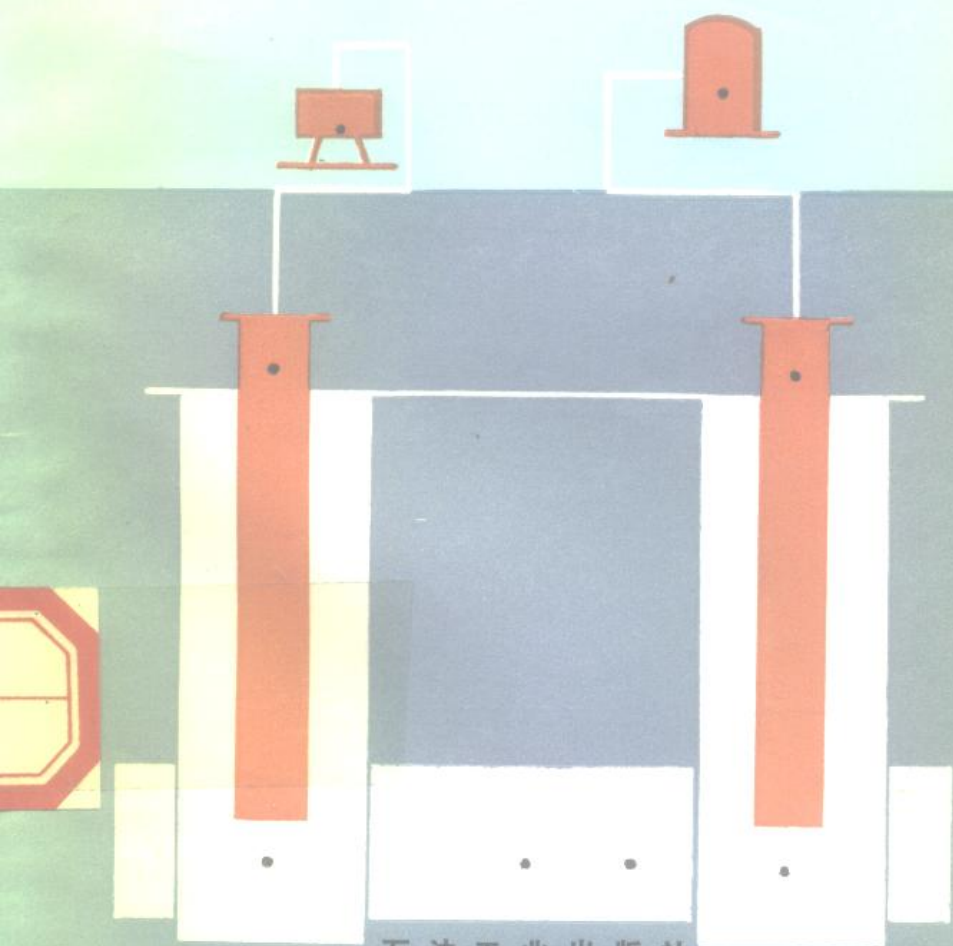


油气井节点分析实例

王德有 编著



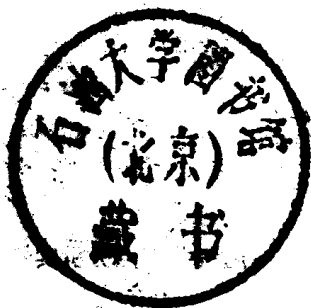
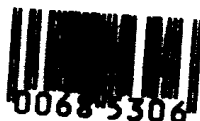
石油工业出版社

070186

TE3/027

油气井节点分析实例

王德有 编著



200415620



石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书在简要介绍了油气井节点分析基本原理的基础上,较详细地介绍了应用油气井节点分析方法进行油井产能计算、多相垂直管流计算、油气井系统分析、采油压力系统设计、气井系统分析等方面的油井实例计算分析。本书运用大量的油田现场实际资料进行计算处理和多种项目的综合分析、从中得出较为符合油田生产实际的结论,因此具有较大的实用参考价值。

本书适合现场从事采油工艺设计、油气田生产管理的工程技术人员实际工作中参考,同时对石油院校师生也有较大的参考价值。



石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
昌平第一排版厂排版
顺义燕华印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 55/100印张 118千字 印1—2000
1991年12月北京第1版 1991年12月北京第1次印刷
ISBN 7-5021-0599-9/TE·570
定价: 1.60元

序 言

“油气井节点分析”是研究油田开发系统的油藏工程、采油工程和油气集输工程之间压力关系的方法。通过分析确定各自的压力界限和压力能量的合理应用，从而改善油田开发效果和提高经济效益。

这个方法的特点就是把一个油田作为一个开发系统，将油藏工程、采油工程和油气集输工程有机地结合在一起，来确定油田压力保持的界限，优选采油方式和合理的油气集输流程，并科学有效地利用油层压力能源。80年代国外油田在制定油田开发方案时，已普遍应用此方法。国内从1986年以来，辽河沈阳油田、华北二连油田在制定油田开发方案时也采用此方法，通过几年实践，证明确定的压力保持界限是合理的，采油方式和油气集输流程选择也是符合实际的，总体效果也是好的。过去，在制定油田开发方案时，往往是油藏工程、采油工程和油气集输工程分别制定各自的方案。由于没有有机地结合，在各环节的衔接中出现过不少问题。使用节点分析方法后避免了这些问题的发生。

本书对节点分析作了较详尽的理论阐述，并结合油田实际情况进行了实例计算，这对各油田采用此方法都是有所裨益的。不仅新油田制定油田开发方案可以使用，老油田开发也可以用此方法检查开发方案执行的结果，并对一些不合理的环节进行调整和整改。值此书出版之际，写下数言，拟推荐各油田熟悉和掌握此方法，真正将油田作为一个整体开发系

统，将地下、井筒和地面工艺技术有机结合，按系统优化设计并付之实施。这样不仅可以提高油田建设效率，提高油田开发、开采效果和油田开发技术水平，而且可以节约大量资金。

万仁溥

1990年3月31日

前 言

油气井节点分析是一项对油气生产过程进行系统优化分析的方法。本方法1954年由美国人吉尔伯特 (Gilbert) 首先提出。这是他在总结了以往油藏工程中多相垂直管流和水平管流、油嘴特性等有关油气井生产过程的数学模拟计算基础上, 运用节点分析技术的综合研究成果。这一分析方法将油气井生产的全过程作为一个整体来研究, 从而使分析和设计结果不仅在局部上是合理和最优化的, 也保证了在整体上的协调。而以往的采油工程研究, 人们常习惯于孤立地研究油气生产过程中的某一局部, 很少将其当作一个统一的整体来分析研究, 因而很容易形成分析和设计结果在局部是合理的, 而在整体上不协调。在油田开发方案的编制方面过去就存在这方面的问题。如往往过多地重视油藏地质的研究 (这显然是必要的), 但忽略了对采油工艺的配套研究, 甚至缺少独立的采油工艺方案; 油田地面建设方案也不能很好地与油田地质和采油工艺配套, 致使油田投入正式开发以后被迫经历不间断的调整改造过程, 这不仅影响油田的正常开发生产, 同时也造成了人、财、物力的极大浪费, 这方面的教训是不乏其例的。油气井节点分析正是解决上述问题的一种科学方法。它的推广应用无疑必将极大地推动油田生产的发展。

但是由于油气井节点分析是一种综合系统分析技术, 内含众多而且较复杂的数学公式, 计算起来是十分复杂的, 这

使它的推广应用受到很大的限制。因此，虽然早在1954年就提出了这一分析方法，但在当时计算手段比较落后的情况下，并未引起人们的广泛注意。直到80年代初期，计算机技术在油田的工程分析和设计中开始广泛应用的时候，这一分析方法才被逐渐应用到油田生产实际中去，并很快地见到了实际效果。尤其在美国，这一分析技术的推广应用打破了以往在采油工程方面的一些传统观念，使油田生产因此而有了较大的发展。

油气井节点分析方法是与计算机技术的发展相联系的，所以计算机软件在这一方法的应用中占有相当重要的地位。下面列举的是国内见到的几个较好的计算机软件。

(1) 美国SSI公司的“WPM”(Well Performance Model) 软件，1987年7月已由大庆油田引进。

(2) 美国Softsearch公司的“SAM”(System Analysis model) 软件，1986年12月已由辽河油田引进。

(3) 美国油藏工程专家K.E.布朗教授来华讲学时介绍的“POP”(Production Optimization Program) 软件。

(4) 北京石油勘探开发研究院采油所编制的“Nodal”软件。

此外，国内石油大学、大庆石油学院等单位也已开展编制油气井节点分析软件的研究工作。

油气井节点分析作为一种系统分析方法，在油田生产实践中具有十分广泛的应用前景。目前国内在这方面的研究尚属于开始阶段，研究工作主要限于对方法本身及软件的编制方面。它的进一步发展应该是运用这一分析方法解决油田生产实际问题，并且得到明显的开采效果和获取巨大的经济效益。

本书是我们在开发应用“SAM”软件过程中，运用该程序对油田生产实际问题进行计算的部分实例。其中比较详细地介绍了运用油气井节点分析方法解决不同生产问题的基本步骤，并通过大量实际问题的计算，提出分析过程中不同模拟计算公式和有关参数的选择意见。为了使本书更具有系统性，在本书的前半部分简要地介绍了油气井节点分析的基本原理。我们希望本书能对油气井节点分析方法在油田的实际应用起到推动作用。

本书的编写及“SAM”程序的开发应用得到了中国石油天然气总公司开发生产部的大力支持，特别是万仁溥同志为本书写了序言，并对全书内容进行了审定。在此对所有关心和支持本书编写的同志及参与本书中部分计算的鲍锋、王立新及在成书过程中帮助整理的程芳、陈君等同志一并致谢。

王德有

1990年3月23日

目 录

第一章 油气井节点分析概述	1
一、油气井节点分析原理	1
二、油气井的流入特性关系 (IPR)	15
三、油气井完井段流入特性关系	37
四、油气井流出段流动特性关系	42
第二章 七个油井产能公式10口井算例分析	59
一、说明	59
二、基础数据	61
三、计算步骤	62
四、七个产能公式计算结果对比	81
五、结论	85
第三章 十个多相垂直管流公式 123 个井层算例分析	88
一、说明	88
二、计算步骤	90
三、123 个井层计算结果分析	92
四、结论	103
第四章 油井系统分析——沈77井算例	106
一、说明	106
二、基础数据	109
三、系统分析步骤	111
四、结论	131
第五章 采油压力系统设计——沈84下层系算例	134
一、说明	134
二、计算原理	134

三、沈84下层系采油压力系统优化设计步骤	137
第六章 高气油比油井及气井算例分析	146
一、双31—20井井口压力预测	146
二、国外石油公司气井系统分析算例	151
符号说明	156
本书常用单位换算表	161
参考文献	163

第一章 油气井节点分析概述

油气井节点分析又称NODAL分析。它是运用系统工程理论，优化分析油气井生产系统的一种综合分析方法。本章简要地介绍油气井节点分析的基本原理。

一、油气井节点分析原理

1. 油气井系统生产过程

油气井系统生产是一个不间断的连续流动过程。注水开发油田的油气生产一般要经历以下几个程序。

(1) 注入水地面流动过程

注水开发油田的油气生产系统起点是注水泵的出口。在联合站或注水站，注水泵将合格的注入水升压到工程所需的压力值，经计量后进入地面注水管网，分配到各计量站。在计量站内，经节流控制及计量后，分配到各注水井。这一过程的主要压力损失为管道内流动摩阻及管件、阀门节流阻力损失。由于注入水粘度很小，这一部分的阻力损失一般也都很小。

(2) 注水井垂直管流过程

分配到各注水井的注入水，经井口、油管（正注）向下流入到井底。在笼统注水方式下，直接经射孔井段进入地层。在分注方式下，经配水器水嘴后，再经过射孔井段进入地层。这一过程的主要阻力损失为管道摩阻和射孔井段孔眼阻力。在分注方式下，外加水嘴损失。

（3）注入水在油藏内的渗流过程

注入水经射孔井段后进入油藏孔隙空间，此间的流动状态为注入水在多孔介质内的渗流。在这一过程中，注入水推动储层空间内的原油向油井方向流动。这一过程是一个很复杂的流动状态。主要压力损失为注入水在孔隙内推动原油向前流动的渗流阻力，表明这一阻力的特征参数为吸水指数。影响这一阻力的因素相当多。在实际生产中，为了简单明了地反映这一阻力特征，通常采用由注入井口压力与注水量变化关系表明的视吸水指数来表达注入水在油藏内的渗流阻力情况。

（4）油气在油藏内向油井渗流的过程

油气生产流体在此间的流动特性与注入水在油藏内的渗流特性相类似。主要不同之处是在此流动段内气体的影响增加。特别是在饱和压力较高，气油比较高的情况下，当地层压力低于饱和压力时，在油、气、水三相流动过程中，由于气体的存在，渗流阻力增加。尤其是在近井筒地带，一般是处于低于饱和压力下流动，再加上油层伤害的影响，渗流阻力是很大的。且流动特性的描述也比较复杂。

（5）油气通过射孔井段的流动过程

油气生产流体在此处的流动，以往的研究中都不重视。近些年来，随着采油工艺技术和油藏工程研究的进步，在这方面的研究取得了很大的进展。尤其是在射孔工艺参数对于完井特性的影响方面，进行了较深入的研究。例如，对射孔密度、射孔深度、孔径、射孔相位，以及由于射孔造成的压实、烧结作用的研究，都有很大的进展。应该说射孔工艺对油井产能的影响越来越受到重视。

（6）油气生产流体沿油管垂直举升过程

油气生产流体在克服油藏内的渗流阻力和射孔井段压力损失后，在油井井底具有一定的剩余压力。这个压力是沿油管向上举升生产流体的原动力。如果这个压力大于生产流体在油管内向上举升的阻力，则油井在自喷条件下生产；反之则不能将生产流体举升到井口，而需要采用人工举升方式，进行机械采油生产。

油气生产流体在油管内向上举升过程中的流动状态是相当复杂的，一般要经历泡状流、段塞流、环流、雾状流等几个流动状态。长期以来人们研究了许多数学相关式来描述其中的流动特性，但是到目前为止还没有哪一个数学相关式能普遍地适合于各种油井的条件。很显然这是由于油管内的流动状态过于复杂的缘故。这其中有油、气、水三相流体的性质、相对比例及流态的变化等因素的影响。在此流动段内主要的阻力损失为流体举升高度和管道摩阻两项。这两项也构成了整个油气生产系统内最主要的压力损失。

（7）油气生产流体通过油嘴的流动过程

油气生产流体通过油嘴的流动过程主要是小孔眼管道的节流过程。目前也已研究出许多数学相关式来描述这一流动特性。

（8）油气生产流体地面水平管流过程

油气生产流体经地面管网进入计量站，经计量后，再依靠由井口提供的系统剩余压力（油压）进入计量接转站或联合站的分离器，经过简单的气液分离处理后，再进入输油泵或大罐。因而油气生产系统的末点应当是计量接转站（三级布站）或联合站（二级布站）的分离器。此间的主要阻力损失是管道内三相生产流体的摩阻。此部分损失一般都不很大。

以上粗略地阐述了油气生产的简要过程，从而建立了一个油气生产系统的整体概念。可以看出油气生产是一个连续过程，是一个统一的整体。对应于某一注水压力下，油层必定保持相应的地层压力。在此地层压力下，油气生产流体克服储层内的渗流阻力、射孔井段阻力，在油井井底剩余一定的压力，这一压力便是沿油管向上举升生产流体的动力。油气生产流体若可以被举升到井口，油井便可以自喷生产。在井口的剩余压力即油压再将油气生产流体输送至生产分离器。油气生产流体若不能举升到井口，就需要采用机械采油方式生产。

由上述分析可以看出，对于这样一个统一的整体在进行系统分析时，就要进行整体研究。油气井节点分析正是系统分析整个油气井生产过程的一种方法。

2. 油气生产系统内节点的设置

运用油气井节点分析方法进行系统分析时，首先要依据上述油气井生产的逻辑关系，在生产系统内设置节点。通常油气井节点分析的节点设置如图1-1所示。

通过上述在油气生产系统内设置节点，将系统划分成若干相对独立，又相互联系的部分。通常划分为如下几部分（段）：

- (1) $p_L - p_{ih}$ 注入地面段；
- (2) $p_{ih} - p_{if}$ 注入管流段；
- (3) $p_{if} - p_r$ 注入地层段；
- (4) $p_r - p_w$ 流入段；
- (5) $p_w - p_{wf}$ 完井段；
- (6) $p_{wf} - p_{wh}$ 流出管流段；
- (7) $p_{wh} - p_{s,p}$ 流出地面段。

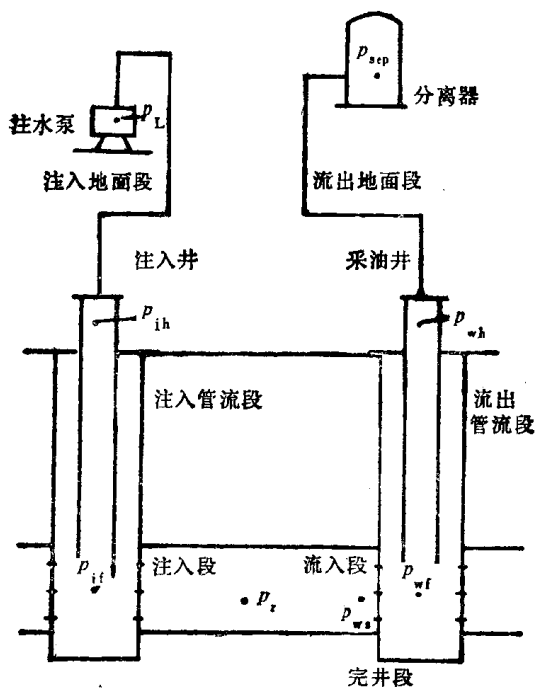


图 1-1 NODAL分析节点示意图

上述各符号意义为

- p_L ——注水泵出口压力；
- p_{ih} ——注水井井口压力；
- p_{if} ——注水井井底流压；
- p_r ——地层压力；
- p_{ws} ——油井井底岩面压力；
- p_{wf} ——油井井底流压；
- p_{wh} ——油井井口油压；
- p_{sep} ——分离器压力。

油气井节点分析方法要对上述中的每一部分（段）采用相应的数学相关式（公式）进行模拟计算。通过前人的工作，人们已经研究出许多数学公式来模拟油气生产流体在上述各部分中的流动特性，主要是描述产量与压力的关系。关于这些数学相关式在本章的下面部分再作具体的说明。由于通过节点设置使系统被连结成一个统一的整体，如果对系统内的每一个部分进行模拟计算，则整个系统就被模拟。节点分析方法就是通过这样的一个模拟计算过程，来分析、优化油气井生产动态的。

3. 解节点的选择

在运用油气井节点分析方法解决具体问题时，通常集中分析系统中的某一节点，此节点一般称为解节点（Solution node）。通过解节点的选择，油气井生产系统被划分为两大部分，即流入（Inflow）和流出（Outflow）部分。分别表明始节点到解节点和解节点到末节点所包括的部分。通过对流入和流出部分的模拟计算求得流入和流出动态特性，再分析比较流入和流出特性，便可以求得油气井生产动态。

解节点的选择要满足下列要求：

- （1）解节点处只有一个压力；
- （2）通过解节点只有一个与该压力相对应的流量。

解节点的选择与系统分析的最终结果无关。换言之，解节点的位置可以在油气井生产系统内任意选择，原则上要依所要求解问题的目的而定。例如，在分析地面生产设施的影响时（地面管线长度、管径及分离器压力等），解节点可选择在井口 p_{wn} 处。但大多数油气井生产系统分析问题中，解节点一般选择在油井井底 p_{wf} 处。

4. 油气井生产系统的模拟分析

在模拟分析一个油气井生产系统时，通过上述节点设置和解节点的选择，使生产系统划分为两大部分，如图 1-2 所示。

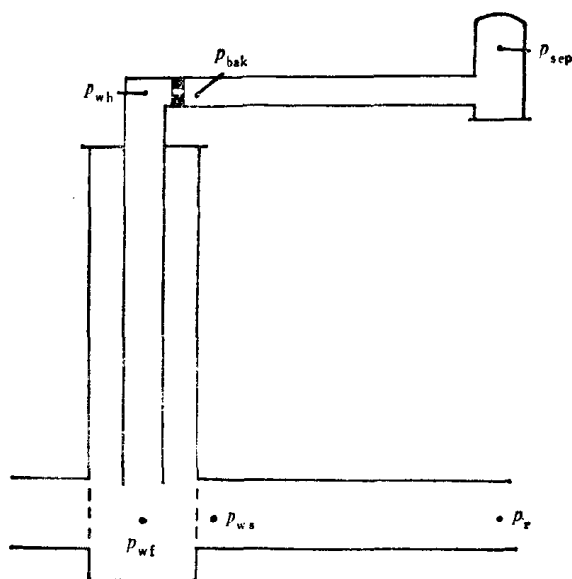


图 1-2 油气井生产系统模拟分析图解

图1-2中， $p_i - p_{wf}$ 段称为流入部分，而 $p_{wf} - p_{sep}$ 段称为流出部分。分析过程中，分别由系统的始点 p_i 和末点 p_{sep} 进行模拟计算，求得流入和流出动态关系。通常用图解形式，将流入和流出动态曲线画在同一张图上进行分析，如图 1-3 所示。

由图中可以看出，流入与流出动态曲线的交点为 A。在 A 点的左侧，例如在 q_1 产量下，对应的井底流压 $p_i > p_i'$ ，说明生产系统内流入能力大于流出能力。这就说明油管或出油管系统设计能力过小或出油管路系统内有阻碍流动的因素