

油田开发

[苏] Ю. П. 日尔托夫 著

石油工业出版社

070986

TE 34

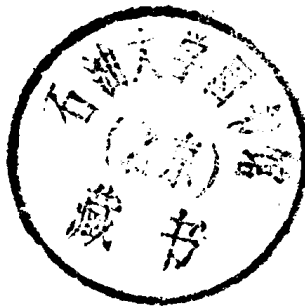


油田开发



〔苏〕Ю.П. 日尔托夫 著

郭美云 栾志安 译 葛家理 校



石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书阐述了油田开发的基本概念和建立油层模型及油层内所发生过程模型的方法。给出了在天然驱动、注水、注其它各种物质的人工作用下,以及在开发目的层的物理-化学状态、温度状态发生变化条件下的油田开发计算方法。同时也给出了选择最佳开发方案和油田开发监控、分析与调整的方法。

本书可作石油高等院校从校的教科书和事油田开发的科技人员参考。

DP-29/29

Ю. П. ЖЕЛТОВ
РАЗРАБОТКА
НЕФТЯНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
Издательство «Недра», 1986

油 田 开 发

〔苏〕Ю. П. 日尔托夫 著
郭美云 栾志安 译 葛家理 校

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京海淀昊海印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168毫米 32开本11³/₈印张300千字 印1-1,500

1992年3月北京第1版 1992年3月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0610-3/TE·581

定价: 3.60元

目 录

中文版前言	(1)
原版前言	(3)
第一章 油田开发系统和开发工艺	(8)
§1 开发目的层和开发系统	(8)
§2 开发系统的分类及特征	(12)
§3 油田投入开发	(23)
§4 油层驱动方式, 开发工艺和开发指标	(27)
第二章 油田开发模拟	(39)
§1 地层模型和油田开发过程模型	(39)
§2 地层模型的种类	(40)
§3 根据地质-物理和矿场资料建立地层模型方法的 原理	(44)
§4 层状地层模型和平面非均质地层模型的概率- 统计描述	(48)
§5 相对渗透率修正后的均质地层模型	(55)
§6 开发过程的模拟	(59)
§7 岩石储集层及地层中液体和气体的性质	(68)
§8 在油田开发计算中数学方法的应用	(79)
第三章 天然能量驱动油田开发	(98)
§1 弹性驱动的表现	(98)
§2 地层边外区为弹性驱动油田边缘压力变化的预测	(105)
§3 溶解气驱动和气顶驱动油田的开发	(116)
第四章 油田注水开发	(132)
§1 基本开发指标	(132)
§2 活塞式水驱油模型条件下层状油层开发指标的 计算	(139)
§3 非活塞式水驱油模型条件下均质地层开发指标的	

计算.....	(148)
§4 水驱油条件下裂缝-孔隙性地层的开发.....	(161)
§5 注水油田开发工艺指标的计算方法.....	(168)
§6 地层压力和油井产量计算.....	(178)
§7 油田注水开发的经验和存在的问题.....	(185)
第五章 油气田、凝析油气田及异常性质油田的开发	(195)
§1 天然能量驱动条件下油气田的开发.....	(195)
§2 对地层作用条件下油气田的开发.....	(205)
§3 异常高地层压力的深层和非牛顿原油油田的开发.....	(213)
§4 异常性质油气田开发的主要结果和存在问题.....	(219)
第六章 油田开发的物理-化学方法.....	(222)
§1 利用溶剂和高压气从地层驱油.....	(222)
§2 向地层注二氧化碳的油气田开发.....	(233)
§3 利用表面活性剂的水溶液从地层驱油.....	(241)
§4 油层的聚合物和胶束-聚合物注水.....	(250)
§5 用物理-化学方法开发油田的若干问题.....	(253)
第七章 油田开发的热力法	(256)
§1 地层中的温度状态及其在油田开发过程中的变化.....	(256)
§2 利用热水和蒸气从地层驱油.....	(264)
§3 利用热段塞方式向地层注热载体的油田开发.....	(274)
§4 利用地层内燃烧从地下采油的工艺和机理.....	(278)
§5 干式和湿式地层内燃烧.....	(285)
§6 利用湿式燃烧从地层采油过程的近似计算方法.....	(290)
§7 热力法油田开发的主要结果及存在问题.....	(304)
第八章 油田开发规划和经济指标	(308)
§1 作为苏联国民经济子系统之一的石油工业.....	(308)
§2 苏联油田开发的基本原则.....	(309)
§3 勘探-开发子系统的数学模型.....	(311)
§4 油田开发的经济指标.....	(324)
第九章 油田开发设计和调整.....	(329)
§1 油田开发的设计文件.....	(329)
§2 油田开发指标的测量、记录和分析.....	(333)
§3 油田开发调整.....	(336)

参考文献	(339)
标准文字符号表	(341)
〔附录部分〕	(343)
§1 概率积分	(343)
§2 幂指数积分函数	(345)
§3 液体从无限大地层向有限半径井渗流问题的解	(347)
§4 裂缝-孔隙性地层中弹性驱动条件下液体的 渗流	(350)
§5 油田开发问题有限差分解法的基本概念	(353)

中文版前言

世界各国的石油高等学校都编写过各种有关从地下开采油气的教程，其中最著名的，要算是《油层开发技术》。苏联的石油天然气学科的教学经验证明，大学生需要学习《油田开发》这门公共课，在这门课程中，不仅阐述有关从地下开采烃类的工艺学方面的概念，而且也给出关于开发系统、油气层构造及其模型以及开发方案设计和选择开发方案的技术-经济原则。以后，如果大学生专门学习的就是油田开发专业，那么，他们就可以再继续学习更加详细的《油矿开发技术》，《开发监控与调整》等课程。

我的这部《油田开发》教程包括的内容或许比公共课所要求的还要多，因此，可根据所学科目的规定和范围略去书中的某些章节。但同时，从这部教程中也能找到在后续的课程中要更详细地讲到的一系列问题。

自然，油田开发是一门工程学科。但它又是与地层中所发生的各种过程以及必须定量地对其预测相联系的。而且充满基础科学学科，如地质、物理、经济，特别是数学的各种概念，因此，必须对上述基础科学学科掌握到一定程度以后，才能学习油田开发。

目前，已有大量有关人类能源方面的预测，这些预测涉及到沥青、页岩、天然气水化物，地热，风，地球热核和太阳能的利用。文献中也常见到有关石油和天然气够用多长时间的预测性估计。这些估计都是简单地把地下剩余的潜在可采油、气储量除以某个不变的年油、气开采水平得到的。

在这种情况下，有时得到的数字结果或是50年、或是30年甚至更少。所以，一些想报考我工作的И.М.古勃金莫斯科石油天然气学院的年青人和一年级的大学学生经常问我：“地下剩余的石油还

很多吗？会不会突然发现，石油矿业工程师不久的将来会没有工作可做了？”

在设法回答这些困难的问题时，我常常讲，从地下开采包含在石油中的丰富的烃类与用人工方式制取它们相比较，前者对人类更有利，这种情况还要延续相当长的时间。很明显，只是将来的天然烃类的产量要有所下降，而它们在能源中的地位将被一些新能源所代替，但这并不能减少石油的价值。因此，“油田开发”专业对几代人来说仍然是需要的，仍然是有威望的，而且是有吸引力的。

我希望这部“油田开发”教程也将能供中国的石油工程师和石油工作者进一步深造时使用。

技术科学博士，教授Ю.П.日尔托夫

1989年6月于莫斯科

原版前言

有科学依据的实现从地层开采所含烃类及伴生有用矿物的过程被称为油田开发。这个过程包括钻开油田和开采油、气储量。

油田开发的科学属于矿业科学。但矿业却是人类一种古老的事业。早在石器时代和青铜器时代人类就开始寻找有用矿物并利用它们。人类发展史上的这两个时代的名称本身就与开采并利用石头和青铜制造工具有关，也即与矿业有关。

但是到了很晚的时候（在19世纪末）才建立采油井来开采石油。

1864年俄国企业家A. H. 诺瓦西里采夫采用顿钻法钻成俄国国土上第一口油井，该井位于黑海古帮地区古达克流域。1871年在巴肯地区人们用机械（转盘）方法钻了一口井。从19世纪的70~80年代，尤其是从20世纪初开始，俄国机械方法钻井发展很快，采油量也有很大增长。

尽管勘探井及采油井的数目以及采油量在20世纪初都迅猛增加，但是当时油田开发都是在天然能量驱动条件下用不正规的开发方法进行的。当时还没有采油方面的科学基础理论，不过关于石油的各种问题，从石油起源、地质和勘探一直到石油储运、加工和利用，许多俄国著名学者和工程师都做了工作，其中有Д. И. 门捷列夫，A. M. 布特列洛夫，И. М. 古勃金，B. Г. 苏霍夫。

甚至到20世纪20年代初，关于从地下开采油、气的油层物理学和力学以及采油过程本身的绝大多数基本概念还不为人们所知和采用。而早在1856年法国工程师A. 达西在研究净化水设施过滤器内水渗流时就发现了渗流的基本定律。后来才知道，石油稳定渗流和不稳定渗流方程与拉普拉斯、富里叶的数学物理方程完全

相似。但是在油田开发中采用这些方程却都是20世纪30年代的事了。

油、气向井底渗流主要动力的确定，也即油气田驱动机理学说的创立曾是油田开发理论的主要成就之一。在这个学说的创立过程中，И.М.古勃金，Л.С.列宾宗，И.Н.斯特利苦夫，А.П.克雷洛夫，С.А.赫利斯恰诺维奇，Ф.А.特列宾，Б.Б.布拉克，И.А.恰尔内，В.Н.谢尔卡乔夫，以及麦斯盖特，维柯夫，包特谢多姆，赖维列特都作出了巨大贡献。在30年代中期，油田驱动机理的理论得到重大发展。同时奠定了油层弹性驱动和溶解气驱动现代理论的基础。应当指出，早在本世纪20年代，Л.С.列宾宗就得到了气体渗流的微分方程，开始创建气田开发理论。

在本世纪20年代和30年代初，油田开发预测基本上是利用这种方法：首先建立由开发初期得到的开发指标随时间变化的实际关系，然后对这些指标进行统计处理并将其外推到将来。

渗流理论的数学方法在这个时期由杰尔卡茨，Н.Е.儒可夫斯基，Н.Н.巴甫洛夫斯基加以大力发展，但是还没有在石油工业中得到应用。而是美国学者麦斯盖特的著名著作才从根本上使这个理论方法在油田开发中得到发展和应用。

尽管在30年代末和40年代初，油、气渗流理论领域及其在采油中应用方面都取得显著的进展，但是油田开发作为一门独立的工程学科还没有形成。

40年代初，有科学依据地选择开发系统和开发工艺的油田开发理论基础还没有形成。例如在美国，很长时间象井距（井网密度）这样极为重要的参数不是根据研究、分析的资料和油田开发基本原理确定的，而是根据油井产量定额的人为方式确定的。而油井产量定额当时是由得克萨斯铁路委员会授权决定的。

1948年国立石油燃料科技书籍出版社出版的，由А.П.克雷洛夫，М.М.戈拉高夫斯基，М.Ф.米尔钦克，Н.М.尼古拉也夫斯

基和И. А. 哈尔内合写的奠基性著作《油田开发科学原理》^①，在油田开发作为独立科学领域和学科建立中起了决定性作用。在这部著作中给出了油田开发基本原理的第一个模式，奠定了油田开发设计基础，解决了一系列重要的渗流力学问题，油田开发科学作为一个综合的知识领域被提出来，它利用了石油地质、地球物理、渗流力学、井的开采、应用经济学等方面取得的成就。

上述著作的出版有利地促进了油田注水开发方法的发展。40年代末和50年代这段时期显著的标志是油田开发领域中研究工作量急剧上升，而且在这个领域中的新方向迅速发展。混合驱动——即水压驱动加溶解气驱动的油田开发问题求解也取得巨大进展。利用水动力学试井确定地层参数的方法也开始有引人注目的发展。建立了概率-统计模型进行油田开发计算的方法论基础。在油层渗流条件下直接考虑非均质性的方法也发展起来。

在50年代，新的油层模型（裂缝性和裂缝-孔隙性模型）以及油田开发的分析、调整方法也出现了而且得到发展。油田开发系统本身也大大发展了。起源于美国开发实践的面积注水系统开始出现，与此同时还出现了用注水井排对油田边内切割而油井沿切割线方向分布的开发系统，然后则是现代的块状-井排式开发系统的出现。

50年代末和60年代初开始研究在强烈岩层变形，在多数情况下是非弹性变形条件下开发的深层油田。

油田开发的设计、分析、调整的发展要求采用更复杂的数学方法和计算工具。在30年代和50年代期间，在开发计算中主要是利用精确解和近似解方法来解渗流力学问题，而在50年代末和60年代则是采用数值法解渗流力学问题。

50年代末和60年代初，在苏联注水成了对地层作用的基本方法。但是就在这个时期就已经明确，用这种注水方法不可能完全解决最大限度地从地下采油的问题，尤其是在高粘度、高含蜡油

① 本书分上、下两册，于1956年由石油工业出版社出版了其中文译本。

田。当时进行了一些基础性研究，并提出了一些技术方案，奠定了与向地层中注热载体和地层中燃烧有关的油田开发热力法发展的基础。也是在这些年间，全世界都十分注重发展用物理-化学方法采油，如象用烃类溶剂、二氧化碳、聚合物和胶束-聚合物等驱油。

油田开发复杂过程的计算不仅要求考虑地层中多相渗流，而且还要考虑它的多组分性，相态变化，地层中渗流物质本身的变化，也即必须利用多相、多组分渗流力学理论。

油田开发是一个正在强化发展的科学领域。它的进一步发展将涉及到采用新的采油工艺，新的认识地层中过程发生特征的方法；还涉及到油田开发控制；以及利用更完善的油田勘探，开发规划方法（这些方法要考虑到国民经济相邻部门的有关资料）；采用从地下开采有用矿物过程的自动化控制系统；发展根据确定性模型在大型电子计算机上实现的、具体计算地层结构及其中所发生过程特征的各种方法。

油田开发关系到人类对自然界进行干预，因此需要无条件地遵循有关资源保护和环境保护的法规。

苏联政府从它成立开始就把资源保护和合理利用作为一个重大问题来研究。伟大的十月社会主义革命之后俄罗斯帝制时期的矿产收归国有，并成为人民的财富。

由于苏联采矿工业的飞速发展，尤其是油、气产量的迅猛增长，迫切需要采取有关合理开采矿物并大大减少有用矿物损失的强制性措施。

1972年颁发了苏共中央和部长会议“关于加强自然界保护和改善自然资源利用”的决议，1975年最高苏维埃通过了有关资源的全苏基本法和加盟共和国基本法。

在有关油田开发的所有设计文件中都必须包括这样的条款：涉及采用封闭式生产流程保护土地、水和空气，预先考虑油、气、水的密闭收集，对采出水的净化和进一步用于向地层回注，石油气的废物利用，为提高地层原油采收率而采用化学物质的再

生及进一步利用。

尽可能充分地将石油、天然气和凝析油从油田中开采出来——这是合理利用资源的主攻方向。

在国民经济所有的各环节中，其中也包括油、气田开发的整个工艺过程中，实施资源保护措施有重大意义。

必须力求所采用的采油工艺、向地面举升以及油、气集输的方案，能够尽可能地减少每开采一吨油、气的能量消耗、减少烃类损失和防止毫无意义的将烃类烧掉的作法。

油田开发作为一门学科是属于工程学科的范畴。其特点是：不仅仅定性的，而且主要的是定量地研究油田及其中发生的过程，而技术方案——即油田开发设计也不是纯叙述性的，而是定量的。因此本教程的各章节中都用到数学方法。甚至于可以强调：油田开发是最充满数学方法的工程学科之一。从以下事实可以部分地解释为什么出现这种情况：工程师和开发工作者不可能直接到达自己的实践目标（油层），甚至于开始认识油层就不是借助于直接测量，而是根据地球物理测井和水动力学试井资料的数学处理结果。工程师和油田开发工作者只有借助于所谓数学反问题的求解（根据这些过程在井眼中的反应），才能定量地认识开发时地层中所进行的过程。

在油田开发教程中综合性地利用了许多重要的各学科原理，例如地质学，地球物理，油层物理，渗流力学，岩石力学，井开采工艺，采油系统，经济学和规划。

但是，油田开发并不是地质学、渗流力学、采油工艺和经济学的混杂体，而是一个独立综合的科学领域和有着自己专业界线的工程学科，它涉及到油田开发系统和油田开发工艺的研究，还涉及到规划和开发原则的实现以及油田开发设计和调整的研究。

第一章 油田开发系统和开发工艺

§1 开发目的层和开发系统

油田和油气田——被认为是以一个或几个局部地质构造，也即位于同一地理位置附近的一些构造为表现形式的地壳内烃类的聚集体。油气藏是油田的组成部分，它一般是位于在地下有不同的延展程度，而往往又有不同的地质-物理性质的地层或者岩块中。在大多数情况下，各个含油气地层被具有相当厚度的不渗透地层分隔开，或者这些含油气地层只存在于油田的个别区域。

这些独特的或者说性质各异的地层是利用不同井组来开发的，而有时还要采用不同的工艺。

我们引入关于油田开发目的层的概念。开发目的层——这是一种人为地在开发油田范围内划分出来的地质形体（地层、岩块、构造、地层组），它含有用一定的井组或其它矿业技术设备可从地下采出的烃类工业储量。油田开发工作者在使用石油工作者广泛应用的专业术语时，通常就认为：每个开发目的层都是用“自己的井网”来开发的。但是必须强调，自然界本身并没有制造出开发目的层——是从事油田开发的人将其划分出来的。

开发目的层的基本特征——其中含有的工业性石油储量，以及属于该目的层并用来开发它的确定井组。但是反过来讲则不成立，因为同样的一些井可以通过同时分采的技术方法开采不同的开发目的层。

为了更好地掌握开发目的层这一概念，我们来看一个例子。设有一个油田，其剖面如图1所示。这个油田含有三组地层，它们具有不同的厚度，充满它们的烃类的分布区域以及物理性质也不同。表中列出了油田范围内1、2、3三组地层的基本性质。在所研究的这个油田，可以肯定地说划分二个开发目的层是有利

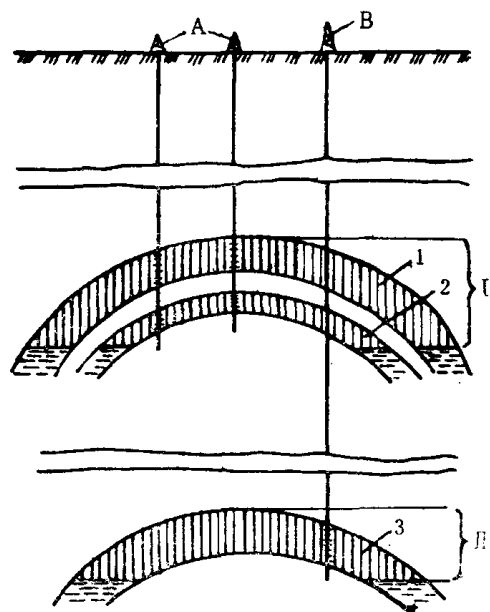


图1 多油层油田剖面

地质-物理性质	地 层		
	1	2	3
原油可采储量(10^6t)	200.0	50.0	70.0
厚度 (m)	10.0	5.0	15.0
渗透率 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	100.0	150.0	500.0
原油粘度($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	50	60	3

的，即把地层1、2合并作为一个开发目的层（目的层Ⅰ），而把地层3作为单个目的层（目的层Ⅱ）。

把地层1、2合并成一个开发目的层的条件是，它们具有很接近的渗透率和粘度值，而且纵向上彼此距离很小。加之在地层2中原油可采储量比较小。地层3尽管与地层1相比原油可采储量也比较小，但是却含有低粘度原油和很高的渗透率。因此打开地层3的井肯定是高产的。此外，如果含有低粘度原油的地层3采用常

规注水开发，则以高粘度原油为特征的地层1、2在开发时从开发一开始就必须采用其它开发工艺，例如蒸气驱油、聚丙烯酰胺水溶液（稠化水）驱油或者借助地层中燃烧的方法。

同时应当考虑到，尽管地层1、2、3的地层参数有很大差别，但是划分开发目的层的最后决定，还是依据将地层合并成开发目的层的各种方案本身的工艺技术和技术-经济指标分析结果而确定的。

开发目的层有时还要细分为下述形式：独立开发目的层，是指在给定时间内开发的；回采开发目的层，是指在该时期内用开采其它目的层的井来回采本层的目的层。

油田开发系统是指下述彼此相关工程方案的总合：确定的开发目的层；钻井、油建的顺序和速度；为从地下开采油气而对地层施加作用；油田油、水井的井数比及其分布；后备井数，油田开发的调控，周围生态环境保护等。建立一个油田开发系统就意味着找出并实施上述工程方案的总体组合。

油田开发系统建立中的一个很重要的组成部分——划分开发目的层。因此，我们将更详尽地来研究这个问题。事先人们可能说，把尽可能多的地层合并成一个开发目的层初看起来总是很有利的，因为这样一合并，整个油田开发需要的井数就要少得多。但是把过多的地层合并成一个目的层，可能使原油采收率受到严重损失，最终效果是技术-经济指标变坏。影响开发目的层划分有如下因素：

1. 油、气岩石储集层的地质-物理性质。渗透率，总厚度和有效厚度、地层非均质程度等这几个参数相差十分悬殊的地层在多数情况下不适于划成一个目的层开发，因为各地层在开发过程中地层产能，压力有很大差别，因而井的开采方式，原油储量的开采速度以及产液含水率的变化等等都会有很大差异。

对于平面上非均质程度有区别的地层，采用不同井网可能是有效的，因此把这类地层合并成一个开发目的层看来是不利的。在纵向上强烈非均质，包含有个别低渗透小层，而且它与高渗透小层

不连通的地层中，一般很难保证当纵向上施加作用时地层在水平方向上有好的波及效果，这是因为仅仅是高渗透小层投入活跃的开发，而低渗透小层并不受注入地层工作介质（水和气）的作用。为提高这类地层波及系数尽量争取把它们划分成几个目的层。

2. 油和气的物理-化学性质。原油性质在划分开发目的层方面有很重要的意义。原油粘度相差很大的地层通常不宜合并成一个目的层，因为可能要采用不同的原油开采工艺，即用不同的布井方案，不同的井网密度来进行开发。含蜡量、含硫化氢量以及含贵重烃组分，其它有用矿物工业含量大不相同等也会成为不能作为一个目的层一起开发的理由，因为这种情况下必须采用根本不同的从地下采油的工艺和开采其它有用矿物的工艺。

3. 烃的相态和地层的驱动方式。即使埋藏深度彼此很接近，又有相似的地质-物理性质的不同地层，在许多情况下，由于地层中烃的相态不同及驱动方式不同通常也不适于合并为一个目的层。例如，在一个地层中有很大的气顶，而另外一个地层是在天然弹性水压驱动方式下开发，则它们合并为一个目的层可能是不利的，因为在其开发中要用不同的布井方案，不同的井数，以及不同的油、气开采工艺。

4. 油田开发过程的控制条件。一个目的层中包含的地层和夹层越多，则从技术上、工艺上实现对油和驱替它的工作介质之间界面（水、油界面和气、油界面）在各个地层和夹层中的运移进行控制也就越困难；同时对小层分别作用以及从中分别开采油、气以及改变地层和小层的开发速度也越困难。结果，很坏的油田开发控制条件导致原油采收率下降。

5. 井的开采工艺和技术。采用某个划分目的层的方案适当或者不适当，还可能有许多技术和工艺上的原因。例如，如果打算让一些开采已划入开发目的层的某个地层和层组的油井采出相当大量液体，但由于现代油井开采设备的限制，就不可能进一步扩大开发目的层的层数。