水电水利
Hydropower and Water Resources
第 9 卷◆第 8 期◆版本 1.0◆2025 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2529-7821 /（中图刊号）：868GL002

智能机器人变电站巡检应用实践

江晨璐
国网江苏省电力有限公司技能培训中心培训一部
DOI:10.12238/hwr.v9i8.6520

[摘　要] 随着智能机器人和人工智能技术的快速发展,变电站智能巡检逐渐成为电力行业的研究热点。传统依靠人工的巡检方式,由于存在着工作速度慢、危险性强、无法保证可靠性等缺点,已很难满足现代电网运作时对维护人员的要求。本文从现有的智能巡检机器人运用现状以及存在问题的角度出发,运用相关案例分析智能巡检机器人的性能、技术框架与应用效果。研究结果表明,智能巡检机器人可以在很大程度上提高工作的速率,而且能够更好的保证系统的稳定性,从而有效的保证电力系统的安全平稳运行。
[关键词] 智能机器人；变电站；巡检应用
中图分类号：TM411+.4　文献标识码：A

Application Practice of Intelligent Robot in Substation Inspection

Chenlu Jiang
State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Skill Training Center Training Department 1
[Abstract] With the rapid development of intelligent robots and artificial intelligence technology, intelligent inspection of substations has gradually become a research hotspot in the power industry. The traditional manual inspection method is difficult to meet the requirements of maintenance personnel in modern power grid operation due to its drawbacks such as slow working speed, strong danger, and inability to guarantee reliability. This article starts from the current application status and existing problems of intelligent inspection robots, and uses relevant cases to analyze the performance, technical framework, and application effects of intelligent inspection robots. The research results indicate that intelligent inspection robots can greatly improve their work speed and better ensure the stability of the system, thereby effectively ensuring the safe and smooth operation of the power system.
[Key words] intelligent robots; Substation; Inspection application

引言

某公司研制出一个融合多模态感知与智能决策的新巡检体系,在提升变电站设备监视与运行保养水准上起重要作用。它运用了激光雷达与双光谱云台设备来达成对整个检测区域内的温度差异实施监测的目标,在保证高频传感信息得以及时传送到后台系统的前提下,做到持续跟踪检测。边缘计算部分安排了NVIDIAJetsonAGXOrin处理器,依靠这个装置配合YOLOv5模型完成故障识别,同时依赖远端的云计算环境做基础成因分析及不断修改行程路线的任务。利用数字模拟技术创建出虚实互动的沟通模式,进而赋予该系统独立决定的能力,使巡检工作的成效和安全性得到改善和提高,在南方电网下属的500kV变电站完成了该套技术的实际运用,经此证明技术创新成果得到了认可和采纳使用的情况。

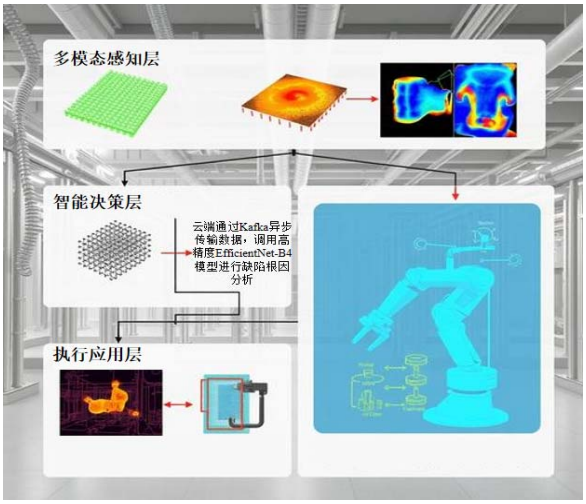

图1 智能巡检系统多模态感知架构示意图

1 系统架构设计

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2529-7821 /（中图刊号）：868GL002

多模态感知层：集成激光雷达(SLAM定位精度±2cm)、双光谱云台(4K可见光相机、640×512红外热成像)实现-20℃~1500℃的测温,获取设备表计数据及温度场分布数据,配备超声波传感器(50kHz采样频率)实现10厘米距离的障碍物检测,通过时间戳同步机制保证多源数据融合时延小于5ms。

智能决策层:按照云边端协同架构的设计思路,边缘节点选用NVIDIA Jetson AGX Orin(峰值算力达到200TOPS)部署轻量化的YOLOv5模型(模型大小约为500MB),可以做到针对30种设备故障以及9类计量异常的即时检测,云端凭借Kafka来执行数据的异步传输任务,而且利用高效的EfficientNet-B4模型开展缺陷成因分析工作,还会动态调整巡检路线规划策略。

执行应用层:基于Unity3D高精度建模技术搭建数字孪生平台,实现“虚实融合”功能,该系统可使机器人自主实现近距离巡检、红外测温、声光预警(可设置三级阈值),其定位精度达到±0.5米；通过轨道式机械臂实现紧急分闸,以代替传统人工高风险作业方式。

设计验证:这个系统已经在南方电网500kv的变电站上完成部署,巡检覆盖率达到了100%,对于电能表的识别准确率高于97%,人工运维所承担的工作量也大幅度降低,超过80%。

2 技术流程

智能机器人巡检系统把高精度环境建模、动态路径规划技术和先进的传感器与算法更新融合起来,明显改善了巡检效率并提升了数据采集的精确度。它的关键部分包含一台32线激光雷达,波长905nm,扫描频率10Hz。依靠SLAM算法创建变电站三维点云地图,定位精度达到正负2厘米。在复杂的多层建筑情形,像配电室和设备区里,这个系统利用数字孪生技术形成“区域-楼层-设备”这样的三层空间索引体系,通过区域编码A_i,层级标识L_j和模块序号M_k给每台设备赋予独一无二的标识符,保证设备定位准确而且做到资产管理的高效化。

系统在路径规划中采用动态成本函数公式：

$$\mathrm{Cost} = \alpha \cdot \|P_{start} - P_{end}\| + \beta \cdot C_t(P) + \gamma \cdot \rho_0(P)$$

式中：

α：距离权重系数,控制路径长度在总成本中的优先级。

$\|P_{start} - P_{end}\|$：欧氏距离范数(单位：米),表示P_{start}到终点P_{end}的直线距离,可以通过SLAM即同步定位和地图构建完成动态距离测量,并且计算。

β：地形权重系数,反映地形对移动难度的影响程度。

$C_t(P)$：动态地形复杂度函数的计算式为：

$$C_t(P) = \max\left(0, \frac{|\theta_P|}{\theta_{max}}\right) + \lambda \cdot \mathrm{roughness}(P)$$

θ_P：点P处的实时坡度角(单位：度)由坡度传感器测量,θ_{max}反映机器人最大爬坡能力。

roughness(P)是表征地表表面的重要参数,取值范围为[0,1],通过激光雷达点云数据方差计算得到,归一化因子λ一般取0.5。

修正机制的分析显示,当路径坡度角θ_P大于最大允许坡度阈值θ_{max}时,路径代价函数$C_t(P)$会呈现出指数级的增长态势,此机制借助增加陡坡区域的经济成本,在路径规划时实现对这些高风险地形的有效规避。

γ：障碍物权重系数,影响避障行为的激进程度。

$\rho_0(P)$：障碍物密度函数$\rho_0(P)$可以通过如下数学表达式来进行表示：其中,该表达式具体呈现出特定的形式,它是基于相关理论和实际情况所确定的,用于准确描述障碍物密度与位置之间的关系,依靠这样的表达式,可以为后续对障碍物相关特性的研究和分析提供基础和依据。

$$\rho_0(P) = \sum_{i=1}^{N} \exp\left(-\frac{\|P - O_i\|^2}{2\sigma^2}\right)$$

O_i：在针对障碍物定位的研究工作中,第i个障碍物的中心坐标O_i可借助融合了双目视觉以及毫米波雷达的多传感器感知系统实现精确测定,此系统的定位精度处于±0.1米的误差范围之内。

σ：障碍物影响半径(单位：米),依据障碍物类型动态调整。

多模态数据采集时要保证各个通道数据的同步一致。可见光通道选用分辨率达到4K、帧率达到30fps的CMOS图像传感器,红外通道则采用640×512像素、采样率25Hz的微测辐射热计,高精度的时间同步由建立于IEEE1588协议上的硬件级同步框架完成,其时间偏差被控制在0.8毫秒内。

遭遇一级数据异常波动,比如变压器油温突然变化的时候,系统就会触发二级监控,这时红外成像装置和声纹传感器会合作,针对某个频段展开动态监测,拿铁芯松动造成的100-400Hz振动信号来说,通过六自由度机械臂准确调节探测距离到10厘米,可以明显改善信噪比并优化数据采集效果。

在异常诊断方面,边缘智能技术被确定为重要的技术突破点。针对云计算处理延时的问题,系统在机器人终端安装了NVIDIA Jetson AGX Orin边缘计算平台,它的峰值算力可以达到200TOPS,而且采用了轻量级的YOLOv5模型大约500MB来实现视觉异常检测以及多种模态的数据融合分析。Swin Transformer模块针对设备形变、油渍泄漏之类的缺陷识别工作,它所承担的推理延迟要被严格把控在23毫秒之内,而那些大型模型则借助红外热成像、振动频谱分析以及过往的维修记录来深入挖掘潜藏的故障原因。该系统凭借Transformer时间序列模型预测设备剩余服役寿命,进而动态调整警报阈值,在此过程中给运维策略的改进给予了数据支撑。

系统一旦察觉到异常状况,就会自动启动分级协同预警机制[1]。在一级告警期间,本地声光报警装置会被激活,以此来提醒现场的操作人员。二级告警阶段之后,系统会自动形成结构化的故障诊断报告,而且通过5G通信网络立刻上传到运维平台,凭借高精度定位技术,可以精准地找到故障点(误差范围控制在正负0.5米之内),当进入到三级紧急告警模式的时候,机械臂会立刻执行分闸动作,并且联动周围的机器人一起开展故障排查工作。

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2529-7821 /（中图刊号）：868GL002

动态优化机制存在于系统全生命周期的闭环管理体系当中，这体现出它在实际应用中具有可行性。

3 实验验证

3.1实验配置

借助某220kV变电站仿真实验平台，搭建起包含主变压器，断路器以及电缆接头等关键设备的测试体系，设计出多种模式感知网络来模仿复杂的工况环境，在高温45℃±3℃，低温-15℃±2℃，高湿度85%±5%以及雨雾天气等极端气候条件下实施实验，目的就是为了全方位地重现南方湿热区域和北方寒冷地区的变电站实际运行状况。

硬件架构设计部分，巡检机器人把双光谱云台当作关键元件，可见光相机，红外热成像模块，激光雷达传感器等核心部分均包含其中。边缘计算平台选取NVIDIA Jetson AGX Orin处理器，其峰值算力达到200TOPS，主要任务是处理数据并做到本地实时处理，云端服务器采用的设备则是具有64GB显存的A100GPU。

在测试场景上分为两种工况，正常工况下设备没有异常，光照稳定，用来测试系统的误报率（<0.5%），以及5G网络下视频流的稳定性（延迟≤200ms）；异部工况模拟设备局部过热（主变套管温升ΔT≥15℃）、机械变形（偏移量>5mm）、绝缘油渗漏等故障，还模拟烟雾火焰报警、异物入侵（体积>10cm³）和人员未戴安全帽、闯入禁区等行为风险。

3.2评价指标

这项研究形成起包含巡检精度，作业效能和安全性在内的多方面评判体系，巡检精度旨在评判智能巡检机器人同传统的依靠人工巡查的方式相比，在判定设备故障时有着怎样的差别，以此来证明智能巡检机器人能够在比较复杂的工况之下一直做到可靠的检测。安全评判主要针对巡视期间的风险管理层次展开评判，保证设备正常运行的安全性和稳定性[2]。实验围绕着故障正确诊断，操作回应速率以及对环境改变的适应程度等指标展开对比评判，从而对智能巡检技术的实际用途和将来潜力做出全面估量。

3.3结果分析

本研究把传统人工巡检和智能机器人巡检的关键技术参数拿来比较（参照表1），从研究结果可以看出，在故障识别准确率这块，传统人工巡检只有75.5%，智能机器人巡检能达到92.3%，比传统人工巡检多出16.8个百分点，这足以体现智能机器人在巡检效能和精确度上的明显优势。

按照作业时间来开展实证分析后表明，智能机器人巡检每一次花费的时间大约在45分钟左右，在这方面的改善空间同传统人工巡检相比要短很多，大概只有一百二十分钟，整体效率提高了62.5%。面对复杂工况适用性问题上所表现出来的指数值则为89.6%，远远优于人工巡检时五十八点七这个数据结果，并且两者对比之后还有着39%之差；而且利用该系统结合红外线成像技术加诸以上深度学习方法之后，其对电网维护期间的漏检比率便由先前25%向下大幅减少。最终得出这样一个结论，在电力系统中完成真正意义上的“无人值守”管理模式其实是非常可行且能够实际应用出来。

表1 传统人工巡检与智能机器人巡检关键指标对比

指标	传统人工巡检	智能机器人巡检	提升幅度
故障识别准确率(%)	75.5	92.3	+16.8%
平均单次巡检时间(min)	120	45	-62.5%
安全事故发生率(次/月)	5	1	-80%
极端环境适应度(%)	58.7	89.6	+30.9%

4 未来发展方向

展望未来，智能机器人巡检系统将会依靠5G通信技术，边缘计算架构以及前沿的人工智能算法，达成更高层次的智能化提升并改善巡检效能，而且还要努力推动智能机器人巡检系统同无人机，远程视频监控等技术展开协同更新，从而充实变电站智能化运维体系的总体创建计划[3]。

5 结语

随着智能机器人和人工智能技术的快速发展，变电站智能巡检已成为电力行业的研究热点。传统的人工巡检方式因工作速度慢、危险性高及可靠性不足等问题，难以满足现代电网对维护的要求。研究表明，智能巡检机器人通过新的技术框架与应用，显著提升了工作效率及系统稳定性，有助于确保电力系统的安全运行。本文探讨了一种新型巡检体系，融合多模态感知与智能决策，该体系采用激光雷达和双光谱云台技术，有效监测变电站设备，并借助边缘计算和云端技术实现故障识别与动态路径优化。实际应用表明，该技术在提高巡检效率及准确性方面表现优异，为未来电力运维提供了可行的解决方案。

[参考文献]

[1]邹德鑫,李昙.智能巡检机器人在500kV变电站变电运维工作中的应用[J].科技与创新,2024(23):185-187.

[2]张文,许明政,李仲强,等.基于机器学习的500kV超高压变电站变电状态机器人巡检系统设计[J].自动化与仪表,2022,37(7):48-53.

[3]范新南,黄伟盛,史朋飞,等.基于改进YOLOv4的嵌入式变电站仪表检测算法[J].图学学报,2022,43(3):396-403.

作者简介：

江晨璐(1998--),女,湖南常德人,硕士研究生,国网江苏省电力有限公司技能培训中心培训一部,主要研究方向为变电运维。