

5G+智慧电厂机器人自主巡检系统设计与开发

田华[✉], 张玮, 冯斌, 王伟, 孟晓伟, 仇韬

(中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: [目的] 为了改变目前以人工巡检为主的电厂巡检模式, 提高电厂巡检作业的智能化水平, 同时充分掌握机器人自主巡检系统的设计方法。[方法] 文章从机器人自主巡检系统的设计思路出发, 明确系统功能, 分别从硬件架构和软件功能两方面给出巡检系统的设计方案。并以此设计方案为依据, 设计出一台集先进性与实用性于一体的5G+机器人自主巡检系统。此外, 为使得机器人的巡检结果能够更加直观地反映出电厂的实际运行情况, 文章基于智能图像处理技术, 完成了对仪表读数、阀门、按钮开关状态等信息的分析处理。[结果] 5G+机器人自主巡检系统能够实现地图构建、任务部署, 并能自主导航执行巡检任务, 自动识别巡检设备, 同时利用5G回传巡检数据, 完成巡检结果分析并自动生成巡检报告。[结论] 开发的5G+智慧电厂机器人自主巡检系统可大幅提升巡检效率, 提高电厂运维的智能化水平, 为电厂的自主巡检作业提供了有力的技术支撑, 为专业人员全面掌握锅炉房、汽机房、升压站、辅助车间的运行状态提供可靠的依据, 在实现减员增效的同时保障了重点区域设备安全运行, 更好地助力智慧电厂建设。

关键词: 巡检机器人; 人工智能; 5G通信技术; 自主导航; 电力巡检

中图分类号: TM7; TM734

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)06-0034-09

开放科学(资源服务)二维码:



Design and Development of 5G+ Robot Autonomous Patrol Inspection System in Intelligent Power Plant

TIAN Hua[✉], ZHANG Wei, FENG Bin, WANG Wei, MENG Xiaowei, QIU Tao

(Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: [Introduction] In order to change the current patrol inspection mode of power plant mainly based on manual patrol inspection, improve the intelligent level of power plant patrol inspection, and fully grasp the design method of robot autonomous patrol inspection system. [Method] This paper started from the design idea of the robot autonomous patrol inspection system, defined the system functions, and gave the design scheme of the patrol inspection system from the hardware architecture and software functions. Based on this design scheme, a 5G+ robot autonomous patrol inspection system integrating progressiveness and practicality was designed. In addition, in order to make the robot's patrol inspection results more intuitively reflect the actual operation of the power plant, this paper, based on intelligent image processing technology, completed the analysis and processing of instrument readings, valves, button switch status and other information. [Result] The 5G+ robot autonomous patrol inspection system can realize map construction, task deployment, autonomous navigation and execution of patrol inspection tasks, automatic identification of patrol inspection equipment, and use 5G to return patrol inspection data, complete the analysis of patrol inspection results and automatically generate patrol inspection reports. [Conclusion] The 5G+ robot autonomous patrol inspection system in intelligent power plant developed in this paper can significantly improve the patrol inspection efficiency, improve the intelligent level of power plant operation and maintenance, provide strong technical support for the independent patrol inspection operation of the power plant, provide reliable basis for professionals to comprehensively grasp the operation status of the boiler room, steam turbine room, booster station and auxiliary workshop, and ensure the safe operation of equipment in key areas while reducing personnel and increasing efficiency, better assist the construction of smart power plants.

收稿日期: 2022-10-14 修回日期: 2023-02-21

基金项目: 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司科技项目“基于5G+的全新一代智慧电厂技术研究与实施”(DK_2022_02)

Key words: patrol inspection robot; artificial intelligence; 5G communication technology; autonomous navigation; power patrol inspection

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

传统电力巡检仍主要采用人工巡检的方式,人力成本高、巡检手段单一、受天气影响大、巡检数据主观性强等诸多不足之处正在不断催生先进的巡检技术^[1]。随着5G通信技术^[2]、无人机^[3]、视觉采集^[4]、激光雷达^[5]等技术的不断涌入,自动化技术代替人力成为了电力巡检的必然趋势。正因如此,我国电力行业逐渐向智慧电厂方向进步^[6],伴随着机器人的有效使用,电厂的智慧等级进一步提升^[7]。文章提出的机器人自主巡检系统融合多种先进的传感、通信与信息处理技术于一体,由监控中心、5G通信平台和四轮移动机器人三者共同组成,不仅能够全方位、无遗漏地自主完成既定巡检任务,而且可以对巡检数据进行全面分析和比较。巡检任务开始后,机器人按照预设巡检顺序,自动规划出最优的巡检路径^[8],随后利用自身装备的热成像双光谱相机对巡检设备进行图像采集,并通过5G通信平台将巡检数据实时回传至监控中心。监控中心对采集到的信息进行处理后,判断当前设备运行是否正常,当设备状态发生变化,如漏水、漏油、温度异常、设备附件变化时,发出异常报警并自动定位异常发生地点,为电厂安全稳定运行提供保障。除实时巡检功能以外,巡检系统还可以对历次的巡检数据进行分析,为专业人员全面掌握锅炉房、汽机房、升压站、辅助车间的运行状态提供可靠的依据。文章将5G和人工智能技术应用到电力巡检中,使得巡检频次和巡检质量得以大幅提升,实现减员增效的同时保障了重点区域设备安全运行。

1 巡检系统设计思路

机器人自主巡检系统以最大限度替代人工,实现自主巡检作业为目标。在进行系统设计之前,需要明确系统功能、系统组成以及巡检环境等重要因素。巡检系统设计遵循以下思路:

1) 不同环境的适用性

在实际应用中,巡检系统会应用于各种环境之

中,这要求巡检系统应具有通用性。因此整套巡检系统应能够灵活部署,作为设备载体的移动机器人需要具备自行建立未知厂区地图和规划巡检路径的能力。

2) 巡检系统的完备性

当未经考虑的情况出现时,操作人员往往不清楚应如何操作,巡检设备也有可能运行失常。因此应充分考虑巡检时会遇到的各种情况,保证巡检系统的完备性。

3) 巡检信息的准确性

巡检任务执行时,操作人员在监控中心对巡检结果进行确认。因此巡检系统采集到的数据信息必须及时可靠,方可以根据巡检数据对运行设备进行准确的评估,这需要终端采集设备与信息传递系统的共同作用。

4) 操作人员的交互性

当巡检结果出现异常时,检修人员到达移动机器人所在位置。巡检系统应当具备远方与就地人员实时沟通的能力,为设备检修工作提供便利。

5) 交互平台的易用性

巡检工作中,操作人员不对巡检装置进行直接操作,因此巡检系统应提供一个友好直观、操作方便的人机交互平台,将所有巡检操作集中放置在交互平台中,方便操作人员远方部署。

2 巡检系统设计方案

2.1 巡检系统硬件设计

依照巡检系统设计的思路,自主巡检系统应具备后台监控处理、实时信息传输、现场信息采集的功能。

系统硬件设计进行如下考虑:

在系统硬件的设计中,尽可能将大量的数据计算交由计算能力突出的监控中心进行处理,从而减轻机器人本体的算力负荷,这样可以使得机器人拥有更好的续航能力、更高的稳定性以及更优的经济性。

5G 凭借大带宽、低时延、高可靠性、海量连接等技术特性以及在网络架构上的灵活性,高度契合工业场景专网的需求^[9]。目前的电厂巡检机器人多以 WiFi 作为信息传输的媒介。相比传统专网如 WiFi-6 接入技术,5G 主要优势体现在良好的网络覆盖性、双向认证的安全性、更快的速度和更低的延时抖动、移动业务的连续性等方面。本课题采用 5G 通信进行数据传输,5G 数据传输高速率、低时延的极大优势,将为机器人接受监控中心的指令,并将采集到的信息回传至监控中心提供有力的保障。

监控中心对巡检信息进行分析处理,在降低机器人本体算力负荷的同时,还为监控中心记录历史巡检信息提供了便利。综合分析历史巡检信息,有利于评估一段时间内设备的运行状态,为专业人员全面掌握设备的运行状态提供可靠的依据。

巡检作业不仅需要采集设备的图像信息,还需关注设备和环境的温度信息,因此机器人可装备热成像双光谱相机,使其同时具备红外与可见光信息的采集能力。

此外,在现有定位与地图构建技术中,激光 SLAM (Simultaneous Localization And Mapping, 定位与同步建图) 技术更加成熟,不仅能够建立直观、高精度地图,并且拥有更高的可靠性^[10]。

根据以上分析,可设计出自主巡检系统的硬件结构。系统硬件部分可分为 5 个层次,如图 1 所示。从上至下分别为应用层、通信层、控制层、执行层和感知层。

应用层对应监控中心,负责巡检任务的部署以及巡检信息的分析处理,为巡检系统的最高层级;通信层对应 5G 通信平台,保证巡检任务的快速下发和采集信息的实时回传;控制层、执行层和感知层共同组成机器人系统,为巡检任务的顺利执行提供保障。控制层由工控机构成,负责将接收到的任务信息进一步细化,得到机器人的巡检路径;执行层由运动底盘和底盘驱动构成,保证机器人能够快速响应控制层的指令;感知层由激光雷达、陀螺仪、声波传感器组成,负责自身状态的检测和环境信息的识别,保证运行过程的可靠性。

系统硬件结构设计完成后,对照巡检系统设计思路,仍有两点需要完善,分别是机器人自主充电和

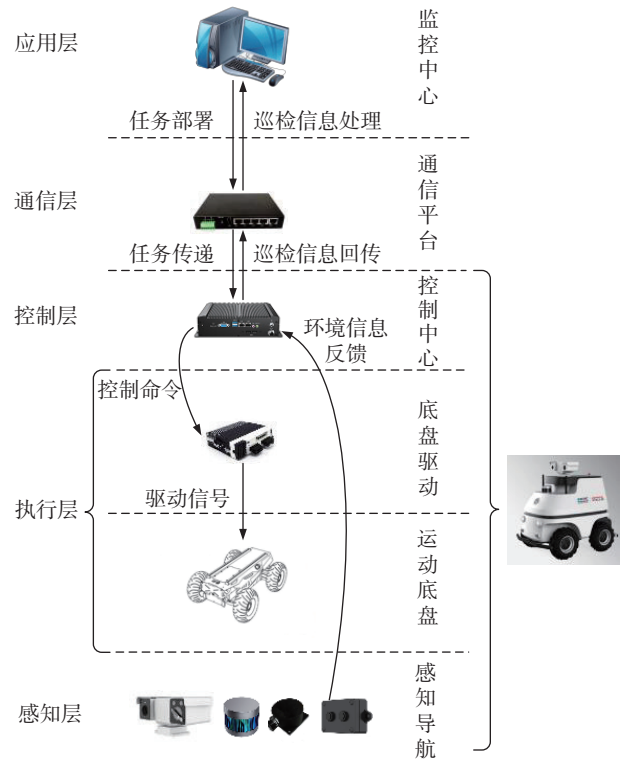


图 1 巡检系统硬件结构

Fig. 1 Hardware structure of patrol inspection system

远方与就地人员实时沟通的问题。

自主充电功能及其稳定性指标是衡量机器人是否实现自主工作的重要参数^[11]。本套巡检系统的充电桩结构如图 2 所示,充电桩对接口安装有可前后伸缩的弹簧装置,同时两电极片可左右摆动,为自主充电提供更大的误差容忍度。

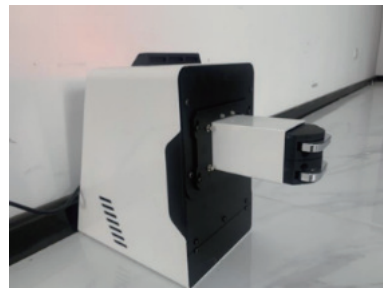


图 2 充电桩

Fig. 2 Charging pile

为保障自主充电能够顺利进行,将自主充电功能集合至机器人导航定位中,机器人亏电时可自主运动至充电点,如图 3 所示。机器人底盘后端的充电电极与充电桩电极对接成功后,完成充电任务。

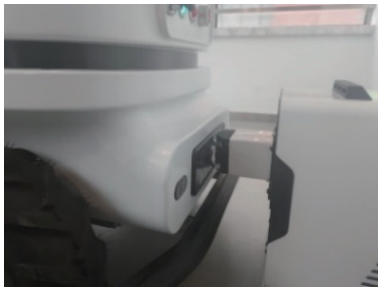


图 3 充电对接
Fig. 3 Charging connection

设备检修需要远方操作人员与就地人员之间进行有效的沟通,因此巡检系统上还设置有拾音器和扩音器,保障了远方与就地操作人员之间交互性的同时,还能够将巡检任务点的设备声音实时无失真上传监控中心,用于后台分析与展示。

以上为系统硬件设计方案,图 4 展示了巡检机器人的全貌。



图 4 巡检机器人实物图
Fig. 4 Picture of patrol inspection robot

2.2 巡检系统软件设计

巡检系统硬件设计完成后,由软件进一步整合

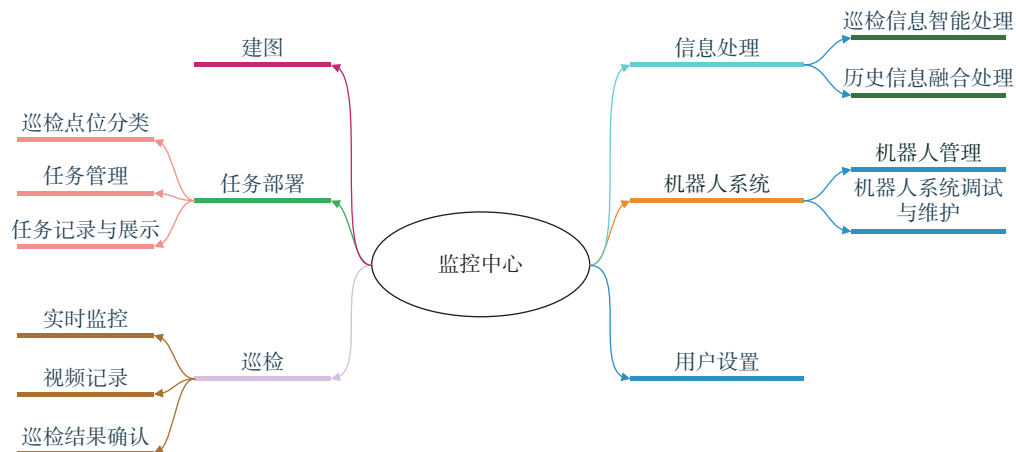


图 5 巡检系统软件组成
Fig. 5 Composition of patrol inspection system software

系统的各项功能,提供一个友好直观、操作方便的人机交互平台。

依据巡检系统硬件设计和巡检任务需求,软件系统可分为 6 个方面,包含建图、任务部署、巡检、信息处理、机器人系统、用户设置。图 5 展示了巡检系统软件的结构关系以及各自的子项功能。交互平台的建立,使得厂区工作人员在巡检系统监控中心就可以直观地了解厂区机器人的实时位置、工作与空闲的机器人数量、每台机器人的巡检场域和巡检点位以及设备异常警告等信息。

除此之外,我们将手机、操作手柄与机器人结合在一起,称之为“Robot Pilot”。这一举措改变了目前需要工作人员采用笔记本电脑跟随其后的操作方式,使得任务部署可以轻松进行,如图 6 所示。从图中可以看到,“Robot Pilot”主界面由地图、可见光视频、红外视频三者构成,并且可以在三者中任意切换。右下角为任务部署工具栏,包含了建图、任务点标记、区域规划等一系列部署工具。“Robot Pilot”类似于无人机的操纵方式,大幅度提升了人机交互平台的易用性。

3 巡检任务部署与执行

3.1 厂区地图构建

在一个未知厂区环境下部署自主巡检系统时,首先需要由移动机器人获得厂区的地图信息,这一过程被称作定位与同步建图技术,简称 SLAM,原理如图 7 所示。SLAM 技术是通过已知信息推测未知



图 6 Robot Pilot
Fig. 6 Robot Pilot

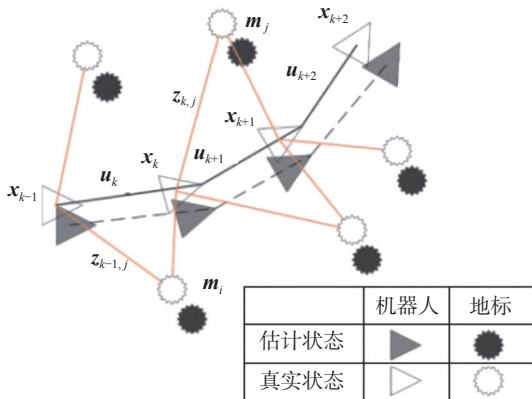


图 7 SLAM 原理示意图
Fig. 7 Schematic diagram of SLAM principle

信息,在 SLAM 过程中,已知信息为激光雷达观测到的地标信息和机器人运动过程中的控制信息,未知信息便是机器人所处的位置和周围环境的地图。这样就形成了 4 组参数,其中 k 表示时刻^[12]:

- 1) 移动过程中激光雷达对地标的观测集合 Z_k 。
- 2) 驱使机器人移动的控制量集合 U_k 。
- 3) 待估计的机器人位姿集合 X_k 。
- 4) 待估计的地标位置集合 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$, 其中 m_n 表示第 n 个地标在地图中的位置。

SLAM 就是根据 Z_k 和 U_k 估计 X_k 和 M 的过程。机器人从人为设定的起点处开始移动,在运动过程中利用激光雷达重复观测到的环境特征定位自身位置和姿态,同时根据自身位置构建周围环境的增量式地图。

目前主流的激光 SLAM 算法有 Gmapping、Hector、Karto、Cartographer 等^[13]。其中 Gmapping 算法已经集成在 ROS (Robot Operating System) 中,广泛应用

于轮式移动机器人。但是在电力巡检作业中,这种算法有 3 个巨大的缺点:

1) 该算法严重依赖里程计,无法适应地面不平坦的区域,当机器人在室外非铺装路面上运动时,如果轮子因打滑发生空转,机器人所依赖的地图将会受到影响。

2) 无回环检测,在构建大场景地图时容易受到累积误差的影响,在回环闭合时可能会造成地图错位。

3) Gmapping 算法是一种粒子滤波算法,随着地图变得越来越大,所需内存和计算量都会大幅增加,这导致该算法并不能被用来构建大场景地图。

以上 3 点问题使得机器人在不同环境中的适用性受到影响,因此我们区别于其他巡检机器人,采用了 Cartographer 算法。

Cartographer 是 Google 推出的一套基于图优化的 SLAM 算法,非常适合于商业应用和再开发。此算法用在电力巡检中有 4 个显著的优势:

1) Cartographer 算法不同于 Gmapping 算法,无需与里程计紧耦合,只通过激光雷达就可以建图,解决了机器人在室外非铺装路面上的使用问题。

2) 在建立大场景地图时,可以实现较低的计算资源消耗,达到实时 SLAM 的目的,很适合嵌入式端的使用。

3) 引入了子图的概念,使前端匹配建立在当前帧与当前创建的子图之上,有效的避免了建图过程中环境中移动物体的干扰。

4) 采用了回环检测,并利用分支定界算法进行优化搜索,提高效率,达到实时回环的作用。

当机器人遍历厂区后,即可获得完整的厂区地图。在后续巡检任务的执行过程中,如遇厂区环境变化,机器人将会对地图进行不断更新。

除了厂区的地图信息以外,我们还需要知道待巡检设备的位置,才可以进行任务的部署。我们在地图建立过程中,记录机器人、采集相机与每个待巡检设备相关联的位姿,将此位姿作为对应设备的位置信息,确定所有的巡检点位。地图建成之后,在地图上设定巡检信息,包括待巡检区域、待巡检设备所属类型、待巡检设备正常阈值、禁止驶入区域等,完成厂区地图的构建。

3.2 任务部署

针对不同的巡检需求, 在所有巡检点位中选取特定的点位, 编制成不同的巡检任务, 如全面巡检、例行巡检、专项巡检、特殊巡检等, 储存在监控中心。在巡检任务的编制过程中, 我们充分考虑了巡检作业过程中会遇到的各种情况, 使得系统的完备性得到保障。当进行某项巡检任务时, 通过 5G 通信平台将任务下发至巡检机器人, 机器人对任务信息进一步细化后开始当次巡检作业。

3.3 任务执行

机器人巡检任务的执行过程中面临着 3 个问题:

- 1) 明确起点及各个任务点的位置关系。
- 2) 运动过程中规避障碍物。
- 3) 尽可能地做到路径上的优化。

为了实现巡检路径的快速规划以及巡检过程中的实时避障, 我们选用 A^* 算法在现有厂区地图上做全局路径规划^[14]: 机器人在出发之前, 将起点的位姿与任务点的位姿进行坐标转换, 得知起点与任务点的位置关系, 进一步结合周围的环境信息, 在所生成的路径中选择一条最优路径作为巡检路径。并选用动态窗口法(DWA 算法)进行局部的路径规划^[15-16], 在任务的执行过程中, 对墙体、柱体、桌椅等物体进行识别, 实时躲避移动的人或物, 保证局部路径靠近全局路径、完成避障任务、朝向目标快速运动。综上所述, 机器人巡检路径规划如图 8 所示。全局路径规划与局部路径规划协作的方式, 使机器人得以更好地规划巡检路径, 为巡检任务的执行提供更优的适应性。

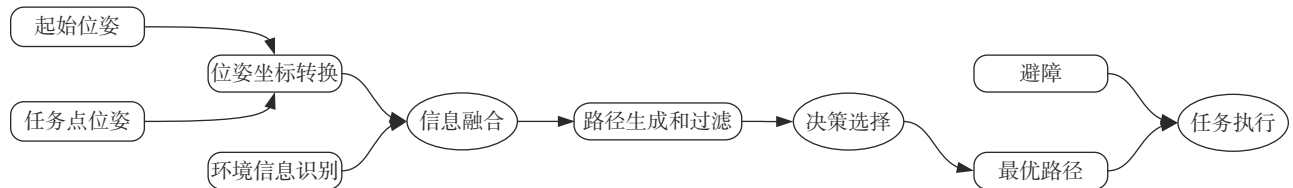


图 8 巡检路径规划

Fig. 8 Patrol inspection path planning

机器人巡检任务执行过程如图 9 所示。在每个巡检点位, 机器人利用机身装备的热成像双光谱相机对设备表盘和状态灯等信息进行采集, 通过 5G 通信平台将采集到的设备信息实时回传至监控中心, 并由监控中心进行分析, 判断当前设备运行是否正常。

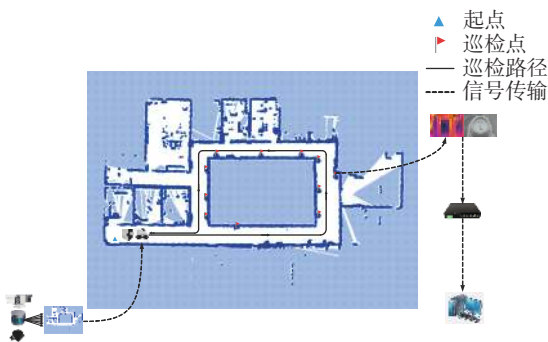


图 9 巡检任务执行过程

Fig. 9 Patrol inspection task execution process

4 巡检结果分析

监控中心接收到机器人回传的原始图像后, 不能直接显示巡检结果, 不利于大批量的数据判断,

因此我们为自主巡检系统提供了一套完善的识别方案, 针对不同形式的设备采用不同的处理方式, 提取其中的有用信息^[17-18], 完成对图像信息的识别。信息提取过程如图 10 所示。

对于指针式仪表, 我们首先对原始图像去噪增强, 并进行二值化处理, 突出原始图像中的有用信息。若拍摄角度产生倾斜, 我们还将进一步对图像进行倾斜矫正, 消除拍摄角度带来的影响, 如图 11 所示。

一般情况下, 指针式表盘的刻度均匀分布, 因此我们采用角度拟合的方式识别指针读数, 如图 12 所示。

记表盘最小值、最大值所在位置分别为 P_1 、 P_2 , 表针旋转轴所在位置为 P_3 , 表针方向所在的线段为 L_1 , L_2 和 L_3 分别为 P_1 与 P_3 、 P_2 与 P_3 的连线。 L_2 和 L_3 的夹角 α 以及 L_1 和 L_2 的夹角 β 可以轻松获得。这样, 表盘的读数问题就转变为表针指向的识别问题, 只要表针指向识别准确, 表盘读数 V 可通过式(1)计算得到:

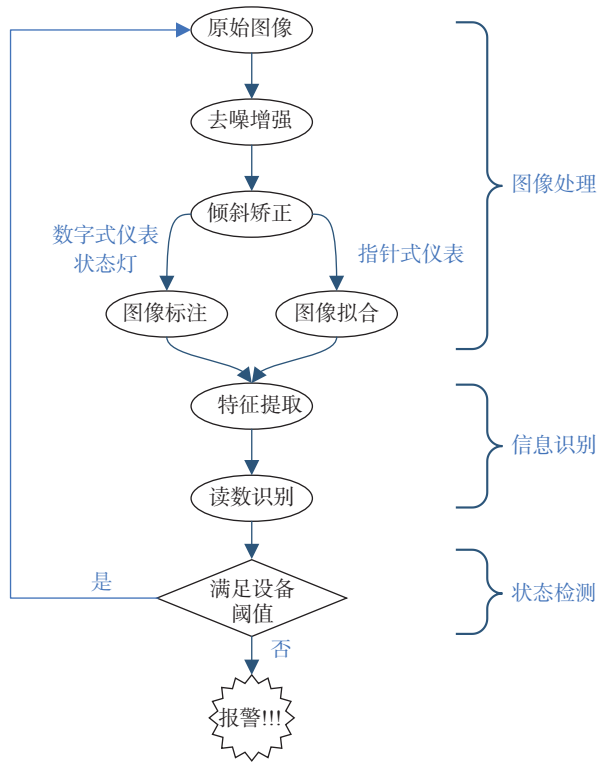


图 10 巡检结果分析

Fig. 10 Analysis of patrol inspection results

$$V = V_{\min} + \frac{\beta}{\alpha}(V_{\max} - V_{\min}) \quad (1)$$

式中:

V_{\min} 、 V_{\max} ——仪表量程的最小值和最大值。

若表盘刻度之间呈现倍数的增长关系时,此方法仍然具有适用性,表盘读数 V 可通过式(2)计算得到:

$$V = M^{V_{\min} + \frac{\beta}{\alpha}(V_{\max} - V_{\min})} \quad (2)$$

式中:

M ——刻度之间的倍数。

对于数字式仪表,我们训练了一个卷积循环神经网络对其读数进行识别。卷积循环神经网络,是目前较为流行的图文识别模型,此方法对不定长的文本序列进行识别时,不必先对单个文字进行切割,而是将文本识别转化为时序依赖的序列学习问题,就是基于图像的序列识别。

图 13 以英文单词“STATE”为例展示了卷积循环神经网络对文字的识别过程^[19]。图像输入至神经网络后,首先使用卷积网络提取文本特征,随后利用深度双向 LSTM 网络对特征向量进行融合,提取字

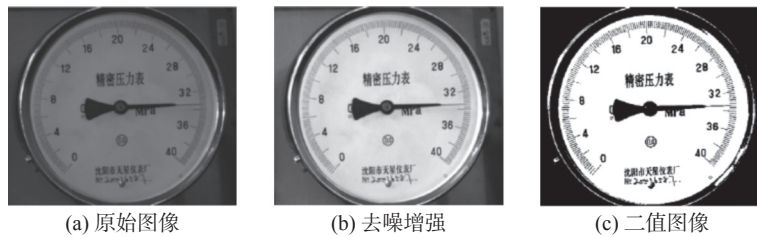


图 11 指针仪表图像处理

Fig. 11 Image processing of pointer meter

符序列的上下文特征,得到每列特征的概率分布,最后通过转录层进行预测得到最终的文本序列。

此外,我们还对阀门和带灯按钮的开关状态进行了识别。监控中心获得实际仪表读数和阀门、按钮的开关状态后,将其与设备阈值进行比对。当设备状态发生变化,如漏水、漏油、温度异常、设备附件变化时,发生异常报警并自动定位异常发生地点。操作人员可对异常信息进行审核确认,快速明确设备存在的问题,为电厂安全稳定运行提供保障。

巡检任务完成后将会生成当次的巡检报告,并储存在监控中心,供操作人员浏览确认。监控中心可对历次的巡检数据进行分析,衡量设备在一段时

间的运行状态,从而判断相应时间内设备运行是否正常。为专业人员全面掌握锅炉房、汽机房、升压站、辅助车间的运行状态提供可靠的依据。

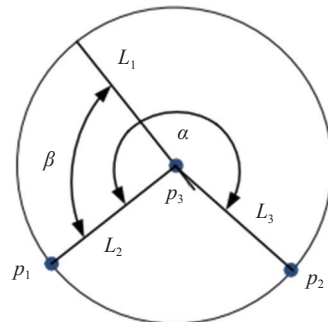


图 12 指针表盘角度拟合

Fig. 12 Angle fitting of pointer dial

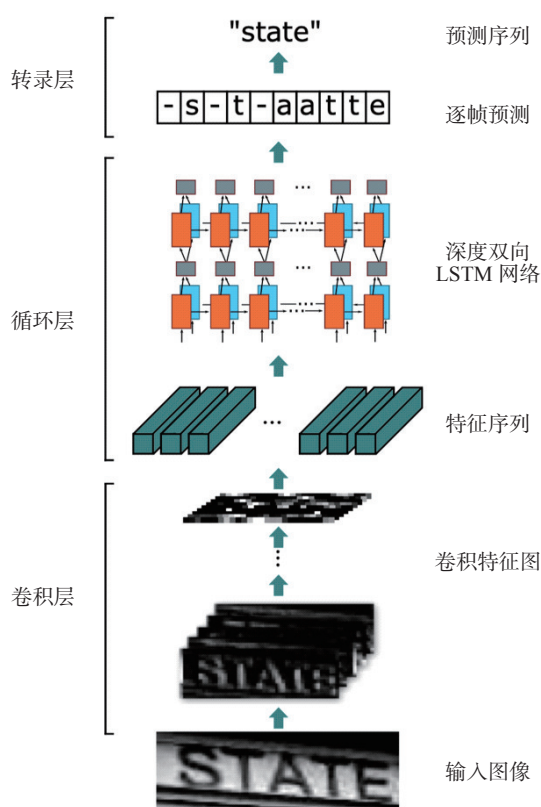


图 13 卷积循环神经网络识别过程

Fig. 13 Recognition process of convolutional recurrent neural network

5 结论

本文对机器人自主巡检系统进行了研究,从设计思路出发,引出巡检系统的设计方案,并对巡检任务的部署和执行进行详细描述,此项研究为电厂的巡检任务提供了可靠的技术,为巡检频次和质量的提升提供了有力的保障。此外,随着近几年计算机视觉领域的迅猛发展,视觉定位技术愈发成熟^[20],在保证系统可靠性的前提下,可进一步考虑使用视觉定位技术代替激光雷达定位,降低巡检系统的部署成本,提升机器人自主巡检系统的竞争力。

参考文献:

- [1] 黄山, 吴振升, 任志刚, 等. 电力智能巡检机器人研究综述 [J]. 电测与仪表, 2020, 57(2): 26-38. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2020.002.005.
HUANG S, WU Z S, REN Z G, et al. Review of electric power intelligent inspection robot [J]. *Electrical measurement & instrumentation*, 2020, 57(2): 26-38. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2020.002.005.
- [2] 郑师应, 李源, 杨博涵, 等. 5G+行业现场网技术与产业发展综

述 [J]. *电信科学*, 2022, 38(增刊1): 17-27. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022104.

ZHENG S Y, LI Y, YANG B H, et al. Technology evolution and industry development of 5G+ industrial proximity network [J]. *Telecommunications science*, 2022, 38(Suppl. 1): 17-27. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022104.

- [3] 刘智勇, 赵晓丹, 祁宏昌, 等. 新时代无人机电力巡检技术展望 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(4): 1-5. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.001.

LIU Z Y, ZHAO X D, QI H C, et al. Prospect of UAV power inspection technology in new era [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(4): 1-5. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.001.

- [4] 孙全, 薛菲. 基于机载激光LiDAR的电网巡检应用研究 [J]. *南方能源建设*, 2018, 5(3): 133-139. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.022.

SUN T, XUE F. Research and application of power grid inspection based on airborne LiDAR system [J]. *Southern energy construction*, 2018, 5(3): 133-139. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.022.

- [5] 张雪焱, 伦振坚, 侯婷, 等. ±800 kV柔直换流站全封闭阀厅智能巡检系统研究 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(4): 144-151. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.023.

ZHANG X Y, LUN Z J, HOU T, et al. Research on intelligent inspection system in enclosed valve hall of ±800 kV VSC-HVDC converter station [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(4): 144-151. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.023.

- [6] 尚文静. 智慧电厂建设管理平台的设计与思考 [J]. *中国新通信*, 2022, 24(13): 28-30. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4866.2022.13.011.

SHANG W J. Design and consideration of the construction management platform for smart power plants [J]. *China new telecommunications*, 2022, 24(13): 28-30. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4866.2022.13.011.

- [7] 张燕东, 田磊, 李茂清, 等. 智能巡检机器人系统在火力发电行业的应用研发及示范 [J]. *中国电力*, 2017, 50(10): 1-7. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.201706125.

ZHANG Y D, TIAN L, LI M Q, et al. Application and development of intelligent inspection robot system in thermal power plant [J]. *Electric power*, 2017, 50(10): 1-7. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.201706125.

- [8] 黎睿. 面向电力巡检机器人的SLAM算法研究与系统设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

LI R. Research and system design of SLAM algorithm for power inspection robot [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

- [9] 邓爱林, 冯钢, 刘梦婕. 5G+工业互联网的关键技术与发展趋势 [J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2022, 34(6): 967-975. DOI: 10.3979/j.issn.1673-825X.202106020189.

DENG A L, FENG G, LIU M J. Key technologies and development trends in 5G+ industrial internet [J]. *Journal of Chongqing University of posts and telecommunications (natural science edition)*, 2022, 34(6): 967-975. DOI: 10.3979/j.issn.1673-825X.202106020189.

- [10] 吴建清, 宋修广. 同步定位与建图技术发展综述 [J]. *山东大学*

- 学报(工学版), 2021, 51(5): 16-31. DOI: 10.6040/j.issn.1672-3961.0.2021.168.
- WU J Q, SONG X G. Review on development of simultaneous localization and mapping technology [J]. *Journal of Shandong University (engineering science)*, 2021, 51(5): 16-31. DOI: 10.6040/j.issn.1672-3961.0.2021.168.
- [11] 吴功平, 杨智勇, 王伟, 等. 巡检机器人自主充电对接控制方法 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, 48(7): 123-129. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.07.020.
- WU G P, YANG Z Y, WANG W, et al. On auto-docking charging control method for the inspection robot [J]. *Journal of Harbin institute of technology*, 2016, 48(7): 123-129. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.07.020.
- [12] 毛军, 付浩, 褚超群, 等. 惯性/视觉/激光雷达SLAM技术综述 [J]. *导航定位与授时*, 2022, 9(4): 17-30. DOI: 10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.04.003.
- MAO J, FU H, CHU C Q, et al. A review of simultaneous localization and mapping based on inertial-visual-lidar fusion [J]. *Navigation positioning and timing*, 2022, 9(4): 17-30. DOI: 10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.04.003.
- [13] 田野, 陈宏巍, 王法胜, 等. 室内移动机器人的SLAM算法综述 [J]. *计算机科学*, 2021, 48(9): 223-234. DOI: 10.11896/jsjcx.200700152.
- TIAN Y, CHEN H W, WANG F S, et al. Overview of SLAM algorithms for mobile robots [J]. *Computer science*, 2021, 48(9): 223-234. DOI: 10.11896/jsjcx.200700152.
- [14] 李晓旭, 马兴录, 王先鹏. 移动机器人路径规划算法综述 [J]. *计算机测量与控制*, 2022, 30(7): 9-19. DOI: 10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2022.07.002.
- LI X X, MA X L, WANG X P. A survey of path planning algorithms for mobile robots [J]. *Computer measurement & control*, 2022, 30(7): 9-19. DOI: 10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2022.07.002.
- [15] 詹京昊, 黄宜庆. 融合安全A*算法与动态窗口法的机器人路径规划 [J]. *计算机工程*, 2022, 48(9): 105-112,120. DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0062264.
- ZHAN J W, HUANG Y Q. Path planning of robot combing safety A* algorithm and dynamic window approach [J]. *Computer engineering*, 2022, 48(9): 105-112,120. DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0062264.
- [16] 姚进鑫, 刘丽桑, 何栋炜, 等. 融合优化A*算法与动态窗口法的动态路径规划算法研究 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2022, 36(7): 197-207. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.07.025.
- YAO J X, LIU L S, HE D W, et al. Research on dynamic path planning algorithm based on optimized A* algorithm and dynamic window approach [J]. *Journal of Chongqing University of technology (natural science)*, 2022, 36(7): 197-207. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.07.025.
- [17] 宋国栋. 煤矿电力巡检机器人设备在线识别方法研究与实践 [J]. *煤炭科技*, 2022, 43(1): 100-104. DOI: 10.19896/j.cnki.mtkj.2022.01.020.
- SONG G D. Research and practice on online identification method of coal mine electric inspection robot equipment [J]. *Coal science & technology magazine*, 2022, 43(1): 100-104. DOI: 10.19896/j.cnki.mtkj.2022.01.020.
- [18] 张文杰. 基于图像配准与视觉显著性检测的指针仪表识别研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- ZHANG W J. Pointer meter recognition via image registration and visual saliency detection [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [19] SHI B G, BAI X, YAO C. An end-to-end trainable neural network for image-based sequence recognition and its application to scene text recognition [J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2017, 39(11): 2298-2304. DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2646371.
- [20] 权美香. 基于多传感器信息融合的单目视觉SLAM算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2021.000085.
- QUAN M X. Research on multi-sensor information fusion based monocular visual slam algorithm [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2021.000085.

作者简介:



田华

田华(通信作者)

1997-, 男, 控制理论与控制工程专业工学硕士, 主要从事自动化系统研究及设计工作(e-mail)tianhua@nwepdi.com。

张玮

1975-, 女, 高级工程师, 计算机应用专业工程硕士, 主要从事信息化智能化领域的研究与管理工作。

冯斌

1993-, 男, 助理工程师, 主要从事发电工程自动化系统研究及设计工作(e-mail)fengbina@nwepdi.com。

王伟

1980-, 女, 满族, 高级工程师, 工程硕士, 主要从事光热电站控制领域的设计与研究(工作)(e-mail>wangweid@nwepdi.com。

孟晓伟

1971-, 男, 教授级高级工程师, 主要从事光热电站控制领域的设计与研究(工作)。

仇韬

1979-, 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事自动化、信息化、智能化领域的设计与研究(工作)(e-mail>qiutao@nwepdi.com。

(编辑 赵琪)