

# 水平孔多参数综合测试仪器研发与应用

房勇<sup>1</sup>, 钱锋<sup>1</sup>, 周策<sup>1</sup>, 蔡网锁<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 611734; 2. 四川水发勘测设计研究院有限公司, 四川成都 610000)

**摘要:**为研究引大济岷工程隧洞岩体特征、岩溶发育特征、地应力特征和地下水特征等,在泸定取水中线方案的引水线路中布置水平钻孔8个,共计2300 m。为满足对水平孔综合测试的需求,研制了一套适用于水平钻孔的存储式综合测井仪器。本文分析了水平孔多参数综合测试仪器各参数测量的基本工作原理;详细阐述了各功能单元的电路构成选型,主要采用DSP微处理器和大规模集成电路,结合传感器技术实现多种参数的综合测量,包括:水平钻孔的压力、温度、自然伽马、声波波速、孔内电视图像。综合测试仪器集成了模拟传感器、模拟调理电路、数据采集、数据处理、信息存储、数据通讯、信息交换、测控软硬件、电脑显示等功能,是水平孔综合测试不可缺少的技术。在引大济岷工程的水平定向孔中成功应用,一趟起下钻解决了水平钻孔的井斜、方位角、压力、温度、自然伽马、孔内电视测试的难题,尽最大可能保证了钻孔的安全及降低了劳动强度。

**关键词:**水平钻孔;测试仪器;井斜;方位角;压力;温度;声波波速;自然伽马;孔内电视

**中图分类号:**P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)01-0097-09

## Development and application of multi-parameter integrated testing instrument for horizontal hole

FANG Yong<sup>1</sup>, QIAN Feng<sup>1</sup>, ZHOU Ce<sup>1</sup>, CAI Wangsuo<sup>2</sup>

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China;

2. Sichuan Water Development Investigation, Design & Research Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610000, China)

**Abstract:** In order to study the characteristics of rock mass, karst development, ground stress and groundwater in the tunnel of the Dadu River to the Min River Replenishment Project, 8 horizontal boreholes with a total of 2300 m were arranged in the diversion route of the Luding Water intake Middle route scheme. In order to meet the demand of horizontal hole comprehensive testing, a set of storage comprehensive logging instrument suitable for horizontal drilling is developed. This paper analyzes the basic working principle of the horizontal hole multi-parameter comprehensive measuring instrument. The circuit composition selection of each functional unit is described in detail. DSP microprocessor and large-scale integrated circuit are mainly used, and the sensor technology is combined to realize the comprehensive measurement of many parameters, including: pressure, temperature, natural gamma ray, acoustic wave velocity, and TV image in the hole. Integrated testing instrument integrates analog sensor, analog conditioning circuit, data acquisition, data processing, information storage, data communication, information exchange, measurement and control hardware and software, computer display and other functions, is an indispensable technology for horizontal hole comprehensive testing. It has been successfully applied in the horizontal directional hole of the Dadu River to the Min River Replenishment Project, and the problems of incline, azimuth, pressure, temperature, natural

收稿日期:2022-12-01; 修回日期:2023-10-08 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.01.013

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“复杂地层钻探关键技术智能升级与应用示范——复杂地层漏失智能检测仪器研发(中国地质科学院探矿工艺研究所)”(编号:DD20221652);四川省重点研发项目“高原山区便携式模块化智能钻探装备研发与应用”(编号:2023YFG0071);引大济岷工程

第一作者:房勇,男,汉族,1982年生,高级工程师,机械工程及自动化专业,主要从事探矿工程设备及仪器的研发工作,四川省成都市郫都区成都现代工业港港华路139号,78766882@qq.com。

引用格式:房勇,钱锋,周策,等.水平孔多参数综合测试仪器研发与应用[J].钻探工程,2024,51(1):97-105.

FANG Yong, QIAN Feng, ZHOU Ce, et al. Development and application of multi-parameter integrated testing instrument for horizontal hole[J]. Drilling Engineering, 2024,51(1):97-105.

gamma ray and TV test in the hole have been solved in one trip, thus ensuring the safety of the hole and reducing the labor intensity as far as possible.

**Key words:** horizontal drilling; testing instruments; well deviation; azimuth angle; stress; temperature; sound wave velocity; gamma ray; bore hole TV

## 0 引言

目前,国内外对水平孔和大斜度孔的测井施工主要采用随钻测井和钻杆输送湿接头测井方法<sup>[1-4]</sup>,但是这两种测井方法有其本身的缺点。随钻测井施工因都采用电磁波传播的方法测量地层电阻率,这种方法适用于低阻砂泥岩地层,对于复杂岩性地层和电阻率高于 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ 砂泥岩地层无法测量。无线数据传输存在误码率高,孔内传输不稳定难题。钻杆输送湿接头测井方法由于仪器裸露在钻具的最底部,仪器下放的过程中无法加压和旋转钻具,下井过程中容易造成仪器损坏和工程事故。

由四川省水利水电勘测设计研究院有限公司主持实施的引大济岷工程<sup>[5]</sup>可行性研究阶段勘查,为研究引大济岷工程隧洞岩体特征、岩溶发育特征、地应力特征和地下水特征等,在泸定取水中线方案的引水线路中布置水平钻孔8个,共计2300 m,采用钻探取心和综合测井方法,探索建立以水平钻孔替代平硐勘查模式。

国内外相关仪器无法满足水平孔综合测试的要求,因此,中国地质科学院探矿工艺研究所研制了一套适用于水平钻孔的多参数全方位无缆(存储式)综试仪器。

## 1 水平孔多参数综合测试仪器原理

该仪器将地球物理测井技术与数据存储技术相结合,多参数的物理测井方法与可视化的成像技术相结合,通过钻杆将相关传感器输送到大斜度及水平孔内目的层,把地层内的相关物理参数及孔壁的真实影像视频存储记录,再通过地面解析得出相关物理参数及钻孔岩心三维立体图,为相关工程建设提供准确的计算数据及技术支撑。

水平孔综合测试仪器具体功能模块包括:(1)井温、自然伽马、井斜/方位、压力测量功能;(2)纵波波速测量;(3)全孔壁高清成像、录像及钻孔轨迹测量功能;(4)能够持续工作60 h以上续航功能;(5)钻孔内数据存储模块;(6)地面检测与深度测量系统;(7)数据采集及回放处理系统;(8)其他辅助材料,包括

绝缘短节、导向锥、硬电极、钻杆连接件等。

### 1.1 压力采集

测压单元的传感器可采用应变式压力传感器或者扩散硅压力传感器,本仪器选用扩散硅压力传感器。扩散硅压力传感器是以单晶硅为基体,采用先进的离子注入工艺和微机械加工工艺,制成了具有惠斯顿电桥和精密力学结构的硅敏感元件。被测压力通过压力接口作用在硅敏感元件上,实现了所加压力与输出信号的线性转换,经激光修调的厚膜电阻网络补偿了敏感元件的温度性能,其性能更加稳定不易漂移。压力传感器输出模拟信号进入A/D模数转换数据采集。参见图1。

### 1.2 温度采集

测温单元<sup>[6]</sup>采用精密铂电阻作为测温元件,铂电阻是根据温度不同引起电阻变化的原理制成的,而铂这种金属在一定的温度变化范围之内,电阻与温度的线性关系好,准确度高,所以被广泛用作测量 $0\sim 500\ ^\circ\text{C}$ 温度的测温元件。

在此设备中温度传感器采用一体封装技术,内部封装导热材料,外部采用不锈钢外管包裹,保证外界温度能快速传递到感温器件。这种封装导热性好、耐压耐腐蚀性能突出,是目前最好的封装方式。

电路中采用PT100作为温度传感器。对铂电阻的信号采集通过高精度双运放、一个仪表放大器和一个压频转换构成。参见图2。

### 1.3 自然伽马采集

自然伽马采集单元<sup>[7]</sup>由闪烁探头、分压电路、脉冲整形、高压电源电路构成。自然伽马测井仪的闪烁探头是一个密闭的暗盒,内有闪烁体、光导和光电倍增管3个部件(见图3)。当核辐射进入闪烁体时,闪烁体中的原子受激而产生荧光。利用光导和反射物质把大部分荧光光子收集到光电倍增管的光阴极上。光子在光阴极上打出光电子,光电子在光电倍增管内不断倍增,最后形成电子束在阳极上产生电脉冲,此脉冲经过脉冲整形后送入处理器。

闪烁体是碘化铯晶体,它输出脉冲的幅度与次级电子能量成正比。因此,闪烁计数器不仅可以测

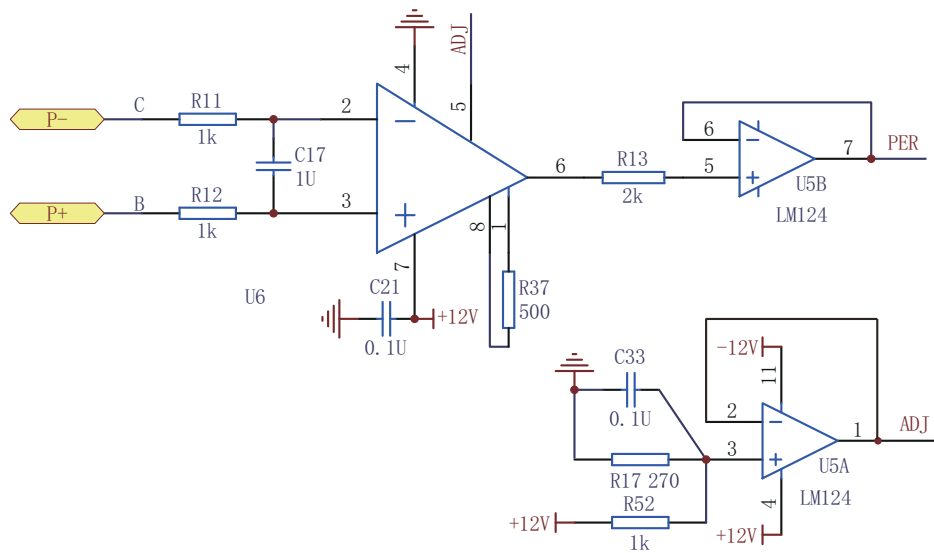


图1 压力采集单元设计原理

Fig.1 Design principle of pressure acquisition unit

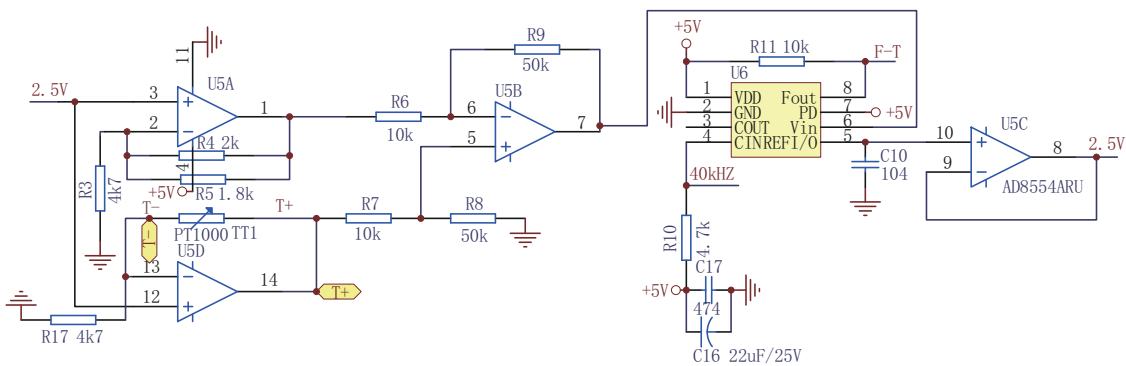


图2 温度采集单元设计原理

Fig.2 Design principle of temperature acquisition unit

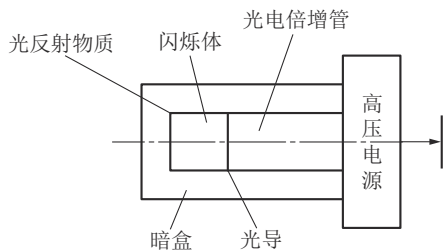


图3 自然伽马闪烁探头

Fig.3 Natural gamma scintillation probe

量射线强度,而且可以测量射线能量。主要电路如下原理设计(参见图4)。

### 1.4 声波采集

主要测量井下岩层声波传播速度<sup>[8-9]</sup>。将一个受控声波振源放入井中,声源发出的声波引起周围质点的振动,在地层中产生体波即纵波和横波,在井

壁-钻井液界面上产生诱导的界面波即伪瑞利波和斯通莱波。这些波作为地层信息的载体,被井下接收器接收,送至地面记录下来,就是声波测井。接收器、声源统称为声系,根据声系排列及尺寸的不同,声波测井仪可分为补偿测井仪(BHC)、长源距声波测井仪(LSS)和阵列声波测井仪。声波在井内地层中传播由于地层岩石成分、结构、孔隙中流体成分的变化其波的速度、幅度甚至频率都会发生变化。只记录声波速度变化的称为声速测井(AC),而记录声幅度变化的则称为声幅测井。声波速度测井中短源声系仅记录纵波(即首波)传播时差,长源距声系可记录下纵波、横波传播时差(见图5)。长源距声波测井仪有两个接收器(R1、R2)和两个发射器(T1、T2)。测量是在两个位置上进行的,在第一个位置

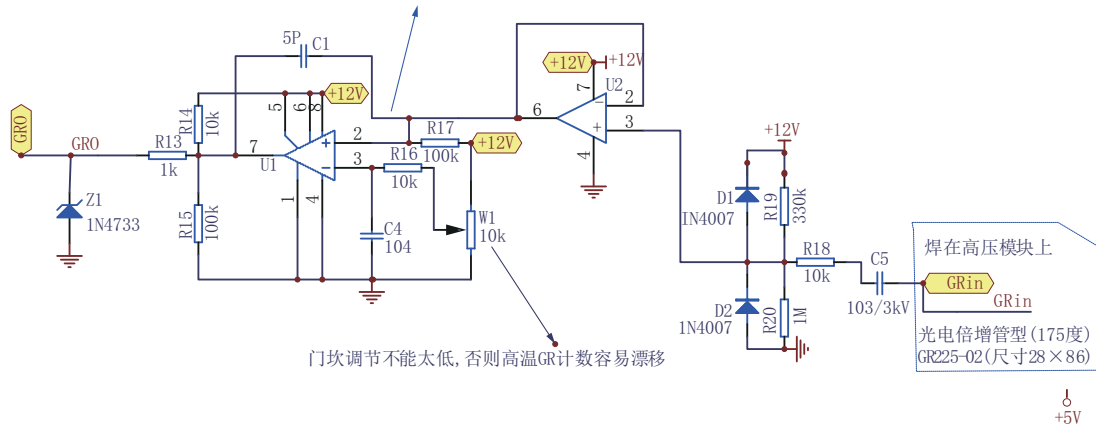


图4 自然伽马采集单元设计原理

Fig.4 Design principle of gamma ray acquisition unit

时,发射器 T1(或 T2)发射、在顶部两个接收器测量时差;当仪器提到两个发射器和第一个位置时两个接收器位置接近时,两个发射器发射,R2(或 R1)记录。第一个位置记录的结果由地面仪器存储起来,等第二个位置记录之后,由仪器自动计算并输出经过井眼补偿的声波时差。

### 1.5 孔内电视原理

孔内电视原理见图6<sup>[10-11]</sup>。

孔内电视选用OV5640型500万像素的摄像头,该系统级芯片(SOC)传感器采用OmniVision公司的1.4 μm的OmniBSI™背面照度架构,以提供卓

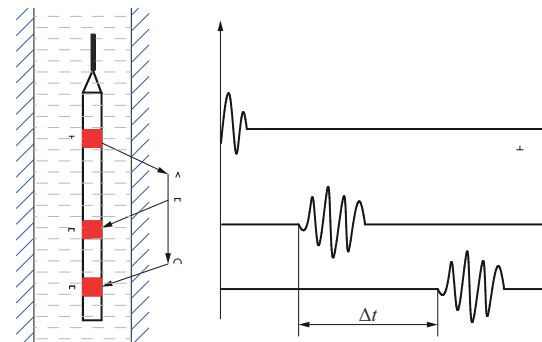


图5 一发双收声波测试示意

Fig.5 Test of one-shot and double-received sound waves

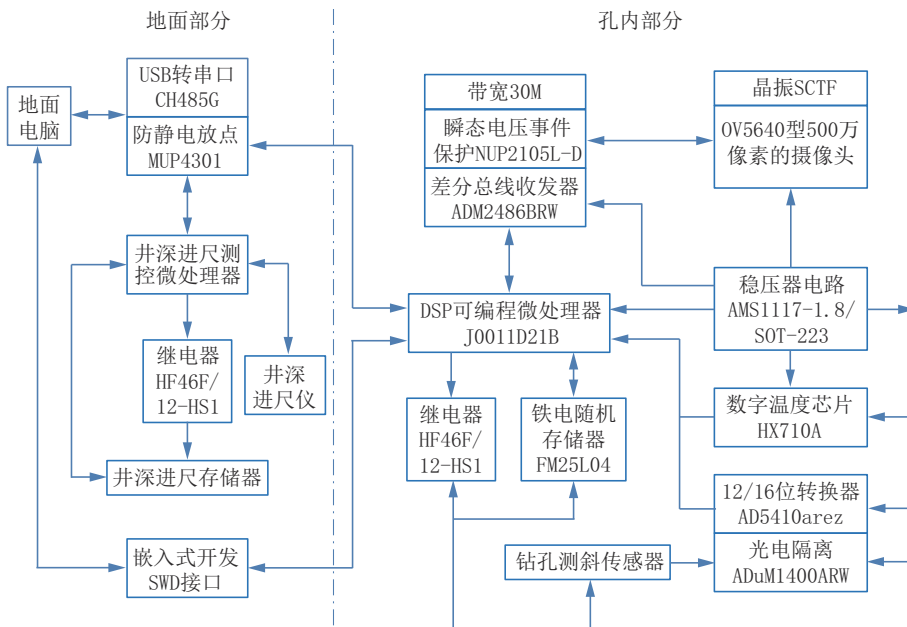


图6 孔内电视主控硬件电路、程序及通讯模块

Fig.6 The main control hardware circuit, program and communication module of the TV in the hole

越的像素性能和最佳的一流的低光灵敏度,同时使8.5 mm×8.5 mm超小型相机模块设计,小于6 mm的Z轴高度。

主控处理器选用DSP微处理器,是以数字信号来处理大量信息的器件。其工作原理是接收模拟信号,转换为0或1的数字信号,再对数字信号进行修改、删除、强化,并在其他系统芯片中把数字数据解译回模拟数据或实际环境格式。

模数转换器选用AD5410/AD5420,这是一款低成本、高精度、完全集成的12/16位转换器,提供可编程电流源输出,可满足工业过程控制应用的要求。输出电流范围可编程为4~20 mA、0~20 mA或0~24 mA的超范围功能。输出开路保护,可驱动IH的电感负载。

存储器选用铁电随机存储器FM25L04,FM25L04是采用先进的铁电工艺制造的4K位非易失性存储器。铁电随机存储器(FRAM)具有非易失性,并且可以像RAM一样快速读写,具有结构简单,系统可靠性更高等诸多优点。

数字温度芯片选用带数字温度测量输出的24位模/数(A/D)转换器芯片(HX710A),HX710采用了海芯科技集成电路专利技术,片内直接温度测量和数字输出(HX710A),(DVDD-AVDD)电压差测量(HX710B),具有集成度高、响应速度快、抗干扰性强等优点,性能和可靠性俱佳。

孔内电视可获得井孔内孔壁的真实影像视频,通过专用软件可获得钻孔岩心二维平面展开图及钻孔岩心三维立体图,从而测量出任意全方位倾角的钻孔结构产状角度,为相关工程建设提供准确的计算数据及技术支撑。

## 1.6 地面深度系统

地面深度系统由深度传感器、深度计量系统、深度采集系统组成。主要功能是对深度和时间等信息进行计量和存储。

(1)光电编码器是深度计量的传感器,它安装在绞车前面的导向轮上,在测井时导向轮带动编码器转动,编码器分别输出A、B两路脉冲,此A、B脉冲的相位互为90°。深度系统根据A、B脉冲的相位和脉冲数来实现当前的深度值。

深度时间计量主要功能是计量存储深度和时间信息,它主要由存储器、主处理器、深度预处理、电源部分构成。

(2)存储器主要存储深度、时间和钢丝拉力信息,它由一个NAND型存储器和一个铁电存储器构成,NAND型存储器主要存储深度、时间和钢丝拉力信息

(3)主处理器采用一颗美国意法半导体的STM2系列单片机,它的数据处理速度快,有两种“看门狗”,在受到干扰后能自动重启并很快进入工作模式,保证数据的连续性。

(4)深度预处理主要是对深度输入信号保护、滤波、整形。图7中两个非门用于信号整形,ZS1、ZS2对输入信号具有保护功能,CS1、CS2对信号中的高频尖刺滤波,保证信号的纯正干净。

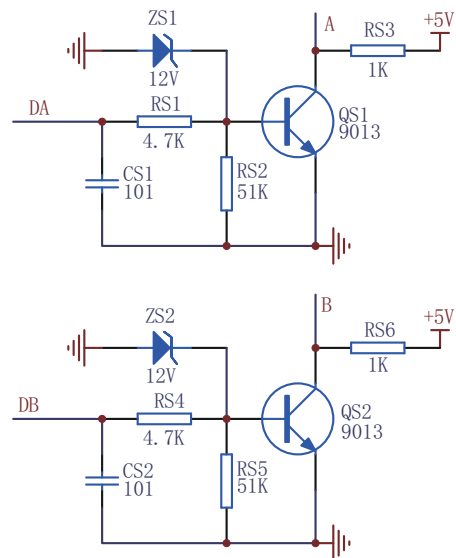


图7 深度预处理设计原理

Fig.7 Design principle of deep preprocessing

(5)电源部分使用一个低压差电源芯片,此芯片可以用后备电池供电,在设备停电后会自动切换到后备电源供电。

## 2 水平孔多参数综合测试仪器构成

### 2.1 地面系统

地面系统主要由多种传感器、传感器接线盒、传感器总线、下井仪总线和数据处理面板(机箱)组成,并与地面计算机和井下仪通讯。

系统可实现两部分功能:深度数据采集、处理和井下仪器参数设置、数据读取。

通过RS-232总线与地面控制计算机连接,通讯速率9600波特率,并提供深度等数据;为下井仪

提供CAN通讯接口,通讯速率1 Mbit/s,工作电源DC40 V $\pm$ 1 V,功率 $\leq$ 20 W。

存储式钻具输送测井系统中的深度跟踪就是地面仪器采集的井深数据始终要与井队下钻(下测)、起钻(上测)、“等待”3种基本状态时井下仪器最下端的位置(钻头位置)保持一致。数据处理面板的深度跟踪是通过测量轮上的深度传感器记录钻杆移动

的距离,完成深度数据采集、处理和井下仪器参数设置、数据读取。

## 2.2 井下仪器

井下仪器主要包括:井斜方位+自然伽马+井温测井组合仪、数字声速测井仪、孔内电视及缓冲短节。井下仪器组成如图8所示。



图8 井下仪器组成

Fig.8 Composition of downhole instruments

## 2.3 测试方案

针对水平孔和大斜度孔的测井难题,采用存储式综合测井技术方法。研制的水平孔多参数综合测试仪器为钻杆输送存储式测井仪器,仪器在钻具的底部,钻具可以将测井仪器直接输送到井底,仪器下放的过程中可以加压、旋转钻具和循环泥浆,测井过程中可以避免造成仪器损坏和工程事故。利用井下大容量的存储器及电池供电,无需电缆,一次下井可完成井斜、方位、井温、压力、声波、井下电视等测井项目<sup>[12-15]</sup>。

## 3 仪器研发实现

### 3.1 仪器主要技术指标

研制的水平孔多参数综合测试仪器如图9所示。

仪器主要技术指标:外径45 mm,最高工作温度125℃,最大承受压力60 MPa,自然伽马测量范围



图9 存储式水平孔多参数综合测井仪器探管

Fig.9 Probe pipe of multi-parameter integrated logging instrument for storage horizontal hole

0~1000 API,倾斜角范围0~90°,方位角范围0~360°,声速时差 $\Delta t$ 范围105~650  $\mu$ s/m,最高测速600 m/h,供电要求DC36 V/200 mA。

### 3.2 室内试验

为了保证孔内电视测试的可靠性及精度,我们在室内进行了相关的测试。测试方法:将一根内径为 $\varnothing 70$  mm的亚克力管水平放置以模拟近水平钻孔,将深度计数轮固定于亚克力管前端,以记录深度,在亚克力管两边放置两台激光方位仪,可模拟钻孔岩层裂隙;将井下电视经过深度计数轮送入亚克力管内进行图像数据采集,随后通过计算机对采集数据进行分析、对比,获取模拟钻孔岩层裂隙的倾角及倾向。试验数据见表1。

表1 室内试验数据(部分)

Table 1 Laboratory test data (part)

序号	实际数据		测试数据		倾向差值/(°)	倾角差值/(°)
	倾向/(°)	倾角/(°)	倾向/(°)	倾角/(°)		
1	355	68	358	63	3	5
4	313	79	317	79	4	0
7	314	78	316	73	2	5
10	326	16	324	16	2	0
13	289	27	284	28	5	1
16	65	63	68	67	3	4
19	42	76	41	81	1	5
22	198	45	194	41	4	4
25	2	76	7	80	5	4
28	110	89	111	88	1	1
29	337	76	336	81	1	5

从试验数据可以看出,倾角、倾向的误差均在 $5^\circ$ 以内,满足误差要求。

## 4 野外生产试验

### 4.1 钻孔基本情况

在引大济岷工程SPZK1~SPZK8共8个水平定向勘探孔中测试应用。以SPZK7水平钻孔为例,该孔位于宝兴县灵关镇,在宝兴河右岸,钻孔设计孔深200 m。该孔于2022年3月25日开钻,4月18日完成设计孔深,终孔深度200.05 m。钻孔结构见表2。

### 4.2 测试情况

2022年4月25日,对该孔进行了综合物探测试,测试内容包括:井温、井斜、方位、自然伽马、声波、水压力及孔内电视。测试孔段0~191 m, $\varnothing 89$  mm套管深度49.2 m, $\varnothing 76$  mm裸孔深度为49.2~

表2 钻孔结构

Table 2 Borehole structure

开次	钻头尺寸/	钻达深度/	套管尺寸/	套管深度/
	mm	m	mm	m
一开	$\varnothing 96$	49.2	$\varnothing 89$	49.2
二开	$\varnothing 76$	200.05		

191 m。

现场操作:仪器在下井前必须要进行维护和相关设置。(1)检查O形密封圈是否破损,有问题及时更换;(2)锂电池电压是否充足;(3)安装地面深度计量装置,连接地面深度及记录箱,确保数值的走向与钻杆的起下一致;(4)连接井下仪器并下井,在井下仪器与孔口齐平时,及时与地面深度进行同步设置;(5)仪器的下放及上提,整个过程需尽量保证匀速,下放和上提速度 $\geq 3$  m/min;(6)仪器上井后及时清洗,取下电池,数据回放。操作过程参见图10。

### 4.3 测试结果

本孔为定向测斜,终止深度200.05 m,孔斜度 $90.1^\circ$ (初始角 $86.8^\circ$ ),方位角 $253.1^\circ$ (初始方位角



(a) 仪器下井作业



(b) 仪器出井作业

图10 仪器下井及仪器提出钻孔

Fig.10 Instrument drilling and instrument drilling

244.3°),水平距离 177.02 m,垂直深度为 6.97 m,钻孔位置平面投影如图 11 所示。

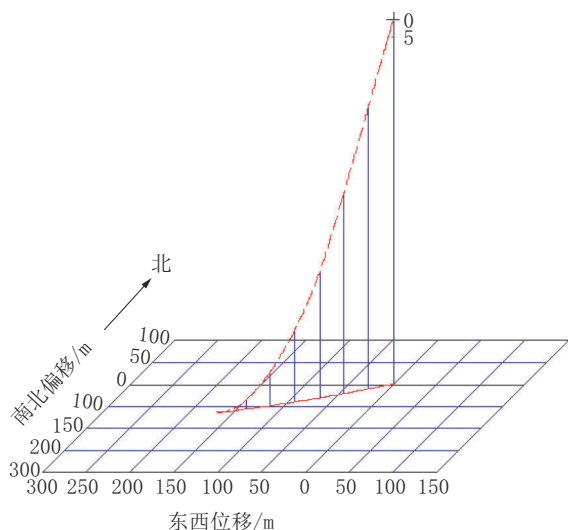


图 11 钻孔位置立体投影

Fig.11 Stereoscopic projection of drilling position

放射性测井发现本孔地层岩体自然放射性照射率一般在 109 API,全孔不存在高放射性异常。声波测井表明钻孔揭露地层声波速度一般值为 3.63~5.85 km/s;本孔最高地温为 14.8℃。

#### 4.4 孔内电视测试对比

为了验证孔内电视测试的准确性及精度,我们在同一钻孔用有缆的孔内电视也进行了测试,对比情况如图 12 所示,产状对比见表 3。

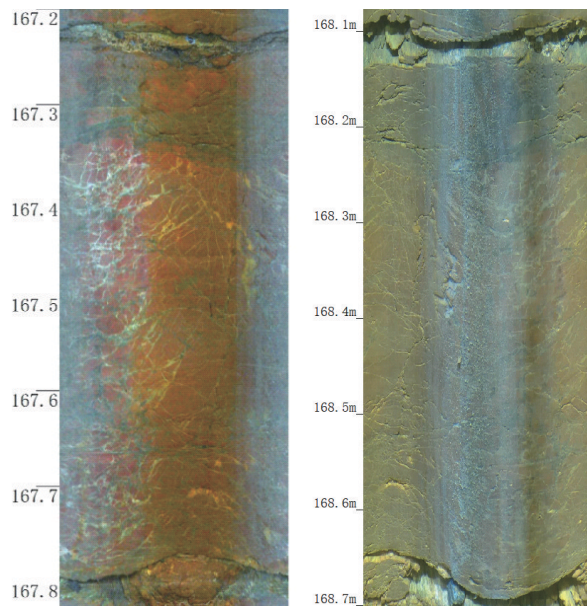
对比结果分析:

(1)根据图 12 分析可以看出,电缆实测展开图与存储实测展开图的图像基本一致,图像形状有些误差是因为有缆仪器和存储仪器取得展开点相差 90°,在同一段深度有大概 1 m 的误差,这是由于两次测井起始零点的误差。

(2)由图 12 可以看出,存储成像分辨率更高一些,层次感较强,图像更加细腻,这是由于存储测井图像像素是无损存储的,有缆的孔内电视受到电缆的影响,图像在传输的时候会损失一些像素,导致图像模糊一些。

(3)图像颜色差距是因为补光灯光照的强度和补光灯灯珠色差影响,可改进灯光的色差来达到最佳的图像效果。

(4)对同深度段的产状测量结果进行对比,倾角、倾向的误差均在 5°以内,主要是由于仪器的扶



(a)有缆电视图像 (b)测试仪存储图像

图 12 孔内电视测试对比

Fig.12 Comparison of TV test in hole

表 3 产状对比数据

Table 3 Comparative data of occurrence

井深/ m	无缆测试		有缆测试		误差	
	倾角/ (°)	倾向/ (°)	倾角/ (°)	倾向/ (°)	倾角误 差/(°)	倾向误 差/(°)
58.84	51	50	55	46	-4	4
71.12	51	85	50	82	1	3
71.19	56	82	54	80	2	2
71.25	42	110	44	108	-2	2
88.82	46	73	42	71	4	2

正、孔径的变化和后期产状解释引起的误差。

## 5 结论

(1)水平孔多参数综合测试仪器采用存储器存储孔内测试信息,通过钻杆下放及上拉测量探管进行单、多点测量,然后进行地面回放,解决水平深孔裸眼测试中的安全和高效问题。研制的仪器具有操作简单、一次测量点多、精度高、省时省力、抗干扰、抗衰减和抗畸变能力强、不易被卡埋、不需要昂贵笨重的绞车和电缆,大幅度提高深孔的测试安全、效率和质量,具有创新性。

(2)引大济岷工程 8 个水平定向勘探孔的测试表明,研制的水平孔多参数综合测试仪及配套测试工艺技术方法,结构设计方案比较合理,测试结果准



确可行。与水利水电行业勘查需求紧密结合,解决了长期困扰水利水电行业勘查水平钻孔综合测试的难题,其应用也可推广至隧道、交通、高速公路、高铁、矿山、新能源地热、地质灾害防治工程等领域。

### 参考文献(References):

- [1] 吴纪修,尹浩,张恒春,等.水平定向勘察技术在长大隧道勘察中的应用现状与展望[J].钻探工程,2021,48(5):1-8.  
WU Jixiu, YIN Hao, ZHANG Hengchun, et al. Application status and R & D trend of horizontal directional investigation technology for long tunnel investigation [J]. Drilling Engineering, 2021,48(5):1-8.
- [2] 武程亮.方位伽马在煤层气水平井中的应用[J].钻探工程,2021,48(5):69-75.  
WU Chengliang. Application of azimuth gamma in coal bed methane horizontal wells[J]. Drilling Engineering, 2021,48(5):69-75.
- [3] 李军,李勇,谢小国,等.狮子洋主航道水平勘察孔测井评价方法研究与应用[J].钻探工程,2022,49(6):21-29.  
LI Jun, LI Yong, XIE Xiaoguo, et al. Research and application of the logging evaluation method for horizontal holes in the main channel of Shiziyang[J]. Drilling Engineering, 2022,49(6):21-29.
- [4] 韦海瑞,朱芝同,吴川,等.近钻头随钻测量系统及其小型化设计关键技术分析[J].钻探工程,2022,49(5):156-162.  
WEI Hairui, ZHU Zhitong, WU Chuan, et al. Analysis on current status and key technology of miniaturization design of near-bit MWD systems[J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):156-162.
- [5] 曾正伢.四川“引大济岷”工程的民间探索[J].中国水运(下半月),2013,13(2):184-185.  
ZENG Zhengya. The folk exploration of the project of “introducing Dadu River into Minjiang River” in Sichuan[J]. China Water Transport (The Second Half of the Month), 2013,13(2):184-185.
- [6] 张元良,修伟,郎庆阳.石油产品检测中Pt100温度传感器动态补偿研究[J].大连理工大学学报,2010,50(3):351-355.  
ZHANG Yuanliang, XIU Wei, LANG Qingyang. Research on dynamic compensation of Pt100 temperature sensor in petroleum products testing[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010,50(3):351-355.
- [7] 徐波,汪中浩,黎泽刚,等.随钻自然伽马测井资料环境影响自动校正[J].石油天然气学报,2009,31(5):7-8,99-102.  
XU Bo, WANG Zhonghao, LI Zegang, et al. Auto-correction method of environmental effect on gamma logging data of logging while drilling [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009,31(5):7-8,99-102.
- [8] 邱锴.声波测井技术在水利工程中的应用[J].西北水电,2016(6):31-34,39.  
QIU Kai. Application of acoustic logging technology in water resources project[J]. Northwest Hydropower, 2016(6):31-34,39.
- [9] 张鹏.声波测井仪器在复杂条件下的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(10):133-135.  
ZHANG Peng. Application of acoustic logging instrument in complex conditions[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2022,42(10):133-135.
- [10] 刘耀伟,侯振学,廖胜军,等.高温电成像仪器的研制与应用[J].海洋石油,2018,38(3):39-45.  
LIU Yaowei, HOU Zhenxue, LIAO Shengjun, et al. Development and application of high temperature electrical imaging tool [J]. Offshore Oil, 2018,38(3):39-45.
- [11] 马哲,杨锦舟,赵金海.无线随钻测量技术的应用现状与发展趋势[J].石油钻探技术,2007,35(6):112-115.  
MA Zhe, YANG Jinzhou, ZHAO Jinhai. Status quo and development trend of MWD technique[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007,35(6):112-115.
- [12] 乔磊,高德利,代继樑,等.煤层气水平井磁导向钻井理论与实践[J].钻探工程,2021,48(6):1-6.  
QIAO Lei, GAO Deli, DAI Jiliang, et al. Magnetic ranging theory and practices in CBM horizontal well drilling [J]. Drilling Engineering, 2021,48(6):1-6.
- [13] 张家希,于家庆,Roman Galchenko,等.北美非常规油气超长水平井优快钻井技术及实例分析[J].钻探工程,2021,48(8):1-11.  
Josh Zhang, Jiaqing Yu, Roman Galchenko, et al. North America unconventional long lateral well fast-drilling technology with case study [J]. Drilling Engineering, 2021,48(8):1-11.
- [14] 汤凤林,赵荣欣,周欣,等.受控定向孔钻进用自动导航系统的分析研究[J].钻探工程,2022,49(2):67-76.  
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. An automatic navigation system used for controlled directional drilling [J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):67-76.
- [15] 李忠,李扬,赵燕来.十二位置标定法在钻孔测斜仪校正中的应用[J].钻探工程,2021,48(5):76-82.  
LI Zhong, LI Yang, ZHAO Yanlai. Application of the twelve-position calibration method for the borehole inclinometer [J]. Drilling Engineering, 2021,48(5):76-82.

(编辑 荐华)