

水平井技术译文集

- 钻井完井
- 测 井
- 开发采油



(北京)

263

29

中国石油天然气总公司科学技术情报研究所

编 者 的 话

八十年代以来，水平井的钻井完井、测井及开发采油技术迅速发展，日臻完善；在世界各主要油气区推广使用，取得十分显著的增产效果和经济效益；现已开始进入钻水平井开发（或再开发）整个油气田的发展阶段，将成为世界低油价下油气勘探开发的重要战略措施之一。为促进我国水平井技术的发展及早日取得增产油气的实际经济效益，特编辑出版本译文集，供各级领导决策及工程技术干部设计与施工时参考。各专业的译者和校者大力支持了我们，在编辑工作中还得到一些同志的帮助，特致谢意。译文集中可能有缺点错误，敬请读者指正。

1989年9月

目 录

1.水平井能降低海上油气生产成本·····	金静芷 (1)
2.水平井应用新进展·····	宋文宁 (13)
3.短半径、中等半径和长半径水平钻井的新发展·····	漆文远 (20)
4.Elif公司已制定了钻水平井规定 ·····	李克向 (34)
5.在成熟油田侧钻水平井眼·····	赵忠举 (42)
6.在逆掩断层带风成纽格特砂岩中水平钻井·····	赵凯民 (54)
7.怎样穿过盐丘水平钻井·····	胡世军 (61)
8.新开发的中等曲率半径水平钻井技术在斯普拉贝里走向带应用情况·····	高寿柏 (67)
9.计算机用于西弗吉尼亚-文尼县2000英尺水平井设计与钻进·····	郭学增 (75)
10.水平井钻井中的有利因素和不利因素·····	陈安贵 (85)
11.在欧洲用导向钻井技术钻水平井的实例·····	杨金华 (90)
12.机器人在钻井过程中的应用·····	王福莲 (104)
13.水平井眼的泥浆和固井·····	张祖兴 (113)
14.斜井注水泥: 第一部分—问题·····	胡征钦 (123)
15.斜井注水泥: 第二部分—解决办法·····	詹 谦 (130)
16.水平井完井的多数问题已解决·····	黄荣樽 (140)
17.水平井的完井技术·····	丁向民 谢荣院 (147)
18.水平井注水泥的试验台检验·····	武兴升 (155)
19.MWD与六种其他测量仪器定向准确度的现场比较·····	倪荣富 (160)
20.随钻测量—经营者的经验·····	朱桂清 (170)
21.随钻测量 (MWD) 技术能有效地改善油井安全、提高井控质量·····	高丽萍 (174)
22.MWD评价地层的作用不断增加·····	杨春胜 (184)
23.MWD在水平钻井中的作用·····	朱桂清 (191)
24.水平井测井技术应用情况·····	孙济元 (194)

水平井能降低海上油气生产成本

J. F. Giannesini 等著

Societe Natl. Elf Aquitaine (P) (France)

金静芷 译

于福忠 校

提 要

本文对水平井钻井和采油技术的应用对海上油藏开发经济性的影响进行了初步分析,对于中等和长曲率半径〔以保证油藏中的水平井段长超过300米(1000英尺)〕的水平井,理论研究表明,在实践中,只要油藏在垂向上是可渗透的,并且厚度不大于60米(200英尺),所有实际油藏采用水平井均可以获得4或大于4的产量比(水平井产量与常规井产量之比)。这些理论研究结果与油田现场观察到的结果十分吻合。

到目前为止,对现有的关于水平井钻井资料进行的分析表明,对海上油田来说,随着经验的不断积累,钻一米水平井的成本趋于与钻一米直井的成本相同。水平井的附加费用主要因钻井长度较大所致。

在海上,随着井数和产量水平的提高,基本建设成本和作业费用也有所增加。用以北海28项水平井工程的资料为依据所建立的成本模型,研究了用水平井取代常规井所产生的影响。在全面开发油藏的情况下,采用水平井时,由于获得同样产量所需要的井数减少,所以能使生产一桶油的技术成本降低2—8美元(依具体情况而定)。重要分析参数依次是水平井产量与常规井产量之比、钻井成本与总成本之比和常规井的产量。

当钻井成本占总成本的比例较高(超过25%)或常规井的产量较低〔低于2000桶(油)/日〕时,应用水平井能节省的费用最多。

一、引 言

自80年代初以来,钻成和投产的水平井数一直在大大增加。起初只限于作工艺操作性研究,后来是先导性试验,而目前则是用来全面开发海上油田。Elf公司在意大利 Rospo Mare油田的开发、加州联合石油公司在北海荷兰水域的作业、阿科公司在印度尼西亚的作业、标准石油公司(ex Sohio)在阿拉斯加的作业(这些地方均类同于海上条件),均证明了这样一个事实:即水平钻井技术已经成熟。

如果不考虑为收集资料、试验技术或作应用性研究而进行的基本以工艺研究为目的的一些作业,那么,大多数水平井均钻在海上油田(图1)。为什么?主要是经济原因。因为从生产角度看,没有理由认为海上油田比陆上油田更适合于应用水平井。从钻井角度来看,可以说是因为海上一直习惯钻斜井,因而为钻水平井提供了基础设施,但经济效益仍是主要动力。

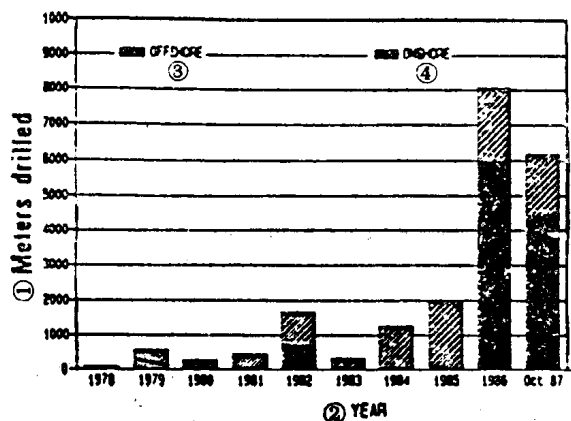


图1 水平井钻井长度

①钻井长度，米；②年；③海上；④陆上

本文试图分析水平井采油技术对海上开发项目的经济效益，尤其是总采油成本的影响。首先，对所要分析的水平井结构类型进行定义，然后叙述水平井的优越性和局限性，最后讨论水平井的经济影响。

二、水平井的定义

大多数作业者赞同的水平井定义是，在油藏中打开油层部分井段的斜度超过 85° 的井为水平井。这个定义实际上很不完善。在这种定义的基础上，不可能对井

的动态进行对比分析。事实上，正如我们下面将要看到的，只有那些能改变油气的径向流条件的井才能被视为水平井。换句话说，水平井就是不再形成环形径向流状态，而是呈平面流态的井。

显然，这种流动条件的改变要求斜度超过 85° ，尤其要求敞开产油部分的维度最小。最小维度与油层厚度和泄油面积有关，许多所谓的“水平井”达不到这个要求。

有关水平井的技术文献，一般都描述了三种水平井之间的区别。根据1987年5月在Houston召开的世界石油会议上提出的一篇论文^[1]，其区别方法如下：

(1) 长曲率半径(573—229米)水平井：造斜率为 $1-2.5^\circ/10$ 米($3-8^\circ/100$ 英尺)。

(2) 中等曲率半径(96—229米)水平井：造斜率为 $2.5-6^\circ/10$ 米。

(3) 短曲率半径水平井：造斜率超过 $6^\circ/10$ 米，目前可达到每米几度的造斜率。

事实上，根据上述基本几何形状分类，对生产者来说，值得感兴趣的事情有二：可以获得水平泄油段长度和安装生产设备的可能性。对钻井者来讲，感兴趣的事情是，采用什么钻井装置，尤其是是否需要使用非常规钻具和设备。如果从生产者的角度考虑，可以看出，上述水平井分类事实上就变成两类：其中一类的水平泄油段长度一般能超过300米(1000英尺)，并且可以用与常规井同样的方法进行测井和完井；另一类井较短，不能用常规方法完井，其直径通常较小。这种区分方式与钻井者将水平井划分成用常规钻具钻成的井和需要用专用设备钻成的井的方法相吻合。

我们的分析只涉及前者，即用常规钻井设备钻成的长泄油井(一般至少300米长)。

三、水平井的优越性

水平井所追求的目标是什么？是增加产量和采收率。如何达到这一目的？通过改变油藏中的流动条件。

钻一口井相当于为某种含流体介质提供一种输送和交换流体的方法，流体通过井被开采到地面，并被人们所利用。因此，井具有两种不同的功能：其一是通过产生压力差，从而产生使流体流动的驱动力，来建立起流体交换的条件；第二个功能是保证流体从交换处被输送到地面。我们这里感兴趣的是第一种功能。

绝大多数油田或气田是“盖子”型的。换句话说，就是它们的厚度相对于其纵向分布范

围来说较小或很小。例如，一个厚30米、纵向分布范围为3公里的油藏，其纵向分布与厚度比为100。再者，由于大多数这类油藏是“扁平”的，所以井与油藏之间的交换面只能是垂向、水平、或近似水平三者之其中一种。由于这个表面是一个圆柱型，所以其面积与圆柱体高度成正比。如果是直井，则圆柱体是垂直的，其高度受制于油层厚度。假如是水平井，则其高度在理论上只受油藏尺寸的影响，但实际上它还要受钻井工艺的限制。正如 Giger^[2]所指出的那样，因为直井时的 hk 乘积被水平井时的 lk 所取代（在一般公式中不用调换此项），因此由于水平井增加了井与油藏间的交换面积，从而提高了产能。

有关这个问题已发表了几篇论文，尤其是Giger^[2-4]和Joshi^[5]的文章。这些作者通常谈到两个比值：在泄油面积相同时水平井与直井的生产指数之比和替代比（即在泄油面积一定和总产量相同时，替代一口水平井所需要的直井井数）。

这些理论研究表明，水平井段的长度是最重要的参数。

这些作者进行的计算表明，对长度超过300米（1000英尺）的水平井眼，可获得的生产指数比大于或等于4，其替代比为同样数量级。如果油藏较厚〔超过60米（200英尺）〕，其渗透率较高，因而直井具有较大的泄油半径，那么对于长300米的水平井来说，上述的比值可能降到2，长度较小的井，比值更小。

水平井采油的另一特点很少提到，但也很重要，那就是采用水平井后流动速度降低。在直井中，由于其流动几何形状（环形径向流）的关系，过流面积随着离井的距离的减小而减小，所以流速不断增加。大部分压力降发生在井壁附近，因此，其生产能力与井壁附近油藏的特性和钻井时可能造成的井底伤害有很大关系。油藏非均质性对直井动态的最不利的影响是众所周知的。

在水平井眼中，如果井眼长度与泄油面积的尺寸相比足够长，那么，流动是平行的，如图2所示（引自Giger的研究结果^[3]）。对于以泄油区边缘为起点的稳态流，其过流面积很快就变得与离井的距离无关，流速变为恒定。而在井眼内流速大大降低。这个问题可以用一个简单计算来说明：

——对一口从厚20米的油藏中以200米³/日产量产油的直井，假设流量沿油层厚度均匀分配，且井径为0.1米，那么入井流速为16米/日。

——而在一口产油段长400米、产量是上述直井产量4倍的水平井中，若其它条件相同，那么这个入井速度仅为3.2米/日。

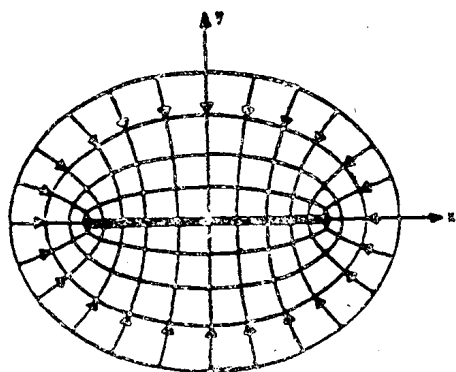


图2 流向水平井的流动型态

水平井能使产量增加，而使流速降低。在出砂或在产气时出现紊流情况而造成压头损失的情况下，马上即可看出水平井的这一特点的重要性。

为了进行分析，我们认为，在厚度小于60米（200英尺）的油藏中，长450米（约1500英尺）的水平井，获得约等于4的比值是可能的。

水平井采油还有另一个重要优越性。那就是它能加长平台的作用半径。用深为1000米、水平段长400米的水平井，代替最大斜度为55/60°的斜井，平台的作用半径增加50%，泄油面积增加225%。

在某些情况下，采用水平井的开发方案能减少所需平台的数量。由于这个优越性很重要，所以在以后将要发表的一篇论文中，我们将要对其作专门分析。

四、获得的效果

有关油田水平井采油效果的文献寥寥无几。Sohio^[6]公司提出,它在普鲁德霍湾油田水平井的生产指数比约为4,其产量比也为同一比值^[7]。Elf^[8]公司宣布,它在意大利的水平井得到了少见的高生产指数比,生产指数提高数十倍,产量比约等于7。在北海,有些作业者已经获得了6—20的比值。在东方,已获得了约为6的比值。对在不同地区进行的13项水平井作业项目结果进行统计,平均比值接近5。

目前所获得的资料表明,理论预测与油田记录结果之间有着很好的一致性。

可以肯定,那些已经将水平井投入工业性生产(主要在1986年和1987年,见图1)的作业者们,目前还没有获得有关这些井生产动态的充分资料,或者尚不希望发表其作业结果。

五、技术局限性

仅从油藏的生产方面来看,水平井的应用只有很少的技术局限性。然而有一个局限性很重要。即必须具有垂向渗透性(即使很小)。

很容易想象,如果垂向渗透率为零,那么直井就从所射孔的油层厚度上产油,同样,水平井也在这个厚度上产油,只不过在这时油层厚度即是井眼的直径。这就说明,在多层油藏中不宜采用水平井。尽管如此,在多层油藏中仍然有一些可以采用水平井的情况,但其使用方式不同。例如当可以进行多层压裂时,就可以采用水平井,不过不是作为直接生产设施使用,而是作为裂缝的支撑物。

从钻井角度考虑,技术局限性在于所能获得的井眼几何形状。油藏深度、所钻水平井段长度、所希望的水平位移都是必须对应于可以使用的钻井设备进行仔细研究的钻井参数。实践中,水平井深度从300米或更小到3000米以上不等。而Esso公司在加拿大已钻出长超过1200米^[9]的水平井。

尽管在硬地层中更容易钻水平井,但这并不妨碍在未胶结地层中钻水平井。

六、水平井钻井成本

水平井钻井的成本高于直井或斜井的钻井成本,其简单理由有二:

- (1) 总钻井长度较大;
- (2) 每钻一米井眼的成本较高。

第一条理由是显而易见的,只要比较一下在平均水平位移相同时的钻井长度,即可明白这一点。假设水平泄油段长450米,其中点为油藏中斜井的终点,利用图3中的曲线,可以计算水平井和斜井的钻井长度,即造斜点(KOP)以下的长度。例如,一口水平位移为750米、斜度为35°的斜井,在造斜点以下的钻井长度为1500米,而水平井为2030米,即长度比为1.35。如果加上造斜点处的深度(1000米),那么比值变为1.21。计算表明,造斜点以下用水平位移表示的钻井长度比值在1.25—1.5之间,目标油藏越深,长度比值越小。

图3中的曲线图是用于评价水平井的快速方法,其用法如下;

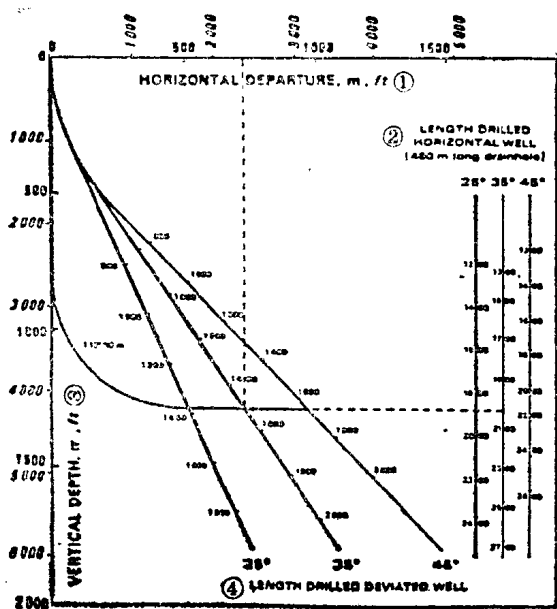


图3 计算水平井长度的示意图

①水平位移, 米 (英尺); ②水平井钻井长度 (水平泄油段长450米); ③垂向井深, 米 (英尺); ④斜井钻井长度

我们用水平井开发可能需要的成本。图4给出了根据Sohio^[10]和Arco^[11]公司的典型资料计算的各种作业的每钻一米井眼的成本比值(水平井/直井)。该曲线表明, 水平井钻井成本很快减小, 趋于接近直井或斜井的成本。这个趋势可用这样一个事实来解释: 用与钻斜井相同的钻具钻水平井, 其附加费用主要是因缺乏经验所致。

因此, 根据油藏深度的大小和作业者与其承包商的经验多寡, 用于海上开发的水平井的附加费用为“标准”井成本的20—70%。

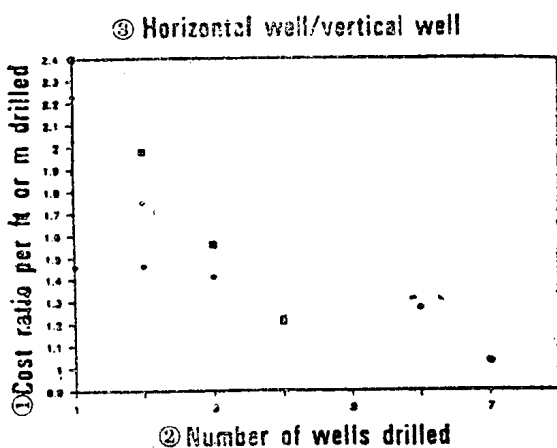


图4 钻一米井的成本比

①每米钻井长度的成本比; ②所钻井数; ③水平井/直井

产量。在此初步分析中, 建议不考虑采收率增加所造成的影响, 也不考虑与平台作用半径有

首先给出油藏深度和所要求的水平位移, 确定出参照斜井的造斜点深度和斜角。可能会有几种解, 但必须根据可能的造斜点深度和目标成本 (最小钻井长度、钻井的难易程度等), 从中选择一种解。

然后, 利用此图确定出水平钻井段长度; 再根据此长度导出总钻井长度之比。

当然, 在进行更详细的可行性研究时, 必须对可能的各种钻井轨迹进行研究, 并在制定开发方案时加以考虑。总之, 用该图可以很快地得到有意义的长度比值的数量级。

在评价水平井钻井成本时, 需要对每钻一米井眼的成本和总钻井长度进行评价。每钻一米井眼的成本似乎与作业者所具有的经验关系颇大。不幸的是, 有关这种成本发表的数据很少。事实上对于一系列井作业的部署来说, 关键的一点是要确定钻一条经验曲线, 这个曲线本身就能告诉

七、水平井对海上开发工程经济效益的影响

为了确定水平井对海上采油的经济影响, 必须首先确证影响海上开发成本的关键参数。

两个主要成本构成为: 基本建设成本 (Capex) (与投资相对应) 和作业费用 (Opex)。用水平井替代直井或斜井时, 这两项成本要受影响。

1. 全面开发情况

水平井的主要作用是减少获得相同产量所需的井数或在井数相同的情况下增加

关的影响。

因此, 必须研究井数和产量水平对基本建设成本和作业费用的影响。

为了进行这一研究, 我们选择了一个作业模型, 其气候条件和水深与实际情况类似。以 Thomas^[12] 论文中的数据为基础, 我们选择了在北海进行的28个作业项目作为分析对象。这些作业项目的特点如表1所示。有些成本数据按照1987年9月提出的 Wood—Mckenzie 方法进行了校正。

为了研究对基本建设成本的影响, 第一步我们将钻井成本从总成本中扣除以消除其影响, 因为钻井成本的影响是不均匀的。总地面成本(非钻井成本)似乎与井数有很大关系, 但不仅仅与井数有关, 它还与产量水平有关。

对28个作业项目的数据进行统计分析, 得出了一个地面成本的简单模型, 其表达式如下:

$$Sc = 0.02N_w^2 + 6N_w + 9.2 \times 10^{-3}Pr \quad (1)$$

利用表2, 我们将实际成本与计算成本进行了对比。图5给出了这两者之间的关系曲线。对有些项目来说, 这两者之间的差别相当大。尽管存在这些差别(一般可以进行解释), 但用这个简单模型研究这些成本对所采用参数的敏感性似乎仍然具有很好的代表性。

表2表明, 钻井成本一般占总成本的10—40%。

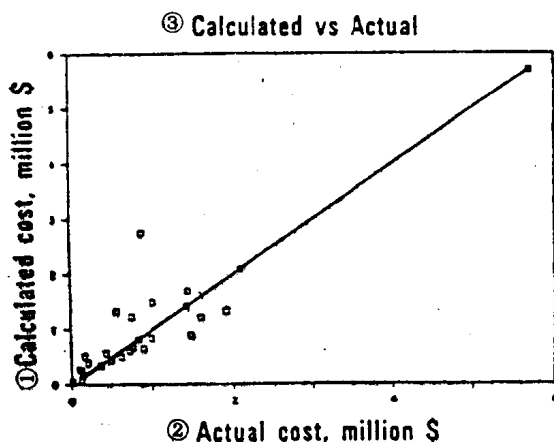


图5 计算和实际地面成本的关系

①计算成本, 10^6 美元; ②实际成本, 10^6 美元;

③计算与实际成本的关系

对每年的作业费用也进行了同样的分析, 其分析模型为:

$$Op = 0.08Sc + 9.10^{-5}Pr \quad (2)$$

表2给出了这一分析结果。

关于这些成本, 还可以参考 Chimi-ssso和Morini^[13] 的论文, 他们得到的成本对井数的敏感程度与我们在此得到的结果相似。

可以看出, 利用这些简单模型, 我们可以对用水平井开发和用常规井开发进行一些经济对比。对比时假设水平钻井的附加费用占直井钻井成本的40%, 并且给出下述不同参数值:

(1) 单井产量比(水平井/直井或斜井);

(2) 替代比(替代一口水平井的直井或斜井数);

(3) 钻井成本与总成本之比。

比较结果用参照直井或斜井的峰值产量的形式给出。

图6示出了总成本(钻井成本+地面成本)之比, 此时 $Rq=4$, $Rr=4$, 此图表明油田的总产量得到了保持。我们看出, 单井产量越低, 基本建设成本的节省额就越大, 这个节省额随着钻井成本占总成本比例的增加而增加。这个计算是对一个标准的16口井开发项目进行的。方程(1)中, N_w^2 项的影响较小。图6中的总成本比值随项目井数的变化很小。作业者可以选用水平井来增加产量。这时可以得到大于1的比值(如图7所示)。在图7中, 产量比为4, 替代比为2, 因而产量翻了一番。

表1 来自北海海上油田的基础资料

(所有成本的单位均为10⁶美元)

油 田 名 称	井 数		峰值产量 10 ³ 桶 (油) / 日	基本建设成本		每年的作用费用
	总计	生产		钻井	总成本	
Auk	12	12	48	124	292	28
Balmoral	19	13	35	217	710	84
Beatrice	46	32	54	334	1160	84
Beryl	62	39	105	957	2380	120
Brent	144	88	480	1469	7164	543
Buchan	8	8	32	92	451	58
Claymore	44	22	100	247	994	84
Clyde	23	12	50	200	919	94
Cormorant	59	41	180	1054	3140	150
Cyrus	2	2	7.5	59	184	10
Duncan	4	4	15	78	217	17
Dunlin	38	31	116	317	877	78
Eider	14	7	45	84	701	27
Fulmar	32	20	160	361	1804	132
Heather	37	26	34	242	668	42
Highlander	3	3	28	147	251	65
Hutton	30	18	75	311	1795	92
Hutton NW	30	20	51	377	1136	105
Innes	1	1	5	35	50	2
Magnus	20	13	130	259	2171	134
Maureen	19	12	78	284	1269	70
Montrose	21	15	28	68	276	52
Murchison	27	14	112	317	1920	142
Minian	102	63	307	848	3515	209
Piper	33	23	274	194	1069	109
Scape	9	6	22	92	217	48
Tern	23	13	55	284	1169	60
Thistle	48	32	125	345	1353	104

表2 计算和实际地面成本与作用费用

(所有成本均以10⁶美元为单位)

油 田 名 称	钻井成本/总成本	地 面 成 本		每年的作业费用	
		实 际	计 算	实际	计算
Auk	0.425	168	516	28	18
Balmoral	0.306	493	443	84	43
Beatrice	0.288	826	815	84	71
Beryl	0.402	1423	1415	120	123
Brent	0.205	5695	5695	543	499
Buchan	0.204	359	344	58	32
Claymore	0.248	747	1223	84	69
Clyde	0.218	719	609	94	62
Cormorant	0.336	2086	2080	150	183
Cyrus	0.321	125	81	16	11
Duncan	0.359	139	161	17	12
Dunlin	0.361	560	1324	78	55
Eider	0.120	617	502	27	53
Fulmar	0.200	1443	1686	132	130
Heather	0.362	426	562	42	37
Highlander	0.586	104	276	65	11
Hutton	0.173	1484	888	92	125
Hutton NW	0.332	759	667	105	65
Innes	0.700	15	52	2	2
Magnus	0.119	1912	1324	134	165
Maureen	0.224	985	839	70	86
Montrose	0.246	208	392	52	19
Murchison	0.165	1603	1207	142	138
Minian	0.241	2667	3644	209	241
Piper	0.181	875	2741	109	95
Scaps	0.424	125	258	48	12
Tern	0.243	885	655	60	76
Thistle	0.255	1008	1484	104	92

为了进一步评价钻井对海上开发项目的经济影响, 考虑到计算的复杂性和参数量较多, 必须研究典型情况。我们定义了下述“典型”情况:

- (1) 在15年中可采油量: 162×10^6 桶;
- (2) 采出程度: 12%;
- (3) 油藏初始产能: 64000桶(油)/日;
- (4) 钻井成本与总成本之比: 30%;
- (5) 水平井钻井与直井钻井成本之比: 1.4。

以下列参数为基础, 计算15年间采出油的技术成本:

- (1) 参照直井/斜井的产量: 1000—4000桶(油)/日;
- (2) 水平井产量与参照井产量之比: 4~2。

其分析结果见表3和图8。

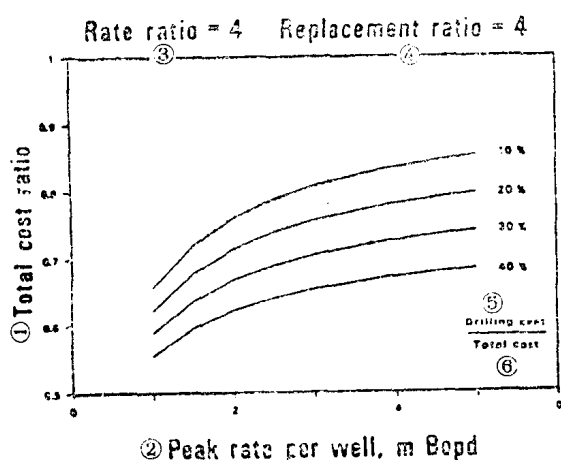


图6 总成本之比, 产量比=替代比=4

①总成本之比; ②单井峰值产量, 10^3 桶(油)/日; ③产量比=4; ④替代比=4; ⑤钻井成本; ⑥总成本

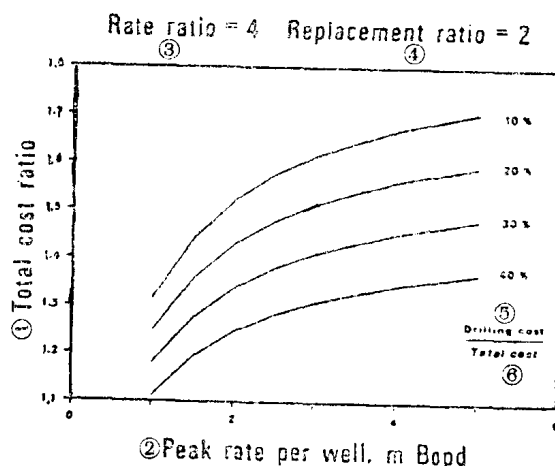


图7 总成本之比, 产量比=4, 替代比=2

①总成本之比; ②单井峰值产量, 10^3 桶(油)/日; ③产量比=4; ④替代比=2; ⑤钻井成本; ⑥总成本

表3 在采出程度为12%时
产出油的技术成本(美元/桶)

单井产量, 桶(油)/日	直井或斜井	水平井		
		R=4	R=3	R=3
1000	23.15	13.79	14.97	17.40
1335	20.30	13.13	14.08	16.00
2000	17.69	12.50	13.23	14.69
3200	15.87	12.05	12.61	13.75
4000	15.29	11.90	12.42	13.45

注意: R=产量比=替代比

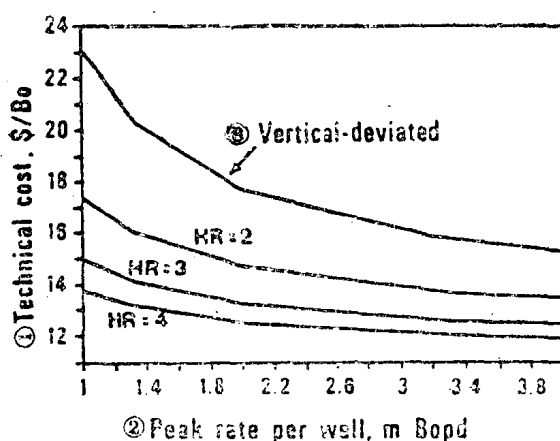


图8 产出油的技术成本

①技术成本, 美元/桶(油); ②单井峰值产量, 10^3 桶(油)/日; ③直井-斜井

从图 8 和表 3 可以看出, 水平井使产出油的技术成本降低 2—9 美元/桶 (依特定情况而定)。参照井产量越低, 这个节省额越大。

对于替代比小于产量比的情况, 换句话说, 如果想要增加产量水平, 那么其结果就不太有利, 因为在这种情况下, 采油速度增加只能部分地补偿因增加产量而增加的地面成本。

如果钻井成本与总成本之比增加, 其结果就更有利。反之, 如果前者减小, 其结果就变得不利了。

当解释这些结果时, 必须小心谨慎, 因为这种开发情况可能都有自己的特点, 所获得的结果与所选成本模型的关系极大。例如, 如果作业费用与地面成本只与产量水平有关, 那么只能在钻井成本中获得一些成本节省额。表 4 给出了在这一假设下的计算结果 (图 9), 其节省额较小, 约为 1—2 美元/桶。如果钻井成本与总成本之比降低, 那么这个节省额可能变得无足轻重了。这样的例子并不少见。实际上, 如果最初设计和建造的地面设备是以直井或斜井开发为依据, 尔后又将其变成用水平井开发, 那么总节省额比一开始就按水平井开发设计所得到的节省额小。

这一点说明了从项目之初就对水平井开发的可行性进行研究的重要性。

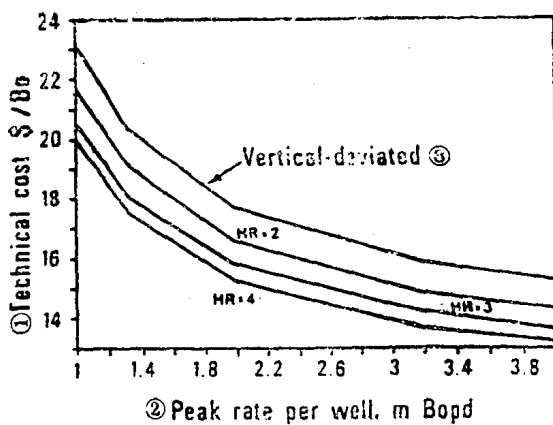


图 9 只考虑地面成本时以产量水平表示产出油技术成本

①技术成本, 美元/桶; ②单井峰值产量, 10^3 桶 (油) / 日; ③直井—斜井

表 4 采出程度为 12% 时仅考虑地面成本时的产出油技术成本 (美元/桶)

单井产量 桶(油)/日	直井或斜井	水 平 井		
		R=4	R=3	R=2
1000	23.15	19.95	20.55	21.67
1335	20.30	17.50	18.00	19.01
2000	17.69	15.26	15.78	16.57
3200	15.87	13.69	14.21	14.87
4000	15.29	13.20	13.64	14.32

注意: $R = \text{产量比} = \text{替代比}$

表 5 采出程度为 12% 时每套浮式系统上有两口生产井情况下的产出油技术成本 (美元/桶)

单井产量 桶(油)/日	直井或斜井	水 平 井		
		R=4	R=3	R=2
1000	52.87	14.05	18.62	27.77
2000	26.59	10.40	10.90	14.05
3000	17.84	9.90	10.23	10.90
4000	13.46	9.65	9.90	10.40

2. 加密开发情况

在这类项目中, 钻加密井通常被认为是边际作业。大部分地面投资已经投入, 新的投资常常只限于用于钻加密井。

在这样的情况下, 如若泄油条件允许, 将钻井成本乘以 1.4, 产量乘以 4, 显然在经济上是合算的。尤其是在某些情况下, 可以将现有常规井进行大修而将其变成水平井。在常规井已进行过水驱的情况下, 这一转换能获得成功。如果平台和水驱前缘相对位置允许,

人们最感兴趣的是利用大修作业将水平泄油井眼位置变高。

在这种情况下，作业者具有很大的优越性，即他们对油藏动态已了解得很透彻。

3. 早期生产系统情况

当油藏资料不充分，不能确证全面开发方案时，或者在使用可动式生产设施采油由于生产筹建时间长，而在经济上比较优越时，就用水平井进行早期开发。

一种方法是用油轮作为浮动基座，但此法要求至少获得最小经济产量。我们用下述数据为基础进行分析：

- (1) 油轮及其设备的成本： 100×10^6 美元；
- (2) 钻井成本： 6×10^6 美元/井；
- (3) 作业费用：同模型 (2)；
- (4) 两口生产井；
- (5) 五年后油轮的残值：60%；
- (6) 不扩建油轮设施情况下的最大产量：10000 桶 (油) / 日。

在这种情况下，我们选择用两口水平井替代两口斜井，其产量比为 4—2，在考虑产量较高的情况下，重新计算了水平井的作业费用和油轮成本。

表 5 给出了以参照斜井产量表示的结果。我们可以看到：

- (1) 这类项目要获得较低的产油成本，则要求较高的单井产量：在产量为 3500 桶 (油) / 日时，成本为 18 美元/桶，当产量为 5000 桶 (油) / 日时，成本为 10 美元/桶。

在不同具体情况下，用水平井可使上述经济极限降低 1 倍到 2/3 倍。

藉下述事实对这些好结果尚易作出解释：即非钻井投资高，且与产量水平的关系极小。这类项目 (或是早期生产，或是边际油藏开发)，也许是应用水平井的最佳情况。

八、结 论

水平井采油是一项目前正进入工业应用阶段的技术。在海上，该技术可以取得下述效果：

- (1) 降低基本建设成本和作业费用；
 - (2) 可以开采用常规采油方法开采处于经济边缘的油藏。
- 应用水平井开发的最佳情况是：

- (1) 在钻井成本占基本建设成本比例高 (30—40%) 时；
- (2) 在产量水平对成本的影响小的情况下。

符 号 说 明

- h — 油藏产层厚度；
- k — 油层渗透率；
- l — 敞开生产的水平段长度；
- Sc — 地面成本， 10^6 美元；
- N_w — 井数；
- P_r — 峰值产量，桶 (油) / 日；
- O_p — 每年的作业费用， 10^6 美元/年。

参 考 文 献

1. Bosio, J.C., Fincher, R.W., Giannesini, J.F., Matten, J.L. : "Horizontal Drilling - A New Production Method". Paper presented at the Twelfth World Petroleum Congress, Houston 1987.
2. Giger, F.M., Reiss, L.H. : "The Reservoir Engineering Aspects of Horizontal Drilling". 59th Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, September 16-19, 1984. SPE 13024.
3. Giger, F.M. : "Horizontal Wells Production Techniques in Heterogeneous Reservoirs". SPE 1985 Middle East Oil Technical Conference and Exhibition, Bahrain, March 11-14, 1985. SPE 13710.
4. Giger, F.M. : "Réduction du nombre de puits par l'utilisation de forages horizontaux". Revue de l'Institut Français du Pétrole, Mai-Juin 1983.
5. Joshi, S.D. : "Augmentation of Well Productivity Using Slant and Horizontal Wells". 61th Annual Technical Conference and Exhibition New Orleans, Louisiana, October 5-8, 1986. SPE 15375.
6. Sherrard, D.W., Brice, B.W., McDonald, D.G. : "Application of Horizontal Wells at Prudhoe Bay". 61th Annual Technical Conference and Exhibition New Orleans Louisiana, October 5-8, 1986. SPE 15376.
7. Petzet, A.G. : "Prudhoe Bay Horizontal Well Yields Hefty Flow". Oil & Gas Journal, February 17, 1986.
8. Reiss, L.H. : "Horizontal Wells Production After Five Years". 60th Annual Technical Conference and Exhibition Las Vegas, Nevada, September 22-25, 1985. SPE 14338.
9. Moore, S.D. : "Horizontal Drilling a Success at Norman Wells". Petroleum Engineer International, September 1987.
10. Wilkerson, J.P., Smith, J.H., Stagg, T.O., Walters, D.A. : "Horizontal Drilling Techniques at Prudhoe Bay, Alaska". 61th Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, October 5-8 1986. SPE 15372.
11. Clary, M.M., Stafford, T.W. : "MWD Performance and Economic Benefits in the ZU Horizontal Drilling Program". SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, March 15-18, 1987. SPE/IADC 16171.
12. Thomas, W.A. : "North Sea Field Developments : Historic Costs and Future Trends". Journal of Petroleum Technology, November 1986.
13. Chimisso, C., Morini, N. : "Preparing the Ground for Deep Sea Production : Development of Floating and Underwater Production Systems for Deepwater Conditions". Paper presented at the Twelfth World Petroleum Congress, Houston 1987.

(译自 OSEA88127)

水平井应用新进展

一、世界水平井应用的成功经验

Haraldur Karlsson 等著
Lateral Drilling

宋文宁 摘译
司艳蛟 校

随着水平钻井技术的发展及实践经验的积累,水平钻井已成为提高产量、解决各类完井问题的重要工具。

自从80年代初以来,全世界已有700多口油、气井利用水平井来提高产量,其中仅1988年就钻水平井近200口。正如图1所示,由于各服务公司开发并提供了新的水平井钻井和采油技术,致使人们对水平钻井的兴趣迅速增加。

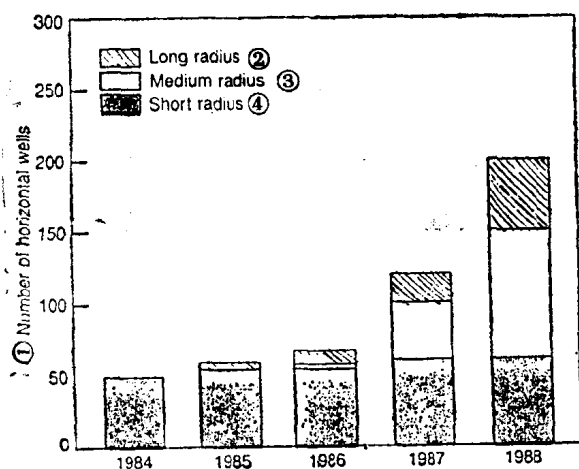


图1 自1984年以来,短曲率半径水平井井数基本稳定,而中等曲率半径和长曲率半径水平井井数增长很快,1988年水平井井数为1984年的四倍

①水平井井数; ②长曲率半径; ③中等曲率半径; ④短曲率半径

目的。在科罗拉多、新墨西哥及宾夕法尼亚州,已将水平井用于开采煤层甲烷气。

在加拿大,大部分水平井与注蒸汽直井结合起来,用于提高重油的产量。在欧洲北海荷兰海域,应用水平井减轻水的锥进问题。在丹麦,应用水平井开发裂缝性白垩储集层。在意大利Rospo Mare油田,应用水平井开发低孔隙度、多裂缝的石灰岩储层。在法国,应用水平井提高天然裂缝性储层开发后期的产量。

同时,各石油公司研究出了适于水平井的储层评价方法。而各石油公司的生产部门又在完井技术及采油工艺方面取得了经验。

美国的大部分地区目前均已钻了水平井。水平井主要用来开发天然裂缝性储层。如得克萨斯州的奥斯汀(Austin)白垩地层、威利斯頓(williston)盆地的巴肯(Bakken)页岩层。西得克萨斯州的斯普拉波雷(Spreberry)地层以及东部各州的泥盆系页岩层。另外,为了开采密歇根州尼亚加拉(Niagaran)岩礁储层及非均质的安特里姆(Antrim)页岩储层,也钻了许多水平井。

在阿拉斯加和加利福尼亚州,在油—水接触面之上优选一垂向深度,然后钻一长水平井眼,从而达到减小底水锥进的目的。

其它一些欧洲经营者，通过在一个阶梯式直井眼的不同深度处，打两口水平井眼，从而开发两个较薄的储层。最近，在北海英国海域，应用长曲率半径水平钻井技术，用一台半潜式钻机，钻了一口水下水平井，用来开发海上边际油藏。挪威的一些经营者，则正在考虑应用水平井开发分布范围广、用常规直井开采没有工业价值的薄储层。

在中东地区，应用水平井提高均质、低渗储层的产量。

在远东地区的近海油田，已钻了大量的水平井，其水平井段长达2500英尺，用于开发较薄的页岩储层。在澳大利亚，用水平井开发裂缝性页岩储层显示了前景。

就常规钻井项目而言，许多石油公司不愿泄漏自己的产量数据。因而，经营者和合伙人对大部分水平井生产数据保密也就不足为怪了。表1列出的是一份水平井增产报告单。它虽然不是一项十分科学的调查，但它至少可以说明，水平井已在全世界范围内各个油田中的各种应用，已经成功地提高了油田产量。

表1 世界水平井增产实例

地理位置	经营者	水平段长度及用途	增产情况及资料来源
美国 密歇根州	Trendwell 石油公司	251英尺， 开发尼亚加拉礁岩	使干井成为日产613.3桶油和607.4千英尺 ³ 气的生产井 见《油气杂志》1986年6月9日号
美国 犹他州	Skyline 石油公司	两口水平井：穿入 垂向裂缝性储层的 长度分别为220英尺 和476英尺	采用水平井二次完井后，使无产能井两年内的产量超过8.5万桶，7口无产能的直井中的6口井成为重要生产井 见《西方世界石油》1986年2月号
丹麦	MAERSK	1500—2500英尺， 开发白垩储层	水平井初产量是附近直井产量的2—4倍 见《瓦尔德岸/近海通讯》1988年8月号
英国北海 赛勒斯	英国 石油公司	1850英尺， 开发边际油田	初始试油产量为6000桶/日，比常规井的期望产量高得多 见《钻井承包商》1988年10—11月号
美国 威利斯顿 盆地	Meridian 石油公司	2000—3000英尺， 开发裂缝性页岩储层	水平井每天产油258—275桶，产气11—30万英尺 ³ ；而附近的直井每天仅产油约60桶，产气3.5万英尺 ³ 见《油气投资者》1988年12月号