

井下控制工程学研究进展

苏义脑 等著



PIP
PETROLEUM
INDUSTRIES
PRESS

石油工业出版社

井下控制工程学研究进展

苏义脑 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

井下控制工程学是研究油气井井下控制技术及其基础理论的一门新兴学科分支。井下控制高新技术是当今国际油气行业中正在蓬勃发展的前沿技术。本书汇集了作者十余年来在井下控制工程学方面的 29 篇学术论文和七项专利说明,内容涉及对井下控制工程学的学科框架、基本概念、井下控制系统理论模型、控制系统及控制机构设计方法的探讨,以及对几种典型控制工具的开发设计,集中反映了作者在这一领域的探索性研究成果。由于书中的多数论文系首次与读者见面,因此在某种意义上也代表了我国当前在这一领域的研究现状。

本书可供从事井下控制的研究人员、产品设计人员、大专院校相关专业研究生、青年教师和高年级本科生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

井下控制工程学研究进展/苏义脑 等著.

北京:石油工业出版社,2001.3

ISBN 7-5021-3304-6

I. 井…

II. 苏…

III. 油气钻井-控制方法-文集

IV. TE28-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 11251 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京施奈德自动化录入排版中心排版

北京密云红光印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 14.125 印张 360 千字 印 1—1000

2001 年 3 月北京第 1 版 2001 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3304-6/TE·2478

定价:28.00 元

前 言

这是一本论文集，是一本反映笔者及其同事们在“井下控制工程学”这一新的钻井技术领域内，多年来从事探索研究所取得的部分成果的汇集。

忆往昔峥嵘岁月稠。12年前，即1988年，在从事国家“七·五”重点科技项目“定向井丛式井钻井技术研究”攻关的后期，为了提高井眼轨道的控制水平和质量，我们产生了把工程控制论引入石油钻井工程，实现航天制导与钻井轨道控制结合的想法，从而提出了“井眼轨道制导控制理论与技术”这一新的研究方向，寄希望于“井下闭环控制”和“用手段解决问题”。开始的路走得艰难而又谨慎，从问题性质的判断到新概念的引入或建立，从对新领域内涵的思索和界定到一系列研究课题的分解，从系统模型、方程、边界条件的推演和确定到某项专利方案的构思和设计，无不伴随着反复的徘徊、反思、自我诘问和自我验证，并且基本上是以“业余”方式进行和完成的。1991年末，当从技术消息报导中发现国外一些同行也在或开始在致力于这一方向的研究并也采用了“Closed Loop Control”的思路和提法，这使我们进一步坚定了继续前进的信心。

1993年前后，在前几年探索工作的基础上，考虑到油气井各种工艺环境的共性及都存在控制问题的普遍性，我们又把研究对象从钻井轨道控制进一步扩展到各种井下工艺过程，把认识从对具体问题的研究提高到对理论与技术体系乃至学科分支的考虑，于是产生了“井下控制工程学”这一提法。这应是在这一新方向研究中的第二个阶段的起点，屈指算来也已经七年过去了。

关于“井下控制工程学”的若干基本问题，我曾在“正在兴起的井下控制工程学”一文中做过介绍，发表于1995年3月20日的《中国科学报》，该文此次也收入本文集中。

1995年，“井眼轨道遥控技术研究”被立为中国石油天然气总公司的“九·五”前沿技术攻关项目。这一重大举措在很大的力度上推动了井下控制工程研究的进展。

1997年11月，中国石油工程学会钻井基础理论学组在讨论钻井专业学科方向时，第一次把“钻井控制工程”列为油气钻井工程的新分支。

今天，在新世纪的开端，鉴于国外和国内在这一新领域内所取得的不断进展，越来越多的人对这项被誉为“21世纪的钻井新技术”开始取得共识并寄予厚望。

但是，毫不讳言，它还是一项发展中的技术，还处在童年时期，还远远没有臻于完善。等待我们的是大量要做的工作，前进的路上还要洒下更多的汗水。

这本文集所收集的文章内容，包括我们对“井下控制工程学”这一新分支的基本问题与体系框架的粗浅认识，也包括对其应用理论基础（井下系统动力学与可控信号分析方法）和对其技术基础（井下控制系统与机构设计学）的初步探讨，还包括对一些产品开发（及专利设计）方面的初步尝试。在收入本书的30多篇文章及专利中，除近三分之一的文章过去公开发表过外，其他均为新作，在本书中首次同读者见面。结集出版本书，旨在抛砖引玉，以期加速我国在这一新方向上的进展步伐。但由于这是一片刚刚开拓和尚待进一步开拓的、难度较大且诸多学科交叉的领域，更因为笔者水平所限，因此难免一孔之见，甚至不乏错讹之处。笔者盼望同行专家不吝赐教，我们诚恳听取来自各方面的批评和教诲。

作者由衷地感谢中国石油天然气集团公司有关部门、中国石油勘探开发科学研究院及其钻井所的很多领导和专家，他们对本书的写作给予了热情鼓励 and 大力支持。除本书的其他合作者外，在本书的编写过程中，张润香、杨小珊、杨德凤等同志帮助做了大量的文图整理工作，笔者在此谨向她们致以诚挚的谢意！

苏义脑

2000年6月于北京

目 录

关于井眼轨道控制研究的新思考	苏义脑	(1)
正在兴起的井下控制工程学	苏义脑	(7)
井下控制工程学的学科框架与基本问题	苏义脑	(9)
有关井眼轨道自动控制系统的几个特殊概念	苏义脑	(13)
建立在百年发展基础上的重大进步	苏义脑	(18)
地质导向钻井	苏义脑 周煜辉	(23)
新发明——自动井斜角控制器的原理及应用	苏义脑	(27)
起下钻时的钻柱和液柱系统纵向振动过程分析	苏义脑 季细星	(30)
井眼轨道自动控制系统设计的几个基本问题	苏义脑 梁 涛	(35)
正排量控制信号机构的设计与计算方法	苏义脑	(42)
可控结构弯角类井眼轨道自动控制系统的分析与综合方法研究	苏义脑 梁 涛	(47)
带有可调弯壳体螺杆钻具的井眼轨道自控系统仿真设计与结果分析	苏义脑 梁 涛	(58)
模糊控制在带有可调弯壳体螺杆钻具的井眼轨道自动跟踪分系统中的应用	苏义脑 梁 涛	(63)
井眼轨道遥控系统的研究	苏义脑 王珍应	(68)
井下控制器的初步研究	苏义脑 董海平 王珍应	(77)
井下变角机构的分析与设计问题	苏义脑 梁 涛	(85)
遥控型井下可调弯壳体的原理及应用	苏义脑 梁 涛	(90)
用于井下控制的销槽机构的运动分析与结构设计	苏义脑 梁 涛	(94)
井下闭环控制执行机构液控组合阀的研制及应用	苏义脑 梁 涛	(99)
井筒中的信号传输系统及其传输特性分析	刘修善 苏义脑	(104)
泥浆脉冲信号的传输速度及其影响因素分析	刘修善 苏义脑	(110)
钻井系统井下锥直喷嘴流量系数的实验研究	苏义脑 王家进	(117)
中空螺杆钻具的外特性及其改进	苏义脑 王家进	(123)
自动垂直钻井工具的设计及自动控制方法	苏义脑 李松林 葛云华	(131)
自动垂直钻井工具的井下控制器的研究和设计	苏义脑 董海平 李松林	(137)
用于井下闭环控制的开关控制、自适应控制与模糊控制方法研究	苏义脑 李松林	(144)
一种重力信号发生机构的理论分析和实验研究	苏义脑 刘英辉	(155)
用于井下控制的跟随机构的设计及工作特性分析	苏义脑 刘英辉	(160)
自动旋转导向系统井下可控稳定器导向集中力的控制原理及方法	苏义脑 李松林	(166)
“自动井斜角控制器”发明专利说明书	苏义脑	(173)
“排量控制式变径稳定器”专利说明书	苏义脑 张润香	(181)
“具有稳流阀的中空转子螺杆钻具”专利说明书	苏义脑 王家进	(187)

“遥控型井下可调弯壳体螺杆钻具”专利说明书·····	苏义脑	窦修荣 (191)
“液控组合阀”专利说明书·····	苏义脑	窦修荣 (197)
“遥控式机液型井下降斜工具”专利说明书·····	苏义脑	刘英辉 (206)
“机电液一体化自动垂直钻井工具”专利说明书·····	苏义脑 李松林	盛利民 (213)

关于井眼轨道控制研究的新思考*

苏义脑

摘 要 井眼轨道控制理论和技术是石油钻井工程的基础和关键。随着定向井、丛式井和水平井的发展,井眼轨道控制难度不断增加。当前面临的一个重要问题是如何开展进一步的理论研究,如何把现有的理论成果转化为实际控制手段,以提高控制精度和降低钻井成本。本文简单回顾了井眼轨道控制理论和技术的发展过程,综述了当前的技术现状和需要解决的问题,在此基础上,用控制理论观点对井眼轨道控制研究进行分析和思考,并对今后的研究方向作了展望。

主题词 钻井工程 井斜控制 遥控 自动控制

1 前言

井眼轨道控制理论和技术是石油钻井工程成套技术中的关键环节。几十年来,它一直是钻井工程研究领域中的一个重要分支。随着世界石油勘探开发的进展,特别是由于近些年来研究和推广定向井、丛式井和水平井技术的需要,井眼控制理论和技术更日益引起各国石油界的极大关注。中外不少石油公司的科研部门均投入大量的人力物力,开展理论研究并研制和开发实用的硬件(工具、仪器)与软件系统,已取得明显的技术进步。但实际上,这项理论和技术至今还不完善。目前还不能在长距离上十分准确地预测井身轨道,控制效果也未能尽如人意。

对现有的这方面的理论研究成果,如何使之变成实钻过程中的有效控制手段?今后,井眼轨道控制理论和技术将会如何发展?应把进一步研究的重点放在何处?对传统研究方法是否有改进和更新的必要?这些都是井眼轨道控制研究人员需作思考并回答的问题。为此,对井眼控制理论和技术的发展过程进行简单回顾和总结,以便于正确认识当前的技术现状、展望未来发展趋势和把握研究方向。

2 影响井眼轨道的四类主要因素

影响井眼轨道的四类主要因素可分为下部钻具组合结构、已钻井眼的几何形状、钻井工艺参数、地层特性四类。

2.1 下部钻具组合的结构

(1)BHA 类型(是转盘钻还是动力钻具);(2)钻头类型(是牙轮还是刮刀、金刚石或 PDC 钻头);(3)稳定器的个数与外径;(4)各跨长度和刚度;(5)弯接头安装位置和弯角大小等。

* 本文写于 1992 年 4 月,发表于《石油学报》,Vol. 14, No. 4, 1993.

2.2 已钻井眼的几何形状

(1)井斜角和井斜变化率;(2)方位角和方位变化率;(3)井眼直径等。

2.3 钻井工艺参数

(1)钻压;(2)转速;(3)工具面角等。

2.4 地层特性

(1)地层产状要素(地层倾角、走向);(2)岩石各向异性;(3)岩石类型与强度参数等。除上述各种因素外,井壁不规则形状造成的钻柱与井壁的接触状况、水力参数不同造成的井底清洁状况差异以及其他随机因素也会对井眼轨道产生影响。因此,井眼轨道控制是受多因素影响的一个系统控制过程。

3 井眼轨道控制研究的简单回顾和技术现状

从 50 年代初至 70 年代末,井眼轨道控制研究的重点是对 BHA 的受力变形分析,取得了许多重要成果,促进了井眼轨道控制技术的发展。其主要特征是:

(1)求解方法的多样性。有四类基本方法分别为微分方程法^[1]、能量法、有限元法和纵横弯曲法^[2, 3];

(2)研究问题的层次不断深入和扩展。由一维分析发展到三维分析,由静态分析发展到动态分析;

(3)计算工具的变革(几乎所有的解法都采用计算机程序,取代了过去的查数表、图版的方法)。

此外,在这一时期还进行了地层因素对井眼轨道影响的初步探讨^[3]。

在这一时期,促进轨道控制技术迅速发展的重要原因还有硬件技术(即测量仪器与钻井工具)进步。单点、多点测斜仪的出现和普及推广,明显提高了轨迹测量的准确性,淘汰了“氟氢酸瓶”测量方法;螺杆钻具的出现,克服了转盘钻与涡轮钻具的局限和缺点,降低了定向造斜和扭方位操作的难度,从而促进了定向井和丛式井技术的迅速发展。这为今后井眼轨道控制技术的进一步发展提供了重要启示。

自 80 年代以来,井眼轨道控制理论和技术发展很快,主要有如下特征:

(1)BHA 受力变形分析方法进一步完善和发展,有些分析模型还演化出多种不同的数值解法;

(2)开始较多地探索地层因素对井眼轨道的影响,提出了多种定性理论和定量计算模型^[2,4,5];

(3)研究钻头的各项切削异性和钻头对岩石的侧向切削问题^[2,4,9];

(4)较普遍地开展对井眼轨道预测的研究,提出了多种不同的预测理论和方法^[2,4,6,7];

(5)多功能软件包开始用于井眼轨道控制实践,并取得一定效果。

特别值得提出的是,在这一时期发展起来的随钻测量仪 MWD、PDC 钻头和导向动力钻具(Steerable Motor),被誉为 80 年代国际钻井工程的三大新技术。它们与电子计算机软件技术(软件包)结合组成了导向钻井系统,目前已广泛用于定向井的连续控制作业和水平井的钻进

过程,可提高轨道控制精度和机械钻速,较大幅度地降低钻井成本。

但是,井眼轨道控制还面临一些问题和难点,需要在进一步的理论研究和实践中加以解决:

(1)多种 BHA 受力分析变形模型均建立在一些简化假设基础上,如“井眼内壁为规则光滑的圆柱体”,但实际上井壁并不规则,这就影响钻柱与井壁的接状况可能影响侧向力的计算值;又如,一些 BHA 的动态力学分析虽然考虑了扭矩和钻压变化的影响,但其简化载荷频谱与实际情况尚有差距;另外,BHA 受力分析模型的一些输入参数仅具有名义性质(如钻压、扭矩等,目前一般均用地面指重表上显示的钻压与转盘扭矩代替。但在定向井、水平井中,由于摩阻问题突出,钻头上的实际钻压和扭矩与其名义值相差甚远),这就必然影响钻头侧向力的计算结果。严格地说,每种模型和方法求出的侧向力都只有名义性质。

对当前几种理论计算模型的分析结果仅能相互比较和相互验证;直至目前,钻井界还未直接从井下实测到钻头侧向力的真实值。

(2)确定地层岩石各向异性指数的模拟实验与实际的井下岩石状况存在一定差异,如围压情况、岩石各向均匀连续假设,等等。此外,一些测定钻头横向切削指数的实验装置因未消除摩擦力的影响也使计算结果产生系统误差。

(3)现有的控制方式基本上是依靠 BHA 的受力分析来确定所用的钻具组合。一旦钻具组合下井,整个钻井系统的特性大体已经确定,所能进行的只是局部调控,如变更钻压、改变转速或调整工具面。如果对 BHA 的力学特性估算不准,或因地层和其他随机因素的影响造成实钻轨道较大地偏离设计轨道时,则必须更换钻具组合。尤其是对轨道要求严格的薄油层水平井,往往需要频繁起下钻更换钻具组合,导致钻井成本增加。

4 由控制工程对井眼轨道控制技术的再认识

综上所述,井眼轨道控制技术所要研究的对象是一个多目标的、具有多种干扰因素的复杂系统。在钻井工程发展初期,该系统堪称是黑色系统。随着多方面理论的开展(包括 BHA 分析、地层作用分析、钻头分析等)。在一定程度上提示了该系统内某些参数之间的相互联系与作用机理,增加了系统透明度。就目前的认识水平来看,该系统尚属灰色系统。

控制理论中控制的定义[1,10],是指被控制对象中某一(某些)被控制量,克服干扰影响达到预先要求状态的手段(或操作)。也就是说,控制是一种手段(或操作),目的是克服干扰使被控制量达到要求状态,而干扰就是指一切破坏被控制量达到要求状态的因素。控制可分为人工控制和自动控制,前者是由人工完成的,后者是靠机器装置自动实现的。自动控制系统多设有反馈环节,构成闭环回路,控制方法按偏差原理进行。在人工控制系统中,没有反馈环节,形成开环控制,检验偏差和纠正偏差是靠人工(包括测量仪器)完成的。

目前的井眼轨道控制系统是一个开环的人工控制系统(图 1)。其有关术语的具体内容为:

控制对象——钻头;

被控制量——井斜角和方位角,或井斜变化率和方位变化率;

给定量——最大井斜角、闭合方位角、规定靶区和给定的岩性分布;

操作量(控制量)——BHA 结构、钻压 P_B 、转盘转速 N 、排量 Q 和工具面角 Ω 等;

扰动量——地层产状误差、井壁不规则性、岩石不均质性、岩性分布变化、井底工况及其他

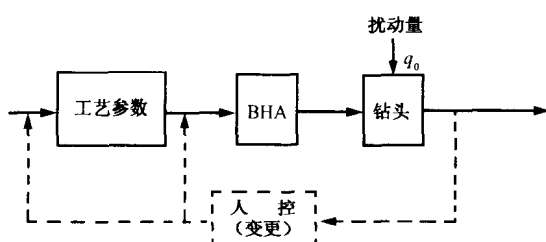


图1 井眼轨道控制系统示意方块图

随机因素(如井塌、断层等)。

与自动控制相比,当前的井眼轨道控制方法缺少一个自动的检测、反馈、调整环节,而是由人来分析测斜仪器(单点或随钻测斜仪器等)的读值,从而确定控制策略,即如果可通过人工调整工艺参数(p_B 、 N 、 Q 、 Ω)而达到控制目的,则优先实施,这意味着系统状态的调整;否则,应起钻变更 BHA,这意味着系统结构的

变动,但随之导致钻井周期加长和钻井成本增加。

当下井钻具组合的实际特性与设计要求不相符合,或在钻井过程中其特性发生了不符合要求的变化(如稳定器外径磨损而使增斜组合变成降斜组合)时,在当前的技术条件下,就应该起下钻变换下部钻具组合。这是由于目前的 BHA 只具有固定结构,在钻进过程中不能进行结构调控所致。如果 BHA 具有可调控结构,而人工在地面遥控调节或在井下根据反馈信号而自行调节,则必然会带来井眼轨道控制技术的重大变革。

因此得出如下几点认识:

- (1)井眼轨道控制是一个多目标、多扰动的复杂动态控制过程;
- (2)各个环节上的简化理论模式在实用过程中均有一定的系统误差;
- (3)大量的干扰量会在不同程度上放大理论模式产生的系统误差;

(4)对于当前这一存在大量的不确定性干扰量的灰色系统,增设系统中的反馈环节以实现动态控制,或在系统中增设可调机构以采用人工开环遥控,这些技术措施可能要比仅通过分析和实验来进一步细化理论模式、以求把灰色系统变成白色系统更为直接、有效和经济。

5 井眼轨道控制理论与技术发展展望

如上所述,增加 BHA 的可调特性,在井眼轨道控制系统中增设反馈环节,将会对提高控制精度、降低钻井成本起到关键作用,这可能成为今后井眼轨道控制技术的重要研究方向。

5.1 增加 BHA 的可调环节,实现开环遥控

这方面的研究实际上已在进行,地面遥控可变弯接头即为一例。它可以改善钻具组合的起下通过性能,减少阻卡;更重要的是通过遥控改变弯接头的弯角值,以调整造斜率。

另一例是可变径稳定器的设计研究。其基本原理是利用 BHA 的分析所得出的重要结论:稳定器的位置和外径显著影响造斜率,甚至可以改变 BHA 的类型(如由增斜组合变为降斜组合,或由降斜组合变为增斜组合)。就控制信号而言,目前有利用钻压、控制和利用排量控制两类。根据井眼轨道的测量结果,可按需要在井口发出遥控信号以改变可变稳定器的外径大小,从而使 BHA 变成所要求的增斜或降斜组合。这种控制方式从整体上降低了 BHA 对计算条件和地层因素的变化及随机因素等多种干扰的依赖程度,从而钻出比较合适的井眼轨道。

国外正在研制的遥控自进式钻井系统(即 Kolibomac 计划)也可作为开环遥控的一个例子。

5.2 增设特殊装置,实现闭环控制

在BHA上连接经特殊设计的装置,增加BHA系统反馈环节,实现对某一钻井过程中既定目标的自动闭环定量控制。例如笔者设计的“自动井斜角控制器”(已申报国家发明专利)即属此类。

自动井斜角控制器由信号发生机构、信号传递和执行机构组成短节,装在钻头上方,用于水平井水平段和定向井稳斜段的井斜角控制。它可以把所钻井段的井斜值控制在标定值范围以内,从而进一步精确控制了水平段的波动高度,可用于钻薄油层和超薄油层,可以在钻进过程中去掉测斜仪器,节省租用MWD的高额租金或用单点测斜的大量时间,显著降低钻井成本。使用自动井斜角控制器,可吸收BHA、地层、钻井操作参数所带来的各种误差,对既定井斜值实现较精确的定量控制。

在国外,用于深井井斜控制的VDS-3系统(KTB计划)是闭环自控的一个实例。

5.3 井眼轨道的计算机控制

国外曾提出一种设想[8],即在导向钻具和MWD的基础上,实现井眼轨道的计算机控制。用装在井下仪器内的微机元件采集和处理实钻轨道参数,并与预先输入的设计轨道比较,根据误差信号驱动造斜机构使实钻轨道回到设计轨道。该系统通过某种遥测线路与地面实现双向通讯。但是目前还存在很多技术难点需要进行攻关。这种设想为钻井自动化研究提供了远景和目标。

6 几点认识

(1)对于存在大量干扰因素的井眼轨道控制灰色系统,增加控制手段(新型遥控或自控工具、检测仪器)比进一步把该系统完全转化成白色系统的理论研究可能更为实际和有效;

(2)考虑到成本最低这一目标,井眼轨道控制应属最优控制问题,系统可以是开环的,也可以是闭环的;

(3)发展开环遥控或增设反馈机构以实现闭环自控,是今后井眼轨道控制研究中的重要课题。对遥控工具和自控工具系统的理论分析,将构成井眼轨道控制理论的新内容。

参考文献

- [1] 钱学森,宋健. 工程控制论(上、下册). 北京:科学出版社,1980
- [2] 白家祉,苏义脑. 井斜控制理论与实践. 第一版,北京:石油工业出版社,1990
- [3] 白家祉. 应用纵横弯曲连续梁理论求解钻具组合的受力与变形. 国际石油工程会议文集,北京:(SPE10561),1982.3
- [4] H-S. H O. Prediction of drilling trajectory in directional wells via a new rock-bit interaction model. SPE 16658, 1987
- [5] 苏义脑,白家祉. 定向井轨道控制中的地层力分析与验证. 石油学报,1991.12(3)
- [6] 苏义脑,周煜辉. 定向井井眼轨道预测方法研究及其应用. 石油学报,1991.12(3)
- [7] 苏义脑. 井斜和方位的自适应跟踪预测法. 石油钻采工艺,1991.13(1)
- [8] Inglis T A. Directional drilling. by graham and torman 1987

- [9] Millheim K K and Warren T. Side cutting characteristics of rock bits and stabilizer while drilling. SPE 7518
- [10] 季新宝. 自动控制理论基础. 上海: 上海科技出版社, 1987

正在兴起的井下控制工程学*

苏义脑

为了满足对石油的日益增长的需要,石油勘探和开发面临着更为艰巨的任务。今后必须投入更多的资金去寻求新的原油储量;必须开展一系列的科学研究,去进一步提高已探明储量的采收率;必须采用多种高新技术,提高钻井的成功率,增加原油产量,降低生产成本。

油井是获取原油的通道。在石油开采中,很多工程问题,如勘探、钻井、完井、测井、采油、修井等均与油井有关。各种井下生产与作业过程均普遍存在控制问题。但由于油井的下述特殊性:(1)油井是一个细长孔,从地表开始向下其长度一般可达数千米,但直径往往在百米以内。由于人无法抵达井底并参与操作过程,因此这种控制问题表现为遥控或闭环自动控制方式;(2)井下存在多种工作媒体。以钻井为例,井下存在固体(钻柱)和液体(钻井液),实际工作过程中的钻井液又是由非牛顿流体、固相颗粒、甚至气泡(在泡沫钻井条件下)组成的多相介质。由多体耦合作用下的井下系统具有十分复杂的物理特性;(3)工作环境条件恶劣。以钻井为例,钻柱工作在高温、高压、强振和有腐蚀的条件下,因此在地面控制设备中可以使用的元器件和控制技术经常无法直接应用于井下控制问题。

由于上述特点,当前井下的很多控制工具还未达到遥控或闭环自动控制的程度。控制精度不能尽如人意。以钻井为例,井眼轨道的方向控制(井深、井斜和方位)是钻井成套技术的关键环节。目前的井眼轨道控制技术是以一套经验理论计算确定的结构不变的钻具组合为基础。当其设计特征与实际要求不相符合时,只有靠人为控制起钻更换钻具组合。这种阶段性的而非适时的人工控制和结构固定而不能根据需要进行调整的钻具组合,一方面容易造成实际轨道严重偏离设计轨道,另一方面加长了钻井辅助时间,增加了操作者的劳动强度,提高了钻井成本。

生产斗争的需要推动着科学技术的发展。实践表明,上述那种井下系统的控制方法、控制工具和手段已经不能满足日益发展的勘探开发的需要。以钻井为例,施工难度不断增加的钻井过程(如各种特殊工艺井、超薄油层中的水平井等)不仅局限于要求实钻轨道能实现准、精、快、省的几何导向控制,使之尽量靠近预先设计的理论轨道,而且要求能给钻头装上“眼睛”,使之能够识别油层,即实现地质导向,可根据油藏目标来适时修正设计轨道和调整实钻轨道。这些特殊的控制要求突破了传统的控制方法的局限,导致了石油工程研究中一个新的学科分支,即“井下控制工程学”的诞生。

井下控制工程学是工程控制论与钻井工程等井下作业问题相结合的产物。从国内外的研究情况来看,这一新的学科分支是从 80 年代末期研制井眼轨道制导系统起诞生和迅速发展起来的新学科,到目前也只有短短的几年时间,但已显示了强大的生产力和广阔发展前景。这一新的学科分支的研究对象是井下各种作业过程中的控制问题,如钻井、取心、完井、采油、修井、井控等等,使之达到遥控和自动控制水平,提高控制精度,降低作业成本。它是横跨在现有石

* 本文发表于《中国科学报》,1995.3.20.

油工程中与井有关的诸多专业之间的一个新分支学科。

这一新的学科分支的理论基础是井下系统动力学和控制信号分析理论。由于井下系统是一个多体耦合作用的复杂系统,必须建立一系列的理论模型,来描述井下系统的动力学特性,以确定一些重要物理参数(如速度、加速度、应力、位移、流速、压强、振幅、频率等等)的分布规律和变化特性,即建立井下系统动力学的基本理论。对于井下系统的控制信号,具有一定的特殊要求,必须研究其动态分析方法和发生、传输过程,确定其动态品质和稳定性指标,进一步用于对控制信号进行优选。

这一新的学科分支的技术基础是井下控制机构设计学,对适用于井下控制的各种实用控制信号,要设计出相应的信号发生、传输和放大、执行机构、确定这些信号机构的典型结构,并建立各种不同类型信号控制机构的结构库和特性仿真库,以达到模块化的设计水平。

这一新的学科分支的应用目标是要研制和开发不同井下作业过程所需要的各种控制工具 and 控制系统,以解决实际生产问题。它是井下控制机构设计学的综合应用,由于产品开发的多样性和实用性,决定了井下控制工程这一分支必将具有重大的经济效益和社会效益,并可望以此为基础形成新的一种高新技术产业。

相应的实验室是井下控制工程学的依托和基础。由于理论分析结果需要进行实验验证,设计中的关键结构参数有时要靠实验加以确定,所以在井下系统动力学的理论研究和信号分析研究中,在井下控制机构设计学研究和产品开发中,实验研究具有不可忽视的作用。井下控制工程实验室实际上也是这一新的学科分支的重要组成部分。

井下控制工程学是一个多学科的交叉应用技术领域。以其中的一个实用系统即井眼轨道制导系统而言,它以钻井和油藏工程为对象,以控制为目标,以力学为基础,以机械为主体,以泥浆为介质,以计算机为手段,以实验为依托。井下控制工程学的建立,涵盖了各种井下作业过程的控制问题,可把控制水平提高到一个新的台阶。就应用范围而言,它不单适用于石油工程的井下问题,而且也适用于地球物理钻探、地热钻井及用于其他各种特殊目的的钻井问题,因此具有显著的经济效益和广阔的应用前景。

在短短的几年中,井下控制工程学研究已取得明显的发展,以钻井为例,除我国之外,国际上已有 5 个国家的 10 余家公司在竞争研制井眼轨道自动导向控制系统。西方某经济大国把参与这一领域内的竞争提高到“战略性和社会重要性”的高度来认识,制订计划,由国家能源部牵头负责,投入巨额资金,自 1995 年开始实施。完全可以预言,井下控制工程学这一新的学科分支是 21 世纪的一门高新技术,它将对下世纪的石油井下工程,对石油的勘探和开发生产,产生重大的影响。

井下控制工程学的学科框架与基本问题

苏义脑

摘 要 井下控制工程学是九十年代初提出的一门新的学科分支。它是工程控制论与油气井井下问题相结合的产物,可作为油气井工程的一个下属新分支学科。本文在简述该分支学科的性质、研究对象、研究目的、发展过程、学科特点的基础上,提出了井下控制工程学的学科框架,并进一步阐述了在理论研究方面要解决的主要内容和问题。

主题词 油气井 井下控制工程学 组成 基本问题

1 井下控制工程学的若干基本问题

在提出一门新的分支学科时,提出者必须回答有关的若干基本问题,如:该学科的定义、性质、研究对象和目的、学科特点、提出这一分支学科的学术和技术背景等;还要描述这一学科的基本框架即组成结构,并提出这一学科要研究的重要内容等。

对于“井下控制工程学”这一油气井工程学科中的新学科分支,当然也应如此。本文将回答和阐述以上的基本问题。

1.1 什么是“井下控制工程学”

井下控制工程学是用工程控制论的观点和方法,去研究和解决油气井井下工程控制问题的有关理论、技术手段的一个新学科分支。

它是油气井工程井下作业问题与工程控制论相结合的产物,是一个多学科的交叉应用技术领域。

它可以作为油气井工程下属的一个新学科分支。从工程性质上看,它涉及到钻井、完井、试井、测井、采油、修井等一切与油气井井下作业有关的施工作业过程;从控制方式上看,它涉及到开环遥控和井下闭环自控。

1.2 研究对象、目的和性质

井下控制工程学的研究对象是涉及油气井井下各种作业过程的所有工程控制问题。

其研究目的是从理论上认清井下控制问题的物理性质和控制过程的基本规律,从实践上开发和提供行之有效的控制系统、工艺和手段,从技术上、经济上最优地解决有关工程问题。

油气井的特殊结构和井下恶劣工况决定了井下控制问题的难度、复杂性和特点。因此,也决定了井下控制工程学这一分支学科的研究性质:它是一个理论性和实践性都很突出的多学科交叉的应用技术领域。

1.3 井下控制工程学产生的学术与技术背景

在一百余年来的近代和现代油气井施工作业过程中,井下控制问题一直是一个客观存在。

作为控制,必不可少要涉及到信息的采集传输和井下的执行工具(机构)。在这些环节上早期的研究和开发活动应是井下控制工程的萌芽和起源。例如:在测量仪器方面,国外在七、八十年代推出的有线随钻测斜仪和无线随钻测斜仪(MWD);在执行工具上,国外于70年代末推出的遥控可变弯接头和80年代后期推出的遥控变径稳定器。

上述这些例子可作为在井下控制问题研究中的初级阶段。其理由是:(1)井下执行工具一般是开环遥控的;(2)仪器和工具各自分离,还未组成完整的闭环控制系统。

八十年代末期和九十年代初期,井下控制问题开始向闭环化、系统化发展。美、法、英、挪威、德国等5个国家、8家公司先后开始研制用于井眼轨道自动化控制的实际系统。在1993年于挪威召开的第13届世界石油大会上,开始提出了“智能钻井”的说法。

我国在这一新阶段的研究工作开始于1988年。当时,在未见到国外此类研究工作信息的情况下(由于技术保密的原因,国外在上述新系统研制开发方面的最早报导始见于1991~1992年),我们于1988年提出“井眼轨道制导理论与技术”的研究新方向,尝试把工程控制论引入钻井工程,力图将已成功用于航空、航天的制导技术加以移植来促进井眼轨道控制技术的发展;在1988~1990年,先后完成了这一方面的可行性研究、概念性设计和课题分解,把这一领域的研究划分为基础研究、产品开发和实验方法三部分,并完成和申报了“自动井斜角控制器”发明专利。

鉴于国外在这一领域的研究集中在几种系统的产品开发,而产品的深层开发需要基础理论和设计方法的指导;同时也鉴于这些产品都局限于钻井过程中井眼轨道的自动控制,而这些原理和方法可扩展到井下其他作业过程的控制问题并用于相关新的工具系统的开发,所以在上述工作的基础上,1992~1993年我们提出了“井下控制工程学”这一新的分支学科,并在1997年中国石油工程学会钻井基础理论学组会议上,被列为“油气钻井工程”的一个新分支。

1.4 井下控制工程学的学科特点

如上所述,井下控制工程学是集理论研究、产品开发和实验室研究于一体的应用性技术领域。多专业多学科的交叉是其主要特点。笔者曾以下面的几句话概括地归纳其主要特征,即:“以井下为对象,以控制为目标,以力学为基础,以机械为主体,以泥浆为介质,以计算机为手段,以实验为依托。”

2 井下控制工程学的学科框架

作为一个新的学科分支,井下控制工程学由以下四个基本部分组成:

2.1 理论基础——井下系统动力学与控制信号分析理论及方法

这一新的学科分支的理论基础是井下系统动力学和控制信号分析理论。由于井下系统是一个多体耦合作用的复杂系统,必须建立一系列的理论模型,来描述井下系统的动力学特性,以确定一些重要物理参数(如速度、加速度、应力、位移、流速、压强、振幅、频率等等)的分布规律和变化特性,即建立井下系统动力学的基本理论。对于井下系统的控制信号,具有一定的特殊要求,必须研究其动态分析方法和发生、传输过程,确定其动态品质和稳定性指标,进一步用于对控制信号进行优选。