

# 智能变电站巡检机器人研制及应用

周立辉<sup>1</sup>, 张永生<sup>1</sup>, 孙 勇<sup>2,3</sup>, 梁 涛<sup>2,3</sup>, 鲁守银<sup>2,3</sup>

(1. 浙江省电力公司金华电业局, 浙江省金华市 321000; 2. 国家电网公司电力机器人技术实验室, 山东省济南市 250002;

3. 山东电力研究院, 山东省济南市 250002)

**摘要:**介绍了一种基于移动机器人的设备巡检系统在智能变电站的应用情况。该系统携带可见光摄像机、红外热像仪、拾音器等传感器,基于磁轨迹实现最优路径规划和双向行走,以自主或遥控方式对站内一次设备进行巡检,及时发现设备热缺陷和外观异常;通过图像处理和模式识别,判别出开关和刀闸的分合状态,并在遥控或顺序控制操作时,与智能变电站顺控系统配合,代替人工实现被控设备位置的自动校核。现场实际应用情况表明,移动式变电站设备巡检机器人为智能变电站或无人值守变电站的运行管理提供了一种创新型的设备检测和监控手段。

**关键词:**智能变电站; 巡检机器人; 顺序控制; 磁轨迹; 最优路径规划

## 0 引言

变电站设备巡检是有效保证变电站设备安全运行、提高供电可靠性的一项基础工作,主要分为例行巡检和特殊巡检。例行巡检每天至少 2 次;特殊巡检一般在高温天气、大负荷运行、新投入设备运行前以及大风、雾天、冰雪、冰雹、雷雨后进行。此外,检修人员还通过手持红外热像仪,一般每半个月一次对变电站设备进行红外测温。现有巡检方式主要为人工巡视,手工或手持掌上电脑记录,每次巡视时间在 2 h 以上。中国地域辽阔,有很多变电站的地理条件十分恶劣,如高海拔、酷热、极寒、大风、沙尘、多雨等,只靠人工在室外进行长时间的设备巡检工作十分困难。人工巡检存在劳动强度大、工作效率低、检测质量分散、管理成本高等明显不足<sup>[1-3]</sup>。

随着机器人技术的快速发展,将机器人技术与电力应用相结合,基于室外机器人移动平台,携带检测设备代替人工进行设备巡检成为可能。早在 2002 年,电力机器人技术实验室在国家“863 计划”(2002AA420110-3)的支持下,研发出第 1 代变电站设备巡检机器人<sup>[4-5]</sup>。该机器人携带可见光摄像机和红外热像仪等传感器,沿一条闭合磁轨迹单向巡视,不支持双向行走;作为一个独立的巡检系统,也未实现与外部系统的接口;此外,该机器人在运行性能和可靠性等方面,还无法做到室外长时间的自主运行。经过几年的持续研究与改进,2010 年实验室又研发出第 4 代巡检机器人,系统性能和可靠性显著提高,采用百万像素的网络高清摄像机,重新设计

了室外柔性充电机构,新增基于磁轨迹的最优路径规划和双向行走、自动配合遥控或顺序控制操作进行被控设备的位置校核、一个变电站双机器人协同、与固定点视频融合等功能。新一代巡检机器人已成功应用于浙江某 500 kV 智能变电站改造项目。

## 1 变电站设备巡检机器人系统

变电站设备巡检机器人基于自主导航、精确定位、自动充电的室外全天候移动平台,集成可见光、红外、声音等传感器;基于磁轨迹和路面特殊布置的无线射频识别(RFID)标签,实现巡检机器人的最优路径规划和双向行走,将被检测设备的视频、声音和红外测温数据通过无线网络传输到监控室;巡检后台系统通过设备图像处理和模式识别等技术,结合设备图像红外专家库,实现对设备热缺陷、分合状态、外观异常的判别,以及仪表读数、油位计位置的识别;并配合智能变电站顺控操作系统实现被控设备状态的自动校核。

### 1.1 系统组成

设备巡检机器人系统设计为网络分布式架构,如图 1 所示。系统分为 3 层:基站层、通信层和终端层。基站层由监控后台组成,是整个巡检系统的数据接收、处理与展示中心,由数据库(模型库、历史库、实时库)、模型配置、设备接口(机器人通信接口、红外热像仪接口、远程控制接口等)、数据处理(实时数据处理、事项报警服务、日志服务等)、视图展示(视频视图、电子地图、事项查看等)等模块组成。基站层通过图像处理和模式识别等技术,实现设备缺陷的自动识别和报警。

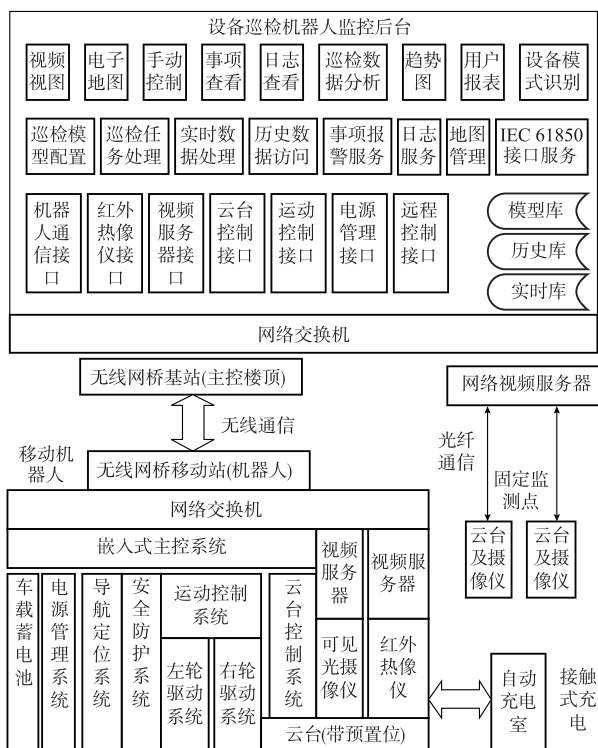


图1 变电站巡检机器人系统结构图

Fig. 1 System structure of substation inspection robot

通信层由网络交换机、无线网络基站(固定在主控楼楼顶)及无线网络桥移动站(安装在移动机器人上)等设备组成,采用 Wifi 802.11 n 无线网络传输协议,为站控层与终端层间的网络通信提供透明的传输通道。

终端层包括移动机器人、充电室和固定视频监测点。移动机器人与监控后台之间为无线通信,固定视频监测点与监控后台之间可采用光纤通信。充电室中安装充电机构,机器人完成一次巡视任务后或电量不足时,自动返回充电室进行充电。

## 1.2 主要功能

1) 检测功能:通过在线式红外热像仪检测一次设备的热缺陷,包括电流致热型、电压致热型设备的本体及接头的红外测温;通过在线式可见光摄像机进行一次设备的外观检查,包括破损、异物、锈蚀、松脱、漏油等;断路器、刀闸的位置;表计读数、油位计位置;通过音频模式识别,分析一次设备的异常声音等。

2) 导航功能:按预先规划的路线行驶,能动态调整车体姿态;差速转向,原地转弯,转弯半径小;磁导航时超声自动停障;最优路径规划和双向行走,指定观测目标后计算最佳行驶路线。

3) 分析及报警:设备故障或缺陷的智能分析并自动报警;自动生成红外测温、设备巡视等报表,报

表格式可由用户定制,可通过 IEC 61850 接口上送信息一体化平台;按设备类别提供设备故障原因分析及处理方案的辅助系统,提供设备红外图像库,协助巡检人员判别设备的故障。

4) 控制功能:设备巡检人员可在监控后台进行巡视;可对车体、云台、红外及可见光摄像机进行手动控制;实现变电站设备巡检的本地及远方控制;与顺序控制系统相结合,代替人工实现开关、刀闸操作后位置的校核。

5) 特殊巡视:当因天气恶劣或设备附近存在安全隐患等原因,运行人员不便靠近该设备时,机器人可代替运行人员到达指定设备的观测位置,运行人员在后台通过调整机器人云台位置对准被观测设备进行检测。

6) 固定视频点接入:设备巡检机器人系统还可接入变电站的固定视频监测点,覆盖机器人无法到达的观测死角,实现全站的视频监测。

7) 与外部系统接口:与变电站综合自动化系统接口,获取设备实时负荷电流进行设备温升分析;作为 IEC 61850 服务端与综合自动化或智能变电站信息一体化系统接口,配合遥控或顺序控制进行被控设备的位置校核。与生产管理信息系统(MIS)接口,上送红外测温和设备外观异常信息。

## 2 变电站设备巡检机器人系统的关键技术

### 2.1 基于磁导航的最优路径规划和双向行走

文献[6]提出一种巡检机器人寻迹方案,先利用全球定位系统(GPS)粗定位(约 3 m),再由光电传感器、电感式接近开关、光电编码器探测轨迹中的金属信号源,实现精确定位。但 GPS 信号在变电站易受干扰,机器人在高压设备区接收不到 GPS 信号。

目前,磁导航(路面磁轨迹结合 RFID 标签定位)是应用于变电站室外强电磁环境、全天候条件下的最为可靠的一种导航定位方式,定位精度在 2 cm 以内。与 GPS 坐标式导航方式不同,采用磁导航时无法得到机器人的位置坐标,通常机器人只能沿一条闭合路径单向行走,可以实现基本的设备巡检功能。为通过机器人实现智能变电站中遥控或顺序控制的位置校核,机器人要从当前位置沿最优路径迅速运动到被控设备的观测位置,下面设计了一种基于磁轨迹实现最优路径规划和双向行走的解决方案并成功通过变电站现场的实际验证。

#### 2.1.1 磁轨迹与 RFID 标签的布置

变电站内磁轨迹和 RFID 标签的布置方式如图 2 所示。磁轨迹敷设在道路中间,停靠检测点的

RFID 标签埋设在磁轨迹的右侧(相距约 20 cm)。如机器人只沿一个闭合路径单向行走,则每个路口只需安置 1 个 RFID 标签。为实现机器人双向行走,需要根据路口类型埋设多个 RFID 标签。由于机器人识别到 RFID 标签后进行平稳停车时有一定的停车距离(约 20 cm),所以在所有路口以路口交叉点为基准,在机器人的每个方向沿磁轨迹向路口交叉点的右侧,埋设路口标示点 RFID 标签(横向距磁轨迹约 20 cm,纵向距道路中心点约 50 cm),路口标示点 RFID 标签的埋设数量分别为:拐弯处 2 个,丁字路口 3 个,十字路口 4 个。移动机器人底部的左右两侧对称安装 2 个 RFID 读卡器,这样机器人行驶过程中读到任一 RFID 标签时,均能识别出自身的位置和行走的方向。

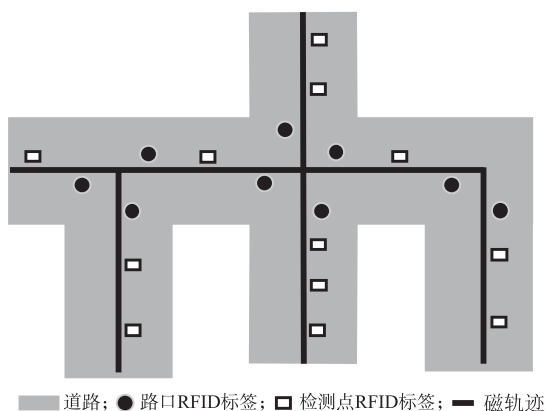


图 2 磁轨迹与 RFID 标签布置示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of magnetic path and RFID tags

### 2.1.2 磁轨迹与 RFID 标签模型配置和规划算法

采用全局路径规划中的拓扑法对巡视道路进行建模。根据 RFID 标签的连通性建立拓扑网状图,为简化计算,路口多个 RFID 标签先合并为图中的一个节点,磁轨迹作为图中的一条边。通过对节点和边的遍历,计算 2 个节点间的最短连通路,再转换到以 RFID 标签序列标示的行驶路线,在每个路口 RFID 标签,根据路径连通性,计算出机器人的转动角度。

## 2.2 顺序控制的位置校核

### 2.2.1 顺序控制

顺序控制是指自动完成相关运行方式变化要求的一系列设备操作,是智能变电站在数字化变电站基础上扩展的一项重要功能。在对开关或刀闸进行操作时,巡检机器人可代替人工,按自动规划出的最优路径移动到目标设备的监测位置,通过所携带的可见光摄像机或红外热像仪抓取设备图像,并对设备图像进行图像处理 and 模式识别,识别出开关或刀

闸的当前位置,从而实现被控设备控前及控后位置的校核,在站内和远端实现可视化操作,满足无人值班及区域监控中心站管理模式的要求。巡检机器人与顺序控制系统的交互过程如图 3 所示。

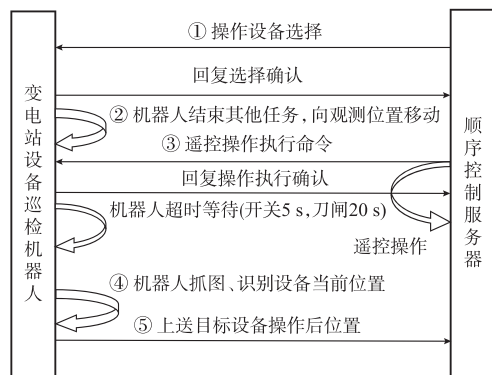


图 3 与顺序控制系统的交互步骤  
Fig. 3 Interactive steps with sequence control system

### 2.2.2 支持顺序控制的 IEC 61850 接口

在机器人巡检系统的 IEC 61850 智能电子设备 (IED) 模型中,创建变电站内所有需要控制的开关、刀闸设备的逻辑节点(即逻辑节点 CSWI),机器人对开关进行模式识别的结果通过逻辑节点 GGIO 的 Ind 数据点组织成信息报告发送给信息一体化平台,Ind 采用 SPS 单点遥信,上送的数据为遥控结果(用布尔量表示):1 表示成功(控分且识别的结果为分,控合且识别的结果为合),0 表示失败(控分未分到,控合未合到);另外,在失败时以报告的形式发送告警信号。

如图 4 所示,巡检机器人后台与信息一体化平台顺序控制系统服务器配合校验的过程,与 IEC 61850 标准中控制信息模型中带增强安全的操作前选择模型一致,可以用 IEC 61850 中定义的控制操作和信息报告来完成上述交互过程。当顺序控制系统遥控站内的某个设备时,在向该开关发送正常遥控命令的同时,也给巡检机器人 IED 模型中的设备节点发送遥控命令。

## 3 变电站现场应用情况

浙江某 500 kV 变电站(南北约 300 m,东西约 200 m)配置 2 台巡检机器人,500 kV 区 1 台,220 kV 和 35 kV 区 1 台,每台机器人 1 个充电室,如图 5 所示。

2 台机器人一般分区巡视,需要时也可跨区巡视。2 个区域的巡视道路总长约 5 km,以 RFID 标签标示的路口有 50 多个;以 RFID 标签标示的机器人停靠点近 300 个;设备观测位置约 1 200 个(平均

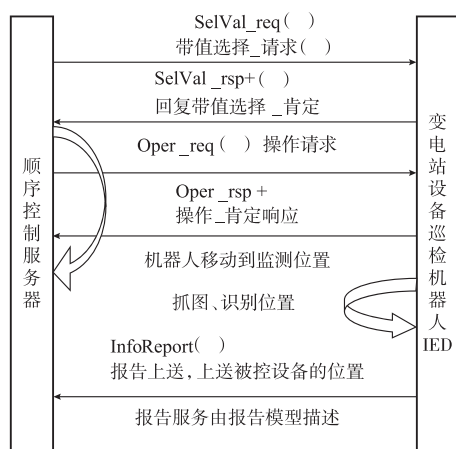


图4 顺序控制的 IEC 61850 接口

Fig. 4 IEC 61850 interface of sequence control

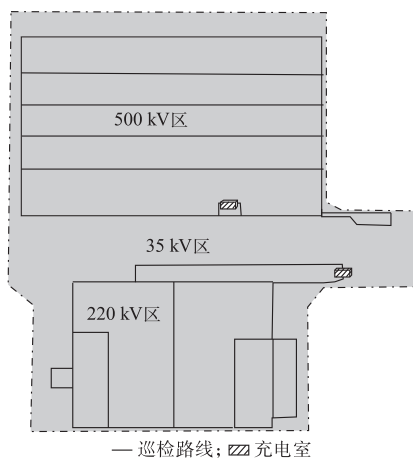


图5 机器人现场巡检路线示意图

Fig. 5 Schematic diagram of patrolling path of mobile robot

在每个停靠点观测附近的4个设备)。500 kV区全任务巡检约70 min, 220 kV和35 kV区全任务巡检约150 min。每天上午、下午、晚上定时执行3次巡检任务, 巡检任务执行结束后, 机器人返回充电室自主充电。如机器人接收到顺序控制系统的遥控操作命令, 将停止充电或正进行的巡检任务, 根据被控设备的观测位置, 计算出最佳行驶路径并直接运动到被控设备的预定观测位置进行检测。机器人现场配合测试顺序控制操作票200余张, 设备位置识别成功率达98%以上。现场应用情况见附录A图A1~图A3。

## 4 结语

本文介绍了设备巡检机器人在智能变电站的典型应用模式, 该机器人基于室外全自主移动平台和磁轨导航, 实现了最优路径规划和双向行走, 可以

取代或辅助变电站运行人员进行日常的设备巡检、红外测温等工作; 巡检机器人还能代替人工配合顺序控制系统实现被控设备位置的自动校核。通过巡检机器人可实现变电站设备巡检的无纸化和信息化, 切实提高设备巡检的工作效率和质量, 降低变电站运行人员的劳动强度和工作风险, 为智能变电站或无人值守变电站的运行管理提供了一种创新型的设备检测和监控手段。

附录见本刊网络版(<http://aeprs.sgepri.sgcc.com.cn/aeprs/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 沈祥, 祝项英, 金乃正. 无人值班变电站远方监控系统的设计和应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 89-90.  
SHEN Xiang, ZHU Xiangying, JIN Naizheng. Design and application for unmanned substation remote monitoring and control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 89-90.
- [3] 张喜平. 变电站远程图像监控系统建设经验[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(16): 97-99.  
ZHANG Xiping. Constructing experience for substation remote image monitoring and control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(16): 97-99.
- [4] 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.
- [5] 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和设计[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.
- [6] 王建元, 王娟, 陈永辉, 等. 基于图论的电力巡检机器人智能寻迹方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(9): 78-80.  
WANG Jianyuan, WANG Xian, CHEN Yonghui, et al. An intelligent patrolling robot addressing program based on graph method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(9): 78-80.

周立辉(1978—), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统变电运行维护与管理。

张永生(1967—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统变电运行维护与管理。

孙勇(1969—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统自动化、电力特种机器人。E-mail: suny@powerobot.org

(下转第96页 continued on page 96)

## Development and Application of Equipment Inspection Robot for Smart Substations

ZHOU Lihui<sup>1</sup>, ZHANG Yongsheng<sup>1</sup>, SUN Yong<sup>2,3</sup>, LIANG Tao<sup>2,3</sup>, LU Shouyin<sup>2,3</sup>

(1. Jinhua Power Administration of Zhejiang, Jinhua 321000, China;

2. Electric Power Robotics Laboratory of State Grid Corporation, Jinan 250002, China;

3. Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China)

**Abstract:** The application of the equipment inspection system based on the outdoor mobile robot used in the smart substation or automatic substation is described. With the video camera, thermal infrared imager, microphone and other sensors, the robot has realized optimal path planning and two-way movement based on the magnetic track to patrol devices by autonomous or remote control to detect thermal problems and abnormal appearances. By image processing and pattern recognition, this robot system can identify the opening/closing state of breaker and isolator. When executing device operation by remote control or sequence control, the mobile robot can replace operating people to check the state of a controlled device. By practical experience, this mobile robot provides an innovative means of detection and monitoring for the smart substation and unmanned substation.

**Key words:** smart substation; inspection robot; sequence control; magnetic track; optimal path planning



## 附录 A

本文源于国家电网公司浙江金华兰溪 500kV 变电站智能化改造项目,是首批 7 个智能化改造站之一。变电站设备巡检机器人 2009 年获“山东省科技进步一等奖”,2010 年成为国家电网公司首批重大科技成果推广候选项目。现场应用情况图片如下:



图 A1 变电站设备巡检机器人  
Fig.A1 Substation inspection mobile robot



图A2 国网公司专家对500 kV兰溪智能变电站智能巡检系统进行现场验收  
Fig.A2 Site accepting by experts to intelligent inspection system of Lanxi 500 kV substation



图A3 巡检机器人现场调试、执行巡检和顺控配合

Fig.A3 Testing, inspection and control execution cooperation of inspection robot