

智能巡检机器人在自然环境试验中的应用探讨

黄伦¹, 朱玉琴¹, 舒畅¹, 周俊炎¹, 代璐¹, 张志豪¹, 何德洪²

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039;

2.江津大气环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站, 重庆 402260)

摘要: **目的** 探索建立自然环境试验智能巡检系统, 使用机器人替代部分人工巡检工作。**方法** 通过分析巡检作业环境和巡检任务, 确定智能巡检机器人的功能要求和技术参数, 进而开展机器人本体结构设计, 融合控制后台、远程数据库等设备, 实现智能巡检系统构建。**结果** 开展了智能巡检数据采集的使用验证, 巡检机器人采集的样品图像对焦清晰、分辨率高, 样品在图像中的位置大小合理, 腐蚀特征展示清楚。巡检系统可对样品图像进行自动分割和智能识别, 对蚀点、流痕等损伤特征识别准确, 精度可达0.1%。**结论** 智能巡检系统可以满足自然环境试验的巡检要求, 替代人工完成部分巡检工作, 智能巡检数据便于入库和使用挖掘, 对于自然环境试验的数字化转型有积极的推动作用。

关键词: 智能巡检; 机器人; 环境试验; 图像识别; 数据采集; 数字化

中图分类号: TP249

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)01-0121-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.01.016

Discussion on Application of Intelligent Inspection Robots in Natural Environment Experiments

HUANG Lun¹, ZHU Yuqin¹, SHU Chang¹, ZHOU Junyan¹, DAI Lu¹, ZHANG Zhihao¹, HE Dehong²

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. Jiangjin Atmospheric Material Corrosion Field National Observation and Research Station, Chongqing 402260, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the establishment of an intelligent inspection system for natural environment experiments, replace some manual inspection work with robots. By analyzing the inspection work environment and inspection tasks, the functional requirements and technical parameters of the intelligent inspection robot were determined, and then the robot body structure design was carried out, integrating control backend, remote database and other equipment to achieve the construction of an intelligent inspection system. The use of intelligent inspection data collection was verified. The sample images collected by the inspection robot have clear focus, high resolution, reasonable position and size of the samples in the images, and clear display of corrosion characteristics. The inspection system could automatically segment and intelligently recognize sample images, and accurately identify damage features such as corrosion points and flow

收稿日期: 2023-11-08; 修订日期: 2023-12-01

Received: 2023-11-08; Revised: 2023-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(U22A201106-1); 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2022TIAD-CUX0015-1)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (U22A201106-1); Special Key Project for Technological Innovation and Application Development in Chongqing (U22A201106-1) (ZJP-PY-H2022-121)

引文格式: 黄伦, 朱玉琴, 舒畅, 等. 智能巡检机器人在自然环境试验中的应用探讨[J]. 装备环境工程, 2024, 21(1): 121-126.

HUANG Lun, ZHU Yuqin, SHU Chang, et al. Discussion on Application of Intelligent Inspection Robots in Natural Environment Experiments, 2024, 21(1): 121-126.

*通信作者 (Corresponding author)

marks, with an accuracy of up to 0.1%. The intelligent inspection system can meet the inspection requirements of natural environment experiments, and replace manual completion of some inspection work. The intelligent inspection data is easy to store and use for mining. It has a positive promoting effect on the digital transformation of natural environment experiments.

KEY WORDS: intelligent inspection; robot; environmental test; image recognition; data collection; digitization

自然环境试验是考核装备环境适应性的重要环节^[1-2],对于提升装备的服役安全性有着重要意义^[3-5]。但是,在环境试验逐步实现数字化转型,向智能化发展的当下^[6-7],自然环境试验的日常巡检仍要依靠人工巡检的方式,鲜有关于使用智能巡检系统的研究^[8-9]。人工巡检存在着工作量大、巡检频率低、可追溯性差等局限性^[10]。此外,为了使大气环境材料腐蚀试验站的大气环境具有足够的代表性,试验站通常建立在沙漠、高原、海岛等典型气候环境区域^[11-12]。这些区域远离城市,条件艰苦,部分试验站无法实现人员常年驻守。基于此,仅仅依靠人工巡检,很难满足装备考核对自然环境试验日益提高的要求^[13-16]。随着机器人技术的发展,电网、油气等行业已经将巡检机器人应用于设备、线路、安全等巡检领域,使用巡检机器人代替了大量的人工巡检工作^[17-23]。根据国家电网的统计数据,2016年底,应用于国网35 kV及以上变电站的智能巡检机器人数量共计893台,大幅减少了巡检人员的工作量^[24]。2018年中国石油首台巡检机器人在长庆油田采气四场使用,实现了气、声、光3项数据收集和各类危害风险的自动化预警^[25]。2021年,国家能源局批复成立了能源行业电网设备智能巡检标准化技术委员会,推动电网智能巡检向标准化发展。这些案例为探索在自然环境试验领域引入智能巡检系统提供了参考。

本文从大气自然环境试验的日常巡检需求出发,以江津大气环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站(以下简称江津试验站)为应用场景,分析了在自然环境试验中使用智能巡检机器人的可行性,探索构建自然环境试验智能巡检系统,并提出了巡检采集数据的自动分析和管理工作方法,希望能为自然环境试验的数字化和智能化发展提供一些启发和参考。

1 自然环境试验中智能巡检的可行性分析

1.1 巡检作业环境分析

江津试验站位于重庆市江津区,属于典型的亚湿热工业大气环境,2019年的年平均气温18.5℃,年平均相对湿度86%,年日照时数937 h,0度角总辐射量约3 600 MJ/m²,年降雨量约750 mm,雨水中pH低至4.6。智能巡检作业区域为江津试验站户外暴露场(见图1),机器人行走路线为办公楼至暴露试验场,暴露场内每个试验架依次巡检完毕后返回办公

楼。其中,办公楼至暴露场为水泥路面,暴露场为泥土地,长有杂草,部分区域凹凸不平,雨后有积水。因此,机器人的通过性、防水性和续航能力是必须考虑的因素。按照GJB 8893.2—2017《军用装备自然环境试验方法 第2部分:户外大气自然环境试验》的要求,使用高低杠式试验架开展自然环境试验,其中低杠高度为500 mm,高杠为1 280 mm,斜面倾角为45°。试验架左下角悬挂金属标牌,巡检作业时可根据标牌上的数字编号进行试验架的定位。

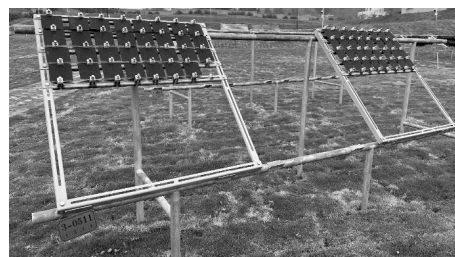


图1 户外暴露场及试验架
Fig.1 Outdoor exposure field and testing frame

1.2 巡检任务分析

自然环境试验的巡检任务对于确保试验的准确性和可靠性十分重要,巡检内容主要包括设备巡检、样品观察、试验状态检查和安全检查。

设备检查:定期检查试验设备的运行情况,包括自动气象站、各类传感器和环境试验设备等。确保设备正常工作,并在发现问题后报告异常信息,方便工作人员进行设备异常状态判断和维护维修。

样品观察:按照试验大纲的规定,定期观察试验样品的变化情况,包括颜色、形状、表面状态、腐蚀损伤等。记录样品的变化过程,并将数据存储到指定位置,以此进行试验样品的腐蚀变化分析和环境适应性评估。

试验状态检查:日常巡视试验场,观察是否存在样品掉落,异物遮挡等异常情况,确保试验正常开展,保证试验数据的准确性和可靠性。

安全检查:检查试验场设施设备是否存在积水、漏电、起火等安全隐患,进行安全事故预警,确保试验过程的安全性。

1.3 智能巡检机器人功能要求

根据以上巡检作业环境和任务分析,本文设计的智能巡检机器人具备以下功能:

1) 巡检功能。机器人具有多种巡检方式,包括

定时定点巡检、遥控巡检、临时任务巡检等。

2) 机器视觉图像识别功能。巡检机器人具有数字识别、样品分割与识别功能。数字识别是指根据机器视觉读取试验架标牌的数字编号, 进行试验架定位。样品分割与识别是指将试验架上固定的若干样品单独分割出来, 并根据样品在试验架上所处的行列位置, 对照后台的样品排布和编号数据, 将每个样品与编号一一对应。

3) 环境试验数据分析与管理功能。智能巡检系统中嵌入腐蚀损伤智能图像识别软件, 在后台对巡检的样品图像数据进行智能识别。开发数据管理模块, 将原始数据和识别出的材质、腐蚀类型、腐蚀面积、评级等信息进行规范化管理。

4) 状态自检功能。机器人配备独立的状态自检系统, 可实现对电源、电机驱动状态、通信状态、机器人自身搭载的检测设备模块的实时自检功能。

5) 防护功能。机器人的防护功能包括防水和安全防护功能。

6) 自主充电功能。机器人在完成任务的停放时间可在规定位置进行自主充电。

2 自然环境试验智能巡检系统的初步构建

2.1 总体架构

自然环境试验智能巡检系统主要由巡检机器人、本地后台和远程数据库组成, 如图 2 所示。巡检机器人通过局域网与本地后台进行数据、信息等交互, 搭载高清摄像头、传感器等设备, 在设定试验区域开展巡视、数据采集等工作。本地后台下发控制、巡检任务等指令, 并将机器人巡视、采集的数据文件等上传至本地后台。本地后台对采集的数据进行智能分析, 形成巡检结果与智能识别评价报告, 然后通过专用网络将数据文件传输至远程数据库, 由远程数据库实现数据的存储和管理。

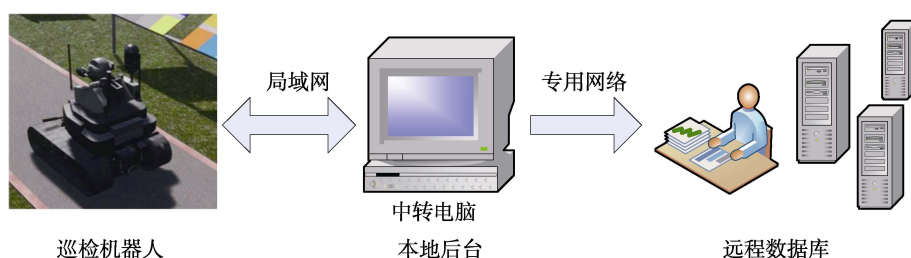


图 2 自然环境试验智能巡检系统

Fig.2 Intelligent inspection system for natural environment testing

2.2 机器人本体设计

针对自然环境试验巡检场景, 本文设计了一种履带式智能巡检机器人系统, 如图 3 所示。该机器人系统包括运动底盘、导航传感器、双目相机、机械手臂、驱动电机、电池和避震器等部件。机器人运动底盘优选履带式底盘, 可适应自然环境试验外场的泥土地面, 并具有 30°斜坡的爬坡能力。双目相机具有光学变焦镜头, 同时具有拍照和摄像功能, 具有智能对焦能力, 其分辨率不低于 1 000 万像素。导航传感器搭载激光雷达、北斗卫星定位导航, 精度优于 ± 0.2 m。电机电池根据不同地区自然环境试验场的使用条件进行选配, 但应满足额定功率下正常使用 3 h 的要求。

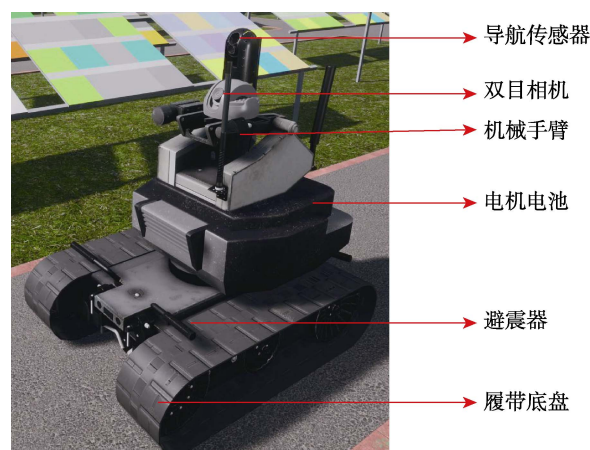


图 3 机器人整体设计示意图

Fig.3 Schematic diagram for overall design of robot

3 自然环境试验智能巡检系统使用验证

3.1 环境效应表现损伤识别方法

GB/T 6461—2002《金属基体上金属和其他无机覆盖层经腐蚀后的试样和试件的评级》提供了一种基于肉眼目视识别腐蚀损伤的方法。在此基础上, 本文

以机器视觉技术为支撑, 将腐蚀损伤特征进行数字化处理, 初步实现了基于智能巡检系统的环境效应表现损伤智能识别。环境试验中需识别的内容主要包括损伤类型、损伤面积和损伤缺陷尺寸。其中, 损伤尺寸的识别通过机器人搭载的高清双目相机实现, 通过双目视觉系统 2 个眼的视差, 建立空间映射关系, 从而获取目标深度信息, 辅助机器人位移和姿态调整。双

目视觉原理如图4所示,其中 Q_1 和 Q_2 为双目相机2个眼的焦点,点 P 为拍摄目标所在位置, f 为相机焦距。点 P 在相机2个眼的成像平面上所映射的点分别为 p_1 和 p_r ,双目相机的2个眼的 y 轴重合。通过几何关系换算可知 P 点的 z 轴坐标为:

$$P_z = \frac{|Q_2 - Q_1|}{|p_r - p_1|} \times f$$

其中, $|Q_2 - Q_1|$ 为双目相机两眼之间的距离,是一个常数;焦距 f 和 $|p_r - p_1|$ 可直接通过后台读出。如此,即可计算出 P 点的深度信息,通过计算损伤缺陷两端的深度差,即可获得缺陷的尺寸信息。

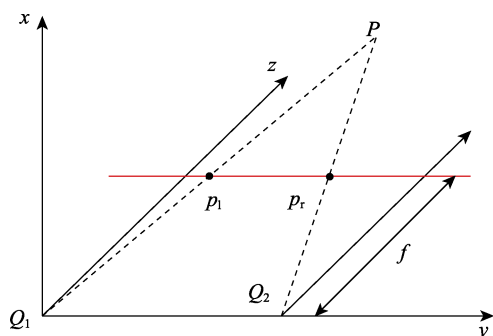


图4 双目视觉原理

Fig.4 Schematic diagram of binocular vision

损伤类型和损伤面积信息由环境效应表观损伤识别模型进行计算。首先,利用智能巡检机器人对试样在不同环境条件下的表观损伤进行图像采集,标注后建立训练数据集。基于深度学习技术,构建环境效应表观损伤图像识别模型。再利用卷积神经网络(CNN)对环境损伤特征进行特征提取和训练,从而得到环境效应表观损伤识别模型。本文采用环境试验初期获得的小规模样本训练获得的模型识别效果如图5所示。经验证,识别准确率高于70%。

3.2 数据采集与识别实例

自然环境试验环境效应数据采集步骤如下:

1) 系统后台制定数据采集任务,包括采集对象、采集时间。

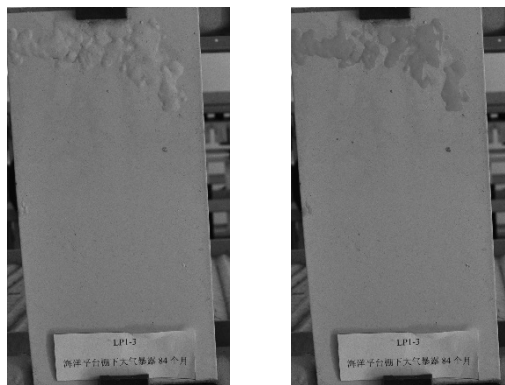


图5 腐蚀损伤智能识别效果

Fig.5 Effect diagram of intelligent identification of corrosion damage

2) 系统通过数据检索,确认采集对象所在的试验架编号及试验架所在的地图位置,并根据后台记录的样品信息表单,确认目标样品在某试验架上的准确坐标。

3) 机器人根据当日巡检任务自动规划合适的路径。

4) 按照路径规划,依次进行图像数据采集。采集信息包括试验架整体图像及对应1组或1个样品的清晰图像。

5) 机器人巡检完成后,返回停放地点,将当次采集的数据保存到指定位置。

分别使用人工拍照和智能巡检机器人2种方式对试验样品进行外观形貌图像采集,其采集效果如图6所示。结果表明,巡检机器人采集的样品外观图像对焦清晰、分辨率高,样品在图像中的位置大小合理,腐蚀损伤形貌展示清楚,满足自然环境试验的巡检要求。同时,机器人内置软件对采集到的一组图像自动进行了样品划分,用方框将样品从背景信息中分割出来,并将每张分割后的图像与后台样品编号进行一一对应。

分割后的样品图像由前述环境效应表观损伤识别模型进行预处理与智能识别评价,此软件采用深度学习算法对巡检图像进行训练学习,达到准确识别的功能。本文所采用的预处理方式主要包括降噪和图像增强,智能识别结果如图7所示,样品的材质为钢,



a 人工采集



b 巡检机器人采集

图6 样品外观图像数据对比

Fig.6 Comparison of sample appearance image data: a) manual collection; b) inspection robot collection



图 7 外观损伤智能识别

Fig.7 Intelligent identification of appearance damage: a)preprocessing images; b) image recognition software; c)intelligent recognition results

损伤类型为蚀点和流痕，其中蚀点面积占比为 13.1%，流痕为 8.3%，损伤程度为中度，综合外观评级为 2 级。通过后台像素级比对，该识别结果符合标准圆点图判定评级。相比于人工巡检目视检测估算评级，机器人智能巡检实现了环境效应损伤识别的量化，且效率大幅提高。由于机器人行走定位误差、气象条件变化等影响，有时会存在样品拍摄不全、反光强烈等质量问题。巡检数据质量的提升优化是后续需要重点开展的研究内容。

识别完毕后，智能巡检系统自动将样品信息、原始图像、分割图像和识别评价数据按规范整编上传至远程数据库。样品信息包括样品名称、编号、试验站试验环境、试验方式、试验时间、试验周期、图像采集时间等。

4 结论

1) 研制了自然环境试验智能巡检系统，该系统可以替代人工完成部分巡检工作，减少人员工作量，大幅提高巡检频率。经初步使用验证，系统设计合理，巡检采集图像数据质量高，满足科研使用要求。

2) 自然环境试验智能巡检系统采用的智能控制、图像智能识别、数据库等技术，可以对高清相机、传感器等采集的信息进行有效融合，利用卷积神经网络构建了具有深度学习功能的环境效应表面损伤智能识别模型，可以实现样品腐蚀损伤的量化智能识别，识别精度达到 0.1%。

3) 相比于人工采集数据，智能巡检数据更加便于入库和使用挖掘，对于自然环境试验的数字化转型有积极的推动作用。

参考文献:

[1] ZHANG B, WANG Y, WAN H X, et al. Actual Xisha Marine Atmospheric Corrosion Behavior of 30CrMnSiA Steel in Different Parts of the Aircraft[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 154: 107684.

[2] CAI S, JI H C, ZHU F Y, et al. Research on the Corrosion Behavior of Q235 Pipeline Steel in an Atmospheric Environment through Experiment[J]. Materials, 2022, 15(18): 6502.

[3] JUHEE Y, DOOYOUL L, SUNGRYUL P, et al. The Effect of Aircraft Parking Environment on Atmospheric Corrosion Severity[J]. Corrosion Science and Technology-Korea, 2021, 20(2): 94-104.

[4] DUBOSE B. Marine Atmospheric Corrosion Takes Toll on U.S. Army Aircraft Hangar[J]. Materials Performance, 2018, 57(3): 14-16.

[5] XIANG L, TAO J Q, XIA X S, et al. Impact of Marine Atmospheric Corrosion on the Microstructure and Tensile Properties of 7075 High-Strength Aluminum Alloy[J]. Materials, 2023, 16(6): 2396.

[6] 宋敬华, 周焕, 陈昱. 装备试验鉴定数字化转型需求分析[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(10): 312-316.

[7] SONG J H, ZHOU H, CHEN Y. Review of Research on Digital Transformation Construction of Equipment Test and Appraisal[J]. Computer Measurement & Control, 2023, 31(10): 312-316.

[8] HASAN I M M, SHAHRIZAN J, AHMAD FAISAL MOHAMAD A, et al. Application of Artificial Intelligence in Marine Corrosion Prediction and Detection[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(2): 256.

[9] JING G Q, QIN X Y, WANG H Y, et al. Developments, Challenges, and Perspectives of Railway Inspection Robots[J]. Automation in Construction, 2022, 138: 104242.

[10] 赵朋飞, 苏晓庆, 张生鹏. 装备自然环境试验工作管理方法探讨[J]. 装备环境工程, 2020, 17(7): 116-121.

ZHAO P F, SU X Q, ZHANG S P. Management Methods of Materiel Natural-Environment Tests[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(7): 116-121.

黄伦, 舒畅, 陈星昊, 等. 一种环境试验样品的标准化图像采集装置研制[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(S1): 312-316.

HUANG L, SHU C, CHEN X H, et al. Development of a Standardized Image Acquisition Device for Environmental Test Samples[J]. Journal of Ordnance Equipment

- Engineering, 2021, 42(S1): 312-316.
- [11] PENG W S, DUAN T G, HOU J, et al. Long-Term Corrosion Behaviour of 1060 Aluminium in Deep-Sea Environment of South China Sea[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2021, 56(4): 327-340.
- [12] 张伦武. 国防大气环境试验站网建设及试验与评价技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- ZHANG L W. The Study for Construction of National Defense Atmospheric Environmental Test Network and Technology of Environmental Test and Worthiness Evaluation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [13] 李赫才, 韦国军, 闫龙. 装甲装备在役考核数据采集研究[J]. 兵工自动化, 2022, 41(2): 14-17.
- LI H C, WEI G J, YAN L. Research on Armored Equipment In-Service Assessment Data Collection[J]. Ordnance Industry Automation, 2022, 41(2): 14-17.
- [14] KE H F. Study on Big Data Development of Test and Evaluation of Weapon and Equipment[J]. Science Discovery, 2016, 4(1): 21.
- [15] WANG D Y, MA C, ZHANG W, et al. Design and Application of a Test System for Ship Platform[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1650(3): 032069.
- [16] XIA R L, JIA C, LIU C Y, et al. Non-Uniform Corrosion Characteristics of the Steel Pipe Pile Exposed to Marine Environments[J]. Ocean Engineering, 2023, 272: 113873.
- [17] YANG L, LI B, FENG J L, et al. Automated Wall-Climbing Robot for Concrete Construction Inspection[J]. Journal of Field Robotics, 2023, 40(1): 110-129.
- [18] LU J H, BADARCH T. Research on the Robot's Intelligent Inspection, Its Target Detection Method[J]. American Journal of Computer Science and Technology, 2022, 5(2): 88.
- [19] YANG Z Y, LIU X, NING C, et al. Research on Speed Control Methods and Energy-Saving for High-Voltage Transmission Line Inspection Robots along Cable Down-hill[J]. Actuators, 2023, 12(9): 352.
- [20] SHEN Y, LI Y, LI Z P. Application of Intelligent Inspection Robot in Coal Mine Industrial Heritage Landscape: Taking Wangshiwa Coal Mine as an Example[J]. Frontiers in Neurorobotics, 2022, 16: 865146.
- [21] WANG Z, WANG Y F, ZHANG B. Development and Experiment of Clamp Type Submarine Cable Inspection Robot[J]. Machines, 2023, 11(6): 627.
- [22] YANG Q, ZHOU J L, MENG H J, et al. Real-Time Marine Target Recognition Method of Underwater Inspection Robot Based on Computer Vision[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2023, 20(5): 136-142.
- [23] LI Y H, FU C G, YANG H, et al. Design of a Closed Pig-gery Environmental Monitoring and Control System Based on a Track Inspection Robot[J]. Agriculture, 2023, 13(8): 1501.
- [24] 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.
- 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.
- [25] 张星, 陈逸, 王立学, 等. 油气行业智能巡检机器人应用现状综述[J]. 中国设备工程, 2021(23): 47-49.
- ZHANG X, CHEN Y, WANG L X, et al. Summary of Application Status of Intelligent Inspection Robot in Oil and Gas Industry[J]. China Plant Engineering, 2021(23): 47-49.