

# 电声成像模拟测量装置方案设计及优选

李琴<sup>1</sup>, 万科峰<sup>1</sup>, 黄志强<sup>1</sup>, 马晓<sup>2</sup>, 朱涵斌<sup>2</sup>, 张波<sup>1</sup>

1. 西南石油大学机电工程学院, 成都 610500
2. 中国石油集团测井有限公司, 西安 710065

**摘要** 针对测井仪器在使用和推广中, 缺乏系统的、理论性应用基础方面的室内研究手段而难形成商业化规模, 制约了其发展的问题, 根据微电阻率成像和超声成像的工作原理及实际运动测量的模式, 并结合实验室用的特点, 设计了一套井周电声成像探测器模拟测量装置, 该装置实现了  $x$ 、 $y$ 、 $z$  及  $d$  (圆周) 4 个方向的运动, 在  $x$ 、 $d$  方向设计了多种方案。利用模糊评判的原理, 对  $d$  和  $x$  方向的多种方案进行了综合评价, 建立了隶属函数及权重, 通过专家打分的形式建立因素集及模糊综合评判集, 选取以  $x$  为双直线电机传动,  $d$  为锥齿轮传动方式为最优方案, 该测量装置能为成像技术的深入研究提供手段。

**关键词** 微电阻率成像; 电声成像探测器模拟测量装置; 模糊综合评判

**中图分类号** TE932

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.20.003

## Design and Optimization for Analog Measuring Equipment of Electroacoustic Imaging

LI Qin<sup>1</sup>, WAN Kefeng<sup>1</sup>, HUANG Zhiqiang<sup>1</sup>, MA Xiao<sup>2</sup>, ZHU Hanbin<sup>2</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>

1. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China
2. China National Petroleum Logging Corporation, Xi'an 710065, China

**Abstract** For logging instrument in use and promotion, the lack of system and the application of theoretical basis of indoor research means that it's difficult to form the commercial scale and restricts its development seriously. According to the operating principle of micro resistivity imaging, ultrasonic imaging, the model of the actual motion measurement and combining with the characteristics of the laboratory, we devised an analog measuring equipment for electroacoustic imaging detector, which had realized the movement of  $x$ ,  $y$ ,  $z$  and  $d$  four direction, devised various schemes for  $x$ ,  $d$ . By using the principle of fuzzy evaluation, the membership functions and weight for various schemes of  $x$ ,  $d$  directions were established. Using the principle of fuzzy evaluation, we evaluated kinds of schemes of the  $d$  and  $x$  direction comprehensively, and established the membership function and weight. The factors set and fuzzy comprehensive evaluation set were established through the expert scoring form and selected the optimal case,  $x$  as double linear motor transmission,  $d$  as bevel gear drive. The measurement device could provide further research of methods for imaging technology.

**Keywords** micro resistivity imaging; analog measuring equipment for electroacoustic imaging detector; fuzzy comprehensive evaluation

### 0 引言

目前, 国内仪器的研究和应用, 如微电阻率成像和超声成像, 已经接近国外同类仪器的技术水平, 而关于测井方法、定量解释机理等理论与应用的研究却缺乏系统的室内研究

手段, 导致中国在测井仪器的升级研究及推广应用方面受阻。

据调研分析, 国外已经在推出商业化的、新型的井周成像技术, 因此系统开展新型成像探测器原型的研究及探究非

收稿日期: 2013-02-25; 修回日期: 2013-03-14

作者简介: 李琴, 副教授, 研究方向为石油装备的现代设计理论及方法, 电子信箱: 574811451@qq.com

常规环境下的成像处理方法的研究就显得尤为重要和突出。通过国内外调研,笔者设计了一种运动精度较高的井周电声成像探测器模拟测量装置,填补了国内空白,为成像技术的深入研究提供了手段。

### 1 电声成像的原理

微电阻率成像测井是通过推靠器将基板很好地贴合在井壁上,由电极发射电流并被聚焦后进入目标层,由于目标层岩石结构及化学性质的不同,电流强度的变化就直接反应了该地层电阻率的变化,然后经过适当的处理再用彩色或灰度等级色彩来反应目标层电阻率的变化。

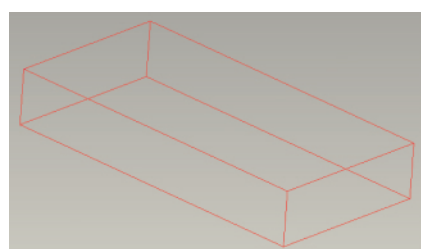
超声波成像测井是通过换能器将波射入目标层,根据接收器接收到波列能量的强度反应目标层情况,对声波的吸收能量越强,接收器接收到的反射波能量就越弱,在处理用色度表示时就越暗。此种方法提供的图像和数据可用于分析井眼的几何形状、裂缝及评价井眼垮塌推算地层应力的方向、

进行地层形态和沉积构造研究等。

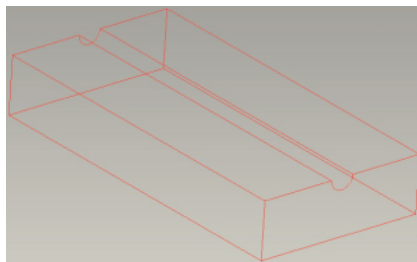
### 2 地层物理模型的选择

本装置为实验室用,其方案的设计是以测量研究对象为依据,该对象被称之为地层物理模型。通过调研得知,地层物理模型主要有3种形式:水平平板式、直立井眼式及水平半空间卧式,其几何形状如图1所示。水平平板式与水平半空间卧式相比,后者设置有井眼,此模型既可实现水平平板式岩石的扫描测量,还能用于超声波换能器沿井眼做圆周旋转扫描测量;直立井眼式与水平半空间卧式相比,前者多用于超声波换能器沿井眼做圆周旋转扫描测量,而对于实验室用的单基板的微电阻率测量则很难实现,且模型的岩石成分及高度易受空间限制。

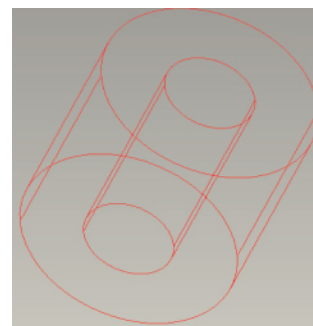
综合以上各模型的特点,最终确定采用水平半空间卧式地层物理模型作为测量研究对象,为下面装置的方案设计奠定了基础。



(a) 水平平板式  
(a) Horizontal plate type



(b) 水平半空间卧式  
(b) Horizontal half space



(c) 直立井眼式  
(c) Vertical borehole type

图1 地层物理模型结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of physical model

### 3 电声成像探测器模拟测量装置方案设计

地层物理模型放置于尺寸为其1.5倍的水槽中,在水槽的外面有槽钢焊接而成的托架,主要用于承受重量和支撑运动部件,如图2所示。

根据水平半空间卧式地层物理模型的结构,要实现扫描测量,需要实现4种运动功能:沿井眼做圆周旋转运动( $d$ ),垂直岩石表面方向运动( $z$ ),宽度方向运动( $y$ )以及长度方向运动( $x$ )。图2为电声成像模拟测量实验装置图。

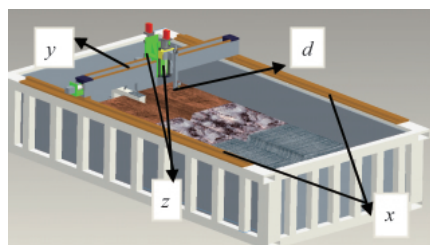


图2 电声成像模拟测量实验装置

Fig. 2 Analog measuring equipment of electroacoustic imaging

#### 3.1 $d$ 方向运动方案

超声波探测器沿着地层物理模型的井眼做圆周运动,实现井眼的扫描。根据总体地层物理模型的结构,本文中设计了3种关于圆周运动的方案,具体如下。

方案1:伺服电机方式。

该方式是伺服电机输出轴直接带动超声波探测器夹持器旋转,实现井周旋转运动。通过对伺服电机的控制,可调节探测器在测量过程中旋转速度,也可控制探测器启停等。

方案2:同步轮同步带方式。

本方案采用伺服电机带动同步轮,经同步带将动力传递到下端同步轮,同步轮与同步带通过齿啮合,实现圆周运动。在运动过程中可通过对伺服电机的控制调节超声波探测器的旋转速度、控制探测器的启停等。

方案3:锥齿轮方式。

该方案是通过一对锥齿轮将伺服电机在水平面的旋转运动转化为夹持器在垂直平面的旋转运动,即可实现井周的旋转运动。在运动测量过程中,通过对伺服电机的控制,实现

了调整超声波探测器的旋转速度及控制探测器启停的目标,其结构如图3所示。

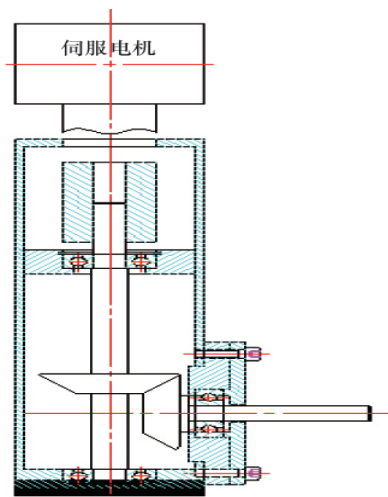


图3 圆周运动方案3

Fig. 3 Design scheme 3 of circular motion

### 3.2 z方向运动方案

$z$ 方向主要是实现微电阻率夹持器装置、超声波探测器夹持器装置的上提或下放功能。根据丝杠的传动原理,将丝杠传动作为 $z$ 方向的运动机构,即丝杠转动,螺母移动的传动方式。该传动方式的特点是结构较为紧凑,丝杠的刚性较好。

传动件丝杠在整个运动过程中不受力,只起到传递动力的作用。上端伺服电机为上提或下放提供必要的动力。上下各设有限位开关,主要用于控制移动螺母的极限行程,以及防止机械碰撞。

### 3.3 y方向的运动方案

$y$ 方向的运动方案设计和 $z$ 方向的运动方案设计原理相同,仍采用丝杠螺母机构,主要由伺服电机、减速器、丝杠、螺母及支撑横梁等组成。由于整个方案设计的跨距较大,主要由横梁承受总量及载荷,丝杠不承受垂直方向的力。

### 3.4 x方向运动方案

$x$ 方向的运动机构主要是实现横梁整体( $z$ 方向运动装置、微电阻率加持器、基板、超声波夹持器以及超声波探头等)在 $x$ 方向的运动,并与 $y$ 方向运动、 $z$ 方向运动协调,保证探头的运动轨迹及其运动精度,运动启停能够得到很好的控制。本研究提出5种设计方案,具体如下。

方案1: 双导轮导轨机构运动方式。

在 $x$ 方向,在托架的两边分别应用了导轮导轨机构,导轨安装在托架上,伺服电机通过带动传动轴两端的导轮,在托架两边的导轨上的滑槽中运行,实现横梁在 $x$ 方向的运动功能,通过控制伺服电机实现调节 $x$ 方向运动的启停、运动速度以及控制精度目的。

方案2: 齿轮齿条与导轮传动方式。

在 $x$ 方向,托架的一边采用齿轮齿条结构,另一边采用导轨导轮结构,齿条和导轨分别布置在托架的两边。伺服电机带动齿轮,与铺设在托架上的齿条相啮合,为横梁整体在 $x$ 方向上的移动提供动力,而在横梁的另一端有导轮支撑,其导轮在导轨上的滑槽中滚动。横梁的运动速度、控制精度及运动的启停仍然通过控制伺服电机来完成。

方案3: 同步轮与同步带传动方式。

在 $x$ 方向,两边安装有同步轮及同步带,同步轮与同步带通过齿啮合,伺服电机通过传动轴带动同步轮,经同步带将动力传递给横梁上的同步轮,进而带动横梁上的导轮在托架铺设导轨的滑槽中滚动,从而实现了 $x$ 方向的运动。此传动方式在托架两边为对称布置,其侧视图如图4所示。

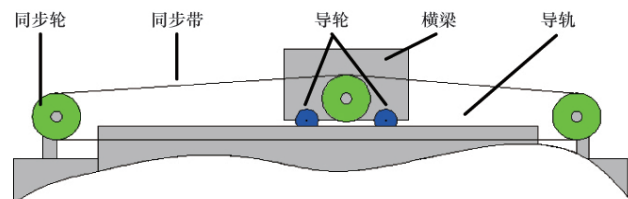


图4 x方向方案3

Fig. 4 Scheme 3 of  $x$  direction

方案4: 滚珠丝杠与滑轨的传动方式。

在 $x$ 方向,安装了滚珠丝杠机构及滑轨结构,一边安装丝杠及滑轨,另一边只安装滑轨,伺服电机通过减速器带动丝杠,将旋转运动转化为横梁的滑动,实现了 $x$ 方向的运动。通过控制伺服电机调节 $x$ 方向速度,控制 $x$ 方向启停等;由于两边都安装有滑轨,在横梁刚性的作用下,两边的同步性较好,且传动过程中,丝杠不承受横梁重量。

方案5: 双直线电机的传动方式。

直线电机是一种不需要任何中间转换机构的传动装置,它是通过将封闭磁场展开为开放式磁场,将电能直接转化为直线运动的机械能。

在 $x$ 方向,在装置两边安装直线电机,而直线电机由定子和动子组成,定子固定安装在托架上,动子安装在横梁两端下部;通过控制两边的直线电机控制动子的滑动速度,即横梁的移动速度,进而调节 $x$ 方向速度,控制 $x$ 方向启停等。

## 4 电声成像探测器模拟测量装置方案优选

在实际工程中,对于多种方案的优选都会涉及到多个因素,要得到切实可行的方案或决策,就要对多种因素做综合的评价。

传统的评价有总分法和加权平均法,但是因素都有模糊性的概念,权重也带模糊概念时,这些方法就不再适用,此时就需要模糊综合评判。

#### 4.1 模糊综合评判

该评判的基本思想就是利用模糊的线性变换原理和隶属最大原则,考虑与方案或事物相关的各个因素,对它们做出比较合理的评价,具体实施步骤如下。

##### (1) 建立因素集

因素集是由影响评判对象的多种因素为元素组成的,通常用  $U$  表示,即

$$U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\} \quad (1)$$

各个因素  $u_i(i=1, 2, \dots, n)$  就代表各种影响评判对象的因素,这些因素可以是定量的也可以是定性的。因素集合的本身就是一个普通集合。

##### (2) 建立权重集

机械设计中,对于各因素的影响有一个统一的权衡,即每种因素的权重分配。它反映了各种因素在评分中所占的地位与作用,因为它能够直接影响综合评分数。而大多数都是采用经验或专家打分的方式,然后用统计方法建立权重分配。为了减少人为因素,也多采用层次分析法,记为  $A$ ,即

$$A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\} \quad (2)$$

且能够满足  $\sum_{i=1}^n a_i=1, a_i>0$ 。

##### (3) 单因素评价

首先对因素集  $U$  中的单因素  $u_i(i=1, 2, \dots, n)$  作单因素评价,从因素  $u_i$  确定该对象对评价  $v_j(j=1, 2, \dots, n)$  的隶属度  $r_{ij}$ ,从而得出第  $i$  因素  $u_i$  的单因素评价集,其表达式为

$$r_i=\{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}\} \quad (3)$$

即评价集上的模糊子集。

同理,可得到相应于每个因素的单因素评价集,把这些单因素评价集作为行即可得到一个模糊评价矩阵  $R$ ,其表达式为

$$R=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

矩阵  $R$  也是模糊矩阵。

##### (4) 模糊综合评判

当因素权重集和模糊评判矩阵(模糊关系) $R$ 已知时,通过  $R$  作模糊的线性变换,即

$$B=AR=\{b_1, b_2, \dots, b_m\} \quad (5)$$

#### 4.2 运动方案优选

根据前面的设计方案,对于  $d$  方向和  $x$  方向因素集和模糊矩阵的建立,是通过专家打分(分值只作方案之间比较的一个参数,不是量值,无单位)的形式得到的,然后应用模糊综合评判对方案进行了优选。

##### (1) $d$ 方向运动方案优选

对该方向的 3 种方案进行隶属度的建立,利用隶属函数分别求出这 3 种方案在 6 个方面的隶属,见表 1。

表 1 圆周运动方案比较

Table 1 Comparison of circular motion scheme

评判因素	方案 1	方案 2	方案 3
连续性	0.851	0.734	0.851
平稳性	0.832	0.832	0.832
可靠性	0.756	0.747	0.800
使用寿命	0.812	0.799	0.825
加工成本	0.644	0.658	0.614
电机可靠性	0.712	0.824	0.824

由表 1 即得到模糊评判矩阵  $R_1$ ,其表达式为

$$R_1=\begin{bmatrix} 0.851 & 0.734 & 0.751 \\ 0.832 & 0.832 & 0.832 \\ 0.756 & 0.747 & 0.800 \\ 0.812 & 0.799 & 0.825 \\ 0.644 & 0.658 & 0.614 \\ 0.712 & 0.824 & 0.824 \end{bmatrix}$$

权重集  $A_1=\{0.20, 0.20, 0.20, 0.15, 0.10, 0.15\}$

得到模糊综合评判集  $B_1$

$$B_1=A_1R_1=\{0.7808, 0.7719, 0.7854\}$$

根据计算数值大小可知,0.7854 值最大,即方案 3(锥齿轮带动探测器旋转方式)要好于其他方案,因此,在圆周运动方案中选择锥齿轮带动探测器旋转方案。

##### (2) $x$ 方向运动方案优选

同理利用隶属函数分别求出  $x$  方向 5 种方案在 7 个方面的隶属,见表 2。

表 2  $x$  方向运动方案比较

Table 2 Comparison of  $x$  direction scheme

评判因素	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
同步性	0.625	0.712	0.726	0.837	0.879
连续性	0.582	0.765	0.812	0.845	0.840
平稳性	0.715	0.683	0.865	0.856	0.855
可靠性	0.819	0.819	0.824	0.824	0.824
使用寿命	0.650	0.650	0.650	0.620	0.700
维修保养	0.700	0.716	0.800	0.727	0.800
加工成本	0.825	0.826	0.834	0.799	0.656

即得到模糊矩阵  $R_2$ ,其表达式为

$$R_2=\begin{bmatrix} 0.625 & 0.712 & 0.726 & 0.837 & 0.879 \\ 0.582 & 0.765 & 0.812 & 0.845 & 0.840 \\ 0.819 & 0.819 & 0.824 & 0.824 & 0.824 \\ 0.819 & 0.819 & 0.824 & 0.824 & 0.824 \\ 0.650 & 0.650 & 0.650 & 0.620 & 0.700 \\ 0.700 & 0.716 & 0.800 & 0.727 & 0.800 \\ 0.825 & 0.826 & 0.834 & 0.799 & 0.656 \end{bmatrix}$$

权重集  $A_2=\{0.20, 0.15, 0.15, 0.15, 0.15, 0.10, 0.10\}$

得到模糊综合评判集  $B_2$

$$B_2 = A_2 R_2 = \{0.6924, 0.7341, 0.7813, 0.7918, 0.8040\}$$

根据计算数值大小可知,方案 5(双直线电机传动方案)要好于其他方案,因此,在  $x$  方向的运动方案中选择双直线电机传动方案。

#### 4.3 电声成像探测器模拟测量装置方案

根据装置方案的设计及经过模糊理论对  $d$  和  $x$  方向方案的优选,电声成像探测器模拟测量装置整体方案: $d$  方向采用锥齿轮方式; $z$  方向采用丝杠螺母传动; $y$  方向采用丝杠螺母传动; $x$  方向采用双直线电机传动。

#### 5 结束语

(1) 通过调研分析,选择水平半空间卧式地层物理模型作为测量对象,并根据地层物理模型设计了  $d$  方向的运动方案(伺服电机方式,同步轮同步带方式,锥齿轮方式), $z$  丝杠螺母传动方向的运动方案, $y$  丝杠螺母传动方向的运动方案, $x$  方向的运动方案(双导轮导轨机构运动方式、齿轮齿条与导轮传动方式、同步轮与同步带传动方式、滚珠丝杠与滑轨的传动方式、双直线电机的传动方式)。

(2) 根据模糊评判理论,对  $d$  和  $x$  方向的多种方案进行

了综合评价,最终优选出  $x$  方向为双直线电机的传动, $d$  方向为锥齿轮的方案

(3) 通过方案设计及优选,得到井周电声成像探测器模拟测量试验装置整体方案,即: $d$  方向采用锥齿轮方式, $z$  方向采用丝杠螺母传动方式, $y$  方向采用丝杠螺母传动方式, $x$  方向采用双直线电机传动的传动方式。

#### 参考文献 (References)

- [1] 曹国强,包明宇,高霁.模糊综合评价法在复杂机械设备可靠性考核中的引用研究[J].机械设计与制造,2002(1):1-2.  
Cao Guoqiang, Bao Mingyu, Gao Ji. Machinery Design & Manufacture, 2002(1):1-2.
- [2] 黄洪钟.对常规可靠性理论的批判评述—兼论模糊可靠性理论的产生、发展及应用前景[J].机械设计,1994(3):1-5.  
Huang Hongzhong. Machinery Design, 1994(3):1-5.
- [3] 董玉革.机械模糊可靠性设计[M].北京:机械工业出版社,2000.  
Dong Yuge. Mechanical fuzzy reliability design [M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [4] 朱文予.机械概率设计与模糊设计[M].北京:高等教育出版社,2001:267-318.  
Zhu Wenyu. Mechanical probabilistic design & fuzzy probability design [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001:267-318.

(责任编辑 赵业玲)

#### ·学术动态·



### 《2013年农村妇女科学素质专项行动工作方案》印发

为贯彻落实《全民科学素质行动计划纲要实施方案(2011—2015年)》精神,确保实现“十二五”末我国公民具备基本科学素质的比例超过5%的目标,中国科协、全国妇联、农业部共同开展农村妇女科学素质提升工作,印发《2013年农村妇女科学素质专项行动工作方案》。

2013年农村妇女科学素质专项行动的重点工作和活动为:

- ① 开展农村妇女骨干科学素质培训;
- ② 开展农村妇女实用知识和技术培训;
- ③ 举办全国农村妇女科学素质网络知识竞赛;
- ④ 针对农村妇女开展主题科普宣传教育活动;
- ⑤ 关注在提高农村妇女科学素质方面做出突出贡献的单位和个人。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35488/14801456.html>。