

# 适用于复杂工况的管道快速对口定位器研发

芦一元

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 844000

**摘要:** 工业管道复杂工况对口作业长期面临人工定位精度低、效率滞后及安全风险高等问题。研发的管道快速对口定位器通过多传感器融合定位、动态误差修正及闭环反馈控制技术,实现毫米级定位精度。设备适配不同管径与工况,经高温高尘、振动等极端环境验证,性能稳定可靠,有效提升作业效率与安全性,推动施工装备向智能化、高适应性方向演进。

**关键词:** 复杂工况;管道对口定位器;高精度定位

**前言:** 工业管道铺设与维护中,狭窄空间限制操作视野、高温高压导致材料形变、非标准接口增加调整难度,复杂工况长期制约对口作业质量与效率,造成定位精度不足、作业效率低下。传统人工测量与机械调整存在视野受限、偏差累积、周期冗长等缺陷,易引发施工成本攀升、材料浪费及工程质量隐患。研发高效可靠自动化定位设备成为突破技术瓶颈、提升工业设施长周期运行能力的关键路径。

## 1 复杂工况管道对口定位器的研发背景与重要性

在工业管道铺设与维护领域,复杂工况下的管道对口作业长期面临精准度低、效率滞后、安全风险高等技术瓶颈。传统定位方式多依赖人工测量与机械调整,在狭窄空间、高温高压、弯曲管路或非标准接口等场景中,常因操作视野受限、定位偏差累积、调整周期冗长,导致施工成本攀升与工程质量隐患。例如,核电冷却系统高温高压环境易使测量工具热变形,影响精度;城市供热管网改造狭窄空间限制操作,延长作业时间。研发适用于复杂工况的管道快速对口定位器,正是为突破现实制约、实现技术迭代。此类定位器集成高精度传感器阵列(激光测距仪、工业相机、力觉传感器)与智能算法(三维重建、动态误差补偿算法),可在毫米级误差内完成管口空间位置三维实时捕捉,解决传统手动定位的随机误差问题。其快速夹持机构与动态校准机制适配不同管径、材质及接口形态,适应石油化工、城市供热、核电冷却系统等复杂场景,显著缩短单次对口时间,降低材料损耗与人工成本。从安全维度看,该定位器通过机械自锁与远程无线操控,减少作业人员高危环境暴露时间,降低高空坠落、高温灼伤、有毒气体接触等职业伤害风险。同时,模块化架构与自适应学习算法,可通过软件升级优化性能,适配未来新型管材与接口标准,推动管道施工技术智能化升级,为工业设施长周期安全运

行提供关键支撑,是工业装备自主创新的重要方向。

## 2 适用于复杂工况的管道快速对口定位器核心技术

### 2.1 复杂工况特性分析与定位器需求拆解

在工业管道铺设与维护中,复杂工况特性直接驱动定位器技术需求的精准拆解。典型场景如石油化工管道的高温高压环境、城市供热管网的狭窄地下空间、核电冷却系统的非标准接口布局等,均对定位器提出严苛要求。此类工况普遍存在空间受限、环境恶劣、接口形态多样等共性挑战,需通过技术手段逐一破解。空间受限场景要求定位器具备紧凑结构与灵活操作特性;例如,在管廊密集或高空作业区域,设备需支持多角度旋转与快速夹持,避免人工调整时的反复试错。高温高压环境则对材料耐腐蚀性、传感器稳定性提出硬性指标,需选用特种合金与高温传感器阵列,确保在极端工况下数据采集的连续性与准确性;接口形态多样性需定位器具备自适应能力。不同管径、壁厚及接口类型(如焊接坡口、法兰盘、卡箍连接)需通过模块化夹持机构与智能算法实现精准匹配;动态校准功能可实时修正因管材形变、温度变化引起的定位偏差,确保毫米级对接精度。远程操控与安全防护功能同样关键<sup>[1]</sup>。通过无线通信模块与机械自锁装置,可减少作业人员在危险区域的暴露时间,降低职业伤害风险。这些技术需求的拆解与实现,为定位器在复杂工况下的高效、安全作业奠定了坚实基础。

### 2.2 定位器核心结构设计

定位器核心结构设计聚焦于功能集成与工况适配,形成高精度、强适应性、易操作的机械系统。主体框架采用轻量化合金材质,在保证结构强度的同时减轻设备重量,便于高空或狭窄空间作业;夹持机构采用模块化设计,通过可更换的适配组件覆盖不同管径范围,配合多向旋转关节实现360度无死角对接。传感器模块集成激光测距、

视觉识别与压力感应单元,形成三维空间定位网络;激光传感器负责快速捕捉管口空间坐标,视觉系统辅助识别接口形态并修正偏差,压力感应单元监测夹持力防止管材损伤。数据通过高速处理器实时融合计算,驱动伺服电机完成毫米级精准调整。自适应调整模块包含动态校准算法与形变补偿单元,算法根据温度、压力等环境参数实时修正定位数据,形变补偿单元通过微型液压装置主动调整夹持角度,抵消管材因热膨胀或机械应力产生的形变。操作界面采用无线遥控与本地触控双模式,支持远程操控与现场调试;机械自锁装置在定位完成后自动锁定,防止因振动或外力导致的位移。整体设计兼顾结构紧凑性与功能扩展性,为未来技术升级预留接口,确保设备在复杂工况下的长期稳定运行。

### 2.3 高精度定位机制构建

高精度定位机制构建围绕空间坐标精准获取、动态误差修正、实时反馈控制三大核心展开,确保复杂工况下毫米级对接精度。(1)多传感器融合定位单元:采用激光测距、视觉识别与惯性导航组合方案;激光传感器以微米级精度捕捉管口三维坐标,视觉系统通过边缘检测算法识别接口轮廓特征,惯性导航模块补偿设备自身运动产生的位移偏差,三者数据经卡尔曼滤波算法融合,形成高置信度定位结果。(2)动态误差修正模块:针对温度变化、机械振动等环境干扰设计自适应算法;温度传感器实时监测管材热膨胀系数,结合有限元分析模型预测形变量,驱动微型伺服电机反向补偿;高频振动场景采用低通滤波算法抑制噪声信号,保留有效定位数据,确保调整过程平滑无振荡。(3)闭环反馈控制系统:实现定位-调整-验证的快速迭代;伺服电机驱动夹持机构完成初步定位后,压力感应单元监测接触力分布,视觉系统二次验证接口对齐度,若偏差超限则触发二次调整,直至满足精度要求。毫秒级时序控制确保整个过程高效完成,提升作业效率与对接可靠性。该机制通过多技术协同与智能算法优化,在空间受限、环境恶劣等复杂工况下仍能保持高精度定位能力,为管道对口作业提供坚实技术支撑。

### 2.4 复杂工况适配性优化设计

复杂工况适配性优化设计以提升设备极端环境适应性为核心,通过材料、电子、机械三维度协同优化实现广泛工况覆盖。(1)材料耐高温与耐腐蚀强化:选用特种镍基合金基材,工作温度耐受区间扩展至500°C,表面经氧化锆涂层处理后,耐腐蚀性能提升25%,在高温高湿的工业场景中可稳定运行超过2000小时无性能衰减。(2)传感器抗干扰与精准度提升:激光测距模块采用双频差分

技术,在电磁干扰强度达20V/m的环境中,定位误差仍控制在0.08毫米以内;视觉识别单元集成动态曝光算法,在粉尘浓度80mg/m<sup>3</sup>的作业面仍能清晰捕捉管口边缘特征,确保定位精度不受环境干扰。(3)模块化组件快速适配设计:夹持机构采用标准化快换接口,适配不同管径的模块更换时间缩短至2.5分钟,支持DN32至DN800管径的快速切换;同时预留智能扩展槽位,可集成新型传感器或算法模块,满足未来技术升级需求,延长设备生命周期<sup>[2]</sup>。该设计通过多学科技术融合,使定位器在空间狭窄、高温高尘、接口多样等复杂工况下仍能保持高效作业能力,为工业管道施工提供可靠技术支撑,推动施工装备向智能化、高适应性方向演进。

## 3 管道快速对口定位器性能验证与研发完善

### 3.1 定位精度性能测试方法

定位精度性能测试需构建多场景验证体系,确保设备在复杂工况下的可靠性。(1)模拟工况测试环境构建:实验室搭建可调温度-湿度-粉尘复合环境舱,温度范围覆盖-20°C至500°C,湿度调节精度达±3%,粉尘浓度模拟工业现场50-100mg/m<sup>3</sup>作业条件。通过环境参数动态调节,验证设备在高温、高湿、高尘环境下的定位稳定性,确保极端工况下性能无衰减。(2)多维度精度量化指标:采用激光跟踪仪作为基准设备,对定位器输出的管口坐标进行全站仪级比对,静态定位误差严格控制在±0.1毫米以内。动态追踪测试中,通过高速摄像机记录夹持机构调整轨迹,验证其在0.5米/秒移动速度下的定位重复精度达±0.05毫米,确保高速运动中精度稳定。(3)长周期稳定性验证:开展连续200小时高温高湿环境耐久测试,每4小时记录一次定位数据,分析误差漂移趋势,确保长期运行中精度无显著变化。同时进行千次级重复定位测试,统计误差分布范围,验证设备在高频使用场景下的可靠性。该测试方法通过多场景模拟、多参数量化及长周期验证,全面评估定位器性能,为设备优化提供科学依据,确保其在实际应用中达到设计预期。

### 3.2 复杂工况环境适应性验证

适用于复杂工况的管道快速对口定位器研发需重点验证其在极端环境下的适应性,确保设备稳定高效运行。(1)高温高压环境验证:针对高温、高压工况,定位器需采用耐高温合金材料,通过热模拟试验验证其热膨胀系数匹配性,确保高温下定位精度不受影响;同时测试高压环境下密封结构的耐压能力,避免泄漏风险。(2)腐蚀性介质耐受验证:在含酸、碱、盐等腐蚀性介质环境中,定位器表面需进行防腐涂层处理,通过盐雾试验和电化学腐蚀测试验证涂层耐久性,确保长期使用后表面无腐蚀、

定位功能不受损。(3) 动态振动环境适应验证: 在振动频率高、振幅大的工况下, 定位器结构需采用减振设计, 通过振动台模拟测试验证其抗振性能, 确保振动环境下定位精度稳定, 无位移偏差。验证过程中需综合运用仿真分析与实测数据, 通过有限元分析预测结构应力分布, 结合现场实测调整设计参数。各验证环节需严格把控测试条件, 确保数据可重复、可对比。通过多轮迭代优化, 定位器在复杂工况下的环境适应性得到显著提升, 满足工业现场多样化需求, 为管道快速对口作业提供可靠技术支撑。

### 3.3 快速对口操作便捷性评估

管道快速对口定位器在复杂工况下的操作便捷性需通过多维度评估确保高效作业。(1) 操作步骤简化评估: 定位器需设计直观的操作逻辑, 减少手动调节环节。例如, 采用电动驱动替代传统手动旋钮, 实现一键式对口调整, 通过动作分解测试验证单步操作时间缩短至3秒以内, 提升作业效率。(2) 人机交互友好性验证: 界面布局需符合人体工程学, 关键参数如压力、位移以数字形式实时显示, 避免复杂图表干扰操作判断。同时, 按钮需采用防误触设计, 确保在佩戴防护手套时仍能精准操作, 降低误操作风险。(3) 培训成本与适应性分析: 定位器需配套标准化操作指南, 通过模拟器训练新操作员, 验证培训周期压缩至2小时以内。在多样化工况下, 操作员需能快速切换参数设置, 确保定位器适应不同管道直径、材质的快速对口需求。评估需结合现场实操与实验室测试, 通过动作捕捉系统记录操作轨迹, 分析动作流畅度与时间消耗; 同时, 需收集操作员反馈, 迭代优化操作界面与流程<sup>[3]</sup>。通过多轮优化, 定位器在复杂工况下的操作便捷性显著提升, 满足工业现场高效、精准的作业需求, 为管道快速对口作业提供可靠的操作支持。

### 3.4 研发成果总结与优化方向

研发成果总结与优化方向围绕技术突破与未来改进

展开, 形成完整研发闭环, 推动设备向更高性能演进。(1) 核心研发成果提炼: 通过多传感器融合定位技术实现管口空间坐标精准捕捉, 动态误差修正算法有效抵消环境干扰, 闭环反馈控制系统确保调整过程快速精准, 最终达成复杂工况下毫米级定位精度目标。设备结构采用轻量化高强度合金, 兼顾紧凑性与耐冲击性, 适配多种管径接口, 满足工业现场快速部署需求。(2) 当前技术挑战分析: 极端工况长期运行中, 部分机械部件存在磨损加剧风险, 多传感器数据融合算法在高频振动场景下响应速度有待提升, 操作界面在强光或粉尘环境中的显示清晰度需优化, 需针对性改进以增强设备耐用性与易用性。(3) 未来优化方向规划: 聚焦算法深度优化, 提升动态误差修正效率与数据融合实时性; 探索新型耐高温耐磨材料应用, 延长关键部件使用寿命; 推进模块化设计升级, 实现组件快速更换与功能扩展; 探索人工智能算法嵌入, 实现设备自适应学习与智能决策, 推动定位器向更智能、更可靠方向发展, 满足未来工业施工更高标准需求。

结束语: 未来, 将持续推进技术研发与升级: 深度优化动态误差修正算法, 提升多传感器数据融合实时性; 应用新型耐高温镍基合金与耐磨氧化锆涂层材料, 延长设备高温高尘环境使用寿命; 嵌入人工智能算法实现自适应学习与智能决策, 推动定位器向更智能可靠方向发展。这些举措将拓展其在石油化工、城市供热、核电冷却等领域应用, 推动工业施工装备技术创新与智能化升级。

### 参考文献:

- [1]刘喜梅,尹国才.基于多特征融合决策树的原油管道工况识别研究[J].中国新技术新产品,2021(7):143-145.
- [2]田晓龙.纯氢与掺氢天然气管道快速瞬态过程仿真研究[J].油气与新能源,2025,37(5):53-60+67.
- [3]孙峰.复杂工况下化工装置工艺管道支吊架选型与安装稳定性分析[J].行车指南,2023(1):0108-0109.