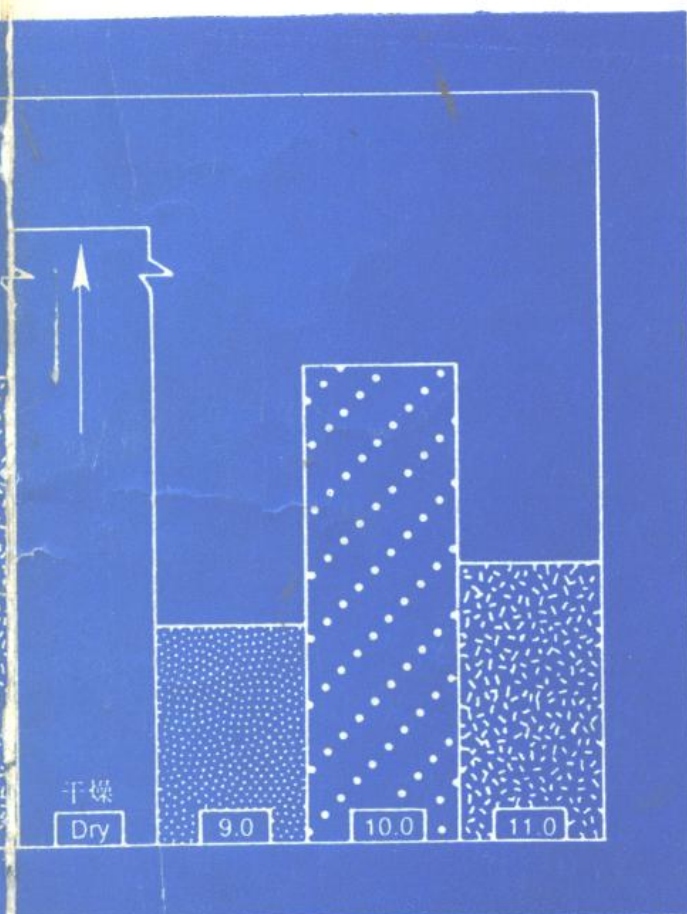


钻井液优选技术
——油田实用方法

钻井液优选技术

[美] James L. 拉默斯 J. J. 阿扎 等

油田实用方法



石油工业出版社

254
015

石油工业出版社

TE254
015

082333



钻井液优选技术

——油田实用方法

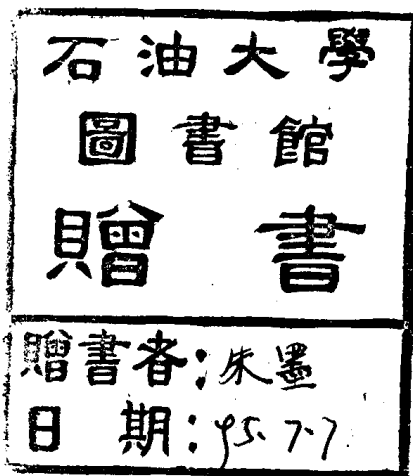
[美] James L. 拉默斯 J.J. 阿扎 著

朱 墨 胡湘炯 鄢捷年 等译

陆庆邦 校



S260/22



石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

本书根据美国各油公司、油田实际应用情况科研成果编纂而成。其特点是内容全面、重点突出、实用性强和技术新。书中主要内容包括优化钻井技术、粘土化学、钻井液添加剂和化学处理剂、低固相不分散钻井液体系、分散性钻井液体系、页岩稳定性、抑制性钻井液和油基钻井液。

本书可供现场钻井液工作者和科研机关从事钻井液工作的研究者参考, 也可供石油院校钻井及钻井液专业的师生参考。

钻井液优选技术

——油田实用方法

[美] James L. 拉默斯 J.J. 阿扎 著

朱墨 胡湘炯 鄢捷年 等译

陆庆邦 校

*

石油工业出版社出版发行

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 $11\frac{3}{4}$ 印张 288 千字 印 1-2000

1994 年 8 月北京第 1 版 1994 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-1166-2 / TE · 1075

定价: 9.00 元

译 者 的 话

《钻井液优选技术——油田实用方法》一书共十章，包括优化钻井、优化钻井液设计、粘土化学、钻井液添加剂，低固相不分散钻井液体系、分散钻井液体系、页岩稳定性、抑制性钻井液及油基钻井液。本书突出了优化钻井液设计，其内容结合美国各油公司、油田实际应用情况及科研成果，内容全面，重点突出，技术新。可作为石油院校钻井及钻井液专业师生的重要参考书，也可供我国现场钻井液工作者参考。

本书第一、二、三章由胡湘炯教授翻译，第四、五章由朱墨教授翻译，第六章由夏俭英副教授翻译，第七章由李健鹰教授翻译，第八、九章由鄢捷年副教授翻译，第十章由吴学诗副教授翻译，附录由赵雄虎讲师翻译。全书各章由陆庆帮教授校核。

由于译者水平有限和时间仓促，翻译中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

1992.2

目 录

第一章 优化钻井技术	1
第一节 优化钻井定义	2
第二节 优化钻井发展阶段	2
第三节 优化钻井的一般准则和假设	4
第四节 优化钻井概述	8
第五节 作为施工指南的钻井优化设计	8
第六节 钻井优化设计范例	9
第七节 优化设计步骤	10
第二章 钻井液	15
第一节 钻井液的功能	15
第二节 受钻井液影响的有关因素	16
第三节 钻井液的选用	17
第四节 优化钻井中重要的钻井液性能	17
第五节 钻井液类型	18
第六节 现场性能试验	20
第三章 钻井液方案优化的设计	51
第一节 钻井液优化设计注意事项	51
第二节 钻井液对钻井速度的影响	53
第四章 粘土化学	58
第一节 钻井粘土	59
第二节 膨润土水化机理	62
第三节 物理性能	63
第四节 氯化钠的影响	64
第五节 多价阳离子的影响	65
第六节 pH 值的影响	66
第五章 钻井液添加剂和化学处理剂	68
第一节 增粘剂	69
第二节 加重材料	71
第三节 降粘剂	71
第四节 乳化剂	73
第五节 堵漏材料	73
第六节 特种添加剂	74
第七节 钻井液添加剂一览表	74
第六章 低固相不分散钻井液体系	87
第一节 低固相不分散钻井液	87

第二节	添加剂	88
第三节	不加重的不分散聚合物钻井液的配制	90
第四节	低固相不分散钻井液的维护	90
第五节	其它不分散钻井液体系	93
第六节	加重的不分散聚合物钻井液	94
第七节	加重的不分散钻井液的配制	94
第八节	加重已有的钻井液体系	95
第九节	加重新配的钻井液体系	95
第十节	加重的不分散钻井液体系的监测	96
第十一节	加重的不分散钻井液的维护	99
第十二节	加重的不分散钻井液的事故处理	99
第十三节	其它加重不分散钻井液	101
第七章	分散性钻井液体系	103
第一节	分散剂对粘土的影响	103
第二节	分散钻井液体系的基本材料	104
第三节	轻微分散的不加重钻井液	106
第四节	轻微分散钻井液的基础材料	107
第五节	分散性淡水加重钻井液	108
第六节	水基钻井液的高温稳定性	110
第八章	页岩稳定性	112
第一节	对页岩问题的诊断	113
第二节	复杂问题的判断	117
第三节	X射线衍射和亚甲基兰试验	119
第四节	滚动试验	122
第五节	其他试验	122
第九章	抑制性钻井液	123
第一节	海水钻井液	123
第二节	预水化膨润土—聚阴离子纤维素 (CMC) 钻井液	124
第三节	黄原胶聚合物钻井液	125
第四节	饱和盐水钻井液	125
第五节	黄原胶和羟丙基胍尔胶	127
第六节	钾基钻井液	127
第七节	钙处理钻井液	128
第十章	油基钻井液	131
第一节	乳化理论	132
第二节	油基钻井液的组成	134
第三节	现场配制	137
第四节	油基钻井液的性能	138
第五节	控制油基钻井液的活度以稳定井眼	144
第六节	低胶体油基钻井液	146

第七节 在油基钻井液中测井	147
第八节 用油基钻井液钻井的事故排除	147
附录 A 钻井优化方案	150
附录 B 完整的优化钻井方案	159
附录 C 钻井优化方案所需的钻井资料	168
附录 D 钻屑的亚甲基蓝容量 (CEC)	170
附录 E 各种常用公式和表格	172

第一章 优化钻井技术

优化钻井的基本目标是要在现有的或特定的制约条件下，尽量获得最大限度的效益。所谓“现有的或特定的条件”是非常重要的，在进行具有一定风险的钻井设计时，这些制约条件常严重影响着能否改善设计的程度。“现有的”制约条件是由选用的钻井设备决定的。例如钻井泵排量，钻机功率不足，以及缺乏固控设备等。“特定的”限制条件是在选定井位后确定的。其中包括地层倾角大（需要用低于最优的钻压与转速配合），有漏失层、偏高或偏低的异常压力带，以及水敏性页岩层等。如果钻井工程师不能自由选用钻井设备，则对现有的约

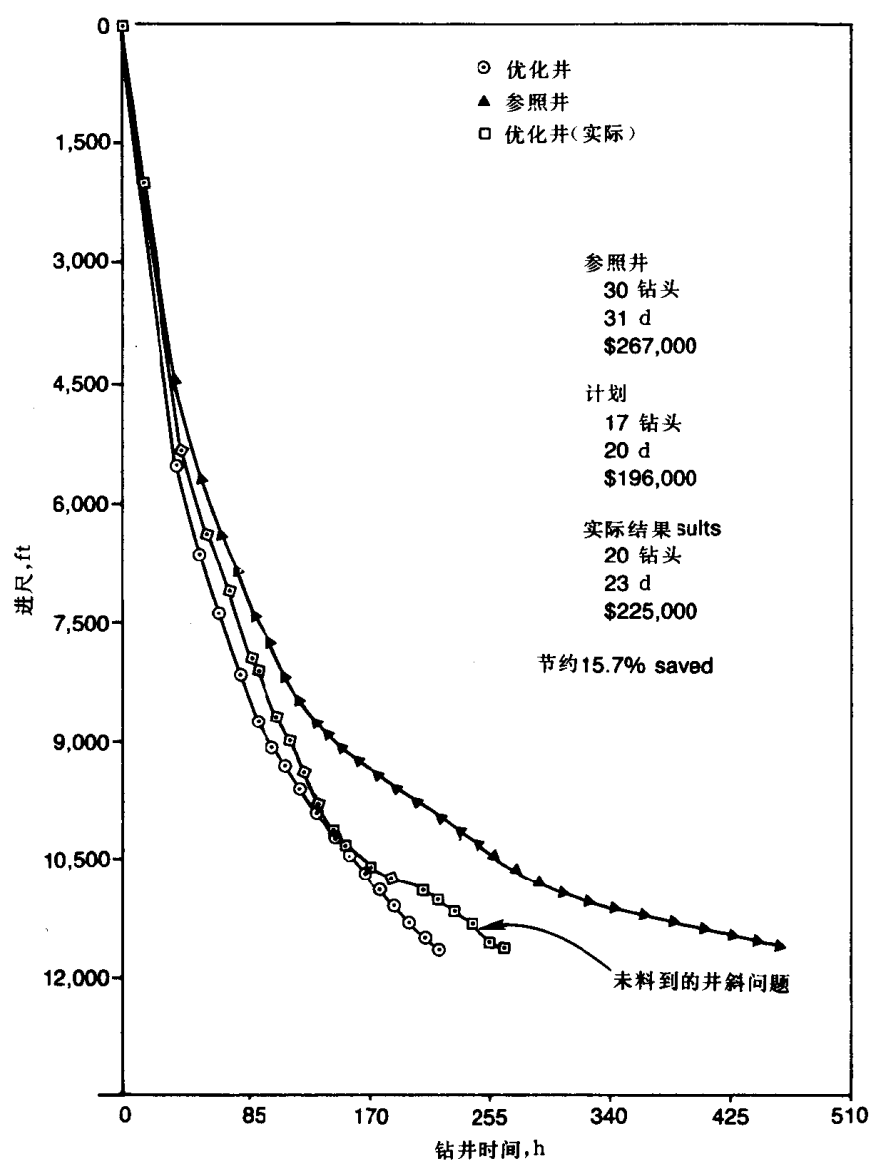


图 1-1 优化钻井基本原理图

束条件便无能为力，即钻井的优化设计只能适应于设备条件。因此钻井工程师必须掌握有关钻井设备能力的第一手资料，以便能更有效地实施钻井计划。

特定的限制条件最好是根据对邻近井的钻后评价来掌握。这需要有邻近井的记录，用以了解钻遇的复杂情况和处理方法，以取得成功的经验。

优化钻井的基本原理见图 1-1。邻近井用 31 只钻头在 30d 内完钻，实际成本为 \$ 267000，其中不包括钻井液费用。优化设计的井计划用 17 只钻头在 21 个钻机日内完钻，预计成本为 \$ 196000。此后因发生未预料到的井斜问题，却用了 20 只钻头，23d 才钻完，实际钻井成本为 \$ 225000。由于这是口费制合同，作业者实际节省了 15.7% 的费用，即 \$ 42000。

这是第一次优化的实例。此后的优化设计应能使效益进一步提高，直到其效益保持相对稳定为止。但这并不意味着已达到“真正的”最优，只是达到了充分发挥设备效率、有效处理了上述两类约束条件的现场施工要求，并能预测和解决该地区的钻井复杂问题。

第一节 优化钻井定义

优化钻井是用数学模拟方法分析各种钻井变量的影响和相互作用，以求获得最大经济效益的逻辑方法。这种方法包括对邻近井记录的钻后评价，确定如钻井液类型、水力参数、钻头类型、钻压和转速等各种可控变量的经济效益。由此确定能最有效地改进钻井作业的这些变量。最后拟定一套优化钻井计划并付诸实施。在此计划中应留有一定的余地，以便在实施中遇到未曾预料的问题时可作适当调整。

第二节 优化钻井发展阶段

从 1939 年到 1947 年，人们都集中研究钻井液的组成及其控制方法，很少注意钻井速度。其目标只是为了能顺利地钻井、固井和完井采油。

从 1947 年到 1975 年，研究重点转向能使钻井液达到所需粘度和失水性能的基本材料，并建立了钻井液材料的初步规范。同时也将井眼稳定及净化井筒与钻井液性能联系起来进行研究，并提出了滤液侵入对油层损害和测井解释的影响问题。但是还未注意研究钻井液性能及其添加剂对钻井速度的可能影响。

50 年代后期，钻井液化学已发展到能在井场用各种材料来调整控制钻井液性能，使其符合规范要求。但是钻井液科技人员注意到，即使对钻井液性能作了有效的控制，井眼状况仍无多大改善，甚至更为严重。由此推测到，对于某些地层，首先是页岩层，即使钻井液性能控制在规定的范围内，也还不能保持井眼稳定。这种“完善的钻井液并不一定能保持良好的井眼”的情况，促使钻井液工程师去进一步了解钻井液化学与井眼特征之间的关系。

1959 年，通过对上百口井的观察研究，发现粘土颗粒对钻速、钻头用量和钻机工作日具有重大影响（图 1-2）。当把固相颗粒的含量由 6% 减少到 0%（清水）时，钻井总效率便有显著提高。

另一个重要发现是，若用完全不分散的钻井液钻井，其钻速比附近用固相含量相同的分散性钻井液钻得井快。以后用微型钻头对这两种钻井液体系进行了钻速对比试验，图 1-3 的试验结果进一步证明，颗粒大小以及总的胶体颗粒含量对于钻速具有重大影响。

在这期间也对钻井液水力学进行了研究。由此进一步了解到净化井底可以改善钻头的工作状况。

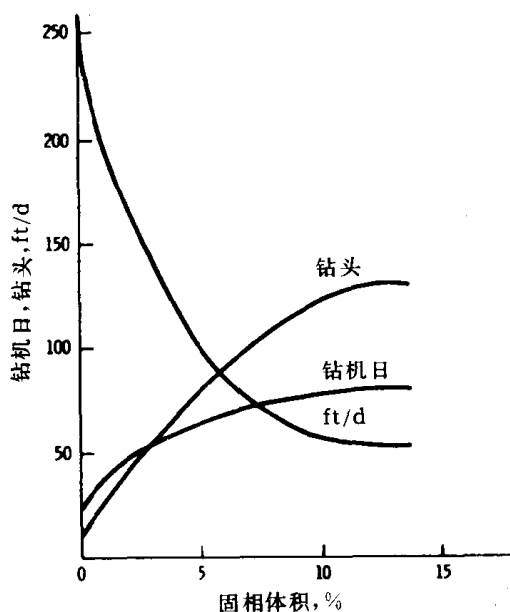


图 1-2 固相含量对钻进效能的影响

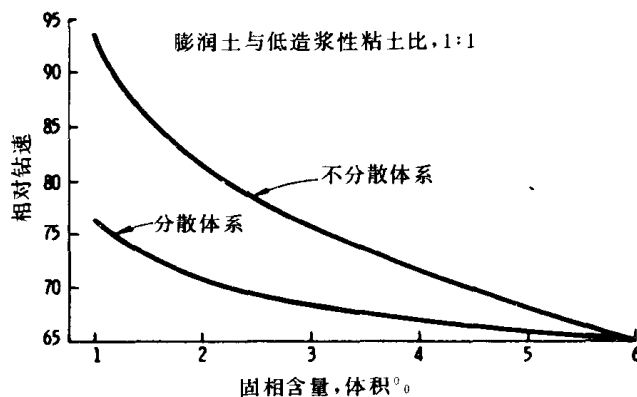


图 1-3 固相分散性对钻速的影响

下一步钻井优化的研究针对钻进作业条件，主要探索在给定的钻头和一定岩层条件下，确定钻压和转速的最优配合。由此提出了用于确定钻压和转速最优组合的钻进成本方程和简化的钻速方程。

钻进成本方程为：

$$C = [C_b + C_r (T_b + T_t)] / \Delta D \quad (1-1)$$

钻速方程为：

$$R = \frac{W^k N^r D_f}{T^p} \quad (1-2)$$

式中 C ——钻进单位成本，\$ / ft;
 C_b ——钻头成本，美元 / 只;
 C_r ——钻机作业费，\$ / h;
 T_b ——钻头寿命，h;
 T_t ——起下钻时间，h;
 ΔD ——钻头进尺，ft;
 R ——机械钻速，ft / h;
 W ——钻压，lb;
 N ——转速，rpm;

T ——牙齿磨损度, in;

D_f ——可钻性系数;

K ——钻压指数;

r ——转速指数;

p ——牙齿磨损指数。

由式 (1-1) 可见, 钻进成本与五个因素有关, 即钻进速度、钻头寿命、钻机作业费、钻头成本和非钻进时间。未包括在上述成本中的其它费用有: 钻井液成本、杂项开支和管理费用, 以及租金、辅助设备和运输费用。

注意, 式 (1-2) 中的可钻性系数 D_f , 是地层类型、钻井液类型、钻头类型和水力参数等很多变量的函数。式 (1-2) 中主要考虑的是钻压和转速而不是钻井液。然而钻井液对可钻性系数的影响比钻压和转速更大。故在钻井设计时首先要从邻近井的资料中确定改进钻井液性能的方案。可以肯定, 优化钻井中的水力参数也应根据钻井液性能的改进而相应变更。钻头选择和钻压、转速的确定, 也会因钻井液性能的改进而和参照井有所不同, 因为钻井液和水力参数的改进会影响可钻性系数和钻头的选择。

第三节 优化钻井的一般准则和假设

优化钻井方法常以下列准则和假设为基础:

① 所有钻井变量都是相互联系的, 改变其中的一个变量便会影响其它变量。

② 粘土颗粒的类型、含量和胶体颗粒尺寸对所有其它钻井参数都有影响。

③ 为有效地进行优化钻井, 应按下列顺序分析各种变量;

(i) 钻井液固相含量和类型;

(ii) 稳定和净化井眼的钻井液流动特性;

(iii) 水力特性 (清洗钻头、净化井筒和稳定井壁);

(iv) 钻头类型;

(v) 与选定的钻头类型相配的钻压与转速。

④ 在钻井施工中将始终坚持运用优化钻井技术。

表 1-1、1-2 和 1-3 列举了钻井中的各种变量。表 1-1 是钻井作业中会影响钻井总效益的各种变量。其中没有区分主要和次要的变量, 也没有区分可控变量和不可控变量。表 1-2 列举的是可控变量及其重要性和对钻速及钻进总成本的影响。表 1-3 则列举出用于优化钻井设计的各种变量。

表 1-3 中的分类是不严格的, 因为有些不可控变量会受改变某一可控变量的影响, 例如钻井液类型的改变可能要改变钻头类型而使岩层的视可钻性发生变化。同时尽管井深列为不可控变量, 但在利用邻近井的岩层可钻性资料时, 应与设计井中相应岩层的井深相一致。

此外, 优化钻井的第一个基本假设是所有变量都是相互联系和相互影响的。其中有的是正影响, 即在两个或更多的变量同时使用时, 其效果比各变量单独作用时相加的影响更大。有的起副作用, 即在两个或更多的变量同时作用时, 其效果比各变量单独作用时相加的影响小。下面举例说明钻井液和水力参数之间的相互影响。

固相含量的影响可用下列经验方程计算。

$$R_m / R_w = 1 - 0.0133F - 0.00114C$$

(1-3)

表 1-1 影响钻井的有关因素

钻压	固相
起下钻时间	钻机灵活性
操作人员	钻柱条件
压差	供水条件
喷射速度	钻头类型
循环排量	钻头制造厂
岩石性质	气候
钻井设备	喷嘴类型
井深	设备供应状况
转速	密度
井眼复杂情况	失水
井位	流动特性
转盘功率	计划
类型	总压降

表 1-2 钻井变量的影响

变量	重要性	影响	
		钻速	成本
井深	主要	下降	增加
钻压	主要	增加	或增或减
转速	中等	增加	或增或减
钻井液固相	主要	下降	增加
钻井液失水	与固相有关	增加	减少
粘度	与固相有关	下降	增加
喷射速度	无到主要	增加	减少
循环排量	次要	或增或减	或增或减
总压降	主要	下降	增加
压差	主要	下降	增加
岩石性质	主要	或增或减	或增或减
钻头类型	主要	或增或减	或增或减

表 1-3 优化钻井中考虑的变量

可控变量	不可控变量
钻井液	所钻岩层
水力参数	井深
钻头类型	
钻压、转速	

式中 R_w ——用清水时的钻速（假定 100%）；

R_m ——用钻井液时的钻速；

F ——小于 $1\mu\text{m}$ 的钻井液颗粒含量，lb / bbl；

C ——大于 $1\mu\text{m}$ 的钻井液颗粒含量，lb / bbl。

因在此例中所计算的相对钻速，基于清水钻进时的钻速为 100%，因此式（1-3）可改为：

$$R_m (1 - 0.0133F - 0.00114C) \times 100 \quad (1-4)$$

现由式（1-4）计算合格的钻井液与不合格钻井液的相对钻速。该式不能确定固相浓度的影响，但可指出给定固相浓度条件下改变小于 $1\mu\text{m}$ 颗粒大小分布的相对影响。在（1-4）式中未考虑钻井液密度的变化，但在计算各种钻井液的相对可钻系数时仍然有用。

合格的钻井液是一种低固相不分散聚合物钻井液，其主要性能如下：

密度 (γ_m) = 8.7ppg

塑性粘度 (PV) = 6cP

屈服值 (YP) = 4lb / 100ft²

失水 = 12mL

亚甲基兰试验 (MBT) = 10

油 = 0

$F = 0.6\text{lb} / \text{bbl}$

$C = 24.4\text{lb} / \text{bbl}$

代入式（1-4）得：

$$R_m = [1 - 0.0133 (0.6) - 0.0014 (24.4)] 100 = 96.4\%$$

因此，这种钻井液合格的配方将以 96.4% 的相对钻速钻进，即比清水钻进的钻速低 3.6%。

不合格钻井液的主要性能为：

密度 (γ_m) = 9.2ppg

塑性粘度 (PV) = 18cP

屈服值 (YP) = 4lb / 100ft²

失水 = 12mL

亚甲基兰试验 (MBT) = 20

油 = 0

F = 16lb / bbl

C = 43lb / bbl

代入式 (1-4) 得:

$$R_m = [1 - 0.0133 (16) - 0.0014 (43)] 100 = 73.8\%$$

用这种细小微粒 (小于 1 μ m) 浓度较高的钻井液, 其相对钻进速度为 73.8%, 即比清水钻进低 26.2%。而上述合格的配方, 其钻速只比清水低 3.6%。

在实际的现场试验中, 上述两种钻井液的钻速差约为 20%。

水力特性: 假定已按上述实例改变钻井液体系而使相对钻速提高了 20%, 以下可进一步改进水力条件。由于合格的钻井液配方是一种微小颗粒很少的低粘度钻井液, 这种钻井液的剪切稀释性好 (喷嘴处的摩阻很低), 因此可通过提高钻头水马力来优化水力特性。例如, 假定所钻岩层为砂质页岩, 其水力可钻性在图 1-4 上为 Q4, 钻头水马力为 0.7 马力 / 英寸²。这时因在井底净化不完善区而钻速只有 9ft / h。如果优化水力参数以获得 2.8 马力 / 英寸² 的钻头水马力, 则钻速可增加到 22ft / h。

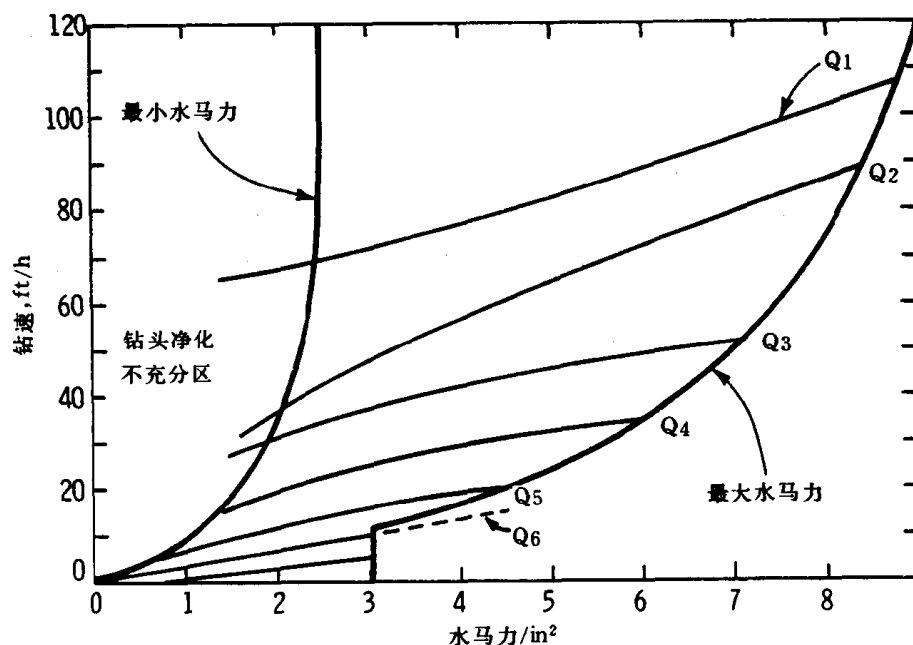


图 1-4 水力可钻性曲线

根据钻头的工作参数定点, 利用船形曲线按定点位置选定相应的 Q—线, 沿 Q—线改变水力参数, 便可查出改变水力参数的影响

由此可见, 改善钻井液体系可以最大限度地提高水力作用, 从而使钻速增加一倍多。上

述实例说明的方法，还可扩展到钻头选型，即钻井液、水力参数、岩石和钻头四个变量的相互作用。

正相互作用的一个例子是同时增加钻压和水力作用，其结果可使钻速比这些变量单独增加时更高。负相互作用的实例之一是同时增加转速和钻压，而不提高水力作用，由此增加的钻速将比单独增加这些变量所得钻速增量之和要低。各参数组合后的相互作用效果见表 1-4。

表 1-4 硬地层中各钻井变量的相互作用效果

变量组合	相互作用
钻压、转速	负作用
钻压、水力	正作用
转速、水力	无相互作用
低固相、水力	正作用
低固相、钻压	正作用
钻头类型、地层	或正或负
低固相、钻头类型	正作用
转速、地层	负作用
不分散钻井液、水力	正作用

表 1-4 中列举的相互作用效果是由因子分析设计实验确定的，在该实验中各变量的作用水平固定不变。如果所钻地层不同，或各组合变量的作用水平有改变，则其作用效果也会改变。所钻地层的岩性和各个变量的作用水平，对其相互作用效果具有很大的影响。优化钻井技术的成败就决定于对这些相互作用效果的了解程度，以及如何用它来提高钻井效益。

第四节 优化钻井概述

优化钻井技术基本上已沟通了凭经验钻井，和由技术人员在井场上用计算机确定参数之间的联系。它为司钻提供了方便的有用技术。综合运用科研成果、大量现场试验资料以及计算机运算，已使这种高技术可在实用程度上用以确定钻井变量的影响。

第五节 作为施工指南的钻井优化设计

提供给现场工作人员实施的优化钻井计划，必须认真研究参照井内所遇到的各种问题，并提出可能的解决途径，还要探讨设计井开钻前和钻进中应予注意的问题。钻井计划应尽量简明扼要。但其规定应有一定的灵活性，以便现场人员在实施计划时运用他们的经验和知识。这一点非常重要，因为优化钻井计划通常是由工程师在办公室内制定的，其实施则是由

指定的钻井监督负责的。

优化钻井的基本要素为：

- ①对各参照井的记录进行钻后评价；
- ②设计并制定钻井计划；
- ③实施优化钻井计划；
- ④分析优化钻井中取得的结果。

优化钻井计划应按附录 A 中所列的提纲进行。优化钻井的指导思想规定、设计和汇编的计划程序必须遵循以下纲要：

- ①钻井液：保证井眼稳定，井筒净化和提高可钻性系数；
- ②水力作用：能清洗钻头，净化井筒，提高钻头水马力，不会冲蚀井眼；
- ③钻头类型：主要应根据给定的岩层特征选用合适的钻头；
- ④根据选用的钻头，确定最优钻压和转速；
- ⑤预计钻井中可能发生的问题并推荐解决办法；
- ⑥估计能节省的费用。

由于未预计到的钻井条件的变化或因设备条件的限制，在实施优化钻井计划时常有某些必要的调整。在实施中作必要的调整时，还应按照制定计划时的指导思想进行。其重点应首先考虑选用最有效的钻井液体系，并采用设备条件或地质条件所允许的水力参数，再按录井资料选用合适的钻头，最后选用最优钻压和转速。

第六节 钻井优化设计范例

在此考查一份制订好的计划，它可帮助有关的计划部门深入了解这套方法。优化设计的范例见附录 B。记住，其主要目的是介绍优化设计的基本内容，而不是阐明优化设计人员如何制定各种规范的细节。这个设计范例包括下列要点：

- ①认真选定参照井和优化设计井；
- ②确定套管程序和应重视的层段；
- ③各参照井情况摘要；
- ④制定钻井液方案，并与参照井相对比；
- ⑤估计可能遇到的复杂情况；
- ⑥推荐的和参照井的钻井液计划趋势图；
- ⑦水力作用摘要；
- ⑧岩性剖面；
- ⑨钻头选择；
- ⑩钻头综合记录；
- ⑪预计钻头使用指标和水力作用
- ⑫绘制井深和钻机日的进度曲线，比较预计可节约的费用；
- ⑬成本分析。

优化钻井的指导思想、基本概念和方法，已在这份设计范例中说明。以下讨论的将是提供有关措施和技术背景，以便使钻井优化设计者知道如何制订一套满意的钻井计划。

第七节 优化设计步骤

在制订计划阶段必须有一套如图 1-5 所示的前后一致而又科学的工作程序。

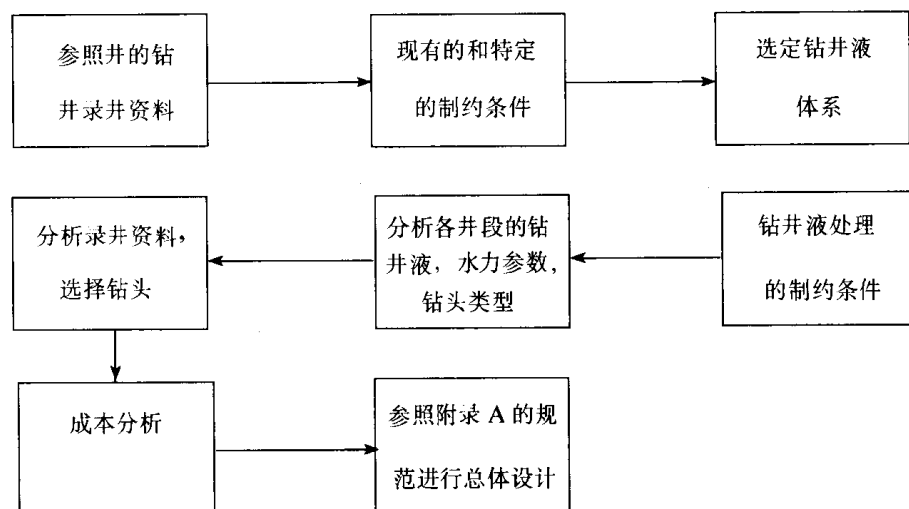


图 1-5 优化步骤流程图

为了能完善地拟定钻井计划，已为优化设计者准备了一套表格（表 1-5）。有效地使用这套表格，保证在作计划前取全各种数据，便可节省许多时间。

最终目标是降低钻井成本。降低成本最有效的方法是采用优化钻井技术，或按预定计划去钻井。近 12 年来只有一家公司一贯采用优化钻井技术，并取得了显著的经济效益。据不完全估计，该公司在这期间共节约 25 亿美元，从而使其 12 年的利润增加 27.5 亿美元。在这相同的 12 年间（1970~1982），北美地区的石油储量呈下降趋势。幸亏在最近期间这种下降趋势已经停止。

面对今天通货膨胀的压力，如果在钻井工艺方面没有实质性的改进，例如采用更好的钻井液、更高的水力作用、寿命更长的钻头、更好的固控设备，以及综合运用这些工艺的优化钻井技术，我们的处境会是怎样？回答必须是在这 12 年来，我们不会有足够的钱去钻这些井。增加储量的前景也不会象今天这样光明。在经济萧条时期，优化钻井则更为重要，因为由此节约的每一部分钱可用来打另一口井。

计划钻井方法的实现经历了较长的时间。很难设想建造一所近千万美元的大厦，可不雇用有经验的建筑师去设计和管理这个项目。钻一口上千万美元的井也是这样。我们承认，一个著名的钻井承包商有能力管理其设备的正确使用；我们也承认有许多现场工作人员，有能力完成钻井作业。然而如果不用以上讨论的优化钻井的指导思想、基本概念和方法，就象一个建筑承包商没有蓝图作依据一样。

一件接一件的实例已记载了优化钻井的显著效益。所以最优化钻井已不再象 70 年代那样只是一种理论，它已是一项可以提高钻井效益的实用、合理而又成功的技术。