

面向修井作业管杆举升的自动识别与智能抓取系统研究

李新海

辽河油田分公司辽河工程技术分公司工程技术研究所

DOI:10.32629/jpm.v7i6.8944

[摘要] 本文旨在设计并实现一套面向修井作业管杆举升的高效、精准自动识别与智能抓取系统，以解决当前修井作业中人工操作效率低、劳动强度大及安全风险高等问题。通过综合运用图像识别、模式识别算法以及机械设计理论，对管杆的特征进行分析，并优化识别算法与抓取机构设计。研究发现，所提出的自动识别算法能够在复杂工况下实现高精度的管杆识别，智能抓取系统可有效适应不同规格管杆并确保抓取过程的稳定性。研究表明，该系统显著提升了修井作业管杆举升环节的自动化水平，为石油开采行业的安全生产与效率提升提供了技术支持。

[关键词] 修井作业；管杆举升；自动识别；智能抓取

Research on an Automatic Recognition and Intelligent Grasping System for Pipe Rod Lifting in Well Repair Operations

Li Xinhai

Engineering Technology Research Institute, Liaohe Engineering Technology Branch, Liaohe Oilfield Company

[Abstract] This study aims to design and implement an efficient, precise automatic recognition and intelligent grasping system specifically tailored for pipe rod lifting during well repair operations, addressing current challenges such as low operational efficiency, high labor intensity, and significant safety risks associated with manual tasks. By integrating image recognition, pattern recognition algorithms, and mechanical design principles, the study analyzes pipe rod characteristics and optimizes both recognition algorithms and grasping mechanism designs. Results demonstrate that the proposed automatic recognition algorithm achieves high-precision identification under complex operating conditions, while the intelligent grasping system effectively adapts to various pipe rod specifications and ensures stable handling performance. The research confirms that this system significantly enhances automation levels in pipe rod lifting processes, providing technical support for improving safety and operational efficiency in the petroleum extraction industry.

[Key words] Well repair operation; Pipe and rod lifting; Automatic identification; Intelligent gripping

引言

修井作业作为石油开采过程中不可或缺的环节，其效率与安全性直接影响油田的整体生产效益。在传统的修井作业中，管杆举升通常依赖人工操作或半机械化设备完成，这种方式不仅效率低下，还存在显著的劳动强度和安全风险。近年来，随着自动化技术的快速发展，国内外学者在修井作业自动化领域取得了多项研究成果。当前修井作业管杆举升环节在自动识别与智能抓取方面仍存在诸多技术瓶颈。如在智能抓取方面，现有系统的抓取机构设计通常较为单一，难以适应不同规格和形状的管杆，导致抓取稳定性和可靠性不足。此外，复杂工况下的外部干扰因素（如振动、光线变化等）进一步加剧了上述问题。这些技术缺口不仅限制了修井作业自动化水平的提升，也对作业效率和安全性构成了潜在威胁。因此，开展面向修井作业管杆举升的自动识别与智能抓取系统研究，旨在通过优化识

别算法和改进抓取机构设计，解决上述关键问题，为修井作业自动化提供技术支持。该研究对于提高作业效率、降低劳动强度以及保障作业安全具有重要意义。

1. 修井作业管杆举升现状分析

1.1 现有管杆举升方式存在的问题

首先，人工举升方式因高度依赖人力操作，导致作业效率低下，尤其是在处理大直径或长长度管杆时，单靠人力难以满足快速举升的需求。此外，人工举升过程中由于操作人员的体力限制和技术水平差异，容易出现举升不稳定的情况，进而影响整体作业进度。其次，机械举升方式虽然在一定程度上缓解了人工举升的不足，但仍存在诸多问题。例如，在人工举升过程中，因操作不当引发的管杆滑落事故屡见不鲜；而在机械举升中，设备故障或操作失误可能导致重大安全事故，直接威胁作业人员的生命安全。

1.2 自动化需求迫切性

通过引入先进的自动识别与智能抓取技术，可实现管杆举升过程的无人化操作，大幅缩短作业时间并减少人为因素对效率影响。其次，自动化系统在保障人员安全方面具有不可替代的作用。通过采用智能化控制技术，自动化系统能够在复杂工况下实时监测举升状态并自动调整运行参数，有效避免因设备故障或操作失误引发的安全事故。最后，自动化系统的引入还有助于降低生产成本。一方面，自动化设备能够减少人工干预，降低人力成本；另一方面，其高效稳定的运行特性有助于减少因设备故障或操作失误导致的经济损失。

2. 自动识别系统研究

2.1 管杆特征分析

油管通常呈现为圆柱形结构，其外径和壁厚根据作业需求存在一定变化范围，这种几何特性为基于图像处理的识别算法提供了基础信息。此外，管杆表面可能因长期使用而存在不同程度的磨损或腐蚀，这些表面纹理变化增加了识别难度，但同时也为模式识别提供了额外的特征参数。通过对多种管杆样本的统计分析，可确定用于自动识别的关键特征参数，这些参数不仅反映了管杆的基本物理属性，还为后续识别算法的设计提供了必要的技术支持。

在材质方面，管杆多采用高强度合金钢制造，其反射率和导热率等光学与热学特性在不同环境下表现出一定的稳定性，这为利用红外成像或其他传感器技术进行辅助识别提供了可能性。同时，管杆连接部位的螺纹结构作为一种独特的几何特征，也可作为识别的重要依据。通过对上述特征的全面分析，可以构建一个多维度的特征空间，从而提高自动识别系统的准确性和鲁棒性。

2.2 识别算法选择

传统的模板匹配算法因其简单直观的特点，在早期研究中被广泛应用于工业自动化领域。然而，该算法对光照变化和背景干扰较为敏感，难以满足复杂工况下的识别需求。相比之下，基于机器学习的识别算法，能够通过训练过程学习到管杆的关键特征，并在一定程度上克服环境因素的影响。特别是在处理高维度数据时，深度学习算法表现出显著的优势。例如，卷积神经网络（CNN）在图像分类和目标检测任务中展现卓越的性能，能够有效提取管杆表面的纹理和形状特征。

综合考虑算法的准确性、实时性和抗干扰能力，选择卷积神经网络作为核心识别算法。其主要优势在于：首先，CNN通过卷积层和池化层的堆叠结构，能够自动提取管杆图像中的局部特征，并逐步抽象为高层语义信息；其次，该算法对输入数据的尺度变化和噪声干扰具有较强的适应性。此外，近年来提出的轻量化CNN模型进一步提升了算法的运算效率，使其更适合部署在嵌入式平台上，满足实时性要求。

2.3 算法优化与实现

尽管卷积神经网络在管杆识别任务中表现出良好的性能，但在实际应用中仍面临诸多挑战，为应对这些复杂工况，对所选算法进行多项优化改进。首先，在数据预处理阶段，采用直

方图均衡化和对比度增强技术，以缓解光线变化对图像质量的影响。其次，引入注意力机制，使模型能够重点关注管杆的关键区域，从而抑制背景噪声的干扰。此外，针对管杆表面缺陷的多样性问题，通过数据增强技术扩充训练集，以提高模型的泛化能力。

在算法实现方面，首先采集大量管杆图像作为训练集，并对其进行标注；其次，构建一个包含多个卷积层、池化层和全连接层的CNN模型，并使用标注数据对其进行端到端训练；最后，通过迁移学习技术微调预训练模型，以进一步提升其在管杆识别任务中的性能。相关研究表明，优化后的CNN算法在管杆识别任务中的准确率达到了95.3%，且单次识别时间控制在100毫秒以内，满足实时性要求。

3. 智能抓取系统研究

3.1 抓取机构设计

提出一种基于多自由度机械臂的抓取机构设计方案，该方案由底座、升降机构、旋转机构、摆动机构以及末端执行器组成。其中，底座提供整体支撑，并通过升降机构实现抓取高度的调节；旋转机构和摆动机构则用于调整抓取角度和姿态，以满足复杂的作业环境要求。末端执行器作为直接与管杆接触的部分，采用可调节式夹持结构，通过液压缸驱动实现夹紧与释放动作。这种设计不仅能够适应不同直径的管杆，还能够抓取过程中提供足够的接触面积，从而减少管杆表面的损伤风险。此外，抓取机构的运动方式采用了复合运动模式，即通过多关节协同工作实现三维空间内的精确定位，确保抓取操作的准确性和稳定性。

另外还结合有限元分析方法对其关键部件进行了强度校核。分析结果表明，在最大负载条件下，抓取机构主要承载部件应力分布均匀，且未超过材料许用应力范围，验证了设计合理性。同时，考虑到修井作业现场的空间限制，抓取机构的整体结构被设计为紧凑型，以减少占地面积并提高作业灵活性。

3.2 抓取力控制

抓取力过大会导致管杆表面损伤甚至变形，而抓取力过小则可能引发管杆脱落，从而影响作业的安全性和效率。为此，通过对管杆重心、重量等参数的详细分析，建立了抓取力计算模型，以确定合适的抓取力范围。具体而言，抓取力的大小主要取决于管杆的质量、长度、材质以及抓取点的位置分布。在实际作业中，管杆的质量和长度可通过传感器实时测量，而材质特性则可通过数据库查询获得。基于这些参数，采用静力学平衡方程计算理论抓取力，并结合安全系数进行修正，以确保抓取过程的可靠性。

为实现抓取力的精确控制，选用高精度的力传感器作为反馈装置。该传感器安装在末端执行器的夹持部位，能够实时监测抓取力的变化并将数据传递至控制系统。控制系统根据预设的抓取力阈值对液压缸的输出压力进行动态调节，从而实现抓取力的闭环控制。实验结果表明，采用上述方法后，抓取力的控制精度可达到±5%以内，有效避免因抓取力不当导致的管杆损坏或脱落问题。此外，为提高系统的鲁棒性，还引入自适应

算法,该算法能够根据抓取过程中的实际情况自动调整抓取力参数,进一步提升了系统的稳定性和可靠性。

3.3 稳定性分析

由于修井作业现场环境复杂,外部因素如振动、风力以及操作过程中的冲击载荷均可能对系统的稳定性造成不利影响。因此,对抓取系统的稳定性进行了全面分析,并提出相应的保障措施。首先,针对振动问题,在抓取机构的设计中采用减振支座和柔性连接技术,以降低外部振动对抓取过程的干扰。实验结果表明,这些措施显著提高系统在动态载荷下的稳定性,抓取成功率从 85% 提升至 95% 以上。

其次,为应对风力对抓取系统的影响,引入风载荷计算模型,并根据实际作业环境的风速数据对抓取力进行了补偿调整。具体而言,当风速超过设定阈值时,控制系统会自动增加抓取力,以确保管杆在风载作用下的稳定性。此外,为防止因操作不当导致的意外脱落,还在抓取机构中设置双重锁定装置,该装置能够在抓取完成后自动锁定夹持部位,从而进一步提高系统的安全性。

最后,通过仿真模拟和现场试验对抓取系统的稳定性进行验证。仿真结果表明,在极端工况下,抓取系统仍能保持较高稳定性,其最大位移量不超过允许范围。现场试验数据则显示,采用上述稳定性保障措施后,抓取过程的失败率降低了约 30%,充分体现了本研究在提升抓取系统稳定性方面的有效性。

4. 实验验证

4.1 实验方案设计

为全面验证面向修井作业管杆举升的自动识别与智能抓取系统的性能,设计详细实验方案。实验目的旨在评估系统在复杂工况下的识别精度、抓取稳定性及整体运行效率,同时验证其在实际应用中的可靠性和适应性。实验样本选取了多种不同规格和材质的管杆,包括直径为 60mm 至 150mm 的常见类型,以覆盖实际作业中可能遇到的多样化需求。实验步骤分为三个阶段:首先进行系统校准与参数初始化,确保各设备处于最佳工作状态;其次,在受控条件下对单个管杆样本进行多次识别与抓取操作,记录关键性能指标;最后,在模拟复杂工况下重复上述操作,以评估系统的适应性。

4.2 实验数据采集

实验过程中,重点采集自动识别系统的识别准确率、识别速度,以及智能抓取系统抓取成功率、抓取时间等相关数据,以确保实验结果科学性和可靠性。对于自动识别系统,识别准确率定义为正确识别管杆特征的次数与总识别次数的比值,而识别速度则通过记录单次识别任务的平均耗时来评估。实验结果显示,理想条件下,系统的识别准确率达到 95% 以上,平均识别时间为 0.8 秒;在复杂工况下,识别准确率仍能保持在 90% 左右,但识别时间略有增加,平均为 1.2 秒。对于智能抓取系统,抓取成功率定义为成功抓取并稳定举升管杆的次数与总抓取次数的比值,而抓取时间则包括抓取机构的启动、闭合及举升全过程的时间消耗。实验结果表明,抓取成功率在不同规格管杆中均超过 92%,平均抓取时间为 3.5 秒。此外,通过

力传感器采集的数据显示,抓取力控制精度在 $\pm 5\%$ 以内,有效避免因抓取力过大或过小导致的管杆损坏或脱落问题。所有数据采集过程均经过多次重复验证,以确保数据的真实性和准确性。

4.3 实验结果分析

通过对采集到的实验数据进行分析,对自动识别与智能抓取系统的性能进行了全面评估,并将其与现有同类系统进行了对比。实验结果表明,本系统在识别精度和抓取稳定性方面均达到了设计要求,特别是在复杂工况下表现优异。与现有系统相比,本系统在识别准确率上提升了约 8%,在抓取成功率上提升了约 5%,且整体运行效率提高了近 15%。这些优势主要得益于优化后的识别算法和智能抓取机构设计。例如,针对光线变化和背景干扰问题,提出的自适应识别算法显著提高了系统的抗干扰能力;同时,基于力反馈控制的抓取机构设计有效提升了抓取过程的稳定性和安全性。然而,实验中也发现了一些问题,例如在极端条件下系统性能仍存在一定波动。针对这些问题,提出了改进措施,包括进一步增强抓取机构的抗干扰能力,以及引入实时监控以动态调整系统参数等。总体而言,实验结果充分验证了本系统在修井作业管杆举升环节中的可行性和优越性,为其推广应用奠定了坚实基础。

5. 结论

(1) 本文聚焦于修井作业管杆举升环节,设计并实现了一套面向修井作业管杆举升的自动识别与智能抓取系统。该系统通过集成先进的图像识别算法、智能抓取机构设计以及精确的抓取力控制技术,显著提升了修井作业中管杆举升的自动化水平。

(2) 本文优化传统识别算法,使其在光线变化、背景干扰等复杂工况下仍能保持高精度的识别能力;通过对抓取力的精确控制和稳定性分析,有效避免了因抓取力不当导致的管杆损坏或脱落问题,进一步提升系统的可靠性。

(3) 未来的研究可改进智能抓取机构的设计,增强其对特殊材质和形状管杆的处理能力;优化设计方案和选用低成本材料,降低系统的整体成本,提高其经济性。这些研究方向的深入探索将为修井作业自动化技术的全面发展提供新的思路和动力。

[参考文献]

- [1]杨希军;刘垚;赵东;易春飏;陈森;白晓弘;徐洪兵;郭登明. 自动化修井机杆管自动接送装置设计与分析[J].石油矿场机械,2023,52(6):39-46.
- [2]安然.修井作业过程中油管抓取移运机器人研究[J].化工设计通讯,2021,47(4):24-25.
- [3]于振祥;曲永哲;聂永晋;张敬.自动化智能化小修作业装备设计开发探讨[J].设备管理与维修,2022,(17):148-151.
- [4]刘兴东.修井井口机械自动化技术在油田管理的应用研究[J].中国设备工程,2024,(4):80-82.
- [5]李顺治.修井作业过程中油管抓取移运机器人的分析[J].科技资讯,2020,18(2):66-66.