

Summary of Research Status of New Generation Nuclear Power Robot Technology Application

Yan Gao* Lv Tian Shuli Shen

Sinomach Intelligence Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510440, China

Abstract

With the continuous development of nuclear power plant construction and the public's high attention to nuclear safety issues, the application of robotics technology to solve nuclear power plant routine inspection and maintenance, accident emergency handling and other operations has become a hot spot in the development of global robots. The nuclear energy industry has become a strategic industry for the development of the national economy. While nuclear energy benefits mankind, it is accompanied by ionizing radiation and nuclear safety issues that endanger the safety of national life and property. Nuclear power safety has become the focus of worldwide attention. The development of nuclear power equipment inspection and maintenance robots, the application of robot teleoperation technology, and the remote control of robots to replace humans to complete dangerous operations are the main technical approaches to solve nuclear safety issues in countries all over the world.

Keywords

new generation; nuclear power robot; technology application research; development trend

新一代核电机机器人技术应用研究现状综述

高燕* 田吕 申淑丽

国机智能科技有限公司, 中国·广东广州 510440

摘要

随着核电站建设的不断发展和公众对核安全问题的高度关注,应用机器人技术解决核电站日常检测维修、事故应急处理等操作已成为全球机器人发展的热点。核能产业已成为国民经济发展的战略性产业,核能在造福人类的同时,伴随而来的是危害国家生命财产安全的电离辐射和核安全性问题。核电安全已经成为举世瞩目的焦点,开发核电设备检查维护机器人,应用机器人遥操作技术,远程控制机器人代替人类完成危险操作是目前世界各国解决核安全问题的主要技术途径。

关键词

新一代;核电机机器人;技术应用研究;发展趋势

1 引言

轻原子核的融合和重原子核的分裂都能放出能量,分别称为核聚变能和核裂变能,在聚变或者裂变时释放大热量,能量按照“核能—机械能—电能”进行转换,这种电力即可称为核电。

自1951年12月美国实验增殖堆1号(EBR-1)首次利用核能发电以来,世界核电至今已有近70年的发展历史。

1951年,美国建成了世界上第一个核发电装置;1954年月,苏联建成了世界上第一座核电站,电功率为5MW。世界核能年发电量于2006年达到最大值,之后逐步下降,到2010

年出现反弹,显现真正复苏的开始;但2011年发生日本福岛核事故后再次下滑,且下滑速度更快。核电在总发电量中的比重,于1993年达到最高值17%,2012年下降到10%,2013年后世界核电进入平稳状态。

80年代初期,中国政府制订了发展核电的技术路线和技术政策,决定发展压水堆核电厂。采用“以我为主,中外合作”的方针,引进其他国家先进技术,逐步实现设计自主化和设备国产化。

自主设计建造的秦山核电厂300MW压水堆核电机组,于1991年底并网发电,1994年4月投入商业运行。同中国香港合资,从其他国家进口成套设备建造的中国广东大亚湾核电厂,两台930MW压水堆机组,分别于1994年2月1日和

【作者简介】高燕(1982-),硕士,高级工程师,任职于国机智能科技有限公司,从事高分子化学与物理研究。

5月4日投入商业运行。

2 世界核电发展技术指标的划分

纵观核电发展历史,核电站技术方案大致可以分四代。

2.1 第一代

核电站的开发与建设开始于20世纪50年代。1954年,苏联建成电功率为5MW的实验性核电站,1957年,美国建成电功率为90000kW的shipping port原型核电站,这些成就证明了利用核能发电的技术可行性。国际上把上述实验性和原型核电机组称为第一代核电机组。

2.2 第二代

20世纪60年代后期,在实验性和原型核电机组基础上,陆续建成电功率在 3×10^5 kW的压水堆、沸水堆、重水堆、石墨水冷堆等核电机组,它们在进一步证明核能发电技术可行性的同时,使核电的经济性也得以证明。20世纪70年代,因石油涨价引发的能源危机促进了核电的大发展。世界上商业运行的400多座核电机组绝大部分是在这段时期建成的,习惯上称之为第二代核电机组。

2.3 第三代

20世纪90年代,为了解决三里岛和切尔诺贝利核电站的严重事故的负面影响,世界核电业界集中力量对严重事故的预防和缓解进行了研究和攻关,美国和欧洲先后出台了《先进轻水堆用户要求文件》,即URD文件(Utility Requirements Document)和《欧洲用户对轻水堆核电站的要求》,即EUR文件(European Utility Requirements Document),进一步明确了预防与缓解严重事故、提高安全可靠性和改善人因工程等方面的要求。国际上通常把满足URD文件或EUR文件的核电机组称为第三代核电机组。对第三代核电机组要求能在2010年前进行商用建造。

2.4 第四代

2000年1月,在美国能源部的倡议下,美国、英国、瑞士、南非、日本、法国、加拿大、巴西、韩国和阿根廷等十个有意发展核能的国家,联合组成了“第四代国际核能论坛”(GIF),于2001年7月签署了合约,约定共同合作研究开发第四代核能技术。根据设想,第四代核能方案的安全性和经济性将更加优越,废物量极少,无需厂外应急,并具备固有的防止核扩散的能力。高温气冷堆、熔盐堆、钠冷快堆就是具有第四代特点的反应堆。

第一代核电站为原型堆,其目的在于验证核电设计技术和商业开发前景;第二代核电站为技术成熟的商业堆,在运的核电站绝大部分属于第二代核电站;第三代核电站为符合URD或EUR要求的核电站,其安全性和经济性均较第二代有所提高,属于未来发展的主要方向之一;第四代核电站强化了防止核扩散等方面的要求,处在原型堆技术研发阶段。

3 第三代核电技术

第三代核电技术的发展设计主要是针对第二代核电机组发展过程中出现的问题,进行效率提升设计与安全防护设计。第三代核电技术的设计主要有以下两个原则:第一,经济性原则。第二代核电技术推广的过程中,前期投入的资源量过大,导致很多国家在建设商用核电站的过程中,存在资金周转上的困难。同时,核电站产生的电能资源成本较高,不利于大面积商务推广。第二,安全性原则。第三代核电技术的发展要完全符合URD文件、EUR文件的相关管理规定,将安全性与稳定性作为核电站发展建设的主要标准之一,避免核电站在建设过程当中出现核泄漏事故^[1]。

3.1 第三代核电机组的技术发展特征

3.1.1 安全性特点

第三代核电机组具有自预防性质,可以对核电站中的核原料进行一定的安全防护,当出现原料泄露问题时,可以延缓严重事故的发生。经过近10年的技术分析与数据统计,第三代核电机组的堆芯熔化事故概率较低,相较第二代核电机组的堆芯熔化事故概率下降了近千倍。同时,第三代核电机组的放射性释放大大降低,燃料热工安全余量大大上升。上述几种性能的显著提升,保障了第三代核电技术的安全性,使核电站可以在经济上与天然气电站相竞争,降低了商用核电站的电能省成本。

3.1.2 使用寿命长

目前,第三代核电机组的可利用率已经达到了90%,设计寿命在60年左右,建设周期可以控制在50个月以内。第三代核电技术采用非能动安全技术,利用材料的天然物理对流性质,降低材料使用过程当中动力驱动,保障材料使用过程当中安全性。在紧急的环境下,技术人员可以在短时间内对材料进行冷却,并带走堆芯余热,减少余热造成的辐射,进一步提升堆芯的安全性。同时,这种设计也大大简化了核电机组的使用程序,降低了第三代核电机组的建设成本与管理

成本,方便技术人员对出现轻微故障的核电机组进行后期维修^[9]。

3.1.3 容量大

第三代核电机组的单机容量进一步扩大。例如,目前法国轻水堆核电站的单位容量,已经可以达到 $16 \times 10^5 \text{kW}$ 。这一单机容量是第二代核电机组单机容量的 3~4 倍。根据世界范围内第三代核电机组的研究和工程建造经验,可以分析得出,随着技术的进步,第三代核电机组的单机容量还将进一步扩大。例如,欧洲玛法的 UPR 机组电功率为 $17 \times 10^5 \text{kW}$,日本三菱的 21 型压水堆核电机组,功率为 $17 \times 10^5 \text{kW}$,美国和俄罗斯的相关研究组织正在建设当中的核电机组,单机容量也达到了 $17 \times 10^5 \text{kW}$ 。

3.1.4 自动化控制

第三代核电机组在建设与管理的过程中,主要采用自动化的数字控制方式对核电机组的建设进行管理。例如,法国、英国、捷克、日本等多个国家,都采用数字化仪表控制的方式,对正在建设的第三代核电机组进行管理。这种自动化的控制方式,基于工业互联网和大数据技术的发展,技术人员可以采用远程操作的方式,利用计算机电子设备,对机组的建设进行自动化控制、自动化监控和自动化操作。这种方式可以显著减少人为操作的空间,避免由于技术人员错误操作而造成核电站原料的管理不当。目前,自动化控制技术已经广泛应用在中国的核电机组建设与管理当中。

3.1.5 模块化

第三代核电技术的建设与发展,还呈现了明显的模块化特征。技术人员从整体性的角度,考虑新核电机组的设计过程。不断加强核电机组设计建造的预算管理,进行设计方式改变,逐渐提升核电机组运行的稳定性与安全性。技术人员采用装配式的设计与施工,在工厂中预先生产核电机组的构件,在施工现场进行组装,缩短施工的周期,进一步降低施工的成本。

3.2 中国三代核电发展现状

中国已成为少数自主掌握三代核电技术的国家,具备了自主化、批量化、规模化建设三代核电的条件和比较优势。

目前中国有 5 种三代核电技术,分别是 AP1000、CAP1400、华龙一号、法国核电技术(EPR)以及俄罗斯核电技术(WER)。

2018 年以来,中国三代核电建设取得突破性进展,全球 AP1000 首堆、EPR 首堆相继在中国建成并投入商用;自主三

代核电技术“华龙一号”首堆工程建设进展顺利,重大节点均按期实现,有望在 2020 年底前后投入商用;自主三代核电技术 CAP 1400 首堆即将开工。

4 核电站机器人研究现状及发展趋势

自从 20 世纪中前叶开始,核电工业和技术得到迅速发展,同时伴随着机器人技术的快速进步与变革,针对核电站巡检与应急处理任务的核电机器人技术得到了世界各国诸多研究人员广泛的研究,并取得了一些研究成果。

核电机器人在非结构条件下行动,可以根据人工智能技术来运行,具有一定的感知能力,还可以进行复杂的行动,比一般机器人的机动性和灵活性更好。核电站机器人涉及大量学科,如计算机科学、控制工程、结构学、材料科学、仿生学、光学、微电子学、人工智能等。在 20 世纪 40 年代各个发达国家就已经开始研究核环境下的机器人技术,并研制成功许多样机^[10]。

4.1 其他国家研究现状

早在 20 世纪 40 年代,美国、法国和日本等发达国家就成功研制了某些应用在核工业的机器人。

美国阿贡国家实验室就研制了一款可操纵放射性物质的机械手,取名为 M1, M1 具备一定的耐辐射能力,能够抓取固定外形的核污染样品。在 M1 的基础上美国 Odetics Incorporated 公司研制了六足移动机械臂搭载平台,并将它与改进的机械背系统组成移动机械背系统,取名为 ODEX。随后 20 世纪 80 年代,美国 Savannah River 实验室与 Odetics Incorporated 展开合作,针对于 Savannah River 核电站的实际应用对 ODEX 机器人进行改进,并研制成功了与之功能类似,且外形为圆柱体状的 ROBIN 核电站机器人。

ROBIN 机器人比较庞大,重量很重,机械臂在完全展开状态时的最大抓取重量为 13.6kg。六足由三个 4V 电机控制,绕主体成 60° 均匀展开,可沿任意方向移动,六足排成两排,跨度可达 88.9cm,主体底部离地面可控制距离范围为 5~50cm,单腿承重可达 113kg。

美国 Remotec 科技有限公司于 1987 年成功研制了 SURBOT 机器人用于核电站的维护和巡检,采用两个行走电机驱动的驱动轮和一个自由飞轮的移动模式使机器人系统能够灵活移动,反向驱动自由飞轮可使机器人系统回转半径接近于 0。机器人外形为圆柱体状,直径为 790mm,高度达到

1400mm, 重量为 270kg。机器人搭载有自由度的机械臂, 可执行开关阀门、清洁溢出物等任务。该机器人采用有缆控制, 机器人内部专口配有缆绳收放机构, 使机器人能够不停对核电站多个室内执行任务。此类有缆核机器人虽然避开了能源和通信等难题, 却存在工作空间有限、增大工作空间却又增加缆绳绞结的可能性进而导致机器人被困等问题^[5]。

1990 年开始, 美国喷气推进实验室 (JPL) 开发了紧急事务响应机器人 HAZBOT, 并将其交付给消防部门使用, 它能应用于危险物质泄漏突发事件的应急处置任务, 可在现场执行泄漏物质鉴别、泄漏源定位、现场监测等任务, 使消防人员免于危险物质的伤害。HAZBOT 机器人移动缓慢, 占地空间较大, 该机器人前后均采用双导臂的履带式结构, 移动平台上搭载重型机械手, 能够在任务现场执行抓取重物 and 关闭阀门等任务。

1998 年由美国航空航天局 (NASA) 和能源局 (DOE) 及乌克兰当局针对切尔诺贝利核事故的惨痛教训, 组织开展了核机器人项目 PIONIEER, PIONIEER 占地空间尺寸约为 $1.2 \times 0.9 \times 0.9\text{m}$, 重量达 500kg。该机器人携带长度达 1m、重量达 70kg 的钻头, 并可通过远程控制对反应堆的厚重墙壁打孔、取样等操作, 在核事故突发后能够根据采集的样品判断核岛安全壳内实时情况, 达到对核反应单元远程监控的目的。

20 世纪 90 年代由中欧技术研究院 (CEIT) 和西班牙 Erdrola and Nuclenor 公司共同研发的微小型爬壁机器人 Robicent 可在蒸汽发生器和其他大直径管道的表面爬行, 达到监测核电站内设备的目的。该机器人重量很轻, 仅有 2.5kg, 体积很小, 占地范围尺寸约为 $290 \times 160 \times 250\text{mm}$ 。该机器人可搭载多种小型传感器, 对现场环境进行小范围巡检与探测。机器人本体专口设有 4 个能够吸附于弧形壁面的真空吸盘, 通过控制系统对 4 个吸盘的步态进行有序控制以改变机器人的运动速度和方向。

20 世纪末, 英国朴茨茅斯大学、Portech 公司、德国的凯泽斯劳滕大学和比利时的立碑卢布塞尔大学等多个研究机构的机器人专家联合设计了能够用于核污染环境工作的遥操作机器人 ROBUG, 它具有 8 条仿生结构的腿, 占地空间尺寸约为 $0.8 \times 0.6 \times 0.6\text{m}$, 能代替人类进入核辐射及对人有害的环境中从事多种工作, 并水平拖动 100kg 的物体, 随身携带 25kg 负荷。

1999 年 9 月, 日本爱知县轴回收厂发生严重的核废料泄漏事故, 造成核辐射惨剧。不久应日本政府要求开展专口应对核泄漏事故的核工业机器人的研究, 日本原子力开发研究机构 (JAEA) 曾经开发过多款能够抵御核辐射的遥控机器人, 其中 RaBot 机器人就是一种能够抵御核辐射, 可打开、关闭阀门的双臂机器人^[6]。

另一款耐辐照机器人 Monirobo 由日本核安全中心研发, 该机器人体积庞大, 占地空间尺寸约为 $(0.8 \times 1.5 \times 1.5)\text{m}$, 采用双履带的移动方式, 移动速度最大能够达到 0.6m/s。机器人主体配有机械臂, 可移除障碍并搜集样品。研究人员称该机器人配备了辐射探测、3D 摄像机以及温湿度传感器等感知系统, 可检测粉尘样品和环境中的可燃气体。

而在 2011 年日本发生福岛大地震时, 人们普遍期待这款机器人能参与抢险救灾工作, 然而外界却始终没有看到 RaBot 机器人和 Monirobo 机器人的身影。究其根源, 日本政府认为日本发生大规模核泄漏的可能性极低, 在经过几年的研制之后, 最终放弃了核放射性环境下感知机器人的研制工作。福岛核事故中, 日本为其忽视核放射性环境下机器人技术的研究付出了极为惨重的代价。

在福岛核事故发生 3 个月后的 2011 年 6 月 20 日, 由 iRoBot 公司生产的 PackBot 和 Warrior 机器人改装后由日本千叶工业大学的 Quince 交付东京电力公司使用, 并先后进入反应堆厂房内部, 进行事故现场的实景拍摄和环境辐射剂量的测量。Warrior 机器人属于中型机器人, 体积较大, 力量也较大, 最大可搬运 90kg 的重物, 在事故现场能够执行放射性障碍物清理工作。PackBot 是一种轻型机器人, 能够在残骸中穿行, 通过有线光纤传回核电站内部图像和环境数据。

Warrior 机器人为 PackBot 机器人进入核反应堆内部清理道路上的障碍, 保证有足够的空间使得 PackBot 机器人进入反应堆。机器人均采用远程控制方式。PackBot、Quince 机器人先后走遍了 1 至 4 号机组的多个楼层, 进行了辐射剂量率、温度测量以及放射性废水取样测量, 工作人员依据返回的数据绘制各机组的辐射分布图。同时, 它们提供的照片、数据为制定核电站事故后续处理方案提供了依据, 提高了救灾工作效率, 降低了人员的辐照危险性。

福岛核事故后, 世界各国对核电站巡检与应急处理有了重新认识, 纷纷投入大量资金开发相关产品。日本政府也重新启动核电站机器人研究计划, 委托新能源产业技术开发机

构实施“灾害对应无人系统研究开发计划”，将核灾害抢险机器人作为主要研究内容之一，并于2012年10月开发出两款机器人用于福岛救灾现场。

4.2 中国研究现状

福岛核事故爆发之后，中国政府十分重视核电站巡检与救援机器人的研制。2012年，在以往技术的基础上，由中广核集团牵头的国家“863计划”项目——“核反应堆专用机器人技术与应用”正式获批，研究6项核电站专用机器人，部分机器人将被应用于核电站事故处理。2011年国家能源局和国防科工局也分别资助了核电站救援机器人和核电站反应堆厂房环境监测机器人研发项目。

2015年6月，由中国广核集团（简称中广核）牵头，众多科研机构、高等院校参与的国家863计划“核反应堆专用机器人技术与应用”课题，通过国家科技部专家组验收。核电机机器人能满足核电特殊的工作环境，特别是耐辐照等，在同等的功能需求下，在其他工业领域也将有广泛的应用前景。据介绍，在核电站的应急救灾、事故处理、设备维修等方面，机器人及相关技术具有重要的应用价值。研究人员经过4年多的研究攻关，掌握了相关应用技术，并研制成功多个工程样机产品，部分产品已经安装在防城港核电站^[7]。

此次研发的6款核电智能机器人，包括反应堆换料机器人、反应堆整体螺栓拉伸机、反应堆压力容器无损检测机器人、核电站多功能水下爬行机器人、蒸汽发生器一次侧堵板操作机器人、核电站微小型作业潜艇等。

4.3 未来发展趋势

早期简单的遥控式机械手已经被淘汰，取而代之的是融入先进技术的自动化智能机器人。以下从高水平的驱动技术、远程控制技术、耐辐射能力、多功能性以及智能化几个方面介绍核电站机器人未来发展趋势。

4.3.1 新型驱动系统

驱动系统是核机器人在地面自由行走、轻松跨越障碍物、在水下工作的内驱力，还能支撑整个机器人的末端执行机构。根据不同的工作环境科研人员设计了不同的驱动系统，如爬行机器人的内驱系统有轮式、履带式、四足式、吸盘式四种类型，这可以使机器人在地面灵活前进、后退、翻越障碍物等；水下工作的机器人的驱动系统被设计成螺旋桨式、仿生鱼结构，可以使机器人在水下工作时灵活上浮、下潜等。

此外，为了使人员尽量远离高辐射区域，现场总线等新一代有线传输技术在核电站机器人产品中也得到了广泛的应用。

4.3.2 远程控制技术

较多的设备和密集的管道，使核电机机器人只能在有限的空间操作，加大了工作的难度。为了避免核电站机器人在行走、工作中破坏设备，技术人员在核电站机器人中融入了远程操控技术，轻松控制机器人完成任务。此外有些工作区域的磁场环境较为复杂，无线信号无法传输，可以采用有缆操作的方式来操控机器人。随着制造业和控制技术的发展，核电站机器人末端执行机构已能满足越来越多正常检修场合的需要。

4.3.3 强耐辐射能力

核电站机器人与其他工业机器人相比，可以适应高辐射环境，这对机器人信号传输系统、传感系统、视频检查系统提出了更高的要求。为了满足这一需求，在结构设计、材料选择、控制算法、辐射防护加固等方面，学界进行了深入研究，其中最具代表性的研究就是摄像头耐辐射技术。在这一方面，美国Mirion公司是最为成功的，其开发的IST摄像头耐辐射能力可以达到 10^6rad/h ，可以满足核电站的一般工作需求。但是如果适应事故下的工作环境，还需要进行进一步的研究。目前中国开发的摄像头耐辐射能力可以达到 10^4rad/h ，部分科研院所已经致力于研究更高水平的摄像头。

各国针对核电站的需求不断进行机器人的研究和改造，希望核电站机器人能完成核电设备的常规维修、应急事故处理、核废物处理等工作。核电站机器人的技术取得进一步成果，甚至在部分领域攻克了关键技术。但是近年来地震、台风等自然灾害的高频率发生开始让人们关注核泄漏问题，目前大多数核电站机器人只是代替工作人员进行辐射环境下的检修活动，高智能、多功能、高恶劣环境适应性的机器人尚未开发出来，这也是未来研究的重要方向。

4.3.4 多功能性

核电站的工作环境恶劣，对人的辐射性强，在一些管道密集的地方，工作人员无法进入。就需要多功能性的机器人替代工作人员进行检查设备、修复、应急处理等工作，这些机器人的研发，不仅能提高工作效率、缩短检修时间，更重要的是保证工作人员的身体健康^[8]。

4.3.5 高智能化

核电站里有许多狭窄的通道，工作空间有限，而且有核心设备的地方都有很高的辐射，在检修的过程中很困难。现

在还是人员远程控制核电站机器人,操作人员稍有不慎,就会造成严重后果。要保证核电站机器人在无人操作的情况下能够在复杂的环境中自动搜索、自动避让、快速搜索目标并精确定位,这就需要对驱动技术、传感系统和控制系统进行深层次研究,这也是一个重要的研究方向。

5 核电机器人技术研究工作方向建议

针对目前核电机器人的发展现状,结合现有的技术研发情况,提出以下工作思路。

5.1 突破耐辐照技术

核作业环境的特殊性,首先体现在高辐照剂量水平。耐辐照能力直接决定了核用机器人的使用周期以及使用范围。以福岛核事故为例,事故发生后最先投入使用的部分应急机器人受限于强放射性环境而无法作业并返回,既没有完成既定任务,同时,也额外增加了放射性废物。反应堆内的 α 、 β 、 γ 射线和中子会对机器人的电子元器件以及传感器造成严重损坏,特别是摄像模块,采用的光电传感器容易受到强辐照干扰,从而丧失功能。从耐辐照材料的研发工作入手,突破耐辐照技术,有助于进一步提升核用机器人的使用周期以及使用范围。

5.2 研究通信技术

机器人进入核电作业区域后,如何快速、可靠地向操作人员反馈现场信息,是一项亟需解决的技术难点。采用有线通信方式,在复杂的作业环境内,机器人的过多操作可能会发生通信线路打结缠绕的情况,致使通信功能丧失、机器人无法返回;研究无线通信方式,在强辐照环境下,无线通信的通信距离、通信稳定性都受到极大的限制。攻克通信中继器或者优化通信线路设计相关的核心技术,能够保证机器人的稳定通信,有助于核机器人及时反馈信息并执行相关动作。

5.3 攻克先进智能控制技术

传统的单一遥控机器人在智能技术的推动下,逐渐向拥有智能决策功能的机器人演化。通过搭配的摄像模块、红外、

超声波等传感器,丰富机器人对环境条件的反馈能力,研发自主可控的机器人智能控制技术,可以实现智能机器人对环境的智能感知、操作任务分析判断及自动化实施,从而实现“人一机一环”的深度融合,也是今后工作的重点。

6 结语

本文介绍了核电技术的发展历程,深入对比分析了核电机器人在国际上研究现状,阐述了核电机器人未来强耐辐照能力、多功能性、高智能化等发展趋势,最后结合核电机器人在国际上研究现状,在前期调研和项目规划方面,给出了核电机器人技术研究的工作建议,这对于形成自主可控的核电机器人技术,促进核电产业的发展具有非常重要的作用。

参考文献

- [1] 赵琛,沈杰,李思颖.水下核电机器人应用现状与技术发展分析[J].自动化技术与应用,2019,38(11):94-98.
- [2] 刘青松,张一心,向文元,等.核电站机器人技术应用现状及发展趋势[J].机器人技术与应用,2011(03):12-16.
- [3] 唐焕泽.核电站机器人技术的应用趋势[J].科技视界,2017(11):138.
- [4] 彭朔,王磊.核电站检修机器人的研究现状及分析[J].中国电力教育,2009(S2):497-499.
- [5] 郑耿峰,曾钦达,张健陈,等.可实时监测和三维重建的新型救援机器人设计[J].机械设计与制造,2015(3):121-124+128.
- [6] Sawada J,Kusumoto K, Maikawa Y, et al. A Mobile Robot for Inspection of Power Transmission Lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991,6(1):309-315.
- [7] Yano K,Maruyama Y, Morita K, et al. Development of the Semi-automatic Hot-line Work Robot Systems “Phase II”[J]. Proceedings of the 7th International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance, 1995(13):212-218.
- [8] Tsukahara, Y Tanaka, Yingxin He, et al. An experimental robot system for power distribution line maintenance robots-system architecture and bolt insertion experiment[J]. Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008(23): 1730-1736.