

文章编号: 1000-0747(2018)04-0000-08 DOI: 10.11698/PED.2018.04.00

井下控制工程学概述及其研究进展

苏义脑

(中国石油工程技术研究院, 北京 102206)

摘要: 在回顾百年来钻井工程技术发展过程的基础上, 阐述了井下控制工程学产生的技术与学术背景, 论述了井下控制工程学的基本问题、学科框架和主要研究内容, 介绍了井下控制工程学 30 年来在中国的研究进展, 并对井下控制工程学的未来发展方向做出展望。笔者于 1988 年提出“井眼轨道制导控制理论与技术”这一研究领域, 并进一步于 1993 年提出了“井下控制工程学”这一概念。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、技术的一个学科分支, 是一个多学科交叉的应用技术领域。该学科分支由井下系统动力学与控制信号分析方法研究、井下控制机构与系统设计学和井下参数采集与传输技术研究、井下控制工程产品开发、实验方法研究与实验室建设等 4 部分组成, 其主要研究内容也包括这 4 个方面。30 年来笔者及研究团队在这 4 个方面取得若干成果和进展。作为石油天然气工程中的一个研究领域和一个学科分支, 井下控制工程学正在向更大的广度和深度发展。图 1 参 16

关键词: 石油天然气; 钻井; 井下控制工程学; 研究进展; 发展方向

中图分类号: TE21

文献标识码: A

Introduction to downhole well control engineering and its research progress

SU Yinao

(CNPC Research Institute of Engineering Technology, Beijing 102206, China)

Abstract: On the basis of reviewing the development history of drilling engineering technology over a century, this paper describes the technical and scientific background of downhole well control engineering, discusses its basic issues, discipline frame and main study contents, and introduces the research progress of downhole well control engineering in China over the past 30 years, and envisions the development direction of downhole well control engineering in the future. The author proposed the study subject of well trajectory control theory and technology in 1988 and the concept of downhole well control engineering in 1993. Downhole well control engineering is a discipline on theories and technologies for solving engineering control issues of oil and gas wells by the methods and from the perspective of engineering control theory and is an application technology field involving multiple disciplines. This discipline includes studies on four aspects, downhole system kinetics and analysis methods of control signals, downhole control mechanisms and system design and downhole parameter collection and transmission, product development, and experimental methods and lab building. Over the past 30 years, the author and the research group under his leadership have achieved a number of progress and accomplishments in the study of the four aspects. As a study field and disciplinary branch of oil and gas engineering, downhole well control engineering is developing to a broader and deeper horizon.

Key words: oil and gas; drilling; downhole well control engineering; study progress; development direction

引用: 苏义脑. 井下控制工程学概述及其研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 1-8.

SU Yinao. Introduction to downhole well control engineering and its research progress[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 1-8.

0 引言

石油是当代人类社会的主要能源和战略物资, 影响国计民生和国防安全。要把深埋在地下数百米乃至数千米的原油和天然气开采出来, 就要进行钻井和建井作业, 以形成沟通地下储集层和地面的油气通道。因此, 油气井工程是石油工业上游业务的重要组成部分

分, 是一个集钻井、完井(含固井)、测井、测试、采油、井下作业及增产改造等多个工艺环节、多学科和多专业交叉的技术领域, 而井下控制工程学则是研究井下控制问题和技术的分支学科。本文阐述井下控制工程学产生的技术与学术背景, 论述井下控制工程学的学科框架、基本问题和主要研究内容, 总结井下控制工程学 30 年来在中国的研究进展, 并对井下控制工

程学的未来发展做出展望。

1 井下控制工程学的产生背景

井下控制工程学这一概念从提出至今只有 20 多年。它从解决油气钻井的井眼轨道控制成功率和精度问题开始,逐步发展成为油气钻完井中的一个新领域,最近 10 多年来在其他井下专业也获得了日益广泛的应用。因此,为了深入认识井下控制工程学产生的技术与学术背景,有必要回顾百年来油气钻井技术特别是井眼轨道控制理论和技术的发展过程。

1.1 百年来钻井技术的发展

钻井工程起源于公元前 3 世纪的中国,当时中国古代的先民们就在四川自贡钻井采卤并形成一定的生产规模^[1-2]。近代油气钻井工程发展于西方,19 世纪国外工业发达国家就采用顿钻方式钻油气井,为 20 世纪现代石油工业的发展奠定了基础^[3]。19 世纪末和 20 世纪初,在世界范围内,旋转钻井取代冲击钻井成为主要的钻井方式,20 世纪 30 年代发明了井下动力钻具,促进了定向井技术在 50 年代到 60 年代的快速发展^[4-5]。此后工程力学、计算机技术和信息技术的引入,以及材料科学和井下工具的进步,进一步推动定向井技术向水平井、大位移井不断发展。当代石油钻井工程技术已形成一个包括钻前、钻进、完井和油气测试等多个环节的综合性系统工程,涉及到地面装备、井下工具、井眼轨道控制、钻井液与储集层保护、测量与测试、完井与固井等多个方面,是一个机械、力学、化学、控制等几个专业交叉的应用技术学科。

1.1.1 井型的发展

井型的发展演变能清楚地反映百年来油气钻井工程技术的发展历程,即直井→定向井(斜井)→丛式井→水平井→大位移井→其他特殊工艺井(如侧钻水平井、分支井、倒丛式井等)。

20 世纪 50 年代以前世界范围内的油气钻井基本上都是以直井为目标。由于技术条件的限制,只能采用直井开采浅层油气。目前直井钻井技术还在发展,重点在于复杂地质结构条件下的深井和超深直井。世界上已有相当数量直井的井深超过了 6 000 m,中国还钻成了井深为 8 408 m 的塔深 1 井。

20 世纪 50 年代至 70 年代是国际上定向井和丛式井技术迅速发展并推广普及的时期。钻定向井主要是为了解决地面障碍、土地租赁权、救险灭火等方面的问题及利用地层自然造斜规律。丛式井的发展则是为了节约占地面积、减少环境污染范围、提高钻井效率

和降低钻井成本,在一块井场上按一定的规划和设计钻成多口定向井(或直井)。

真正的水平钻井开始于 20 世纪 50 年代,但在 80 年代才开始大规模发展,90 年代得到进一步推广应用。水平井是最大井斜角为 90°左右并在储集层内有一段水平延伸长度的特殊定向井。在从定向井向水平井的过渡发展过程中,经历了大斜度井这一技术阶段。大斜度井是最大井斜角超过 60°的定向井。由于水平井在储集层内的穿越长度是常规直井及定向井的几倍乃至上百倍,因此水平井的产量可以是常规直井及定向井的几倍甚至 10 倍以上。另外水平井可以解决水气锥进等问题,可以大幅度地提高单井产量和油气采收率,从而达到少井高产的效果。钻定向井是为了解决地面问题和钻井工程本身的问题,钻水平井则是为了解决地下问题即提高产量和采收率的问题。

大位移井是大斜度井的发展,其特点是有很长的大斜度稳斜段和很大的水平位移,其发展趋势是与水平井技术结合而形成大位移水平井。大位移井技术开始于 20 世纪 70 年代末的海洋平台钻井,其目的是尽量扩大控油面积以减少平台数量。20 世纪 80 年代特别是 90 年代以来,大位移井技术发展迅速。现在世界上已经钻成了水平位移超过 10 km 的大位移井^[6],而且应用领域扩大到陆地,用大位移井实现“海油陆采”,进一步降低开发成本。

侧钻井和分支井(又称多底井)等特殊工艺井钻井技术正呈现日益蓬勃发展的趋势。老井侧钻技术与水平井技术相结合形成的老井侧钻短半径和中短半径水平井,可以明显地提高采收率并大幅度降低钻井成本。分支井实现了一井多层开采,正日益受到关注。此外,美国和加拿大把采矿(金属矿、煤矿)技术与石油钻井技术相结合,用大口径竖井和井底人工巷道方式向上钻多口“倒丛式井”,利用重力来采特稠油并取得成功。

油气勘探开发的需求始终是推动钻井技术进步的最大动力。井型的演变表明钻井技术早已摆脱“单纯为完成一条油气通道”的局限,日益成为提高勘探钻遇率和开发采收率的重要途径。今后钻井技术的发展趋势是,为降低吨油成本和提高总体效益,钻成满足开发需要的井眼,沿储集层钻进和单井钻穿多个地下油气目标将成为重要技术方向^[7]。满足钻井工程需求的关键在于提高井眼轨道控制技术的水平。

1.1.2 井眼轨道控制技术的发展

井眼轨道控制是钻井工程技术的基础和关键环节

之一。油气勘探开发的需求推动着井型的演变与发展，井型的发展促进了井眼轨道控制理论与技术的发展，井眼轨道控制技术的发展又是井型进一步发展的基础。

现代井眼轨道控制理论与技术体系是在融汇了钻井工程、工程力学、机械、控制、计算机、仪器仪表等多个专业的基础上形成的。从19世纪80年代到20世纪90年代，井眼轨道控制技术的发展可以大致划分为如下几个阶段^[3]。

①“摸着钻”，即主要靠经验钻井，这一阶段是20世纪50年代以前。20世纪20年代，人们开始认识到直井时产生的井斜问题及其严重性^[9]。1928年首次在直井中使用稳定器。一些学者和钻井工作者尝试利用钻铤重量来减少井斜，并用梁的弹性理论来分析直井中钻柱的弯曲和稳定问题，以探索“防斜打直”的技术途径，但没有大的突破。

②“算着钻”，即通过理论分析提供用于井斜控制的图版和软件。这一阶段大约为1950年至20世纪80年代初。1950年，美国著名学者Lubinski A提出了直井中钻柱弯曲的力学模型^[8]。这是井眼轨道控制研究历史上的重要里程碑。此后产生了多种理论算法，按其力学模型可分为微分方程法^[8]、有限元法^[9]、能量法^[10]和纵横弯曲法^[11-12]等4类代表性方法，相应的计算图版和软件为现场应用提供了理论和技术支持。在这一阶段，钻井工程由“工艺”发展为“科学”，下部钻具组合的受力与变形分析、地层与钻头的相互作用分析和井眼轨道预测构成了这一“科学”内容的3大方面，计算机应用是其外部特征。以下部钻具组合受力与变形分析为例，除了解法的多样性外，研究问题由一维发展到三维，由静态发展到动态，由小变形发展到大变形^[8,11]。在这一阶段，井眼轨道控制的对象由直井发展到定向井、丛式井乃至水平井，控制目标由单一的井斜控制发展到对全角变化率、造斜率与方位变化率的控制。

③“看着钻”，即根据随钻测量仪器提供的测量信息及时控制井眼轨道。这一阶段大约为20世纪80年代初至90年代。井眼轨道的测量仪器经历了从氟氢酸瓶测斜仪、单点测斜仪、多点测斜仪、有线随钻测斜仪到无线随钻测斜仪的发展。随钻测斜仪使井眼轨道控制进入“看着钻”的阶段，大大提高了轨道控制决策的准确性。目前最先进的随钻测斜仪是无线随钻测斜仪，它克服了有线随钻测斜仪只能用于“滑动钻井”状态的缺点，可用于“旋转钻井”状态。配置高的无线随钻测斜仪的测量参数可达10种以上，不仅包括井

斜、方位、工具面等方向参数，还有井下钻压、井下扭矩、井下振动、环空温度等工况参数，以及自然伽马、地层电阻率、密度和中子孔隙度等地质参数。这种仪器系统通称为随钻测井仪。

从“摸着钻”到“算着钻”，是井眼轨道控制技术的一大进步，是工程力学和计算机技术引入钻井工程的结果。但是，仅靠力学模型和计算机软件还不能彻底解决井眼轨道控制技术中存在的一些问题和难点，原因有以下几点^[13]。

①多种BHA(Bottom Hole Assembly, 井底钻具组合)受力分析模型均建立在一些简化、假设基础上，计算结果与实际存在偏差。例如，假设井眼内壁为规则光滑的圆柱体，但实际上并非如此，这就影响钻柱与井壁的接触状况并可能影响侧向力的计算值。一些BHA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。此外，BHA受力分析模型的一些输入参数仅具有名义性质，如钻压和扭矩，目前一般均用地面指重表上显示的钻压和转盘扭矩代替。但在定向井、水平井中，由于摩擦问题突出，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。

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。此外，一些测定钻头横向切削指数的实验装置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，只能进行局部调控，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，则必须起钻更换钻具组合。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。

力学模型误差、测量参数误差、某些重要计算参数在实际施工中难于获取、BHA结构和特性不可变更以及传统的控制方法，严重制约了井眼轨道控制技术的有效性和控制精度，使其难以满足超薄油层和复杂结构井的井眼轨道控制的精度和效率要求。

如何在实钻过程中克服BHA受力分析模型带来的误差？如何在不能准确预知的参数条件下实施高精度的控制？如何在实钻过程中及时改变BHA的固有结构和固有力学特性？如何在目标位置发生变化（由地质误差引起）的情况下钻入靶区？如何使钻头能在地

下灵活地改变轨道从而准确钻入油气层?这些重要问题在 20 世纪 80 年代中后期引发了笔者及同行们的深入思考。考虑到钻井技术的每一次重大进步都是其他学科和新技术引入并结合的结果,再考虑到钻头与飞行器在姿态和轨道控制方面的共性以及工程控制论在导弹制导中的成功应用^[14],笔者产生了把工程控制论和飞行器制导技术引入油气钻井工程以发展井眼轨道控制理论与技术的想法。在经过一段时间的类比、分析和较深入的研究工作之后,1988 年笔者提出井眼轨道制导控制理论与技术这一新的研究领域,并预测井眼轨道控制技术在继“摸着钻”、“算着钻”和“看着钻”的发展过程之后,将进入“变着钻”和“自动钻”的新阶段。

1.2 井下控制工程学的提出

20 世纪 80 年代末期和 90 年代初期,井眼轨道控制技术开始向闭环化、系统化发展。美国、法国、英国、挪威、德国等 5 个国家的 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。在国内,1988—1990 年,笔者先后完成“井眼轨道制导控制理论与技术”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 3 部分,并完成和申报了“自动井斜角控制器”发明专利^[15-16]。在此基础上,鉴于以下几点考虑,笔者于 1992—1993 年间又进一步提出了“井下控制工程学”这一新的概念,把研究范围由原来的钻井井眼轨道控制问题扩展到油气井井下各个专业的所有工程控制问题:

- ① 国外在这一领域的研究主要集中在几种典型的系统产品开发并互设壁垒,有关理论和方法研究结果鲜见报道;
- ② 产品的深层开发需要针对油气井井下特点的共性的基础理论和设计方法作指导,由此可带来更大程度的创新,而当时未见有关研究成果报道;
- ③ 国外的这些产品都局限于钻井过程中井眼轨道的自动控制,而其原理和方法可扩展到井下其他作业过程的控制问题,并用于相关新工具、新系统的开发;
- ④ 在新的理论研究成果基础上进一步开展控制机构和系统设计方法的研究,并形成模块化设计方法,可以使没有从事过有关基础研究工作的设计人员根据需要用给定的方法进行创新和创造,成功率更大。

2 井下控制问题的普遍性及特征、难点

2.1 井下控制问题的普遍性

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

生产与作业过程都普遍存在控制问题。仅以钻井作业的井下控制为例,就涉及到安全控制、质量控制和成本控制等 3 方面的多种控制问题(见图 1)。针对每一个控制问题,都可以研发一种或多种控制方式的控制工具或系统。这些均属于井下控制工程学的研究范畴。

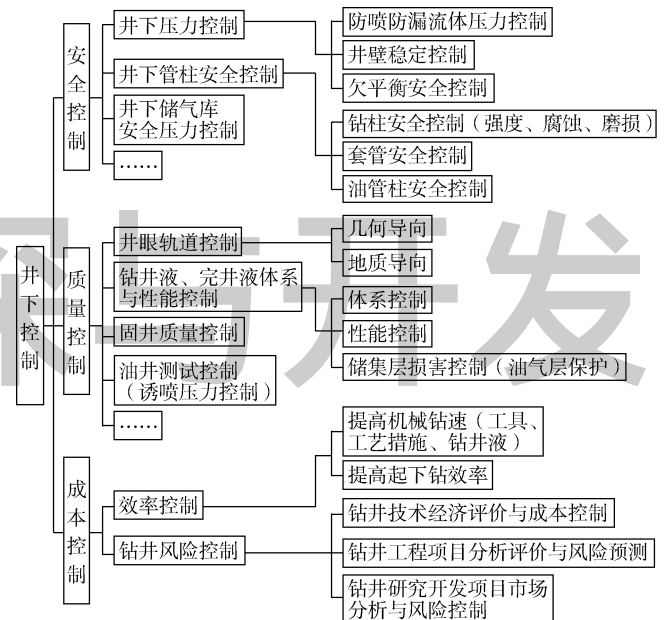


图 1 钻井作业的井下控制分类示意图

2.2 井下控制问题的特征和难点

井下控制问题有其固有的特征和难点,这是由油气井结构、井下作业环境和载荷性质所决定的。

① 径向尺寸小。油气井是一个细长孔,从地表开始向下其长度可达数千米,但直径往往在半米以内,且随着井深逐级缩小,最小的井眼直径可在 0.1 m 以下。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,特别是径向尺寸的限制使得井下工具或系统在设计和制造中存在困难。

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。多体耦合作用下的井下系统具有十分复杂的物理特性。

③ 工作环境恶劣。以钻井为例,钻柱工作在高温(最高可达 200 ℃ 以上)、高压(最高可达 100 MPa 以上)、强振(最大冲击可达 500 g (重力加速度)以上)、重载(最大轴向拉力负荷可达近千吨)和有冲蚀、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通常无法直接应用于井下控制问题。

井下控制问题的特殊性使得在其他行业及地面工

程中可以有效应用的控制系统、机构、元器件以及常规的成熟的方法很难简单地照搬到井下控制中来。井下控制工程学必须研究这些特殊问题，从而形成一套特殊的设计方法和工艺方法。

3 井下控制工程学的基本问题及学科框架

3.1 井下控制工程学的基本问题

3.1.1 定义

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、技术手段的一个学科分支。它是油气井工程井下工艺问题与工程控制论相结合的产物，是一个多学科交叉的应用技术领域。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工艺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。

3.1.2 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。

研究井下控制工程学的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，从技术和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的恶劣工况决定了井下控制问题的难度、复杂性和特点，也决定了井下控制工程学这一分支学科的研究性质，即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。

3.1.3 学科特点

井下控制工程学是集理论研究、产品开发和实验研究于一体的应用性技术领域。多专业多学科交叉是其特点，可概括为：以井下为对象，以控制为目标，以力学为基础，以机械为主体，以流体为介质，以计算机为手段，以实验为依托。

3.2 井下控制工程学的学科框架

作为一个学科分支，井下控制工程学由以下 4 个基本部分组成。

3.2.1 理论基础研究

井下控制工程学这一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、压强、

振幅、频率等）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。对井下系统的控制信号有一定的特殊要求，必须研究其发生、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。

3.2.2 技术基础研究

井下控制工程学这一学科分支的技术基础是井下控制机构与系统设计学及井下参数采集与传输技术。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、放大和执行机构，要确定这些机构的典型结构，并建立各种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。井下参数可分为状态参数和控制参数。状态参数是描述井下系统工作边界与工作过程特征的各种几何参数和物理参数，在控制过程中要用到很多状态参数。要研究不同种类井下状态参数和控制参数的测量方法和手段，以及这些参数信号在井下对井下短传、井下对地面双向传输的方法和实用技术。

3.2.3 产品开发

这一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和控制系统，以解决实际生产问题。机电液一体化往往是这种井下控制系统的基本特征。它是井下控制机构设计技术的综合应用。由于产品开发的多样性和实用性，决定了井下控制工程学必将具有针对性很强的专业应用范围，能产生较大的经济效益和社会效益，并可望以此为基础形成一种新的高技术产业。

3.2.4 实验室建设和实验方法研究

相应的实验室是井下控制工程学的依托。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，特别是涉及到真实流体系统的系数只有通过实验才能选定。因此，在井下系统动力学和信号分析理论研究、井下控制机构设计学研究、井下参数采集与传输技术研究、产品开发中，实验研究具有不可忽视的作用。

以上 4 个部分的关系为：产品开发是井下控制工程学研究的主要目的，而技术基础研究是产品开发的基础，理论基础研究又是技术研究的基础，实验室建设和实验研究则是开展理论基础研究、技术基础研究和产品开发的重要手段和依托。开展理论和技术基础研究的实际意义在于形成一种模块化的设计方法，根据上述硬件结构库和特性仿真库，使没有从事过理论和技术基础研究的产品开发人员也能够按“搭积木”

的方式完成产品的设计和开发。这将减小产品开发难度,提高设计水平,扩大井下控制工程学的应用范围。

4 井下控制工程学的主要研究内容

井下控制工程学的主要研究内容包括以下4个方面。

4.1 井下系统动力学与控制信号分析方法研究

具体包括:井下系统(钻柱-管内液柱-管外环空系统)的动力学模型;井下系统在不同情况下的载荷性质和模型的初始、边界(井底、井壁状态)条件;井下系统几种物理场(压力场、速度场、流速场、力场)的定量描述;井下控制信号动态分析和稳定性评价方法;井下控制信号的传输过程、传递函数和频谱特性分析;井下实用控制信号的筛选。

4.2 井下控制机构与系统设计学和井下参数采集与传输技术研究

具体包括:信号发生、传递、执行机构设计方法和原则;各种实用控制信号的发生、传递、执行机构的设计和分析;各种实用控制信号的发生、传递、执行机构的计算机仿真;井下控制系统总体设计方法和原则;不同控制信号的系统综合与模块化设计方法;井下控制系统智能化基本算法和系统仿真;井下控制系统的动态调试方法和技术评价;各种控制信号的子系统(机构)的结构模块库与仿真软件库;各种参数采集方法和装置(传感器)设计方法;提高参数传输特性(频率与品质)的方法。

4.3 井下控制工程的产品开发

关于产品开发,应结合各种井下作业过程(如钻井、完井、试井、测井、采油、修井等)对控制的要求来研制所需的控制工具和系统。例如对钻井过程而言,目前主要是针对井眼轨迹的几何导向和地质导向研制开发各种开环遥控型井下工具和闭环自控型工具与仪器系统。

4.4 实验方法研究与实验室建设

实验室应具备检验上述各种理论研究结果、确定关键结构尺寸、组装和统调实验样机等功能。由于油气井结构和工况的特殊性,需要研究相应的行之有效的实验方法,形成相关的技术标准和操作规程;还要根据实验要求在必要的情况下自行设计和开发特种实验装备。

5 井下控制工程学的主要研究进展和技术发展趋势

自1988年以来,笔者及研究团队在井下控制工程

学方面开展基础性研究和技术攻关,在井下系统动力学研究、可控信号分析、井下控制系统与机构设计、前沿技术研发、实验方法研究和实验室建设等工作中取得若干成果和进展,择要列举如下。

研究确定了井眼轨道控制系统的性质。该系统属多目标、多干扰的复杂系统,就目前认识程度而言,仍属灰色系统,因此很难用一个确定性模型完全描述,需加控制环节(闭环自控或开环遥控)。研究确定了该系统中的控制对象、被控量、给定量、操作量和扰动量。例如把钻井过程中的地层变化及其他随机干扰视为扰动量,为建立系统的分析和控制模型提供了可能。

研究了可用于井下控制的多种信号,提出了一些新的概念和方法。列举并研究了4类(机械类、水力类、几何类、其他类)共22种以上控制信号,并从中分析筛选可控信号。针对井下控制系统的特殊性,进一步提出了可控信号、闭环控制、控制链与主控信号等概念和术语,有助于系统和机构的分析与设计工作。掌握了多种可控信号的品质、特性和发生方法。

提出了井下系统动力学的概念和研究方法,以作为井下控制系统分析和建模的理论基础。其特点是把基于固体力学的管柱力学和基于流体力学的井下环空水力学结合起来,把钻柱(或其他管柱,如套管柱、作业管柱等)管内流体和环空流体作为一个系统进行分析和建模,实现“流固耦合”,有别于传统的管柱力学与环空水力学各自分析、互不相连的分析方法,因而能更准确地反映井下系统的物理特性。用多种方法建立井下系统动力学的基本方程,从操作工艺和设备特点上抽象提出切合实际的边界条件,因而使求解结果更具有普适性。在此基础上,针对具体的工艺过程,该基本方程可简化为相应的力学方程:若只研究钻柱而忽略环空,则可由此得出钻柱动力学方程;若只研究环空而忽略钻柱,则基本方程可演变为环空水动力学方程。因此,传统的井下管柱动力学和环空水动力学均为井下系统动力学的特例。

油气井井下控制系统特别是钻井过程动力学分析的基本问题就是要确定钻头在井底工作时的真实载荷频谱和特性。鉴于国内外在这一方面研究工作的匮乏,组织开展了钻进中钻头载荷变化的理论研究和实验研究,研发专用数据采集短节,海量采集实验台架和实际钻井中的相关数据并进行分析和辨识,总结规律,从而使钻井系统的力学分析建立在坚实的实验基础上。

运用井下系统动力学的分析方法,针对钻井起、下钻这两种基本工况,开展了钻柱和液柱耦合系统条

件下钻柱纵向振动问题研究，建立了该固-液耦合系统的纵振方程和边界条件，用差分法求解。定量分析了起、下钻时的波动压力和反压差的影响因素，阐明了井下钻柱所载荷与大钩载荷变化规律，为井下工况预测、井下事故原因分析及井眼轨道控制系统控制信号的确定提供了理论依据。

开展了信息传输通道和信息传输规律的理论研究和实验研究。针对从井下到地面、从地面到井下和从井下到井下的信息传输要求，开展了液体脉冲、电磁波、声波等多种传输方式的物理建模和理论分析，并辅之以实验验证，研究结果为信道设计、脉冲发生器研制和信息编码提供了理论依据。

开展了井眼轨道遥控系统和自动控制系统的目标、基本结构与设计原则的研究。给出了井眼轨道遥控系统和自动控制系统的目标及其数学描述，并根据系统的功能分配，提出了系统的基本结构以及控制方法，阐明了控制系统的基本设计原则。在此基础上，进一步研究了开关控制、模糊控制、自适应控制等多种方法在井下控制中的应用特点，从而为系统设计研发提供了依据。

针对井下控制器这一井下闭环智能钻井系统中的核心部件，分析了井下控制器的功能结构、硬件模块组成和软件结构模式及其设计的原则和方法，为井下控制器的物理设计奠定基础。

提出了井下控制系统和机构设计学的概念和模块化设计方法。针对油气井井下特殊的作业环境和特点，研究确定了井下控制机构和系统的设计原则。研究了多种井下控制机构的主控信号和结构形式，如液控分流机构、液动跟随机构、排量控制机构、重力信号机构、重力寻边机构、行程控制变径机构、井下变角机构、旋转变径机构、销槽机构、锁位机构、伞状变径机构、反压差机构等。确定了这些实用机构中的信号发生、放大、传递和执行环节的特性和传递函数，建立了这些机构的硬件结构库和仿真软件库。运用笔者提出的控制链和模块化设计方法，可把有关机构有序组合，产生多种可达同一控制目的的技术方案并进行比较、评价和优化，从而形成设计方案，为技术开发提供了理论基础和保障。该库集硬件和软件于一体，并具有开放性，是设计人员从事技术创新的有力工具，降低了制造厂和现场技术人员的使用门槛，扩大了应用范围。

开展了井下若干种工程参数和地质参数的测量研究，如井斜、方位、工具面、钻压、扭矩、温度及振

动等工程参数和电阻率(近钻头电阻率、方位电阻率)、自然伽马、中子孔隙度等地质参数。研究这些井下参数的测量方法、模型和实验方法，并形成实用技术(工艺、装置与软件)。

开展了井下无线短传技术的研究，从建立模型到形成实用技术并应用于工具系统。

研究了提高井下信息上传速率的方法，包括脉冲发生器的设计方法、技术开发和编码方法，提出一种组合码编码方法并用于实际仪器系统。开展了钻井液连续压力波信号的特性分析与处理方法研究，包括编码调制规则、信号数学模型、频谱特性、传输特性、检测与处理方法、压力相移键控信号的解调与解码等，为连续波传输技术的研究提供了理论基础。

开展了井下发电机设计，开发的井下发电机用于实际工具系统，为井下测量和控制提供了电源保证。

开展了井下控制实验方法研究，建立了井下控制工程实验室。为配合连续波传输技术的研发，设计建造了长风洞、短风洞等实验装置。

在基础理论、设计方法研究和实验室建设的基础上，笔者及研究团队进一步致力于井下控制工具和系统的研发工作，如遥控可变径稳定器、正脉冲无线随钻测量系统、近钻头地质导向钻井系统、随钻压力测量系统、无线电磁波随钻测量系统、连续波无线随钻测量系统、自动垂直钻井系统、旋转导向系统、工程用随钻测量系统、随钻地震系统、中子孔隙度测量工具和遥控分层配采系统等。这些具有自主知识产权的控制工具和系统获得多项国家发明专利授权，其中一部分已经产业化并得到规模应用，取得显著的技术效果和经济效益，另一部分正在由样机向产品转化。这些科研成果丰富和扩展了井下控制工程学的技术内涵和应用范围。

当前，作为石油天然气工程中的一个新领域和一个新兴的学科分支，井下控制工程学正在向更大的广度和深度发展，这是由当代科学技术的发展趋势、油气井井下控制问题的普遍性和相关工艺工程对控制技术的要求所决定的。

控制论、信息论和系统论的产生与发展推动了控制技术的快速发展及其在诸多领域的大规模应用，极大地丰富了相关工程技术的内涵和水平。概括而言，控制论改善了工程技术的功能，系统论提高了工程技术的整体性，信息论提升了工程技术的精度。它们与计算机技术、工程力学和机械科学的交叉和融合则为油气井井下控制技术的发展提供了保障。井下控制工

程学的发展方向 and 趋势为：①井下控制技术正在从钻井领域向其他井下工艺领域扩展应用，如完井、采油、测井、测试、井下作业和储集层改造等；②控制技术正在从单体工具或仪器向高度集成化、系统化和特殊作业化发展；③控制系统正在向实时化、自动化和智能化方向发展；④井下控制系统的工作特点正在向高性能指标（如高温、高压、大容量、高传输速率等）、高可靠性、长工作寿命和强适应性方向发展；⑤井下控制技术与油气勘探开发的结合将更加紧密，逐渐成为提高勘探发现率、开发采收率和单井产量的直接手段，目标是降低吨油成本。

6 结语

回顾井下控制工程学的提出背景和相关技术的发展过程，再一次说明了理论创新、技术创新的重要性、作用与价值。在需求引领和创新驱动下，通过相关学者的不断努力，井下控制工程学这一学科分支必将日趋完善，井下控制技术也将成为有广阔应用前景的高新技术，为石油井下工程乃至勘探和开发提供重要的技术支持和手段保证，从而产生较大的经济和社会效益，为提升中国石油工程技术的核心竞争力做出贡献。

参考文献：

- [1] 刘广志. 中国钻探科学技术史[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
LIU Guangzhi. History of drilling science and technology in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.
- [2] 申立生. 中国石油工业发展史: 第2卷[M]. 北京: 石油工业出版社, 1988: 61.
SHEN Lisheng. History of the development of China's oil industry: Vol 2[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1988: 61.
- [3] 苏义脑. 建立在百年发展基础上的重大进步[R]. 北京: “世纪展望”学术活动月, 1998.
SU Yinao. Major progress on the basis of one hundred years' development[R]. Beijing: “Century Outlook” Academic Activity Month, 1998.
- [4] The University of Texas at Austin. Rotary drilling series: Unit III: Nonroutine rig operations[M]. Austin: The University of Texas at Austin, 1976.
- [5] INGLIS T A. 定向钻井[M]. 苏义脑, 译. 北京: 石油工业出版社, 1995.
INGLIS T A. Directional drilling[M]. SU Yinao, Trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [6] 李克向, 周煜辉, 苏义脑, 等. 国外大位移井钻井与完井技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
LI Kexiang, ZHOU Yuhui, SU Yinao, et al. Drilling and completion techniques for large displacement wells in foreign countries[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [7] 刘修善. 导向钻井定向造斜方程及井眼轨迹控制机制[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(5): 788-793.
LIU Xiushan. Directional deflection equations for steerable drilling tools and the control mechanism of wellbore trajectory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 788-793.
- [8] LUBINSKI A. A study of the buckling of rotary drilling strings[R]. API 50-178, 1950.
- [9] MILLHEIM K, JORDAN S, RITTER C J. Bottom-hole assembly analysis using the finite-element method[J]. Journal of Petroleum Technology, 1978, 30(2): 265-274.
- [10] WALKER B H. Some technical and economic aspects of stabilizer placement[J]. Journal of Petroleum Technology, 1973, 25(6): 663-672.
- [11] 百家社, 苏义脑. 井斜控制理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.
BAI Jiazhi, SU Yinao. Theory and practice of well deviation control[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990.
- [12] BAI Jiazhi. Applying longitudinal and transverse bending beam theory to solve stress and deformation of BHA[R]. SPE 10561, 1982.
- [13] 苏义脑. 关于井眼轨道控制研究的新思考[J]. 石油学报, 1993, 14(4): 117-123.
SU Yinao. New thinking on borehole trajectory control[J]. Acta Petrolei Sinica, 1993, 14(4): 117-123.
- [14] 钱学森, 宋健. 工程控制论[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
QIAN Xuesen, SONG Jian. Engineering cybernetics[M]. Beijing: Science Press, 1980.
- [15] 苏义脑. 自动井斜角控制器: 90109809.4[P]. 1991-08-21.
SU Yinao. Automatic well slope controller: 90109809.4[P]. 1991-08-21.
- [16] 苏义脑. 井下控制工程学研究进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
SU Yinao. Progress in research on downhole control engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.

第一作者简介: 苏义脑(1949-), 男, 河南偃师人, 中国工程院院士, 中国石油工程技术研究院教授级高级工程师, 主要从事油气钻井工程技术研究。地址: 北京市昌平区黄河街5号院1号楼, 中国石油工程技术研究院, 邮政编码: 102206. E-mail: suyinao@petrochina.com.cn

收稿日期: 2018-02-02 修回日期: 2018-05-20

(编辑 胡菁玮)