

# 基于分布式光纤传感系统的油气管道清管器跟踪应用研究

余波

国家石油天然气管网集团有限公司华中分公司 湖北 武汉 430014

**摘要：**分布式光纤振动传感系统能够对管道挖掘破坏等行为进行预警，确保管道安全，而在清管作业期间，清管器产生的振动信号会触发系统的大量误报警，不仅影响系统的运行效果，也没有利用光纤传感的技术优势，对清管器进行连续实时地跟踪。设计一种基于振动信号判断的自动切换监测模式的运行机制，当系统探测到大量强烈振动时，自动开启清管器振动判断，并自动切换为清管器跟踪模式。能够在优化系统监测效果的同时，弥补现有清管器跟踪技术的不足，实现清管器作业全过程的跟踪监测，进一步保障油气管道的安全运行。

**关键词：**分布式光纤传感；油气管道；安全监测；清管器跟踪

## 1 引言

分布式光纤振动传感系统以其现场无源、监测距离长、探测灵敏度高等技术优势，已经成为油气管道安全监测的重要手段<sup>[1-3]</sup>。其监测原理是利用油气管道伴行通信光缆作为振动传感器，对油气管道沿线的振动信号进行采集和分析，对管道破坏事件进行预警。油气管道在长期的运行过程中，会定期进行清管作业，以提高运输效率、延长管道寿命，在清管作业的过程中，清管器会与管道焊缝发生碰撞而产生强烈的振动波，由于此种振动波具有明显的规律性，监测系统在常规运行状态下，当大量探测到此种振动波时，极易产生大量的误报警，尤其是被识别为机械挖掘的误报警，对管道运维人员产生干扰，同时，也没有发挥光纤传感系统分布式探测的优势来进行清管器跟踪。因此需要设计一种基于振动信号判断的自动切换监测模式的运行机制，无需管道运维人员进行手动操作切换监测模式，当系统探测到大量强烈振动时，自动开启清管器振动判断，当系统判定此时存在清管器作业时，自动切换为清管器跟踪定位模式。通过对管道伴行光缆所感测到的振动波进行实时采集和分析判断，即可实现油气管道清管器的跟踪定位。

## 2 光纤振动监测

### 2.1 系统结构

光纤振动传感系统结构见图1，选取管道伴行通信光缆的其中一芯作为测振光缆，接入光源及数据采集模块，光源模块负责向测振光纤内注入高度相干的激光脉冲，光电探测模块负责采集光纤内的瑞利散射回波。经过放大电路和模数转换，将振动探测信号输入到数据处理计算机。传感光缆沿线区域的振动信号，都被完整实

时地探测和采集。

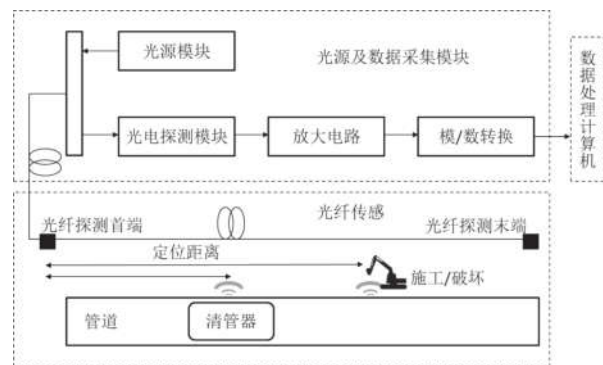


图1 光纤传感系统结构示意图

### 2.2 振动信号提取

分别截取一段清管器振动信号与一段机械施工振动信号进行对比分析，清管器在经过管道焊接缝隙时，与管道焊接缝隙撞击会产生强烈的振动波，从清管器振动信号的时域波形中可以看到多次明显的激励振动，从激励的时域形态和时间间隔来看与机械施工作业信号非常相似，这是因为在铺设油气管道施工时采用环焊缝焊接技术将各节钢管焊接为一体，每节钢管规格一致，所以每条管道焊缝的间距是基本一致的，而在通常情况下，清管器在管道中匀速前进，因此激励信号波形呈现较为明显的规律性。挖掘机在进行开挖动土作业时，其动作间隔时间一般也较为均匀一致，从机械施工振动信号的时域波形中也可以看到多次明显的激励振动，且每次激励的间隔时间基本一致，约为2s至3s，其信号波形与清管器振动产生的波形仍具有一定的相似性。根据以上分析，凭借单个探测点的时域波形，从中提取的信号特征较难对清管器振动信号与机械施工振动信号进行有效区

分,这也是在清管器作业期间分布式光纤振动传感系统极易产生大量机械挖掘误报警的主要原因。

如图2所示,为此段清管器振动信号与此段机械施工振动信号的时间-空间光纤振动信号瀑布图的比较。可见,加入了空间的观察维度后,从人眼观察,清管器振动信号与机械施工振动信号具有较为明显的区别。清管器产生的振动波,是沿着金属管壁向前后方向传播。在分布式光纤振动传感系统中,空间连续的多个探测点,均可以探测到同一次清管器撞击管道焊缝的振动波,由于管道伴行光缆与管道一般是水平铺设,因此分布式光纤振动传感系统的各个相邻探测点对同一次清管器撞击管道焊缝的振动波的接收时差是基本一致的。从光纤振动信号瀑布图中,清管器撞击管道焊缝产生的每次振动

信号均呈现一个类似V字的形状,信号图块的底部具有明显的直线型特征。而机械挖掘每次下挖动作产生的激励,由于振动波是通过土壤介质传导到探测光缆,由于土壤介质对振动波的吸收作用,其空间影响范围一般小于清管器撞击管道焊缝信号,且底部一般不具有直线型特征,而是更接近于圆弧形,综上,从空间影响范围和激励图块的形态等方面,机械挖掘振动信号都与清管器撞击管道焊缝信号存在明显区别。因此,应将分布式光纤振动传感系统探测信号的时域和空域进行结合分析,通过空间连续的探测点构建振动信号时域-空域瀑布图,利用图像分析算法,将计算分析的侧重点放在机械挖掘振动信号和清管器振动信号的形态特征区别。

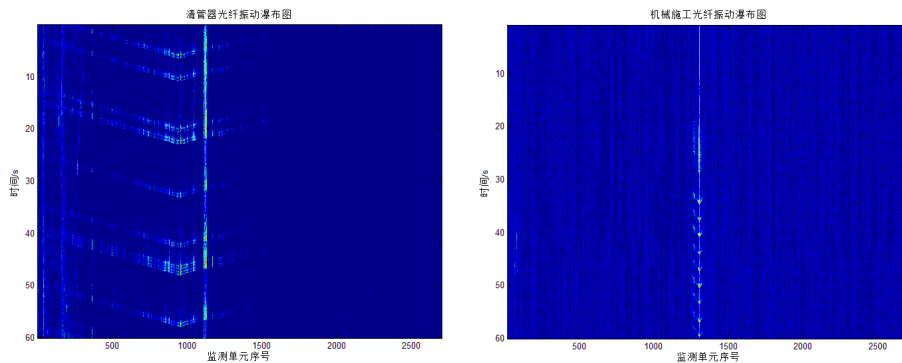


图2 光纤振动信号瀑布图比较

### 3 数据处理方法

#### 3.1 清管器判断

当分布式光纤振动传感系统在运行过程中探测到大量强烈振动信号时,此时系统需开启清管器判断机制,当判断结果确认当前存在清管器作业时,系统自动切换为清管器跟踪模式。

清管器判断计算步骤如下:

(1) 系统读取经过数据预处理后的光纤振动信号瀑布图矩阵,再进行霍夫变换,查找图像中的直线段,其中空间跨度设置为10,直线段长度阈值设置为50,若图像中存在符合条件的直线段,记录每条直线段的起始位置和斜率信息。

(2) 统计图像中存在符合条件的直线段数量,当符合条件的直线段数量达到阈值 $T_1$ ,进入下一步判断。

(3) 统计直线段斜率绝对值数组的方差值,当直线段斜率数组的方差值小于阈值 $T_2$ ,则说明此时光纤振动信号瀑布图中存在多条斜率绝对值相近的直线段,系统此时判断当前存在清管器作业,需开启清管器跟踪模式。

#### 3.2 清管器跟踪

从光纤振动信号瀑布图中,清管器撞击管道焊缝产生的每次振动信号均呈现一个类似V字的形状。对光纤振动信号瀑布图中的每个V字形状进行底部的判断定位,即可实现基于分布式光纤振动传感系统的清管器跟踪。

清管器跟踪计算步骤如下:

(1) 系统读取经过数据预处理后的光纤振动信号瀑布图矩阵,进行图像连通域分割,分别提取瀑布图中空间连续的每次激励信号。

(2) 对于图像连通域分割得到的每个独立的图块,判断这个图块是否处于直线区域,即根据上一节所述的清管器判断步骤记录的每条直线段的起始位置,判断图块是否与直线指示的区域是否有重合,若存在重合,则认为这个图块为清管器振动激励产生的信号图块。

(3) 对于每个被判定为清管器振动激励产生的信号图块,查找其底部像素点的横坐标,记为 $V_1$ ,同时,查找其对应直线指示区域中,靠近图块底部的直线段的两个端点,记为 $V_2$ 和 $V_3$ ,当 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 的数值差值小于预设阈值范围,则取这三个值的均值作为这个清管器振动激励信号图块的定位结果,当 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 的数值差值超

过预设阈值范围,则取 $V_1$ 值作为这个清管器振动激励信号图块的定位结果。

(4)系统每60秒进行一次清管器跟踪定位判断计算,记录每次清管器定位判断的时刻和定位估值,使用历史时刻-定位数据进行线性拟合,对清管器在下一时刻的行进位置进行预测,若清管器进行位置的判断数值和预测数值差异,超过5次超过预设范围,系统发出清管器卡球危险报警。

(5)系统每60秒进行一次清管器跟踪定位判断计算,当超过10次在光纤振动信号瀑布图中未查找到符合清管器激励特征的图块,即没有在光纤振动信号瀑布图查找到符合条件的直线段,清管器跟踪模式自动关闭,系统恢复常规的挖掘监测模式。

### 3.3 测试效果

某天然气管道监测距离约25km,沿途共有20个标识定位桩,标识定位桩依次命名为1号至20号。在常规的运行状态下,分布式光纤振动传感系统对管道周边出现的各种挖掘破坏振动进行连续实时地监测,在某次清管作业期间,同时开展了清管器跟踪的现场试验。在清管器作业过程中,工作人员在管道沿线设置了多个机械法跟踪监测点,但由于条件限制,一共只设置有5个监测点,分别位于:1号桩、6号桩、11号桩、16号桩、19号桩,当清管器行进到机械法跟踪监测点位置时,会推动应变片,此时工作人员会记录清管器到达对应跟踪监测点的时刻。同时,当清管器作业开始进行时,产生的大量强烈振动信号会被分布式光纤振动传感系统探测到,自动触发系统切换为清管器跟踪模式,在此同时利用分布式光纤振动传感系统对清管器进行跟踪定位。

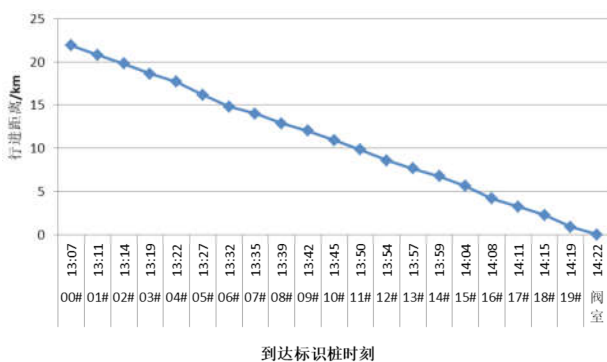


图3 清管器的行进路线

以机械法和分布式光纤振动传感系统各自判断并记录的清管器到达各标识桩的时刻作为比较依据。根据监测记录比对,分布式光纤振动传感系统记录的到达各标识桩的时刻,与现场人员的记录基本一致。根据分布式光纤振动传感系统的记录数据,绘制清管器行进路线如

图3所示。

由图3可以看出,此次清管作业过程中,清管器的行进速度较为均匀,没有出现清管器卡球等危险状况。利用光纤传感系统实现清管器跟踪,可以大量地节约清管作业期间的监测人力和物力成本,并能够实时监测清管器的行进速度,通过监测清管器位置数据的斜率变化对清管器的运行状态进行预判,及时发现清管作业中的风险因素。

### 4 结语

分布式光纤振动传感系统利用管道伴行通信光缆作为振动传感器,采集和分析管道沿线周边的振动信号,对管道挖掘破坏等行为进行预警,以确保管道运营安全。而在清管器作业期间,由清管器在管道中行进时碰撞管道焊缝而引起的大量振动信号,往往会触发光纤管道安全监测系统的大量误报警,不仅给管道维护人员带来困扰,影响系统的运行效果。而清管器跟踪在清管作业期间,也是一项极为重要的工作,必须及时地发现清管器是否出现卡球的情况,确保在清管作业期间不会发生安全事故。利用分布式光纤振动传感系统进行清管器跟踪,不需布设安装额外的监测设备,可以大幅降低清管跟踪作业成本和人工劳动强度,并可以对清管器在作业期间的行进状态进行连续实时地监测。

本文对分布式光纤振动传感系统信号预处理和振动信号的提取方法进行的论述,并据此设计了一种清管器自动判断和清管器跟踪方法,当分布式光纤振动传感系统在运行过程中探测到大量强烈振动信号时,此时系统被触发开启清管器判断机制,当判断结果确认当前存在清管器作业时,系统自动切换为清管器跟踪模式。而当清管作业结束后,系统再次判断清管器振动信号是否停止,从而自动切换回挖掘监测模式。通过现场实验,由实验结果可知:本文提出的方法能够有效利用光纤振动传感系统实现清管器跟踪,及时发现清管作业中的风险因素,验证了该方法的可行性和有效性。此种基于光纤振动信号判断自动切换清管器跟踪监测模式运行机制的应用,能够在优化系统管道破坏事件监测效果的同时,实现清管器作业全过程的监测跟踪定位,进一步保障油气管道的安全运行。

### 参考文献

- [1]范军领,何昊,毕海胜,等.油气管道及站场光纤监测技术研究进展[J].管道技术与设备,2022(003):000.
- [2]陈晨.基于COTDR技术在长输油气管道光纤预警系统中的设计与应用[J].石油化工自动化,2022,58(6):5.
- [3]孙磊峰,魏庆东,韦正鑫.油气管道外破事件横向定位估算方法分析[J].石化技术,2022,29(11):71-72.