

长输热力管道维抢修自动焊接技术 现状与发展趋势

赵来栓¹, 赵江栋¹, 李晨斌¹, 李亚男¹, 罗雨², 贾玉麟²

1. 中铁三局集团投资有限公司 山西太原 030001

2. 北京石油化工学院能源工程先进连接技术研究中心 北京 102617

摘要: 随着集中供热模式的不断发展,长输热力管网作为供热至关重要的一环,其稳定、高效的传输为工业以及居民用热提供保障。当热力管道发生泄漏时,需花费大量时间进行维抢修工作,维修速度与进程极大影响着工业生产与居民生活。管道自动焊技术在该领域逐渐崭露头角并不断发展,现已作为管道维抢修的主要技术手段。通过讨论长输热力管道常见的损坏与缺陷、修复方法及维抢修自动焊设备的技术发展现状与前景,为该工程领域内的从业者提供有益的参考。

关键词: 热力管道;损坏与缺陷;管道修复;自动焊接设备

The current situation and development trend of automatic welding technology for maintenance and emergency repair of long-distance thermal pipelines

ZHAO Laishuan¹, ZHAO Jiangdong¹, LI Chenbin¹, LI Yanan¹, LUO Yu², JIA Yulin²

1. China Railway Third Bureau Group Investment Co., Ltd., Taiyuan 030001, Shanxi, China

2. Beijing Institute of Petrochemical Technology Research Center of Energy Engineering Advanced Joining Technology, Beijing 102617, China

Abstract: With the continuous development of the central heating mode, the long-distance heat transmission pipe network is a vital part of heat supply, and its stable and efficient transmission provides a guarantee for industrial and residential heat. When the thermal pipeline leaks, it takes a lot of time to carry out maintenance and repair work, and the speed and process of maintenance greatly affect industrial production and residents' lives. Therefore, automatic welding equipment technology has gradually emerged and developed in this field, and has now been used as the main technical means of pipeline maintenance and repair. This paper mainly discusses the common damage and defects of long-distance heat pipelines, repair methods, and the technical development status and prospect of maintenance and repair automatic welding equipment, so as to provide a useful reference for practitioners in the field of engineering.

Keywords: thermal piping; damage and defects; pipe repair; automatic welding equipment

1 序言

近年来,我国集中供热管道里程逐年增加(见图1),一般以地埋和架空两种方式铺设,其输送

介质压力大、温度高且易腐蚀钢材,因此管道损坏的事故时常发生^[1]。一旦因管道缺陷造成主管道泄漏,即会导致大面积停止供热,给工业生产及居民

生活带来不便和损失，严重时还会威胁生命财产安全。例如，2020年12月5日，山东某热力公司发生一起城区主管网受外力损坏泄漏事件，自发现泄漏到抢修完成历时33h，影响36座换热站的运行，停运供热面积约312万 m^2 ，涉及用户近3万户。此次事件影响范围极广，严重影响了居民正常生活。



图1 2016—2021年全国集中供热管道里程及新增里程

传统的人工焊接维修方式效率低、安全隐患大、维修周期长等问题制约了管道系统的持续运行，因此已经难以满足管道安全及高效运行的需求。由此应运而生了管道自动焊接技术，其通过自动化手段，提高了管道维修的效率，降低了成本，减缓了因管道破损而长时间暂停供热的问题，确保了热力的稳定输送，并最大限度地减少了人工操作的安全风险，其在长输热力管道维抢修任务中逐渐占据了重要地位，保障了民生。在城市化建设的进程中，自动焊接技术的不断发展为长输热力管道的维抢修带来了新的可能。

2 常见的管道损伤与缺陷

长输热力管道的突出特点是温度变化引起的热膨胀和冷收缩，且其输送介质存在较大压力，此时在管道接口处会产生较大应力，可能导致焊缝开裂。此外，管道的老化、内外部腐蚀、外部开挖导致的机械损伤等因素，都可能使管道发生泄漏事故。从热力管网的故障统计调查结果来看，管道内外腐蚀、裂纹、管体金属损失导致泄漏占比约为70%，焊缝破裂导致泄漏约占比20%，管件损坏导致热力管网泄漏约占比6%，其余原因占比约4%。

总体而言，长输热力管道常见的损坏缺陷类型大致可分为内腐蚀、外腐蚀、管体金属损失、裂纹、焊缝缺陷及外部机械损伤等（见图2）。大里程

的热力管道与多样的缺陷类型为管道维抢修工作带来了巨大的挑战，为实现管道的快速抢修、维护，缩短维修周期，提高维修效率，焊接方式从传统的手工焊接逐渐发展为自动焊接^[2]。



a) 腐蚀



b) 裂纹



c) 焊缝开裂



d) 机械损伤

图2 损伤类型

3 管道缺陷修复方法

管材质量问题、输送介质对管道的腐蚀、焊接接头质量问题，以及外部施工对管道的破坏等^[3]，均会使管道受到不同程度的损伤，从而造成管道泄漏。对于热力管道的维抢修作业，工程人员结合特点、成本等因素对不同的泄漏原因给出了不同修复办法^[4]，见表1。

本文旨在讨论长输热力管道维抢修自动焊接技术，故只针对涉及自动焊接设备与技术的维抢修方法进行讨论，其余管道维抢修技术不再过多赘述。

表1 不同维抢修方法的适用范围

维抢修方法	维修寿命	适用范围
堆焊修复	取决于防腐效果	小面积腐蚀、金属损失、裂纹等缺陷
补板修复	取决于防腐效果	小面积腐蚀、金属损失、裂纹等缺陷
套筒修复	永久修复	大面积腐蚀、金属损失、裂纹等缺陷
夹具修复	临时修复	临时抢修
纤维复合材料修复	永久修复	大面积腐蚀性缺陷
打磨修复	永久修复	平面型缺陷
换管修复	永久修复	所有缺陷

3.1 堆焊修复

堆焊是一种焊接工艺，指在一种基底金属（称为基材）的表面上涂覆一层焊接材料，从而使焊件恢复或增加尺寸，达到焊接表面获得耐磨、耐热、耐蚀性的目的^[5]。当管道因腐蚀等原因而造成金属损失，包括单点缺陷和深度较小的体积型缺陷时，经技术人员对缺陷进行评估后，即可用堆焊工艺进行修复（见图3）。在修复之前需要清洁待修复区域，包括去除油脂、氧化层等污染材料，并对缺陷进行评估，确定堆焊的范围及深度。以X52管线钢腐蚀缺陷造成的金属损失为堆焊维修对象，采用半自动或自动熔化极气体保护焊接系统开发堆焊维修工艺，堆焊工艺采用脉冲熔化极气体保护焊，使用80%Ar+20%CO₂混合气，使用直径1.0mm的ER70S-6焊丝。通过堆焊工艺试验，评估高质量维修的焊道数量和搭接率，形成单层多道或多层多道



a) 修复前 b) 修复后

图3 堆焊修复示意

堆焊工艺规范。在充分考虑焊接材料及焊接参数后，即可进行堆焊工作。但此种方法具有焊穿、氢脆及冷脆的风险性，需进行严格的评估把控^[6]。

3.2 补板修复

补板修复是指在管道有缺陷的部位，通过焊接的方式修补一块高强度的加强板，从而修补管道缺陷^[7]。加强板的形状一般为圆形或椭圆形（见图4），适用于修补管道的腐蚀、金属流失、裂纹等缺陷。使用其对管道进行修复时，应当保证焊接区域表面均匀、光滑，且无油脂、油气、氧化层等污染源。此外，该管道修复方法存在氢脆、裂纹、烧穿或爆裂等风险，因此采用该方法进行管道修复时，应充分考虑焊接条件与焊接规程，确保焊接工艺和工艺的标准化^[8]。

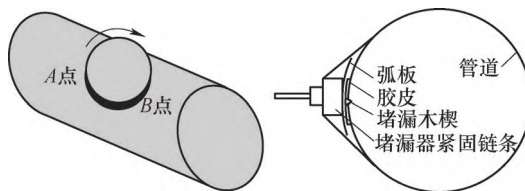


图4 补板修复示意

3.3 套筒修复

套筒修复是指在管道缺陷部位外包一个圆柱套筒，其由上下两片半瓦组成一个完整圆柱体，其内径与待修复管道的外径相匹配，维修时可通过焊接的方式将整个待修复管道区域包住，以达到修复目的^[9]。

套筒可分为A类加强型与B类承压型（见图5）。在选择套筒时，应当充分了解两类套筒差别与修复目的。A类套筒适用于没有缺陷的管道修复，仅需要焊接环向焊缝。B类套筒则是修复管道缺陷最常用且最重要的修复方法，此需要焊接侧面焊缝与环向角焊缝，使其能够承受内部压力，并且增强管道的轴向承压能力，适用于存在泄漏或泄漏可能的管道。

在进行B类套筒修复时，需将套筒外包在管道外侧，进行侧缝的焊接，然后在套筒的末端采用角焊的方式将其固定在输送管道上，从而完成修复^[10]。汪嘉伟等^[11]研制了一种基于激光跟踪系统B型套筒自动焊接装置，它可以利于激光传感器采集焊接图像、提取焊接位置，从而跟踪、控制焊接过程，焊接效率高，外观成形好，修复原理如图6所示。

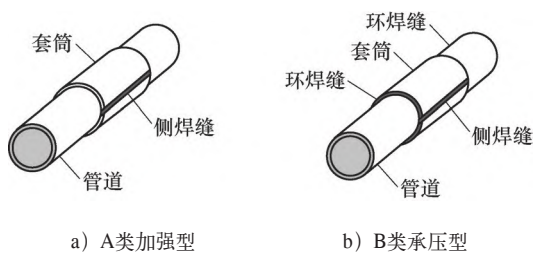


图5 A类加强型与B类承压型套筒结构

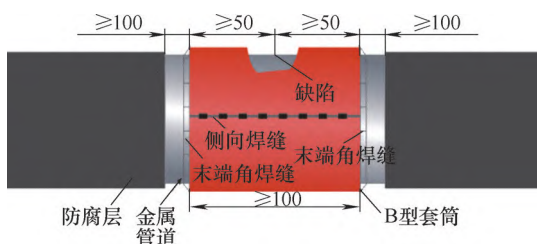


图6 套管修复原理

3.4 换管修复

换管修复指对损坏管道进行切割后重新对接一组新的管道，以达到修复的目的（见图7）。此类方法可一次性解决所有管道缺陷，包括损坏、裂纹、腐蚀等^[12]。但其成本高，且换管需要焊接管道两端，相当于增加一个风险点。因此，除非在其他修复方法失效时，一般不会考虑换管修复。换管修复的一般流程为旧管切割、测量计算、下料组对、焊接及检测等。在测量计算方面，王志方等^[13]研制了一种三维激光扫描测量技术，可以提高对接精度，为焊接打下坚实的基础。换管修复的焊接任务则为全位置管道焊接，使用管道自动焊接设备往往会事半功倍。

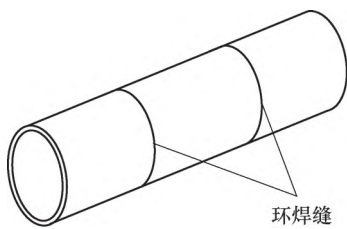


图7 换管修复示意

4 管道维抢修自动焊接设备

4.1 国外研究现状

自20世纪初期，林肯电气（Lincoln Electric）等诸多著名的焊接龙头企业对自动焊接设备进行研制，在20世纪30年代研制出了第一款自动焊接设

备。

加拿大Firefly公司的自动焊接系统作为长输管道维抢修专用设备（见图8），根据API 1104: 2021《管道及相关设备的焊接》、ASME B31.4: 2019《液态烃和其他液体管线输送系统》等长输管道焊接规范标准进行了优化设计。考虑到在役焊接和对接焊的特殊需求，其控制系统精度高，可根据机头空间位置，按照程序调节所需要的送丝量、行走速度、摆幅及电压等相关参数，参数和动作控制精确，可保证焊接质量稳定性；导轨设计适应管道变形，轨道支腿高度可调节，当待维修管道存在椭圆变形时，调整轨道支腿长短，可补偿管道变形，保证轨道与管外壁距离一致；设备安装操作简单；适应野外恶劣环境，设备坚固耐用，并可长时间连续作业。



图8 Firefly公司维抢修自动焊接小车

AWS公司开发了一款Comet机械化自动焊接系统（见图9），这是一款多功能、自动化的全位置焊接系统，具有机载可编程系统，可自动调用全位置焊接参数。Comet系统有左右两种型号，可在同一导轨上同时进行两台机器的管道焊接。此焊接系统的焊接速度比纤维素焊条焊接快3倍。除了提高熔覆率外，使用Comet系统还可将焊接效率提高70%，射线和超声波检测质量符合管道行业的大多数标准。

美国爱迪生焊接研究所（EWI）开发了一种便携式自动焊接系统（见图10），用于焊接在役管道上的腐蚀区域，并自动修复易受影响的区域。该技术使用常用的激光传感器来测量焊接和管道表面等物体的表面轮廓，这些轮廓图像由三维表面形貌数据形成，可通过软件程序进行分析，从而实现对面缺陷的精确测量。该系统在2007年4月进行现场试验后，在管道维修车间成功演示，并成功应用于工程实践中。



图9 AWS公司Comet机械化自动焊接系统



图10 EWI维抢修自动焊接系统

2021年1月底,由英国坎布里亚郡工程公司牵头研发的FSWBot成功结题,该管内维修机器人可以在具有流动介质的管道内运行,系统将几种最先进的技术,包括搅拌摩擦焊接、铣削、补丁部署和超声波NDT(无损检测)整合到一个机器人系统上,可以用于管道内维修,而无需在维修期间停输管道。FSWBot由5个单元连接组成(见图11),其将插入管道的生产端,并将随着输送介质流动定位到缺陷区域进行维修。其中一部分将携带FSW机器人和钢补丁分配器,其他部分将携带导航、控制系统、通信、NDT和电力存储/发电有效载荷。在进入预先识别到的缺陷管段时,FSWBot缓慢前进,直到

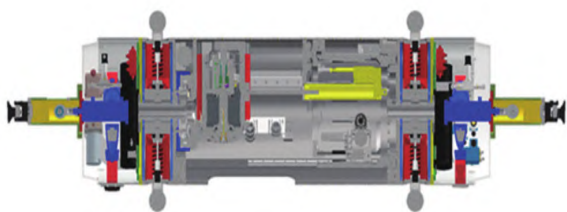


图11 FSWBot结构示意图

FSW系统在缺陷上方就位。锁定到位,确认其位置正确后,执行修复任务。

4.2 国内研究现状

20世纪90年代以前,我国管道自动焊核心技术和装备尚处于空白阶段,国内使用的管道自动焊装备全部依靠进口,成本高、维修难度大、技术操作受制于人。打造管道自动焊核心从事技术和装备、实现关键核心技术自主可控成为从事管道科研人员的目标^[14],经过不懈努力,中石油管道科学研究院分别于2000年和2008年自主研发出第一代PAW2000、PAW3000自动焊接设备,我国也在这项领域内崭露头角。目前,中石油管道科学研究院自动焊接设备已升级为CPP900系列,产品性能和稳定性获得了极大的提高,成为国内管道铺设主力设备,在管道维抢修领域也有大规模的应用。此外,以熊谷为代表的国产管道自动焊专机也大放异彩,市场占有率高,也开发了相应的管道维抢修设备。国内其他管道自动焊产品经过不断升级优化,逐渐应用到长输管道维抢修等领域。

中石油管道科学研究院自主研发的CPP900系列自动焊接设备(见图12)现在已成为国内自动焊接行业的代表性设备,其采用先进的数字化控制系统,并结合焊缝跟踪技术,可以稳定高效地实现全位置自动焊接,并且适应性好,可适用于不同管径和壁厚的管道焊接任务^[15],现已在漠大原油二线、中靖联络线、中俄东线天然气管道及山地管道等工程中成功应用,展现了其在极端条件下的焊接能力。

此外,针对管道维抢修的特殊工况,国内一些机构开发了相应的特种维抢修装备。长输热力管道维抢修工作的任务复杂,不属于流水线性质,其



图12 CPP900系列自动焊接设备

具有变化性、灵活性的特点，面对非规则曲线的焊接任务时，目前的管道自动焊接设备无法胜任。因此，将焊接行走驱动底盘与小型协作机器人相结合将会成为一个发展方向。小型协作机器人的引入可提高焊接设备的灵活性，使其轻松适应复杂的工作内容，包括非规则曲线的焊接任务等。例如，罗雨等^[16]设计了一款基于六轴协作机器人的管道自动焊接装置（见图13），这种结合将会使自动焊接设备具有更好的适应性、灵活性和智能化水平，为管道的维护和抢修工作带来极大的便利。

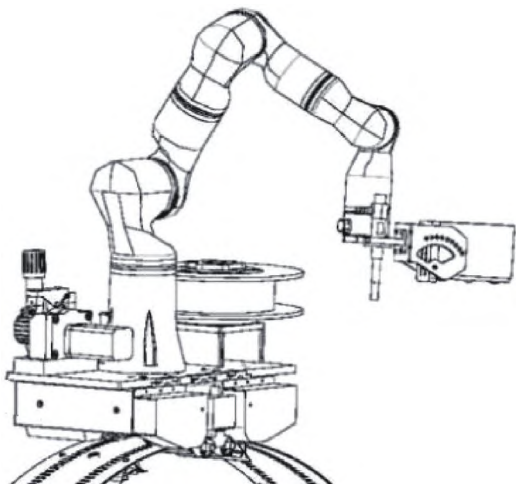


图13 基于六轴协作机器人的管道自动焊接装置

伴随着海底能源工程逐步发展，针对海底管道维修任务，LUO等^[17, 18]研制了一款无潜式海底管道维修焊接机器人（见图14），该系统还包括控制系统、通信系统、视频监控系统和水下干式舱系统等。在此基础上又对其运动控制系统进行了研究，其利用网络拓扑结构灵活的高速以太网总线，实现了基于EtherCAT的多轴运动控制、基于 DeviceNet 的数字化焊接电源控制、人机交互与数据库系统及在线视频监控系统等多个功能单元的实时远程协同控制。并且研制了倾角传感+增量编码双闭环变增益控制算法，规划了机器人焊枪末端位姿，可实现对海底管道的高质量、高效率维修。

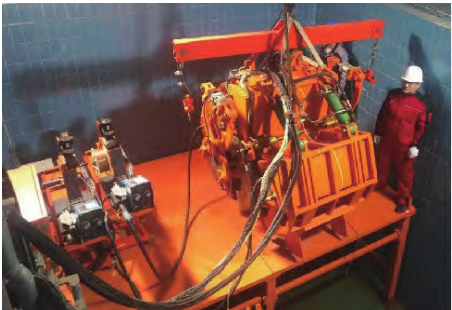


图14 无潜式海底管道维修焊接机器人

国内外管道修复自动焊接设备与技术的适用场合或优势、不足或局限性对比见表2。

表2 不同自动焊接设备与技术对比

设备	适用场合	优势	不足及局限性
Firefly自动焊接系统	长输管道维抢修	维抢修系统全套技术方案成熟	设备体积大，便携性
AWS Comet机械化自动焊接系统	管道全位置维抢修焊接	维修效率高	智能化程度低
EWI便携式自动焊接系统	在役管道腐蚀区域修复	设备便携，适用于多种维修工况	不同管径需要配备相应的设备，设备投资大
FSWBot	管道内维修	集成多种技术，管内在役维抢修，无需停输	研发阶段，尚未广泛应用
管道研究院CPP9000系列	管道铺设和维抢修	性能稳定，自主可控	需要增加现场维修工况的适应性
熊谷国产管道自动焊专机	管道铺设和管道维抢修	市场占有率高，适应性强	需要增加现场维修工况的适应性
基于六轴协作机器人的管道自动焊接装置	特殊工况的管道焊接和管道修复	灵活性高，模拟高级焊工运条手法，智能化程度高	技术难度大，需要进行大量的工程应用验证
无潜式海底管道维修焊接机器人	长输管道或海底管道维修	智能化程度高，无人化远程摇操作	缺少工程应用经验

5 管道维抢修技术的发展趋势

5.1 视觉传感与路径规划技术

伴随着科技的不断发展，用于管道维抢修的自动焊接设备正逐步向着智能化方向发展，视觉传感和路径规划技术将成为焊接领域的重要研究方向^[19]。

通过将更先进的传感技术集成到焊接系统中，例如激光传感技术，可以准确地跟踪焊缝，从而确保焊接过程的准确性。此外，基于人工智能的焊缝跟踪和轨迹规划也将成为热门方向之一，通过建立焊接专家的大型数据模型，并不断进行升级优化和自我

学习,使其能够自动生成不同焊接条件下的最优焊接路径,提高焊接质量和效率。

5.2 协作机器人技术

小型协作机器人的引入,可以提高管道维抢修自动焊接设备的灵活性与智能性,通过集成先进的传感器及视觉系统,协作机器人可实时感知和分析工作环境,并自动调整焊接参数,使之可轻松地适应复杂的工作内容,包括非规则曲线的焊接任务等。此外,在长输管道的维抢修过程中,协作机器人可完成强度高、重复性的焊接工作,工作人员负责监控与操作,实现人机协作,从而提高整个焊接工作的效率。

5.3 远程遥控操作技术

目前,焊接领域内远程遥控操作技术将会成为研究的方向之一,并且将会与虚拟现实、数字孪生等技术进行深度融合。当今对于自动焊接设备的遥控通常使用手控盒、工业PC或手持触摸屏等设备,操作员对焊接现场的把控度不够,无法深度融合于焊接过程,进而会影响焊接效率与精度。通过虚拟现实及数字孪生等技术,施工人员可以远程感知焊接区域,实时对焊接过程进行监控,对设备故障进行精确预警,使得施工人员能够更加直接地做出焊接操作与决策,提高了焊接工作的准确性与效率,保障了施工人员的安全,并且降低了设备的故障率与维护成本。

6 结束语

热力工程事关工业发展与民生福祉,热力管道的铺设里程将不断增加,长输热力管道维抢修自动焊接设备与技术将会在管道维抢修工作中担任重要角色,并将与视觉传感技术、协作机器人及远程遥控操作技术等更多智能技术进行深度融合,在自动化、智能化的方向上不断发展,进一步提高焊接效率和焊接稳定性。

参考文献:

- [1] 张冲. 供热管道泄漏机理浅析[J]. 区域供热, 2020 (6): 66-71.
- [2] 高杨. 长输管道自动焊接设备及技术发展探究[J]. 石化技术, 2022, 29 (12): 219-221.
- [3] 梁欢, 张一帆, 李明. 供热管网泄露工况分析[J]. 区域供热, 2022 (3): 86-93, 99.

- [4] 韩凤臣. 油田埋地钢质管道修复技术[J]. 油气田地面工程, 2013, 32 (11): 78-79.
- [5] 单际国, 董祖珏, 徐滨士. 我国堆焊技术的发展及其在基础工业中的应用现状[J]. 中国表面工程, 2002 (4): 19-22.
- [6] 王长翌, 姜征锋, 卢启春, 等. 油气管道在役焊接研究进展[J]. 油气储运, 2015, 34 (6): 586-589.
- [7] 王友义, 魏立新, 吴迪, 等. 输油管道补板焊接修复结构有限元分析[J]. 化工机械, 2016, 43 (4): 522-525.
- [8] 白振军. 长输管道换管抢修焊接方法选择探讨[J]. 石油和化工设备, 2022, 25 (6): 93-94, 109.
- [9] 李伟伟. 输油管道缺陷点修复技术的比较研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44 (12): 184-186.
- [10] 李勇, 解静, 牛志勇, 等. 长输管道B型套筒修复关键技术问题探讨[J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37 (10): 34-37.
- [11] 汪嘉伟, 贾永海, 杨帆, 等. 基于激光跟踪系统B型套筒自动焊接装置的研制与应用[J]. 石油化工设计, 2021, 38 (4): 6-9.
- [12] 白振军. 长输管道换管抢修焊接方法选择探讨[J]. 石油和化工设备, 2022, 25 (6): 93-94, 109.
- [13] 王志方, 徐海峰, 孙宝龙, 等. 三维激光扫描技术在管道维抢修作业中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2020 (7): 24-27.
- [14] 秦晋中, 杜改平. 城市供热管网常用焊接工艺和方法[J]. 科技情报开发与经济, 2009, 19 (4): 215-216.
- [15] 袁泽浩, 李广超, 解庆生. CPP900自动焊设备在长输管道焊接中的应用[J]. 焊接, 2021 (9): 57-60, 64.
- [16] 罗雨. 基于六轴协作机器人的管道自动焊接装置及焊接方法: CN 202311601159.Y[P]. 2024-02-20.
- [17] LUO Y, JIAO X D, FANG Z W, et al. Remote deepwater subsea pipeline maintenance system[J]. Industrial Robot, 2021, 48 (2): 280-289.
- [18] 杨成功. 无潜式海底管道维修焊接机器人运动控制系统研究[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2019.
- [19] 马明豪, 吴闯, 刘金平, 等. 基于遥控操作机器人视觉传感系统的人机交互设计[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (5): 72-76.