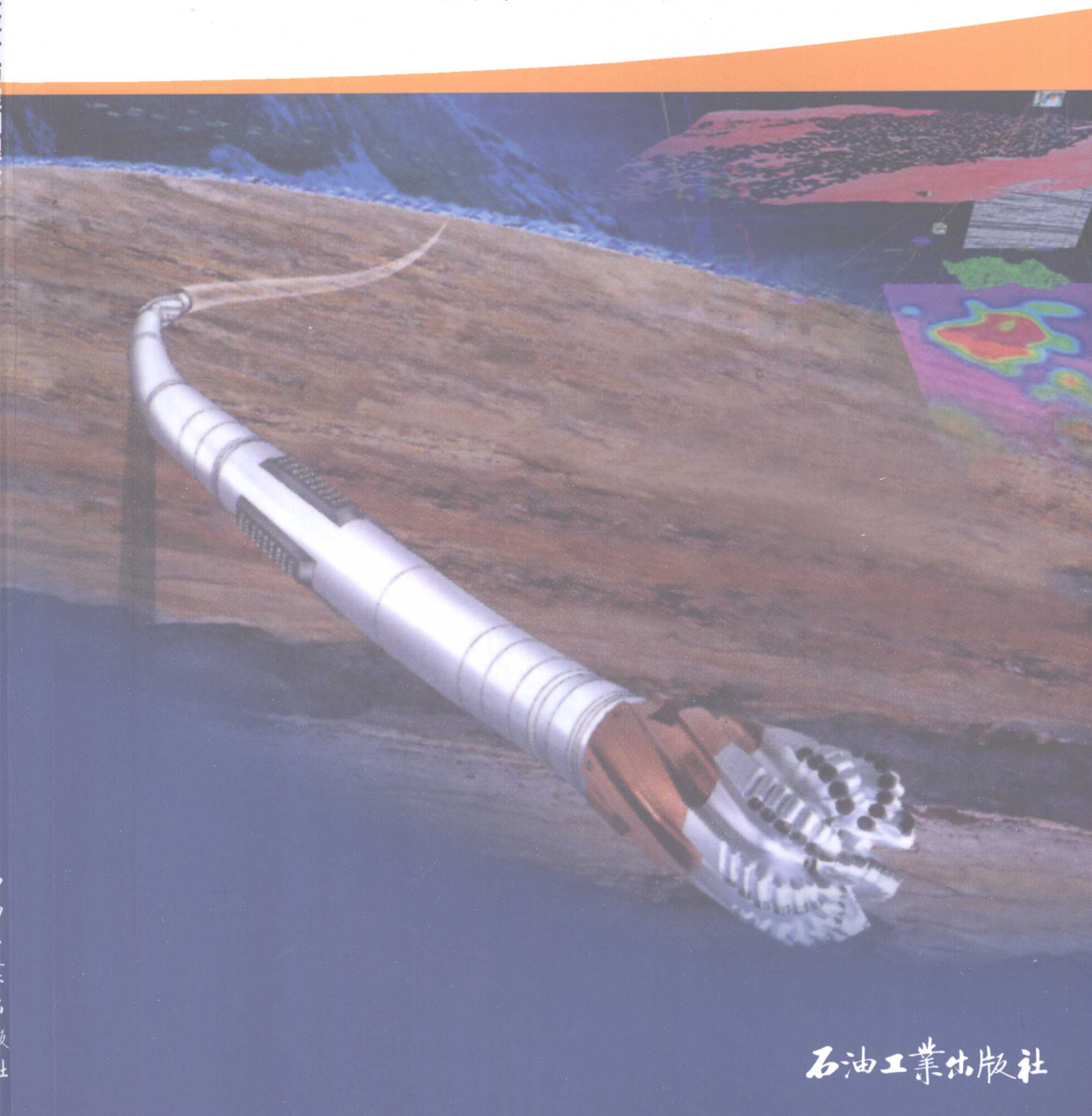


侧钻水平井、分支井井眼 轨迹设计与控制理论

石晓兵 喻著成 陈平 李枝林 著



石油工业出版社

侧钻水平井、分支井井眼轨迹 设计与控制理论

石晓兵 喻著成 陈 平 李枝林 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了开窗侧钻水平井及分支井井眼轨迹设计、井眼轨迹控制的有关理论和方法。同时介绍了三维井眼轨迹可视化技术。在井眼轨迹与钻柱相容性、侧钻水平井钻柱强度分析、侧钻井眼轨迹起始段影响因素评价、斜向器开窗力学性能分析等方面提出了新的理论和新方法,相关内容同样适用于定向井、水平井、丛式井和大位移井。

本书可供石油工程、采矿工程、钻探工程及相关专业的研究人员和工程师阅读,也可作为高等院校有关专业的高年级学生、研究生和教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

侧钻水平井、分支井井眼轨迹设计与控制理论/石晓兵,喻著成,陈平,李枝林著. —北京:石油工业出版社,2009.6

ISBN 978 - 7 - 5021 - 7184 - 1

I. 侧…

II. ①石…②喻…③陈…④李…

III. 定向井 - 油气钻井

IV. TE243

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 083974 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www. petropub. com. cn

编辑部:(010) 64523563 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

排 版:北京时代澄宇科技有限公司

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:8.5

字数:210 千字 印数:1—1000 册

定价:28.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

随着定向井、水平井技术的发展和不断完善,侧钻水平井、多分支井技术得到了迅速的发展,被认为是老井挖潜,进一步提高剩余油气采收率,开采难动储藏,提高油气田开发经济效益和社会效益的最具发展前景的前沿技术之一。无论是老油田还是新区,该技术都可以广泛应用。该项技术与丛式井和单一的水平井相比,在某些条件下,可以节约成本和时间,目前已成为热门技术,掌握了这些核心技术,形成生产力,达到产业化水平,就能在市场的竞争中赢得优势,因此,该技术已引起了全球石油界的广泛关注。

井眼轨迹设计和控制是油气钻完井工程的关键环节,同时也是一个典型的多学科交叉综合的课题,它涉及到工程、数学、力学、计算机、测量和控制、机械和设备等诸多学科领域。在该理论和技术领域,都存在缺陷和不完善之处,多年来,作者在侧钻水平井、分支井开采技术、井眼轨迹设计、管柱力学和井眼轨迹控制,以及三维可视技术研究方面作了许多工作。本书针对侧钻水平井、分支井井眼轨迹设计和控制方面的技术问题,提出了相应的原理和方法,并开发了井轨迹设计控制分析软件,应用于现场设计和施工,在国内多个油田进行了现场应用,取得了良好的应用效果。作者对这些工作和成果加以系统总结和提炼,期望能够为侧钻水平井、分支井轨迹设计和控制理论的科研和生产实践提供参考。

本书首先根据国内外已钻分支井的情况,结合油藏地质,详细讨论了分支井、侧钻水平的轨迹类型及其油藏适应性,以及轨迹设计需要考虑的油藏地质因素及其之间的相互影响,提出了出分支井井眼轨迹设计的原则、方法和步骤,针对分支井的三维特性,重点研究了其三维设计计算方法。对于三维扭方位设计中提出了完整的绕向判断准则,给出完善的曲率校核模型;推导出一种双靶(靶段)设计的简易新方法和空间圆弧设计计算方法,这两种方法可以广泛用于分支井空间三维轨迹设计;提出了轨迹分段设计计算的方法,该方法为计算机程序化提供理论基础,可广泛运用于实际设计中;同时建立全井眼轨迹最优化设计模型,并首次在轨迹设计中引入最优化方法中的乘子法求解。

由于侧钻水平井主要用于开采薄油层、边际油田和死油区中的剩余油,因而,科学合理的轨迹设计、精确的入靶定位显得更为重要,这给轨迹设计理论提出了挑战。影响水平井轨迹设计的因素很多,如除应满足地质设计要求外,在进行轨道设计时,还应考虑地层因素、工具因素、原井眼状态、侧钻位置、侧钻方式及安全因素等的影响,而这些影响因素或信息在以往的设计方法中不能定量考虑或定量考虑较少。本书针对侧钻水平井的特点,在尽量多地定量考虑上述影响因素的前提下,设计出一条工程易于实现、符合安全要求、成本较低的轨迹,给出了侧钻水平井二维轨迹设计和三维轨迹设计的方法和计算模型。

建立了开窗侧钻工具及井壁受力分析模型,为开窗参数的确定和优化提供了理论依据。

针对分支井分支处连接段井壁力学特性，系统研究了分支连接处的应力分布规律，应用有限元法分析了造斜半径和造斜方位对连接段井壁应力分布的影响，以及连接处破坏的程度及变化规律，同时提出连接井段井眼最稳定时的最佳分支造斜方位是沿着最大水平主应力方向的技术观点，这些研究结果国内尚属首次。

综合考虑了侧钻水平井井眼形态、管柱受力、管柱的弯曲对其摩阻的影响，运用纵横弯曲梁理论建立了摩阻计算模型，开发一套关于侧钻水平井管柱下入摩阻计算和安全性评价软件，预测管柱在井内运动的摩阻力和轴向力等主要参数，进行管柱与井眼的相容性评价，具有良好的现场实用价值，对判断管柱下入的可行性和分析判断井下复杂情况有重要的指导作用。

从钻具选择及钻具组合优化设计、施工参数配置及工艺采取措施、钻具事故预防及处理、施工方案推荐等方面提出了较系统的侧钻井水平井井眼轨迹控制技术。

本书基于可视化技术的理论和关键技术，用 VB 结合 OpenGL 三维可视化技术，编制了分支井轨迹设计和三维可视化软件，软件引入虚拟现实技术，可以在虚拟的油藏地质环境中显示轨迹的空间展布和轨迹之间的关系，为设计人员提供更直观的设计与轨迹控制平台。

本书的研究成果可广泛应用于侧钻水平井（侧钻井）、分支井以及定向井、水平井、大位移井的设计计算和施工指导。这些内容反映了作者近年来的部分创新研究成果，有些成果已在专业期刊上公开发表，在这次编写过程中作者对所发表的资料进行了重新整理和完善。

本书得到了“西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室”的支持和帮助。

由于作者水平和时间有限，书中难免有错误和不足之处，恳请读者批评指正。

石 晓 兵

2009 年 5 月

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 问题的提出	(1)
1.2 国内外研究现状	(3)
1.2.1 分支井技术的研究现状	(3)
1.2.2 侧钻水平井研究现状	(5)
1.2.3 井眼轨迹设计的研究现状	(7)
1.2.4 井眼轨迹可视化技术的研究现状	(9)
2 分支井、侧钻水平井井眼轨迹设计方法	(11)
2.1 分支井轨迹设计方法概述	(11)
2.2 分支井轨迹剖面类型及其油藏适应性	(13)
2.2.1 分支井轨迹剖面类型	(13)
2.2.2 分支井轨迹剖面类型的油藏适应性	(13)
2.3 分支井筒轨迹设计的油藏地质因素分析	(17)
2.3.1 分支段方位应考虑的油藏地质因素	(18)
2.3.2 分支段垂向位置应考虑的油藏地质因素	(18)
2.3.3 分支段数目应考虑的油藏地质因素	(18)
2.3.4 分支段长度应考虑的油藏地质因素	(19)
2.3.5 分支造斜点位置应考虑的油藏地质因素	(19)
2.4 分支井轨迹设计方法	(19)
2.4.1 二维井眼轨迹设计方法	(21)
2.4.2 分支井三维井眼轨迹设计新方法	(23)
2.4.3 轨迹分段设计计算方法	(36)
2.5 侧钻水平井轨迹起始段因素分析	(50)
2.5.1 侧钻水平井轨迹起始段的定义	(51)
2.5.2 侧钻水平井起始段施工参数的优化设计	(51)
2.6 侧钻水平井轨迹设计方法	(52)
2.6.1 侧钻水平井二维轨迹设计方法	(52)
2.6.2 三维侧钻水平井轨迹设计方法	(57)
3 分支井、侧钻水平井井眼轨迹控制理论	(62)
3.1 侧钻、分支井起始段影响因素分析	(62)
3.1.1 套管开窗位置的确定	(62)
3.1.2 段铣套管长度的确定	(63)
3.1.3 开窗钻井参数的确定	(63)
3.2 分支井、侧钻水平井连接井段井眼力学稳定分析	(68)

3.2.1	分支井连接井段的几何模型	(68)
3.2.2	分支井连接井段的有限元力学模型及网格模型	(70)
3.2.3	井眼破坏判断准则——Mohr-Coulomb 准则	(72)
3.2.4	分析结果	(73)
3.3	管柱下入摩阻分析理论和方法	(80)
3.3.1	管柱下入过程中井眼轨迹的模拟计算	(81)
3.3.2	侧钻水平井管柱摩阻计算模型	(84)
3.4	分支井、侧钻水平井管柱组合相容性分析	(93)
3.4.1	侧钻水平井管柱相容性分析方法	(93)
3.4.2	管柱相容性计算实例分析	(94)
3.4.3	小结	(102)
3.5	侧钻井水平井井眼轨迹控制施工工艺技术研究	(103)
3.5.1	侧钻井水平井井眼轨迹控制技术要点	(103)
3.5.2	侧钻水平井井眼轨迹控制施工工艺技术	(106)
3.6	侧钻水平井钻具事故预防措施及处理工艺技术研究	(108)
3.6.1	开窗中常见事故分析	(108)
3.6.2	钻具疲劳失效趋势分析	(109)
3.6.3	钻具事故预防措施与处理工艺技术	(109)
3.7	推荐钻井施工工艺技术	(111)
4	分支井井眼轨迹可视化设计、井眼轨迹控制软件	(112)
4.1	软件主要内容及结构	(112)
4.1.1	软件主要内容	(112)
4.1.2	软件主要结构	(113)
4.2	软件程序实现的步骤和框图	(113)
4.2.1	分支井轨迹设计模块	(113)
4.2.2	三维可视化显示模块	(114)
4.3	软件实例分析与结果界面展示	(121)
参考文献		(127)

1 绪 论

1.1 问题的提出

多分支井是由一个主井眼和两个或两个以上的分支井眼所组成的，能使多个储层泄油。

多分支井技术起源于 20 世纪 50 年代，第一批多分支井开始于前苏联的俄罗斯和乌克兰地区，第二批多分支井于 1968 年开钻于前苏联的东西伯利亚地区。直到 1995 年以后，随着水平井完井技术的发展和三维地震技术的普及，多分支井技术得到了迅速的发展。该项技术与钻丛式井和单一的水平井相比，在某些条件下，多分支井可以节约成本和时间，此项技术目前已成为热门技术，引起了世界石油工业广泛的关注。

由于分支井开采的油藏都是比较复杂的油藏，虽然分支井开发油气田的单位成本相对较低，但是单口分支井的钻井完井费用远高于一口常规直井或水平井的钻完井费用，因此为了避免分支井井眼轨迹走向的盲目性，同时达到提高产量的目的，就必须对分支井在地层中的展布和走向及其形态进行精确地设计。

轨迹设计是钻分支井前钻井工程的首要关键环节。虽然井眼轨迹设计已经有近 50 年的研究和发展历史，但由于分支井自身的复杂性和特殊性，这对目前井眼轨迹设计和三维显示提出了新的挑战，相关的理论和技术距人们所期望的理想目标还相差甚远。

同时，对于钻直井或一般的定向井时，人们可以想像出井眼轨迹的空间展布情况。但对于分支井这样复杂的三维轨迹，人们一般不可能较直观的想像出分支井井眼轨迹在地层中的展布和走向情况。井眼轨迹在地下是不可能用肉眼来看到的，同时，井眼轨迹是否穿越了某个标定的地层，是否达到目标点，两个或多个分支井眼或区块井网和该分支井眼之间的空间关系如何，是否相碰，实际钻进的轨迹和设计轨迹是否相符，这些问题是很难用大脑想象的，对于分支井而言，最重要的问题是：每个分支井和主井眼相连的整个轨迹是否足够光滑以保证顺利钻进；分支井眼之间是否可能相碰；整个分支井轨迹和区块井网的老井眼是否存在碰撞的可能性；分支井各个分支是否在标定的层位；实际钻进时是否按照设计钻中地质靶区；分支井轨迹和地层或地质构造之间的关系如何；同时在钻进的过程中，人们期望能时时了解井眼轨迹的走向如何以及正钻进的地层或将要钻进的地层的情况是否会产生井下复杂事故，这些问题的解决是不可能光凭借大脑想象来完成，而随着计算机可视化技术的发展，利用该项技术来处理这一系列重大问题，则显得轻而易举了。

利用现代计算机数据信息可视化技术来实现井眼轨迹的三维立体可视化，我们就可以非常清楚地看到设计的井眼轨迹在地质环境中地空间展布和姿态，不光是象常规地轨迹显示技术那样，给人们展示的是水平投影图、垂直剖面图和一个立方体中的三维视图，让人们在大脑中有一定的三维形态，但这不能非常形象地展示轨迹到底接触哪些地层和地质构造等等人们关心的重要问题。同时，可以借助于计算机数据信息可视化技术，立体形象的显示三维地质构造形态和相关的地质信息，为钻井轨迹设计和施工提供一个虚拟现实的可视化平台，让设计人员和施工人员能完全掌握分支井轨迹和地质构造两者的详细情况以及两者之间的相互

关系，为最优、安全、迅速地设计和施工提供一个生动可靠的平台。

而在油气勘探开发中涉及地质显示也只仅仅显示地质上需要的信息，而没有能够很好地结合钻井的工程需要，常常也是在横向上表现为二维地图的形式，在纵向上表现为三维油气层的分布，而对于在油气田开发管理决策者来说，目前迫切需要表现地质构造和油气田空间分布以及井网的空间展布，井网各个井眼轨迹的空间展布及其各个井眼轨迹之间的相互关系，以及各井眼轨迹和地质构造之间的相互关系，同时希望能够三维动画显示来表现地质构造、目标油气层、井眼轨迹及其之间关系的空间分布情况，而现在油田运用的一般的地理信息系统和钻井轨迹设计系统在这些方面显得无能为力，这就需要应用目前更高级的技术开发特定的专业软件系统，产生真实而有效的轨迹并在地质环境中三维显示。而 OpenGL 强大的三维图形开发功能能够很好的描述空间属性类信息，输出三维构造图、剖面图等。

根据钻井现场施工的需要，目前国外已经开发出了象 Landmark 这样的钻井设计可视化和地质三维显示商用软件，实现井眼轨迹可视化和地质环境的可视化，许多国内外油田正在使用，但国内还没有开发出大量推广的商用轨迹设计软件和轨迹在三维地质环境中显示的软件，根据这些情况，本书希望从这些方面着手编制分支井井眼轨迹设计及可视化系统软件。

对于分支井连接井段的力学特性及其井壁稳定性是一个非常关键的问题，因为分支井连接井段的力学特性及其应力分布情况直接决定了分支完井的方式选择以及完井质量的好坏。如果在完井前没有很好的进行连接井段地层应力释放情况的研究，就可能造成连接失效或连接段套管的挤毁而不能再进入，导致分支的丢失和井下复杂事故的发生。由于连接井段的井眼几何形状复杂，在地层中的空间形态各异，地层应力大小和方向不同，以及分支造斜半径和方位不一样，连接井眼段的应力集中和破坏情况就会各不相同。因此对于这样一个空间不规则的几何体而言，很难用一个解析公式求解连接段的应力重新分布问题以及井眼的变形和破坏问题。目前在这方面的研究工作国内尚未见报道，国外也极少。因此，在这方面的研究是具有开创性意义的研究。

在研究期间，进行了大量的资料调研，对国内外分支井技术的发展历史、现状和趋势都有详细的了解，掌握了分支井轨迹设计和三维可视化的原理及其实际应用过程。并且在软件程序方面有一定的基础，能够熟练的进行程序编制，因此在此基础上能完成对分支井轨迹设计研究和三维可视化软件编制。实现在虚拟地质环境中轨迹三维展布的显示。同时调研了井眼稳定性的研究状况，特别是对于分支井的井眼连接井段的力学特性研究，掌握了分支井连接井段的相关特性，抽象出几何和物理模型，并借助于大型有限元软件 ANSYS，实现对连接井段力学特性的分析。这对于分支井这样一项高投入高风险的技术具有重要的现实意义。

综上所述，分支井井眼轨迹设计和可视化技术的研究不仅有巨大的工程实际应用价值，而且将推动分支井及其他油气井工艺的发展。

侧钻水平井技术，目前已经是国内外公认的恢复老井产量的一项好技术。据相关文献报道，在美国、加拿大、俄罗斯、伊朗等国家每年施工侧钻井数量逐年增加，有的国家每年施工的侧钻井上万口以上，世界各国已经普遍大量应用该项技术。从侧钻井技术的发展趋势看已逐渐向侧钻水平井、分支井方向发展，适用范围越来越广。

随着老油田的不断开发，套损井逐年增多，特别是处于开发中后期的老油田，套损井更为严重，直接影响到原油资源的开采程度。推广和实施侧钻水平井技术，充分利用停产井、低效井已有的井段进行开窗侧钻，其成本要比钻新井经济，同时，采用侧钻水平井技术可提高剩余油的开采程度，恢复停产井、低效井生产能力，在一定程度上解决油田后备储量不

足，采收率低等问题。

本书针对侧钻水平井、分支井井眼轨迹设计和控制方面的技术问题，提出了相应的原理和方法，并应用于现场设计和施工，作者对这些工作和成果加以系统总结和提炼，期望能够为侧钻水平井、分支井轨迹设计和控制理论的科研和生产实践提供参考。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 分支井技术的研究现状

多分支井技术是在定向井、大斜度井和水平井技术基础上迅速发展起来的一项新的石油开采技术，它可以大大提高油藏的采收率，降低油藏开采综合成本，经济效益十分显著，应用前景十分广泛，应该是 21 世纪油气田开发的主体工艺技术之一。

自从 1953 年前苏联用涡轮钻具钻成世界上第一口真正的分支井——申拜 66/45 井（9 个分支井眼，产量是直井的 17 倍）到现在，分支井技术现场运用技术的发展已经经历了半个世纪。但是分支井技术的理论早在 20 世纪初就提出来了，在 20 世纪 80 年代以前仅仅前苏联在该技术上做了较多的研究。至 1990 年，共打了 126 口多分支井，其中 33 口勘探井、77 口采油井、3 口注入井和 9 口其他用途井。

到 20 世纪 90 年代，随着定向井、水平井技术的日臻成熟以及井下工具的快速发展，以美国、加拿大为主的许多国家石油公司便开始对分支井进行大规模的研究和现场应用。特别是井下工具的快速发展大大加速了分支井技术的发展，国外已经研制出多套多底井系统，据不完全统计，Baker Oil Tool、Halliburton、Sperry - Sun 等公司现已研制成功了近 20 套多分支井系统，并钻成了近 2000 口多分支井。在某种意义上说，没有井下钻井工具的发展是不可能分支井技术的广泛应用。近年来多分支井系统的更新速度很快，大多数井都实现了四级以上完井，实现了工程为地质油藏服务的目标，获得了较大的经济效益。

1997 年春，由英国 Shell 公司 Eric Diggins 组织在阿伯丁举行了多分支井的技术进展论坛，并按复杂性和功能性建立了 TAML（Technology Advancement Multilaterals）分级体系，其目的是为多分支井技术的发展指出一个更加统一的方向。为了满足分支井技术发展要求，Marathon 等多家石油公司开发了多种分支井钻井完井系统。虽然目前分支井井下装置系统还不太成熟，有许多需要改进和完善之处，但是它们标志着分支井技术已开始进入划时代发展阶段。

据不完全统计，目前世界上已有数千口分支井，其中约 80% 都是裸眼完井，约 20% 是衬管完井，只有个别井是尾管完井。这些分支井基本上采用已有的常规钻井技术，地面设备与钻直井无多少区别。主要是完井技术和需满足特殊要求的完井工具与常规有所区别。当然在地质导向（随钻测井）技术、井下泥浆马达（涡轮和螺杆）、钻头选型（无轴承的 PDC 和 TSP 钻头）等方面都采用了新技术、新工具。

我国从 1993 年才开始在东部老油田进行老井侧钻分支井眼尝试，而国外在 20 世纪 70 年代末就已经进行了大量的老井侧钻分支井眼作业。美国 Bechtel 公司于 1987 年开发出水力破岩分支水平井技术，并在加利福尼亚和洛杉矶油田钻成径向分支水平井 600 余口，而我国目前尚无这种技术和该类型的分支井。1992 年国外开始进行井下分支装置系统研究，1993 年和 1994 年几家石油公司开始进行现场试验（目前某些系统已趋于成熟），而我国到 1997 年才开始准备立项研究。

国内各科研院所、油田都十分重视多分支井技术的攻关，辽河石油勘探局是国内第一家

成功研制并现场应用具有 TAML 第四等级多分支井技术的单位。对分支井的运用我国还处于试验阶段,在技术研究上还远远落后于国外,我国和国外分支井技术发展差距为 5~10 年。为此,建议尽快开展分支井钻井完井综合配套工具的试验研究,以促使我国尽早赶上国外分支井钻井完井技术水平。

国外各大公司仍然把多分支井技术作为前沿课题进行攻关,并且把多分支井技术作为公司的标志性技术。在分支井技术的研究上主要集中在钻井和完井技术上。但是,分支井的油藏评价技术也远远落后于分支井的钻井技术,对钻井项目的评价和油井产能预测这一个古老而又难以精确解决的问题一直以来困扰着石油界,因为钻井过程中和油藏中不确定性的存在使得对油田开发的评价带来很多困难。一直以来,研究人员曾通过多方面的努力来描述并估算水平井和多侧向井、分支井的生产指数和注水指数,而且为此建立了若干模型。在建立形式简化但计算准确的解析和半解析模型过程中,人们借鉴了垂直井模型经验,采用模拟井的概念并考虑了油藏几何形状的影响。通常人们将油井的泄油面积简化为具有封闭边界的平行六面体,或简化为顶部或底部压力恒定,边部为封闭边界或无限大的油藏。虽然数值模拟可适用于非均质或其他复杂的油藏,但采用解析模型计算生产指数还是具有很大吸引力和指导意义的。

从 20 世纪 50 年代开始研究水平井产能预测方法到现在,国外很多学者对此做了很多努力,对于多分支井和打开部分井段的水平井,目前还没有一个可准确预测其产能的模型。Surak Yeten 等人对非常规井的类型、井位和轨迹进行的研究,主要运用油藏数值模拟技术和神经网络等方法,对分支井分支位置的选择和分支长度进行了经济评价,最终优选出井的类型、位置和轨迹走向及分支长度。Ray Brister 等人对分支井的分支造斜点的优选进行了研究。我国在 1990 年前后才开始研究水平井渗流理论,但是关于分支井渗流理论的研究近几年才开始,一些文献对此做了研究。

而定量研究国内也是近年才开始,范子非等对油藏和气藏水平井水平段最优长度设计方法进行了定量的研究,分析了几个关键参数对产量的影响。1998 年程林松等对水驱油藏合理水平井段长度的确定方法进行了基于经济评价模型的定量研究,根据资金平衡原理,运用最优化方法,综合考虑水驱油藏水平井开发的技术指标因素和经济指标因素建立了确定水驱油藏水平井开发中合理水平段长度的优化模型,提出了一种确定水平井合理水平段长度的工程计算方法;同时,还给出了水平井开发中各项费用及收入的计算方法;根据所介绍的方法,在微机上研制和开发了水平井合理水平段长度的优化计算软件;运用该方法对某海上油田进行了计算,与数值模拟计算结果对比表明该计算方法可应用于水平井开发的优化设计。胡月亭等对水平井水平段长度优化设计方法进行了研究,通过分析一口水平井的投入与产出随水平段长度的延伸而发生的相应变化,着重对模型目标函数的选取及水平段长度的效益约束方程进行分析研究。杨耀忠等对屋脊式断块油藏侧钻水平井优化技术进行了研究,根据屋脊式断块油藏侧钻水平井的地质条件,对地质建模、剩余油分布研究的相关技术进行了综合论述;并研究了水平井地质参数敏感性,指出了这类油藏进行侧钻的水平段最佳优化方位、最佳长度及最佳射开部位;在临盘油田盘 40 块屋脊式断块油藏应用了侧钻水平井技术,根据剩余油研究结果及优化的水平井地质参数进行了布井。

对于分支井的井眼连接井段的力学特性和井壁稳定性问题,目前国外的研究也很少,目前只有 Bernt S Aadnoy 等人对此做了解析研究,把连接井段垂向上不同位置的井眼抽象成平面问题来研究,并建立了临界破裂压力和临界坍塌压力的公式。但是这种把空间的一个三维

问题抽象成为一个平面问题是存在严重缺陷的，在弹塑性力学理论上讲是绝对不可行的。目前就此问题如何解决还没有找到一个很好的办法。而目前国内还没有见到这方面研究工作的报道，可以说几乎还是一片空白。本文给出的分支井井眼连接井段的研究以及利用有限元分析方法得出的结论在国内尚属首次。

综上所述，分支井的钻井完井技术是超前于分支井的油藏评价技术，对于分支井轨迹优化设计涉及诸如地质及油藏工程和钻井工艺如何结合等方面的问题，目前还未见文献报道，但与分支井关键参数对产量等的影响，如分支数目，长度等对产能的影响虽已有文献进行研究，并且这些研究大都是针对分支水平井而作出的，但是对于整口分支井的轨迹如何优化设计和任意形状轨迹下产能的预测现在还是一个大难题，同时，分支段井壁稳定的研究才刚刚开始，急需进一步的研究。就目前分支井技术的发展来看，现在还有很多须待解决的关键技术和问题，而现在急需解决好的关键技术有：

(1) 多分支井的地质、油藏工程与井眼轨迹最优化设计的综合技术。即根据地质、油藏条件和拟用的采油方式，选择分级标准并确定井身剖面的类型。分支井的类型选择取决于产层特征、开发目的、开采条件、产层厚度和它的岩性，以及产层上部是否存在密闭层。分支井的井身剖面、分支长度和分支数目等取决于产层的非均质性、地层厚度、岩性、岩石硬度的分布、地层剖面的稳定性等。选择和设计分支井时必须考虑当时的钻井、固井、完井工艺技术水平及多底井采油、修井等工艺水平。尽可能选择完井新技术。

(2) 先进的开窗技术，研究窗口周围密封技术，研究特种水泥，提高密封质量。研制密封的、可封隔、耐高温高压的连接部件和井下专用工具。研究完井测控安装技术，确保安装一次成功。

(3) 研究多分支井的固井、完井、采油、增产、修井配套技术及专用软、硬件的开发工作。多分支井是用钻井手段提高产量和采收率的新兴技术，其技术难度较大，尤其是完井技术。因此，我们必须在跟踪国外技术的同时，加大研究力度，要有所创新，尽快开发和完善该项技术。

(4) 多分支井眼的井眼稳定技术、轨迹控制技术、扭矩摩阻预测技术、井下压力波动预测技术、井控技术等等。

1.2.2 侧钻水平井研究现状

自从世界上第一口定向井在 20 世纪 30 年代问世以来，定向井、丛式井等钻井技术有了很大的发展。油气田在开采过程中，对于油藏储层构造及断块复杂，打不到目的层的垂直井；因水淹、水窜而储量动用程度差，剩余油具有可采价值的生产井；生产过程中油层套管严重破损的停产报废井；井下复杂事故以及为满足特殊需要等原因的油气水井，可以采取在一定深度开窗，另钻新井眼完井，使油气水恢复生产，达到正常生产的目的。根据油藏工程、地质及开发的需要，在油气水井油层套管内一个预定的方向和深度，采用一定的工具和工艺开窗钻进后，使部分井眼与原井口垂线偏离一定的距离的井身剖面称为侧钻井，最终入靶的井斜角接近 90° ，则为侧钻水平井。侧钻作为油田开发中井下作业的主要工艺技术，不但适用于油井，同样也适用于气井和注水井，不受井别的限制。

通过侧钻，使油气水井恢复生产，有利于提高油气的利用率，有利于提高开发效果，有利于提高采收率，同时可以节约钻井费用和地面建设费用，因而可取得较好的经济效益和社会效益。

随着油田开发时间的增长，油气井在生产过程中，除套管本身质量外，常因为受各种应

力作用而造成油层套管的严重破坏，加上各种井下严重故障，迫使部分井不能正常生产，此类复杂井用一般的方法处理很难见效，可以采用侧钻技术恢复生产，以提高油气井的利用率。因此侧钻水平井工艺是油田开发后期保持油气水井完好，增加油气产量的重要措施之一。其作用主要表现在：（1）油气水井侧钻在开发区利用原井眼，完善并保证了部分井网，可减少打部分调整井；（2）在开发区利用原井眼，可利用油气井侧钻加深层位，获取新的油气流；（3）通过油气水井侧钻，使部分停产井恢复生产，提高油气水井利用率和开发效果；（4）侧钻作为井下作业大修的主要工艺手段，有利于老区改造挖潜，有利于提高井下作业工艺技术水平。

自 20 世纪 90 年代以来，作为三次采油技术的重要组成部分，侧钻水平井技术得到了广泛的应用。对于开发低渗透、低压油层和垂直裂缝发育的油层或开发受地面工程限制的油气水井，利用原井眼采用套管内开窗侧钻水平井技术，有利于提高油气井产量，提高采油速度和采收率。

自 20 世纪 90 年代以来，作为三次采油技术的重要组成部分，侧钻水平井技术得到了广泛的应用。由于侧钻水平井主要用于开采薄油层、边际油田和死油区中的剩余油，因而，科学合理的轨道设计、精确的入靶定位显得更为重要，这给轨道设计理论提出了挑战。

目前，轨道设计的方法主要有 4 种：斜平面法、圆柱螺旋线法、常扭方位法和模拟法。尽管前面 3 种设计方法计算简单，但未能体现水平井轨道及其控制的特征；模拟法或常曲率法是目前现场使用的最为普遍的方法，它们较好地反映了轨道控制的特点（如小井斜下尽可能多地扭方位），并且在相同条件下，它可获得曲率较小的轨道。但这些方法本质上均属于试错法或人机交互方法的范畴，即在进行轨道设计时，首先假定部分设计参数已知，然后计算轨道参数，并与靶点处参数反复进行比较，进而求得余下的设计参数。显然，在这类方法中，井眼轨道设计参数的确定明显地依赖于设计者的经验与直觉，不能保证设计结果具有技术上或经济上的最优性，且设计效率随设计的曲线段段数的增加而显著降低。造成侧钻水平井轨道设计看似简单实则比较复杂的原因，在于影响水平井轨迹设计的因素很多，如除应满足地质设计要求外，在进行轨道设计时，还应考虑地层因素、工具因素、原井眼状态、侧钻位置、侧钻方式及安全因素等的影响，而这些影响因素或信息在以往的设计方法中不能定量考虑或定量考虑较少。井眼轨道优化设计的目的，就是要在尽量多地定量考虑上述影响因素的前提下，设计出一条工程易于实现、符合安全要求、成本较低的轨迹。显然这是一个典型的约束优化问题，而这一问题的解决，需要新的设计思想及相应的数学模型。迄今为止，有关井眼轨道优化设计与控制的数学模型及相应算法的研究，还未引起人们充分的重视。

在侧钻水平井、分支井下部钻柱力学和井眼轨迹控制领域。许多学者都对定向井、水平井钻井过程中的钻柱、管柱摩阻进行了大量的研究，建立了许多力学模型，并取得了可喜的成绩。这些研究都声称他们的计算模型能用于套管柱摩阻分析和计算，但是他们都没有给出实例。

1983 年，约翰西克（Johansick）首先提出了在定向井中预测钻柱力和扭矩的“软管”模型，开创了摩阻和扭矩问题研究的先河。他把钻柱视为无刚度的“软管”，钻柱均匀地躺在下井壁上，其模型简单，为改进井身剖面，校核和设计钻柱、现场事故的诊断和预测等创立了理论基础，但该模型是以皮带轮传动原理为基础建立起来的。因此，将钻柱视为无刚度的软管，这在井眼曲率较小的情况下是合理的，但在井眼狗腿度较大，井眼曲率较大的情况下，就低估了钻柱的侧向力，从而低估了钻柱摩阻和扭矩，与实际偏差较大。

Lesage 在 Johansick 模型的基础上分起、下钻、旋转钻进三个过程,考虑了管柱的运动状态对拉力扭矩模型的影响,该模型有所改进。

1988 年,何华山以大变形理论为基础,并考虑了钻柱的刚度作用,提出了软管改进模型——刚性模型。计算该模型时采用有限差分求解。但该模型没有考虑钻井液粘滞力和压差的作用。

1992 年,在何华山模型的基础上,杨姝综合考虑了井眼轨迹和井眼状态,特别是考虑了管柱的运动状态、钻井液粘滞力和结构力的影响。但对钻井液粘滞力和结构力作了很大程度的简化。

美国得克萨斯大学机械工程系的 Ching Yew 博士开发了圆管的弯曲模型 (TBEND)。该模型从力学上,充分考虑了实际井眼的三维空间内的多变性,考虑了管柱的弯曲力矩、剪力对任一微元都满足力、力矩平衡条件。

在侧钻水平井中,钻杆发生弯曲后,一方面在管柱上引起弯曲应力,会降低管柱的安全系数;另一方面,由于钻柱管弯曲而使管柱与井壁接触力增加,从而使摩阻力增加。对于管柱弯曲的研究,在 20 世纪 50 年代初,美国著名学者 Lubinski 较系统、全面地研究了直井中钻柱的受力与变形,提出了垂直井内受压钻柱失稳临界长度和临界压力的表达式。由于 Lubinski 当时未考虑到井斜角对管柱失稳弯曲的影响,其计算出的临界压曲载荷在定向井、水平井中是偏于保守的。20 世纪 60 年代, Paslay 等发展了靠在倾斜圆管孔低侧的圆杆稳定性分析理论,建立了圆杆压曲载荷的计算模型。在 80 年代, Dawson 等将 Paslay 的模型应用于斜井中计算钻杆的临界压曲载荷,进行了近似处理,得到计算压曲载荷的模型。在 90 年代,国外学者 Yu - che chen 等人为了研究油管和套管在水平井中水平段的弯曲问题,进行了试验研究和理论上的研究。结果表明,在水平圆孔中的受压杆件在压曲载荷的作用下,受压杆件的最初失稳曲线为正玄线,当载荷继续增加时,失稳的杆件会变成螺旋形。国内学者吕英民等对水平井中的管柱临界弯曲载荷进行了研究,将水平段钻柱简化为两端铰支等刚度的弹性地基梁,考虑弹性地基的影响,得到临界载荷。

1.2.3 井眼轨迹设计的研究现状

对于分支井的主井眼和分支井眼轨迹设计计算,一般来讲是和常规的定向井、水平井轨迹设计方法一样。而一般井眼轨迹设计都是二维设计,至今为止主要以直线—圆弧组合剖面和悬链线剖面等为主。其中最典型的剖面有“L”型、“S”型和双增型剖面。Wiggins 从增斜—稳斜井段中的 5 个未知参数的关系分析出发,推导了“L”型、“S”型和连续增型剖面的计算公式。Kikuchi 从平面几何的角度讨论了双增型剖面水平井轨迹的设计方法,建立了基本公式,并编制相应的软件,它的最大特点在于设计井眼轨迹时可以考虑相应的地质参数,如地层倾角等。Hashem 应用几何学原理推导了大位移井和水平井的基本公式,并设计了通用的 PC 程序。国内韩志勇对定向井轨迹设计进行了详尽的研究。

但是,二维剖面井眼轨迹无法解决在定向钻井实际施工中所碰到的三维空间问题。刘根梅等研究了两种三维定向井设计方法:水平面投影法和空间斜平面法。水平面投影法适用于稳斜变方位的三维定向井轨迹设计,它是将定向井三维井眼所在的曲面展开后再投影到水平面上,进而根据水平投影图计算出当量水平位移。空间斜平面法适用于定向井增斜和降斜变方位及三维侧钻井眼轨迹设计它的基本做法是进行坐标变换。赵静华根据三次函数方程的图像与定向井井身剖面很相似的特点,用变换坐标轴的方法使图像在第四象限内,分析函数方程中各参数与图像的关系和实际表示的意义,从而得到井眼轨迹的三维设计公式。这种设计

方法的特点是井眼曲线为一条连续的曲线。冯志明详细分析了多种轨迹设计方法，它们的特点是把动力钻具装置角在钻进的过程中作为常数来处理，不符合实际情况。因为在实际钻进中弯角可以保持不变，但装置角却随着井眼轨迹的增长而不断变化。也就是说，在钻进过程中，装置角是一个瞬时值。因此，冯志明把装置角作为一个瞬时值来考虑，建立了一套新的模式。Guo 等讨论了三种三维设计方法：常曲率法、曲率半径法和常变方位率法。Cobbly 等讨论了短曲率半径、中曲率半径和长曲率半径定向井的轨迹设计。Mcoillian 讨论了定向井轨迹设计的计算机算法。Sheppard 等着重考虑了如何降低轨迹摩阻和扭矩情况下的轨迹设计问题。David 等分别讨论了定向井轨迹设计的 PC 优化算法。

在定向钻进中，实钻井眼轨迹与理论设计轨迹是不可能完全吻合的，二者之间必然存在一定的偏差。如果偏差在允许的范围以内，则可继续钻进；如果超过允许范围，或当要绕障钻进时，就应该随钻修正设计，以使钻头在已偏差的基础上，沿着一条新的理论曲线向目标点钻进。因此，随钻修正设计在现场施工中几乎是不可避免的。

白家祉等主要讨论了随钻修正设计的性质，提出了两种修正方案，对每种方案推导了具体方程组，并运用牛顿迭代法编程。陈作等首先通过实钻井眼轨迹数据和井下钻具的造斜能力来判别实钻井眼轨迹与原设计井眼轨迹的偏离情况然后根据偏离的情况来修正待钻井眼轨迹设计，并对待钻井段造斜钻具组合进行判别。当不发生偏离时，不改变钻具组合，继续钻进；当实钻井眼与设计井眼发生偏离时，利用实钻中正在使用的造斜钻具另加一套稳斜钻具可准确钻达水平段的靶点。刘修缮等将水平井的待钻设计问题分为两类：（1）限制终点井眼方向并适当限制终点的位置；（2）限制终点的位置和井眼方向。针对以上两类问题讨论了方向斜平面法和复合斜平面法两种待钻设计方法。孙国华采用柱面法研究了三维绕障多目标井的轨迹设计，把轨道分为七段，即直—增—增扭—稳扭—稳稳—稳扭—稳稳，推导出了该类井轨道设计的通用算式。阎铁等根据绕障定向井的具体条件，从三角几何学及水平、垂直图分析，建立了一套绕障定向井简单实用的待钻设计方法。邱国虎等给出了含有井斜变化率、方位变化率、段长等未知数的井眼轨迹三维方程，并应用无约束下的最优化方法进行求解。因为没有限制工具造斜率的范围，所以这种方法的缺点是不能保证设计出来的井眼轨迹是可行的轨迹。艾池等针对井眼轨迹设计的内容、形式以及设计方法的多样性问题，提出了井眼轨迹设计的广义方程。该方程与井眼轨迹的具体描述模型无关，适用于定向井和水平井的二维和三维剖面设计。其中，待钻井眼设计采用斜平面模型；绕障井段设计是将障碍物抽象为铅直圆柱；对于三维漂移轨迹设计，除考虑最大井斜角和第一稳斜段外，还要确定初始方位角。张焱等将非线性最优化理论引入到定向井、水平井的轨迹设计中，把轨迹设计问题归结为非线性不等式约束下的非线性规划问题，并采用序列无约束最优化方法（SUMT）求解，得到具有满足现场工具造斜能力、井眼最短、管柱摩阻最小等特点。迄今为止，关于三维井眼轨迹的模型有很多种，考虑到钻柱的摩阻扭矩和狗腿度，现在多建议采用空间圆弧。

就目前来讲，国内外单纯的轨迹设计计算方法基本已经成熟，水平是基本一致，常规二维井眼轨迹设计、水平井井眼轨迹设计、丛式井设计、斜面法井眼轨迹设计等理论在国内外都有研究和应用。为了适应各种实际情况，出现了各种设计理论和方法。有为了减少钻柱扭矩的设计方法，也有为了减少摩阻的设计方法。

但是单纯的轨迹设计方法还远远不能满足分支井轨迹设计的要求，分支井轨迹设计不光要考虑钻井工艺上的要求，还要满足地质和油藏工程的要求。B. Lawson 阐述了多分支井井眼轨迹设计的一般规则。目前还没有见到关于分支井轨迹设计的详细设计理论和评价技术。

1.2.4 井眼轨迹可视化技术的研究现状

现代的数据可视化 (Data Visualization) 技术指的是运用计算机图形学和图像处理技术, 将数据换为图形或图像在屏幕上显示出来, 并进行交互处理的理论、方法和技术。它涉及计算机图形学、图像处理、计算机辅助设计、计算机视觉及人机交互技术等多个领域。数据可视化概念首先来自科学计算可视化 (Visualization in Scientific Computing), 科学家们不仅需要通过图形图像来分析由计算机算出的数据, 而且需要了解在计算过程中数据的变化。随着计算机技术的发展, 数据可视化概念已大大扩展, 它不仅包括科学计算数据的可视化, 而且包括工程数据和测量数据的可视化。学术界常把这种空间数据的可视化称为体视化 (Volum Visualization) 技术。近年来, 随着网络技术和电子商务的发展, 提出了信息可视化 (Information Visualization) 的要求。我们可以通过数据可视化技术, 发现大量金融、通信和商业数据中隐含的规律, 从而为决策提供依据。这已成为数据可视化技术中新的热点。

从历史上看, 美国洛斯·阿拉莫斯国家实验室 (LANL) 是世界上最早实现计算结果可视化的单位。早在 20 世纪 50 年代, 他们就用打印机和扫描仪作为可视化的输出手段。20 世纪 60 年代开始使用交互式图形显示器和图形终端, 并开始制作幻灯片和动画胶卷。美国劳伦斯·利弗莫国家实验室 (LLNL) 早在 20 世纪 70 年代就使用电视监督显示系统 (TMDS) 实现计算结果的图形显示, 能提供低分辨率的黑白视频图像。进入 20 世纪 80 年代, 微电子技术的发展使图形设备的功能和性能不断增强。LANL 采用 Karl - Heinz Winkler 视频动画系统实现超级计算机计算结果的动态图形显示; LLNL 改进 TMDS 系统, 使其分辨率提高并具有彩色功能, 同时增强其功能与交互性。20 世纪 80 年代中期, 随着超级计算机的应用和发展, 可视化需求越来越强, 同时可视化的硬件条件大大加强, 图形图像技术越来越成熟。为适应硬件平台、操作系统、网络和通信方面的飞速发展, 可视化的软件产品在近几年中发展很快, 其中以 AVS/Express 开发版、IDL (包括 VIP、ION) 和 PV - WAVE 等为代表。AVS/Express 开发版, 可以提供多平台的交互式多维可视化软件开发和集成环境。

而我国科学计算可视化技术的研究开始于 20 世纪 90 年代初。由于数据可视化所处理的数据量十分庞大, 生成图像算法又比较复杂, 过去常常需要使用巨型计算机和高档图形工作站等。因此, 数据可视化开始都在国家级研究中心、高水平的大学、大公司的研究开发中心进行研究和应用。近年来, 随着 PC 功能的提高、各种图形显卡以及可视化软件的发展, 可视化技术已扩展到科学研究、工程、军事、医学、经济等各个领域。随着 Internet 兴起, 信息可视化技术方兴未艾。我国在 20 世纪 80 年代就开始进行科学计算可视化技术的研究和应用。至今, 我国不论在算法方面, 还是在油气勘探、气象、计算力学、医学等领域的应用方面, 都已取得了一大批可喜的成果。但从总体上来说, 与国外先进水平还有相当的差距, 特别是在商业软件方面, 还是空白。因此, 组织力量开发可视化商业软件, 并通过市场竞争, 促使其逐步成熟, 已成为当务之急。

目前, 计算机可视化图形技术在石油工业中已取得长足的进步, 已经深入到石油工业的许多工程实际。可视化井眼轨迹作为最直观显示井眼情况、井斜控制重要依据。以往以手工绘制或计算机二维作图为主, 既耗人力, 又不生动直观; 而且多数仅以某一个或某几个面的投影图进行描述, 给井眼轨迹的控制、开发方案的制订带来了不便, 因此, 井眼轨迹可视化在钻井工程中有很重要的意义。1994 年, Santos 等人在 Microsoft Windows 95 环境下的 FORTRAN 程序实现了井眼轨迹的三维显示, 但是, 它的表现方式比较单调, 不能实现图像的放大、缩小、旋转和剪切等。

随着计算机技术的发展，人们开始要求计算机能再现真实的世界，因而计算机技术也正从多媒体时代向虚拟现实迈进。虚拟现实（简称 VR：Virtual Reality）是一种可以创建和体验虚拟世界的计算机系统。虚拟世界是全体虚拟环境或给定仿真对象的全体。虚拟环境是计算机生成的，通过视、听、触觉等作用于用户，使之产生身临其境的感觉的交互式景视仿真。虚拟现实技术从概念的提出至今不过 30 多年，但是它在航天、军事、机械制造业、机器人技术等领域得到了快速发展和应用。在石油勘探开发领域，少数领先的国际石油软件公司，如 Landmark，Paradigm 开发出了价格昂贵的三维立体地下信息显示系统，但是，在国内的钻井软件方面，虚拟现实技术的实际应用才刚刚起步。因此，基于虚拟现实技术的钻井软件开发，具有开创性的意义。