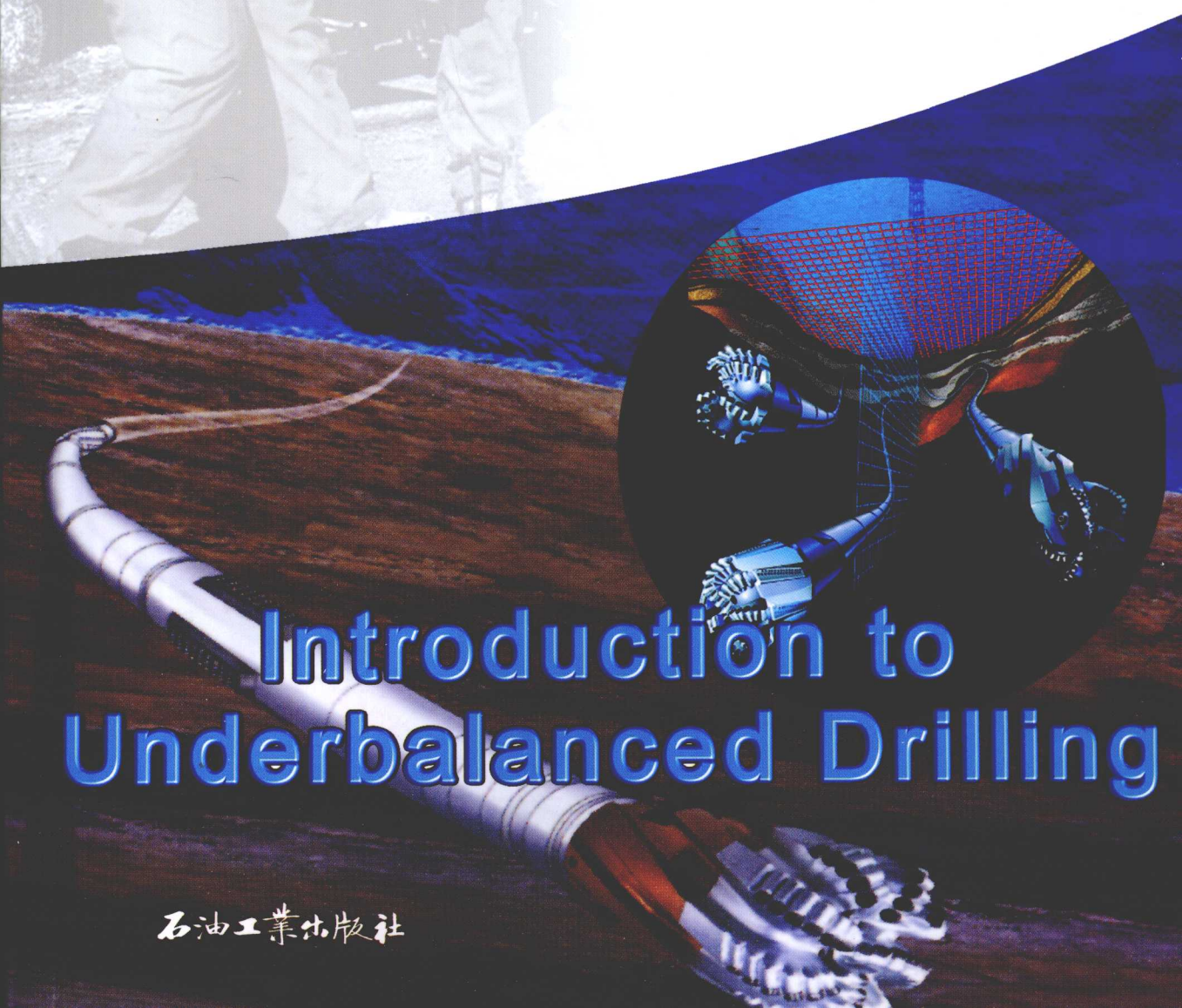




Weatherford®

# 欠平衡钻井技术

〔荷〕 Steve Nas 等著  
孙振纯 杜德林 编译



Introduction to  
Underbalanced Drilling

石油工业出版社



**Weatherford**

# 欠平衡钻井技术

〔荷〕 Steve Nas 等著  
孙振纯 杜德林 编译

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书用简练的语言全面系统地介绍了欠平衡钻井的定义, 如何进行欠平衡钻井, 详细钻井设计, 人员培训与选择, HSE 规划, 主要的欠平衡钻井服务公司等内容。本书注重理论与实践相结合, 在系统介绍欠平衡钻井基本概念和理论方法的同时, 提供了大量现场设备照片, 方便了读者理解相关内容。

本书适合从事油气勘探、钻采工程、油气田开发工程、应用化学的技术人员以及相关研究院所的科研人员、高等院校师生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

欠平衡钻井技术 / [荷] Steve Nas 等著; 孙振纯, 杜德林编译.

北京: 石油工业出版社, 2009.11

书名原文: Introduction to Underbalanced Drilling

ISBN 978-7-5021-7353-1

I . 欠…

II . ①纳…②孙…③杜…

III . 油气钻井—技术

IV . TE249

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 160594 号

本书经 Weatherford International 授权出版, 中文版权归石油工业出版社所有, 侵权必究。

著作权合同登记号: 图字 01-2009-3466

All rights reserved. No part of this book may be reproduced, stored in a retrieval system, or transcribed in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying or recording, without the prior permission of the publisher.

---

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](http://www.petropub.com.cn)

编辑部: (010) 64523694 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

---

2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 7

字数: 176 千字

---

定价: 50.00 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

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 编写目的 .....	1
1.2 提速钻井 .....	1
1.3 控制环空压力钻井 .....	2
1.4 欠平衡钻井的定义 .....	3
1.5 欠平衡钻井的历史 .....	4
1.6 进行欠平衡钻井的原因 .....	5
1.7 欠平衡钻井与过平衡钻井的对比 .....	6
1.8 欠平衡钻井的缺点和局限性 .....	7
1.9 欠平衡钻井分级体系 .....	8
<b>2 如何进行欠平衡钻井</b> .....	<b>10</b>
2.1 数据收集 .....	10
2.2 评价 .....	14
2.3 欠平衡钻井的可行性 .....	17
<b>3 详细钻井设计</b> .....	<b>19</b>
3.1 循环系统设计 .....	19
3.2 流动模型 .....	37
3.3 钻柱及井下工具设计 .....	52
3.4 设备选择 .....	60
3.5 井控策略 .....	76
3.6 人员选择 .....	81
3.7 培训和资格 .....	82
3.8 作业程序 .....	83
3.9 欠平衡井的完井 .....	85
3.10 井下作业 .....	87
3.11 工艺流程图 .....	88

3.12 钻机与工区布置 .....	89
3.13 健康、安全和环境规划 .....	89
3.14 详细成本估算 .....	90
3.15 欠平衡钻井方案 .....	91
<b>4 重要的欠平衡钻井事件 .....</b>	<b>93</b>
<b>附录 1 欠平衡钻井服务公司 .....</b>	<b>95</b>
<b>附录 2 常用缩写 .....</b>	<b>96</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>97</b>

# 1 绪论

本书旨在为读者介绍当今欠平衡钻井技术的概况，不打算包罗万象。它可以作为欠平衡钻井技术的指南，阐明怎样、何时，以及为什么要进行欠平衡钻井。

## 1.1 编写目的

本书的编写目的是为了促进读者对欠平衡钻井技术和相关作业的了解，同时它也提供了风险识别与评估的基本知识。在绪论中还简短介绍了控制环空压力钻井和提速钻井，以期对欠平衡钻井和相关技术做一个完整的综述。

目前威德福公司欠平衡钻井部门可以提供三种技术服务，即提速钻井、控制环空压力钻井、欠平衡钻井（图 1.1）。

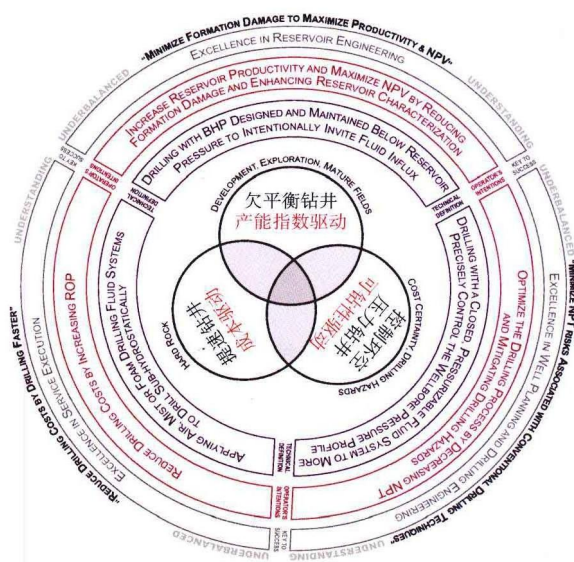


图 1.1 威德福公司可提供的三种钻井技术服务

- 提速钻井 (PD)。

该项技术旨在通过尽可能降低井眼压力而实现最大机械钻速。

- 控制环空压力钻井 (MPD)。

该项技术旨在精确地管理和控制环空压力，使井底压力很接近于孔隙压力。

- 欠平衡钻井 (UBD)。

该项技术旨在减轻地层伤害、发现可能被遗漏的油层、增加储量，最终可以提高净现值 (NPV)。欠平衡油气藏钻井时可以边钻进边试采。

## 1.2 提速钻井

提速钻井是早期经常采用的用来提高机械钻速的钻井技术（图 1.2）。在提速钻井过程中，

井底压力应尽可能低，以提高钻井效率。

提速钻井过程中的地层压力与井底压力情况： $p_{\text{地层}} \gg p_{\text{井底}}$ ； $p_{\text{井底}} = p_{\text{液柱}} + p_{\text{摩擦}} + p_{\text{节流}}$ 。

提速钻井是通过提高机械钻速从而降低钻井成本，通常使用天然气、空气作为循环介质。降低井底循环压力可以大幅度提高机械钻速。

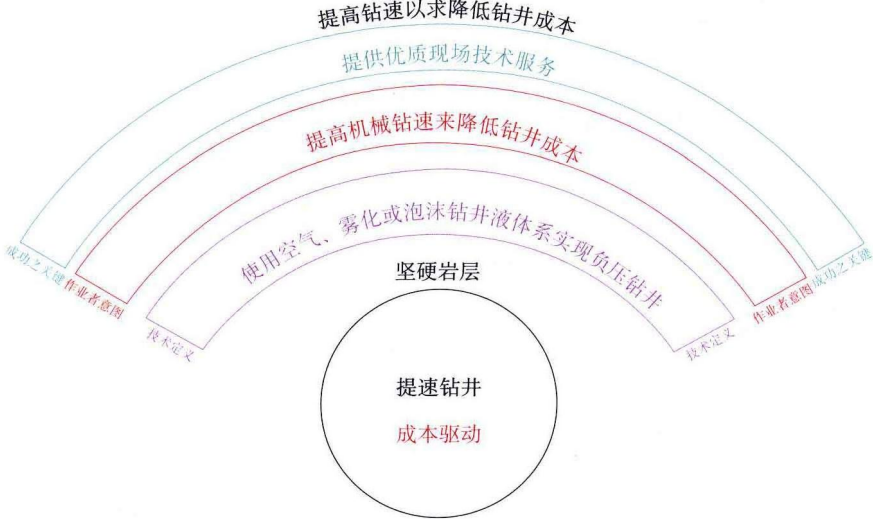


图 1.2 提速钻井的定义

### 1.3 控制环空压力钻井

随着欠平衡钻井的应用和发展，一些相关技术相继出现，控制环空压力钻井技术就是其中之一，其定义如下（图 1.3）。

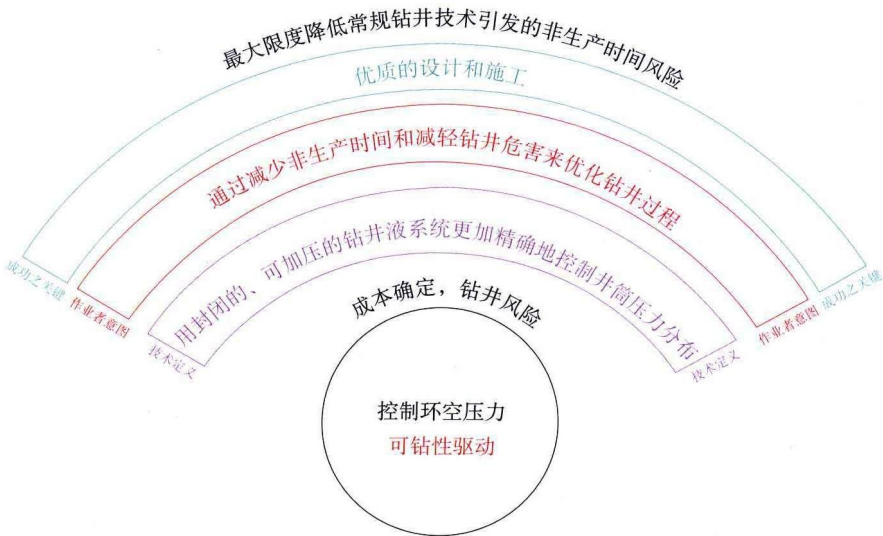


图 1.3 控制环空压力钻井的定义

控制环空压力钻井是一种改进的钻井工艺，用于精确控制整个井筒的环空压力剖面。其目的是对井下压力状况做到胸中有数，并据此控制环空液柱压力。

这就意味着可以随时对环空压力剖面进行控制，以便在任何时刻都能实现井中的压力平衡。

控制环空压力钻井过程中的储层压力与井底压力情况： $p_{\text{储层}} = p_{\text{井底}} = p_{\text{液柱}} + p_{\text{摩擦}} + p_{\text{节流}}$

#### 1.4 欠平衡钻井的定义

国际钻井承包商协会（IADC）的欠平衡钻井委员会对欠平衡钻井的定义如下（图 1.4）。

钻进中使用的静液柱压力人为地设计成低于所钻地层压力。静液柱压力可以自然低于地层压力，也可以人为实现。人为负压状态的形成，可通过向钻井液中加入天然气、氮气或空气实现。无论负压状态是人为的还是自然的，都可能会使地层流体流入井眼，必须将进入井眼的地层流体循环出来，并在地面加以控制。

这实际上意味着在欠平衡钻井过程中，为了让油气藏流体流入井眼，应把井眼中的当量压力总是维持在低于油气藏压力的水平。

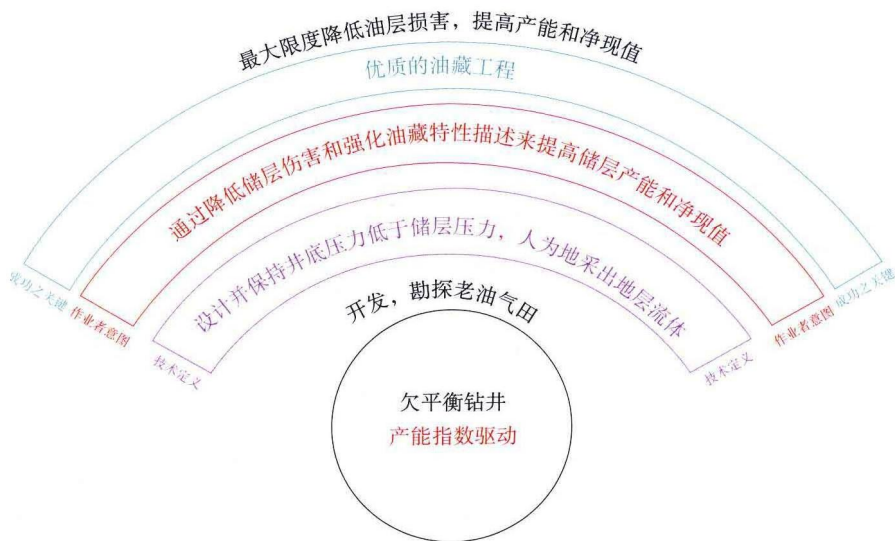


图 1.4 欠平衡钻井的定义

这三项技术使用的设备中有些是相同的，但设备的使用环境不同（图 1.5）。

本书主要讨论欠平衡钻井以及相关的设备和技术，提速钻井和控制环空压力钻井并不过多涉及。

在欠平衡钻井中，井眼压力总是维持在低于油气藏压力的水平，因此在整个钻井过程中都要仔细控制流入的油气藏流体。

欠平衡钻井过程中的储层压力与井底压力情况： $p_{\text{储层}} > p_{\text{井底}}$ ； $p_{\text{井底}} = p_{\text{液柱}} + p_{\text{摩擦}} + p_{\text{节流}}$ 。



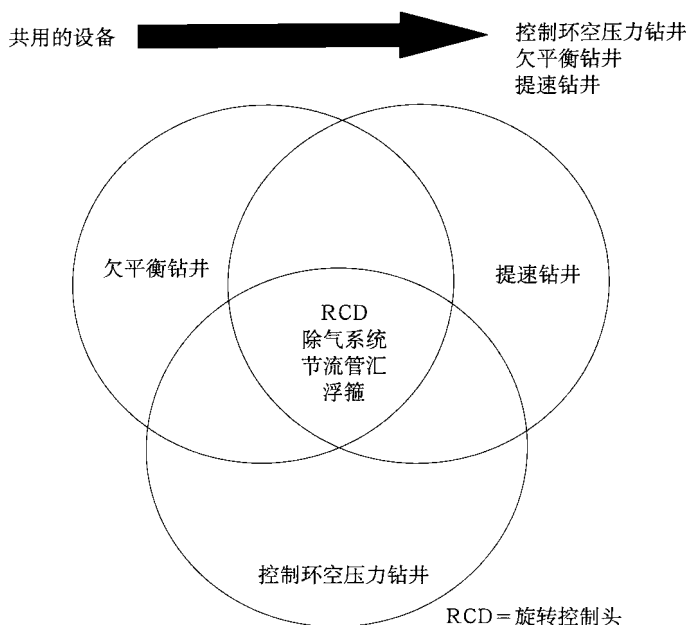


图 1.5 控制环空压力钻井、欠平衡钻井、提速钻井的共用设备

井底压力仍然处于受控状态，但该压力维持在低于油气藏压力的水平。一级井控不再单纯地由产生过压的静液柱来提供，而是由液柱压力、摩擦压力和节流压力的组合来控制流动。防喷器组作为二级井控屏障。必须指出的是，欠平衡钻井作业中仅仅依靠单一的屏障。

井底循环压力是静液柱压力、摩擦压力和地面节流压力的总和。

静液柱压力被认为是一个被动压力，是井眼中钻井液密度、钻屑和混入气体共同作用的结果。摩擦压力是一个动态压力（随开泵、停泵而变化），产生于钻井液的循环摩擦。

节流压力来源于从地面施加的环空回压。

这三个压力随时都要处于受控状态，在欠平衡钻进的同时，保证流体的流动也要得到控制。

较低的静液压头可以避免在油气藏表面形成泥饼，也可避免泥浆和钻屑侵入油气藏内部。这有助于提高产能，减少钻井施工中与压力有关的任何问题。

### 1.5 欠平衡钻井的历史

自从石油勘探开始以来，就有了欠平衡钻井。所有顿钻钻井都是欠平衡钻进的，我们中的大多数人都曾看到过钻遇油气藏时发生井喷的照片。1895年以前所有的油井都是欠平衡钻井完成的。

1895年投入使用的旋转钻井技术需要使用循环介质。起初使用的循环介质是清水，为强化施工安全和井眼清洁，1920年研发出了泥浆体系，继续施行过压钻进。

随着更深更大的油气藏被发现，油层保护问题变得不太重要了。直到20世纪80年代，才在奥斯汀灰岩钻出了第一口欠平衡井，拉开了20世纪90年代初在加拿大开始的现代欠平衡钻井的序幕（表1.1）。

表 1.1 钻井大事件时间表

时 间	钻井大事件
1284 年	在中国完成第一口顿钻井
1859—1895 年	所有井均是欠平衡钻进
1895 年	旋转钻井, 用水作循环介质
1920 年	首次使用泥浆体系
1928 年	首次使用防喷器组
1932 年	首次使用充气钻井液
1955 年	吹尘或空气钻井开始流行
1988 年	在奥斯汀灰岩欠平衡钻出了第一口高压气井
1993 年	在加拿大钻出了第一批欠平衡井
1995 年	在德国钻出了第一批欠平衡井
1997 年	在海上钻出了第一批欠平衡井

1997 年, 也就是第三届国际欠平衡钻井大会之后, 作业者之间的国际合作开始了。由于壳牌和美孚公司希望获得更多的信息以及加强合作, 成立了第一批委员会, 以保证海上油气井能够安全地进行欠平衡钻进。

1998 年, IADC 在欠平衡钻井的安全方面走在了前面, 成立了 IADC 欠平衡钻井委员会, 目的在于加强欠平衡钻井作业中的安全工作。该委员会制定了欠平衡钻井分类框架, 目前仍然在制定更加安全、更加高效的欠平衡钻井方法和程序。更好的流动模拟系统和培训系统与作业者之间经验共享相结合, 使得欠平衡钻井成为提高枯竭油田产量和评价新油田油气藏的主要技术之一。

## 1.6 进行欠平衡钻井的原因

应用欠平衡钻井的原因可以分为三大类 (图 1.6):

- 最大限度地减少钻井施工中与压力有关的问题。
- 减少油层伤害, 提高产能。
- 边钻进边进行油气藏描述。

应用欠平衡钻井的第一个原因常常是为了减少循环漏失, 避免压差卡钻等与压力有关的问题, 提高机械钻速。这些原因现在仍然广泛作为是否应用欠平衡钻井的决策依据, 但今天解决这些问题更好的方法是进行控制环空压力钻井。

应用欠平衡钻井的另一个原因是为了消除因泥浆、颗粒和滤液侵入油气藏所造成的油层伤害, 进而提高油气藏产能。因此, 降低表皮系数就成了选择欠平衡钻井的主要依据。

最近, 一些作业者为了边钻进边定性油气藏而使用了欠平衡钻井, 在钻进过程中就可以识别油气藏特征, 并且对井眼轨迹和井段长度进行优化, 以便提高油气藏产能并发现潜在产层。

作业者考虑欠平衡钻井的主要原因是为了避免在油气层钻进时出现问题, 尤其是油气藏开始枯竭, 井漏与压差卡钻概率的增加使得加密水平钻井更具有挑战性时。

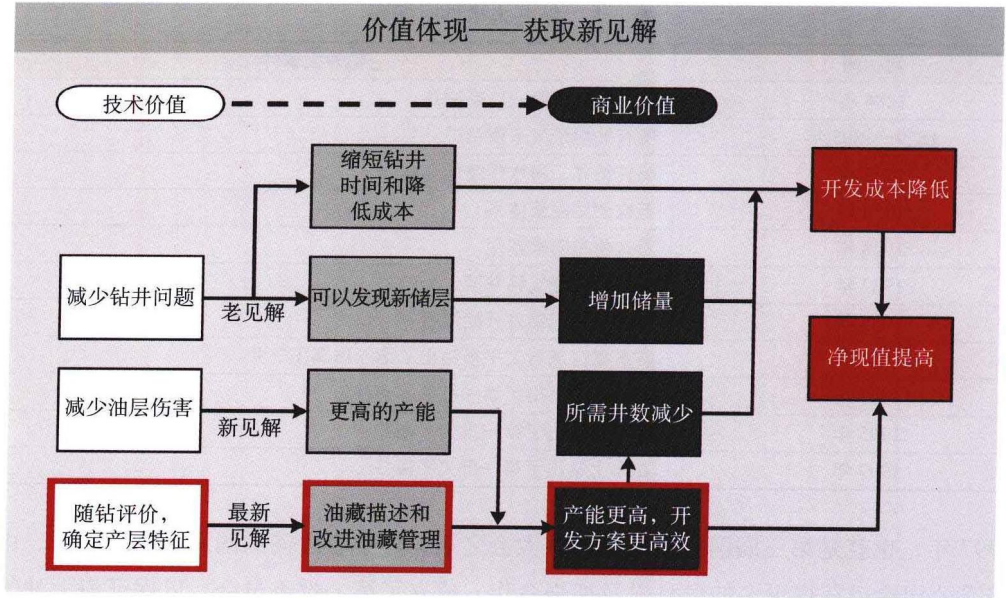


图 1.6 进行欠平衡钻井的原因

如果要在油气层中维持欠平衡，起下钻作业就会变得较慢并更为复杂，因此在油气层中钻进时，提高钻速从来都不是选择欠平衡钻井的主要原因。

人们发现在钻井和完井作业中维持欠平衡条件，可使油气藏的产能增加大约 300% (SPE 91559 期)。

随着实践经验的积累和更好的欠平衡系统的开发，油气藏描述成为作业者考虑使用欠平衡钻井的更主要原因。掌握储层的特征，如裂缝和高渗透夹层情况，可以降低钻井成本，提高储层产能 (图 1.7)。

世界上某些地区通过采用欠平衡钻井，原来因过平衡钻井而被遗漏的油气层被发现并且开发。

### 1.7 欠平衡钻井与过平衡钻井的对比

将过平衡钻井与欠平衡钻井加以对比，就能使我们认识到这两种技术之间的主要差别 (图 1.8)。

在过平衡钻井作业时，泥浆的侵入和井眼中的静液柱压力可能会掩盖潜在的产层。一旦开始采油，油层伤害常常难以消除或清洗，在水平井中尤其是如此。低孔低渗地层可能再也无法清洗，这可能导致很长的井段 (尤其是水平段) 没有产能。井漏和压差卡钻问题可能会十分严重，在枯竭油气藏中很多井可能根本无法钻达设计井深。

在欠平衡钻井作业过程中经常可以发现新的储层，由于对油层没有伤害或伤害很小 (包括致密井段)，因而可以提高产量。由于液柱压力低于油气藏压力，所以不会发生井漏和压差卡钻。

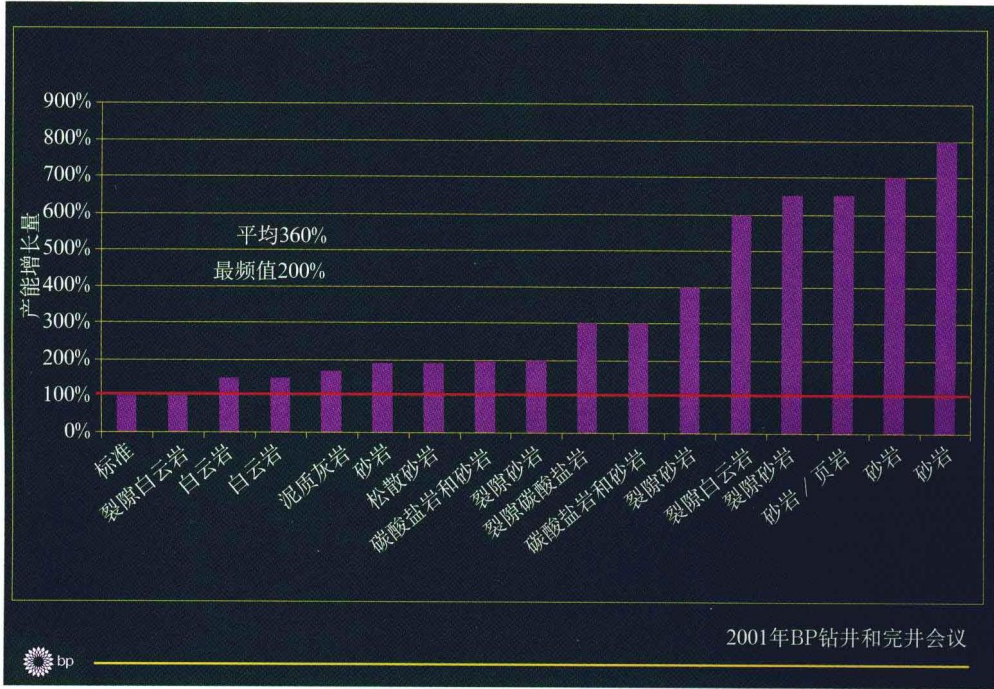


图 1.7 储层类型不同井的产能增长量 (据 BP, 2001)

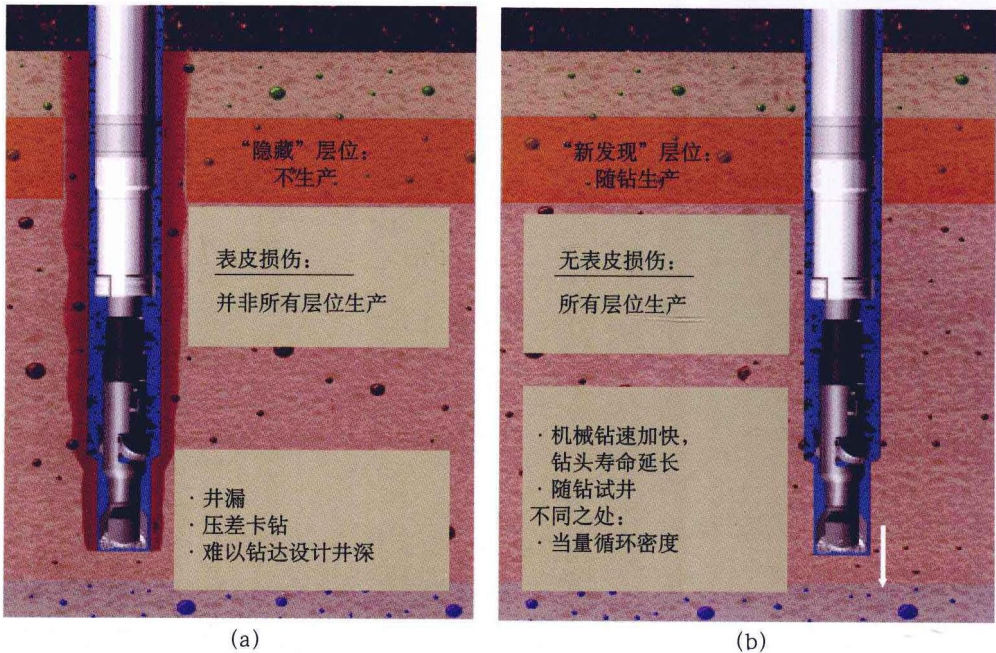


图 1.8 过平衡钻井与欠平衡钻井对比

(a) 过平衡钻井；(b) 欠平衡钻井

### 1.8 欠平衡钻井的缺点和局限性

欠平衡钻井有不少优点，同时它也有一些特定的缺点。将欠平衡钻井的优缺点进行比较，有

助于作业者进行考虑和选择（表 1.2）。

表 1.2 欠平衡钻井的优缺点

欠平衡钻井	
优点	缺点
减轻油层伤害	潜在的井眼稳定问题
消除压差卡钻	日费增加
降低井漏风险	由于其固有问题，一般来说风险较高
提高机械钻速	起下钻作业更复杂
延长钻头寿命	扭矩和摩阻可能上升
利于油气藏描述	钻井装备更复杂
	需要更多的人员

欠平衡钻井不是只有优点，在进行欠平衡钻井作业之前，也必须仔细考虑该技术的局限性。除了安全和经济方面，欠平衡钻井还有诸多技术上的局限性。

对欠平衡钻井可能产生不利影响的有下列因素：

- 井眼稳定问题。
- 由于流动控制和安全问题，深井、高压井、高渗透井可能很难钻进。
- 地层过量出水。
- 在井眼造斜点附近的高产层会对欠平衡条件造成不利影响。
- 不遵循公认的设计指南。
- 在有些钻井、完井作业过程中，需要靠静液柱压力压井。
- 小井眼环空压耗太高。
- 地层压力过高或岩性变化大。
- 作业者代表干涉欠平衡钻井专家决策。
- 含 H<sub>2</sub>S 井的作业更复杂，健康、安全、环保问题更突出。
- 产出液的处置。
- 产出气的燃烧。
- 冲蚀和腐蚀风险。

### 1.9 欠平衡钻井分级体系

国际钻井承包商协会（IADC）制定的分级体系有助于我们认识与欠平衡钻井相关的风险（表 1.3）。

关于欠平衡技术主要应用的分类，请参考表 1.4。

该分类体系将上面定义的风险级别（0 级至 5 级）与第二层次分类相结合，用来表明一口井是“欠平衡钻进”还是利用欠平衡技术用“低压头”钻进。为了提供一口井中一个或多个井段，或一个具体项目中的多口井所用技术的完整分类方法，还使用了第三层次分类代表所用的欠平

衡技术。

表 1.3 国际钻井承包商协会 (IADC) 欠平衡钻井分级体系

级 别	风 险
0 级	只是为了提高作业效率, 未钻遇油气层
1 级	井底压力不足以使地层流体自发地流到地面。井眼“天生稳定”, 从井控的观点看风险低
2 级	井底压力能够使地层流体自发地流到地面, 但使用常规压井方法可以控制, 即使设备完全失效, 造成的后果也不严重
3 级	当地热井与非油气井进行欠平衡钻井时, 最大关井压力低于欠平衡钻井设备的额定工作压力, 设备完全失效时会立即造成严重后果
4 级	当采油气井进行欠平衡钻井时, 最大关井压力低于欠平衡钻井设备的额定工作压力, 设备完全失效时会立即造成严重后果
5 级	最大预期井口压力超过欠平衡钻井设备的额定工作压力, 但低于防喷器组的额定压力, 设备完全失效时会立即造成严重后果

表 1.4 欠平衡钻井技术主要应用的分类

分 级	0		1		2		3		4		5	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
A = 低压头, B = 欠平衡钻井												
气体钻井	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
雾化钻井	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
泡沫钻井	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
充气钻井液	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
钻井液	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

分级体系应用示例: 在一个地质条件已知的区块钻一口井的水平段, 应使用充氮气的钻井液, 以便在油气藏段实现欠平衡。该井预期的最高井底压力为 3000psi<sup>①</sup>, 井口关井压力为 2500psi。该井的级别将定为 4-B-4, 根据表 1.4 可知其风险级别为 4, 采用欠平衡钻进, 使用介质为充气钻井液。

风险级别为 4 级或 5 级的所有欠平衡钻井作业, 都要进行精心策划, 以保证安全钻进。

可从 IADC 网站获得更多信息, 网址为: [www.iadc.org](http://www.iadc.org)。

① 1psi=6895Pa。

## 2 如何进行欠平衡钻井

在选择和收集设备之前，必须要选择好候选油气藏，确定正确的井位及合适的欠平衡钻井方法。

欠平衡钻井的难点之一就是在钻进的同时采出油气藏流体，要完全弄清楚与之相关的一些问题并非易事。

因为在钻进和起下钻作业中，需采取何种措施均应视油气藏情况而定，所以在常规钻井中一些做法现在都不再适用了。为了保证在欠平衡钻井作业开始之前将这些问题都考虑到，制定了欠平衡钻井项目管理路线图（图 2.1），设计了考虑问题的标准次序。该路线图能够为成功地进行欠平衡作业奠定基础。

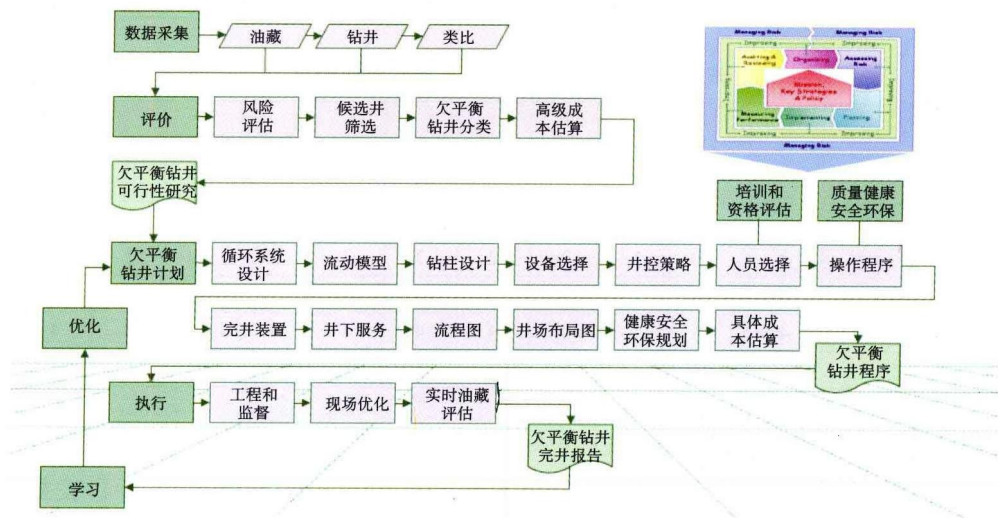


图 2.1 欠平衡钻井项目管理路线图

### 2.1 数据收集

为了弄清楚某个油气藏是否适合欠平衡钻井，需要收集和分析大量数据（图 2.2）。在欠平衡钻井项目的初期，就要确定项目实施的目的和原因。在项目准备期间，目的和原因必须是持续关注焦点。

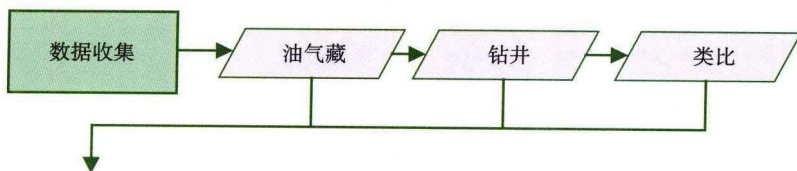


图 2.2 数据收集流程

#### 2.1.1 油气藏数据

油气藏数据收集是成功进行欠平衡钻井项目的第一步。欠平衡钻井通常未能实现预期目的的

原因是选择了不合适的油气藏，或是选用了不合适的钻井技术。到目前为止，尚没有一个简便而可靠的方法来筛选欠平衡钻井项目、找准项目中的难点，或量化地给出项目的预期结果。威德福的适合欠平衡钻井油气藏评价程序（Suitable Underbalanced Reservoir Evaluation，缩写为 SURE）和 SURE 工作小组完全改变了这一现状。SURE 使用油气藏筛选工具软件（Reservoir Screening Tools，缩写为 RST™）使得筛选过程大为简化，使用油气藏伤害评价软件（Reservoir Damage Assessment，缩写为 RDA™）提供深层次的分析，并能够生成一个以风险为基础的经济模型，以帮助决策。

SURE 程序中需要收集的油气藏数据包括：

- 油气藏埋深。
- 油气藏压力。
- 油气藏温度。
- 岩性。
- 有效厚度与总厚度的比值。
- 裂缝数据（是否为天然裂缝油气藏）。
- 油水界面 / 油气界面。
- 渗透率与孔隙度。
- 将会产出什么流体？
- 有无油气藏岩心分析数据？有无岩心可用于油气藏伤害分析？
- 从邻井可获得哪些生产数据？
- 将采用什么样的油气藏模型？
- 确定目的层位的根据是什么？

对一个特定油气藏收集的信息越多，能够进行的分析就越彻底，而分析的目的是确定该油气藏采用欠平衡钻井是否有益。

#### 2.1.1.1 油气藏筛选工具软件（RST™）

为了运行油气藏筛选工具软件（RST™），需要输入基本油气藏数据、驱油机理、有无裂缝、井眼失稳风险、油气藏非均质性，以及孔隙度、水的饱和度、油气藏厚度、压力、粘土含量等储层基本特征的最小值 / 最可能值 / 最大值。

##### (1) RST™ 的工作原理。

在该方法中，RST™ 软件由数个模块组合而成，每个候选油气藏都要用它进行评价。这些模块是由经典的油层伤害理论与在世界范围内获得的欠平衡油气藏类比经验结合而开发的。

RST™ 软件使用蒙特卡罗模拟作为其组成部分，使用概率分布给出各个不确定油气藏参数的可能值。在模拟中，软件从这些概率分布中随机抽取可能的油气藏参数值，用来计算基于风险的欠平衡钻井的适用性级别。在数千次迭代之后，RST™ 对每一个油气藏给出一个适用性分值。该分值的范围为从 -100（用常规技术钻进）到 +100（用欠平衡技术钻进），0 分值是分界点（图 2.3）。



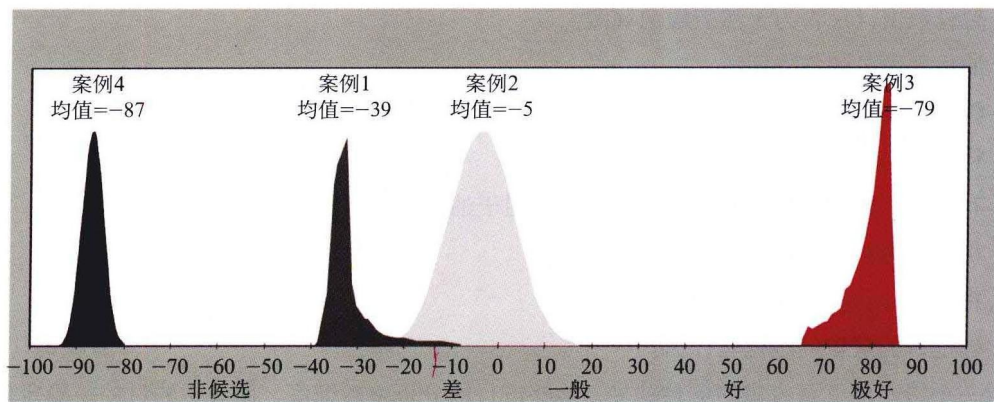
某些油气藏由于技术风险太大，无法进行欠平衡钻井，所以 RST™ 考虑了一些额外因素。这些因素可能包括高的油气藏压力、井眼失稳或极低的孔隙压力梯度。

除了给出油气藏的欠平衡钻井适用性统计分布之外，RST™ 还能够进行储层敏感性分析。对每一个油气藏都给出了旋风图版，这样有助于理解哪个参数与适用性分之间的相关性最大。相关性的类型（正或负）和大小，表明该输入参数对输出结果的影响程度。

## (2) RST™ 的输出结果。

在 RST™ 方法筛选研究结束以后，将会产生一份总结报告，所包括内容如下：

- 每个候选油气藏欠平衡钻井的适用性级别，以统计分布的形式给出；
- 所有候选油气藏的排序；
- 候选油气藏与类似油气藏的对比，后者已经被证明能够成功进行欠平衡钻井；
- 对影响候选油气藏适用性分值的各种因素的讨论；
- 储层敏感性分析；
- 基于以上信息，决定是否继续进行 SURE 程序的深入分析。



适合性	RST™ 分值	建议
极好	70 ~ 100	进行欠平衡钻井
好	40 ~ 69	进行欠平衡钻井或 SURE 第二阶段研究
一般	0 ~ 39	进行 RDA™ 或 SURE 第二阶段研究
差	-21 ~ 0	取消候选资格或进行 RDA™ 研究
非候选	-100 ~ -21	取消欠平衡钻井的候选资格

图 2.3 欠平衡钻井的适用性统计分布

### 2.1.1.2 SURE 第二阶段

SURE 第二阶段的目的是，为经过 RST™ 筛选的油气藏提供一套以风险为基础的欠平衡钻井经济评价方法。此阶段会预测并比较过平衡钻井与欠平衡钻井的油层伤害机理和计算产能。

深入分析的第一步是收集大量地质、生产和油气藏数据，重点是具体的油气藏描述（岩相、X 射线衍射、岩心分析等），并收集先前钻井、完井的实际数据。应由 SURE 小组和客户共同完成数据收集工作。在经过正式的 QA/QC 评估之后，将这些可靠的数据输入威德福专有油气藏