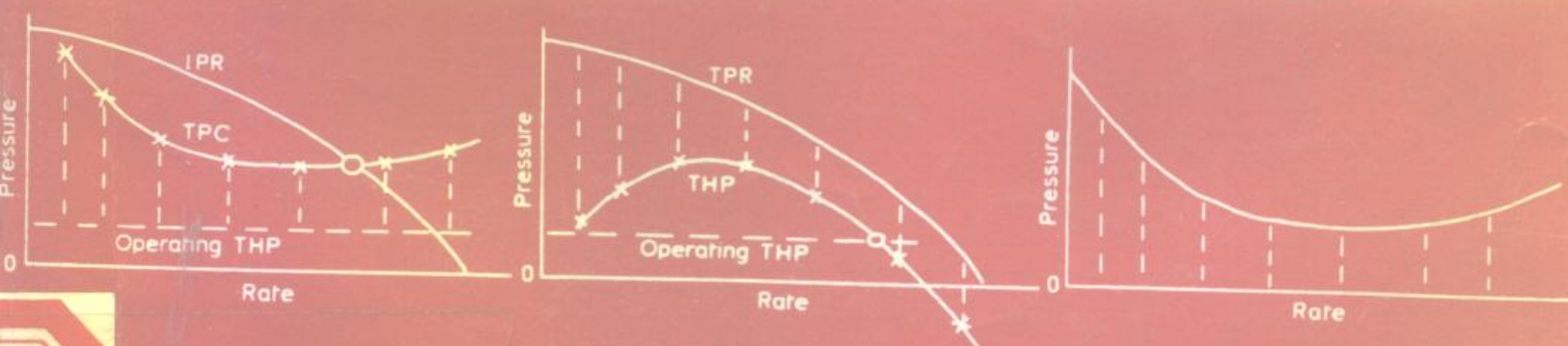


油气井动态分析

(第二版)

M. Golan C.H. Whitson



石油工业出版社

油气井动态分析

(第 二 版)

M. Golan

C. H. Whitson

陈钟祥 许政纲 等译

石 油 工 业 出 版 社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书在综合经典理论和现代研究成果的基础上,利用油藏工程方法和采油工程方法分析了油气井的生产动态、增产措施效果及地层损害因素,论述了用油气井动态来预测产量递减的原理,描述并分析了人工举升方法的设计方法和优选原则。为使读者掌握并在实践中灵活应用这些理论,书中有大量的图版曲线和示例,书末附有习题。

本书既适用于具备一定基础理论知识和实践经验的工程技术人员阅读,也是油气田开采专业学生的重要参考书。

本书由杨元建(序言、第一章)、郑洪印(第二、四章部分)、张仲宏(第二章部分)、**陈钟祥**(第三章)、赵明(第四章部分)、王国清(第四章部分)和许政纲(第五章、附录和习题)翻译。

Michael Golan/Curtis H. Whitson

WELL PERFORMANCE

Second Edition

Prentice-Hall, Inc.

A division of Simon & Schuster

Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1991

*

油 气 井 动 态 分 析 (第二版)

M. Golan

C. H. Whitson

陈钟祥 许政纲 等译

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京顺义燕华印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 26³/₄ 印张 674 千字 印1—1,500

1992 年 7 月北京第 1 版 1992 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0665-0/TE·632

定价: 13.65 元

序 言

本书是在课程讲义基础上发展而成的，该讲义是为在特隆赫姆的挪威技术研究所(NTH)讲授油田开采工程和讲授专门研究高产能油气井动态的石油工业课程而准备的。虽然本书的目的是帮助油气井动态的教学，但它也是工程师们掌握某些油气井动态因素的有用参考书。

我们知道，如果根本不了解试井分析、采油地质、测井解释、设备设计和多相管流，就不能完成油气井动态这个课题，至于这些基础内容，本文仅顺便作了一些讨论。但是，我们认为，本书所详述的油气井动态分析方法构成了油气井动态分析的基础，足以满足石油工程师们的需要。

文中包含了许多实例。通常，每讲述一个新的概念都伴随一些实例。只要有可能，我们都从已发表的油田资料中选择实例。事实上，为举例而收集已发表的资料是我们最艰巨的任务之一。似乎近期（最近10~20年）文献中所引证的大多数实例不是所给出的数据不完整就是由计算机“制造”的。文中许多实例来源机密，为此而采用了虚构的井名和地理位置名。

正象大多数经验丰富的工程师所能证实的那样，矿场数据并不适合教科书上的理论。这就向我们的工作提出了挑战，因为我们的多数实例来源于油气井的实际数据。理论与矿场实际的不一致性正好给了我们一个机会，要求我们对此提出更确切的观点和更好地弄清理论用于油气井动态分析工程中的局限条件。

在世界范围内，油气井产量的变化范围达几个数量级。本书的一名作者是在俄克拉何马的油田（在这里，一口“好”油井的产量为10~100bbl/d；一口气井探井至少能获得 10×10^5 ft³/d的产量）成长起来的，他创办了日报。另外一名作者是在中东的油田（在这里，单井日产油量为几百桶到几千桶，天然气产量通常是巨大的）开始其职业生涯的。在大约8年前左右，这两名作者首次相遇，自此，便着重从事挪威海上的油气开采工作。在此地，一口好油井的产量至少为10000bbl/d；一口高产气井由于设备的局限性而不能以其产能来进行生产。在本书中，依据我们对低产能和高产能油气井积累的经验，尽力考虑较大范围的油气井产能。

我们选择了惯用的矿场单位，如bbl/d、ft和mD等。做出这项抉择是很勉强的，因为转换到SI单位制似乎很迫切。但是，本书选用比较保守的矿场单位制有两方面的原因。第一，作者本人比较熟悉矿场单位，并且与选用不熟悉的SI单位制相比，在公式、图和实例中出现错误的机会比较少。第二，石油工业目前仍在沿用矿场单位。对于在中学用SI单位制“培养”起来的学生来说，重要的是让他们在两种单位制并存的石油工业中学会如何正确使用矿场单位制。而且，1980年前的大多数石油工程文献用的是矿场单位，为便于阅读这些文献，故本书应用矿场单位制是有必要的。

自20年代初期以来，许多工程人员对了解油气井动态做出了贡献。其中Millikan、Muskat、Poettmann、Gilbert、Vogel和Fetkovich的早期工作为现代油气井动态分析铺平了道路。此后，其它人在有关课程讲义、教科书和文献中综合、创立和提出了油气井动态的概念。

有两位专家（即Mike J. Fetkovich和Marshall B. Standing）对本书提出的观点有

重要的贡献。据我们看来，Fetkovich先生在把标准工程用于油气井动态中奠定了两个经典概念。首先，在其关于油井多流量试井的论文中(1973年)，他把油井与气井之间作了类推。并在文中表明，气井的标准回压方程可以等效地用于油井，这是因为：(1)油井中的多相流动类似于气井中压力相关特性的影响和(2)与采气有关的典型高速流或非达西流动也在油井中很普遍。Fetkovich的第二个突出贡献是用恒压解来解释和预测产量递减。关于递减分析所推导的许多典型曲线法是来自于Fetkovich的原始文献。我们力图消化吸收Fetkovich和其它专家提供的大量资料，并以不熟悉不稳定试井理论的工程师易于理解的方式表达出来。

Standing博士继加利福尼亚的标准石油公司长期供职后，于1974~1975年在NTH讲授采油工程和油藏工程。Standing博士以他在油气系统中相态方面的贡献而闻名于世。在NTH，他论证了对采油工程和油藏工程的综合理解。Standing博士能够以简单的书写形式表达深奥的概念，他在这方面的能力受成千上万个学生的赞赏。在NTH期间，Standing博士写了一系列的文献笔记(可惜未出版)，包括一本数据书、三本传统的油藏工程手册、多本生产笔记、一本关于相对渗透率的经典著作和几本“如何写”指南。其中的大多数在近10年的斯坦福大学供职期间(1975~1983年)得到改进和提高。我们很愿意用这些文献笔记中的许多观点作为本书论述的起点。联系到他那广泛的兴趣和丰富的阅历，作为一个前辈，Standing博士的贡献在未来多年里是不会有人超过的。

我们在此感谢得克萨斯大学的Augusto L. Podio博士，他严格地审查了本书的第一章和第二章。我们听取了他的大部分评论和意见。还感谢Tenneco石油公司的David M. Dering先生协助我们准备原图。感谢Roy Davis先生为我们绘制图件。

Phillips石油公司挪威和Tenneco石油勘探开发分公司为我们完成此书提供了必要的财政支持。特别感谢这些公司和其它公司的工程师们，他们也对此书提出了批评和建议。

最后，我们要感谢我们的家庭、朋友和同事，他们为我们提供必要的支持和理解，甚至在周末和假日期间，他们为我们的工作做出了奉献。

Michael Golan和Curtis H. Whitson
于挪威特隆赫姆

目 录

第一章 油气井动态工程的概念	(1)
第一节 生产系统的简介	(1)
第二节 油藏流体和地面流体的相态	(7)
第三节 油藏流体流入动态	(18)
第四节 油管动态和梯度曲线	(30)
第五节 自喷	(38)
第六节 井口、油嘴和出油管动态	(50)
第七节 自喷概念的外延	(61)
第八节 小结	(65)
第二章 关于油气井动态的油藏状况	(67)
第一节 向井流动	(67)
第二节 理想流体的稳态径向流动	(69)
第三节 表皮效应	(77)
第四节 气井的产量与压力关系	(82)
第五节 饱和油井的产量与压力关系	(101)
第六节 拟稳定态生产：稳定流动	(117)
第七节 不稳定生产	(130)
第八节 小结	(150)
第三章 向井筒的流动限制	(152)
第一节 表皮系数及其有关概念	(152)
第二节 井筒附近的渗透率变化	(154)
第三节 局部打开和限制性进口	(162)
第四节 高速流动	(172)
第五节 孔眼穿透深度、几何形状和密度	(183)
第六节 防砂依据	(198)
第七节 凝析液阻塞表皮系数	(213)
第八节 综合表皮系数	(215)
第九节 净产层、非均质性和流动屏障	(223)
第十节 小结	(233)
第四章 产量递减分析	(236)
第一节 不稳定产量递减	(237)
第二节 衰竭式产量递减	(248)
第三节 油气井增产措施	(260)
第四节 典型递减曲线分析的特殊方法	(285)
第五节 油田开采策略：综合油气井动态	(291)
第六节 小结	(305)
第五章 人工举升原理	(307)
第一节 人工举升方法	(307)

第二节 油井下泵采油 (309)

第三节 气举 (345)

第四节 人工举升方法的选择..... (365)

第五节 小 结 (368)

附录A 梯度曲线 (370)

附录B 典型曲线和预测产量递减程序..... (375)

参考文献 (389)

练习题..... (398)

第一章 油气井动态工程的概念

本章描述了分析油气井动态问题所用的基本原理。首先描述了一个简单的油气生产系统，接着简要地讨论了主要的机械组成和生产系统的常规布置。也涉及了解决有关油气井产量和流动条件问题的综合策略。本章介绍的用于解决生产问题的基本概念包括：

- (1) 油藏流体和地面流体的相态；
- (2) 油藏流入动态关系式(IPR)；
- (3) 梯度曲线和油管动态；
- (4) 井口动态；
- (5) 油嘴动态；
- (6) 出油管动态。

最后，本章将说明如何应用这些概念来预测自喷条件和人工举升依据。

第一节 生产系统的简介

生产系统实际上是一个把油藏流体输送到地面并且分离为油、气和水的系统，如果有必要和计划从油田销售或外输油气，则油气流需要处理。所有的产出水也需要处理，以便于再次使用或重新注入正在开采的油藏。一个生产系统的基本机械组成包括：

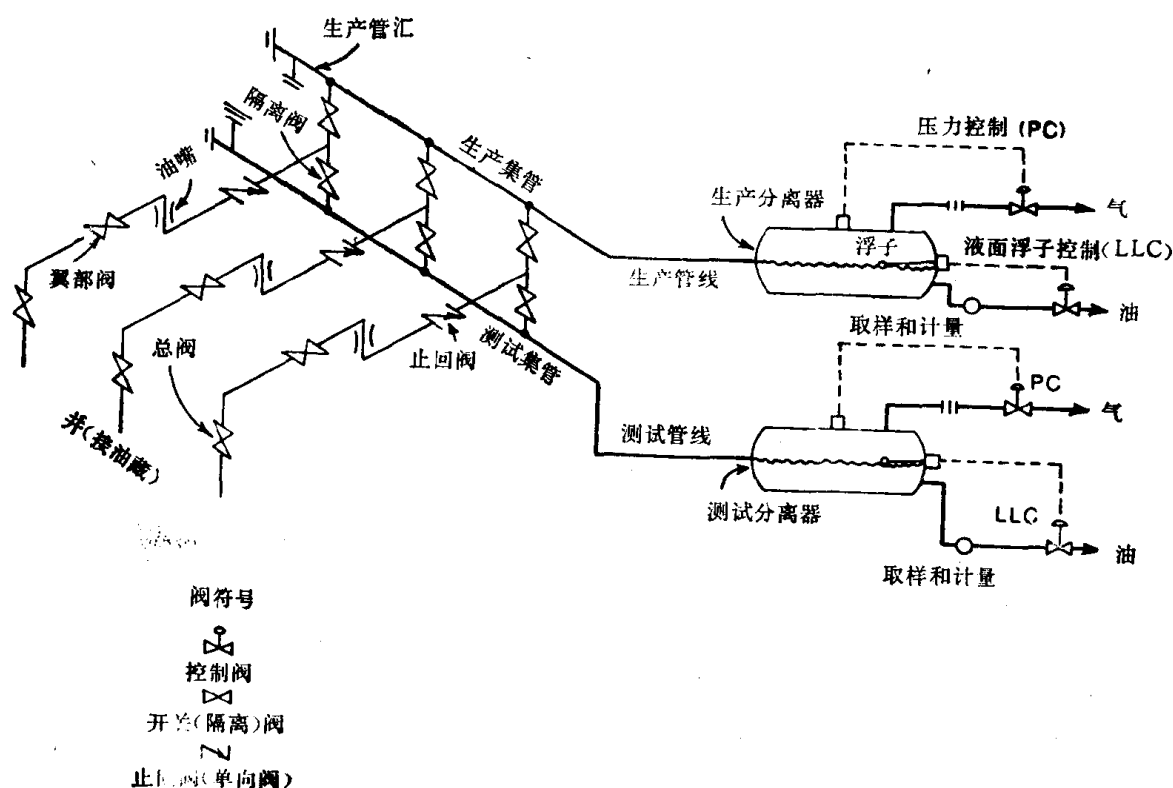


图 1.1 简单的生产系统

- (1) 井；
- (2) 出油管；
- (3) 生产管汇；
- (4) 分离器和处理设备；
- (5) 计量装置；
- (6) 储存装置。

图1.1说明了一个用于并列的3口自喷井和2个分离器的简单生产系统。

例1.1 生产管汇的设计

绘出并说明隔离阀在生产管汇上的位置，该生产管汇连接5口生产井，并把产出流体直接输往并列的一个测试分离器和2个生产分离器。

解

一个有效的管汇应该能够把任何一口井的产出流体输往3个分离器中的任何一个。通过建立3根集管（并且一根集管连通一个分离器）的管汇就能达到这个目的。如图E1.1所示，通过图中所排列的隔离（开关）阀可把任何一口井的产出流体任意输往任何一个分离器。

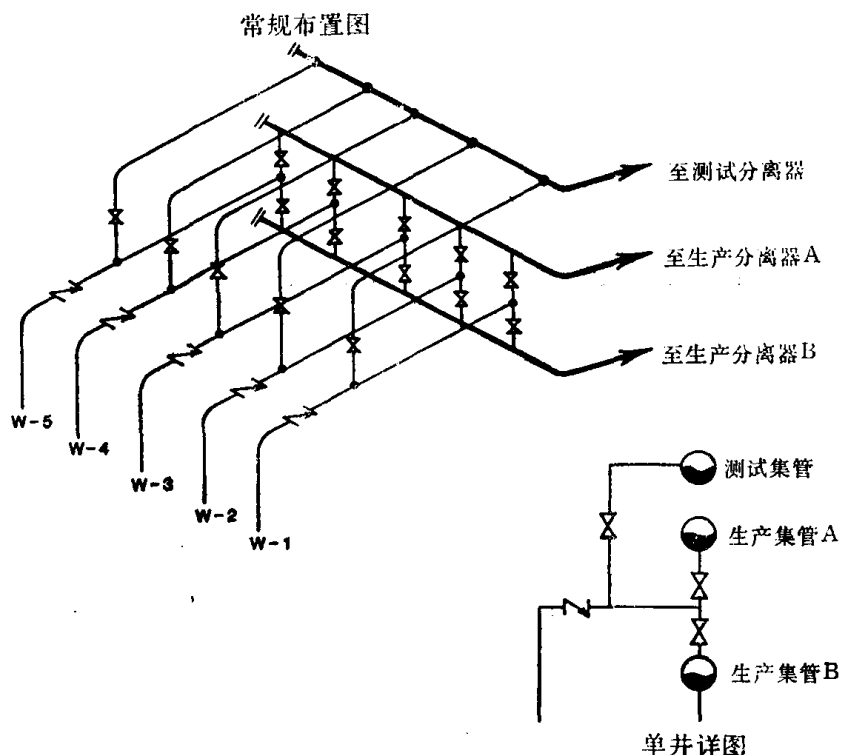


图 E1.1 连接3个并列分离器的5口井的生产管汇常规布置图

在图1.1中，3口井的产出流体通过出油管到达生产管汇。通过调节一个安装在管汇上的合适的阀，能够使流体输往两个分离器中的任何一个。产出流体在分离器中分为液流和气流，分别计量后，进一步输出处理或销售。管汇阀隔离每个单井的产出流体，使之直接进入两根称为集管（或收集器）的收集管线中的一根。对于这个简单的生产系统，当一个分离器（生产分离器）用作产出流体的连续处理时，另一个分离器（测试分离器）则可用作单井的日常测试。连接生产分离器的集管称为生产集管，另一根连接测试分离器的集管称为测试集管。每口井的产出流体可以直接通过生产集管进入生产分离器，或者转向通过测试集管进入测试

分离器。在井与管汇之间安装了止回阀。这个阀能够防止高压井产出流体通过管汇回流入低压井。多井生产系统的设计应该能使任何一口井的产出流体进入任何一个分离器，除非额外的投资不能购买这些灵活的设备。

如例E1.1中所布置的，并列分离器是应用两个小型生产分离器而不用1个大型分离器来连续分离使流体。这样的布置也能分离处理井组产出的流体，高水油比（WOR）井的产出流体需要进行脱水或破乳处理。

在图1.2中示出了1口自喷井的简单生产系统，从中可以观察到各项机械组成。井中与开采工程有关的主要机械组成包括：（1）生产套管或衬管；（2）油管柱；（3）生产封隔器；（4）井口和油管悬挂器；（5）采油树。

对含油气层段的生产套管进行射孔，使油藏流体进入井中，并向上流入生产油管。在井的下部用1个生产封隔器对套管与油管之间的环形空间进行密封，从而使油管与油套环空隔离开。在封隔器处锚定油管，否则，由于温度和压力的变化会导致油管在其长度方向上自由伸缩。油管柱也包括一些辅助设备，例如座节、安全阀、循环套和耐磨接头。

油管柱悬挂在安装于井口的油管悬挂器上。油管悬挂器也能使油管顶部与油套环空顶部之间密封。在油管悬挂器上部安装了一系列的隔离阀，它们的组合构成了采油树总成。采油树是单块型的，即所有的阀门安装在一个钢块上，或者它由法兰接合（连接）在一起的几个阀门组成。图1.2示出了一个简单的采油树，它由底端的1个总阀和在顶端把流动分为3个方向的1个出油三通组成。把水平出口导向翼部阀。在采油树顶部安装了抽汲闸门。通常，仅有一侧的出口连接1个翼部阀，用1个无口法兰或塞子堵住其它出口。根据要求，总阀和翼部阀可用来开井和关井。如图1.2所示，另外1个阀是环空连通阀。在人工举升的生产井中，环空和环空连通阀既用于放空，又用于注入天然气。

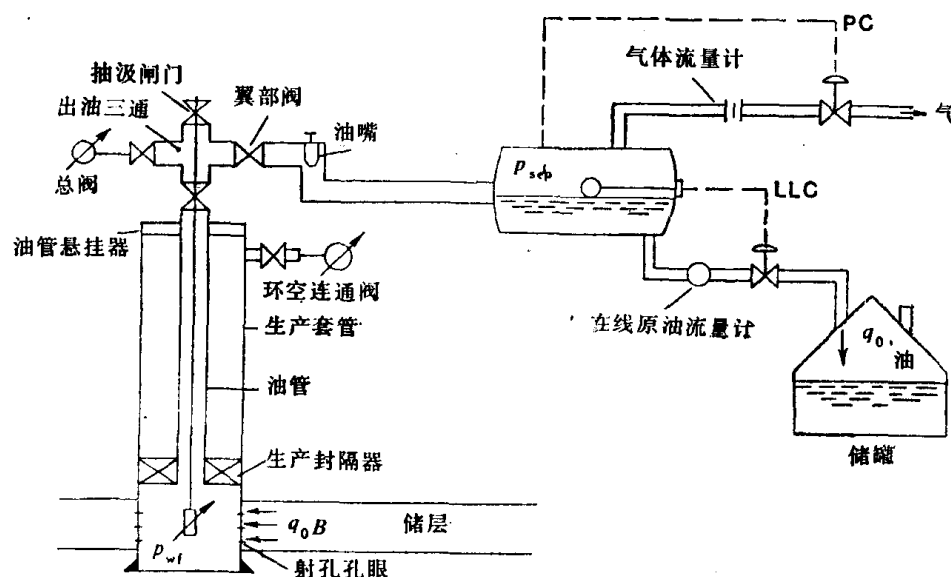


图 1.2 简单的单井生产系统

在正常生产期间，流体流过总阀和翼部阀进入出油管。封闭和堵死其它翼部阀，在一般情况下需封闭抽汲闸门。高压气井需要两个主阀和两个翼部阀（一侧出口安装一个），以便满足较高的地面压力和较高的安全要求。阻流阀（油嘴）安装在翼部阀的下游，并连接出油管的上游。阻流阀用来稳定产量和把井口压力降到较低的出油管压力（下游）。对于海洋平台上的卫星井来说，油嘴通常安装在管汇入口上而不是采油树上，所以它易于控制、观察。

采油树和管汇上的隔离（开/关）阀不是用于稳定产量的，因为侵蚀造成的损害，使阀过早地失效。在高产井中，关井时最好逐渐地拧紧阻流阀，然后当停止流动时，再拧紧翼部阀和总阀。重要的是意识到油嘴仅是为稳定井的产量而设计的阀。

如图1.2所示，在井的日常生产测试期间，用1根钢丝绳起下的井下压力计来测量和记录井底压力。与此同时，在地面储罐中可测量脱离溶解气后的液体产量。用1个安装在管线中的流量计测量由分离器分离出来的气量，报告出标准压力、温度（即14.7psia和60°F）条件下的体积流量。分离器由两个控制器来调节：液面控制（LLC）和分离器压力控制器（PC）。分离器中的液面通过液体出口处的控制阀来调节。该阀由连接浮子的控制器来调节，浮子是用于监测分离器中的液面的，它是以预先设定的液面为基准，当液面上升时，浮子会带动阀使出口张大；当液面下降时，它会使出口缩小。分离器的压力由气管线中的1个回压阀控制。用1个压力调节器启动回压阀，当分离器压力降低到低于预先设定的值时，它会缩小阀门开度；当压力超过此设定值时，会增大阀门开度。

在一个简单的生产系统中，分离器分离出来的原油流入一个大气条件下的储存罐。气体直接进入天然气集输管线。在这种情况下，在储罐中测量油，在管线中计量气。用一个管线上的流量计来测量分离器的原油产量，该流量计应安装在LLC阀的上游，从而减少原油流量计中存在的游离气。在存在游离气时，原油流量计不够精确，分离器分离出的原油被气体饱和，微小的压降将会使气体从溶液中逸出来。所以，应该尽可能地靠近分离器出口处计量原油。

至此，生产系统的描述比较简单一些，但其原理代表了大多数陆上和小型近海油田的情况。当油田生产中要求多井、多分离器和其它处理设备时，地面设备的布置图相当复杂。在图1.1和1.27中示出的基本组成在更复杂的生产系统中仍保持其应有的职能，了解这些机械组成的基本原理将在生产系统设计中起着重要的作用。图1.3示出了控制4个底盘和3口卫星井的水下管汇系统。管汇位于海底，而分离器和处理设备座落在浮式储油装置的甲板上。地面设备连接具有软管和生产立管的管汇上。

除了常规的生产控制职能外，所述的管汇能够使注入气通过注气集管到达气举井。为此，一条附加的管线能连接每口井的环空和管汇。系统设计者愿意使油嘴位于生产集管上游的管汇上。一个位于测试分离器上游的附加油嘴能够稳定测试期间的产量。如图1.3所示的设计，提供了以下职能：

- （1）自喷开采时，保持正常压力，并连续监测环空压力；
- （2）在其它井生产时可进行单井测试；
- （3）仅能对底盘上的井进行气举；
- （4）当底盘井不能自喷生产时，可把卫星井转为注入井；
- （5）若连通卫星井的1根4in管线损坏时，所有的井仍能继续生产；
- （6）当潜水员修理管汇中的水下阻流器时，整个油田不需停产。

在上述的每种情况下，读者可在图1.3中试着找出流动路线。

在讨论了一个生产系统的机械布置后，我们可以研究系统的流动特征。油藏提供的流体和能源可把流体送到地面。流体从油藏进入井筒并向上到达地面，经过地面设备，最终进入储罐或外输，每个流动过程都伴随着一系列的压力降落。图1.4设想了以恒定产量生产的单井的压力横向分布。以油藏外边界的压力作为压力横向分布的起点，以输送管线的压力或储罐的大气压力为终点。

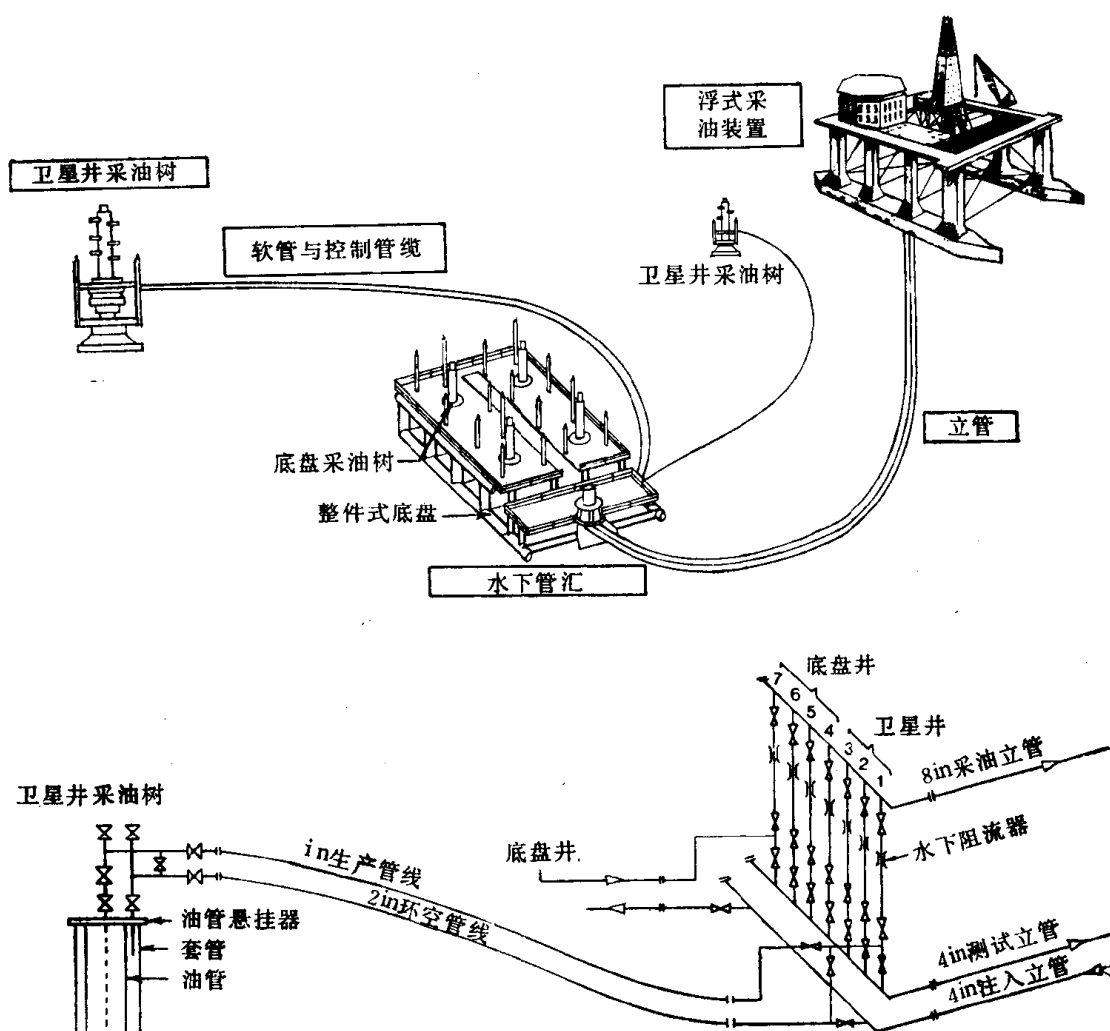


图 1.3 复杂的水下生产系统

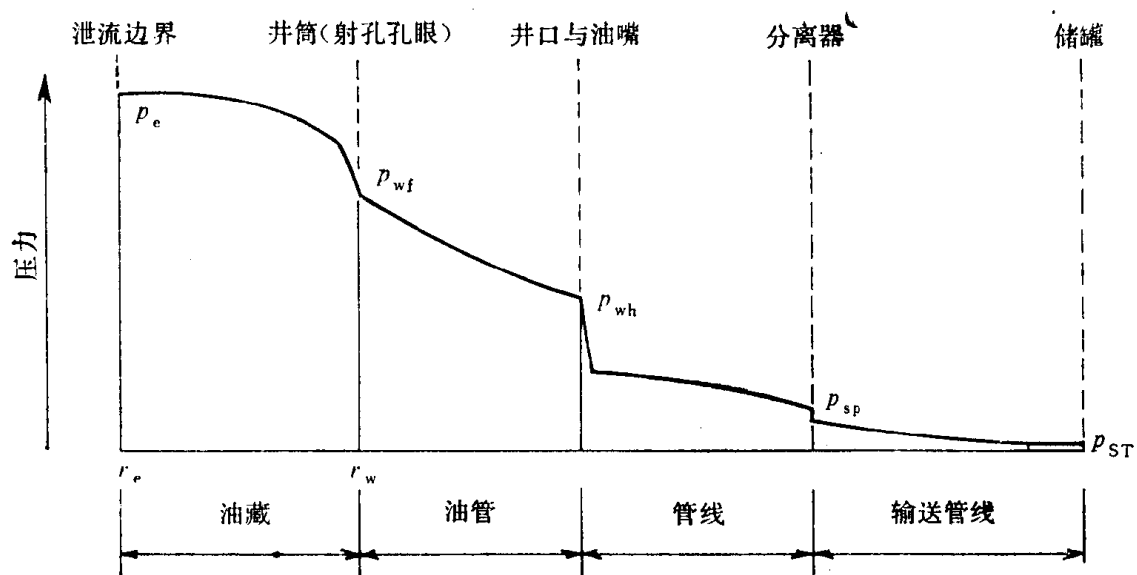


图 1.4 生产压力剖面

在大量的油气通过系统时，将产生较大的压力梯度。反之，较大的压力梯度导致较高的产量。产量取决于压降，这是大多数采油工程问题的实质。通常以下面两种方式进行研究：

- (1) 在流动路线（即井筒或井口）上的特定点来研究产量与压力的关系；
- (2) 在恒定产量下研究流动路线上的压力横向分布，即井筒周围或油管内的压力分布。

更一般地说，油气井动态工程的分析实质是对以下三种情况的压力与产量关系的研究。

- (1) 稳定态生产。
- (2) 由于油藏衰竭，压力与产量缓慢而长期地变化。
- (3) 流动条件突然变化后的短期不稳定状态。

在研究之前，重要的是认识产量计算的特点和在准确性方面的局限性。设计和计算几乎总是用不完整的和常常不准确的数据。油藏流体和地面流体的流动现象也是复杂的，很难简单地进行数学描述。因此，我们常常尽可能地定性分析，给出对生产系统的因果特性的认识。Campbell和Farrar (1972)通过“我们只能认识环境，但决不能控制它”的论述表达了石油开采的特殊性质。

解决生产工程问题常需要有一个快捷而简单的计算方法，即它能够近似油藏流体开采中的复杂现象。当我们的最终分析结果是为一个新油田的经济分析来预测产量或确定改变完井和增产处理方法的经济影响时，这是相当重要的。

当然，它不能代替有良好直觉的实践经验。但是，要是常根据“明智”的判断而不是根据工程分析来进行决策，其结果会导致巨大的失误。例如，考虑图1.5示出的3种完井选择。试着推论哪种完井方法可产生最大的效益和实用解。任何企图想尽快获得这个问题的解都可能是徒劳的。没有通用解，相反，解取决于人们所用的特定准则（经济上的或机械上的）、所用的数据和工程设备。在本章末，你将会应用你自己的比较准则来解决这个问题。

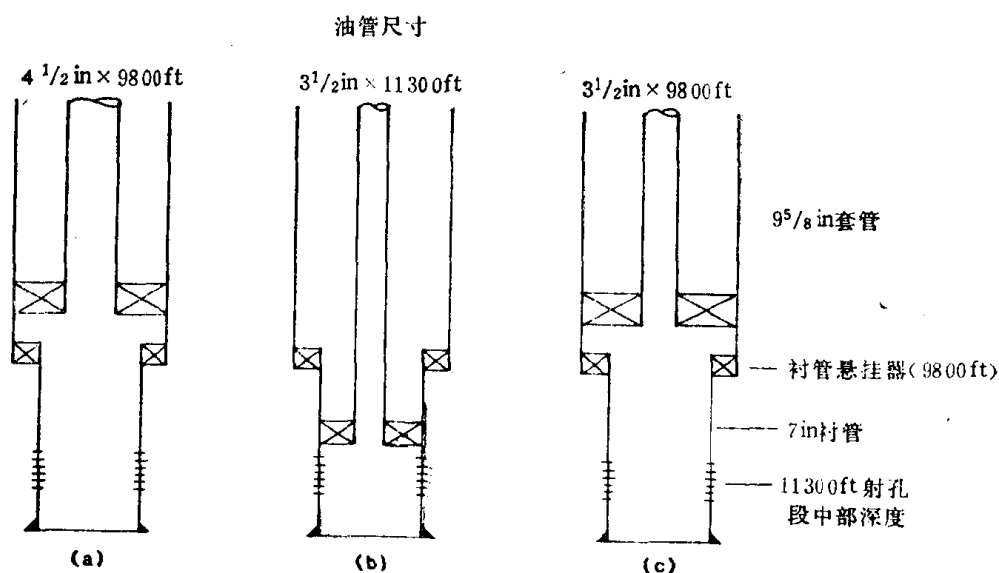


图 1.5 完井设计的选择

究竟什么时间需要油气井动态工程？事实上，任何时间都需要，你必须预测产量或选定井或地面系统的机械设备。你也需要它来评价系统变化对产量的影响。在早期的可行性研究中，可用产量预测来研究油田的商业价值和计划油田开发的策略等。一旦确定其商业价值，则生产装置和设备的规格设计就变为油气井动态工程的主要任务。最后，当油田正在开发时，

重要的是确定单井生产需要何种类型的增产措施和人工举升系统。解释生产数据和诊断油藏及其它油井问题也是油气井动态工程的任务。

本章的其它几节说明了用于油气井动态工程的基本计算方法，并介绍了控制油气井稳定生产的基本原理。介绍的第一个问题是油藏流体沿生产系统流动时的相态和体积变化。

第二节 油藏流体和地面流体的相态

油从油藏的泄流边界流进井筒，沿生产油管上升到地面，通过地面和处理设备后，最终达到了饱和状态。此后，当在流动路线上发生压力降落时，气体会从溶液中逸出，形成一个气油两相系统。根据油的特性和泄流边界处的压力和温度，油达到饱和状态的那点位于连接储罐或外输管线的流动管线上的某个位置。释放的气体和流体处理中分离出来的气体被收集在一个管线中，或排放到大气，或处理获得液化天然气，或用作现场作业的燃料，或重新注入正在开采的油藏，或储在一个地下储存系统。最后，在储罐或储存装置中，气体将从原油中逸出。

在油藏条件下，油中的溶解气量取决于流体的整个组分。在其它条件下，留在油中的溶解气量取决于当时的压力和温度。因此，气体的逸出量和逸出速度取决于流动路线的压力和温度剖面。当气体逸出时，原油收缩（体积收缩）直到它在储罐的标准温度、压力条件下保持稳定，原油在油藏条件的体积 V_R 与在储罐中的体积 V_{STD} 之间的比值称为原油地层体积系数（FVF）。

在研究中，发现由于以下因素的联合作用导致流动路线上部分气体和原油体积的共同变化：

- (1) 游离气膨胀；
- (2) 饱和原油收缩；
- (3) 油相和气相之间的传质（气体逸出）。

为简化管线中的压降计算，在给定的横截面积下定义液相和气相所占据的体积分数是有用的。它们可表示为：

$$E_L = A_L / (A_L + A_g) \quad (1.1)$$

和

$$E_g = 1 - E_L = A_g / (A_L + A_g) \quad (1.2)$$

式中 A_L 是液相（油和水）占据的横截面积， A_g 是气相占据的横截面积， E_L 是液相在总面积中的分数。 E_g 是气相在总面积中的分数。 E_L 项通常称为持液率。它在管流计算有几种用途，其中一个最重要的用途是计算流动状态。

图1.6中示出了管线横截面的两个示意图。两相（油和气）正在管线中移动，但每个图上的相态分布是不同的。图1.6a示出了一相（液相）以液珠和段塞形状进入另一相（气相）时的示意图。在低气液比情况下会发生相反的情况，即气相以气泡和段塞形状进入液相。图1.6b示出了两相分离的情况。这种相态分布是低流速时水平管流和倾斜管流的特征。其它几种特殊的流动状态，即气液分布结构，已在实验中观察过。

在分离的或夹带的两相流的每种情况下，液体和气体体积分数 E_L 和 E_g （即无滑脱）的数量是管流计算中有用的数量。实际上，无滑脱持液率的意思是，如果有一个流动，在一个短管段的两个快速封闭阀之间捕捉两相流混合物，液体和气体的体积分数将分别等于其面积

分数 A_L 和 A_g 。短管段的体积分数可用每相进入和离开管段的体积流量来表示。假设两相通过管子时具有相似的速度（假设无滑脱），无滑脱 E_L 可定义为：

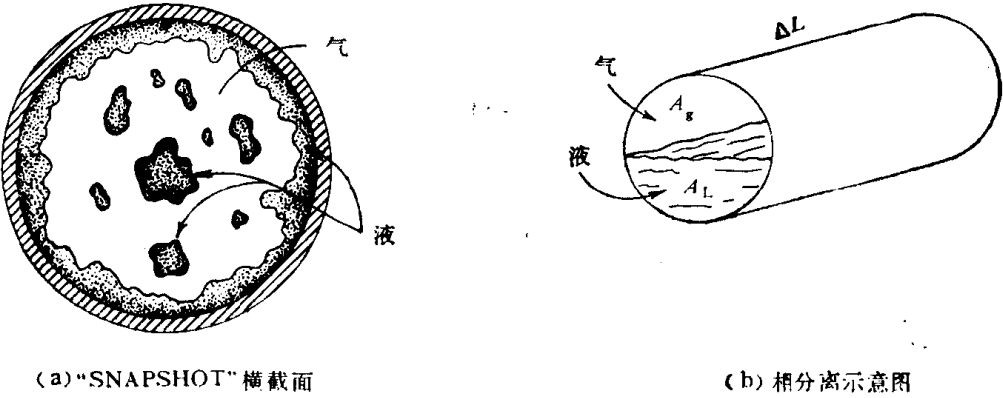


图 1.6 管中两相流的剖面图

$$E_L = q_L(p, T) / [q_L(p, T) + q_g(p, T)] \quad (1.3)$$

式中 $q(p, T)$ 是指对应于压力 p 和温度 T 时通过所研究横截面的体积流量。可利用无滑脱假设作近似计算，其中混合物的密度定义为产出流体（气、油和水）的总质量除以所有三相的总体积。总质量是个常数，仅仅是气液比例随着压力和温度变化而变化。所以，应用无滑脱持液率 E_L 和 E_g 以及相密度 ρ_L 和 ρ_g ，则混合物密度 ρ_m 可表示为：

$$\rho_m = \rho_L E_L + \rho_g (1 - E_L) \quad (1.4)$$

该值可用于计算垂直管或倾斜管中重力造成的压降，可在某些关系式中定义雷诺数($Re = \rho v d / \mu$)，它把摩阻造成的压力损失联系起来。

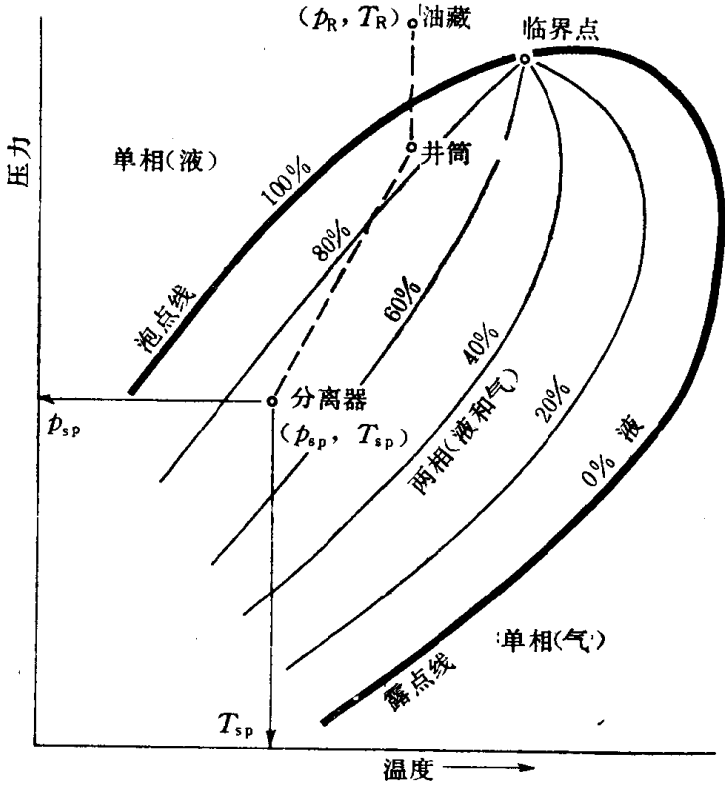


图 1.7 未饱和油藏原油的压力-温度图

为了计算密度和无滑脱持液，必须确定所研究横截面上常规温度和压力下的气体和液体体积。虽然凝析油计算需要更复杂的状态方程，但体积计算中通常用的是压力、体积和温度（PVT）关系式。压力-温度(p - T)图是描述油气混合物在生产系统中流动相态的有用工具。图1.7示出了原始油藏条件下未饱和原油建立的油气混合物的典型 p - T 图。

在 p - T 图上绘出了混合物为单相和分离为油气两相的区域。泡点线定义了当混合物呈现为单相液体的条件，并且如果压力降低，它将逸出气体形成两相系统。露点线定义了当混合物呈现为单相气体的条件，并且，如果压力变化，将出现凝析液体，形成两相系统。泡点线与露点线的交接点是临界点，它代表一个独特的热力学条件。认为两相包络线之外的混合物是处于未饱和状态。

露点线通常可分为两个区，即反凝析和正常区。如果压力从反凝析露点线下降时，将会发生液体凝析，而从正常露点线提高压力时，才会发生液体凝析。发现两个露点线段的交接点处于最高温度点，混合物在该点以两相形式存在（临界凝析温度）。

在图1.7中的相图上，我们可循着对应于从油藏边界流到井筒（绝热过程），通过生产油管和油嘴，最终到达分离器的轨迹。在分离器中，气和油被分离为不同的流线，每一种又构成了具有不同组成和不同相图的一个新混合物。气体将在其相图的露点线上开始出现，油将在其相图的泡点线上开始出现。根据综合气和油的 p - T 图，图1.8示出了分离过程：注意，许多离开分离器的气体可能是前面沿着油管到分离器的流线上逸出的。

可把生产油管中气体逸出、气体体积膨胀和原油体积收缩作为一系列连续的、饱和油气平衡共存的增量状态。图1.9中示出了这种模式。（a）单相原油进入井筒；（b）混合物泡点，标出了气体第一次逸出；（c）和（d）示出了横向的两相区。注意，气和油的 p - T 图描述c和d点处的平衡相是不相同的。这意味着即使混合物 p - T 图未变，平衡气和油相的组成在两相区内不断地变化。在研究中，因为进入两相区，气体逸出，故油相和气相的体积和组成发生变化，但它们总是处于饱和状态（气体处于其露点线上，油处在泡点线上）。

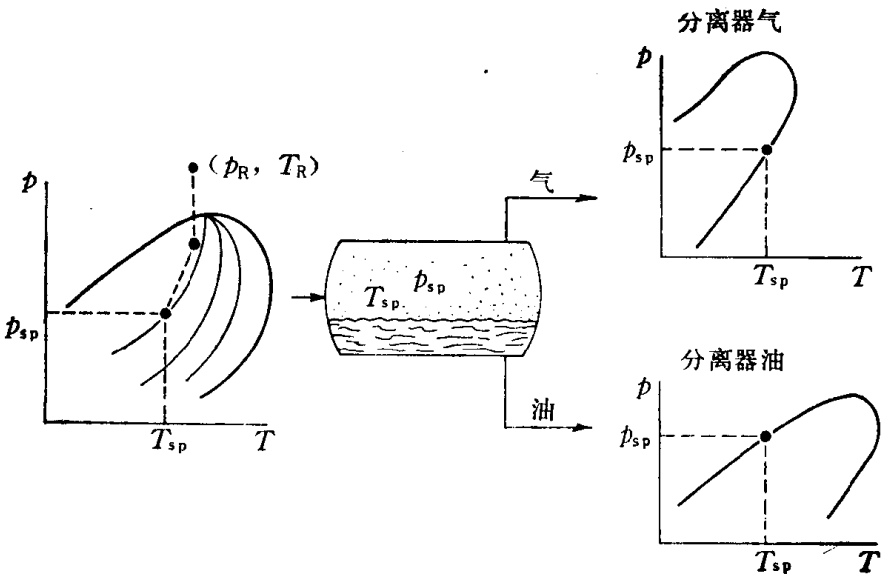


图 1.8 用于描述地面分离器的压力-温度相图

复杂PVT模型，诸如状态方程，可用来描述复杂的相态，但仅限于描述，对于生产计算来说，我们要依靠近似计算式和一些简化公式。预测PVT状态所要求的最少数据是产出气

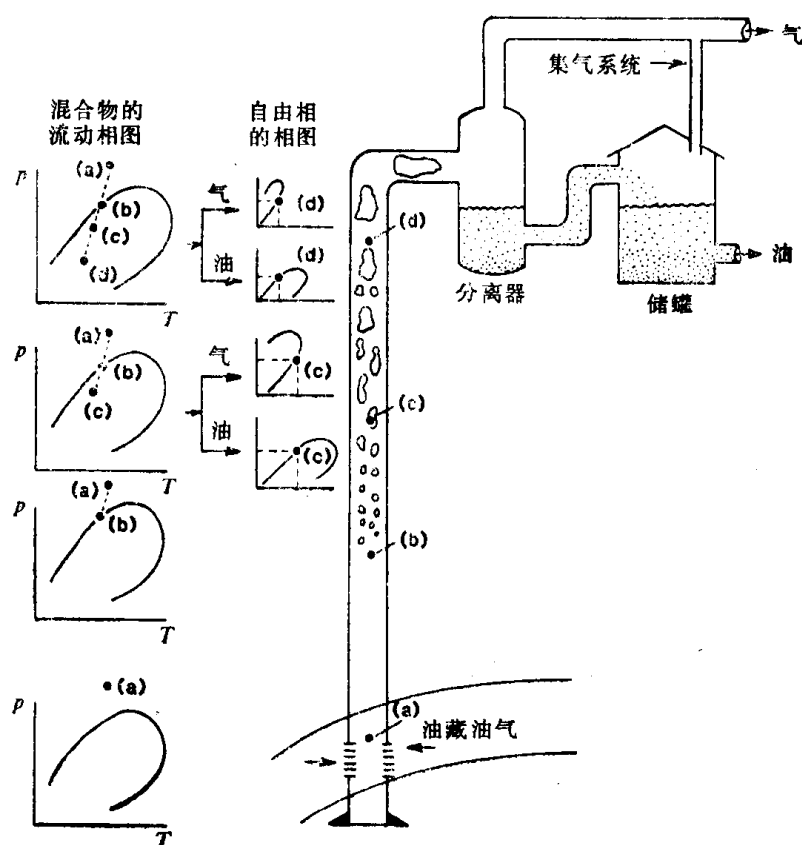


图 1.9 在生产油管中的相态变化

和储罐油的地面特性以及估算流动路线上的温度剖面。油和气的相对密度以及气油比(GOR)是用于PVT关系式的主要地面特性。油和气的相对密度定义不同。气体相对密度是标准状态下气体密度与空气密度的比值,而油的相对密度是标准状态下原油密度与蒸馏水密度的比值,相对密度是无因次的,但它与标准状态(通常为14.7psia和60°F)下定义的基准密度有关。

典型的PVT关系式是由现场单位推导的。PVT关系式应用的现场单位是:API重度 γ_{API} 用API度给出(°API);总的气体相对密度, γ_g ;原始溶解气油比 R_s 的单位是(scf/STB);油藏温度,°F。图1.10示出了从生产数据中报告地面特性的典型定义示意图。

API重度与原油密度 γ_o 的关系为:

$$\gamma_{API} = 141.5 / \gamma_o - 131.5 \quad (1.5)$$

$$\gamma_o = 141.5 / (131.5 + \gamma_{API}) \quad (1.6)$$

其中我们记起 γ_o 是在14.7psia和60°F的标准状态下定义的。为计算储罐油密度 ρ_{STO} ,必须利用标准状态下蒸馏水的密度(约为62.37lbm/ft³),得到:

$$\rho_{STO} = 62.37 \gamma_o \quad (1.7)$$

单位也是lbm/ft³。

溶解气油比 R_s 是每级分离收集到的气体总体积除以储罐油体积。溶解气油比的大小取决于分离器的级数和油藏流体处理中所用的条件。在这种情况下,一个基本的假设是进入井筒的混合物为单相,因此使得:(1)在油藏中没有捕集原始溶解气,(2)在油藏中没有是游离气的产出气。

根据定义,气体相对密度是标准状态下气体密度与空气密度的比值。气体相对密度可等效为气体分子量与空气分子量(28.97)的比值,总气体相对密度 γ_g 是每级分离的气体相对