

管道内壁焊接机器人的现状、挑战与未来发展方向

余涵阳 董鹏 李硕

安徽理工大学

DOI:10.12238/etd.v5i6.10959

[摘要] 为介绍管道焊接中机器人焊接技术的现状、挑战以及未来发展方向,本文综述了管道焊接机器人在管道维修中的应用,重点分析了其自动化焊接设备的工作原理和应用场景。介绍了管道焊接检测技术和防腐接头保护技术,并讨论了焊接机器人的发展趋势,包括运动仿真、障碍跨越、功能扩展及传感器的引入等关键技术。

[关键词] 管道焊接; 传感器应用; 焊接机器人; 焊缝追踪; 管道检测

中图分类号: TG43 **文献标识码:** A

Pipeline Inner Wall Welding Robots for Complex Environments: Current Status, Challenges and Future Development Directions

Hanyang Yu Peng Dong Shuo Li

Anhui University of Science and Technology

[Abstract] To introduce the current status, challenges and future development directions of robotic welding technology in pipeline welding, this paper reviews the application of pipeline welding robots in pipeline maintenance, and focuses on analyzing the working principles and application scenarios of their automatic welding equipment. It also introduces pipeline welding inspection technology and anti-corrosion joint protection technology, and discusses the development trends of welding robots, including key technologies such as motion simulation, obstacle crossing, function expansion and the introduction of sensors.

[Key words] Pipeline welding; Sensor application; Welding robots; Weld tracking; Pipeline inspection

引言

随着社会经济的不断发展,石油和天然气的需求日益增加。作为石油和天然气运输的重要工具,管道的使用量也不断上升。根据国家统计局的数据,到2022年年底,中国各类管道的长度相较于1978年有了显著的增加。具体来看,供水管道从1978年的3.3万公里增长到了2022年的110.3万公里,燃气管道从0.5万公里增长到了99万公里,而排水管道增长到了91.4万公里。管道长度的增长幅度超过90%。

然而,随着使用时间的延长,管道内壁往往会出现磨损和腐蚀等问题,进而降低了管道的完整性和安全性^[1]。而由于不同管道的管径不一致,焊缝出现在内壁曲面上,致使人工焊接难度大,工作安全性和效率低,并且焊接质量很容易受焊工因素的影响,易发生由于某处焊缝焊接修复不合格导致某段管道报废^[2],进而提升制造成本。因此,开发一种能够在管道内壁进行焊接修复的机器人以克服人工焊接的局限性和低效性显得尤为重要:一方面,通过管道内壁焊接机器人的使用可以减少人工操作对工人的伤害和风险,能实现连续作业,提高焊接速度,减少生产周期;另一方面,管道内壁焊接机器人具有更好的工作环境适应能

力,利用机器人进行管道内壁焊接修复可以提高焊接的精度和稳定性,从而提高管道的完整性和安全性^[3]。

1 国内研究现状

国内机器人发展较晚,但发展迅速。在20世纪70年代,在引进和研究国外机器人技术的基础上,经过“七五”“八五”和“九五”的“863”等计划的支持,我国已基本掌握了焊接机器人的设计制造与控制等技术,并在焊接机器人领域有了显著的成果^[4]。

国内的焊接机器人起源于1984年,当时一汽公司首次引进德国KUKA公司的焊接机器人,用于“红旗牌”车身和“解放牌”车头顶盖的焊接。在此之后,由于上海大众和一汽大众等汽车企业的成立,国内的焊接机器人技术得到了进一步的发展^[5],开始广泛应用于汽车制造、工程机械等行业^[6]。1985年,哈尔滨工业大学成功研制出了我国第一台焊接机器人“H-Y12”。在1999年,由“一汽”集团、沈阳自动化研究所和哈尔滨工业大学联合研发的“HT-100A”型点焊机器人,通过了“863”计划智能机器人专家的验收。

此后,管道焊接机器人便被正式投入工业生产中,例如:2021年4月28日至5月22日,北京石油化工学院自主设计研制的市政管道焊接机器人在北京自来水集团石景山区供水管网一期

工程建设中获得应用^[7],顺利完成1.2公里DN1000钢制给水管道工程标段的焊接施工任务;2021年,北京市自来水集团在供水管道施工作业中,首次应用了北京石油化工学院研发的“焊接机器人”^[8],相较于传统焊接工艺,该技术工作效率提高了3倍。现如今,国内从事管道焊接机器人开发的企业中具有代表性的有沈阳豪邦机器人股份有限公司、洛阳德平科技股份有限公司和上海美焊智能化科技股份有限公司等^{[9][10]}。

尽管国内的管道内壁焊接机器人技术取得了一定的进展,但仍存在一些挑战如造价较高、整体技术水平相对较低等。并且国内管道内壁焊接机器人的可靠度、稳定性和使用寿命与国外仍有较大差距^[11]。

2 国外研究现状

国外工业焊接机器人起步较早,技术相对成熟。1954年,美国Dexol公司首次提出了工业机器人的设计,并于1962年开发了第一台工业机器人“Unimate”,这标志着工业机器人正式问世。目前,国外管道焊接机器人具有如下几个现状特点:

(1)国外的管道内壁焊接机器人通常采用先进的传感器技术视觉系统和智能控制算法,能够实现高精度的焊接操作;(2)国外的管道机器人具备多种焊接工艺的能力,可以适应不同类型和材质的管道焊接需求;(3)国外的管道内壁焊接机器人普遍具有较高的自动化程度可以实现自动焊缝跟踪、自适应焊接参数调整等功能;(4)国外的焊接机器人可以通过远程监控系统进行操作和控制,提高了工作的灵活性和效率。(5)国外的管道内壁焊接机器人常常与其他生产环节相集成,形成完整的自动化生产线,实现高效的生产流程。

与此同时,国外的相关研究机构和企业也在不断探索新的技术和应用场景,如水下管道焊接、极地环境下的管道焊接等^[12]。这极大地推动了管道焊接机器人技术的不断进步和发展。

例如英国原子能机构的“机器蛇”^[13],这种机器人可以在核聚变工厂的管道内进行焊接维修。它的独特设计使其能够适应狭窄复杂的管道环境完成高难度的焊接工作。

德国KUKA公司的机器人技术在全球领先,他们的管道焊接机器人具有高精度、高效率和高适应性的特点^[14],可以应用于各种不同规格和材质的管道焊接。

美国Novarc公司的SWR焊接机器人^[15]采用了先进的电弧跟踪技术,能够在管道焊接过程中自动调整焊接参数,保证焊接质量的稳定。

日本安川电机的机器人以稳定性和可靠性著称,他们的管道焊接机器人在石油、化工等领域有广泛应用,能够满足长时间连续作业的需求。

3 现有问题挑战与创新发展方向

3.1 现有问题挑战

(1)管线连接跟踪技术的局限性。尽管管道焊接机器人技术有所进步,但如学者韩伟在《串联机械臂特性仿真及其非线性控制研究》中指出,当前机器人在管线连接跟踪上主要局限于二维空间,面对复杂的三维空间和较大偏差时,仍需人工干预调整参

数^[16]。(2)远程监控与智能管理缺失。刘磊等人发表的《管道内软体爬行机器人的设计与性能分析》中提到,当前管道焊接机器人缺乏高效的远程监控平台,难以实现焊接过程的实时监控和远程管理,这限制了其在大型、长距离管道项目中的应用潜力^[17]。(3)传统维修方式的局限。赵鹏洋等人的研究《一种矿用管道检测机器人设计及牵引性能分析》,传统管道检测或维修方式存在周期长、成本高等问题,迫切需要新的技术手段来提高维修效率和降低成本^[18]。

3.2 技术创新

(1)结合3D打印技术的在线修复。苏德尔等人提出的“用于管道检测机器人的微型化成像系统”,虽然直接关注的是检测而非焊接,但启示我们类似的技术创新(如3D打印)可应用于管道内壁的在线修复,如文献所述,通过定向能增材制造技术,实现高效、精确的管道修复,延长管道使用寿命^[19]。(2)微型化与高精度检测。微型化成像系统的研发为管道内部的高精度检测提供了可能,这同样对焊接前的精准定位和后续质量检测具有重要意义,可推动管道焊接机器人向更高精度和更小尺寸方向发展^[20]。(3)水下及特殊环境应用。支祥瑞的研究《基于水下机器人的输水管道内壁检测系统研制》分析示意了水下机器人在管道检测中的应用,预示着管道焊接机器人技术也将向水下、深海等极端环境扩展,要求机器人具备更强的环境适应性和稳定性^[21]。(4)动态性能与爬坡能力。汪洋等人的研究《管道机器人过T型管垂直爬坡动态性能分析》强调了管道机器人在复杂地形(如T型管、垂直爬坡)中的动态性能,尤其是在处理复杂管道网络时,良好的通过性和爬坡能力是确保焊接任务顺利完成的关键^[22]。

综上所述,管道焊接机器人技术正面临着从二维跟踪到三维智能跟踪、从人工监控到远程智能管理、从传统维修到高新技术修复等多方面的技术革新需求。通过借鉴和融合上述文献中的先进理念和技术成果,未来管道焊接机器人将更加智能化、多样化,能够更好地适应复杂多变的作业环境,提高焊接质量和效率。

3.3 发展方向

为提升管道检测的效率和准确性,美国AASHTO已规定每两年需利用健康监测系统对管道表面进行全面检查,并进行技术性的状态评估。然而,当前技术存在的局限性阻碍了这一进程的顺利推进。为此,研发新型机器人及相关技术成为突破这些限制的关键。美国西南研究院(SWRI)所研发的磁致伸缩超声导波检测技术,在无外部护套的管道检测中展现出了显著优势。

在探索更为高效的检测手段方面,日本东京电力与东芝公司携手开发的输电线路移动检查机器人,该系统集成了汽车、导轨、机械手和平衡器等组件,能够轻松跨越地面障碍。遗憾的是,目前尚未有关于该系统实际应用的报道。与此同时,韩国在2010年启动了管道检测机器人系统的研究计划,并获得了土地、运输和海洋事务部的大力支持。该计划中的爬行机器人子系统能够沿管道自主移动,并通过无线方式向控制和分析子系统传输传感器数据。其中,无损检测子系统包含磁传感模块和基于图像处理的感应模块,分别用于检测管道内部的腐蚀和表面缺陷。

此外宁波市公路管理局研发的管道检测机器人,通过有线方式提供电源和传输信号,已成功应用于杭州湾跨海大桥的管道检测。华南理工大学自动化学院则研制了一种蛇形机器人,其设计灵感来源于蛇的灵活运动方式,能够在管道内螺旋上升前进。虽然室内试验效果良好,但还需进一步开展实际试验以验证其性能。此外,华中科技大学研发的基于磁致伸缩导波技术的索体损伤无损检测技术,也已在管道和锚管区域的索体检测中展现出广阔的应用前景。

中铁大桥局桥科院在管道检测自动传感方面取得了丰硕成果,他们研发的“探索者IV”管道检测机器人,集成了雷达探测、实时测速、高清电子视频、步进驱动机等多项先进技术,实现了自动定点定位、寻路导航、远程控制等功能,在空中管道检测中表现出既准确又安全的特点,其相关技术参数如表1所示。

表1 管道机器人相关参数

项目	探索者-IV参数
适应索径范围	80mm—210mm
最大爬行速度	20m/min(分钟)
无线通讯距离	1000m
电池工作里程	1500m
视频像素	100万pix
工作环境温度	-20℃—60℃

4 结论

管道焊接机器人技术作为现代工业自动化的重要组成部分,虽然已经取得一定进展,但仍面临诸多挑战。通过文献分析,本研究发现现有技术在管线连接跟踪、远程监控以及维修方式等方面存在局限性,这限制了其在复杂环境和大规模项目中的应用。然而,随着定向能增材制造、微型化成像系统、水下机器人技术等创新成果的不断涌现,管道焊接机器人技术正朝着智能化、高精度和多样化方向发展。未来,通过融合先进技术与设计理念,如增强机器人的自适应性、提高跟踪精度、构建远程智能管理平台以及探索新型维修方式,管道焊接机器人将能够更好地满足高压、厚壁、高强度大直径管线钢的焊接需求,为工业自动化和智能制造提供有力支撑。

[参考文献]

[1]姚凯洞,王树强.机器人焊接技术在管道焊接中的应用现状[J].管道技术与设备,2024,(01):54-57.

[2]赵志锋.我国焊接技术的现状与发展趋势[J].农机时代,2016,43(07):23-24.

[3]李兵.长输管道焊接技术的进展与发展方向[J].南方农机,2020,51(14):159-160.

[4]赵连学.长输管道焊接技术发展[J].化工管理,2022,(31):

79-82.

[5]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.

[6]黄建鹏.重型机械智能焊接应用现状及其发展趋势[J].金属加工(热加工),2022,(01):18-21.

[7]中国工业机器人行业分析[J].中国科技信息,2023,(14):2-7.

[8]杨书娟.6R机器人管道直缝焊接与焊缝识别技术研究[D].无锡:江南大学,2022.

[9]吕树迪,仪登利.钢管焊接辅助机器人设计与分析优化[J].管道技术与设备,2021,(04):40-43.

[10]周伦,尹铁,张锋,等.管道全位置焊接机器人结构设计与分析[J].机床与液压,2020,48(21):36-40.

[11]FakM.利用管道机器人更加经济地焊接管道[J].现代制造,2024,(02):39-40.

[12]汤宇.管道全位置焊接机器人控制技术研究[D].襄阳:湖北文理学院,2022.

[13]J.H.PARK,H.M.MOON.Advanced Automatic Welding System for Offshore Pipeline System with Seam Tracking Function[J].Applied Sciences,2020,10(1):324.

[14]Lu,Z.,Yabao,G.,Tie,Y.,etal.Application of Rail-Type Welding Robot in Automatic Welding of Pipeline[J].Journal of Physics:Conference Series,2023,16(5):63-69.

[15]Cui,L.,Quitag,Z.,Wiachui,W.Design of a Robot for Pipeline Weld Quality Inspection[J]. Journal of Physics:Conference Series,2021,36(17):36-46.

[16]韩伟.串联机械臂特性仿真及其非线性控制研究[D].中原工学院,2018.

[17]刘磊,温涛,韩伟涛,等.快速爬行软体管道机器人的设计与性能分析[J].工程设计学报,2024,31(5):614-622.

[18]赵鹏洋,闫宏伟,张登峰,等.一种矿用管道检测机器人设计及牵引性能分析[J].工矿自动化,2024,50(1):122-130,162.

[19]苏德尔,李浩宇,高伟达,等.用于管道检测机器人的微型化成像系统(特邀)[J].激光与光电子学进展,2024(002):061.

[20]黄波,晏佳魏,赵建国,等.一种管道检测机器人.CN202211350024.0[P].2024-10-23.

[21]支祥瑞.基于水下机器人的输水管道内壁检测系统研制[D].齐鲁工业大学,2024.

[22]汪洋,焦彪彪,陆青松,等.管道机器人过T型管垂直爬坡动态性能分析[J].中国工程机械学报,2024,22(2):179-184.

作者简介:

余涵阳(2004--),男,安徽安庆人,本科在读,研究方向: 机器人工程。

董鹏(2004--),男,安徽合肥人,本科在读,研究方向: 机器人工程。

李硕(2001--),男,安徽蚌埠人,本科在读,研究方向: 机器人工程。