

# 基于 PLC 与机器视觉的智能码垛控制系统

余师辉<sup>1</sup>, 范黎<sup>2</sup>, 包建东<sup>1</sup>, 涂远程<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏南京 210094;

2. 苏州安可苏健康科技有限公司, 江苏常熟 215500)

**摘要:**针对高频焊管人工码垛存在的效率低、成本高及安全隐患问题, 该文设计并实现了一套基于 PLC 与机器视觉协同控制的管型材智能码垛系统。系统采用工业相机实时采集图像, 结合纹理分析算法识别焊管表面焊缝裂纹; 依托西门子 S7-1200PLC 进行核心逻辑控制, 驱动配备了自适应电磁夹具的六轴机械手, 实现对不规则钢管的稳定抓取与精准码垛; 并设计了可调节式码垛架以适应不同规格管材的分层存放。实验验证表明: 系统不良品识别准确率达 98.2%, 单管码垛周期 15 秒; 相比传统人工方式, 单班次生产效率提升约 80%, 人工成本降低 60% 以上。该系统为焊管制造业的智能化升级及大型管材高效自动化码垛提供了实践性解决方案。

**关键词:**码垛; 高频焊管; 视觉检测; PLC; 控制系统; 机械手

中图分类号: TP23

文章编号: 1000-0682(2025)06-0009-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.06.002

## Intelligent palletizing control system based on PLC and machine vision

YU Shihui<sup>1</sup>, FAN Li<sup>2</sup>, BAO Jiandong<sup>1</sup>, TU Yuancheng<sup>1</sup>

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Jiangsu Nanjing 210094, China;

2. Suzhou Ankesu Health Technology Co., Ltd., Jiangsu Changshu 215500, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of low efficiency, high cost and potential safety hazards in manual palletizing of high-frequency welded pipes, this paper designs and implements a set of intelligent palletizing system for pipe profiles based on collaborative control of PLC and machine vision. The system uses industrial cameras to collect images in real time, combined with texture analysis algorithms to identify weld cracks on the surface of welded pipes. Relying on Siemens S7-1200PLC for core logic control, it drives a six-axis manipulator equipped with adaptive electromagnetic fixtures to achieve stable grasping and accurate palletizing of irregular steel pipes. And the adjustable palletizing frame is designed to adapt to the layered storage of pipes of different specifications. Experimental verification shows that the accuracy of the system is 98.2%, the single-pipe palletizing cycle is 15 seconds, and the single-shift production efficiency is increased by about 80%, and the labor cost is reduced by more than 60% compared with the traditional manual method. The system provides a practical solution for the intelligent upgrading of the welded pipe manufacturing industry and the efficient automatic palletizing of large pipes.

**Keywords:** palletizing; high-frequency welded pipes; visual inspection; PLC; control systems; manipulator

## 0 引言

高频焊管凭借其高效率、低成本、规格多样等优

势, 广泛应用于油气输送、建筑结构等领域<sup>[1-3]</sup>。当前国内钢管制造业正面临着严峻挑战: 一方面, 产能饱和导致市场竞争白热化; 另一方面, “双碳”政策与产业结构调整推动行业深度转型<sup>[4]</sup>。在此背景下, 企业亟需通过生产流程优化实现降本增效, 提升产品竞争力。

收稿日期: 2025-06-27

第一作者: 余师辉(2001—), 男, 汉族, 江西南昌人, 硕士研究生, 控制工程, 研究方向为智能制造。

目前高频焊管的焊接、定径、测试等前道工序均已实现自动化生产,但末端码垛环节的自动化程度明显滞后,仍高度依赖人工操作。这种工艺断层带来两个关键弊端,一是人工码垛不仅效率低下、劳动强度极大,还存在显著的安全隐患<sup>[5]</sup>。二是人工搬运过程中难以避免的碰撞、刮擦等问题,易对焊管表面造成损伤,直接影响到产品的最终质量和用户满意度<sup>[6]</sup>。

为应对这一挑战,提高产品竞争力,许多企业和研究机构纷纷致力于开发自动化码垛装备。例如文献[7]采用西门子 S7 - 1200 PLC 结合那智 LP130 机器人,设计了“一机四位”码垛系统,通过视觉识别包装颜色实现袋装物料高效分拣码垛,解决了人工码垛效率低、易混批的问题。文献[8]开发自适应钢管码垛装置,结合伺服纠偏夹具,实现多规格钢管无损堆码,解决了传统钢管码垛损伤大、规格切换繁琐的行业痛点。文献[9]基于西门子 PLC 与工业机器人协同控制,通过模块化软硬件设计实现码垛轨迹优化与远程监控,解决了传统人工码垛效率低和复杂生产环境适应性差的问题。

基于上述研究背景,该研究开发了一套完整的高频焊管全自动码垛系统,该系统采用西门子 PLC S7 - 1200 作为控制核心,集成了高精度伺服定位单元、自适应电磁夹具、可调码垛架、机器视觉等,构建了一种适用于多规格高频焊管的智能码垛控制系统。该系统以长度为 2 至 8 米的高频焊管为处理对象,具备自动分拣、精确抓取与智能堆垛三大核心功能,有效解决了传统人工码垛存在的劳动强度大、作业效率低以及可能造成焊管表面损伤等关键问题。

## 1 系统总体设计

该系统主要由六大部分组成:视觉检测模块、输送定位机构、码垛机械手、智能码垛架、PLC 控制系统和安全防护装置。

(1)视觉检测模块采用高精度工业相机实时采集图像数据,通过图像处理算法实现焊管表面的缺陷检测。

(2)输送与定位模块由双滚筒输送线和推进装置构成,配合磁感应传感器实现焊管的精确运输与定位。

(3)机械手码垛模块采用六轴机械手,机械手末端安装自主设计的自适应磁吸夹具,可依据 PLC 发出的型号指令动态调整电磁力强度,以适应不同

管径,确保抓取的稳定性。

(4)智能码垛架由滚筒传送带和夹紧立柱构成,由伺服电机驱动。PLC 根据焊管信息自动调用预设的伺服电机参数,调整立柱间距,精准控制垛堆空间,进一步确保码垛的稳定性。

(5)系统的控制中枢采用西门子 PLC 配合威纶通触摸屏,通过 Profinet 协议实现底层设备的高速通信,与机械手之间采用抗干扰能力强的 Modbus RTU 协议进行实时数据交互。

(6)安全模块配备急停按钮和区域激光扫描仪,在检测到人员闯入时能够立即暂停机械手运行,防止意外碰撞事故的发生。具体机械结构如图 1 所示。

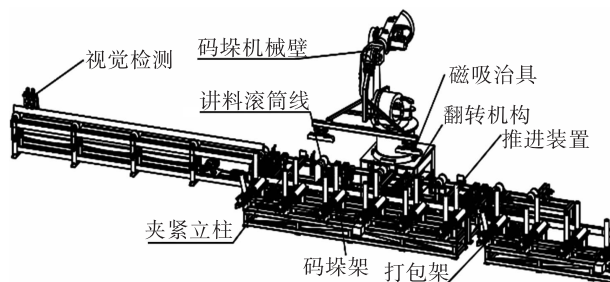


图 1 码垛线结构布局图

## 2 硬件设计

该系统的硬件架构由控制层、执行层和检测层协同构成。各环节通过工业通信网络实现数据交互,确保钢管的输送、定位、检测及码垛的全流程自动化运行。系统硬件整体采用工业级设计标准,全部核心部件均达到 IP65 防护等级,配备专业电磁兼容设计和模块化连接结构,能够适应焊接车间的恶劣环境<sup>[10]</sup>。

### 2.1 控制系统

电气系统采用三相 380 V 主电源和 24 V 直流控制电源分离设计,关键信号线路采用专业屏蔽处理,有效防止电磁干扰。控制层采用西门子 S7 - 1200 系列 PLC 作为核心控制单元,依托其 0.1  $\mu\text{s}$  级的高速指令处理能力,实现精准的实时控制<sup>[11]</sup>。各类传感器信号和视觉检测模块的识别结果通过输入接口传输至 PLC 进行处理分析。PLC 作为整个控制系统的核心,既要输入信号进行快速响应和逻辑判断,还要与 HMI 人机交互界面和机械手控制器进行数据交互与指令传输,并通过数字量输出驱动伺服电机、变频器和指示灯等执行机构。码垛输送线总体硬件架构如图 2 所示。

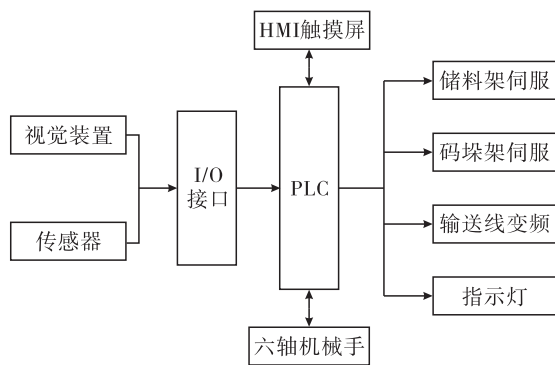


图2 系统硬件架构图

## 2.2 执行机构

执行层主要由工业机械手和输送定位机构两大部分组成。工业机械手采用库卡 KR 360 R2830 六轴机器人,该设备拥有 360 kg 的有效负载能力和  $\pm 0.05$  mm 的重复定位精度<sup>[12]</sup>。机械手末端采用自主研发的电磁吸盘装置,该装置通过弹簧缓冲机构实现柔性接触,确保治具可紧密贴合管件表面。吸盘内置分区可控电磁铁,根据 PLC 指令自动调节吸附区域与磁力强度,确保平面和弧面都能做到稳定抓取,抓取治具如图 3 所示。



图3 磁吸治具

输送线采用汇川 IS620N 系列伺服驱动器和伺服电机配合,实现管件的高精度运送与定位。输送系统设计了自适应码垛架,如图 4 所示。该码垛架

可依据管件的码垛需求智能调节垛堆间距,并通过可调角度的竖向滚筒来优化垛形结构,确保码垛稳定可靠。

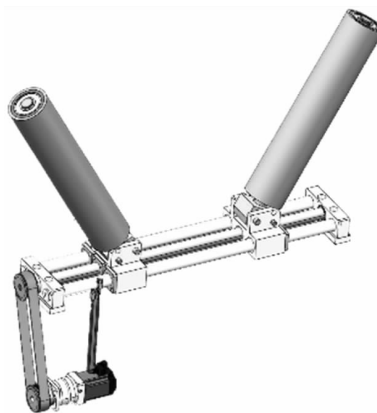


图4 打包架机械结构图

## 2.3 检测机构

检测层包含定位检测、视觉检验和安全监测。在定位方面,系统配置了高精度磁感应接近开关和激光测距仪,分别用于动作触发和位置补偿。视觉检测系统搭载工业相机,能够实时采集管件图像并传输至焊缝检测系统。安全监测系统采用符合国际标准的安全激光扫描仪和双通道急停回路,配合完善的气动系统监测功能,全方位保障设备及人员作业安全。

## 3 软件设计

### 3.1 I/O 分配

I/O 模块作为 PLC 控制系统与现场设备的核心接口,负责实时采集各类传感器信号,同时向执行机构输出控制指令。根据码垛系统的输入输出需求,对 PLC 的 I/O 端口进行如表 1 所示的分配。

表1 I/O 分配表

输入	功能	输出	功能
I0.0	设备急停	Q0.0	停止指示灯
I0.1	启动按钮	Q0.1	运行指示灯
I0.2	运行准备	Q0.2	手动指示灯
I0.3	停止按钮	Q0.3	启动指示灯
I1.0	1#取料伺服原点	Q3.0	打包线电机
I1.1	2#取料伺服原点	Q3.1	码垛线电机
I1.2	码垛伺服原点	Q3.2	1#滚筒线电机
I1.3	打包伺服原点	Q3.3	2#滚筒线电机
I2.0	取料气缸上限位	Q3.4	废料气缸
I2.1	取料气缸下限位	Q3.5	1#取料气缸
I2.3	取料伺服前进限位	Q3.6	斜推气缸
I2.4	滚筒线物料到达	Q3.7	推进气缸
I2.5	储料架物料到达	Q4.0	2#取料气缸
I2.6	码垛线有物料	Q4.1	快换盘气缸锁

续表 1

输入	功能	输出	功能
I2.7	码垛线物料清空	Q4.2	快换盘气缸开
I3.0	磁吸治具无磁	Q4.3	允许机器人取料
I3.1	磁吸治具有磁	Q4.4	停止机器人
I3.2	视觉检测合格	Q4.5	设备准备完成
I3.3	视觉检测不合格	Q4.6	充磁
I3.5	废料管到位	Q4.7	退磁
I4.0	物料到打包位	Q5.0	解锁
I4.0	机械手已到取料位	Q5.2	机械手准备取件
I4.1	机械手已到放料位	Q5.3	机械手取件离开
I4.2	机械手码垛已完成	Q5.4	机械手放件离开
/	/	Q5.5	机器人暂停

### 3.2 工艺流程

完成高频焊接的成品管,由进料滚筒线运送至质检区域,工业相机拍摄焊管表面图像并传输至缺陷检测系统进行质量判定。检测结果通过工业以太网发送至 PLC 控制器,合格品继续输送至码垛工位,不良品则被气动分拣装置自动剔除至废料区。合格品到达码垛工位时,磁感应传感器传输“管件到位”信号至 PLC,PLC 控制气动翻转装置调整焊管方位,确保其平整面朝下,完成焊管位姿的初步调整;随后由伺服电机控制的推杆装置,按预设轨迹将焊管推送至机械手抓取点,完成精准定位。

管件到达抓取点位后,PLC 向机械手发出码垛指令,机械手通过末端的磁吸治具抓取焊管,并按预编程的层叠算法执行码放。当垛堆达到设定层数时,系统触发码垛架滚筒线的电机,将满载垛堆输送至打包区,生产工艺流程如图 5 所示。

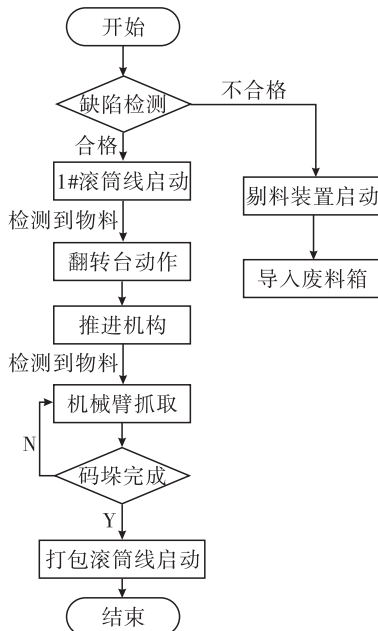


图 5 码垛工艺流程图

系统还对接了工厂 MES 系统,可以实现生产数据的实时上传和管理,为企业的智能化生产管理提供有力支持。

### 3.3 视觉检测

在现代工业生产中,产品质量是提升企业核心竞争力的关键要素。为实现全自动化生产的需求,系统采用基于纹理特征的焊缝缺陷检测方法,通过纹理特征定位焊缝区域,完成质量判定。缺陷检测由图像采集、预处理、缺陷定位、质量判定四个环节组成。

图像采集阶段,由于金属焊管表面的强反光特性,实际采集到的图像会受此干扰,遮蔽图像的纹理信息,采集到的原始图像如图 6 所示。

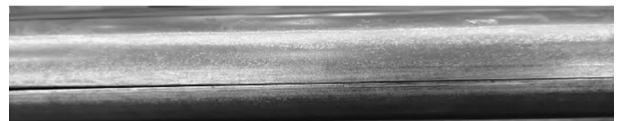


图 6 原始图像

为解决这一问题,首先需要在预处理阶段对原始图像进行高斯模糊平滑处理,生成反光抑制参考图<sup>[13]</sup>。再通过加权融合的方式(1)确保仅抑制高频反光而保留焊缝结构。

$$I_{mix} = (1 - \alpha) \cdot I_{ORG} + \alpha \cdot G_{\sigma} * I_{ORG} \quad (1)$$

其中:权重系数  $\alpha$  通过 HSV 空间的亮度分量确定,亮度大于 220 时  $\alpha$  取 0.7,反之  $\alpha$  取 0.1。对融合后的图像进行光照补偿和图像增强,进一步均衡光照分布并突出纹理细节。最终结果如图 7 所示。



图 7 预处理图像

对预处理后的图像进行焊缝定位,计算  $35 \times 35$  窗口的灰度标准差(2),得到图像的纹理分布矩阵。

$$T(x, y) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i \in \Omega} (I(i, j) - \mu_{\Omega})^2} \quad (2)$$

其中： $\Omega$ 为当前像素为中心的  $35 \times 35$  像素窗口， $\mu_{\Omega}$ 为窗口平均灰度值。由于焊缝区域存在规律性焊接纹理，其标准差显著高于背景金属。因此通过沿  $y$  轴方向投影纹理强度：

$$P(y) = \sum_x T(x, y) \quad (3)$$

来凸显焊缝的峰值带，对  $P(y)$  进行高斯平滑处理后，在其曲线上进行阈值分割，取最先超过阈值和最后超过阈值的点作为 ROI 区域的起点和终点。定位效果如图 8 所示。



图 8 ROI 区域定位图

在 ROI 区域采用更小的滑动窗口计算每个像素位置的局部纹理特征，并根据纹理特征矩阵，绘制焊缝纹理强度分布的彩色图像，蓝色代表低纹理，红色代表高纹理。绘制结果如图 9 所示。



图 9 纹理特征分布图

最后在原始图像的基础上对检测到的缺陷纹理进行标注。通过形态学处理增强缺陷区域的连通性，并结合几何形状特征滤除噪声干扰，生成标准后的缺陷检测结果如图 10 所示。

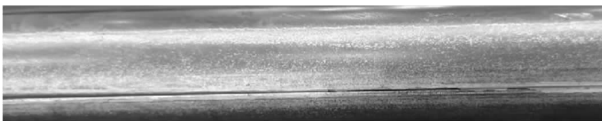


图 10 缺陷检测结果

### 3.4 人机交互界面

基于威纶通触摸屏和 EasyBuilder Pro 组态软件设计 HMI 界面，实现运行状态以及关键参数的监控与控制。HMI 界面能够直观地展示设备状态信息，包括机械手位置、电机转速、气缸状态等。当检测到设备状态异常或操作不当时，会通过弹窗警示操作人员。实际生产过程中操作人员可以通过下拉菜单选择焊管产品型号，系统自动匹配预设的机械手轨迹、码垛层数及电磁夹具吸力参数，实现快速换产。提供手动操作面板，允许对输送线电机、气缸等执行机构单独启停，便于故障排查或临时工艺调整。HMI 界面如图 11 所示。

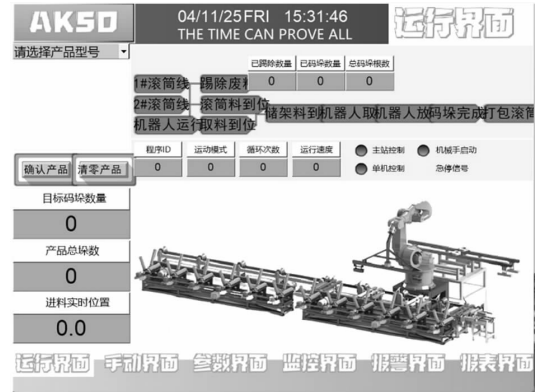


图 11 人机交互界面

## 4 系统测试

为了验证系统的可行性在设备安装调试完成之后，进行现场码垛测试，设备运行实况如图 12 所示。



图 12 设备码垛测试

测试过程中对多种高频焊管进行了实际码垛测试，主要测试设备的码垛效率以及稳定性，测试结果如表 2 所示。实际运行结果表明，单管码垛时间控制在 15 秒左右，相比传统人工运行效率大大提升。机械手运行稳定可靠，电磁夹具抓取稳定，未发生管材滑落或定位偏差问题，视觉检测结果均符合要求未出现错检漏检情况。

表 2 码垛测试结果

类型	规格	打包模式	打包时间/s
圆管	140 × 2.5	3 支 × 4 层	186
方管	110.3 × 110.3 × 3.2	5 支 × 5 层	370
矩形管	40 × 150 × 2	3 支 × 12 层	557
平椭圆	50 × 200 × 2.5	2 支 × 10 层	290
面包管	50 × 140 × 2	4 支 × 10 层	586
立柱管	60.9 × 195.6 × 2.5	2 支 × 10 层	307
梯形管	60 × 150 × 2.5	3 支 × 8 层	369

### 5 总结

该文针对高频焊管人工码垛效率低、成本高及安全隐患等问题,设计并实现了一套基于 PLC 与机器视觉协同控制的管型材智能码垛系统。系统采用西门子 S7-1200 PLC 作为核心控制器,集成高精度工业相机、六轴机械手、自适应电磁夹具及可调式码垛架,实现了焊管的全自动检测、分拣与码垛作业。

研究重点包括高效的硬件架构设计、精准的视觉缺陷检测算法以及可靠的 PLC 逻辑控制策略。实验验证表明,系统不良品识别准确率达到 98.2%,码垛效率相比人工提升了 80%,大幅提升了生产线的自动化水平。此外,该系统支持多规格焊管柔性化生产,并通过模块化设计降低维护成本,具有较高的工业应用价值。

该研究成果为焊管制造行业的智能化升级提供了可行方案,并为后续大型管材堆垛机器人的优化研究奠定了技术基础。未来可进一步扩展系统功能,实现更复杂场景下的自适应码垛与智能调度优化。

#### 参考文献:

[1] 胡松林. 低碳经济带给焊管行业的思考[J]. 钢管, 2022,51(04):1-4.

[2] 李远征,毕宗岳,陈浩明,等. N80 钢级直缝高频焊石油套管的研制[J]. 焊管,2022,45(8):35-39.

[3] Gavriilidis I, Stamou A G, Palagas C, et al. Collapse Testing and Analysis of High Frequency Welded (HFW) Steel Pipes [Z]. 2024-09-23.

[4] Elhouar S, Terreno S. Leveraging advances in automation

to benefit the construction industry in the structural steel sector[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2022, 1218(1): 012008.

[5] 王祥傲,郭建勇,苏鹏,等. 基于物联网和 PLC 的物料分拣码垛监控系统设计[J]. 衡水学院学报,2022,24(4):11-16+28.

[6] 白玉田. 基于 PLC 技术控制的太阳能电池板智能生产线产品故障检测研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2025(3):71-75+80.

[7] 吴健辉,黄德启. 基于 PLC 和那智机器人的码垛输送线控制系统设计[J]. 现代电子技术,2023,46(6):175-181.

[8] 周磊,张礼华,陈景铭,等. 基于 PLC 的可降解塑料片材成型自动化生产线设计[J]. 机床与液压,2024,52(10):116-122.

[9] 牛大伟. 基于 PLC 的工业码垛机器人控制系统设计[J]. 信息记录材料,2024,25(7):122-124+127.

[10] 上海人民企业集团水泵有限公司. 一种 IP65 防护等级的高效节能降温电气控制柜:CN202211065786.6 [P]. 2025-05-16.

[11] 吴健辉,黄德启. 基于 PLC 和那智机器人的码垛输送线控制系统设计[J]. 现代电子技术,2023,46(6):175-181.

[12] Celek O E, Yurdakul M, İÇ Y T. Havacılık Endüstrisi Proseslerine Uygun Robotların Seçimi İçin Çok Ölçütlü Bir Karar Verme Modelinin Geliştirilmesi [J]. Politeknik Dergisi, 2023: 1-1.

[13] 李浩,支殿楠,张胜利,等. 基于机器视觉的码垛成品烟箱表面缺陷检测模型研究[J]. 制造业自动化, 2023,45(11):10-14+21.

(上接第 8 页)

#### 参考文献:

[1] 周如好. 液体火箭发动机测试技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2021: 125-130.

[2] 蓝箭航天空间科技股份有限公司. 朱雀二号液氧甲烷火箭发射报告[R]. 北京:蓝箭航天空间科技股份有限公司, 2023.

[3] 中国航天科工集团有限公司. 70 吨级液氧甲烷发动机试车技术总结[R]. 北京:中国航天科工集团有限公司, 2023.

[4] E. I. du Pont de Nemours and Company. Vertrel XF Technical Data Sheet[Z]. Wilmington: E. I. du Pont de Nemours and Company, 2021.

[5] 帝舍智能科技(武汉)有限公司. 一种开放式清洗通道及设置开放清洗通道的清洁剂:CN219982802U [P]. 2023-11-10.

[6] 西安交通大学. 火箭尾焰污染处理技术:CN201910256347.8[P]. 2019-03-29.

[7] 陕西蓝箭航天技术有限公司. 姿轨控液体火箭发动机试车后处理多模式清洗系统及方法:CN202410959583.X[P]. 2024-11-12.

[8] 西北工业大学. 液体火箭发动机内壁煤油清除数值模拟方法:CN202211247934.6[P]. 2022-10-18.

[9] 汪兴,程金石,王德权,等. 发动机缸体清洗机可视化监控系统[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(04):123-125.

[10] 蓝箭航天空间科技股份有限公司. 闭式清洗液回收系统:CN202223456789.3[P]. 2022-12-20.

[11] 中国航天科技集团第六研究院. 130 吨级可重复使用液氧煤油发动机试验报告[R]. 西安:中国航天科技集团第六研究院, 2024.