声音识别使用了 48 组数据,正确识别 47 组,识别率达到 98%。

表 1 不同设备声音识别结果

Table 1 Audio recognition result of different equipment

测试样本类型	识别结果		
	变压器	互感器	电容器
变压器(共 17 组)	16	1	0
互感器(共 16 组)	0	16	0
电容器(共 15 组)	0	0	15

在此基础上进一步对变电站异常声音进行检测,对声音传感器采集到的声音进行处理,提取出音频信号特征参数组成观测序列,利用隐马尔可夫模型对观测序列进行建模,实现对采集的实时音频信号状态识别和异常声音报警。

2.5 机器人自动充电技术

2.5.1 对准充电功能

研究了一种基于视觉的自主充电机器人精确充电对准方法,利用视觉理论中 Hough 变换的算法进行直线检测^[17-18],进而精确的控制机器人的姿态。在应用中基于视觉检测方法,用可见光相机对特征目标靶杆进行拍照,然后用 Hough 变换算法对图片进行直线检测,将图片进行二值化处理,由式(1)将图像空间转换为参数空间,用投票的方式找出参数空间中票数最多的一个点,也就对应图像空间中的一条直线。

$$\rho = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta \quad (1)$$

根据直线在图片中直线偏离中心点的距离计算出车体应该调整的角度^[19],进而引导车体靠近充电桩,实现插头和插槽的充分结合。充电桩设计成前面为圆弧形,用来保证在角度偏离中心线的时候,插头和插槽也能充分结合。特征目标靶杆均匀

镶嵌红外二极管,这样即使是在夜间或光照不足的情况下,可见光相机也能检测到目标靶板。

2.5.2 充电房辅助功能

机器人充电房安装自动门,并与巡检任务联动,实现机器人在无人干预情况下可靠自动充电和长期自主运行。自动卷帘门包含电动卷帘、光电传感器和光电开关,光电传感器用于感应卷帘门升降位置,光电开关用于探测卷帘门处有无物体遮挡。机器人没进入充电房时,充电电源处于断路状态;机器人进入充电房,充电插头对接完成后,充电电源接通并进入充电状态,这样可保证外露的充电座在非工作时段处于安全断电状态。

为延长锂电池使用寿命,充电柜采用恒流定压的均衡充电模式,先以恒定电流充电,电流大小由用户设定,当电池组电压达到用户设定的电压值时,充电柜自动转换为对电池组进行恒压补充充电,充电电流减小,持续均衡充电1~2 h结束。从恒流充电到定压充电以及充电结束整个过程,可在监控后台实时监测电量、电压、电流、温度等信息。

2.6 任务规划技术

最大限度提高巡检效率、最短时间完成巡检任务是任务规划要解决的问题。求解此类问题有以下几类算法:①动态规划算法,通过寻求优化的搜索算法求得较优的解;②模拟进化算法,如蚁群算法,粒子群算法等;③DNA算法。通过对问题分析,提出基于遗传算法的解决方法,实验证明该路径规划方法是可行有效的,为变电站机器人任务路径规划提供了一种有效方法。机器人巡检路径构成了一个连通无向图,见图8。

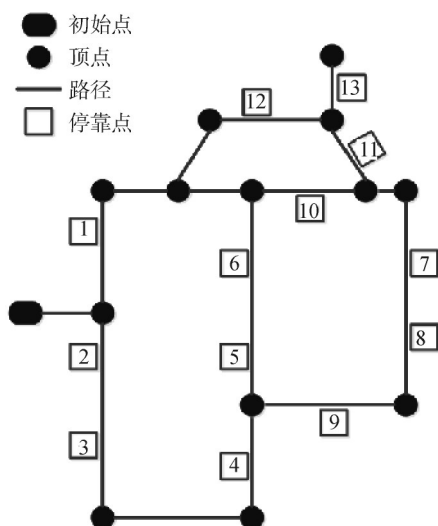


图8 机器人巡检拓扑图

Fig. 8 Topological graph of robot inspection

机器人路径规划问题可总结为求从初始点出

发经过图上选定的若干条路径并返回初始点的最短代价。即给定一组待巡检的路径集合 $\{e_1 \cdots e_n\}$,求出一个集合排列的顺序使得从初始点出发按顺序经过排列中的路径然后返回初始点的路径最短。2个点之间行走路径按照Flord算法求解。待巡检路径集合的所有排列有 $n!$ 个,在 n 较大时找到代价最小的排列这几乎不可能。

动态规划算法是求取最优解的一种算法,但在巡检路径 n 较多时求解时间太长。基于遗传算法的求解方法首先通过分析拓扑图的特征对拓扑图简化,减少参与计算的路径;再根据动态规划算法给出路径排列的等价模型;最后给出遗传算法的选择、交叉、变异、适应度模型使用遗传算法进行求解。路径规划具体步骤见图9。

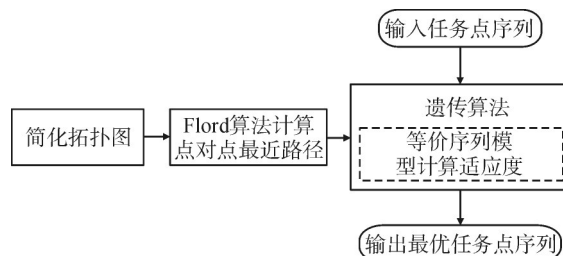


图9 巡检路径规划步骤

Fig. 9 Inspection path planning procedure

3 变电站机器人巡检应用效果

研发的巡检机器人平台搭载了可见光、红外热像仪和声音采集器等传感器,可自动完成变电站内户外高压设备的部分巡检任务,以降低人工巡检强度,提高巡检效率,并且实现巡检数据自动归档,方便查询和统计。以下介绍机器人在广东电网220 kV清远站和500 kV五邑站的巡检效果。

3.1 红外检测电流致热缺陷

利用机器人搭载的红外热像仪,对设备进行红外检测^[20],测量画面中小区域内的最高温并进行记录,判断是否存在单相绝对温度异常和相间相对温差异异常缺陷。机器人自动记录的数据包括红外图像的原始测温数据、红外伪彩色渲染的普通图片、同方向的广角可见光相片、指定测试区域最高温度值等。单相温度测量拍摄的刀闸连接点、CVT连接点、T型线夹和耐张线夹红外和可见光相片见图10~13。上述几个位置巡检值分别为17.29、33.3、35.17、32.86℃,均在正常范围,巡检结果显示状态“正常”。相间温度对比见图14。选取出线间隔断路器引下线T型线夹,根据三相温差对比分析,B相、C相对应温度分别为32.15、30.95℃,A相为50.35℃,相

对温差为 15 K, 属一般缺陷。



图 10 刀闸连接点

Fig. 10 Junction point of disconnecting link



图 11 CVT C 相连接点

Fig. 11 Phase C junction point of CVT



图 12 T 型线夹

Fig. 12 T type cable clamp



图 13 耐张线夹

Fig. 13 Strain cable clamp

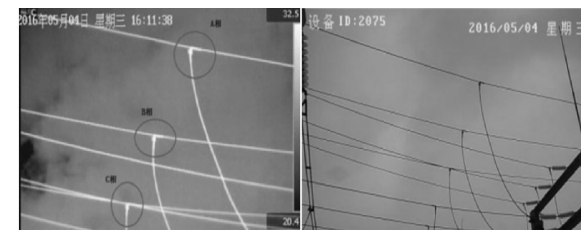


图 14 相间温度对比

Fig. 14 Contrast of interphase temperature

3.2 可见光检测开关状态

机器人对存在二值状态的指示标志或设备位置状态进行自动识别,通常用来对开关分合闸状态、储能状态、刀闸分合闸状态等进行识别。储能状态与开关分合闸状态的检测方法类似。机器人记录的数据包括包含识别区域的稍大范围的可见光相片、叠加识别结果的识别区域放大图像以及识

别结果。通过可见光进行刀闸开合状态、开关分合状态识别见图 15–18,识别结果与实际情况一致。



图 15 刀闸合闸状态识别

Fig. 15 Closing status recognition of disconnecting link



图 16 刀闸分闸状态识别

Fig. 16 Opening status recognition of disconnecting link

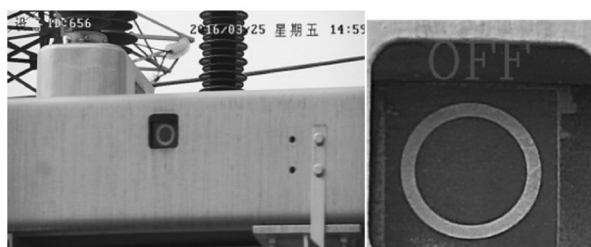


图 17 符号型开关状态识别

Fig. 17 Switch status recognition of symbol type



图 18 文字型开关状态识别

Fig. 18 Switch status recognition of text type

3.3 可见光检测表计读数

机器人对表计、可确定上下限及指示位置的指示装置进行识别,一般用来读取各类指针式、数字式仪表盘面的指示数据。部分油位计没有明确数值意义时,建议用状态识别来进行处理。机器人记录数据包括包含识别区域的稍大范围的可见光相片、叠加识别结果的识别区域放大图像以及识别结果。对普通型 SF₆ 气压表、镂空型 SF₆ 气压表、避雷器泄漏电流表、避雷器计数器和油位表读数识别结果见图 19–23。识别结果与实际读数一致。

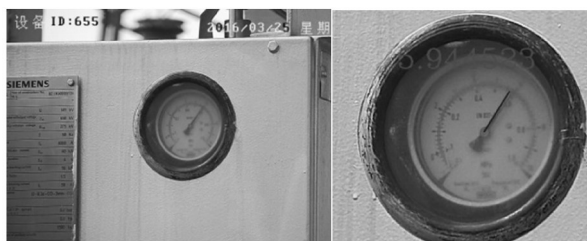


图19 普通SF₆气压表
Fig. 19 Ordinary SF₆ barometer

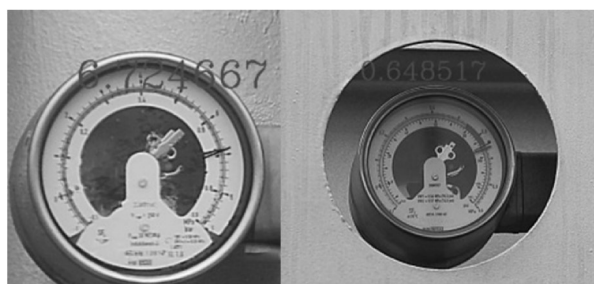


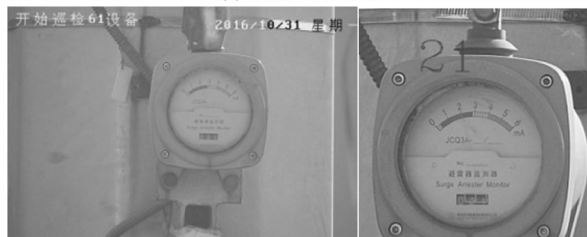
图20 镂空型SF₆气压表
Fig. 20 Hollow type SF₆ barometer



图21 避雷器泄漏电流表
Fig. 21 Leakage amperemeter of lightning arrester



(a) 指针式计数器



(b) 数字式计数器

图22 避雷器动作次数识别
Fig. 22 Action times recognition of lightning arrester



图23 油位表识别
Fig. 23 Oil level recognition

3.4 人工辅助诊断

3.4.1 红外检测电压致热缺陷

变电设备电压致热型缺陷具有温升小、位置不易发现或确定、发热部位一般不是最高温点等特点,通常情况下不易利用机器人完成自动化诊断,通常需要采用人工辅助诊断,定期依次检查容易产生电压致热缺陷的红外图像,判断是否存在疑似缺陷的情况,见图24。根据红外图像进行人工辅助诊断,发现220 kV出线间隔电流互感器存在局部温升情况,最大局部温升达2℃。

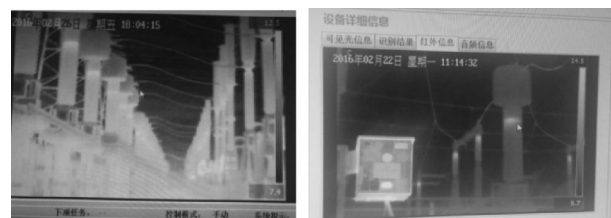


图24 电流互感器局部温升诊断

Fig. 24 Local temperature rise diagnosis of CT

3.4.2 可见光检测设备外观缺陷

外观检查主要用来诊断设备外观上存在损坏、锈蚀、渗漏油等缺陷^[21],部分表计识别异常的情况也能检查出表计密封不良等缺陷。受限于图像识别技术水平,目前还需要人工查阅照片完成检查。部分检查项目正在开展自动化诊断功能研发。利用可见光检测玻璃绝缘子自爆缺陷见图25,结合红外热像进行刀闸分合闸不到位诊断见图26。机器人进行表针识别,对于某些读数异常(与历史数据、同类设备表计数据明显不一致)时,进行人工复检,可检测出仪表存在密封不良、外表脏污等情况见图27、28。在定期人工复查设备外观图片时,可识别出部分严重锈蚀设备,见图29。



图25 玻璃绝缘子自爆

Fig. 25 Spontaneous detonation diagnosis of glass insulator

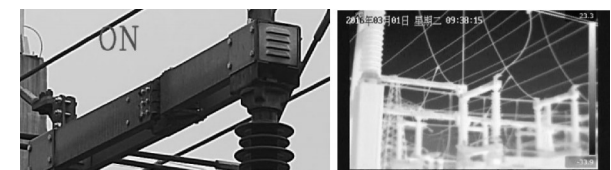


图26 刀闸分合闸不到位

Fig. 26 Poor fulfillment diagnosis of disconnection link

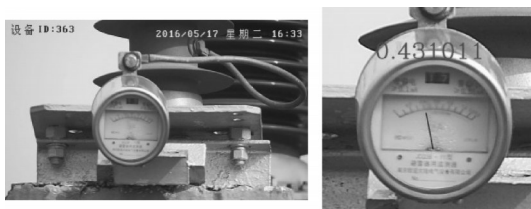


图 27 仪表密封性不良

Fig. 27 Poor sealing diagnosis of meter



图 28 仪表表面脏污

Fig. 28 Smudgy surface diagnosis of meter



图 29 金属外壳锈蚀

Fig. 29 Metal shell corrosion diagnosis

3.4.3 音频检测主变噪声

机器人记录的数据包括拟开展音频检查设备的整体红外数据集伪彩色渲染图片、广角可见光相片以及音频数据(可播放,后台软件显示为时域波形及频谱图)。利用红外和音频检测进行主变噪声诊断见图 30。

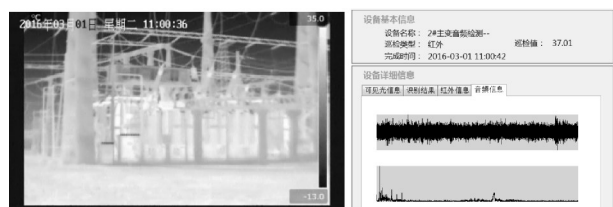


图 30 主变红外和音频检测

Fig. 30 Infrared and audio detection of main transformer

4 结论

1)针对中国电网变电站机器人智能巡检存在的实用化问题,文中系统研发了机器人综合导航、可见光图像智能检测、红外热像智能检测、设备声音检测、机器人自动充电以及任务规划等多项智能巡检技术,显著提高了机器人巡检的稳定性和数据采集质量。

2)机器人采用综合导航技术和红外与数字地图辅助导航、立体视觉辅助定位技术,可显著提高机器人长时间持续导航定位精度。机器人可见光检测采用基于大视场匹配和小视场对准的目标视场

中心点校正程序,并采用曝光补偿、去模糊、色彩均衡等方法进行图像增强处理,可显著提高巡检目标识别和判读准确率。

3)研制的智能巡检机器人在广东电网 220 kV 和 500 kV 变电站进行了巡检应用,实现了电流致热型发热缺陷、开关设备分合闸状态和设备表计读数的智能检测和诊断,实现了电压致热型发热缺陷、设备外观缺陷和设备音频缺陷的人工辅助诊断。机器人巡检应用取得良好效果,极大提高了巡检效率,降低了巡检成本。

参考文献:

- [1] 宋晓明. 变电站智能巡检机器人关键技术研究[D]. 长沙:长沙理工大学大学,2013:1-2.
SONG Xiaoming. Key technology research of intelligent iterative inspection robot in substation[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2013:1-2.
- [2] 赵永俊. 变电站巡视中图像分析方法的研究[D]. 北京:华北电力大学,2013:1-3.
ZHAO Yongjun. Study of image analysis methods in substation inspecting[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013:1-3.
- [3] 胡启明,胡润滋,周平. 变电站巡检机器人应用技术[J]. 华中电力,2011(5):36-38.
HU Qiming, HU Runzi, ZHOU Ping. Application of inspection robot technology in substation[J]. Central China Electric Power, 2011(5):36-38.
- [4] 陈启卷,毛慧和,肖志怀,等. 便携式电力设备巡检装置[J]. 电力系统自动化,2001,25(2):61-63.
CHEN Qijuan, MAO Huihe, XIAO Zhihui, et al. Portable inspection tour installation of power equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(2):61-63.
- [5] 陈志军. 国内外变电站无人值守的比较与思考[J]. 广东电力,2006,19(1):35-38.
CHEN Zhijun. Some comparisons and opinions of non-attended substations between china and foreign countries [J]. Guangdong Electric Power, 2006, 19(1):35-38.
- [6] 周立辉,张永生,孙勇,等. 智能变电站巡检机器人研制及应用[J]. 电力系统自动化,2011,35(19):84-88.
ZHOU Lihui, ZHANG Yongsheng, SUN Yong, et al. Development and application of equipment inspection robot for smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19):84-88.
- [7] 王可之. 基于 Pioneer3-AT 的变电站巡检控制系统设计与实现[D]. 重庆:重庆大学,2011:1-3.
WANG Kezhi. Design and implementation of control system of an inspection robot for substation equipment based on Pioneer 3-AT[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011:1-3.

- [8] SHOUYIN L. Design and implement of control system for power substation equipment inspection robot[C]//International Conference on Intelligent Robots and Systems.[S.l.]:[s.n.],2009:93-96.
- [9] NAKASHIMA M, YANO K, MARUYAMA Y, et al. The hot-line work robot system phase 2 and its human-robot interface MOS[C]//IEEE International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance.[S.l.]:IEEE,1995:212-218.
- [10] TAKAOKA K, YOKOYAMA K, WAKISAKO H. Development of the fully-automatic live-line maintenance robot phase 3[C]//4th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning Soft Research Park.[S.l.]:IEEE,2001:28-29.
- [11] POULIOT N, MONTAMBAULT S. Geometric design of the line scout: A teleoperated robot for power line inspection and maintenance[C]//2008 IEEE International Conference of Robotics and Automation. Pasadena, USA: IEEE, 2008: 3970-3977.
- [12] PINTO J K C, MASUDA M, MAGRINI L C, et al. Mobile robot for hot spot monitoring in electric power substation[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition. [S.l.]:[s.n.],2008:1-5.
- [13] BRIK A, KENN H. An industrial application of behavior-oriented robotics in substation[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation.[S.l.]:IEEE,2005: 749-754.
- [14] CARNEGIE D A, LOUGHNANE D L, HURD S A. The design of a mobile autonomous robot for substation application [J]. Journal of Engineering Manufacture - Proceedings Part B,2008,218(B5):533-543.
- [15] 李向东,鲁守银,王 宏,等. 一种智能巡检机器人的体系结构分析[J]. 机器人,2005,27(6):502-506.
LI Xiangdong, LU Shouyin, WANG Hong, et al. Design and analysis on the architecture of an intelligent iterative inspection robot[J]. Robot, 2005, 27(6):502-506.
- [16] 鲁守银,钱庆林,张 斌,等. 变电站设备巡检机器人的研制[J]. 电力系统自动化,2006,30(13):94-98.
LU Shouyin, QIAN Qinglin, ZHANG Bin, et al. Development of a mobile robot for substation equipment inspection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13):94-98.
- [17] 王荣本,余天洪,郭 烈,等. 强光照条件下车道标识线识别与跟踪方法[J]. 计算机应用,2006(26):32-34.
WANG Rongben, YU Tianhong, GUO Lie, et al. Lane mark identification and tracking method under bright illumination [J]. Computer Application, 2006(26): 32-34.
- [18] 许宏科,秦严严. 一种基于 Hough 变换的车道线检测新方法[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版),2013,28(4):1-4.
XU Hongke, QIN Yanyan. A new method for lane line detection based on Hough transformation[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology(Natural Sciences Edition), 2013, 28(4):1-4.
- [19] 何 缘,吴功平,肖 华. 高压输电线路巡检机器人机构设计及运动学分析[J]. 高压电器,2016,52(6):61-68.
HE Yuan, WU Gongping, XIAO Hua. Mechanism design and kinematic analysis of inspection robot for high voltage transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(6): 61-68.
- [20] 李永祥,王天正,李艳鹏,等. 基于红外成像检漏技术的 GIS 设备气体泄漏异常分析[J]. 高压电器,2016,52(7): 185-191.
LI Yongxiang, WANG Tianzheng, LI Yanpeng, et al. Abnormal analysis of GIS electrical equipment gas leakage based on infrared imaging leakage detection technology[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7):185-191.
- [21] 金立军,曹 培,胡 娟. 可见光图像颜色特征与支持向量机相结合的绝缘子污秽状态识别方法[J]. 高压电器, 2015,51(2):1-7.
JIN Lijun, CAO Pei, HU Juan. Identification of insulator contamination grade combining color features of visual image with support vector machine[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2):1-7.

彭向阳(1971—),男,博士,教授级高工,主要研究方向为输变电设备运行及故障诊断、高压设备智能巡检技术、电力系统过电压及绝缘配合等。

金 亮(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为输电线路运行及智能巡检技术。

王 锐(1988—),男,硕士,工程师,主要研究方向为输电线路运行及高电压试验技术。