

深井钻进时井底参数自动遥控系统用传感器的设计研究

汤凤林^{1,3}, Чихоткин А.В.¹, Есауленко В.Н.², 宁伏龙^{1,3},
段隆臣^{1,3}, Чихоткин В.Ф.^{1,3}

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. Астраханский Государственный Технический Университет, Россия Г.Астрахань 414025;

3. 地球深部钻探与深地资源开发国际联合研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要:我国正在计划打一口13000 m的特深地质井,以超过目前世界上最深的俄罗斯12262 m科拉超深井,意义重大。深井、特别是超深井钻进中,除了钻井设备、钻具(含钻头)之外,钻井工艺和操作规程也非常重要,后者实施与优化有赖于操作规程地面仪表显示的井底参数数据。但是这些井底数据与实际情况可能有较大差异,导致相应的钻井操作出现偏差和失误,直接影响钻进技术经济指标的提高。俄罗斯阿斯特拉罕国立技术大学Есауленко В.Н.教授等人,设计出了井底参数自动测量控制系统以实现高精度井底监测。其中传感器设计是该测量控制系统实施的关键,本文以方位角传感器设计计算为例对其测量原理进行讨论和分析,以期为我国特深地质井井底参数测控设计提供参考。

关键词:特深井;井底参数;地面仪表;自动遥测系统;传感器;方位角

中图分类号:P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)01-0042-07

Design of the sensors for automatic remote control of the deep downhole parameters

TANG Fenglin^{1,3}, CHIKHOTKIN A. V.¹, ESAULENKO V. N.², NING Fulong^{1,3},
DUAN Longchen^{1,3}, CHIKHOTKIN V. F.^{1,3}

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

2. Astrahan State Technical University, Astrahan 414025, Russia;

3. National Center for International Research on Deep Earth Drilling and Resource Development,
Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: China is planning to drill an extra deep borehole with a depth of 13000m which will exceed the depth of 12262m of the Russian Cola super-deep borehole. However, it faces huge challenges to drill into the depth. Besides drill equipment and tools, the drilling process and the drilling procedure also determine if drilling is successful or not. At present the drilling process and the drilling procedure are mainly guided by and depend on the data shown at surface devices. However, the data may deviate from the real values of downhole parameters, which will influence directly improvement of technical and economical indexes of deep drilling accordingly. Professor of Russian Astrahan State Technical University Esaulenko V. N. and others have designed an automatic measurement and control system of downhole parameters, in which the sensors are necessary and critical devices. This paper introduces the sensors for downhole parameter measurement and takes the design of the azimuth sensor as an example to demonstrate how to

收稿日期:2020-01-07 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.01.006

基金项目:国家自然科学基金面上项目“液压冲击回转作用下热压WC-Cu基孕镶金刚石钻头的磨损行为研究”(编号:D0219,2019—2022)

作者简介:汤凤林,男,汉族,1933年生,教授,博士生导师,俄罗斯工程院院士,俄罗斯自然科学院院士,国际矿产资源科学院院士,探矿工程专业,主要从事探矿工程方面的教学和科研工作,湖北省武汉市鲁磨路388号,lttang_wuhan@aliyun.com。

引用格式:汤凤林,Чихоткин А.В.,Есауленко В.Н.,等.深井钻进时井底参数自动遥控系统用传感器的设计研究[J].钻探工程,2021,48(1):42-48.

TANG Fenglin, CHIKHOTKIN A. V., ESAULENKO V. N., et al. Design of the sensors for automatic remote control of the deep downhole parameters[J]. Drilling Engineering, 2021,48(1):42-48.

design the measurement system, which would be useful for improving future ultra-deep borehole drilling in China.

Key words: extremely deep borehole; downhole parameter; surface device; automatic control system; sensor; azimuth

1 概述

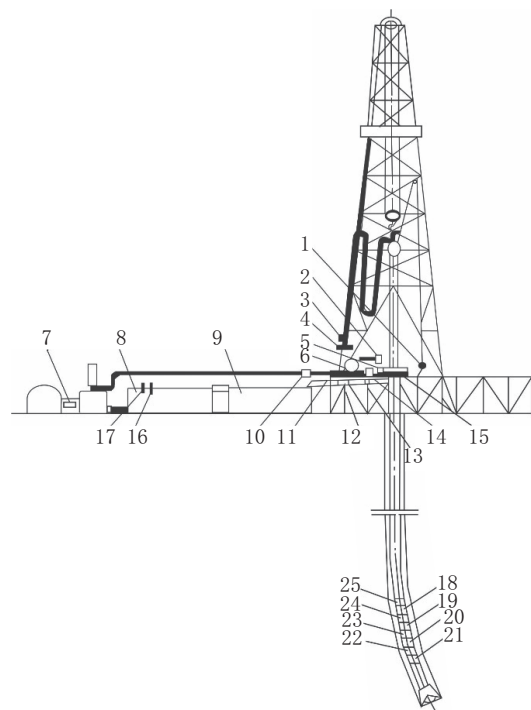
当前我国“三深一土”战略正在紧密锣鼓的实施,在深部探测和深部找矿方面已取得一系列成果^[1-3]。未来国家还计划实施一口13000 m特深地质井重大工程,该井深度超过了前苏联的12262 m科拉超深井,将创造新的钻探世界纪录,对推动地球系统科学发展和钻井技术进步具有重要意义。

钻井是一个系统工程,涉及钻井设备、工具、钻进工艺、固井和完井工艺以及操作规程、生产管理等。在根据井深和所钻地层选定设备、工具之后,钻进工艺和操作规程非常重要,直接影响着钻井技术经济指标。目前主要还是依靠地面仪表显示的读数指标来指导钻井工艺和操作规程。但是,地面仪表显示的读数与井底参数实际数值有一定的差异。据俄罗斯超深井钻井研究结果,此差异可达20%~30%^[4-7]。为了检测 and 了解井底钻进参数的真实情况,通常会在钻井设备和钻具上安装各种不同类型的传感器(见图1)^[4-15]。但是超深井钻进时,井底条件非常恶劣,压力可能大于100 MPa,温度可能大于200 ℃,各个方向的振动可达10~100个重力加速度。这些苛刻条件对井底参数测量使用的传感器元器件提出了特殊的要求^[4-7],需要优选设计井下传感器工作元件类型。

2 传感器系统元件选型

传感器是一种检测装置,能感受到被测量的信息,并能将感受到的信息,按一定规律变换成为电信号或其它所需形式的信息输出,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等需求。通常传感器工作包括以下部件:敏感元件直接感受被测量对象,并输出与测量有确定关系的物理量信号;转换元件将敏感元件输出的物理信号转换成为电信号;变换电路负责对输出的电信号进行放大调制;转换元件和变换电路一般需要辅助电源供电。

根据传感器工作原理的不同,传感器元器件类型又可分为:射流元件、电力元件、半导体线路、集成(电子)线路、一般水力元件、一般气动元件、机械系统等,其性能参数很不相同。各种元件的主要性



1—动滑车位置和钻井速度传感器;2—机械大钩扭矩传感器;3—钻井液入井压力传感器;4—钻井液入井密度传感器;5—转盘扭矩传感器;6—大钩质量和钻头载荷传感器;7—水泵活塞双作用次数传感器;8、9—钻井液池容积传感器;10—钻井液入井流量传感器;11—钻井液井口出口温度传感器;12—钻井液从井口出来的流量传感器;13—钻井液出口电阻率传感器;14—钻井液中气体和硫化氢含量传感器;15—转盘转速传感器;16—钻井液入井温度传感器;17—钻井液入口电阻率传感器;18—氢离子浓度(pH)传感器;19—钻井液井底压力传感器;20—井筒弯曲顶角传感器;21—钻头轴载传感器;22—井筒弯曲方位角传感器;23—涡轮钻具轴转数传感器;24—钻头轴承温度传感器;25—井内温度传感器

图1 钻井过程传感器布置

Fig.1 Deployment of the sensors in drilling process

能指标见表1^[4-7]。

从表1可见,与其它元器件相比,射流元件具有尺寸小、无活动零件、不受高温和辐射影响、不惧撞击振动、制作容易、价格低廉、容易与其它测量系统连接、可在危险条件下使用等优点,非常适合作为

表1 射流元件与其它类型元件性能对比

Table 1 Performance comparison between jet elements and other elements

元件类型	尺寸	活动零件	温度影响	辐射影响	加速度, 撞击, 振动	工艺性	价格	与其它控制系统连接的可能性	危险条件下工作可能性
射流元件	小	无	无	无	无影响	制作简单	低	无需转换	可用
电力元件	与现代射流元件略同	要求有	高温时损坏	损坏(绝缘材料性能破坏)	大的加速度有影响	制作较射流元件复杂	大量生产时高于射流元件	要求机电转换或电磁转换	采用专门措施
半导体线路	比现代射流元件小	要求有	高温时损坏	损坏	相应固定时可以经受大的加速度	制作工艺与射流元件略同	与射流元件几乎相同	要求机电转换或电磁转换	可用
集成(电子)线路	小于射流元件	无	高温时损坏	损坏	可以经受大的加速度	制作工艺与射流元件略同或简单一点	低于射流元件	要求多次转换	安全取决于控制措施
一般水力元件	大于射流元件	要求有	高温时可能损坏或失去工作能力	可能损坏	大的加速度有影响	工艺比较复杂	高于射流元件	与水力系统联系无需转换	安全取决于控制措施
一般气动元件	远远大于射流元件	要求有	高温时可能损坏或失去工作能力	可能损坏	大的加速度有影响	工艺比较复杂	高于射流元件	与水力系统联系无需转换	安全取决于控制措施
机械系统	大于射流元件	要求有	高温时工作能力与结构有关	可能影响	大的加速度可能有很大的影响	工艺比较复杂	高于射流元件	与机械系统联系无需转换	可用

超深钻探传感器工作元件。下面就以方位角传感器为例,介绍基于射流元件的该类传感器的设计方法。

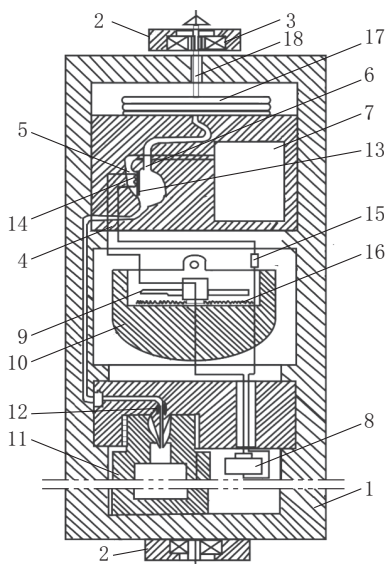
3 方位角传感器设计

3.1 方位角传感器结构

俄罗斯使用的不是一般国家标准的方位角传感器,而是将机械谐振装置和含有空气射流元件组合的传感器,其结构和原理见图2。之所以使用机械谐振装置是因为其突出的技术指标:质量好、稳定性高、井底和井口数据传输通道参数容易协调等。使用空气射流元件是因为其可靠性高、发生作用快、简单和价廉,可以在其它传感器不能使用的条件下使用。这些射流元件的频率范围可以与井中无线传输通道的频带相适应。利用射流及其和固体井壁的相互作用,可以设计出具有比例特征、继电器特征和实现各种逻辑功能的转换器元件。此外,空气射流元件还有尺寸小、不含活动易磨损零件的优点。因为这些优点,使之适合在极端条件

下(压力 $>100\text{ MPa}$,温度 $T>+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和各个方向的振动为 $10\sim100$ 个重力加速度)使用。供给射流装置空气的压力,一般为 $0.01\sim0.1\text{ MPa}$ 。使用如此低的空气压力,是因为井眼内径尺寸制约了空气用量。从射流元件和机械谐振装置输出的传感器信号,是频率为 $f(\text{Hz})$ 、空气压力振幅为 $A_0=0.005\sim0.05\text{ MPa}$ 的系列气动脉冲信号^[4-15]。

从图2可见,射流发生器型转换器位于带有偏心重锤的框架1内,框架1用轴承3固定在支座2上。转换器由供气喷嘴4、接收喷嘴5和出口喷嘴6组成,出口喷嘴6通过转换通道与接收容器7连接。机械谐振装置13呈一端固定的舌片形式,置于射流发生器非平整表面的射流粘附区内。在框架1内固定有带有压缩气体的气瓶11,这个气瓶既是转换器的供气来源,也同时起重锤作用。气瓶11利用调解减速器12与供气喷嘴连接。气囊17与水力放大器18控制连杆连接。传感器装置中装有带磁针9的锅状物体10,可以锁定滑线电阻器16的线圈。谐振装置13的驱动系统14接入由滑线变阻器16、电阻15



1—带有偏心重锤的转动框架;2—支座;3—轴承;4—供气喷嘴;5—接收喷嘴;6—出口喷嘴;7—接收容器;8—供电电源;9—磁针;10—锅状物体;11—气瓶;12—调解减速器;13—机械谐振装置;14—驱动系统;15—电阻;16—滑线变阻器;17—气囊;18—水力放大器

图2 新型方位角传感器结构示意图

Fig.2 Structure of the new type azimuth sensor

和供电电源8组成的电路中。

测量时,从滑线电阻器16线圈中来的电流,与按地球磁子午线确定的磁针9的位置有关。此时,减速器12打开,气流从气瓶11出来,经过喷嘴4,粘附非平整管壁,进入接收喷嘴5,充满接收容器7。充满接收容器7后,在接收喷嘴5前产生反压,使气体脱离管壁,转入出口喷嘴6。此后,气体进入气囊17,气囊17推动水力放大器18的控制连杆。出口喷嘴中的压力以频率为 $f(H_z)$ 进行跳跃式变化。气流依次粘附管壁,充满接收容器7,进入出口喷嘴6。在喷嘴5的入口端置有舌片13,舌片13在驱动系统14的作用下产生振动。气流发生器的振动频率,与谐振装置的振幅有关。供电用交变电源8进行。框架1位于井筒弯曲平面内。井筒弯曲方位角变化时,带有偏心重锤11的框架1相对按子午线确定的磁针开始转动。磁针重新锁定滑线变阻器的线圈,使电阻发生变化。滑线变阻器是接入平衡电桥的一个臂上的。所以,电桥电阻的变化,可以改变电桥对角线臂电压的变化,改变谐振装置13的振幅。此时,射流元件的振动频率也发生变化。利用水力

放大器18的拉杆,把脉冲传给井底和井口的水力传输通道。这样,就把方位角转换成了频率为 $f(H_z)$ 的跟踪脉冲。

3.2 方位角传感器转换过程

方位角传感器转换过程如下。第一阶段,把等于方位角 α 的框架转动角度转换成驱动线圈的电压 U ,这是因为接入平衡电桥一个臂上的滑线变阻器的电阻 R_p 发生变化的结果。第二个阶段,把驱动线圈上的交变电压 U 转换成舌片的振幅 X 。第三个阶段,把舌片振幅 X 转换成出口喷嘴频率为 f 的空气脉冲。频率为 f 的序列脉冲是井筒弯曲方位角传感器的输出信号。转换过程示意图3。

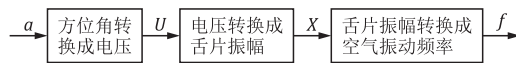


图3 方位角传感器信号转换示意

Fig.3 Signal conversion of the azimuth sensor

3.3 方位角传感器试验台及其试验结果

上述新型传感器工作原理是基于科安德(Коанд)效应的,即当射流通过非平整固体管壁时,则因射流(气流或液流)粘附到附近的管壁上,而改变流动方向。

从图4可见,射流发生器出口振动频率与供气喷嘴出口面积、接收喷嘴面积、接收容器体积、接收容器充满和用空过程参数以及气流流动情况有关,也与位于气流粘附固体表面上的机械谐振装置(舌片)的振幅及其规律有关。接收容器的充满时间,亦即射流发生器的频率,与从供气喷嘴出来的射流断面面积 S 有关。断面面积 S 由舌片一端与粘附表面间的间隙 d 确定。如果舌片端是平面的,则面积 S 是个矩形, $S=hd$ (式中 h 是舌片端的高度)。舌片不动时,面积 S 是个常数。舌片振动时,则 d 是个变量,且与舌片振动规律 $X(t)$ 和管壁形状有关。可以看出,舌片偏离平衡位置越远,则射流瞬时断面面积 $S(t)$ 越大。如果射流断面面积变化,则射流发生器出口冲击频率也随之变化。为了分析和研究,建立了方位角试验台(见图5)^[4-6],确定了射流发生器出口冲击频率与方位角的对应关系(见图6)^[4-7]。

此外还通过实验确定了射流发生器出口冲击频率与供气压力(图7)、接收容器容积(图8)、发生器几何形状和尺寸间的关系(图9)^[4-7]。

试验台试验结果表明,舌片和射流发生器中的

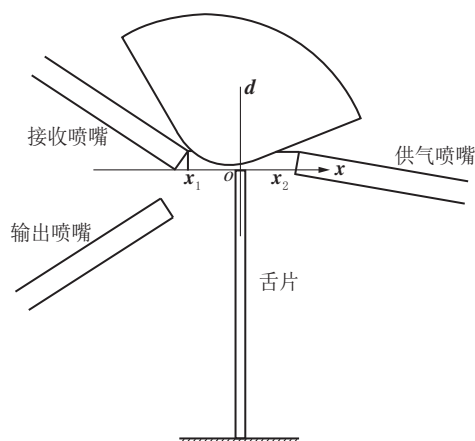
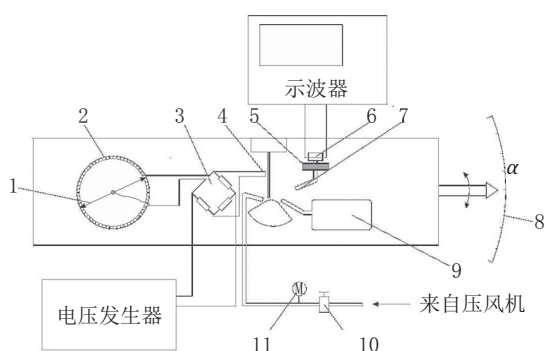


图4 射流发生器示意

Fig.4 Jet generator



1—磁针；2—滑线变阻器；3—电桥线路；4—驱动装置电磁线圈；5—传压器；6—获得出口脉冲的电磁系统；7—射流发生器；8—方位角度盘；9—接收容器；10—阀门；11—压力表

图5 方位角传感器试验台示意

Fig.5 Test bench for the azimuth sensor

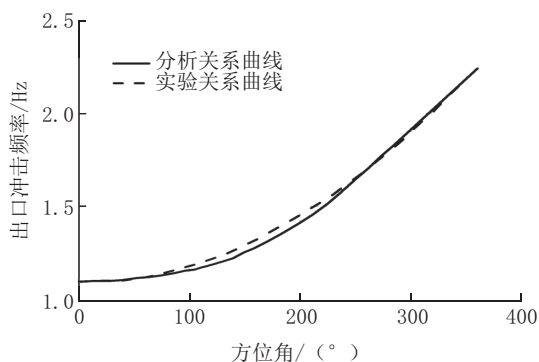


图6 射流发生器出口冲击频率与方位角的关系

Fig.6 Impact frequency at the outlet of the jet generator vs azimuth

主要参数有： α —舌片位置和射流粘附表面前部的夹角； β —供气喷嘴位置与射流粘附表面前部的夹

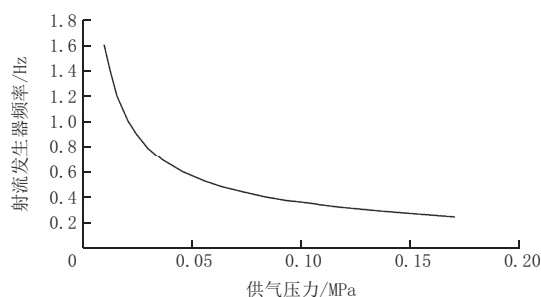


图7 射流发生器出口冲击频率与空气供给压力的关系曲线

Fig.7 Impact frequency at the outlet of the jet generator vs air supply pressure

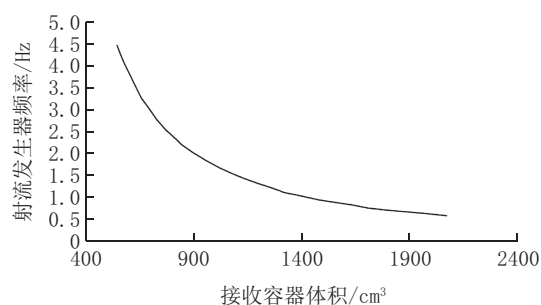


图8 射流发生器出口冲击频率与接收容器容积的关系曲线

Fig.8 Impact frequency at the outlet of the jet generator outlet vs receiver volume

角； γ —接收喷嘴位置与射流粘附表面侧面的夹角； a —供气喷嘴与舌片间的距离； b —接收喷嘴与舌片间的垂直距离； c —供气喷嘴到射流粘附表面的距离； d —舌片端部到射流粘附表面的距离。上述参数的变化，很大程度上影响空气脉冲行为，直至导致空气脉冲不再发生。因此，设计射流发生器时，应特别注意这些参数取值。其中， α 影响最大，其数值范围应控制在 $65^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 之间； β 和 γ 影响次之， β 应控制在 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 之间， γ 应控制在 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 之间。距离 b 、 d 影响较小，可取 $a=2.5 \sim 5 \text{ mm}$ ， $b=1 \sim 2 \text{ mm}$ ， $c=0.5 \sim 1 \text{ mm}$ ， $d=0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 。

3.4 方位角传感器的设计

方位角传感器可按如下步骤进行设计：

第一步，根据井底条件计算方位角测量仪器直径。对于超深井（大于7000 m）来说，钻柱下部结构主要是钻杆（钻杆外径144 mm、内径100 mm），由于钻井液需要在钻杆内部循环，所以必须考虑钻杆内壁和井底测量仪器的间隙。所以，容器外径等于：

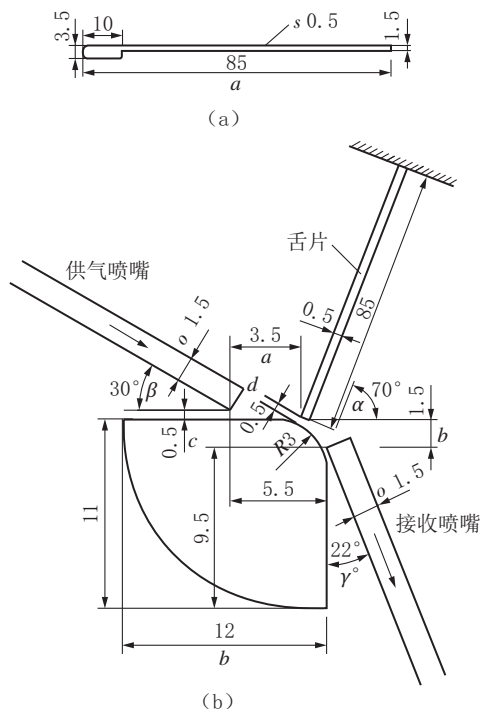


图9 方位角传感器中舌片(a)和射流发生器(b)尺寸、角度

Fig.9 Size and arrangement of the azimuth angle sensor tongue (a) and the jet generator(b)

$$D_{\text{仪器}} = 2[r_T - h - (r_{BT} - r_K)]$$

式中: r_T ——钻杆外径; h ——钻杆壁厚; r_{BT} ——钻杆内径; r_K ——测量仪器外壁到钻杆内壁的距离(间隙)。

第二步, 计算测量仪器内传感器的尺寸。传感器位于转动框架内(参见图2), 所以传感器外径等于:

$$D_{\text{传}} = D_{\text{仪器}} - 2h_K - 2h_3 - 2h_p$$

式中: $D_{\text{传}}$ ——传感器外径; $D_{\text{仪器}}$ ——测量仪器外径; h_K ——井底测量仪器壁厚; h_3 ——测量仪器内壁和转动框架的间隙; h_p ——转动框架壁厚。

超深井钻进时, 方位角测量仪器直径通常为40~50 mm, 必要时测量容器长度可达10 m, 即可与一根钻杆长度相应。

第三步, 计算射流转换器的尺寸和接收容器的容积。射流转换器由一组喷嘴、粘附表面和舌片组成, 置于转动框架内。转换器的最大尺寸元件是舌片, 其长度可达80~90 mm。所以, 必须将其置于与传感器垂直轴线平行的位置上(见图9)。转换器元件的几何形状应与图9一致。

接收容器容积决定传感器出口信号的频率范

围。计算表明, 为了与无线组合传输通道传感器配合, 喷嘴直径为1.5 mm时, 接收容器的容积为3~4 L即可。射流传感器尺寸减小时, 接收容器的容积也应减小。如果传感器直径为40 mm、长度为2~3 m, 则在传感器内可以安置容积为3~4 L的接收容器。

第四步, 计算传感器的电路。要计算电桥上滑线变阻器和各个臂的电阻额定值以及驱动装置电磁线圈的匝数。

第五步, 确定传感器频率范围与通信传输通道通过范围是否一致。

第六步, 计算供气瓶的容积。供气瓶容积应能保证传感器在井底工作的时间。为了保证供给射流传感器的气体, 必须使气体压力保持在0.01~0.12 MPa范围内, 气体在传感器中的消耗量不大(为10~20 L/h)。如果射流传感器直径为50 mm, 长度为2 m, 则其容积为3925 cm³。

第七步, 按数学模型计算传感器。

方位角传感器设计计算框图见图10^[4-7]。

4 结论和建议

(1) 钻探工程中, 当根据钻孔深度和所钻地层选定钻探设备和钻具(含钻头)之后, 钻探工艺和操作规程决定着钻探工程技术经济指标的好坏。而钻探工艺和操作规程决策和优化依赖地面仪表显示的井底参数及其准确性。从目前情况看, 地面仪表所示读数与孔底实际参数有一定差距, 孔越深, 差距越大, 影响了钻进技术经济指标的提高, 成为当前超深钻探急需解决的难题之一。

(2) 消除上述差距的有力措施就是研发井底多参数测量监控系统加以解决。在监控系统中, 传感器是关键部件。俄罗斯研发的井底传感器不是通常所用的标准传感器, 而是新型传感器。文中以方位角传感器设计和计算方法为例, 阐明了其设计思想和实施方案, 以指导后续深井传感器选型和检测方案设计, 以对安全高效实施13000 m特深地质井具有重要意义。建议有关部门和单位对其进行全面分析研究, 确认其合理性、参考性和可用性。

(3) 对于这样一口特深地质井来说, 为了钻井顺利优质高产, 井底参数检测控制非常重要, 俄罗斯研发的井底参数遥控系统(含传感器)或许具有一定的参考价值。

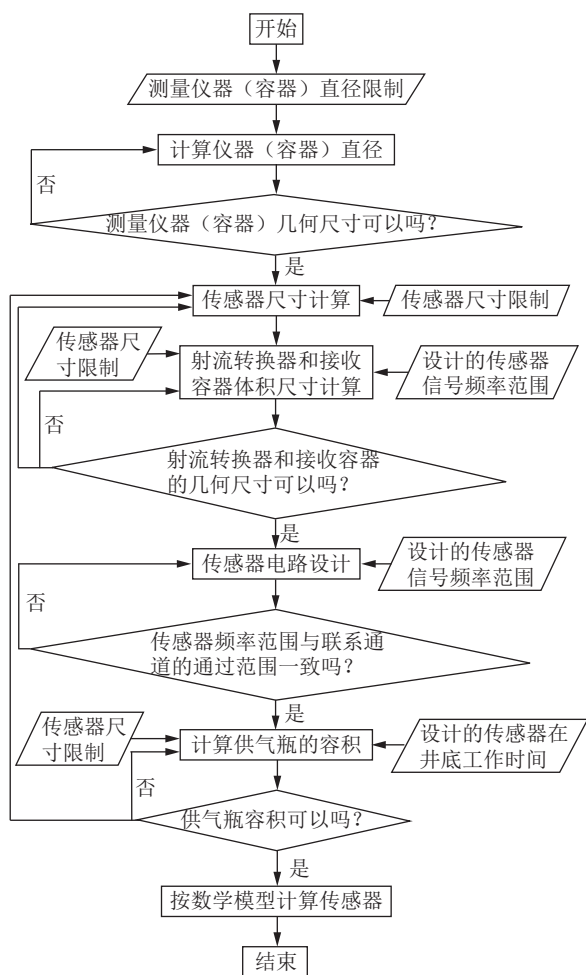


图10 方位角传感器设计流程

Fig.10 Design chart for the azimuth sensor

参考文献(References):

- [1] 胡郁乐,张惠,王稳石,等.深部岩心钻探关键技术[M].武汉:中国地质大学出版社,2018.
HU Yule, ZHANG Hui, WANG Wenshi, et al. Key technologies in deep core drilling[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.
- [2] 朱恒银,王强,杨凯华,等.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.
ZHU Hengyin, WANG Qiang, YANG Kaihua, et al. Deep core drilling technology and management[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [3] 朱恒银,王强,杨展,等.深部地质钻探金刚石钻头研究与应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2014.
ZHU Hengying, WANG Qiang, YANG Zhan, et al. Research

and application of diamond bit for deep geological drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.

- [4] Козловский Е. А. Кольская сверхглубокая [М]. Москва, Россия: Издальство Недр, 1984.
- [5] В. Н. Есауленко. Телерегулирование забойных парметров при бурении глубоких скважин [М]. г. Астрахань, Россия: Издательство «Астрахинский государственный технический университет», 2015.
- [6] В.Н.Есауленко, Н.В.Есаулеко. Частные датчики в бурении [М]. г. Астрахань, Россия: Издательство «Астрахинский государственный технический университет», 2012.
- [7] В. Н. Есауленко, Н. В. Есаулеко. Аэродинамические измерительные преобразователи для телеметрии забойных параметров при бурении скважины [М]. г. Астрахань, Россия: Издательство «Астрахинский государственный технический университет», 2010.
- [8] В. Н. Есауленко, Н. В. Есауленко. Механические измерические преобразователи для систем телеметрии забойных параметров [J]. Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2009(7):4-7.
- [9] В. Н. Есауленко, А. М. Дегтярева, Н. В. Есауленко. Устройство для измерения зенитного угла искривления ствола скважины: 2285797[P].2006-10-20.
- [10] В. Н. Есауленко, А. М. Дегтярева, Н. В. Есауленко. Устройство для измерения зенитного угла искривления ствола скважины: 2349750[P].2009-03-20.
- [11] В. Н. Есауленко, А. М. Дегтярева, Н. В. Есауленко. Устройство для измерения температуры в скважине: 2381361[P]. 2010-02-10.
- [12] В. Н. Есауленко, А. М. Дегтярева, Н. В. Есауленко. Устройство для определения параметров искривления в скважине: 2468201[P].2012-11-27.
- [13] Шевченко М. А. Датчик азимута искривления скважины [J]. Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2011(7):2-3.
- [14] Шевченко М. А. Имитационная модель комбинированного канала связи для телеметрии забойных параметров в процессе бурения скважины [С]// 4-ая всеросс. науч. - практ. конф., 2013:136-138.
- [15] Шевченко М. А. Применение струйных элементов для коммутации датчиков скважинной телеметрической системы[J]. Нефтяное хозяйство, 2013(11):124-126.

(编辑 荐 华)