

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.06.16

机器人管端焊缝智能打磨工作站研制

李洪涛, 秦伟涛, 付 傲, 周 坤, 白 硕, 张 晴, 王玥瑶

中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150028

摘 要: 针对管端焊缝存在的几何复杂性高、多材质适配性差及工艺参数动态优化不足, 人工打磨效率低、质量一致性差等问题, 以视觉传感器技术为基础, 二次开发视觉传感器在打磨中的控制技术, 研制了一种融合多源传感与智能决策的机器人智能打磨工作站。工作站集成三维结构光束视觉传感器与激光位移测距传感器, 构建多模态感知系统; 通过结构光条纹投影实现焊缝形貌的亚毫米级三维重建(点云密度 $\geq 2\ 000$ 点/cm²), 结合激光测距数据补偿钢管椭圆度误差(补偿精度 ± 0.05 mm), 综合检测精度提升至0.1 mm(较单传感器方案提升60%)。解决了复杂曲面自适应跟踪难题; 提出二次寻位的程序运算轨迹算法, 将轨迹跟踪精度提升至 ± 0.08 mm。研究突破了多源信息融合、工艺知识库构建等关键技术, 为管道制造行业智能化升级提供了理论支撑与装备范式。

关键词: 视觉传感器; 柔性化; 自动控制; 打磨; 机器人

中图分类号: TG409 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)06-0129-07

Development of the Intelligent Grinding Workstation for the Welds at the Pipe Ends of Robots

LI Hongtao, QIN Weitao, FU Ao, ZHOU Kun, BAI Shuo, ZHANG Qing, WANG Yueyao

Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin 150028, China

Abstract: To address the high geometric complexity, poor multi-material adaptability, and insufficient dynamic optimization of process parameters in end weld seams, as well as the low efficiency and poor quality consistency of manual grinding, a robotic intelligent grinding workstation was developed based on visual sensor technology. This workstation integrates a three-dimensional structured light beam vision sensor and a laser displacement distance sensor to create a multimodal perception system. It achieves sub-millimeter-level three-dimensional reconstruction of weld seam morphology using structured light stripe projection (point cloud density $\geq 2\ 000$ points/cm²) and compensates for pipe ellipticity errors with laser distance data (compensation accuracy ± 0.05 mm), thereby improving the overall detection accuracy to 0.1 mm (a 60% improvement over single-sensor solutions). It solves the problem of adaptive tracking of complex surfaces; a secondary positioning trajectory algorithm was proposed, which enhances trajectory tracking accuracy to ± 0.08 mm. The research has overcome key technologies such as multi-source information fusion and the construction of a process knowledge base, providing theoretical support and equipment paradigms for the intelligent upgrade of the pipeline manufacturing industry. It realizes intelligent recognition, precise tracking, and grinding of weld seams.

Keywords: vision sensor; flexibility; automatic control; grinding; robot

引用格式: 李洪涛, 秦伟涛, 付傲, 等. 机器人管端焊缝智能打磨工作站研制[J]. 电焊机, 2026, 56(6): 129-135.

Citation: LI Hongtao, QIN Weitao, FU Ao, et al. Development of the Intelligent Grinding Workstation for the Welds at the Pipe Ends of Robots[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(6): 129-135.

收稿日期: 2025-03-23 修回日期: 2025-04-28

作者简介: 李洪涛(1988—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事直缝钢管、螺旋钢管埋弧焊设备、机器人智能设备的设计和研发。

E-mail: LHT0425@126.com。

0 引言

“十四五”时期是我国钢铁行业推动高质量发展、深化供给侧结构性改革、全力提前实现碳达峰的关键时期。钢管广泛应用于石油(天然气)、化工、电站(核电)、机械制造、汽车、船舶、航天等领域,是国家重点工程建设和重大装备制造所需的关键钢铁材料,在国民经济发展和产业升级中的作用不可替代。近几年来受宏观经济政策和下游需求的影响,钢管企业不断加大产品研发和创新,并在油套管、管线管、超超临界机组用管、高强度高韧性工程机械和油缸用管、连续管以及复合管等方面取得了不小的进步^[1-2]。美国、德国、日本等发达国家纷纷实施“再工业化”和“制造回归战略”,力图抢占高端制造市场,国内制造业面临创新升级和智能化转型的迫切需求^[3]。

随着科学技术的进步和制造业的不断发展,市场对打磨抛光加工的需求不断增长与工业制造领域对精密加工需求的不断提升,管道端面打磨作为石油、天然气、化工等行业管道连接工艺的关键环节,其质量直接影响管道的密封性、耐压性及使用寿命。目前一般采用人工手持打磨工具来处理这些缺陷^[4]。人工打磨效率低,打磨后表面一致性也较差,并且打磨产生的粉尘和噪声会危害人身健康。用工密集、工作环境差、劳动强度高、安全管理不到位、产品质量不稳定一直是重工行业的五大痛点^[5],面对这五个难题,行业对机器人的需求迫在眉睫。而现有自动化设备在复杂曲面适应性、实时精度控制及智能化决策方面仍有不足^[6]。在此背景下,机器人管端智能打磨系统应运而生,融合机器人高精度运动控制、多模态传感技术、自适应算法与工业大数据分析,旨在实现管道端面打磨的智能化、柔性化与高效化。而当前的打磨机器人的结构与特性研究主要集中在三/四/五自由度串联机器人、3-RSS 同轴驱动布局或 3-RUU 并联机构的打磨机器人、6-DOF 混联打磨机器人以及焊缝打磨机器人^[7-9]。

本系统通过视觉传感器实时检测工件形貌、动态优化工艺参数,并结合机器学习模型实现工艺迭代,能够精准识别管端的复杂形状和缺陷,显著提

升了打磨质量与工艺稳定性,同时降低人工干预与资源消耗,为管端打磨智能制造转型升级提供了创新性解决方案。

1 系统架构设计

机器人管端焊缝智能打磨工作站如图 1 所示,基于六轴工业机器人系统,辅以基恩士激光视觉传感器、测距传感器、防碰撞传感器、等关键传感器元件和伺服电机搭配打磨头建立自动打磨单元,并且能够快速响应指令,协调机器人、传感器与打磨头协同工作,实现全自动化,无人值守的管端打磨作业,实现以机代人。

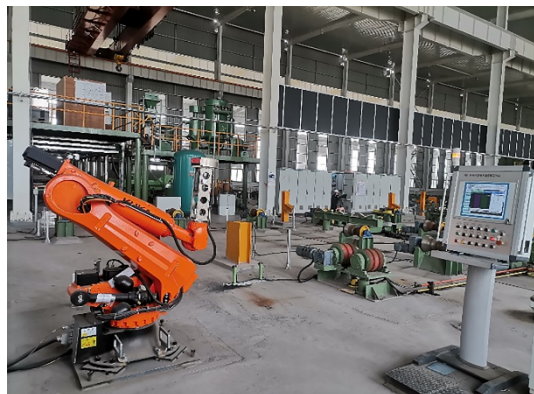


图1 机器人管端焊缝智能打磨工作站示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the intelligent grinding workstation for the welds at the pipe ends of robots

1.1 机械设计基本结构

该系统中,机器人本体采用坐式,安装在指定的工位,打磨头机构安装在机器人六轴的法兰接头处,法兰接口处首先连接的是特制方钢,打磨电机以及激光视觉传感器都固定安装在方钢内部,测距传感器安装位置与激光视觉传感器在同一水平线上。打磨头三维模型及实际安装如图 2 所示。

1.2 电气设计基本结构

1.2.1 控制系统设计原理

电气设计部分主要控制机器人内置 PLC 和 S120 伺服电机、外设 PLC 和视觉传感器、测距传感器、操作台、电抗器等。通过外置 PLC 循环扫描的方式进行控制系统的整体控制,1 个扫描周期一般为 20~50 ms。扫描周期主要由输入采样、程序执行和刷新输出构成,PLC 控制器首先读取输入段的信

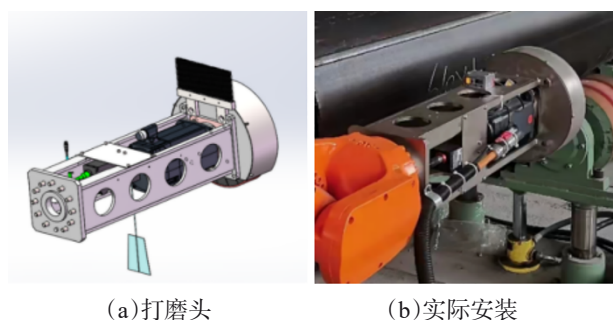


图2 打磨头整体示意

Fig. 2 Overall schematic diagram of the grinding head

号状态并存入与输入端子数目对应的寄存器中,并在下阶段的扫描周期中被重新读取。程序执行期间,地址计数器顺序执行这些指令^[10],对指令指定的输入状态寄存器、输出或内部辅助继电器、定时器、计数器、状态器的状态进行逻辑运算,运算结果通过输出指令存入对应状态的寄存器^[11],在整个周期执行完成后,计数器地址恢复到初始地址,不间断执行以上三个阶段的运行,最终实现管端焊缝智能打磨工作站的自动控制。控制界面如图3所示。



图3 控制界面示意

Fig. 3 Schematic diagram of the control interface

1.2.2 视觉传感器控制系统

为解决管端打磨作业时因焊缝不规则、成型缺陷等核心技术问题导致的寻位不稳定展开技术攻关。采用基恩士 LJ-7200 视觉传感器系列,辅以测距传感器,开发了一种扫描检测两次焊缝寻位点的方法,将视觉传感器安装在打磨机器人六轴端部,机器人带动视觉传感器和测距传感器以2次扫描焊缝的方式进行快速扫描,机器人根据传感器所采集

的待打磨焊缝信息,控制系统规划调取机器人自动打磨程序,并开展管端的自动打磨作业。该方法以工业机器人核心,配合焊缝识别,利用视觉传感器柱面物镜将激光光束扩大为条状,随后激光在目标物上产生漫射。反射光在 HSE3 CMOS 上成像,通过检测位置、形状的变化来测量位移和形状。传感器连接 EtherNet/IP/TM 单元,自动获取扫描信息。针对焊缝边缘由焊接工艺造成的压道痕迹导致的寻位不稳,可采取屏蔽以焊缝中心向左右 $\pm 3 \sim \pm 5$ mm 的方式。打磨轨迹在机器人程序中提前预制,通过 PLC 和现场网络与 EtherNet/IP/TM 单元进行连接,进行焊缝宽度、高度、咬边等信息的获取和判断,利用 2D Emostar 物镜将 405 nm 短波长激光聚焦,从而在 LJ-Navigator2 中清晰地显示,如图4所示,设定扫描参数时需要在 WINCC 中调用专用软件,通过 PROFINET 连接传感器与计算机进行通信。



图4 LJ-Navigator2焊缝检测界面示意

Fig. 4 Schematic diagram of the LJ-Navigator2 interface

利用机器人精度高、柔性化的特点,提前运行到预置好的打磨轨迹和位置,进行扫描拍照,在扫描寻位过程中可实时调整机器人姿态及扫描示教点,将扫描完成的测量值同步传输至 PLC,从而实现焊缝信息在 PLC 内部进行数据运算。打磨参数在 WINCC 控制界面的工艺编程窗口中进行设置,包括机器人程序号、钢管类型、打磨速度、自动传输速度等。

1.2.3 控制单元及管理界面系统

控制单元包括硬件及软件部分。硬件部分 PC

上位机采用研华 UNO-2484G 工业计算机,下位机采用西门子 1200PLC(可编程控制器)控制,S210 伺服控制打磨电机,PLC 与 KUKA 机器人、基恩士视觉传感器采用双向 PROFINET PN 总线进行通信及数据传输。

软件部分主控软件采用 WinCC7.5SP2 定制开发,建立工艺数据库,视觉传感器测量数据,传输数据的实时传输,实现打磨工艺数字可控化调用、机器人实时状态显示、数字通讯及报警故障识别。

工控机主画面显示部分:包括机器人、视觉传感器界面、数据管理、传输系统的运行状态,控制界面与 PLC 联机,可实时监控运行状态、设置工艺参数以及视觉传感器调用,整套系统可实现机器人、视觉传感器、传输系统三部分通讯,实现协同工作。运行管理界面是用于检查打磨与运动过程中,各运动部分传感器检测开关所处位置都在该界面有所体现,通过该界面可直观地让操作者处理简单的故障并给出判断。管理界面图 5 所示。



图5 管理界面

Fig. 5 Schematic diagram of management interface

2 基本工作流程

2.1 机器人 KRL 执行过程程序

机器人世界坐标系下,根据右手定则确定 X、Y、Z 分别为笛卡尔坐标系的三维坐标方向^[12](X 为调整打磨头高低位置,Y 调整跟踪示教点位置,Z 调整打磨深度),机器人的工具坐标的 X、Y、Z 值通过与

PLC 的信号流实时改变工具坐标值,从而改变打磨路径。机器人 KRL 程序流程如图 6 所示。

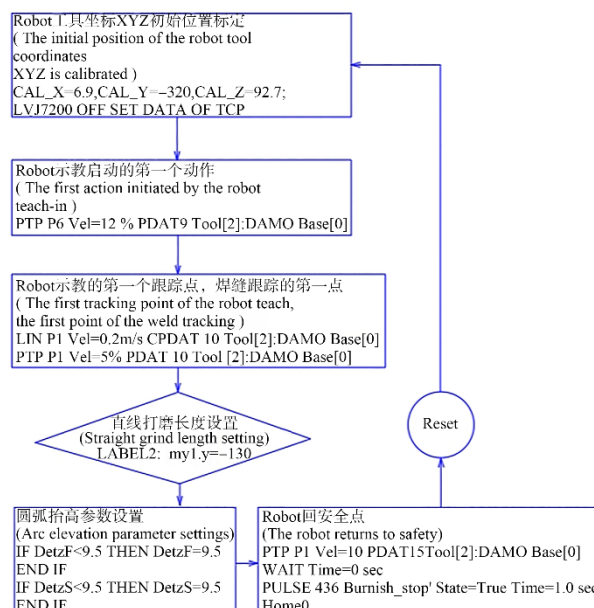


图6 KRL 程序流程

Fig. 6 Flowchart of the KRL program

2.2 打磨动态补偿算法及轨迹规划

根据 LJ-Navigator2 中检测的焊缝轮廓特征数据来计算打磨头中心运动轨迹。如果焊缝整体高度过高时,单次打磨完整条焊缝会对打磨头及机器人 6 轴带来极大的冲击,并且会减少打磨砂带的使用寿命,所以要根据焊缝的高度进行多次打磨。

2.2.1 直线打磨运动轨迹

直线打磨过程如图 7 中轨迹 1、轨迹 2、轨迹 3 所示。依据线性比例关系,利用式(1)得出每个测量圆周的截面上直线打磨头中心运动轨迹。中心轨迹方程式(±分别用于外焊缝与内焊缝)公式为:

$$X = \frac{(X_m - X_0) \times [R \pm (r + l_{\text{OFFSET}})]}{L + X_0}$$

$$Z = \frac{(Z_m - Z_0) \times [R \pm (r + l_{\text{OFFSET}})]}{L + Z_0}$$

$$L = \sqrt{(X_m - X_0)^2 + (Z_m - Z_0)^2} \quad (1)$$

式中 l_{OFFSET} 为单次打磨的补偿量; r 为打磨头半径(单位:mm); R 为钢管半径(单位:mm); (X_0, Z_0) : 钢管焊缝所在截面的圆心 O 坐标; (X_m, Z_m) : 钢管焊缝两点间连线中心点 M 坐标。打磨头中心沿不同圆截面的轨迹按照式(1)做直线往返运动,快速打磨

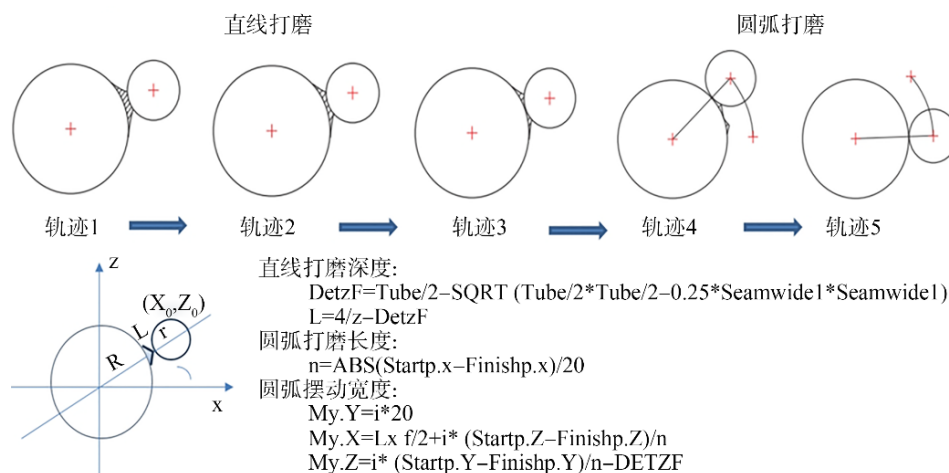


图7 内、外焊缝打磨轨迹示意图

Fig. 7 Schematic diagram of internal and external weld grinding paths

焊缝,多次打磨完成,补偿量 l_{OFFSET} 随着焊缝高度的变化逐渐削减到0。

2.2.2 圆弧打磨运动轨迹

直线打磨完成后,焊缝大部分都已被打磨掉,其余剩下边缘部分的少量焊缝,将焊缝分区成若干段,每段内采取圆弧打磨的方法将直线打磨后剩下的焊缝打磨掉。打磨头中心圆弧打磨的轨迹方程公式($\pm$ 分别用于外焊缝和内焊缝)公式如下:

$$\begin{aligned} X &= \frac{(x - X_0) \times (R \pm r)}{R + X_0} \\ Z &= \frac{(z - Z_0) \times (R \pm r)}{R + Z_0} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 (x, z) 为焊缝两侧边缘的坐标值 (X_1, Z_1) , (X_2, Z_2) 。

利用式(2)分别得出打磨头中心圆弧打磨运动轨迹的起点与终点,并且围绕钢管圆心 $O(X_0, Z_0)$ 运动,来完成一个设定段内焊缝余高的打磨。改变 Y 值,继续下一段焊缝的打磨运动,重复多次,完成整条焊缝的打磨。圆弧打磨轨迹如图7中的轨迹4、轨迹5所示。打磨方式分为直线打磨与圆弧打磨,打磨公式与轨迹与机器人打磨程序计算公式如图7所示。

2.3 打磨程序执行过程

人工按动操作台上的“启动”按钮,系统向传输辊道传递要管信号,钢管自动传输至预先设定好的停止位置后,经位置传感器检测自动停止,停止后液压辊道将钢管托起至固定高度。机器人判断钢

管到位后由HOME点向预先示教完成的示教点进行运动,距钢管外焊缝 $\pm 180 \sim \pm 200$ mm左右后,机器人到达安全点,此时转辊转动钢管,视觉传感器扫描到焊缝后转辊停止,视觉传感器开始扫描第一个寻位点,寻位过程在LJ-Navigator2界面详细体现,传感器会自动识别焊缝两侧的特征点及焊缝宽度,当第二个寻位点扫描完成后开始打磨,打磨长度根据管型不同预先设置完成,打磨过程中焊缝X、Y、Z方向可通过操作台实时干预,打磨完外焊缝后机器人按照预先设置好的轨迹继续打磨内焊缝。打磨完成后机器人返回HOME安全点,钢管运出。控制系统流程如图8所示。

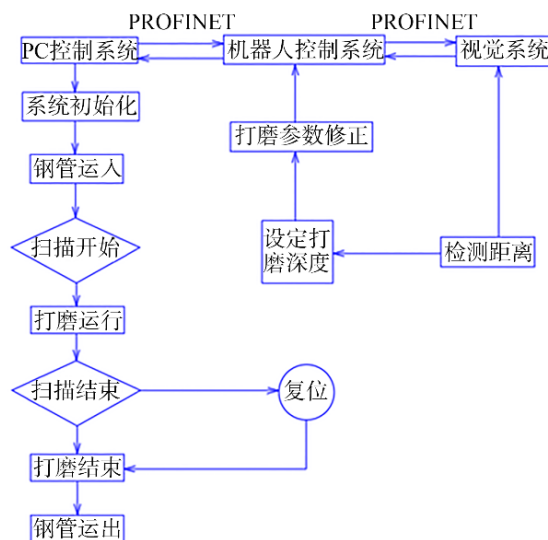


图8 控制系统流程

Fig. 8 Flowchart of control system

3 工业应用

工业现场整体布局合理,打磨机器人在钢管传输到位的情况下,本体六轴可伸展工作范围,确保工作范围延伸至钢管焊缝打磨具体位置,传输辊道由液压装置控制钢管升降,保证钢管两侧在升降后的打磨作业中始终处于水平状态。

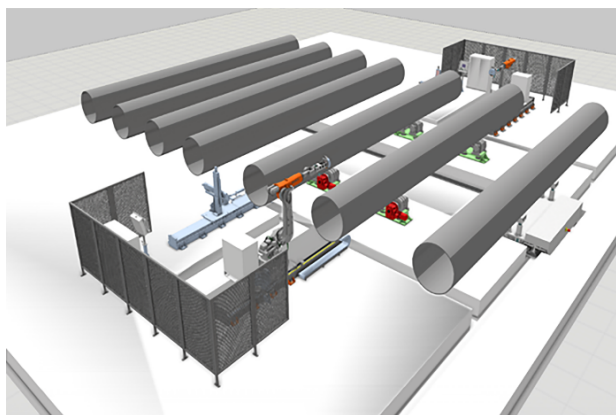


图9 虚拟仿真作业

Fig. 9 Virtual simulation assignment



图10 现场打磨作业示意图

Fig. 10 Schematic diagram of on-site grinding operations

结合 KUKA Sim4.3 虚拟仿真软件(见图9)与现场打磨作业(见图10),现场实际工况多次调试与运行试验结果表明,对于常见的钢管管径生产中,在钢管焊接后形成的管端焊缝常呈现非均匀余高(0.5~3 mm)、空间曲率突变(曲率半径 50~500 mm)及表面强反光特性、氧化皮多,导致传统二维视觉检测误差率超 15%,且人工打磨效率不足 5 件/小时的状况下,通过集成视觉定位,自适应轨迹规划与柔性化控制,实现了焊缝形貌的高精度重构(误差 $\leq$

0.12 mm)及接触力的动态补偿(波动范围 ± 1.5 N),结构光条纹投影实现焊缝形貌的亚毫米级三维重建(点云密度 $\geq 2\,000$ 点/ cm^2),结合激光测距数据补偿钢管椭圆度误差(补偿精度 ± 0.05 mm),综合检测精度提升至 0.1 mm(较单传感器方案提升 60%)。打磨误差小于 0.5 mm,具体误差数据如表 1 所示。打磨后效果如图 11 所示。

表1 打磨测试结果

Table 1 Radial error test results

管径 类型	钢管长度 /m	打磨时间 /min	打磨长度 /mm	余高误差 /mm
406	8.0	10	100(只打磨外焊)	0.3
408	8.0	10	120(只打磨外焊)	0.4
508	10.0	15	120	0.4
559	10.0	15	130	0.5
610	10.0	16	130	0.3
660	12.0	16	130	0.2
711	12.0	16	130	0.4
813	12.0	16	150	0.2
914	12.0	18	150	0.4
1 016	12.0	17	140	0.5
1 219	12.0	18	140	0.4
508	12.0	18	130	0.4
610	14.0	18	130	0.3
660	14.0	18	130	0.5
1 020	14.0	18	130	0.4
平均				0.373



图11 打磨后管端

Fig. 11 Diagram of the machined pipe end

4 结论

(1)梳理了管端打磨在复杂场景下的打磨方法及关键技术,介绍了视觉寻位、焊缝信息获取处理及扫描原理,系统运行稳定、界面简洁,通过实践作业验证,该系统在钢管管道典型工况下,对 $\varnothing 406 \sim 1\,219\text{ mm}$ 规格钢管焊缝的打磨合格率达98.7%,表面粗糙度 $Ra \leq 0.8\text{ }\mu\text{m}$,单件作业时间降至18 min内,综合效率较人工提升3倍以上。

(2)实现焊缝的智能识别,从而为焊缝打磨提供精准引导,显著提升了焊缝打磨质量和效率,降低了人工干预强度与生产成本,实现了复杂工况下的自适应能力和全流程自动作业。未来将持续优化智能算法与工业数据库,拓展装备在更多工业场景的适配性,为智能制造领域提供高效可靠的解决方案。

参考文献:

- [1] 中国钢结构协会钢管分会. 中国钢管行业“十四五”发展规划指导意见[R]. 2021.
- [2] 庄钢,陈洪琪. 我国无缝钢管产业“十三五”回顾与“十四五”发展思考[J]. 钢管, 2021, 50(5): 1-8.
ZHUANG G, CHEN H Q. Review of Development of Domestic Seamless Steel Tube Industry in 13th FYP Period and Thinking for Further Development thereof in 14th FYP[J]. Steel Pipe, 2021, 50(5): 1-8.
- [3] 国家自然科学基金委员会,工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告[M]. 北京:科学出版社, 2021.
- [4] 胡必超. 缸体缸盖铸件机器人打磨的关键技术及其应用[J]. 中国铸造装备与技术, 2024, 59(04): 24-30.
HU B C. The key technology and application of robot-grinding of cylinder block and head castings[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2024, 59(04): 24-30.
- [5] 郑博涛. 工业机器人打磨刹车片支架仿真加工[J]. 装备机械, 2024(2): 100-102.
ZHENG B T. Simulation of machining brake pad brackets using industrial robots Equip machinery [J]. The Magazine on Equipment Machinery, 2024(2): 100-102.
- [6] 习杰,李军,申勇. 工业机器人在球墨铸铁管生产线上的应用[J]. 机器人技术与应用, 2021(1): 37-40.
XI J, LI J, SHEN Y. The application of industrial robots in ductile iron pipe production lines [J]. Robot Technique and Application, 2021(1): 37-40.
- [7] 贾小宇,李宪华,徐玉杰,等. 基于MATLAB/Simulink工业机器人模糊PID阻抗控制仿真研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2024, 42(3): 1-5.
JIA X Y, LI X H, XU Y J, et al. Simulation research on fuzzy pid impedance control of industrial robots based on matlab/simulink [J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2024, 42(3): 1-5.
- [8] 唐康峻,王志刚,郭宇飞,等. 基于神经网络的打磨机器人的力/位混合控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(4): 121-125.
TANG K J, WANG Z G, GUO Y F, et al. Hybrid force/position control of grinding robot based on neural network [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(4): 121-125.
- [9] Yin J H, Liu X M, Wang Y Q, et al. Design and motion mechanism analysis of screw-driven in-pipe inspection robot based on novel adapting mechanism[J]. Robotica, 2024, 42(4): 1297-1319.
- [10] 万鹏. 火焰切割机器人工作站[J]. 品牌与标准化, 2010(2): 58.
WAN P. Flame cutting robot workstation [J]. Brand & Standardization, 2010(2): 58.
- [11] 岳鹏飞. 基于机器人的3C产品柔性生产线电气系统设计[J]. 时代汽车, 2022(7): 140-141.
YUE P F. Electrical system design of 3c product flexible production line based on robot [J]. Auto Time, 2022(7): 140-141.
- [12] 沈鹏程. 基于激光视觉的焊缝跟踪及纠偏系统[D]. 杭州:中国计量学院, 2015.
SHEN P C. Welding seam tracking and correcting system based on laser vision [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2015.