用于核电现场小尺寸管全位置自动焊装备的研发与应用

汤昊[1,2]，唐春云[1,2]，王世培[1,2]，姚舒扬[1,2]，李竹渊[1,2]，孙秋阳[1,2]，甘佰胜[1,2]，
屈晗玮[1,2]，贾世进[1,2]，王志康[1,2]

1.核工业工程研究设计有限公司　北京　101300
2.中国核工业二三建设有限公司　北京　101300

摘要：随着华龙一号实现首次并网，各核电项目中10in以下（$D_e \leqslant \phi 273$mm）小尺寸管的焊接工程量大、焊接成本高，传统焊接方式已不能满足当前核电建造安装现状，为此自主研发一套专用于核电现场小尺寸管的开放式全位置自动焊装备，用以满足各核电项目施工需求，降低施工成本及周期。以开放式全位置自动焊装备为切入点，总体介绍我国核电对自动焊装备的需求情况，同时系统地阐述了装备的组成及其特有的分区焊接功能，并介绍了焊接工艺试验验证结果与现场应用情况，为后续新产品的研发推广提供了参考。

关键词：核电；小尺寸管；全位置焊接；分区焊接；应用推广

Development and application of full-position automatic welding equipment for small-diameter tubes in nuclear power plant sites

TANG Hao[1,2], TANG Chunyun[1,2], WANG Shipei[1,2], YAO Shuyang[1,2], LI Zhuyuan[1,2],
SUN Qiuyang[1,2], GAN Baisheng[1,2], QU Hanwei[1,2], JIA Shijin[1,2], WANG Zhikang[1,2]

1. Nuclear Industry Research and Engineering Co., Ltd., Beijing 101300, China
2. China Nuclear Industry 23 Construction Co., Ltd., Beijing 101300, China

Abstract: With the first grid connection of Hualong No.1, the welding engineering quantity of small-size pipes $D_e \leqslant \phi 273$mm in each nuclear power project is large and the welding cost is high, and the traditional welding method can no longer meet the current status quo of nuclear power construction and installation. Taking the open full-position automatic welding equipment as the starting point, this paper generally introduces the demand for automatic welding equipment for nuclear power in China, systematically expounds the composition of the equipment and its unique partition welding function, and introduces the welding process test verification results and field application, which provides a reference for the subsequent development and promotion of new products.

Keywords: nuclear power; small-size tubes; all-position welding; partition welding; application promotion

1　序言

最初“十五”规划中的“适度发展”以及“十一五”规划中的“积极发展”和“十二五”规划的“安全高效发展”，到如今“十四五”中的

“加快发展非化石能源”的未来规划，我国核电行业得到了快速发展[1]。截至2022年，在运核电机组共53台，在建核电机组共19台，这就导致我国目前面临着多项目同时施工的问题，而其中管道焊接作为核电建造安装及在役的主要焊接工作，内容涵盖了中厚壁管道、仪表管及工艺管在内的小尺寸管道的焊接任务。仅以某核电项目为例，就有约20万道焊口的焊接量，数量巨大，而传统手工焊的焊接数量和焊缝质量已无法支撑后续陆续开展的项目需求，因此焊接自动化迫在眉睫。

自动焊作为一种高效的焊接技术早已在国外广泛应用。以芬兰的核电站为例，其管道预制、安装的自动化焊接比例已接近90%[2]。伴随国内自动焊技术的发展，国产自动化焊接设备从技术先进性、稳定性、可靠性均得到了逐步的提升[3]。但相较于国外某些厂商的焊接设备，如德国OBS、法国宝利苏迪等，国产装备还有不小的差距，为提升现场施工质量、提高焊接合格率、降低焊接成本，打破国外技术封锁，急需研发一套专用于小尺寸管的自动焊装备，以缓解项目压力。

本文深入阐述了核工业工程研究设计有限公司焊接研究所科研团队自主研发的一套开放式全位置自动焊接装备的结构及其在实际应用中的成效，为核电工程项目现场针对小尺寸管道焊接作业所需的自动焊接设备研发，提供了具有可复制性的宝贵参考与经验借鉴。

2　装备介绍

开放式全位置自动焊装备（23HY-Arc400-P/K）是一种采用卡钳紧固的方式将其固定在待焊管道上，机头部位可以围绕管道旋转，从而实现在不同空间位置对接环焊缝的TIG自动焊接。设备适用管径为3～10in（1in=25.4mm）、壁厚＜25mm碳素钢及不锈钢等材质的辅助管道或工艺管道。能够焊接的坡口既可以是窄间隙自动焊坡口，也可以是手工打底焊的V形坡口。在焊接时可以实现直线焊接、摆动焊接及专为薄壁小管研发的分区焊接功能，其各项焊接参数均可通过控制器面板触摸调节，而在起弧焊接时则可通过手持控制器调节设备运行情况及焊接参数，最大程度地降低焊接操作人员的劳动强度和对技能水平的要求。

同时，设备还配有弧压自动跟踪系统，使得设备在焊接过程中可以自行调整弧压高低，降低人为因素对焊缝质量的影响，由于机械和控制两大部分主导了焊接过程，因此获得的焊缝具有成形美观、合格率高、焊接速度快等优点。

3　装备机械组成

开放式全位置自动焊接装备主要由控制盒（含触摸显示屏）、线控器、外置送丝机、开放式焊接机头、焊接电源及各种连接线缆组成。设备主体采用模块化、小型化、轻量化的设计理念。主要部件材质为6160铝合金，其中传动部件材质则采用锡青铜，设计精巧紧凑，安装架设方便快捷，夹持运转稳定，如图1所示。

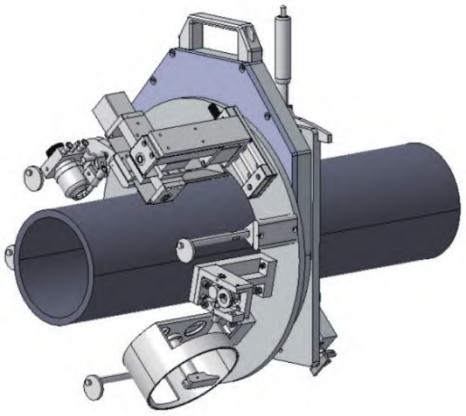
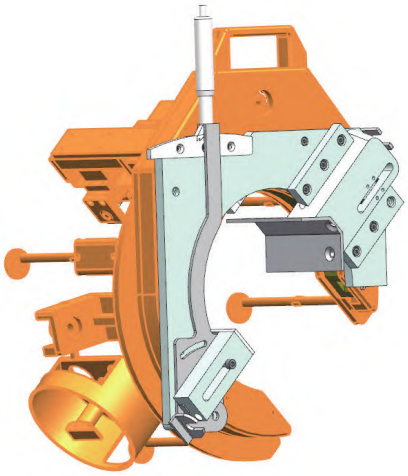


图1　开放式机头示意

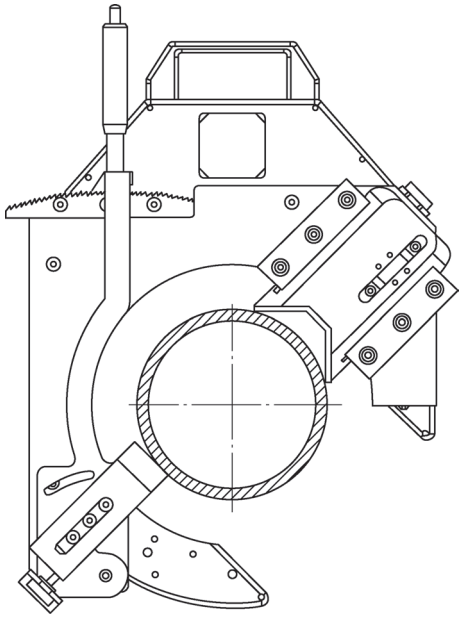
3.1　紧固装置

在管道焊接行业中，为了使管道在焊后的成形质量更好，一般在焊接过程中需要对管道进行夹紧定位，确保设备机头可以带动焊枪平稳地围绕管道做圆周运动。目前，对于大管道焊接的自动焊设备，行业上普遍采用轨道夹紧的方式，而当焊接小尺寸管道时，若采用传统的轨道夹紧方式，则不但会增加设备成本，而且会增加现场操作难度。本次研发的机械夹持机构可以满足现场的使用要求，而且安装高效、方便快捷，如图2所示。

该夹持机构可以完成对被焊管道的快速调节、装夹工作。在实际操作过程中只需要根据现场所焊管道的直径调节夹持尺寸（见图3），并将设备机头架设至管道上，推动手柄即可完成对管道的紧固，如图4所示。此种夹持机构操作难度低，夹持方便、快捷，有效地提高了现场施工效率，并且夹持定位



a）三维图



b）平面图（含待焊母材）

图2　开放式机头夹持机构示意

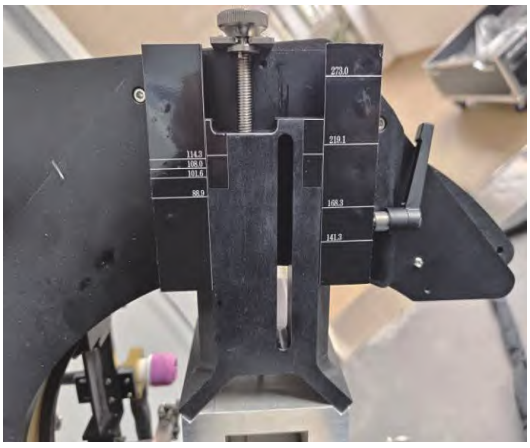


图3　调节尺寸定位滑块示意

准确，极大地提升了机头与待焊管道的同心度，同时夹持牢固，使得设备机头可以有效带动焊枪围绕环焊缝平稳地做全位置焊接运动。

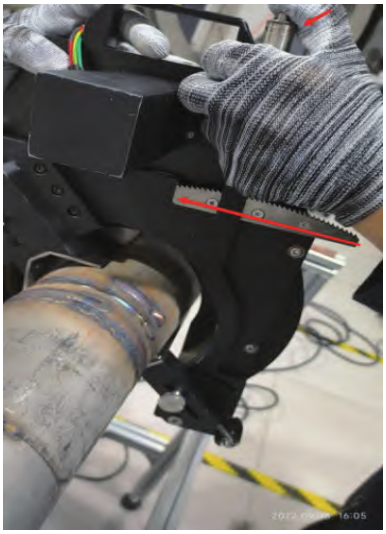


图4　机头夹紧管道操作示意

3.2　传动系统

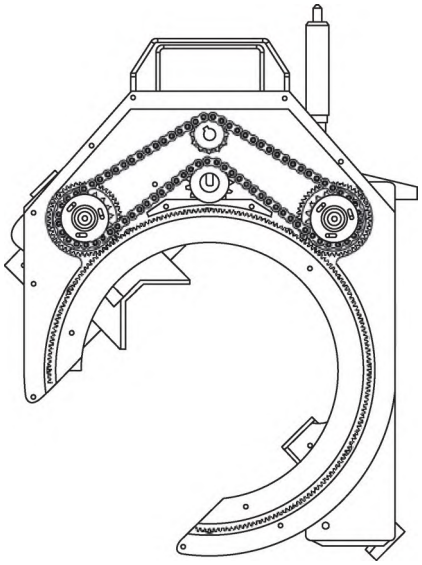
行走电动机通过传动系统驱动转盘旋转，转盘带动焊枪模组一起转动。由于转盘的旋转通过机械进行驱动，因此焊枪的运行速度即焊接速度可控。

为了增强设备的外在美观度并同时确保传动的精确度，传动系统的所有组件均被安置在机头内部，防止焊接过程中产生的飞溅物以及打磨作业中散落的铁屑对传动机构造成潜在损伤。通过这样的布局，设备在保持高效、精确传动的同时，也展现出了出色的耐用性和维护便利性。

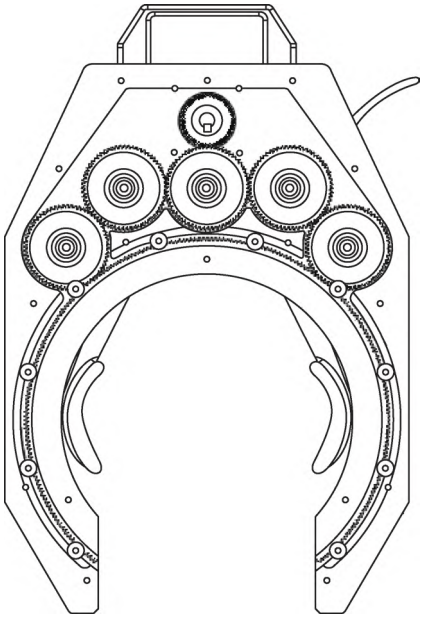
行走电动机通过减速器与链轮相连，链轮则与链条协同工作，驱动转盘顺畅旋转。此外，系统内还装备了链条涨紧机构，以确保传动过程的高效与及时。相较于传统的齿轮组传动方式，此传动系统展现出更低的加工精度要求与更高的传动精度优势，如图5所示。更重要的是，其可有效避免传动过程中可能出现的卡齿问题，从而极大程度地提升了设备运行的整体稳定性。

3.3　送丝方式

相较于传统的手工氩弧焊丝，自动化焊接工艺所使用的填充材料一般均为盘装焊丝，焊丝牌号和化学成分与焊条电弧焊一致[4]。焊丝尺寸有ϕ0.8mm、ϕ1.0mm及ϕ1.2mm共3种选择，焊丝规格市面上通常为1kg、5kg和15kg。



a）自研设备传动机构

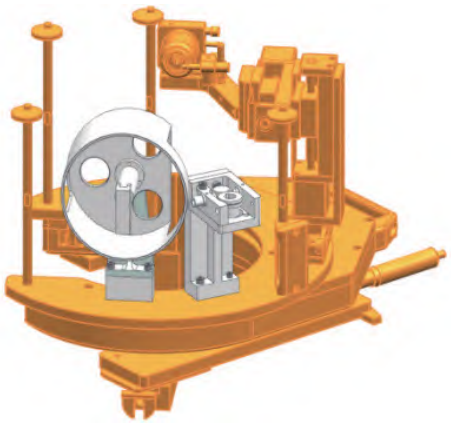


b）传统齿轮传动机构

图5　装备传动机构

经调研各核电项目的使用情况，发现采购的焊丝均为5kg盘装焊丝。考虑到设备的轻量化及搬运安装的便捷性，研发时在保留机头部位1kg送丝机构的基础上，又研制了一套“5kg外置送丝机”，并配有焊丝校直机构（见图6），从而增加了设备的选择性，使得设备更加贴近项目现场，方便核岛现场施焊。

目前，各核电项目为提高焊接施工效率，均选择使用5kg外置送丝机。该送丝机在设计之初便考虑到送丝状态对熔池及焊缝成形的影响，以及对大



a）1kg送丝机构

b）5kg外置送丝机

图6　送丝机构

送丝量的需求，从而使用大功率步进电动机，增大送丝扭矩。目前，自动焊丝送丝系统主要存在的问题为送丝过程不稳定，盘装供给的焊丝均因弯曲度问题而使焊丝在高速送给时搅动熔池，从而影响焊缝成形。因此，为有效提升焊丝供给的稳定性，提高焊缝美观度及合格率，在送丝系统中加装了校直器，如图7所示。

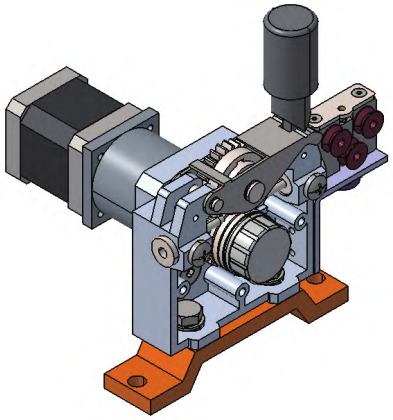


图7　三维校直器

4 装备控制系统

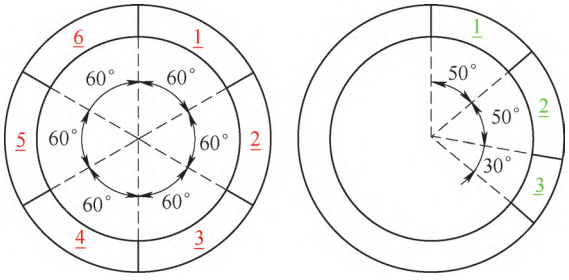
4.1 分区焊接（程序焊接）

焊接参数在焊接过程中起着至关重要的作用，它们不仅关乎焊接操作的顺利进行，还直接影响到焊缝的最终形态、尺寸精度、焊接质量及整体的生产效率[5]。当焊接薄壁小管时，例如在焊接ϕ108mm×8mm不锈钢管道时，若热输入量稍大，则会造成焊缝表面低于母材，达不到标准要求；若热输入稍小，则会产生根部未焊透缺陷[6]。因此，通过大量实际焊接案例，并结合不锈钢薄壁小径管的特点，以及在测试中所焊接试验件的具体情况，最终开发出分区焊接（程序焊接）功能，如图8所示。

图8 分区焊接操作界面

分区焊接（程序焊接）功能将整个管道焊接流程精细地划分为最多6个独立的区间段。每个区间段均可独立配置焊接参数，涵盖峰/基值电流、峰/基值送丝速度、焊接行进速度及焊接区间角度等关键要素。针对管径较小、壁厚较薄的管道，通过增加区间划分数量，并逐段递减电流值（建议每段递减3～5A），可以实现更为精细的焊接控制，从而优化焊接质量。

在焊接角度的设置上，该功能展现出极大的灵活性，允许所有区间段的焊接角度总和既可＜360°，也可超出此范围，如图9所示。这一设计使得操作人员能够根据现场实际条件及焊接需求，精确调整每一区间的焊接角度，确保焊接作业的精准执行与高效完成。具体角度设定值需由专业人员依据现场实际情况进行科学判断与决策。



a）等分6区间示意　　b）不等分3区间示意

图9 分区焊接示意

4.2 摆动焊接

为了显著提升现场焊接作业的效率并缩短焊接周期，在打底、填充及盖面焊接的关键环节中，采取了在既定焊接参数范围内微调焊接参数的措施。具体而言，通过适当降低焊接速度，同时增大焊接电流及送丝量，旨在优化焊接过程的热输入量与熔敷金属堆积厚度。然而，即便如此，传统的直线焊接模式在效率提升方面仍显局限，难以满足高强度现场施工的要求。

鉴于此，针对设备设计进行了创新性升级，引入了摆动焊接功能作为对直线焊接的有效补充。这一功能的加入，不仅使得焊接电流与送丝量的调整范围得以进一步拓宽，从而实现了每道焊缝熔敷金属厚度的显著提升，而且极大地减少了焊接层数，直接促进了整体施焊效率的大幅提高。更为重要的是，摆动焊接通过其独特的焊接路径，有效分散了焊接过程中的热输入，显著降低了焊接变形风险，为高质量、高效率的焊接作业提供了有力保障。

控制器摆动参数调整界面如图10所示。摆动焊接参数包括左右摆动速度、左右摆动宽度及左右停留时间等，其数值均可以通过控制器触摸面板输入或手持控制器远程调节。

图10 控制器摆动参数调整界面

5 工艺开发及现场应用

5.1 焊接工艺评定

开放式管道全位置自动焊焊接参数主要包括：焊接电流、送丝量、气体流量、焊接速度、占空比及脉冲周期等。其中，焊接电流、气体保护流量与送丝速度尤为重要，各数值大小主要由被焊管

件材质、外径、壁厚、钝边厚度及坡口形式等因素决定。核电厂管道规格种类冗杂，材质主要为碳素钢和不锈钢。以某核电现场为例，根据设备适用管径尺寸及现场常用接头规格尺寸，决定开展ϕ114.3mm×12mm碳素钢（P280GH）及不锈钢（Z2CN18.10）两种材质管道的工艺评定，用以覆盖该核电现场管径≥ϕ57.15mm、壁厚为3～24mm所有管-管对接的接头。

设备在开展工艺评定期间运行稳定，焊缝成形质量良好，所有接头均通过RCCM-1级检测和破坏性力学试验，焊接效果如图11所示（手工焊打底、自动焊填充盖面）。

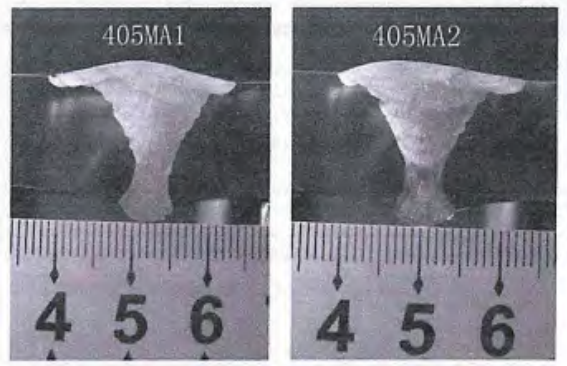
在所有工艺试件全部通过检测后，对试件进行切割加工，并开展后续的破坏性力学试验及金相检查。在室温拉伸、弯曲、冲击等测试中，拉伸检测破断位置均处于母材部位，其他检测项目均符合RCC-M-2007版《压水堆核岛机械设备设计和建造规则》中相应检测标准。金相检测均未见缺陷及微裂纹和沉淀物，宏观金相与微观金相分别如图12、图13所示。

a）不锈钢盖面效果

b）不锈钢填充效果

c）碳素钢盖面效果

图11　焊接效果



a）模拟件1　　b）模拟件2

图12　宏观金相

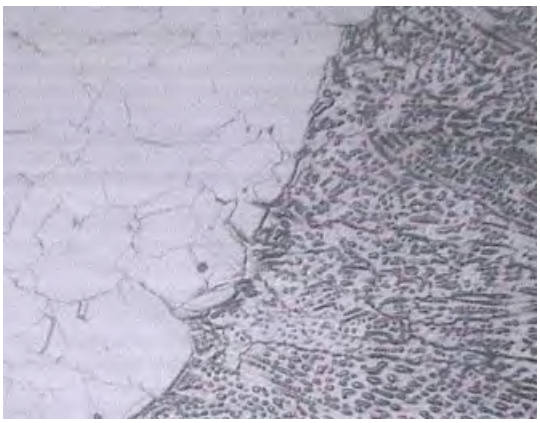


图13　微观金相（200×）

5.2　现场应用

基于设备的核心运行机理、独特的结构设计特性、详尽的操作流程指引，并结合全面且严谨的焊接工艺评定试验结果，精心编纂了《管道全位置自动焊接系统23HY-Arc400-P/K操作手册》。该手册旨在为现场操作人员提供一套系统化、专业化的指导方案，确保他们能够准确理解并掌握该设备的各项功能与应用，进而在实际作业中实现高效、精准的管道全位置自动焊接，全面提升焊接作业的质量与效率。

截至目前，该设备已在核电工程项目及众多非核电行业中取得了成功应用，具体包括船舶行业、火电行业等，展现出极为广阔的应用前景。以核电

建造安装领域为例，该设备已累计部署超过30套，专门应用于外径$D_e \leqslant \phi 273$mm的工艺管道焊接作业，累计完成焊缝超过6万余道焊口，且焊缝质量卓越，合格率高达99%以上。图14、图15所示为某预制车间内的焊接现场与焊后成形效果。由图15可知，所完成的焊接接口呈现出优异的成形质量，焊接合格率高，且在多数情况下无需进行焊后表面打磨处理（对于需进行超声波检测的接头除外）。此外，该设备的设计充分考虑了易用性，拆卸、搬运及操作过程均极为便捷，为用户提供了极大的便利。

图14　预制车间焊接现场

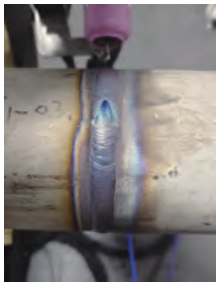


图15　焊后成形效果

6　结束语

开放式全位置自动焊接设备的研发成果，已在核电工程现场的小尺寸管道对接焊施工中取得了成功应用，且成效显著，彰显出极高的推广价值与广阔的发展前景。该设备的研发与实际应用，不仅标志着我国在小尺寸管道自动焊接装备技术领域的突破，更为后续同类设备的研发提供了宝贵的可借鉴、可复制的成熟经验，对于推动我国自动焊技术的进一步发展具有重要意义。

参考文献：

[1] 李莹，孙玉兵. 我国核电发展现状、问题和建议[J]. 当代化工研究，2021（22）：175-177.

[2] 冯英超，党文智，李青霞，等. 核电站辅助管道预制中自动焊技术应用研究[J]. 焊接技术，2013，42（9）：29-33.

[3] 张毅，张锋，苗群福，等. 长输管道自动焊数字化现状及发展趋势——数据采集及无线传输技术[J]. 天然气工业，2022，42（7）：110-117.

[4] 冯英超，凌张庆，王健. 台山EPR核电站核岛安装工程小管预制自动焊应用技术研究[J]. 电焊机，2010，40（8）：35-39.

[5] 王志华，杜双明. 焊接工艺[M]. 北京：北京师范大学出版社，2011.

[6] 靳孝义，王更杰，徐俊. 三代核电站小径薄壁不锈钢管的焊接工艺[J]. 焊接技术，2017，46（1）：39-42.

MW 20250125

（上接第48页）

在识别算法中的重要性，具有很强的实践操作性。

参考文献：

[1] 徐洪飞，咸云飞，吴佰胜. 基于模糊BP神经网络的钢箱梁焊接质量评价方法[J]. 科技和产业，2020，20（12）：233-236.

[2] 苟肖辉，张朝林，张浩军，等. 安全气囊发生器激光焊接在线监测技术探究[J]. 金属加工（热加工），2021（3）：25-28.

[3] YUAN J，WANG S，WANG F，et al. Abnormal condition identification via OVR-IRBF-NN for the process industry with imprecise data and semantic information[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research，2020，59（11）：5072-5086.

[4] YANG J B，LIU J，WANG J，et al. Belief rule-base inference methodology using the evidential reasoning Approach-RIMER[J]. IEEE Transactions on Systems，Man，and Cybernetics - Part A：Systems and Humans，2006，36（2）：266-285.

[5] CALZADA A，LIU J，WANG H，et al. A new dynamic rule activation method for extended belief rule-based systems[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering，2015（4）：27.

[6] 杨隆浩，陈江鸿，叶菲菲，等. 基于规则聚类和参数学习的扩展置信规则库推理模型[J]. 控制与决策，2024，39（8）：2685-2693.

[7] 侯震. 基于激光视觉传感的造船分段中厚板机器人多层多道自主焊接技术研究[D]. 上海：上海交通大学，2021.

[8] 吴月玉，张弓，林群煦，等. 焊接机器人特征参数预测方法的研究综述与展望[J]. 机床与液压，2021，49（15）：168-173，199.

MW 20241212