

大口径油气管道动火连头高精度测量定位与切割技术研究与应用

姜国荣 郭依宝

国家管网集团北京管道有限公司维抢修分公司 北京 102101

摘要: 针对大型油气管道改线、维修、扩建动火连头作业中存在的传统测量定位误差累积大、切割装备自适应能力弱、管口成型精度低、劳动强度高等行业共性技术瓶颈,本文提出一种基于模板投影式垂直四点垂线测量定位法与激光测距-步进闭环控制的集成化高精度切割技术。该技术以新管段为基准模板实现端口轮廓直接投影定位,消除多次测量累积误差;通过激光位移传感、PLC闭环控制与精密直线模组执行,实现割嘴间距与切割路径的实时自适应补偿,解决了大口径管道不圆度、轨道形变、人工调节精度差等问题。工程应用对比表明,本技术将测量定位误差控制在 $\pm 1\text{mm}$ 以内,管口切割平直度误差降至 $\pm 1\text{mm}$ 以下,劳动强度降低30%以上,大幅提升动火连头作业的精度、效率与质量稳定性,可为油气管道工程施工提供新型技术支持。

关键词: 管道动火连头;模板投影测量;激光测距;闭环控制;高精度切割

引言

在长输油气管道运营维护过程中,因线路改线、缺陷管段更换、管网扩建等开展的动火连头施工,其核心环节在于新旧管道端口的精准切割与后续组对焊接。管口切割的几何轮廓匹配度、端面平直度一致性,直接决定了焊接质量与焊口长期服役安全,是制约动火连头施工效率与一次焊接合格率的关键技术因素。当前,国内油气管道动火连头切割作业仍普遍依赖传统工艺:测量环节采用直角尺、水平仪、铅垂等工具进行多次间接测量与人工划线,各环节误差逐级累积;切割环节多采用刚性轨道式火焰切割机,无法自适应管道不圆度与轨道不平造成割嘴与管面距离偏差,割嘴与管壁间距波动显著,且斜口坡口加工需人工目视与手动调节。上述工艺在野外复杂工况、特别是大口径旧管道作业中,存在测量误差大、切割质量离散性高、返工率高、作业风险大及耗材浪费严重等问题,技术短板尤为突出。近年来,三维激光扫描定位配合数控火焰切割的下料方式在部分工程中得到应用,但其适用范围局限于直管段常规正下料,对三通、弯头、大倍率弯管等异形管件无法实现精准定位。同时,设备结构庞大、安装调试繁琐,依赖G代码预设轨迹运行,缺乏误差自动补偿能力,难以满足复杂工况下的高精度测量定位切割需求。综上,亟须研发一套集高精度测量定位与智能自适应切割于一体的系统化技术方案。

1 现有技术缺陷与技术瓶颈

1.1 测量定位技术落后,误差累积难以控制

传统动火连头测量采用“间接测量-人工划线”模式,需依次完成基准找正、多点测量、人工标记与划线等工序。该过程中,对中误差、读数误差、工具系统误差及人为操作误差逐级叠加,形成显著的累积误差。同时,野外风扰、地面不平、管道长期服役产生的几何形变等环境因素进一步降低了轮廓匹配精度。切割后的管口常出现间隙超标、错边等缺陷,需进行大量打磨修正,严重延长施工周期并增加成本。

1.2 切割装备自动化水平低,自适应能力差

目前广泛使用的轨道式火焰切割机采用刚性轨道,其跨度有限且易受设备自重影响产生挠曲变形,导致割嘴与管壁实际间距沿圆周方向波动可达 $\pm 4\text{mm}$ 以上,管口平直度误差普遍超过 3mm ^[1]。在进行带角度坡口切割时,完全依赖操作人员目视划线、手动调节割炬姿态,对人员技能与视力要求极高,不仅劳动强度大、精度离散性强,而且存在较高的安全风险与质量风险。

1.3 先进测量与切割技术现场适用性受限

尽管三维激光扫描定位配合数控火焰切割机在下料中表现出一定先进性,但其在动火连头现场应用中存在明显局限:仅能满足直管段常规正下料需求,对于三通、弯头、大倍率弯管等异形管件无法实现精准测量定位。此外,火焰切割机设备机身结构庞大,现场安装调试流程繁琐,需双人协同操作;其运动控制完全依赖G代码预设轨迹,不具备实时的误差自动补偿功能,无法校正因轨道安装偏差或管道轴心不垂直所引起的切割误差。

综上所述,现有技术难以满足大口径油气管道动火

连头对高精度、高效率、高稳定性的施工要求，亟须开发新型集成化技术实现突破。

2 核心技术方案设计

本技术由高精度模板投影测量定位方法与激光闭环自适应切割装置两部分构成，形成“测量定位-路径生成-自动切割-实时补偿”的全流程精度控制体系。

2.1 垂直投影四点垂线测量法（定位核心技术）

本方法基于“以新代旧、直接投影”原理，将预制合格的新管段作为理想基准模板，将其端口轮廓直接复刻至待切割旧管段，从而从源头上消除间接测量带来的多重误差。具体步骤如下：

2.1.1 吊装精准对正

将新管段吊至旧管段正上方，通过Y/Z轴双向对中调节器完成新旧管道的同轴对齐，保证新旧管同轴且端口间距恒定（如图1所示）。

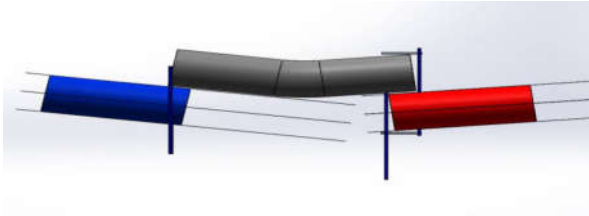


图1：新管段吊至旧管段正上方进行比对

2.1.2 四点垂线布设

在新管端口圆周方向的3点、6点、9点、12点钟位置四个对称基准点布设仿磁线坠垂线。其中，3点与9点钟方向直接悬挂，6点与12点钟方向采用专用靠尺辅助定位，确保各垂线严格垂直、无偏移（如图2所示）。

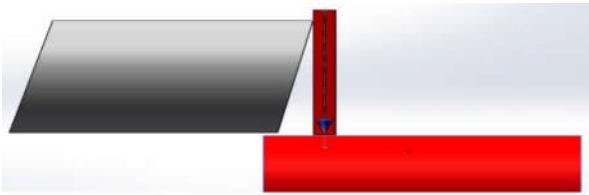


图2：0点、6点垂线布设

2.1.3 轮廓投影标记

通过四条垂线将新管口轮廓投影至旧管外壁，标记4个基准投影点。

2.1.4 精准切割线生成

采用刚性划线圈顺次连接上述4点，形成闭合环形的精准切割线，作为后续切割作业的唯一边界基准。

该方法的定位误差仅取决于垂线的垂直精度（可控制在 $\pm 1\text{mm}$ 以内），彻底消除了传统多步骤间接测量的累积误差。

2.2 激光测距-伺服闭环控制切割装置

装置由机械行走系统、高精度传感系统、智能控制系统及精密执行机构四部分组成，实现全自主自适应切割。

2.2.1 机械行走系统

主体框架采用双轴精密滑台组成十字模组，结构刚性强、定位精度高；行走驱动采用高精度闭环步进电机，保证装置沿切割线平稳、匀速行走^[2]。

2.2.2 高精度传感系统

核心传感单元为高精度激光位移传感器（分辨率 $\leq 0.01\text{mm}$ ），构成轮廓跟随与间距检测单元。安装于机械行走系统前端的传感器实时扫描切割路径变化，并垂直方向监测割嘴与管壁之间的瞬时间距，为闭环控制提供高频率、高精度的反馈信号。

2.2.3 智能控制系统

以工业PLC一体机为控制核心，建立“检测-比较-运算-执行”的实时闭环逻辑。系统将激光传感器实时反馈的间距值与预设的理想切割间距进行比较，通过内置PID（比例-积分-微分）控制算法生成微调指令，驱动步进电机执行精确的位置补偿。设置合理的控制死区（如 $\pm 0.1\text{mm}$ ），误差超出死区时立即补偿，在死区内保持静止，从而兼顾控制精度与系统运行的稳定性。

2.2.4 精密执行机构

采用轴向（X轴）与径向（Z轴）双轴精密直线模组，驱动分辨率可达 0.1mm 。径向模组实时维持割嘴与管壁间距恒定，自动补偿管道不圆度及轨道不平造成割嘴与管面距离偏差；轴向模组则保证割嘴沿预设切割路径精确行走，并补偿因轨道安装偏差引起的角度误差，确保管道斜口角度与端面平直度满足标准要求（如图3所示）。

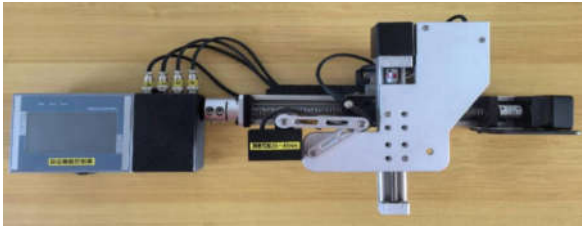


图3：精密执行机构

2.3 系统整体工作流程

装置安装至环形切割线起点后启动，沿切割线（管道划线圈）自动匀速行走。传感-控制-执行单元形成动态闭环，持续完成：实时激光测距→PLC误差解算→步进电机微量补偿^[3]。Z轴实时检测并维持割嘴与管壁的恒定距离，自动补偿不圆度、轨道形变等动态误差；X轴严格沿着由划线圈连通3点、6点、9点、12点钟定位点所确定的轨迹恒距行走。整个切割过程全程无需人工干预，实

现全自动高精度切割。

3 工程应用与技术优势对比

本技术在多个油气管道改线与维修工程中进行了实际

应用验证。为量化对比,选取典型DN1000(口径1000mm)管道动火连头作业,将本技术与传统工艺(刚性轨道切割+人工划线)的关键指标进行对比,结果如表1所示。

表1: 本技术与传统动火连头切割工艺核心指标对比

对比指标	传统工艺	本技术	提升/改善幅度
测量定位误差	$\geq 3\text{mm}$ (累积)	$\leq \pm 1\text{mm}$	精度提升 $\geq 70\%$
管口平直度误差	$\geq \pm 3\text{mm}$	$\leq \pm 1\text{mm}$	误差缩小 $\geq 66\%$
端口角度一致性	离散性大,依赖人工技能	均匀一致,自动保证	质量稳定性显著提升
劳动强度(切割)	需多人配合,重复测量与手动调节	单人操作,全流程自动化	劳动强度降低30%~60%
测量下料总均耗时	约300~360分钟(含测量、切割与修磨)	约240~300分钟(一次成型)	效率提升约25%
综合施工成本	基准(含返工、打磨、耗材)	降低约25%	经济效益显著
工况适应性	对管道不圆度、轨道形变敏感	实时自适应补偿,适用复杂旧管道	适应范围大幅拓宽

3.1 测量定位精度大幅提升

传统工艺多次间接测量导致累积误差通常大于3mm;本技术采用直接投影法,误差仅取决于垂线垂直精度,可稳定控制在 $\pm 1\text{mm}$ 以内,定位精度提升70%以上,端口轮廓匹配度可满足API1104等高标准组对要求。

3.2 切割质量与稳定性显著优化

传统工艺依赖人工调节,管口平直度误差为 $\pm 3\text{mm}$,端口角度一致性差;本技术采用激光闭环自动控制,全程无人干预,管口平直度误差降至 $\pm 1\text{mm}$ 以下,坡口角度均匀一致,一次成型合格率接近100%,显著减少了后续打磨与返修工作量。

3.3 作业效率与劳动强度大幅改善

传统工艺需3~4人配合,反复测量、划线、调试与修磨;本技术仅需2人完成设备安装与启动,测量与切割过程全自动化执行,人工劳动强度降低30%~60%,施工周期大幅缩短^[4]。

3.4 工况适应性与成本控制优势突出

本技术可实时补偿管道不圆度、轨道轻微形变等动态干扰,在服役多年的旧管道上表现出极强的适应性。由于切割一次成型,无需大量打磨修正与返工,综合施工成本(含人工、耗材、时间成本)降低约25%,经济效益与工程推广价值显著。

4 结语

本文研发的大口径油气管道动火连头高精度定位与切割技术,通过模板投影式垂直四点垂线测量方法,实

现了无累积误差的精准定位;通过激光测距与步进闭环控制,实现了割嘴间距与切割路径的全自动自适应补偿,从根本上解决了传统动火连头作业中测量精度低、切割质量差、劳动强度高及工况适应性弱的行业共性难题。工程应用验证表明,该技术可将测量定位误差控制在 $\pm 1\text{mm}$ 以内、管口平直度误差降至 $\pm 1\text{mm}$ 以下,兼具高精度、高自动化、高适应性与低成本优势。该技术可广泛应用于陆上长输油气管道、场站管网、大口径工业管道的动火连头施工,对提升管道施工行业的装备技术水平、施工质量保障能力及管道运营安全性具有重要的工程价值和推广意义。未来研究可进一步融合智能化功能,例如集成机器视觉识别切割路径与坡口质量、加入远程无线监控,从而推动动火连头作业向全流程数字化、无人化、智能化管控方向演进,更好地适配智慧管网数字化转型的建设需求。

参考文献

[1]李玉坤,吴涛,李军涛,等.管道动火连头快速下料自动化工具研制[J].自动化与仪表,2022,37(6):69-73.
[2]李玉坤,王龙升,蒋毅,等.长输管道对接管口切割量计算方法[J].油气储运,2022,41(3):318-324.
[3]郝大顺,李杉,李克龙.直缝埋弧焊管引熄弧板自动切割系统设计与应用[J].钢管,2025,54(5):67-70.
[4]高永强,史兴隆.基于分段控制的激光精密切割离焦量控制算法研究[J].应用激光,2025,45(6):122-127.