

石油钻井与下套管作业

〔美〕 J·A·肖特 著

DRILLING AND CASING OPERATIONS

地 质 学 社

石油钻井与下套管作业

[美]J·A·肖特 著

王健安 杨长城 毛克伟 合译

陈庆寿 校

642/02

地质出版社

B 553693



内 容 提 要

本书包括钻井和固井两大部分。叙述了钻井原理、钻井设备的选择与评价、钻井工艺技术、套管设计、下套管工艺、套管、尾管固井工艺以及固井质量的检查等。

作者掌握了大量的第一手资料，通过分析比较，系统地论述了在钻井、固井设计与施工中产生各种复杂问题的原因、影响预防及其解决方法，反映了当代美国石油钻井的实际技术水平，具有较高的实用价值。

本书适合钻井、试采工程技术人员以及中、高等石油院校师生学习参考。

DRILLING AND CASING OPERATIONS

J. A. "Jim" Short

Penn Well Publishing Company 1982

Tulsa, Oklahoma

石油钻井与下套管作业

〔美〕J. A. 肖特 著

王健安 杨长城 毛克伟 合译

陈庆寿 校

责任编辑：徐一明

地质出版社 出版发行

（北京 西四）

地质出版社印刷厂印刷

（北京海淀区学院路29号）

新华书店总店科技发行所经销

开本：850×1168/32 印张：12.8125 字数：339,000

1988年10月北京第一版·1988年10月北京第一次印刷

印数：1—1,505册 国内定价：4.90元

ISBN7-116-00299-5/P.267



计量单位换算表

物理量名称或单位意义	名称、符号及换算关系
长度	英里(mile) = 1609.344m 英尺(ft) = 0.3048m 英寸(in) = 0.0254m
体积、容积	立方英尺(ft ³) = 2.831685 × 10 ⁻³ m ³ 桶(bbl) = 119.2410L 加仑(gal) = 3.78543L
质量* (力) 温度	磅(lb) = 0.453592kg 华氏度(°F) = 9/5°C + 32
压力*	磅每平方英寸(lb/in ²) = 6894.76Pa
速度 (英尺)	英里每小时(mile/h) = 0.44704m/s 英尺每秒(ft/s) = 0.3048m/s 英尺每分钟(ft/min) = 0.00508m/s 英尺每小时(ft/h) = 0.846 × 10 ⁻³ m/s
相对密度* (比重)	磅每加仑(lb/gal) = 0.11983kg/L 磅每桶(lb/bbl) = 0.00380kg/L 磅每立方英尺(lb/ft ³) = 16.0185kg/m ³ 磅每袋(lb/袋) = 0.453592kg/袋
力矩*	磅英尺(lb·ft) = 1.35582N·m
体积流量 (产量、排量、流失量、 循环速度)	桶每日(bbl/d) = 4.969375L/h 千立方英尺每日(Mcf/d) = 1.18 m ³ /h 桶每小时(bbl/h) = 19.2410L/h 加仑每分(gal/min) = 203.1258L/h 加仑每次(gal/次) = 3.78543L/次
钢丝绳寿命	吨英里(t-mile) = 1609.344t·m
压力梯度	磅每平方英寸每英尺(lb/in ² /ft) = 22629.6Pa/m
井斜	度每100英尺(1°/100ft) = 1°/30.48m
单位长度重量	磅每英尺(lb/ft) = 1.4882kg/m
相对粘度 (表观粘度)	秒每夸脱(s/qt) (美国API标准)

注：1. 凡无换算关系者不列入此表；

2. 由于本书采用英制工程单位，故在单位lb的使用中有混淆不清之处，书中均未改动。lb作质量单位时1b = 0.453592kg，lb作为力的单位时应为1bf = 4.44822N；

3. 凡与单位lb有关的导出单位，均有上条指出的问题。

目 录

导言	1
第一章 钻井计划	2
一、钻井计划的来源	3
二、钻井计划书的内容	6
三、钻井计划的评价	8
四、商业准备(钻井计划的买卖)	16
五、基本的租借条款	17
六、商业条款	19
七、资金筹集	20
第二章 钻井设备的选择	21
一、旋转钻井	21
二、钻机的评价与选择	23
第三章 钻井	31
一、钻柱组合	36
二、钻铤组合的类型	44
三、钻头	65
四、钻井液	80
五、井斜、狗腿和键槽	91
六、复杂地层	138
七、钻进作业	203
第四章 套管设计	286
一、基本的套管柱	287
二、影响套管设计的各种因素	289
三、钻小直径井眼	309
四、标准的套管程序	317
第五章 固井设计、下套管、固井、钻水泥塞、套	

管和尾管试压.....	338
一、概述.....	338
二、下套管.....	352
三、试压和钻水泥塞.....	385
参考读物.....	402

导 言

本书包括钻井设计与钻井作业两部分，强调恰当地设计钻井程序，精心地进行施工，以避免打捞作业和井内复杂情况的发生；同时建议利用风险计算促进钻井作业。本书的对象是具有钻井基本设计、标准操作和程序知识的工程技术人员。除了一些在其他领域有不同解释的术语外，一般的术语没有做专门的解释。

对于设计与作业中经常遇到的问题均采用系统的方法进行分析解答。本书注重实践经验，着重介绍正确的作业方法和特殊情况下的处理方法，讲解发生井下事故的原因及其影响。同时建议随时作好处理事故的准备。

本书没有涉及更多的概念问题。如果对于一种作业，有几种明显不同的处理方法，本书将讨论并对这些不同的处理方法，作出评价和选择。

对于读者而言，钻井设计与施工中遇到的问题不可能是完全相似的，但讨论和解决一般性钻井问题可以提高钻井设计与管理的能力。本书对典型的钻井实例均作了详细的解释，包括发生问题的原因、解决方法以及方法对比。对于发生问题的背景情况也有详细说明，读者可以了解发生问题的条件和选择处理方法的理由。有时书中介绍的处理方法是错误的，作者则提出一些建设性的评论，以便使读者引以为戒。

除了列举的实例之外，本书还介绍了一些成熟的实践经验和工艺技术。虽然这些经验和工艺不可能适用于所有地区和所有钻井条件，但可供参考。具体问题具体分析是钻井作业的重要原则。

第一章 钻 井 计 划

钻井施工前，必须有一份钻井计划。它应包括以下内容：地图、井位、设计井深、钻井的地质与物探依据、目的层井深与层位、钻井程序、钻井成本、土地租借情况以及所有有关的资料。

钻井计划是很重要的文献，因为它关系到上万甚至 500 万美元以上的单井钻井费用。钻井计划应尽可能详细并包括准备与实施两大部分。它还应简要地包括完整的论证数据与细节，以供第三者研究与校验。

钻井计划可以分为开发井计划和勘探井（野猫井）计划两大类。根据石油公司的解释，开发井包括油田内的生产井和油田外数英里(mile)的钻井，后者接近于野猫井。一般地讲，开发井系指风险比野猫井小的井。

开发井的钻井计划通常比较简单和明确。例如，公司在自己管辖范围的平伏岩层的两口深度适中的生产井之间布一口井，它的钻井计划可以十分简单。因为钻井可参照邻井的钻井资料做出相似的设计。

野猫井的钻井计划则复杂得多，对于深勘探井因为风险大投资多，需要大量的调研材料才能做出合理的设计，对于条件类似的一口相同深度的井，野猫井的钻井成本往往是开发井的1.5—3倍。野猫井的钻井计划必须包括：详细的地质和物探报告、详细的钻井程序和钻井(干井和完井)成本报告。还要考虑油井管理成本和油气销售成本，并对与施工有关的所有官方规定进行讨论。总之，钻井计划必须经过充分研究，呈文力求简明扼要，使有关评价人员能全面了解情况并掌握足够的的数据，以便做出正确的决定。

一、钻井计划的来源

钻井计划可以由石油公司完成，也可以由其他公司或个人咨询完成。

（一）石油公司内部完成的钻井计划

石油公司一般有 4 个主要部门参与制定钻井计划。它们是：地质部门；物探或地震部门；土地部门和工程部门。任何一个部门或几个部门联合均可以完成钻井计划。但最终提交的计划与四个部门都有不同程度的关系。地质部门和物探部门完成钻井计划最多，因为这是他们的主要任务；土地部门负责提供土地面积，所有权和租借权等有关情况，可从贸易角度提出钻井计划；工程部门则设计钻井程序、进行成本预算和储量研究，可以从油井本身与有关工程方面提出钻井计划。

地质部门 在油田地区工作的地质学家通常都能适应地质勘探和钻井工作。他们的工作包括调查新老钻井资料、研究地层走向和倾向，进行地质填图等。因此，他们可以研究地层构造特点、压力异常情况、地表地层圈闭和有油气储集的构造特点等。一旦发现有价值的构造、地质学家就集中到该区域，研究所得资料从而解释油气圈闭的存在。这就为制定钻井计划提供了重要依据。

有时，当地质情报资料和数据尚不完善时，则须物探部门在该区域补作地震勘探，以满足钻井计划的要求。如果在地质图上不能准确确定最佳井位，也需要补作地震勘探工作。总之，钻井计划多出自地质部门，其他部门仅提供一些补充，确定是否可以施工。

目前，地质研究已经借助计算机程序。井的数据可储在计算机磁带内，如开钻、完井时间，套管数据，地层测试资料，地层层序与厚度等。这些资料可以按不同参数，用图表的形式输出来，例如使用不同的形式和比例尺绘出地形图、构造图、等厚图

油井产量图。这些程序有助于地质学家研究钻井计划，以及完成诸如绘地形图的日常工作。不过，这些程序仅仅是地质学家对真实推断的补充而已，实际研究钻井计划还是靠有创造性的地质勘探学家。

物探部门 地球物理学家在有价值的区域从事监控地震勘探工作，帮助地质学家研究并和其它公司在共同关心的地区一起进行区域性的地震测线工作，例如大规模的爆破地震。区域地震测线可能预示油气圈闭时，就要加密测线，进行详细地震勘探。地震数据一般都用计算机处理。

计算机处理地震数据是十分重要的，例如以前在美国密执安州和俄亥俄州北部地区，由于冰冻层厚达1500ft以上，所得地震资料非常不清晰。后来用计算机进行处理，消除了冰碛的掩蔽效应，得出了下部地层的清晰反射。由此发现了许多含油丰富的顶部矿脉。

物探部门也许掌握了足够的地震数据可以提出钻井计划，但一般要与地质部门协作完成。

地质部门利用这些重要的地震数据推算地层剖面并提供其他有关钻井计划的论证。

土地部门 它通过商业方式或与其它公司联合投资参与钻井计划。它注视着—个地区的动向。如果这一地区的勘探活动增加并有希望成为油气田，土地部门就千方百计设法获得土地。如果土地已为其他公司占有，则要通过谈判建立租用合同。通常采用的方法有收买农场，购买或租用土地或组成联合钻井公司等。

总之，井位确定之后土地部门就得了解这块土地的主权并设法得到它。

土地部门需要熟悉钻井和采油方面的法律知识和经验。它要接触土地所有者，承办租用土地，保护管线与道路的业务。他们还要与政府机构、管理机构打交道完成各种必要的文件。

工程部门 工程部门制定钻井程序、钻井成本并估计储量。这有助于评价钻井计划的经济效益，在为钻井计划准备资料时，

工程师应研究这一地区的油井情况，通过研究可以发现那些有潜力但未经测试的油气产层。例如，某一层位原误认为低渗透层，经对电测井图的仔细研究发现，原先完井时未考虑的该层可以成为生产层。储量研究可能表明，现有油井不能经济有效地采出全部储量，则需加密钻井。储量边缘试验可以证明补偿井是合理的。

工程部门提出钻井计划后，需经其他部门提供的资料数据加以审查，证明该计划是否正确。如此，可以决定是重新打开原井还是另钻新井。

大部分钻井计划是由地质、物探、土地、工程部门紧密配合和共同负责完成的。参与制定钻井计划的人都必须具有能评价和提出一个钻井计划的实践经验和受过培训。小的石油公司不一定有上述4个部门，但也要有相应的技术人员。

（二）石油公司外部完成钻井计划

通常，钻井计划出自石油公司本身。如果钻井计划是由其它公司完成，对于承接公司而言，该钻井计划叫做外部完成的钻井计划。从外部公司接受的钻井计划往往是小公司、个人或咨询部门完成的，他们通常缺乏钻井投资，则把钻井计划提交给有资金的公司去施工。

许多小公司和个人注视着区域石油的发展，当钻井活动开始在某一地区集中时，他们便租地，然后提供给大公司去研究和决定是否上钻。

在石油界有一种叫推销者，也可以叫发起者，他们是发起钻井的个人或公司，但他们往往被人们曲解。所谓发起就意味着付给参与钻井的合伙人一份不均称的经费。譬如，一个公司接受了发起人提供的某一钻井计划，它必须支付 $\frac{3}{4}$ 的钻井费用而将来只能从发起人那里获得 $\frac{1}{2}$ 的利息，这说明其中 $\frac{1}{4}$ 费用是属于不均称分配的。因为发起人已经投资提供了井场用地，并做出了钻井计划书，因此，他们就靠此不平衡投资分配而得到偿还。

一个公司可以在发起钻井的基础上向一个投资集团提供钻井

计划。这样，这个公司在完成钻井计划和组织发起等工作中实际上已经付出了时间和财力，因此要求报酬是理所当然的。

由于误解和发起人可能的欺骗行为，发起人这个词变成了贬义词，这常与广泛的宣传有关。然而，仅仅回顾这些少量情况而看不到大量的正确的钻井计划是由发起人提供的事实是不公平的。

二、钻井计划书的内容

钻井计划书应尽可能详细，资料、数据应当完善，力争回答钻井的全部问题，满足完井评价要求。一份典型的钻井计划书应包括以下内容：

概述 首先，钻井计划应简明扼要地说明其主要部分，例如：地质物探分析、占地简况、成本和经济分析等。同时也应扼要准确地叙述钻井计划的全貌而不应强调某一部分，除非是具有很高价值的钻井计划。如果钻井是高风险的应加以说明。

地质-物探分析 它应完整、详细地说明地质条件，包括碳氢化合物的圈闭类型(背斜构造、地台、断层等)，圈闭中含有碳氢化合物的原因，碳氢化合物的种类等。目的层的深度、厚度、圈闭面积也需论述并附等值图和等厚图。根据已钻井的资料应给出地层剖面图。如果除主要目的层外还有一些次要目的层，也应详细说明并提供全部资料。

这一部分还应包括已知的和可能的钻井故障提示，如坍塌页岩、盐水层、漏失层等。为了评价一个地区，一份钻井书往往包括数口井，所有井的布井依据以及井位均要详细说明。

设计钻井深度往往是一个难题，尤其是野猫井。可以根据假定的油水界面设计理想的钻井深度，第二口井则可以根据第一口井的资料进行修定。

应该有一张大比例尺的平面图。在图上标出井位，周围已钻井井位、输油输气管道、主要的公路与道路，以及与钻井有关的

有利或不利情况。

地质报告还应包括产量和可采储量的预算。如果有必要，可参考邻井的有关产量数据加以说明。

土地概述 它是一张一览表，记述土地面积、租契项目和法律内容，主要的矿区租用费以及与租契有关的其它数据。还要有一份详细的地图并注明租契的所有权。土地概述必须说明租契合法性的法律意见。

钻井程序 它讨论钻井、测井、下套管、固井和完井等问题。包括井身结构、套管程序、可能的钻井问题、设计的泥浆类型与性能、电测计划、钻杆测试计划、地面设备和所有钻井、完井、采油所需的资料。

经费预算 成本预算要详细记入经费预算 (AFE) 表中。成本分为实体成本与非实体成本两大类，然后再细分标准项目或编码项目，如：道路与井位费用、承包商费用、泥浆费用、套管费用等。这些费用又可分为干井和完井两大类。干井成本为包括裸眼测井在内的全部钻井费用。干井在进行电测井作业之后有时只承认下套管深度或电测井深度。完井成本系指干井成本加完井、试油成本、地面设备成本以及使井达到开采水平的费用。

如果需要油气集油系统，它也应包括在完井成本中，而输油管线费用一般不包括在经费预算中，但应给予讨论。

经济评价 钻井计划中应包括经济评价。如果钻井计划是本公司完成的，则应按本公司的程序做出完整的经济评价。如果钻井计划是为外公司做的，经济评价应尽可能完备，包括所有可供其它公司进行经济分析的基本数据。

贸易条件 钻井计划书可以包括一些建议性的贸易条款，不过，通常只是口头表达或写在钻井计划书前面的前言中。这些贸易条款一般是提出问题以供协商。如果贸易条款是不可协商的，它们就属于承诺的，可靠的，则应给以说明。贸易条款的内容主要是这一地区的贸易形式，贸易项目。它可以对今后的贸易起指导作用。

三、钻井计划的评价

评价钻井计划的基本依据是能否赚钱。实施钻井计划需要花钱，同时也会获得与自身的财政目标相一致的利润。当钻井计划中的钻井经费超过所拥有的资金时，评价钻井计划还有其他的作用。石油公司可以利用经济评价的方法将钻井计划分类，确定哪些可以实施，哪些推迟，哪些否决。

评价钻井计划的主要标准是资本投资总额，现值、未来净收入、支出、利润率和风险。公司的联邦所得税也有很大影响，所得税的影响因素很多，需作专门评价。因此本书讨论的经济评价除非特殊声明都是指付税前的。

每个公司评价钻井计划的标准各有侧重。例如：新公司侧重于近期收入，他们可以选择收益快的钻井计划；资金短缺的公司可以选择支出少的钻井计划；大多数公司则在诸因素中寻求平衡。

经济与评价是密切相关而又相互独立的。这里所指的经济只涉及一口井或一个钻井计划的利润，评价则涉及到风险和其他非实体项目。只有进行评价才能确定钻井计划是否赚钱、是否需要保险。经济评价包括风险评价。

经济评价有简单的也有极其复杂的。在开发的油田钻一口井做经济评价就比较简单，可以列个表，它包括设计产油量、产油总值，操作费用、地方税和付税前的净收入。钻井计划的现值就是回扣的未来净收入减去回扣的未来资本支出（钻井成本、修井成本）。回扣率取决于投资目标，但最少不低于最高银行贷款利率的1.2—1.5倍。支出取决于扣除回扣投资的回扣未来净收入的累积总额。支出发生在累积总额等于零的时候。

利润率（ROR）由计算各种回扣率下来的未来净收入和净收入-回扣率曲线求得。通过总投资（风险投资）与曲线的交点可以得出利润率的百分数。这是最基本的经济评价方法（见表1.1，表

1.2, 图1.1), 当然还有一些其它方法和演变。最重要的一点是, 早期的收入与投资对经济的影响比后期的收入与投资对经济的影响要大, 而且回扣率越高影响越大。

联邦所得税的影响可做单独项目列入表1.1, 也可以纳入地方税一栏。最初经费(例中为600万美元)的钻井部分可列为税款信贷。这样可以依靠公司的税款地位提高经济效益。

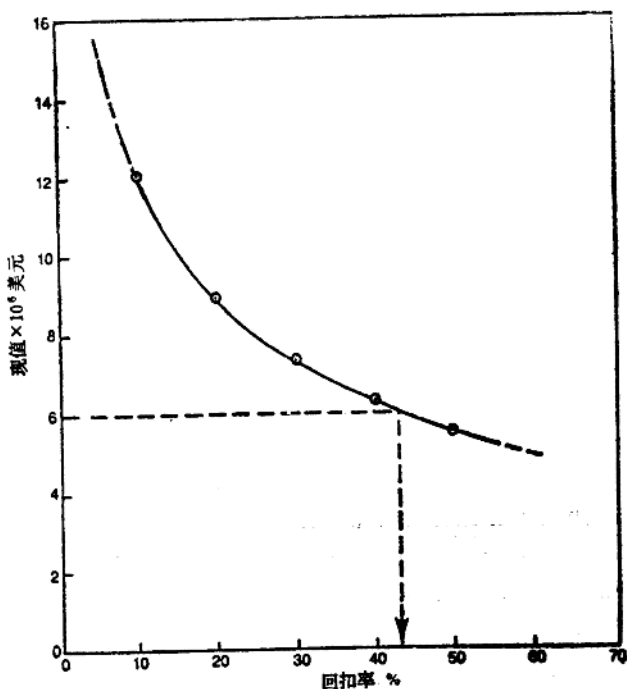


图 1.1 单井钻井计划的现值与回扣率曲线假定完井总成本为600
万美元利润率为43%

如果钻井计划包括几口井。可以用上述图解法一个个进行评价, 也可以合并起来进行评价。

经济分析一般是用计算机进行的, 它可以节省时间, 减少错

表 1.1 单井钻井计划的收入与投资预算*

年	年产量×1000桶		售 价 美元/桶 (3)	毛收入 1000美元	操作费用 (4) 1000美元	地方税 (5) 1000美元	总偿付 1000美元	净收入 1000美元
	(1) 毛产量	(2) 净产量						
1	183	160	25.00	4000	24	600	624	3376
2	119	104	27.50	2860	28	429	457	2403
3	89	78	30.25	2360	32	356	388	1972
4	71	62	33.28	2063	37	309	346	1717
5	59	52	36.60	1903	42	285	327	1576
6	50	44	40.26	1771	97	266	363	1408
7	43	38	44.29	1683	111	252	363	1320
8	36	32	48.72	1559	128	234	362	1197
9	31	27	53.59	1447	147	217	364	1113
10	26	23	58.95	1356	169	203	372	984
11	22	19	64.84	1232	195	185	380	852
12	19	17	71.33	1213	223	182	405	808
13	16	14	78.46	1098	257	165	422	676
14	14	12	86.31	1036	295	155	450	586
15	12	11	94.94	1014	340	157	497	547

(1) 初始产量—500桶/日；递减率：第1年35%；第2年25%；第3年20%；第4年17%；第5年以后15%。

(2) 减去1/8的矿区使用费之后的收入为100%。

基于：

(3) 每年增加8%

(4) 每年递增12%；第6年增加100%——使用抽油泵

(5) 售价的15%（矿区出租人自付所得税）

• 假定使用标准的租契方式（获利7/8）钻一口油井生产与操作费用列于此

误，并可以对多种可能情况进行详细对比分析。

计算机可以租用。程序系列由简单到复杂。输入的数据包括每口井钻井成本、井号、钻井时间表、开采数据、操作费用、税款等。

计算机将按照预先选择的程序，输出评价所需要的经济参数，一般包括：支出、利润率、回扣与不回扣的净收入、每年的现金流动、利润或通用指数，以及程序设计中公司所需的其它细节等。计算机的计算输出数据日趋精确，但其准确性不会比输入数据更

表 1.2 单井钻井计划的现值

年	净收入 1000美元	资本投资 1000美元 (1)	年收益 1000美元	现 值 回 扣 率				
				10%	20%	30%	40%	50%
1	3376	-0-	3376	3219	3082	2961	2853	2757
2	2403	-0-	2403	2083	1829	1622	1451	1307
3	1972	500	1472	1160	933	764	634	534
4	1717	-0-	1717	1229	907	685	529	416
5	1576	-0-	1576	1026	593	484	347	254
6	1408	600	808	478	297	191	127	87
7	1320	-0-	1320	710	404	240	149	95
8	1197	200	997	488	254	140	80	48
9	1113	-0-	1113	495	236	120	63	36
10	984	300	684	276	121	57	28	14
11	852	-0-	852	313	125	55	25	12
12	808	400	408	136	50	20	9	4
13	676	-0-	676	205	69	25	10	4
14	586	400	186	51	16	5	2	1
15	547	-0-	547	137	39	12	4	2
总计	20535	2100	18135	12006	8955	7381	6311	5571

支出计算——假定钻井、完井成本为6百万美元，基于未回扣的年净收益（或亏损）的支出为：

$$\text{支出} = 2 + [6000 - (3376 + 2403)] / (1472)$$

$$= 2 + 0.15$$

$$= 2.15 \text{年}$$

注：基于净收益（或亏损）回扣10%支出为2.60年。

(1) 第3年一修井；第6年一使用抽油泵；第8、10、12、14年一修井。一些操作者将此纳入投资，一些操作者仅将此作为付税投资。

高。

在经济分析中输入最准确的数据是最重要的，这样就可以用计算机得到一个成本低于平均值的钻井完井计划，降低施工成本。钻井计划的设计者最能做出正确的经济评价，因为他已为制定计划作了大量的工作。

支出与利润率是经济评价中最重要指标。不过，有时会有无形的因素影响钻井计划的最终选择。