

深部钻进井底冲洗液压力自动控制系统分析研究

汤凤林^{1,2}, 赵荣欣¹, 李博¹, Есауленко В. Н.³,
周欣⁴, 段隆臣², Чихоткин В. Ф.²

(1. 上海市建筑科学研究院有限公司, 上海 200032; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074;
3. Астраханский Государственный Технический Университет, Россия Г.Астрахань 414025;
4. 湖北省地震局, 湖北 武汉 430064)

摘要:我国计划施工一口深度为13000 m的地质特深井,意义重大。在深井钻进中,特别是超深井钻进中,如何把井底的钻进工况参数准确及时地传送到地面,进行调节控制,以保证正常钻进和提高钻探技术经济指标,俄罗斯专家提出了组合联系通道。如何控制冲洗液井底压力,以保证钻进安全,防止事故发生,需要有一个自动控制系统,以及如何解决此系统中的信号响应滞后问题,俄罗斯钻探科研人员在这些方面做了大量的工作,取得了一定成果。这些研究成果值得引起我们的注意。

关键词:超深井钻进;参数传送;组合联系通道;井底冲洗液压力;自动控制系统;信号响应滞后

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)04-0009-07

Analytical research on automatic control system of bottom hole drilling fluid pressure in deep drilling

TANG Fenglin^{1,2}, ZHAO Rongxin¹, LI Bo¹, ESAULENKO V.N.³,
ZHOU Xin⁴, DUAN Longchen², CHIKHOTKIN V.F.²

(1. Shanghai Institute of Building Sciences Limited Company, Shanghai 200032, China;
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan Hubei 430074, China;
3. Astrakhan State Technical University, Astrakhan 414025, Russia;
4. Hubei Earthquake Agency, Wuhan Hubei 430064, China)

Abstract: It is planning to drill an extremely deep hole with depth of 13000m in China that has great significance. In deep drilling, particularly in superdeep drilling it is a difficult problem to transfer the bottom hole drilling parameters to the surface in time and correctly and to adjust and control them so that the normal drilling and good technical and economic results can be guaranteed. Russian experts propose a combination link channel and that has definite reference value probably. It is very important to have an automatic control system to solve the problem of how to adjust and control the bottom hole drilling fluid pressure in order to guarantee the normal drilling and prevent accident and how to resolve the response lateness of signal in the link channel. Russian scientists have done a lot of work in these fields and got a definite success and that deserves our attention.

Key words: superdeep drilling; parameter transfer; combination link channel; bottom hole drilling fluid pressure; automatic control system; lateness of signal response

收稿日期:2023-04-23; 修回日期:2023-04-23 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.04.002

基金项目:国家自然科学基金面上项目“不同结构高压电脉冲钻头的破岩过程与预测模型研究”(编号:42272366)

第一作者:汤凤林,男,汉族,1933年生,教授,博士生导师,俄罗斯工程院外籍院士,俄罗斯自然科学院外籍院士,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,ftang_wuhan@aliyun.com。

引用格式:汤凤林,赵荣欣,李博,等.深部钻进井底冲洗液压力自动控制系统分析研究[J].钻探工程,2023,50(4):9-15.

TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, LI Bo, et al. Analytical research on automatic control system of bottom hole drilling fluid pressure in deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 9-15.

我国正在计划施工一口深度为13000 m的特深地质井,将超过目前世界上最深的垂直钻井——深度为12262 m的俄罗斯科拉超深井(官方公布的是此深度,实际上已达12300 m),意义重大^[1-8]。俄罗斯(前苏联)在深井和超深井钻进方面做了很多工作,施工了多口地质超深井,取得了很多成绩,这是世界上公认的^[9-21]。

在深井、特别是超深井钻进中,除了钻井设备、钻具(含钻头)之外,钻井工艺和操作技术也非常重要。钻井工艺和操作技术目前主要是利用地面仪表显示的井底参数数据来进行指导。但是,地面仪表显示的数据与井底钻井参数的实际情况往往有较大差异,其差异可高达20%~30%,井越深,差异越大,直接影响技术经济指标的提高。没有可靠的井底参数检测手段,井底和井口的联系通道不够完善,就不可能有效地控制井底过程,不可能提高钻井的技术经济指标^[10-21]。俄罗斯专家提出了组合联系通道,或许有一定参考价值。如何控制冲洗液井底压力,以保证钻进安全进行,防止事故发生,需要有一个自动控制系统,以及如何解决此系统中的信号响应滞后问题,非常重要。俄罗斯钻探科研人员在这些方面做了大量的工作,取得了一定成果,值得引起我们的注意。

1 井底井口联系通道^[10-13]

俄罗斯阿斯特拉罕国立技术大学 Есауленко В.Н. 教授等设计出了井底参数自动测量传送系统。该传送系统把信息源的信息转换为沿联系通道传送的信号。联系通道是把信号从信号源传到用户的物理介质。通常在联系通道中都有干扰存在,其物理性质与信号性质同类,因此,信号在联系通道终端总有某种程度的畸变。所以,在接收装置中,信号需要再次转换,然后把所得有关信息传送给用户。

为了把信号从井底传到地面,有几种类型联系通道:水力通道,是利用井内循环的冲洗液作为传送介质,其中的压力振动是信息传送源;无线电磁通道,是利用钻井周围的岩石和钻杆柱作为传送介质;有线通道,是利用下入井内的电缆或光缆作为传送介质;声波通道,钻杆柱是其通道,钻头或专用冲击器在钻杆柱中产生的振动(含噪声)是信息传送介质。

1.1 水力联系通道

水力联系通道的优点是:由于是利用冲洗液液柱传送信息,是自然传送通道,所以,建立的联系线路无需另外投资,信号传送距离最大;不干扰钻井施工操作;与所钻地层岩石关系不大。

缺点是:信息传送速度慢,因而信息量少;不能在空气洗井和泡沫洗井中使用;形成信号信息的水功率消耗大;对冲洗液性能的要求高。

1.2 无线电磁联系通道

无线电磁联系通道利用的是钻杆柱绝缘部分和岩石之间产生的电磁波。电压是用电池或水力涡轮带动旋转的发电机产生的。在地表上,接收的信号是电流在钻柱和距离钻机一定距离的接收天线之间的岩石中涡流产生的电位差。

遥测系统电磁联系通道原理见图1,信号从位于井底遥测系统中的钻杆柱下方的无磁分隔管的信号源出来,电磁波通过岩石把信号传送给接地天线,被信号处理系统吸收,由计算机进行处理。

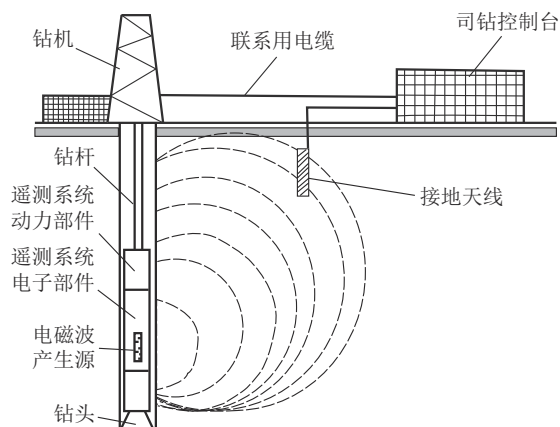


图1 遥测系统电磁联系通道工作原理示意

Fig.1 Working principle of electro-magnetic link channel in remote measure system

电磁联系通道的优点是:传送速度比水力通道大一点;简易价廉;对冲洗液没有要求,可以使用空气和泡沫洗井;使用此种类型线路无需另加投资。

其缺点是:信号传送距离与围岩电阻率大小关系很大,这是此种联系通道的主要缺点,在低阻岩石(电阻率 $<5\Omega\cdot\text{m}$)中,信号严重分流、衰减;在含盐地层中遥测系统偶极被地层电绝缘,信号不能通过;抗干扰性差,在交通不便地方安装天线困难。

1.3 有线联系通道

在井底和地表之间建立有线联系通道有一定困难,但是,其信息传送速度快,比水力输送速度快数倍。在电钻钻井中使用有线通道比较方便,电钻的供电电缆可以作为联系线路。

有线联系通道的优点是:信息传送速度快,可以双向联系,可从地表供电给井下仪表,不受地质剖面的影响,在钻井中可以使用空气和泡沫洗井。

缺点是:此类装置成本高,连接可靠性差,电缆可能因钻杆转动和冲洗液研磨性影响而受到磨损和腐蚀,升降工序时间长,使用电缆需用专用设备。

1.4 声波联系通道

在声波联系通道中,信息的传送是靠沿着钻杆柱传播的声波振动来实现的。专用冲击装置或牙轮钻头钻进时,在井底滚动的牙轮是声波振动源。地面上装有接收装置,计算振动次数。声波振动遥测系统的信息量低,抗干扰能力差。声波联系通道的缺点是,在地表上处理噪声比较复杂,信号形式可能在钻井规程变化和所钻岩石性质变化时发生变化,现在仍处于理论研究和试验研究当中。

1.5 组合联系通道

上述方法各有其优缺点,如果将其合理组合起来,扬长避短,可以取得好的效果。俄罗斯专家提出使用组合方法,例如,把水力联系通道和无线电磁联系通道结合起来,对于超深井(深度 > 6000 m)来说,可以在井底 3000 m 以内使用水力(指流体,含液体或空气,下同)联系通道,从距离井底 3000 m 到井口使用无线电磁通道,如图 2 所示^[5-8]。

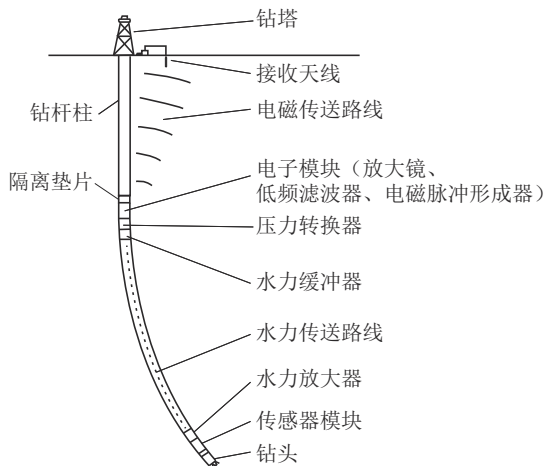


图 2 组合联系通道示意

Fig.2 Scheme of combination link channel

从图 2 可见,组合联系通道中,在钻头的上方置有传感器模块,包括有一组井底传感器和一个转换器。模块的上端与水力放大器连接,水力放大器控制井内循环冲洗液液流阀门的开关。水力放大器形成系列强力脉冲,沿着井内冲洗液柱(水力传送线路)传送。水力脉冲在水力联系通道中部产生,在 3000 m 左右深度,是利用压力转换器形成的。为了减少在水力联系通道中产生干扰的影响,在转换器敏感元件的前面,置有水力缓冲器。压力转换器把压力脉冲转换成进入电子模块的电信号。电子模块由低频放大器、滤波器和电磁联系路线传送的脉冲形成器组成。信号在电子模块中放大,滤除干扰,为在电磁路线中传送进行准备。脉冲器的上端与两个电极连接,这两个电极与用不导电的垫片隔开的钻杆柱的两个部分连接。作用在电极上的电信号,以在周围岩石和钻柱中分流形式传到地表。在地表上,信号用安装在距钻杆柱不远地下的天线电极接收,然后进入井口接收的记录仪表。

为了确定信号能够通过组合联系通道,需要建立组合通道的数学模型,见图 3^[5-7]。

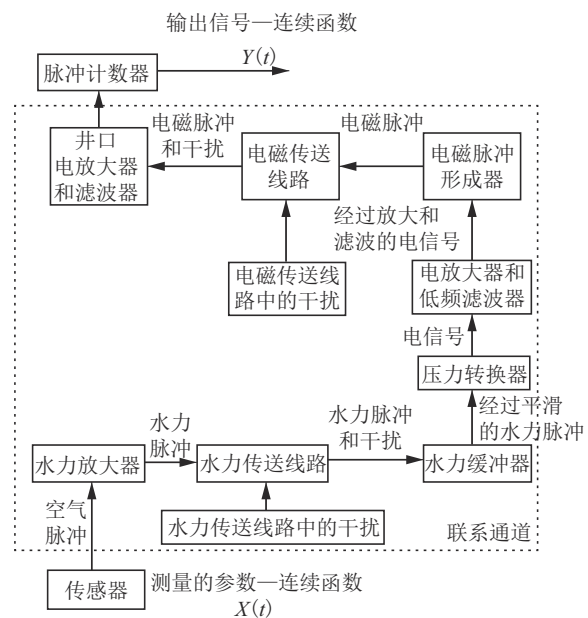


图 3 组合联系通道遥测系统结构框

Fig.3 Framework of remote measure system structure with combination link channel

从图 3 可见,传感器把以任意连续函数 $X(t)$ 形式表示的被测井底参数,转换成为与该参数成比例的频率为 f 的脉冲信号。之所以选择频率型脉冲,

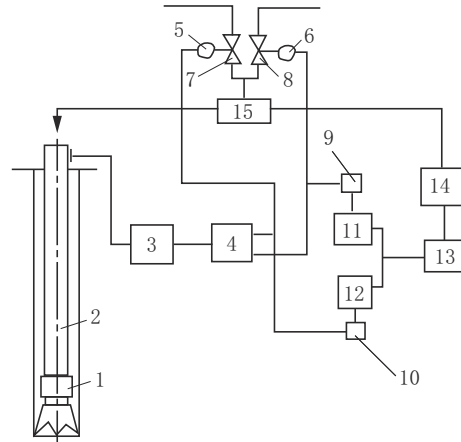
是因为它的抗干扰能力强,装置简单,无需另外的转换器。为了测量超深井钻井过程中的井底参数,建议使用射流元件制作的传感器和机械谐振器。这些器具输出的信号是其频率与被测量井底参数值成比例的连续空气动脉冲,这些气动脉冲作用到水力放大器的拉杆上,水力放大器在钻井液液柱中形成强大的水力脉冲,在水力传送线路中移动。在水力联系通道上有水力干扰存在,与有用信号叠加。为了减小干扰的影响,在压力转换器的前面,置有一个水力缓冲器。压力转换器在输出端有电磁脉冲形式的信号。这个信号被放大和干扰滤波(用低频放大器和滤波器)后,送到电磁脉冲形成器。电磁脉冲形成器把电磁场变化形式的信号,沿着电磁传送路线进行传送。这条线路上有干扰存在,干扰与有用信号进行叠加。在地表上用接收天线接受信号,送到放大器和滤波器,然后,脉冲序列被脉冲计数器转换成所测参数的数值。这样,信息测量通道输入端的 $X(t)$ 就转换成了通道输出端的信号 $Y(t)$ 。

2 冲洗液井底压力控制系统^[10-15]

在钻井过程中,既有地层压力 p_p ,即地层孔隙中的流体压力;又有冲洗液柱形成的静液压力 P_{dh} 。在正常钻进情况下,是用冲洗液柱形成的静液压力来平衡地层压力,以保持冲洗液柱形成的静液压力略大于地层压力的平衡条件下进行钻井的。如果失去平衡,当 $P_{dh} > p_p$ 过多时,会造成机械钻速慢、压差卡钻多,同时在油气井钻进时油气显示不好;当 $P_{dh} > P_l$ 后,将形成井漏或地下井喷。当 $P_{dh} < p_p$ 时,地层流体将向井内流动,形成井涌(或称溢流)。此时,若不及时进行压井作业,使这种流失失去控制,则会形成井喷。如果在地面失去控制,则会形成地面井喷。如果这种流动进入裸露地层,则会形成地下井喷。可见,控制冲洗液井底的压力是非常重要的。

到目前为止,冲洗液井底压力是根据地面仪表所示指标,通过改变水泵性能进行调节的,是不能迅速改变的,因此,不能及时按照地层压力和井底压力平衡原理进行钻井。俄罗斯科研工作者提出了井底冲洗液压力自动控制系统来解决这个问题,其示意图见图4^[10-12]。

这个系统工作过程为:钻进时,钻头和安装在钻头上方的冲洗液井底压力传感器一起下入井内。钻头回转、施加轴载、供给必要数量的冲洗液。系统通



1—冲洗液井底压力传感器;2—联系通道;3—接收器;4—逻辑件;5、6—传动件;7、8—阀门;9、10—地层压力指示器;11、12—调节器;13—供电频率调节部件;14—水泵驱动装置;15—水泵

图4 冲洗液井底压力控制系统示意

Fig.4 Scheme of bottom hole drilling fluid pressure control system

过分析传感器采集的数据来调节井底冲洗液的压力。传感器的信号通过水力联系通道传送给接收器的入口,从接收器的出口传到逻辑件的入口。在逻辑件中,对从传感器中得到的冲洗液井底压力信号与地球物理研究得到的预测正常地层压力和异常地层压力进行比较。从逻辑件出口出来的信号进入阀门的驱动装置的入口,打开相应的阀门。于是,向水泵供给常规冲洗液或在地层压力异常高的情况下供给加重冲洗液。同时,信号从调节器的预测地层压力指示器入口进入相关调节器,在此进行调节,把调节结果供给钻井水泵驱动装置的供电频率调节部件。于是,驱动装置供电频率发生变化,钻头转速变化,与驱动装置连接的水泵出来的冲洗液压力,也根据设定的常规地层压力或异常地层压力的不同,发生相应变化。

根据现代钻井工艺,可以按照地层压力和井底冲洗液压力平衡原理进行钻井,可以利用压制方法,即利用高的井内冲洗液静水压力压制高压地层进行钻进。深井钻进经验证明,地层超高压力和井底冲洗液压力间的压力差大,是井内严重事故(井喷、漏失、卡钻)的主要原因之一,也是回次进尺和机械钻速降低,进而技术经济指标降低的原因。

这个问题之所以能够得到解决,是因为在这个井底冲洗液压力控制装置中,在常规冲洗液和加重

冲洗液供给线上,置有两个阀门及其两个传动装置,还有一个逻辑部件、两个控制件和两个预测地层压力指示器的控制部件,可以通过与预测地层压力比较的办法,保证上述两个阀门的开关转换,保持冲洗液井底压力接近预测地层压力逻辑件确定的平衡压力。同时,可以调节钻井水泵驱动装置和供电频率部件的可调驱动装置,可以在广泛范围内平稳调节这个驱动装置回转速度和与此有关的钻井水泵性能参数,因而保证改变冲洗液供给量和类型(常规冲洗液或加重冲洗液),改变冲洗液井底压力,以满足平衡钻井的需要。

3 冲洗液井底压力控制通道信号的滞后问题^[10-12]

深井钻进技术和工艺是被控制的对象,其特点之一是信号通过调节通道的时间是滞后的,而且可能是滞后很多,从而影响自动控制系统效果的正常发挥,影响技术经济指标的提高,甚至可能导致发生事故,因此,应该对其进行分析并加以解决。

在自动控制系统中,常用传递函数(Transfer function)。传递函数是指在零初始条件下,用线性系统响应(即输出)量的拉普拉斯变换(或 Z 变换)与激励(即输入)量的拉普拉斯变换之比来表示的,即:

$$G(s) = Y(s) / U(s) \quad (1)$$

式中: $Y(s)$ ——输出量的拉普拉斯变换; $U(s)$ ——输入量的拉普拉斯变换。

对于复变函数来说,输入函数为 $x(t)$, 输出函数为 $y(t)$, 则 $y(t)$ 的拉普拉斯变换 $Y(s)$ 与 $x(t)$ 的拉普拉斯变换 $X(s)$ 的商 W 为:

$$W(s) = Y(s) / X(s) \quad (2)$$

称为这个系统的传递函数。

当滞后时间为 300 s 时,冲洗液井底压力自动控制系统的传递函数 $W(s)$ 为:

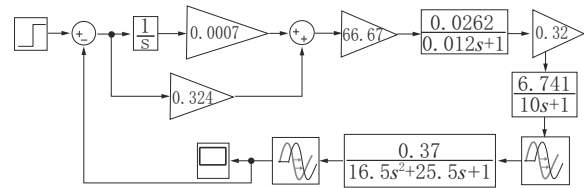
$$W(s) = \frac{0.37}{16.5s^2 + 25.2s + 1} e^{-300s}$$

当控制对象有的滞后性很大时,使用带有 2~3 个调节作用的一般调节器,很难取得好的控制效果。

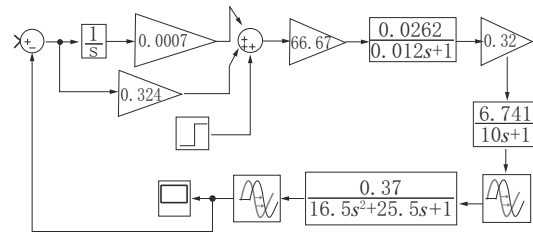
为了顺利实现上述自动控制系统,检验其稳定性和调节质量,使用 Simulink 软件对其进行了处理。

为了分析过渡过程的效果(质量),构建了装有比例积分(PI)调节器、可以得到单回路系统中设计工况及其干扰工况的过渡过程的系统的模型(图 5)。

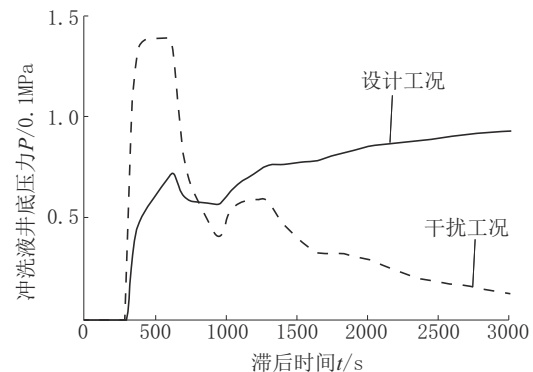
从图 5 分析上述两个过渡过程可见,单回路系



(a) 设计工况条件下的自动控制系统



(b) 干扰工况条件下的自动控制系统



(c) 过渡过程的响应曲线

图 5 单回路井底冲洗液压力自动控制系统及其过渡过程的响应曲线

Fig.5 Automatic control system of bottom hole drilling fluid pressure in single-loop circuit and response curve of its transition process

统不具备有很好的接收性能,稳定性差,不能满足井底冲洗液压力自动控制系统的要求,需要改进。

有几种方法可以改进、提高滞后系统中过渡过程的质量。如果对控制系统中的过渡过程质量要求很高,应该使用可以补偿(排除)纯滞后的专用控制器或算法。史密斯(Smith)调节器就是其中的一种,这种调节器乃是一个闭式系统,由一个普通调节器和一个连接到调节件反馈线路上的调节器组成。推导史密斯调节器模型的过程表明,在期望的传递函数中,没有出现纯滞后的有关内容。所以,在相同调节器调节参数条件下,含有史密斯调节器的自动调节系统稳定性高,控制效果好。

装有史密斯调节器的自动控制系统,在稳定性系数相同的条件下,可以接收更多的工作频率和有

着更大的放大倍数,从而可以保证有更好的调节性能,可以满足井底冲洗液压力自动控制系统的要求。

用Simulink软件处理装有史密斯调节器的自动控制系统,见图6、图7。

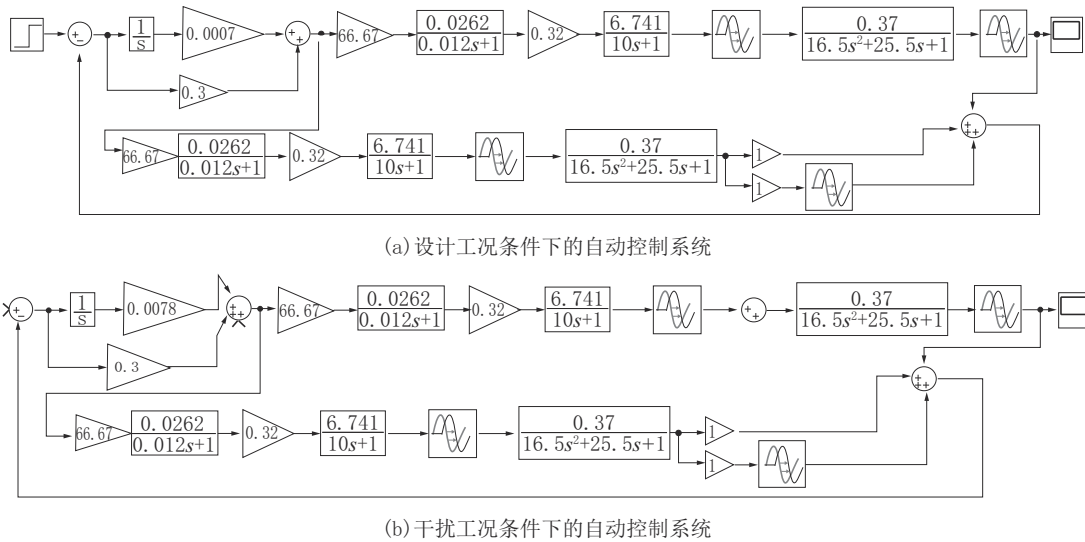


图6 装有史密斯调节器的冲洗液井底压力自动控制系统

Fig.6 Automatic control system of bottom hole drilling fluid pressure with Smith adjuster

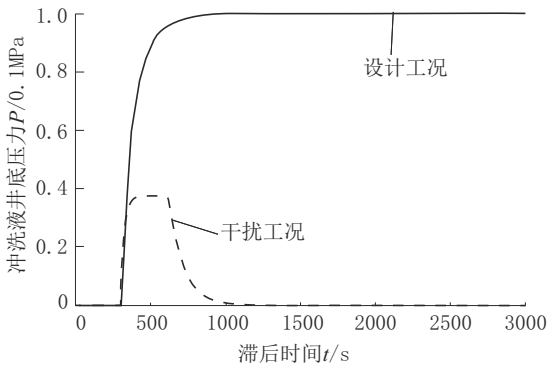


图7 过渡过程的响应曲线

Fig.7 Response curve of the process

通过对比图6、图7和图5,对装有史密斯调节器的深井冲洗液井底压力自动控制系统进行的模拟表明,其过渡过程的质量,无论是在设计工况通道,还是在干扰工况通道来说都是稳定的,都是可以接受的。所以,在设计和研发深部钻进井底参数自动控制系统的实践中,可以采用这种调节模式。

4 分析、讨论与建议

(1)我国计划施工一口深度13000 m的地质特深井,将打破俄罗斯科拉超深井深度12262 m的垂直井深度世界纪录,意义重大,难度也很大。建议做好充分论证和切实准备,精心设计,精心施工,争取

做到旗开得胜,马到成功。

(2)深井钻进中,如何把井底钻进参数准确及时传送到地面,对其进行调节和控制,确定合理的钻进规程参数,取得好的钻进技术经济指标,非常重要。俄罗斯提出组合联系通道方案,值得研究和考虑。

(3)深井钻进中,如何控制冲洗液井底压力,以保证能够进行正常的平衡钻井,避免发生事故,提高钻进效果,需要有一个冲洗液井底压力控制系统。俄罗斯研发的冲洗液井底压力自动控制系统,是俄罗斯的一项近期的发明专利,与过去的控制系统相比有一定的创新性,值得借鉴。

(4)冲洗液井底压力控制系统存在的响应滞后问题,是深部钻进中的一个难题,利用Simulink软件处理,并装有史密斯(Smith)调节器加以解决,为这种系统在深部钻进中的推广使用创造了有利条件。建议有关专家对其进行讨论、研究和跟踪考察,以确定其在我国深部钻进中使用的可行性。

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 Hengyin, 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] 汤凤林,赵荣欣,周欣,等.深部钻进用新型复合片钻头的试验研究[J].钻探工程2023,50(1):39-48.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. Experimental research on a new generation PDC bit used for deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2023,50(1):39-48.
- [5] 汤凤林, Нескоромных В.В., 赵荣欣,等.深部钻进时井底钻头导向系统的分析与建议[J].钻探工程2022,49(6):54-61.
TANG Fenglin, NESKOROMNYH V.V., ZHAO Rongxin, et al. Analysis and suggestion about the downhole bit steering system for deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2022,49(6):54-61.
- [6] 汤凤林,赵荣欣,周欣,等.井底参数新型检测手段设计研究[J].钻探工程,2023,50(2):1-7.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. Research on designing of a new inspect and measure means for bottom hole parameters[J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):1-7.
- [7] 汤凤林,沈中华,段隆臣,等.深部各向异性硬岩钻进用新型金刚石钻头试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):74-79.
TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Experimental research on new type diamond bit for drilling in deep hard anisotropic rocks[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(4):74-79.
- [8] 汤凤林,沈中华,段隆臣,等.关于切削型多节式刮刀钻头的分析研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(6):88-92.
TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Analytical research on cutting type multitierwing bit[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(6):88-92.
- [9] Козловский Е. А. Кольская Сверхглубокая [M]. Москва, Россия: Издальство Недра, 1984.
- [10] Шевченко М. А. Имитационная модель комбинированного канала связи для телеметрии забойных параметров в процессе бурения скважины[C]. 4-ая всеросс. науч.-практ. конф., 2013:136-138.
- [11] Е. В. Есауленко, В. И. Кантемиров, Н. В. Есауленко. Устройство для управления процессом бурения скважин 2728079[P]. Рос. Федерация, МПК E21B44/06, E21B21/08. заявл.10.06.2019; опублик.28.07.2020, Бюл.№2.
- [12] В.Н.Есауленко.Телерегулирование забойных парпметров при бурении глубоких скважин [M]. г. Астрахань, Россия: Издательство «Астрахинский государственный технический университет», 2015.
- [13] В.Н.Есауленко, Н.В.Есаулеко. Частные датчики в бурении [M]. г. Астрахань, Россия: Издательство «Астрахинский государственный технический университет», 2012.
- [14] В. Н. Есауленко, Н. В. Есаулеко. Аэродинамические измерительные преобразователи для телеметрии забойных параметров при бурении скважины[M]. г.Астрахань, Россия: Издательство «Астраханский государственный технический университет», 2010.
- [15] 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.
- [16] В.Н.Есауленко, А.М.Дегтярева, Н.В.Есауленко. Устройство для измерения зенитного угла искривления ствола скважины: 2285797[P]. 2006-10-20.
- [17] В.Н.Есауленко, А.М.Дегтярева, Н.В.Есауленко. Устройство для измерения зенитного угла искривления ствола скважины: 2349750[P]. 2009-03-20.
- [18] В.Н.Есауленко, А.М.Дегтярева, Н.В.Есауленко. Устройство для измерения температуры вскважине: 2381361[P]. 2010-02-10.
- [19] В.Н.Есауленко, А.М.Дегтярева, Н.В.Есауленко. Устройство для определения параметров искривления в скважине: 2468201[P]. 2012-11-27.
- [20] Шевченко М.А. Датчик азимута искривления скважины[J]. Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2011(7):2-3.
- [21] Шевченко М. А. Применение струйных элементов для коммутации датчиков скважинной телеметрической системы [J]. Нефтяное хозяйство, 2013(11):124-126.

(编辑 王文)