

文章编号: 0253-2697(2006)02-0103-04

# 机械式无线随钻测斜仪设计方案及关键技术

蔡文军<sup>1</sup> 王 平<sup>2</sup> 祝远征<sup>2</sup> 陈国明<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学机电工程学院 山东东营 257062; 2. 胜利石油管理局钻井工艺研究院 山东东营 257017)

**摘要:** 设计了一种机械式无线随钻测斜仪。介绍了该仪器的系统组成、主要技术参数及相关的关键技术,重点论述了机械测斜机构、控制机构和脉冲发生器的结构、工作原理和各机构之间的相互关系。在进行运动学分析的基础上,给出了测斜机构和控制机构的设计计算方法,阐述了井下仪器密封和润滑系统的作用、设计性能、特点及润滑油、密封件的选择方法等。现场应用表明,机械式无线随钻测斜仪具有很好的现场适用性和抗高温性能,可以满足直井随钻测斜的需要并解决了深井、高温井测斜的难题。

**关键词:** 机械测斜仪;直井;随钻测量;设计方案;关键技术

**中图分类号:** TE249 **文献标识码:** A

## Design scheme and key techniques for mechanical wireless inclinometer

Cai Wenjun<sup>1,2</sup> Wang Ping<sup>2</sup> Zhu Yuanzheng<sup>2</sup> Chen Guoming<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Electronic Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257062, China;

2. Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Administration, Dongying 257017, China)

**Abstract:** A mechanical wireless inclinometer to measure hole's deviation was designed. The systematic composition, main technical parameters and key techniques of the inclinometer are described. The structure, principle and interrelation of devices including the deviation measurement device, control device and mud pulse generator are introduced. The calculation methods in design of devices are given on the basis of kinematics analysis. In addition, the techniques related to lubrication and seal ability of apparatus, such as the function, design performance, features, choice of lubricating oil and sealing element, are discussed. Field application shows that this inclinometer has good adaptability and high anti-temperature capacity and can satisfy the requirement of measuring deviation while drilling in vertical well. It is also suitable for measuring deviation in deep well and high-temperature well.

**Key words:** mechanical inclinometer; vertical well; measurement while drilling; design scheme; key techniques

随着石油勘探开发的不断深入,地层结构越来越复杂,深井、超深井和高温、高压井等特殊复杂井越来越多。这些特殊井的井斜测量面临很大的挑战,同时随着钻井技术的发展和勘探开发要求的提高,对井身质量的要求越来越高,对直井的井斜测量和控制越来越重要<sup>[1]</sup>。目前现场使用多种类型的测斜仪器,如照相式单多点测斜仪、电子单多点测斜仪、有线随钻测斜仪、无线随钻测斜仪等,这些仪器各有优缺点,具有不同的用途<sup>[2-3]</sup>。有线随钻测斜仪和无线随钻测斜仪主要用于定向井和水平井的定向测量,但因费用昂贵,很少在直井中应用;单多点测斜仪广泛用于直井井斜的测量,但不能随钻测量。而且,由于受到温度和井深的限制,这些仪器不能完全满足深井及高温井钻井工程的需要。

胜利石油管理局钻井工艺研究院对机械式无线随钻测斜仪进行了调研和研究工作,成功研制了一种使用方便、价格低廉,适用于直井的随钻测斜仪器。与目

前相同用途的其他测斜仪相比,它具有操作简单、使用方便、适应性强和可随钻测量等优点。

## 1 设计方案

机械式无线随钻测斜仪是利用精密机械机构测量井斜,利用钻井液脉冲技术传输信息。其功能是对直井进行无线随钻测量井斜,它的基本结构组成与现场广泛使用的电子式无线随钻测斜仪(MWD)相似,包括井下仪器和地面信号接收系统,井下与地面之间通过钻井液以压力脉冲的形式传输信息。与电子式无线随钻测斜仪显著区别在于机械式无线随钻测斜仪的井下仪器为纯机械机构,井斜的测量、井斜信息的转换、脉冲发生器的控制及脉冲信号的发生等全部由机械装置完成。

系统的工作原理是:井下仪器的测量装置测得的井斜信息通过一定的机构传递给控制装置,控制装置

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2001AA602013)部分成果。

作者简介:蔡文军,男,1972年11月生,1998年毕业于石油大学(华东)获工学硕士学位,现为胜利石油管理局钻井工艺研究院工程师,中国石油大学(华东)在读博士,主要从事石油钻井装备及井下工具的研究工作。E-mail: wenjunc@slof.com

将井斜信息转换为控制信息,从而控制脉冲发生器产生脉冲信号,脉冲信号通过钻井液传递到地面,地面记录仪将立管传感器检测到的压力脉冲信号打印出来,并根据脉冲信号的数量显示出井斜的大小。

机械式无线随钻测斜仪的主要技术参数如下:

(1) 精度 综合考虑机械测斜的特点与钻井工程直井测斜的要求,其精度定为  $\pm 0.5^\circ$ ,这样既能满足现场需要,又降低了零件的加工难度,同时也提高了仪器的可靠性。

(2) 测量范围 由于该仪器主要用于直井的随钻测量,其测量范围定为  $0 \sim 10^\circ$ 。

(3) 工作温度 机械式测斜仪的井下仪器受温度的影响较小,最高工作温度为  $260^\circ\text{C}$ 。适用于深井和高温井。

(4) 仪器外径 仪器的外径有  $88.9\text{ mm}$  和  $120\text{ mm}$  两种规格,可以满足  $152.4\text{ mm}$  以上井眼使用。

(5) 仪器长度 仪器总长度为  $1500\text{ mm}$ 。

(6) 钻铤尺寸 仪器使用时放置在近钻头的专用钻铤短节中,适用于直径大于或等于  $127\text{ mm}$  的钻铤,钻铤长度为  $3000\text{ mm}$ 。其中直径小于  $203.2\text{ mm}$  的钻铤用外径为  $88.9\text{ mm}$  的仪器,大于或等于  $203.2\text{ mm}$  的钻铤用外径为  $120\text{ mm}$  的仪器。

## 2 关键技术

### 2.1 测斜技术

机械测斜的基本原理是基于重力原理,如图1所示。其测量原理为:在重力作用下,摆锤一直处于自由

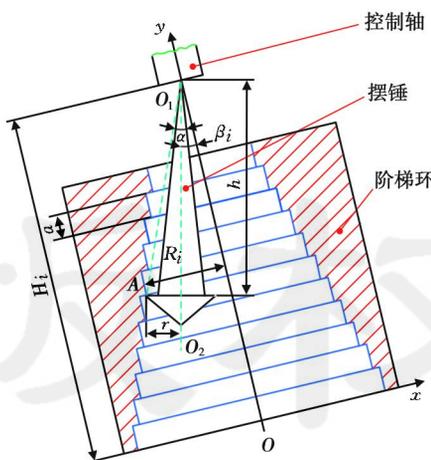


图1 测斜机构原理及计算参数

Fig. 1 Principle and calculation parameters of deviation measurement device

垂直状态。当摆锤随控制轴沿阶梯环中心线从下向上运动的过程中,由于阶梯环是倾斜的,摆锤必定会挂在阶梯环的某一台阶上。当阶梯环的倾角不同时,摆锤

将挂在不同的台阶上。这样根据摆锤所挂台阶的位置就可以确定阶梯环的倾斜角度。

摆锤与阶梯环的结构尺寸确定方法如下:建立如图1所示的坐标系。假设阶梯环共有  $N$  个台阶,上端直径最小的为第1个,下端为第  $N$  个,每个台阶的高度均为  $a$ ,则有

$$R_i = r^2 + h^2 \sin^2(\beta_i) \quad (1)$$

$$H_i = (N - i + 1)a + r^2 + h^2 \cos^2(\beta_i) \quad (2)$$

式中  $h$  为摆锤顶端铰接点距摆锤挂齿的距离; $r$  为摆锤挂齿的半径; $\beta_i$  为摆锤中心线与挂齿外沿和顶端铰接点连线的夹角,即:  $\beta_i = \arctan r/h$ ;  $i$  为阶梯环的第  $i$  个倾角(阶梯环中心线与摆锤中心线夹角,图1中  $OO_1O_2$ ),角度增量为  $0.2^\circ \sim 1.0^\circ$ ,且  $\beta_i = \beta_{i-1} + \Delta\beta$ ;  $R_i$  为阶梯环第  $i$  个台阶的半径; $H_i$  为摆锤挂住阶梯环第  $i$  个台阶时摆锤顶端铰接点距阶梯环下端面的距离,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。

由式(1)和式(2)可知,阶梯环的各台阶半径  $R_i$  与摆锤的结构尺寸  $r, h$  有关,只要  $r, h$  确定以后,对不同的倾角  $\beta_i$ ,就可以得到对应的阶梯环台阶半径  $R_i$  和摆锤铰接点距阶梯环下端面的距离  $H_i$ 。阶梯环台阶半径  $R_i$  是设计阶梯环结构必需的参数,而  $H_i$  则与控制轴的位移有关,是设计控制机构的关键尺寸。

在实际的结构设计中,为了保证摆锤的挂齿能够挂住阶梯环的台阶,相邻台阶的半径之差必须有一定的距离,这就要求倾角增量的值不能太小。角度增量低于  $0.2^\circ$  结构不容易实现,高于  $1.0^\circ$  不能满足现场测斜的需要。目前国外的仪器有  $0.25^\circ, 0.5^\circ$  和  $1.0^\circ$  三种精度,本研究提出的设计方案精度为  $0.5^\circ$ 。

### 2.2 控制技术

控制技术是将测量机构测得的井斜信息通过特定的装置转变为用于控制脉冲发生器的控制信息,以控制脉冲发生器根据不同的井斜发出不同的脉冲信号。控制技术的实现方法是设计一种控制机构,将测斜机构测得的井斜信息转变为位移变化量,并进行放大,用位移变化量控制脉冲发生器的工作。

如图2(a)是控制机构的示意图。其工作原理为:执行筒在垂直外力作用下,处于如图2(a)状态。当执行筒失去外力作用时,主弹簧推动限位筒向上运动,从而带动执行筒也向上运动。与此同时,因控制轴的上端与执行筒的内孔上端脱离而失去执行筒的作用,控制轴在控制弹簧的作用下向上运动。控制轴的下端与测量机构的摆锤相连,可以控制其向上运动的距离。且其运动的距离正好使控制轴上的某一挡球柱运动到其对应的钢球位置,这时钢球将被推出,从而使限位筒在向上运动的过程中因被钢球挡住而停止,同时执行

筒的运动也将停止。这样,当摆锤挂在阶梯环不同的台阶上时,控制轴向上运动的距离不同,会有不同的挡球柱将对应的钢球推出,从而使执行筒移动不同的距离。同时,控制轴移动的距离很小,而执行筒移动的距离却很大,所以,控制机构可以起到行程控制和放大的

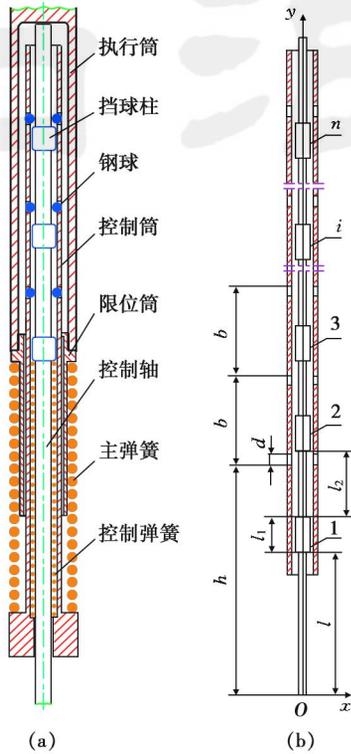


图 2 控制机构原理和分析计算参数

Fig. 2 Principle and calculation parameters of control device

作用。如果想要执行筒回到初始位置,那么只须给执行筒施加一向下的力,就会将主弹簧压缩,推动限位筒向下运动。同时,当执行筒与控制轴的上端接触时,控制轴压缩控制弹簧向下运动,回到初始位置。为了保证钢球始终在控制筒的钢球孔中,须合理确定控制轴与执行筒的结构尺寸。

控制机构的关键部件是控制轴和控制筒,为了分析方便,把控制轴与控制筒简化为如图 2(b) 所示形式。为了实现行程的放大和控制功能,控制轴向上移动距离  $s$  后,最上端第  $n$  个挡球柱应正好在控制筒最上端的钢球孔位置。当移动  $2s$  后,第  $n-1$  个挡球柱应正好在控制筒上端的第 2 对钢球孔位置,以此类推。这样,移动  $i$  个  $s$  距离时,第  $n-(i-1)$  个挡球柱位于控制筒的第  $i$  对钢球孔的位置。它还可以有另一种控制方式,即当控制轴向上移动 1 个  $s$  距离后,最下端的第 1 个挡球柱正好在控制筒最下端的钢球孔位置;当移动  $2s$  后,第 2 个挡球柱正好在控制筒下端的第 2 对钢球孔位置;以此类推。以第一种控制方式为例推导

了设计计算公式。

建立如图 2(b) 坐标系,当控制轴移动  $i$  个  $s$  距离后,满足如下关系式:

$$h + (i - 1)b = (n - i + 1)s + l + l_1 + (i - 1)(l_1 + l_2) \quad (3)$$

在满足式(3)的前提下,还必须满足一个条件,就是当中心轴移动  $i$  个  $s$  距离时,第  $i$  个挡球柱以下的所有挡球柱都不能在控制筒钢球孔的位置,即满足以下不等式:

$$\begin{aligned} h + (j - 2)b - d &> is + l + l_1 + (j - 2)(l_1 + l_2) \\ h + (j - 2)b &< is + l + (j - 2)(l_1 + l_2) \end{aligned} \quad (4)$$

而且为了保证机构的工作稳定,要求挡球柱的长度要大于钢球孔的直径,即

$$l_1 > d \quad (5)$$

由式(3)可知,当  $i=1$  时有

$$h = ns + l + l_1 \quad (6)$$

当  $i=n$  时有

$$h + (n - 1)b = s + l + l_1 + (n - 1)(l_1 + l_2) \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可得

$$b = l_1 + l_2 - s \quad (8)$$

将式(8)代入式(4)并结合(5)式可得出如下不等式

$$\begin{cases} d < s \\ d < l_1 < b - (n - 2)s \end{cases} \quad (9)$$

式中  $n$  为挡球柱的个数,即机构的放大级数,  $n > 2$ ;  $h$  为坐标原点到第 1 个钢球孔的距离;  $b$  为相邻两钢球孔之间的距离,也是单级放大距离;  $s$  为控制轴的单个控制距离,控制轴的移动距离只能是  $s$  的整数倍;  $l$  为控制轴下端距第 1 个挡球柱的距离;  $l_1$  为挡球柱的长度;  $l_2$  为相邻两个挡球柱之间的距离;  $d$  为钢球孔的直径;  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $j = 2, 3, \dots, i$ 。

控制轴和控制筒钢球孔的尺寸可由式(8)和式(9)确定。从式中可以看出,  $l_1$ 、 $l_2$  与  $n$ 、 $b$ 、 $d$ 、 $s$  等参数密切相关,在设计时可根据需要调整各参数的值,使之满足式(6)、式(8)和不等式(9),从而得到最优的参数值。

### 2.3 信息传输技术

无线随钻测量技术的关键是建立一条用于井下和地面信息传递的有效信号通道<sup>[4]</sup>。实践表明,钻井液压力脉冲传输技术<sup>[5-6]</sup>是用于钻井随钻测量中最好的信息传输技术,现有的无线随钻测量系统大部分都是采用这种技术<sup>[7]</sup>。钻井液脉冲技术的基本原理是将井下测量的信息转换成控制信息,用控制信息控制井下仪器的脉冲发生器,使钻柱中的钻井液压力发生变化,从而产生压力脉冲,压力脉冲通过钻柱中的钻井液传递到地面。钻井液脉冲信号的类型包括正脉冲、负脉冲和连续

波 3 种信号<sup>[4,8]</sup>。目前使用最多的是正脉冲信号,并有多种与之相关的脉冲发生器<sup>[4,8-9]</sup>。

机械式无线随钻测斜仪的信息传输采用正脉冲信号,其脉冲信号发生装置为往复节流型正脉冲发生器,如图 3 所示。其原理是:当钻井泵启动时,钻井液从脉冲环中流过,脉冲头在高速钻井液的作用下向下运动;当脉冲头通过脉冲环的节流孔时,钻井液的过流面积将由大变小然后再变大,从而使得钻井液的压力由小变大再变小,产生正压力脉冲。

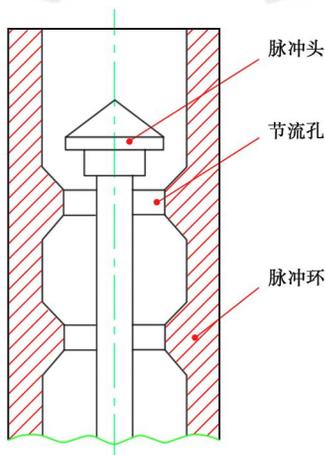


图 3 脉冲发生器示意图

Fig. 3 Sketch of mud pulse generator

脉冲头与控制机构的执行筒相连,所以脉冲头的高度位置受控制机构的控制。当井斜不同时,脉冲头在脉冲环中的位置不同,向下运动过程中经过的节流孔数也不同,从而产生不同数量的脉冲信号。

#### 2.4 密封及润滑技术

通过密封技术来屏蔽井下恶劣的工作环境,使仪器在一个清洁的环境中工作。通过润滑技术来改善井下仪器的工作条件,保证仪器各部件的正常工作和可靠性。

机械式无线随钻测斜仪的井下仪器为纯机械结构,大部分是精密零件,且有很多运动部件,所以井下仪器的测斜机构、控制机构等关键部件都安装在一个密封的外壳中。为了保证密封的有效性,仪器的密封系统设计有一个浮动活塞,从而使仪器系统成为一个内高外低的近平衡压力系统。即不管仪器工作的环境压力如何变化,仪器内部的压力总是略高于外部的压力,这样做的优点是:即使密封系统有些微小的泄漏,只能是润滑油外泄,外面的污物不易进入仪器,不影响仪器的正常工作;由于内外压差小,井下压力对仪器没有影响,可以适用于深井和高压井,同时降低了对密封件的要求。

为了保证各运动部件的正常工作,减少零件的摩擦和磨损,在密封的仪器壳体内充满润滑油。在充油前先将仪器内部抽成真空,并将润滑油内的空气排出,从而避免仪器由于井下温度的变化而受到影响,保证仪器性能的可靠性。为了使仪器适应高温的工作环境,密封件选用最高可达 260 的耐高温材料。同时选择性能受温度影响小、闪点在 300 以上的润滑油。

### 3 仪器的应用

基于以上方案与关键技术研制的机械式无线随钻测斜仪于 2004 年研制成功,目前已完成了室内及现场试验,并小批量生产,已经在胜利油田的渤古 602 井、中国石油化工集团公司南方勘探公司的重点探井黑池 1 井等 14 口井成功使用,目前正在中国石油化工集团公司的重点探井胜科 1 井和塔深 1 井使用,应用效果良好。

### 4 结 论

(1) 机械式无线随钻测斜仪是集精密机械技术与钻井液脉冲技术为一体的一种新型井斜测量仪器。关键技术包括机械测斜技术、控制技术、信息传输技术和密封及润滑技术等。

(2) 机械式无线随钻测斜仪的井下仪器为纯机械结构,具有操作方便、适应性强、可随钻测量等优点。

(3) 现场应用表明,机械式无线随钻测斜仪具有较好的现场适应性和抗高温性能,解决了深井、超深井、高温高压井等高难度直井随钻测斜的难题。

#### 参 考 文 献

- [1] 张绍槐,张洁. 21 世纪中国钻井技术发展与创新[J]. 石油学报, 2001, 22(6): 63-68.
- [2] 王斌. 定向钻井测量仪器[M]. 北京:石油工业出版社, 1990: 22-60.
- [3] 桂德洙. 浅谈钻井测斜仪[J]. 石油钻采工艺, 1999, 21(5): 45-49.
- [4] McDonald W J. Four different system used for MWD[J]. Oil & Gas Journal, 1978, 76(14): 115-124.
- [5] 王若. 随钻测井技术发展史[J]. 石油仪器, 2001, 15(2): 5-7, 15.
- [6] 赖志坚. 随钻测量技术与传感器原理探讨[J]. 石油钻探技术, 1991, 19(4): 9-17.
- [7] 刘修善,苏义脑. 地面信号下传系统的方案设计[J]. 石油学报, 2000, 21(6): 88-92.
- [8] Desbrandes R. Status report: MWD Technology (Part 2—Data transmission) [J]. Petroleum Engineer International, 1988, 60(10): 48-54.
- [9] 房军,苏义脑. 液压信号发生器基本类型与信号产生的原理[J]. 石油钻探技术, 2004, 32(2): 39-41.