

深海钻探管柱扶持装置自动控制系统的 设计与分析

高洁云^{1,2,3}, 刘晓林^{1,2,3*}, 陈永智⁴, 王林清^{1,2,3}, 和国磊^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质学会自动化智能化钻探装备创新基地, 河北 廊坊 065000; 3. 中国地质调查局深部探测钻探装备技术创新中心, 河北 廊坊 065000; 4. 一汽-大众汽车有限公司成都分公司, 四川 成都 610199)

摘要: 深海钻探中钻井船或平台在月池进行管柱收放作业时, 为避免管柱与钻台或月池机构发生磕碰, 设计了一种具备双层液压缸驱动辊子机构、可在月池区有效限制约束管柱径向位移、缓冲碰撞作用力的管柱扶持装置。本文主要介绍了该装置的自动控制系统, 该系统为提升管柱扶持稳定性与接箍通过性, 同时为应对复杂作业工况, 提出了3种管柱接箍识别方案设计; 通过搭建PLC为主控设备、HMI为上位机的硬件系统, 结合PLC程序主-子程序设计和HMI界面设计, 实现了多种不同规格的管柱在收放过程自动扶持管体与避让接箍等功能设计。样机经厂内联调试验, 成功通过了套管接箍识别与扶持避让自动控制测试, 其中机器视觉与颜色识别方案识别率达到了100%, 验证了系统方案可行性。同时该装置的自动控制系统具备良好的管柱规格适应性、功能扩展性、人机交互友好性等。

关键词: 管柱扶持; 接箍识别; 自动避让; 控制系统; 深海钻探

中图分类号: P634.3; TE92 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)S1-0178-08

Design and analysis of an automatic control system for deep sea drilling pipe support device

GAO Jieyun^{1,2,3}, LIU Xiaolin^{1,2,3*}, CHEN Yongzhi⁴, WANG Linqing^{1,2,3}, HE Guolei^{1,2,3}

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2. Innovation Base for Automatic and Intelligent Drilling Equipment, Geological Society of China, Langfang Hebei 065000, China; 3. Technology Innovation Center for Deep Exploration Drilling Equipment, China Geological Survey, Langfang Hebei 065000, China; 4. FAW-Volkswagen Automotive Company Ltd., Chengdu Branch, Chengdu Sichuan 610199, China)

Abstract: During deep-sea drilling operations, when drilling ships or platforms are conducting pipe retraction and extension operations in the moonpool, in order to avoid collisions between the pipe and the drilling platform or moonpool, this paper designed a pipe support device with a double-layer hydraulic cylinder driven roller mechanism that can effectively constrain the radial displacement of the pipe and buffer the collision force in the moonpool. This article mainly introduces the automatic control system of the support device. The system proposes three identification schemes for couplings to improve the stability of pipe support and the passability of couplings, as well as to cope with complex operating conditions. By building a hardware system with PLC as the main control device and HMI as the upper computer device, combined with PLC main-sub program design and HMI interface design, automatic support of pipes and

收稿日期: 2025-04-29; 修回日期: 2025-07-02 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.S1.027

基金项目: 国家重点研发计划项目“深海无隔水管泥浆回收循环钻井技术装备研发”(编号: 2021YFC2800802); 广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目“天然气水合物储层改造增产与测试技术支撑”(编号: GDNRC[2022]44)

第一作者: 高洁云, 女, 汉族, 1996年生, 助理工程师, 地质机械专业, 硕士, 主要从事钻探新技术、新设备、新工艺的研发工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, 775726390@qq.com。

通信作者: 刘晓林, 男, 汉族, 1987年生, 高级工程师, 地质机械专业, 长期从事钻探设备自动化研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, liuxiaolin_cqu@163.com。

引用格式: 高洁云, 刘晓林, 陈永智, 等. 深海钻探管柱扶持装置自动控制系统的设计与分析[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 178-185.

GAO Jieyun, LIU Xiaolin, CHEN Yongzhi, et al. Design and analysis of an automatic control system for deep sea drilling pipe support device[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 178-185.

avoidance of couplings during the retraction and extension process of various specifications of pipes have been achieved. The prototype successfully passed automatic control test of casing coupling identification and support/avoidance through the factory acceptance tests. The machine vision and color recognition solutions achieved 100% identification accuracy, validating the system's feasibility. Furthermore, the automatic control system exhibits excellent adaptability to different pipe specifications, strong functional expandability, and user-friendly operational characteristics.

Key words: pipe support; coupling identification; automatic avoidance; control system; deep sea drilling

0 引言

深海钻探过程中,钻井船或平台在月池收放套管或钻杆等管柱作业时,为避免管柱在飞溅区或风、浪、流综合作用下与钻台或月池机构发生磕碰,通常需要对管柱进行导正扶持,在径向为管柱增加位移约束和缓冲支撑。传统解决方案多采用弹簧自适应缓冲扶持机构或液压夹持机构对管柱进行径向约束和缓冲支撑。弹簧机构依靠弹性变形适应不同管径,结构简单但扶持力有限;液压机构则可提供更大扶持力,但缺乏智能调节能力;这些传统装置在面对管柱接箍(包括法兰连接和螺纹连接等多种形式)时表现不佳,经常出现接箍卡滞或避让失效的情况。

近年来,国内外学者和工程技术人员针对这一问题进行了大量研究与实践。中国石油大学(北京)团队开发的液压自适应扶正器采用了压力反馈调节机制,能够根据管径变化自动调整夹持力,但在接箍通过时仍依赖人工干预^[1]。此外,传统装置对于不同规格的管柱和接箍自适应能力不强,2019年渤海某平台事故分析报告指出,对于变形接箍识别避让能力不足导致发生卡阻,从而造成管柱坠落^[2];南海某深水钻井平台在2018年作业中,因未及时更换扶持装置衬套,导致 $\varnothing 139.7$ mm套管通过 $\varnothing 177.8$ mm规格的扶持器时发生严重偏斜,最终造成月池结构损伤^[2]。接箍识别与避让失效是导致管柱扶持失效的另一重要原因,传统装置缺乏有效的接箍检测手段,主要依靠机械式限位开关或简单的光电传感器,在恶劣的海洋环境中可靠性大幅降低。东海油田2020年的作业记录显示,约38%的扶持装置故障与传感器误动作有关^[3]。动态响应迟缓也是制约传统装置性能的关键因素,深海钻探中,管柱运动速度变化范围大(0.1~1.2 m/s),且受到波浪引起的平台运动影响,传统装置具有的固定参数难以在所有工况下都保持最佳性能,研究表明,在管柱变速运动时,传统液压扶持系统的跟随

误差可达 ± 15 mm,远高于 ± 5 mm的安全标准^[3]。

针对以上技术瓶颈,本文设计了一种创新型管柱扶持装置,采用双层液压缸驱动辊子机构和多种管柱接箍识别技术,通过可编程逻辑控制器(PLC)实现智能控制,能够在管柱收放过程中动态调整辊子位置,既保证对管体的稳定扶持,又能精准避让各种形式的接箍。系统上位机提供友好的人机交互界面,可灵活设置不同管柱规格参数,适应多样化作业需求。同时,采用电磁阀控制液压缸驱动辊子机构,提高响应速度。以上设计不仅解决了传统装置中面临的问题,更为深海钻探管柱扶持装置的发展提供了新思路。

1 管柱扶持装置方案设计

管柱扶持装置需要在月池区有效限制约束管柱径向位移、缓冲碰撞作用力,为避免扶持装置夹持管柱接箍导致接箍卡住或损坏,扶持装置需要同时具备扶持管体与避让接箍功能^[3-6],如图1所示。

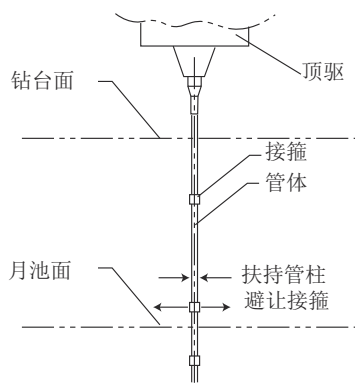


图1 管柱扶持与接箍避让示意

根据一般海上钻探船或平台作业工况和管柱收放作业特点,以及管柱系统承载性能、与月池搭载平台的连接接口形式^[7-9],对扶持装置的整体结构进行总体方案设计,如图2所示,管柱扶持装置由基座平台和导向扶持两部分组成。

图2中,基座平台是整个装置的机架,主要功能

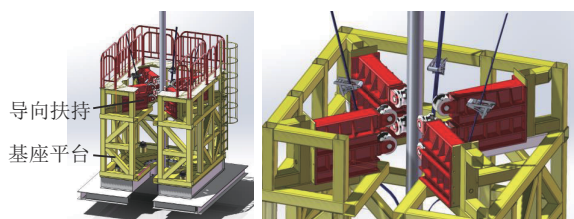


图2 管柱扶持装置方案设计

是与船舶月池安装平台(或月池台车)进行连接和承受管柱扶持过程中的反力。

导向扶持模块采用4组双层8个液压缸驱动辊子机构,辊子采用具有缓冲作用且耐磨性较好的尼龙材质,与管柱接触并限制管柱径向位移,同时辊子可以绕轴转动,有效减少了管柱上下移动中辊子与管柱之间的摩擦力。双层辊子机构由8个液压缸经比例阀驱动,可单独动作,通过控制8个液压缸进行组合动作,可实现扶持管体与避让接箍功能:在管柱收放过程中,至少有一层辊子扶持管体,不会出现因避让接箍而导致管柱扶持失效的情况,如图3所示,双层辊子机构在下管过程中,根据接箍自上而下顺序通过机构过程依次出现上下夹持、上松下夹、上夹下松、上下夹持状态,上管过程同理;自动控制系统采用传感器和管柱接箍识别技术,可实现管柱扶持全流程自动化操作。

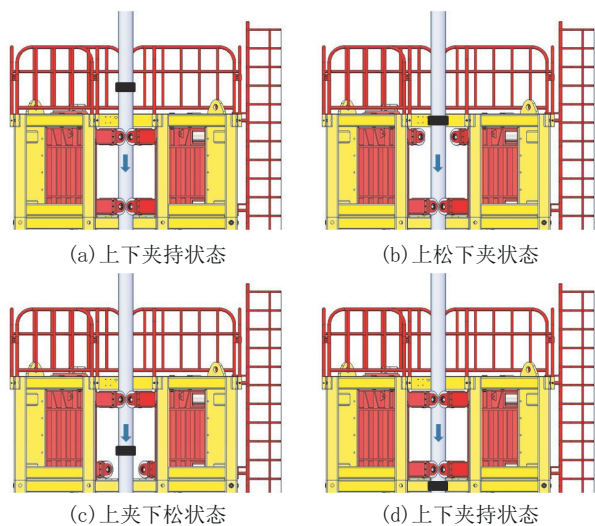


图3 双层辊子机构动作示意

2 自动控制系统设计

2.1 接箍识别方案

在扶持装置的自动控制系统设计中,如何精准识别不同直径规格的管柱、不同形式的管柱接箍是

关键技术问题^[10]。考虑系统在多种管柱规格和作业工况下的适应性,设计以下接箍识别方案:

2.1.1 管柱测距与外径检测

管柱测距与外径检测是指通过声学、光学手段,如超声波传感器或激光测距传感器对管柱外圆进行单点测距^[11-12],如图4所示。

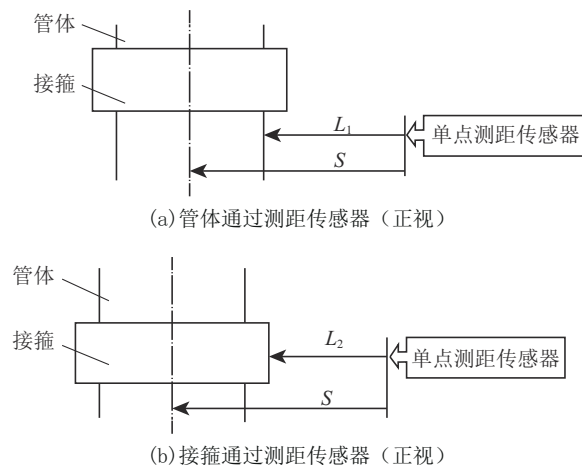


图4 单点检测管柱外径

图4中,在管体直径方向上设置单点测距传感器,在假定管柱无径向窜动、且传感器所测距离严格在管柱直径方向条件下,则当前管柱外径可表示为公式(1):

$$D = 2(S - L) \quad (1)$$

式中: D ——待测管柱外径,mm; S ——传感器到管柱中心距离,在传感器安装之后已经确定,是个常数,mm; L ——传感器与当前通过管柱表面之间的距离,mm。

由公式(1)可知,当管体和接箍连续通过传感器时,理论上传感器会输出两个数值,即管体外径与接箍外径,而包含这两个数值的管柱参数已提前在控制系统中设置好,在控制系统运行过程中,将传感器计算输出结果与设置参数进行对比,即可判定当前通过的是管体或接箍。

但是在实际情况下,管柱存在径向窜动现象,管体中心会偏离理论中心点,此时仅用单个传感器不能保证所测 L 值一定在管柱直径方向上,因此在管柱径向两侧同时布置多个测距传感器构成传感器阵列,传感器阵列布置如图5所示。

在利用传感器阵列时,当前管柱外径计算可表示为公式(2)~(4):

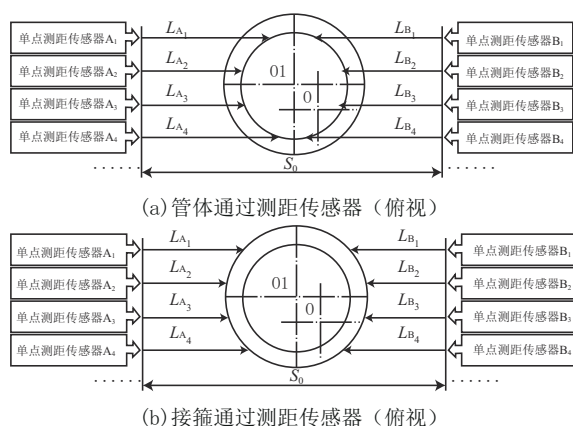


图5 多点检测管柱外径

$$L_{A_{\min}} = \min(L_{A_1}, L_{A_2}, L_{A_3}, L_{A_4}, \dots) \quad (2)$$

$$L_{B_{\min}} = \min(L_{B_1}, L_{B_2}, L_{B_3}, L_{B_4}, \dots) \quad (3)$$

$$D = S_0 - (L_{A_{\min}} + L_{B_{\min}}) \quad (4)$$

式中: $L_{A_1}, L_{A_2}, L_{A_3}, L_{A_4}, \dots$ ——分别为单点测距传感器 $A_1, A_2, A_3, A_4, \dots$ 与当前通过管柱表面之间的距离, mm; $L_{A_{\min}}$ ——这些距离之中的最小值, mm; $L_{B_1}, L_{B_2}, L_{B_3}, L_{B_4}, \dots$ ——分别为单点测距传感器 $B_1, B_2, B_3, B_4, \dots$ 与当前通过管柱表面之间的距离, mm; $L_{B_{\min}}$ ——这些距离之中的最小值, mm; S_0 ——

两侧传感器之间的安装距离, 是个常数, mm; D ——当前通过的管柱外径, mm。

类似的, 当管体和接箍连续通过传感器时, 传感器输出结果有两个数值, 分别为管体外径与接箍外径。将当前管柱的规格参数在控制系统中设置好, 通过将传感器计算结果与设置参数进行对比, 即可判定当前通过的是管体或接箍。该外径检测手段的误差来源于相邻传感器之间的检测漏点, 为减小误差, 需尽可能多地设置传感器, 以使检测结果逼近管柱外径。

2.1.2 接箍轮廓机器视觉识别

接箍轮廓机器视觉识别是指利用光电成像系统采集管柱图像, 而后经过图像处理模块进行数字化处理, 利用图像分析模块进行接箍轮廓判别并输出检测结果, 上位机实时根据检测结果, 控制液压缸驱动辊子运动, 扶持管体或避让接箍^[13-15]。

机器视觉识别系统的硬件主要包括: 光源、工业相机、镜头和图像采集卡等, 工业相机选择 CCD 相机或 CMOS 相机, 光源可根据需求选择 LED 灯、高频荧光灯、石英灯等, 见图 6。

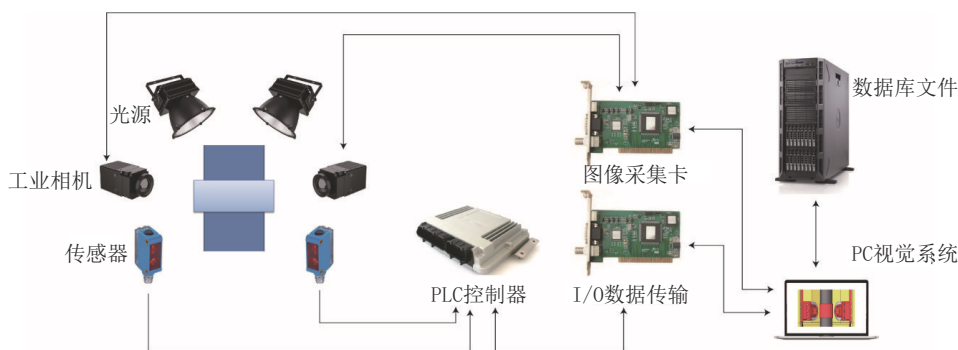


图6 接箍轮廓机器视觉识别

机器视觉识别系统软件使用 Visual C++ 作为程序的开发平台, C++ 语言具有灵活性强, 功能扩展性强、运行速度高等优点, 适合处理图像^[16]。软件主要包含界面模块、图像采集模块和图像处理与分析模块。界面模块方便用户查看各种函数并调整参数; 采集模块主要功能是进行图像采集与存储; 图像处理与分析模块是软件的核心, 在此模块中, 先将图像进行预处理, 包括图像增强、图像去噪、二值化等处理, 减少图像中的干扰信息^[17-18], 使接箍的轮廓特征更加清晰、明显, 然后使用轮廓提取算法, 如

梯度算子、拉普拉斯算子、高斯-拉普拉斯算子, Kirsch 方向算子等提取接箍轮廓特征^[19-20], 实现接箍识别, 并将结果输出。

机器视觉识别方法具有速度快、可重复性高、智能化程度高、经济成本低等优点, 能够根据不同管柱直径灵活修改参数。但将其应用于管柱扶正装置的接箍识别时, 需要重点解决安装距离远、易受光照及恶劣天气等环境因素干扰, 且室外防护性差影响设备寿命等问题。

2.1.3 接箍颜色检测与识别

在一些行业规范里,为提高某些滑动或转动部件辨识度或为区分不同规格、材质的部件,常使用不同颜色对这些零部件进行涂装,如API标准中对不同钢级的石油套管接箍采用特定颜色进行涂装,见表1。当采用此类管柱作业时,利用接箍与管体表面颜色色差明显,可使用具有颜色识别的光电传感器来进行接箍识别。

具有颜色识别功能的光电传感器在工业生产线领域应用广泛,具有可设置颜色容差、检测精度高的特点^[21-23]。相比前述管柱测距与外径检测方案和机器视觉识别方案,接箍颜色检测与识别方案无

表1 API套管钢级和颜色标识(部分)

钢级	J55	K55	C75	L80	N80	C90	C95	P105	Q125
识别色带	浅绿	绿	蓝	红棕	红	紫	棕	白	桔红

需在上位机输入管柱参数,且不易受管柱对中性、船舶海上作业机械晃动等因素影响。

2.1.4 不同识别方案对比分析

对于前述的测距与外径检测、机器视觉与颜色检测等3种管柱接箍识别方案,分别从识别精度、抗干扰能力、适用场景和成本等方面进行对比分析,结果见表2。

表2 接箍识别方案对比

识别方案	核心技术	识别精度	抗干扰能力	适用场景	成本
测距与外径检测	超声波/激光测距传感器	一般	机械位置依赖性高,易受机械晃动、冲击振动影响	机械晃动、冲击振动较小的场景	较高
机器视觉	深度学习网络+图像增强技术	高精度定位	易受环境光线变化及背景影响	环境背景和光线较为单一固定的场景	高
颜色检测	颜色识别光电传感器	高精度	易受管柱表面锈蚀、油泥附着物等影响	管柱接箍与管体存在色差,管柱较新或表面一致性较好、有管柱表面清洗装置配合的场景	低

从表2可以看出,3种管柱接箍识别方案各有其特点和适用场景,系统设计时同时采用3种方案可以扩大系统适用场景,在实际作业中操作人员可根据现场环境、管柱表面等情况优选一种识别方案。

2.2 系统方案设计

管柱扶持装置自动控制系统方案设计如图7,将管柱接箍检测和液压缸位移检测数据输入控制器;操作人员在上位机输入扶持管柱的参数信息,参数包括管体外径与接箍外径,控制器与上位机可通过通讯实现参数信息交互;控制器通过计算对比当前管柱接箍检测数据、液压缸位移检测数据与上位机中设置的管柱参数,就可以判定当前通过的是接箍或管体;若是接箍,则输出执行信号控制比例电磁阀驱动液压缸缩回,实现避让接箍动作,若是管体,则输出执行信号控制比例电磁阀驱动液压缸伸出,实现扶持管体动作。

2.3 控制流程设计

系统控制流程设计如图8。

启动后,系统首先初始化,接着读取用户输入的管柱参数信息,当用户选择手动模式可手动控制电磁阀驱动液压缸和辘子机构动作,当用户选择自

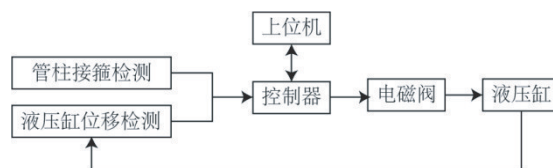


图7 自动控制系统方案

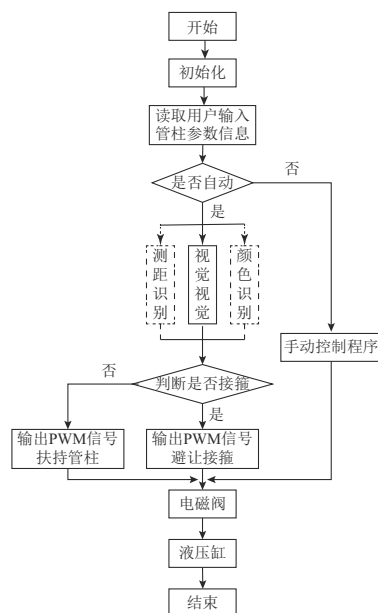


图8 系统控制流程

动控制模式则将根据用户具体选择的管柱接箍识别方案,来自动判断当前位置是否为接箍,当判断为接箍,则输出 PWM 信号控制电磁阀相应油口出油驱动液压缸缩回避让接箍,否则输出 PWM 信号控制电磁阀驱动液压缸伸出扶持管柱;重复执行上述流程,系统连续运行即可实现在管柱连续提升或下放过程中持续对管柱进行自动避让接箍与扶持管体等动作。

2.4 软硬件设计

2.4.1 硬件设计

根据系统方案设计,选用工控自动化行业常用的人机界面(HMI)、PLC 等硬件,结合前述接箍识别方案选用相应传感器和接箍轮廓机器视觉识别模块,并在基座平台合适位置布置监控相机(图 9)。

2.4.2 PLC 程序设计

2.4.2.1 主程序设计

以模块化设计为指导,PLC 程序采用主程序子

程序体系结构,即将主程序分解为多个子程序,每个子程序负责完成具体的任务或功能,每个子程序都可以独立开发、测试和维护。这种体系结构具有灵活性和可维护性,能够提高程序可读性和可扩展性^[24-26]。本项目 PLC 程序设计如图 10。

图 10 中,Main 主程序调用了多个子程序,每个子程序完成一项具体的功能,主程序顺序调用执行这些子程序,子程序之间、与主程序之间存在数据交互和传递。

2.4.2.2 伸缩缸自动控制程序

在主程序调用的众多子程序中,伸缩缸自动控制程序是本自动控制系统的关键和核心控制子程序,无论采用何种接箍识别方案,对于本控制子程序来说,只是系统输入信号不同,系统的控制逻辑是相同的,都使用了顺序控制结构。对于每一层液压缸驱动辊子机构,在下管作业过程中,采用 PLC 顺序控制中步与动作的设计理念,顺序功能图见图 11。

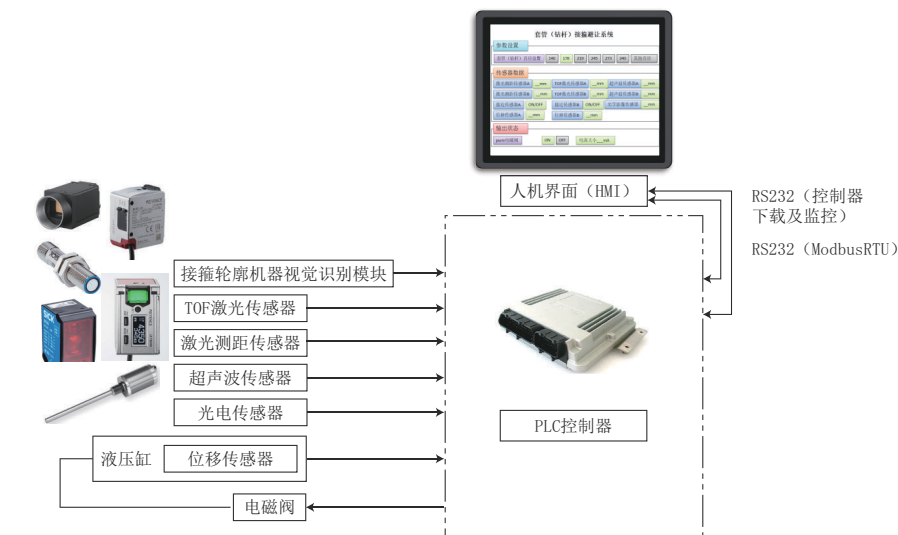


图 9 系统硬件组成

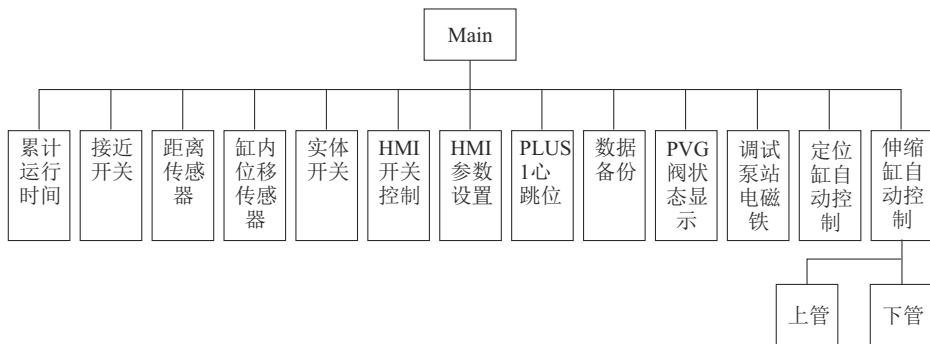


图 10 PLC 程序结构

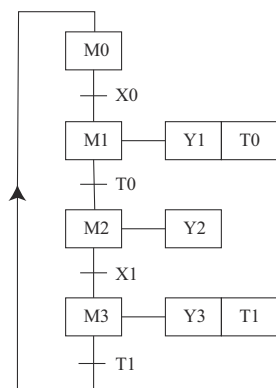


图11 自动扶持与避让子程序顺序流程

M0为初始步,初始状态为扶持状态,X0为系统识别到接箍靠近辊子上部,X0为ON时,进入活动步M1,Y1变为ON,液压缸缩回动作,同时接通T0定时器,T0时间后进入活动步M2,Y2变为ON,液压缸缩回动作;X1为系统识别到接箍向下完全通过辊子机构,X1为ON时,进入活动步M3,Y3变为ON,液压缸伸出动作,同时接通T1定时器,T1时间后返回初始步,停止运行,控制系统完成一次自动扶持与避让动作并返回初始扶持状态。上述顺序动作循环执行 n 次可实现 n 个接箍的避让动作并返回扶持管体状态。

对于上管作业,控制逻辑相同,只是转换条件X0替换为系统识别到接箍靠近辊子下部,X1替换为系统识别到接箍向上完全通过辊子。

2.4.3 上位机人机界面设计

上位机人机界面(HMI)与PLC通信,主要功能是实现系统数据人机交互,如作业模式的选择、管柱参数设置以及传感器数据显示和状态监控等。人机界面设计如图12。

图12中,主界面设计功能如下:(1)主图动画显示双层液压缸驱动辊子机构的工作状态;(2)底部以数值显示系统累计运行小时和分钟数;(3)上管、下管工作模式切换选择按钮。

参数设置界面主要实现管体外径和接箍外径等相关参数的设置和液压缸驱动比例阀的输出电流(开度)设置。

3 联调试验

管柱扶持装置自动控制系统样机经厂内集成组装测试后,开展了联调试验,试验成功验证了扶持管柱与避让接箍方案的可行性,见图13。试验中



图12 HMI用户界面

采用了具有红色接箍的套管管柱,该管柱接箍与管体直径尺寸相差较小。在联调试验中,采用天车悬吊套管管柱使其晃动,从而模拟深海钻探中海浪扰动场景。当采用测距与外径检测识别方案时,出现了管体通过辊子机构时辊子缩回避让现象,即误动作现象,分析产生原因为管柱晃动引起了管柱径向窜动,使测距传感器产生了较大的测量误差,当误差超过了接箍与管体直径差时则会引起误动作;当切换为机器视觉识别方案时,管柱扶持装置在上下管过程中能够自动实现扶持管体与避让接箍等动作,响应及时、避让成功率100%;同样地,切换为颜色识别方案时,管柱扶持装置也达到了避让成功率100%的效果。

联调试验结果表明,在模拟深海钻探场景下,管柱扶持装置自动控制系统中的三种接箍识别方案,对于不同规格的管柱具有较好的径向位移抑制效果,同时能够及时响应避让管柱接箍,使得管柱能够平稳顺利地下放。

4 结语

在管柱扶持装置自动控制系统的设计中,考虑到控制系统在多种管柱规格和作业工况下的适应性,提出了几种不同原理的接箍识别方案;以PLC作为主控设备、HMI作为上位机人机交互设备,结合不同接箍识别方案下的传感器和机器视觉识别模块,搭建了具备管体扶持与接箍避让功能的自动



图13 装置联调试验

控制系统,并细化了PLC程序顺序控制结构设计与HMI界面设计,实现了管柱扶持装置自动控制系统对多种不同规格管柱实现自动扶持管体与避让接箍等功能。后续将根据现场使用情况与需求进一步完善和改进该系统。

参考文献:

- [1] 高爱华,孙红,李冬梅,等.采油井下管柱扶正防脱装置:CN201920164874.9[P]. 2025-07-02.
- [2] 王定亚,张增年,王汝华,等.推扶式管柱自动化处理系统研究及发展建议[J].石油机械,2018,46(9):1-6.
- [3] 田华勇,海彬,张福民,等.采矿船月池内部防撞消波装置设计[J].中国有色金属学报,2021,31(10):2829-2835.
- [4] 任文亮,刘高军,李社坤,等.偏心式滚轮套管刚性扶正器的研制及应用[J].石油钻采工艺,2012,34(4):122-124.
- [5] 宋宇,黄芳飞,段明星,等.大洋钻探船月池扶正器结构准静态设计方法[J].石油钻采工艺,2023,45(6):712-719.
- [6] 杨启贞.在水平井、大位移井中选用合适的套管扶正器[J].石油钻采工艺,2000(4):37-39,84.
- [7] 宋宇,杨进,何黎,等.基于隔水管受力分析的深水钻井平台防台风措施优选[J].石油钻采工艺,2015,37(1):147-150.
- [8] 谷家扬,董智新,凌晨,等.超深水钻井船月池区域结构极限强度[J].中国海洋平台,2020,35(3):6-10,17.
- [9] 王斯虎,薛鸿祥,唐文勇.超深水钻井船月池角隅区域疲劳强度及载荷敏感性分析[J].船海工程,2020,49(1):56-60.
- [10] 常玉连,张旭,高胜.国内外油套管接箍探测的发展概况[J].石油仪器,2010,24(1):1-3.
- [11] Koh Y, Chen S H, Sarafianou M, et al. Close range and high resolution detection of vibration by ultrasonic wave using silicon-on-nothing PMUTs[J]. IEEE Transactions on Ultrason-
- [12] Xu H B, Xie F, Chen L H, et al. A technology of absolute distance measurement based on multi-wavelength self-mixing interferometry of a three-wavelength optical fiber laser[C]//2019 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems, 2020, 11439.
- [13] Elias N Malamas, Euripides G.M Petrakis, Michalis Zervakis, et al. A survey on industrial vision systems, applications and tools[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(2):171-188.
- [14] Franci Lahajnar, Rok Bernard, Franjo Pernuš, et al. Machine vision system for inspecting electric plates[J]. Computers in Industry, 2002, 47(1):113-122.
- [15] 廖强,周忆,米林,等.机器视觉在精密测量中的应用[J].重庆大学学报(自然科学版),2002(6):1-4.
- [16] 杨淑莹.VC++图像处理程序设计(第2版)[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [17] 王跃轩,易红,倪中华.机器视觉系统中图像误差补偿方法[J].数据采集与处理,2005(4):472-477.
- [18] 李弼程,彭天强,彭波.智能图像处理技术[M].北京:电子工业出版社,2004.
- [19] Yang M, Zou R W, Ai T H, et al. Regularizing building outlines extracted from remote sensing images by integrating multiple algorithms[J]. Geocarto International, 2024, 39(1):2370322.
- [20] Ma J, Yan W D, Liu G Q, et al. Complex texture contour feature extraction of cracks in timber structures of ancient architecture based on YOLO algorithm[J]. Advances in Civil Engineering, 2022(1):7879302.
- [21] 时玮,袁磊.基于锁相环的颜色识别系统设计[J].机械工程与自动化,2006(3):113-114,117.
- [22] 张松灿,肖本贤.高分辨率颜色传感器TCS230的原理和应用[J].单片机与嵌入式系统应用,2005(3):44-46.
- [23] Asl A. Beheshti, Ahmadi H, Rostami A. A novel plasmonic metal-semiconductor-insulator-metal (MSIM) color sensor compatible with CMOS technology[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 1-10.
- [24] Li S D. The design of the modern ecological agricultural water-saving irrigation control system based on virtual instrument[C]. 2011 International Conference on Environmental Systems Science and Engineering (ICESSE 2011), 2011:7.
- [25] Seong Min Han. Implementation of integrated development environment for machine vision-based IEC 61131-3[J]. Computers, 2024, 13(7):172.
- [26] Eelco Van Der Wal. Building a solid foundation with PLCopen, IEC 61131-3[J]. Control Engineering: Covering Control, Instrumentation, and Automation Systems Worldwide, 2023, (6):70.

(编辑 王文)