

数控射孔仪智能校深定位技术

汤科,温德志,蔡山,李龙新,胡胜杰,葛广辉

中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司 黑龙江大庆 163412

项目支持:中国石油大庆油田有限责任公司油气田数智化发展科技专项“数智化射孔装备及应用技术研究”(25DQYTSG013-06-03)

引用:汤科,温德志,蔡山,等. 数控射孔仪智能校深定位技术[J]. 油气井测试,2026,35(2):24-31.

Cite: TANG Ke, WEN Dezhi, CAI Shan, et al. Intelligent depth calibration and positioning technology for unmanned CNC perforating machine[J]. Well Testing, 2026, 35(2): 24-31.

摘要 针对传统数控射孔仪人工测井校深技术门槛高、误差难控、劳动繁琐的行业痛点,研发数控射孔仪智能校深定位技术,提升射孔施工数字化与智能化水平。构建“语音指挥+曲线智能比对+施工节点人机协控”三大核心技术体系,研制数控射孔仪语音指挥系统实现绞车操作语音调度,融合 CCL 多重耦合过滤与 DTW 算法实现曲线智能识别,建立射频指令序贯验证的人机协控机制保障施工安全,形成数控射孔仪智能校深定位技术。59 井次现场试验表明,该技术接箍识别准确率 $\geq 98\%$,单井校深效率平均提升 25.4%,人力成本降低约 16.6%,试验中系统自动完成参数调节、深度标注与管柱调整值计算,人工复核结果均符合行业标准。本技术实现了数控射孔仪校深定位的全流程智能化操作,解决了传统施工效率低、误差难控的问题,为射孔技术智能化发展提供了关键技术支撑。

关键词 射孔;校深技术;数控射孔仪;语音指挥系统;智能化;人机协控;标志层识别

中图分类号:TE928 文献标识码:B DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2026.02.004

Intelligent depth calibration and positioning technology for unmanned CNC perforating machine

TANG Ke, WEN Dezhi, CAI Shan, LI Longxin, HU Shengjie, GE Guanghui

Oil Testing Technology Service Branch, PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163412, China

Abstract: Aiming at the industry pain points of high technical threshold, difficult error control and cumbersome labor in manual logging and depth calibration of traditional numerical control perforation tools, the intelligent depth calibration and positioning technology for numerical control perforation tools is researched and developed to improve the digitalization and intelligentization level of perforation construction. Three core technical systems, namely “voice command + intelligent curve comparison + human-machine cooperative control of construction nodes”, are constructed. A voice command system for numerical control perforation tools is developed to realize voice scheduling of winch operation; intelligent curve recognition is achieved by integrating CCL (Casing Collar Locator) multi-coupling filtering and DTW (Dynamic Time Warping) algorithm; a human-machine cooperative control mechanism based on sequential verification of radio frequency commands is established to ensure construction safety, thus forming the intelligent depth calibration and positioning technology for numerical control perforation tools. Field tests on 59 wells show that the casing collar recognition accuracy of this technology is $\geq 98\%$, the average depth calibration efficiency per well is increased by 25.4%, and the labor cost is reduced by about 16.6%. During the tests, the system automatically completes parameter adjustment, depth marking and calculation of pipe string adjustment values, and all manual review results conform to industry standards. This technology realizes the full-process intelligent operation of depth calibration and positioning for numerical control perforation tools, solves the problems of low efficiency and difficult error control in traditional construction, and provides key technical support for the intelligent development of perforation technology.

Keywords: perforation; depth calibration technology; numerical control perforation tool; voice command system; intelligence; human-machine cooperative control; marker bed identification

数字化与智能化技术的迭代推动石油工业向智能化、少人化转型,射孔作为油气田开发的关键工序,其作业效率与智能化水平直接影响油气田开发效益。当前石油测井领域已实现部分智能化突

破,中国石油测井公司研制的 CPLog 多维高精度成像测井系统^[1],通过软件模拟绞车操作流程实现了仪器串自动化输送,开创了智能测井新模式,但该系统的技术应用范围聚焦于测井环节,未覆盖射孔

校深定位的核心工序,无法满足射孔作业的智能化需求。赵昕迪等^[2]开发了水平井泵送数据可视化系统,实现了泵送跟踪、自动定位与语音提示等功能,但该系统仍需测控人员在现场操作地面系统完成测井校深,未完全摆脱对人工的依赖,且缺乏对射孔曲线的智能识别与自动比对能力。李缙^[3]研发的新型数控射孔仪实现了射孔操作的数控化,但未集成智能校深定位模块,仍需工程师人工观测、对比 CCL 与 GR 信号曲线,作业效率受人员技术水平影响较大。

射孔行业作为油气田开发的重要环节,正面临结构性缺员与人力成本上升的双重压力,传统射孔仪校深定位的人工操作模式,存在劳动强度大、技术门槛高、测量误差易受人为主观因素影响等问题,成为制约射孔作业数字化升级的关键瓶颈。现有射孔领域的测控技术均未实现校深定位的全流程智能化,且缺乏针对电缆输送与油管输送两种主流射孔工艺的适配性智能解决方案。为此,本文研制了数控射孔仪智能校深定位技术,集成语音指挥、曲线智能比对与人机协控三大核心技术,适配电缆、油管输送射孔工艺,实现射孔校深定位的智能化操作与管控,同时通过人机协控机制保障射孔起爆安全,为射孔行业的智能化转型提供技术支撑。

1 技术原理

数控射孔仪智能校深定位系统以中央处理单元为核心,由语音指挥模块、曲线智能分析模块、人机协控模块及电源管理单元构成,系统架构如图 1 所示。电源管理单元为其余四大单元提供稳定供电,是系统运行的基础保障;中央处理单元作为数据交互与指令控制的核心,接收曲线智能分析模块的测井曲线数据、人机协控模块的人工确认射孔信号,同时向语音指挥模块发送语音指令信号、向曲线智能分析模块发送参数调节指令;语音指挥模块根据中央处理单元的指令生成合成语音,指挥绞车操作员完成电缆起下操作,并将操作执行状态反馈至中央处理单元;曲线智能分析模块融合 CCL 接箍信号多重耦合过滤算法^[4]与基于动态时间弯曲(DTW)的 GR 曲线相似度匹配算法^[5](相似度阈值 >80%),自动识别并标注 CCL 与 GR 曲线特征尖峰,将识别结果传输至中央处理单元实现射孔器自动校深定位^[6];人机协控模块接收绞车操作员的手持终端射孔信号,解调解码后传输至中央处理单

元,实现施工节点的人工确认与工序控制^[7-9]。

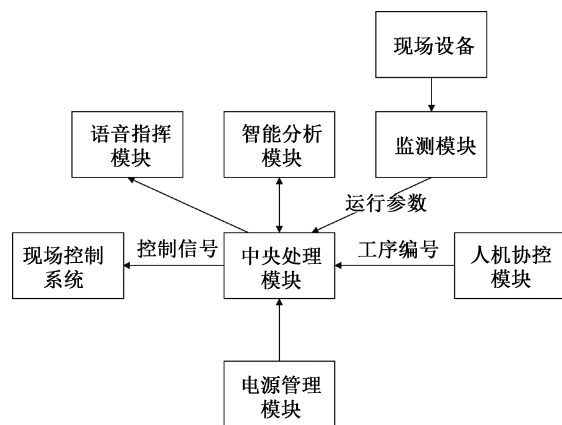


图 1 系统架构图

Fig. 1 System architecture diagram

为保障射孔起爆安全,系统基于射频频指令编码技术,将电缆输送射孔流程划分为 6 个关键工序节点,油管输送射孔流程划分为 5 个关键节点,每个节点对应唯一的二进制射频频指令编码。在关键施工节点设置人机协控机制,需经人工确认并发送射频频信号后,中央处理单元方可触发后续工序指令,未接收对应射频频信号时系统将锁定程序。该技术通过 DTW 距离算法与相对高值法提升曲线匹配精度,通过人机协控模块实现工序指令的强制校验,创新性地实现了射孔校深定位全流程的智能化,有效解决了传统人工方法效率低、误差难控的问题。

2 关键技术

本技术的三大关键技术模块围绕射孔校深定位的安全管控、操作标准化、曲线精准识别三大核心需求构建,分别为施工节点人机协控系统、数控射孔仪语音指挥系统、实测接箍 CCL 和 GR 标志尖峰自动识别技术。各模块独立实现专项功能且彼此协同联动,通过中央处理单元完成数据与指令的交互,形成闭环的智能校深定位技术体系,既实现了射孔作业的智能化操控,又保障了施工精度与安全,同时适配电缆输送、油管输送两种主流射孔工艺。

2.1 施工节点人机协控系统

施工节点人机协控系统是保障射孔作业安全与质量可控的核心模块,通过射频频指令序贯验证与人工节点确认相结合的方式,将电缆、油管输送射孔的测量工序拆分为标准化关键节点,实现工序的强制控序与质量闭环管控,避免因工序跳步、操作失误引发的射孔安全事故。

该系统的核心实现方式为射频信号的收发与解码:在数控仪端安装软件无线电设备(USRP)作为射频接收装置,绞车工在确认当前工序节点完成达标后,通过手持终端点击对应工序代码按键,产生特定编码的射频信号并经天线发送;数控仪的天线接收信号后,经射频模块解调转换为数字信号,再由解码器解码为相应的控制指令^[10],并传输至中央处理单元触发后续工序。

系统将电缆输送射孔的测量工序拆分为6个关键节点,油管输送射孔的测量工序拆分为5个关键节点,各工序编号对应唯一的二进制射频命令信号,指令需严格按照预设顺序执行,若跳过某一节点,中央处理单元将锁定程序,无法激发后续动作。电缆/油管输送射孔测量工序控制流程如图2、图3所示,其中明确了各判断节点的定量判定标准,提升流程的指导性与可操作性。

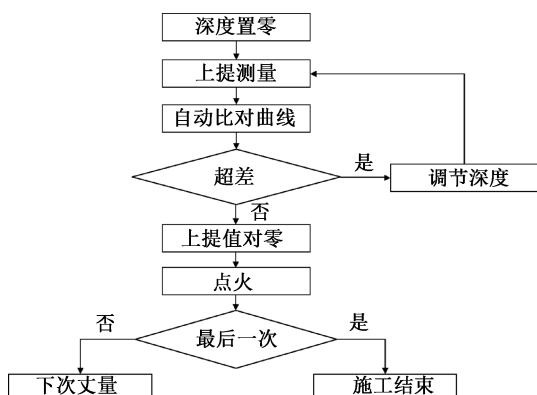


图2 电缆输送射孔测量工序控制流程图
Fig. 2 Control flow chart of wireline conveyed perforating measurement process

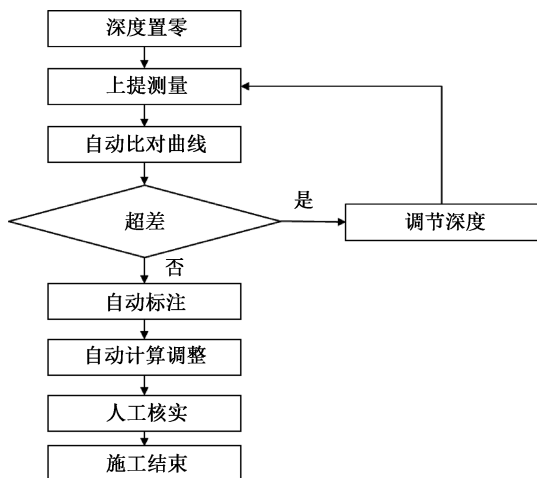


图3 油管输送射孔测量工序控制流程图
Fig. 3 Control flow chart of tubing conveyed perforating measurement process

2.2 数控射孔仪语音指挥系统

数控射孔仪语音指挥系统是实现射孔作业“智能化操控、标准化执行”的关键,系统根据实时测控工序状态自动生成合成语音指令,指挥绞车工完成电缆起下操作,并通过监测井口滑轮运转状态与深度变化,验证指令执行效果,未正确执行时将锁定程序。针对电缆输送 CCL 定位与油管输送 GR-CCL 定位两种工艺,开发了两套适配性语音指挥流程,并设计了遇阻、遇卡、曲线不达标等特殊工况的语音处理流程^[11-12],异常情况无法处理时将切换至远程人工操作模式。

为简化流程表述,将电缆输送射孔6个工序、油管输送射孔5个工序的语音指挥流程按工序编号-指令内容-执行动作-判定标准梳理,分别如表1、表2所示。

表1 电缆输送射孔测量语音指挥流程

Table 1 Voice command process for wireline conveyed perforating measurement

工序编号	指令内容	执行动作	判定标准
1#(井口置深)	下放电缆	电缆零点对准井口,绞车工发送1#命令,下放电缆	深度增加1 m,指令执行完成,停止语音播报
2#(测接箍)	起测深度已到,进行上提测量	发送2#命令,上提电缆完成射孔井段CCL曲线测量,超差时重新下放测量	接箍深度误差 ≤ 1.0 m,套管长度误差 ≤ 0.1 m;连续3次超差转远程人工
3#(上提值对零)	进行点火上提对零,对零成功,请确认	发送3#命令,下放射孔枪至复测深度,上提测量下标/标志接箍,完成对零	深度对零无误,指令执行完成
4#(核实深度、充电)	核实点火深度、接箍深度	绞车工核实点火深度、接箍深度等参数与设计的一致性	参数吻合,发送4#命令,系统自动为起爆器充电
5#(点火)	准备点火	充电至额定电压,发送5#命令,系统执行放电起爆	起爆完成,测量界面生成点火线标记
6#(丈量)	丈量对零,施工结束	发送6#命令,上提/下放电缆至丈量倒数归零,完成丈量	倒数归零,指令执行完成;最后一次丈量播报施工结束

2.3 实测接箍 CCL 和 GR 标志尖峰自动识别技术

为实现 CCL 接箍信号与 GR 标志层尖峰的自动识别,研发了 CCL 接箍多重耦合过滤算法与 GR 曲线动态关联智能识别技术。该技术能将测井数据转换为电子图纸,并与实测曲线进行自动比对与评价。

表 2 油管输送射孔测量语音指挥流程

Table 2 Voice command process for tubing conveyed perforating measurement

工序编号	指令内容	执行动作	判定标准
1#(井口置深)	下放电缆	电缆零点对准井口,绞车工发送 1# 命令,下放电缆	深度增加 1 m,指令执行完成,停止语音播报
2#(上提测量)	起测深度已到,进行上提测量	发送 2# 命令,上提电缆完成 GR/CCL 曲线测量	深度减少 1 m,停止播报;上提至停测深度
3#(自动比对曲线)	比对分析曲线	发送 3# 命令,系统自动比对实测与基准 GR 曲线相似度,识别主/辅标志层	相似度 ≥ 80%,标志层误差符合要求;不满足则转远程人工
4#(自动标注与计算)	标注并计算深度调整值	发送 4# 命令,系统完成曲线深度标注与管柱调整值计算	标注/计算完成,指令执行完成
5#(人工核实)	施工结束	绞车工核实深度数据的准确性	数据无误,发送 5# 命令,测量流程停止

2.3.1 CCL 与 GR 校深的选择依据及核心特点

CCL(磁性定位)接箍校深与 GR(自然伽马)地层标志层校深是射孔作业中两种核心校深方式,二者的适用场景、技术特点存在显著差异,系统根据射孔输送工艺、井型特征、井下工况及地层条件进行适配性选择,核心选择依据及特点如表 3 所示。

表 3 CCL 与 GR 校深的选择依据及核心特点

Table 3 Selection basis and core characteristics of CCL and GR depth calibration

校深方式	核心原理	核心特点	选择依据
CCL 接箍校深	通过识别套管接箍的磁性异常信号,确定套管深度位置,实现射孔深度定位	1. 定位与套管结构强关联,精度受套管完整性影响小;2. 信号识别速度快,适配短井段快速校深;3. 抗井下温度、压力干扰能力强,经算法优化后可适配深井复杂工况;4. 对地层无依赖性,适用于地层标志层不明显的井段	1. 射孔工艺:主要用于电缆输送射孔;2. 井型:直井、超深井为主;3. 工况:井下温度高、压力大、地层标志层不清晰的复杂工况;4. 井段:短井段射孔,需快速完成接箍定位的场景
GR-CCL 联合校深	融合 CCL 套管接箍定位与 GR 地层标志层定位,相互验证、互补误差	1. 定位与地层特征强关联,精度受标志层辨识度影响大;2. 适配长井段连续地层定位,可弥补 CCL 在长水平段套管定位的误差;3. 需与测井基准 GR 曲线比对,对算法匹配精度要求高;4. 受地层岩性变化影响,需划定特征井段进行识别	1. 射孔工艺:主要用于油管输送射孔;2. 井型:水平井、大位移井、多层系直井;3. 工况:地层标志层清晰、岩性特征明显的常规工况;4. 井段:长水平段、多层系射孔,需结合地层定位的场景

2.3.2 CCL 接箍多重耦合过滤算法

该算法通过五层筛选实现接箍的精确识别:

(1)深度边界识别:仅在测井资料指示的接箍理论深度 ± 3 m 范围内进行识别标注。

(2)幅差过滤:如图 4 所示,计算实测 CCL 曲线上相邻两个正极值点连线与水平线的夹角,滤除夹角小于设定阈值(如 75°)的无效尖峰。

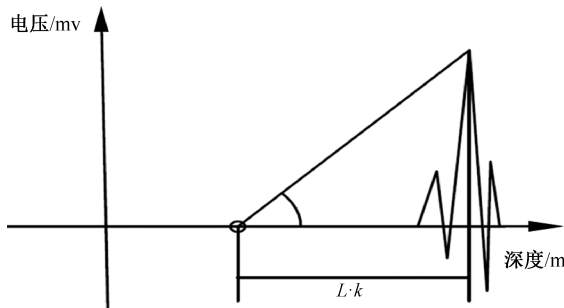


图 4 幅差过滤算法

Fig. 4 Amplitude difference filtering algorithm

设 C 为接箍曲线的所有采样点的数据集合, $C = (Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_N)$, $Y_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 为接箍曲线第 i 个采样点的高度值, N 为接箍曲线采样点的个数;利用式(1)计算当前采样点与前一个采样点连线与深度基线形成的夹角 A 为

$$A = \arctan \frac{Y_{i+k} - Y_i}{L \cdot k} \quad (1)$$

式中: Y_{i+k} 为第 i+k 个采样点的尖峰顶点高度值; Y_i 为第 i 个采样点的尖峰顶点高度值; $L \cdot k$ 为测试长度; L 为采样间距,取值大于 0.000 4 m; k 为测试长度内的采样点个数一般取值 25; A 为测试长度内两个接箍数据点连线与深度基线形成的夹角,如图 5 所示。

(3)形态识别:对保留的尖峰进行形态校验,要求在大约 30 cm 深度范围内,曲线顺序出现一个负极值、一个正极值、一个负极值的特征形态。

(4)极大值筛选:将经过上述筛选的尖峰与其深度 ± 3 m 范围内的其他尖峰比较,将幅值最高的尖峰判定为真实接箍信号。

(5)动态阈值调整:系统累计存储已识别接箍的幅值并求取平均值,以该平均值的 2/3 作为动态阈值,用于后续实时识别过程的阈值自适应调整。

2.3.3 GR 曲线动态关联智能识别技术

(1)GR 曲线特征井段识别

如图 5 所示,在测量过程中,系统以测井 GR 曲线上两个标志层尖峰及短标的理论深度为基础,向上、下各扩展 5 m,划定一个样本井段。利用动态时

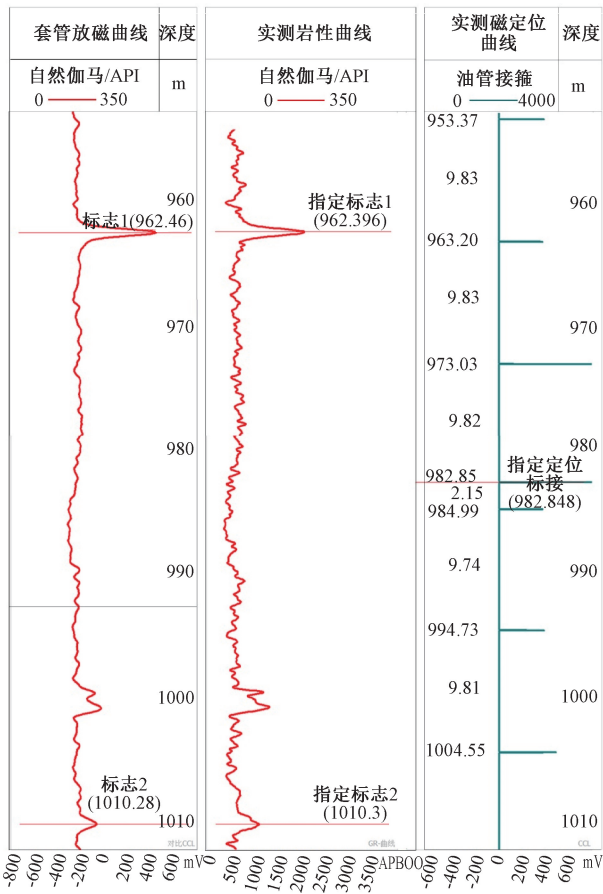


图5 GR自动识别系统

Fig. 5 GR automatic identification system

间弯曲(DTW)距离算法计算该样本井段内实测GR曲线与测井GR基准曲线之间的相似度。若相似度超过预设阈值(80%),则判定井位正确,并将该样本井段确定为用于比对的特征井段。DTW距离计算公式为

$$TW(X, Y) = \min_{z(i)} \left\{ \sqrt{\sum_{i=1}^n C[X_i, Y_j] / K} \right\} \quad (2)$$

式中: $C[X_i, Y_j]$ 表示第*i*个点 X_i 和第*j*个点 Y_j 之间的距离测度,一般这个距离测度采用欧氏距离的平方, $C[X_i, Y_j] = (X_i - Y_j)^2$,其中, $i = (1, 2, \dots, n)$, $j = (1, 2, \dots, m)$; K 为弯曲路径的数量; $z(i)$ 为弯曲路径, m 。

(2) GR曲线标志尖峰识别

在已确定的实测GR特征井段内,通过计算曲线斜度与尖度,筛选出符合正态分布且幅值最大的两个尖峰作为候选校深标志^[13],如图5所示。将与套管放磁曲线标志尖峰1深度误差 ≤ 1 m的实测尖峰设为实测标志尖峰1,与标志尖峰2深度误差 ≤ 1 m的设为实测标志尖峰2,并自动标注其峰值点深度。若深度误差超过1 m,则转为远程人工操作。

系统将实测与理论标志层尖峰进行对比,若深度差值符合射孔要求,则自动计算深度调整值;若不符合,则转为远程人工操作。

3 现场应用

该技术已累计完成59井次的测控施工应用,覆盖大庆油田直井32井次、水平井20井次、超深井7井次,根据不同井型、射孔工艺选择CCL校深或GR-CCL联合校深方式,适配电缆输送、油管输送两种射孔工艺,应用结果表明:均实现接箍识别准确率 $\geq 98\%$,射孔深度误差 ≤ 0.1 m,单井校深效率平均提升25.4%;单井次均可减少现场操作人员1名,人力成本降低约16.6%,验证了本技术在不同井型、不同工艺下的普适性与稳定性。

3.1 直井应用案例——南XX井

以南XX井电缆输送射孔为例进行说明。该井射孔目的层深度为1 206.20~1 207.20 m,射孔1次,使用102枪,配16发SDP45HMX39-1型射孔弹。选择依据:该井为常规直井,采用电缆输送射孔工艺,井段短且地层标志层辨识度一般,符合CCL接箍校深的适配场景,利用CCL信号识别速度快、对地层无依赖的特点,可快速完成接箍定位与射孔校深。施工过程如下:

1#工序(深度置零):绞车工对齐电缆零点后,通过手持终端发送“1#”信号。系统接收后循环播报“下放电缆”,深度置零。检测到深度增加1 m后停止播报。

2#工序(测接箍):深度达到起测深度1 218.5 m后,系统播报“起测深度已到,请上提测量”。绞车工发送“2#”信号,停止语音播报,开始测量曲线,上提过程中,曲线智能分析模块启动CCL接箍多重耦合过滤算法准确识别接箍,充分发挥该算法在接箍识别上的高精度优势。

3#工序(上提值对零):测量曲线合格后,发送3#命令,系统指挥下放射孔枪至起测深度后上提对零,对零成功后语音提示确认。

4#工序(核实深度):系统自动比对深度并显示参数,绞车工核实点火深度、接箍深度等参数与设计的一致性,核实无误后,发送4#命令,系统自动为起爆器充电至180 V。

5#工序(点火):充电至额定电压,发送5#命令,系统执行放电起爆射孔器,界面生成点火线。

6#工序(丈量):发送6#命令,上提/下放电缆至

丈量倒数归零,完成丈量。倒数归零,指令执行完成;最后一次丈量播报施工结束。

为量化评估射孔施工远程测控系统中智能校深模块的工程应用价值,以南 XX 井为试验对象,

开展同井条件下人工校深与智能校深的对比试验,从人员配置、作业效率、识别精度、深度控制及操作模式 5 个核心维度进行综合评价,结果如表 4 所示。

表 4 南 XX 井人工与智能校深效果对比

Table 4 Comparison of manual and intelligent depth calibration for Nan XX well

对比指标	人工校深	智能校深	效果
人员数量	3 人(绞车工、操作工程师)	2 人(绞车工)	减少 1 人,人力成本降低 16.7%
校深耗时	45 min	33 min	效率提升 26.7%,高于平均提升值
曲线识别准确率	89%	99.20%	提升 10.2%
射孔深度误差	≤0.20 m	≤0.10 m	误差缩小 50%,远优于行业标准
参数调节方式	人工计算、手动标注	系统自动调节、智能标注	无人工干预,避免人为误差

试验数据表明,智能校深模式将现场作业人员从 2 人精简至 1 人(仅保留绞车工),单井人力成本降低 16.7%;校深耗时由 45 min 缩短至 33 min,作业效率提升 26.7%。精度指标方面,曲线识别准确率从 89% 提升至 99.20%,射孔深度误差控制在 0.10 m 以内,较人工校深误差缩小 50%,远优于行业通用标准。参数调节方式由人工计算、手动标注转变为系统自动调节与智能标注,实现了校深核心环节的无人工干预,从根源上规避了人为操作失误。该对比结果验证了智能校深技术在降本增效、提升施工可靠性方面的显著优势。

3.2 水平井应用案例——葡平 XX 井

北 XX 井为大庆油田水平井,水平段长度 860 m,采用油管输送射孔工艺,射孔目的层深度 1 890.5~1 905.3 m。选择依据:该井为长水平段水平井,采用油管输送射孔工艺,测量段地层标志层清晰(岩性特征明显),符合 GR-CCL 联合校深的适配场景,利用 GR 曲线对地层的精准定位优势,结合 CCL 接箍的油管定位优势,实现二者互补、提升整体校深精度。

该井测量深度覆盖范围为 1 040~1 105 m,应用本技术开展智能校深,曲线智能分析模块通过 GR 曲线动态关联智能识别技术^[14],精准识别标志层尖峰,射孔实测地层 GR 曲线与左侧地层 GR 曲线形态高度吻合,相似度达 89%,对应识别出指定标志层 1(1 070.5 m)与指定标志层 2(1 044 m),与基准标志层深度偏差分别为 0.01、0.02 m,验证了 GR 曲线地层对比的高精度。

系统自动记录油管接箍 CCL 信号,共识别了 115 个油管接箍,与下入井内的油管数量一致,接箍识别准确率 100%,在 1 102.80、1 104.43 m 等深度

处识别到短距脉冲尖峰,间距 1.63 m,与预先输入的 1.62 m 定位油管短节长度一致。系统通过检测全井的油管长度,判断这两个尖峰为定位油管短节的上下接箍,自动设置其上接箍为定位接箍。通过计算定位接箍与 GR 标志层的距离,判断射孔枪需要下放 9.56 m 才能准确射开目标油层。射孔深度误差控制到了 0.05 m 以内。本井传统人工校深需耗时 45 min,智能校深仅耗时 33 min,效率提升 25.3%;现场测控人员从 2 人减至 1 人,顺利完成射孔施工,验证了技术在水平井射孔施工中的适配性。

3.3 超深井应用案例——庆深 XX 井

庆深 XX 井为大庆油田超深井,最大井深 4 720 m,采用电缆输送射孔工艺,井底温度 185 ℃、压力 47 MPa,井下工况复杂。选择依据:该井为超深井,井下温度高、压力大,且深井地层标志层辨识度降低,采用电缆输送射孔工艺,符合 CCL 接箍校深的适配场景,利用 CCL 抗井下温度、压力干扰能力强的特点,经算法优化后可有效克服深井信号干扰问题,实现精准校深。

应用本技术时,系统通过动态调整识别门槛的 CCL 接箍过滤算法,克服了深井信号干扰问题,如图 6 所示。接箍识别准确率 98.2%,射孔深度误差 0.05 m 以内;单井校深耗时从传统人工的 60 min 缩短至 44 min,效率提升 26.7%,实现了深井复杂工况下的智能校深定位,证明技术的抗干扰性与可靠性。

此外,本技术在 59 井次试验中,针对遇阻、遇卡、曲线相似度不达标等特殊工况共触发 12 次语音预警,均通过系统自带的特殊工况处理流程完成应对,3 次触发远程人工干预,无任何安全事故发生,

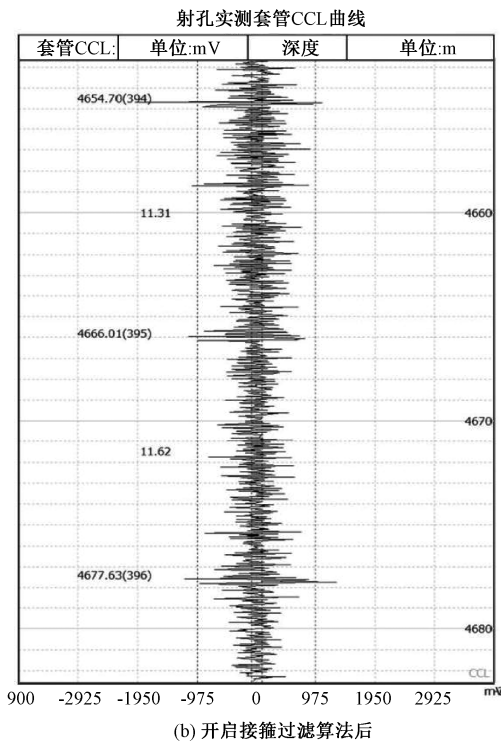
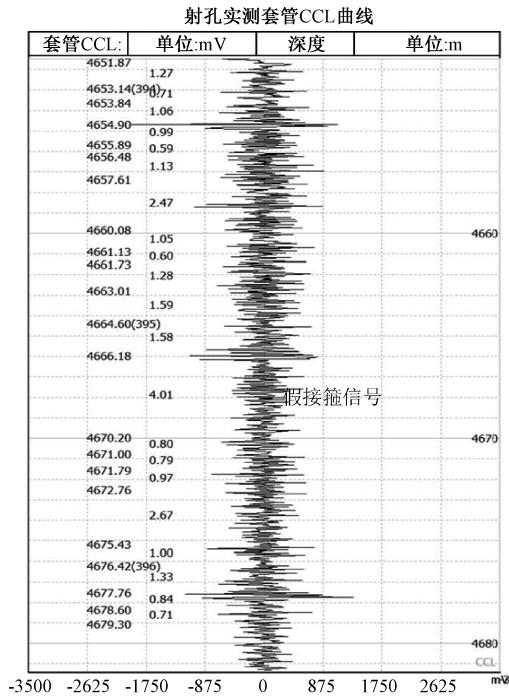


图6 智能过滤假接箍信号

Fig. 6 Intelligent filtering of false thread joint signals

进一步验证了技术的安全性与实用性,同时也验证了CCL与GR校深方式在不同工况下选择的合理性与适配性。

4 结论

(1)本研究针对传统数控射孔仪校深定位依

赖人工、误差难控等行业痛点,集成语音指挥、曲线智能比对、人机协控三大核心技术,构建出适配电缆、油管两种射孔工艺的智能校深定位技术体系,实现射孔校深定位全流程智能化与少人化,填补了该领域的技术空白,为射孔技术变革提供了关键支撑。

(2)该技术核心是“中央处理单元+功能模块”的分布式架构,实现了模块功能协同与数据闭环。研发出适配双工艺的智能语音指挥系统,提出的高精度曲线识别算法让接箍识别准确率 $\geq 98\%$ 、射孔深度误差 $\leq 0.1\text{ m}$,建立的射频指令序贯验证人机协控机制,实现工序强制控序,试验中未出现因工序操作引发的安全事故。

(3)该技术经59井次直井、水平井等多井型现场试验验证,单井校深效率平均提升25.4%,单井可减少1名操作人员、人力成本降低约16.6%,推动射孔作业从人工主导向智能自主转型,提供了可复制的技术范例。下步开展射孔绞车智能化控制技术研究,实现绞车“智能驾驶”,优化算法以适配复杂工况,解放绞车工,同时深化与油田数字化平台的融合,构建井场-云端一体化智能管控体系^[15]。

致谢:感谢大庆油田试油试采分公司同意本文公开发表,感谢相关技术人员在论文写作过程中给予的帮助。

参考文献

- [1] 佚名. CPLog 多维高精度成像测井系统——集团公司高端测井主力装备[J]. 石油科技论坛, 2021, 40(6): 75.
Anonymous. CPLog Multidimensional high-precision imaging logging system: a core high-end logging equipment of the group company[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2021, 40(6): 75.
- [2] 赵昕迪, 任国辉, 聂靖, 等. 水平井泵送数据可视化系统[J]. 测井技术, 2022, 46(3): 367-370.
ZHAO Xindi, REN Guohui, NIE Jing, et al. Data visualization system for horizontal well pumping[J]. Well Logging Technology, 2022, 46(3): 367-370.
- [3] 李缙. 新型数控射孔仪研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
LI Jin. Research and implementation of a new numerical control perforating instrument[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2010.
- [4] 舒义刚. 磁定位曲线和伽马曲线的应用[J]. 石油仪器, 2007, 21(3): 53-54.
SHU Yigang. Application of magnetic positioning curve and gamma curve[J]. Petroleum Instruments, 2007, 21(3): 53-54.

- [5] 杨靖. 基于动态时间弯曲的时间序列相似性搜索技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013:4-46.
YANG Jing. Research on similarity search technology for time series based on dynamic time warping [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 4-46.
- [6] 丛颜. 基于套管节箍自动跟踪识别技术的射孔深度控制方法[J]. 石油化工自动化,2022,58(5):29-33.
CONG Yan. Perforation depth control method based on casing collar automatic tracking and identification technology [J]. Automation in Petro Chemical Industry, 2022, 58(5):29-33.
- [7] 陈力颖,毛陆虹,吴顺华,等. 低功耗无源超高频射频识别应答器芯片的射频电路设计与实现[J]. 高技术通讯,2007,17(11):1157-1162.
CHEN Liying, MAO Luhong, WU Shunhua, et al. Design and implementation of radio frequency circuit for low-power passive ultra high frequency radio frequency identification transponder chip [J]. High Technology Letters, 2007, 17(11):1157-1162.
- [8] 张光. 一种基于 ZigBee 无线射频识别系统的设计[J]. 兵器装备工程学报,2016,37(7):109-112.
ZHANG Guang. Design of a wireless radio frequency identification system based on zigbee [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(7): 109-112.
- [9] 蒋皓石,张成,林嘉宇. 无线射频识别技术及其应用和发展趋势[J]. 电子技术应用,2005,31(5):1-4.
JIANG Haoshi, ZHANG Cheng, LIN Jiayu. Radio frequency identification technology and its applications and development trends [J]. Application of Electronic Technology, 2005, 31(5):1-4.
- [10] 孟秋云,殷宪祯,徐鹤. 基于 USRP 的无线射频识别平台设计与实现[J]. 计算机技术与发展,2021,31(3):168-173.
MENG Qiuyun, YIN Xianzhen, XU He. Design and implementation of radio frequency identification platform based on usrp [J]. Computer Technology and Development, 2021, 31(3): 168-173.
- [11] 南京铁道职业技术学院. 一种用于轨道车安全施工的语音指挥系统:CN202021708290.2[P]. 2021-06-01.
- [12] 张效民,武磊,杨学良. 语音指挥调度系统的设计与实现[J]. 计算机系统应用,2003(5):21-22.
ZHANG Xiaomin, WU Cui, YANG Xueliang. Design and implementation of voice command and dispatch system [J]. Computer Systems and Applications, 2003(5):21-22.
- [13] 滕海滨,孙晓明,王玮. 基于智能测调的自然伽马校深磁定位技术的研制与应用[J]. 采油工程,2015(1):38-41.
TENG Haibin, SUN Xiaoming, WANG Wei. Development and application of natural gamma calibration deep magnetic positioning technology based on intelligent measurement and adjustment [J]. Oil Production Engineering, 2015(1):38-41.
- [14] 王强. 基于伽玛与磁性定位测井曲线的智能校深方法 [C]//2023 油气田勘探与开发国际会议(2023IFEDC)论文集. 2023:1-6.
WANG Qiang. Intelligent depth calibration method based on gamma and magnetic positioning logging curves [C]//2023 International Field Exploration and Development Conference Proceedings, 2023:1-6.
- [15] 匡立春,刘合,任义丽,等. 人工智能在石油勘探开发领域的应用现状与发展趋势[J]. 石油勘探与开发,2021,48(1):1-11.
KUANG Lichun, LIU He, REN Yili, et al. Current application status and development trend of artificial intelligence in the field of petroleum exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1):1-11.

编辑 陈志杰

第一作者简介:汤科,男,1981年出生,高级工程师,本科,2004年毕业于中国石油大学(华东)电子信息工程专业,现主要从事射孔完井技术研究和管理工作。电话:17704596717,Email:sk_tangke@petrochina.com.cn。通信地址:黑龙江省大庆市让胡路区乘南十八街试油试采分公司,邮政编码:163412。