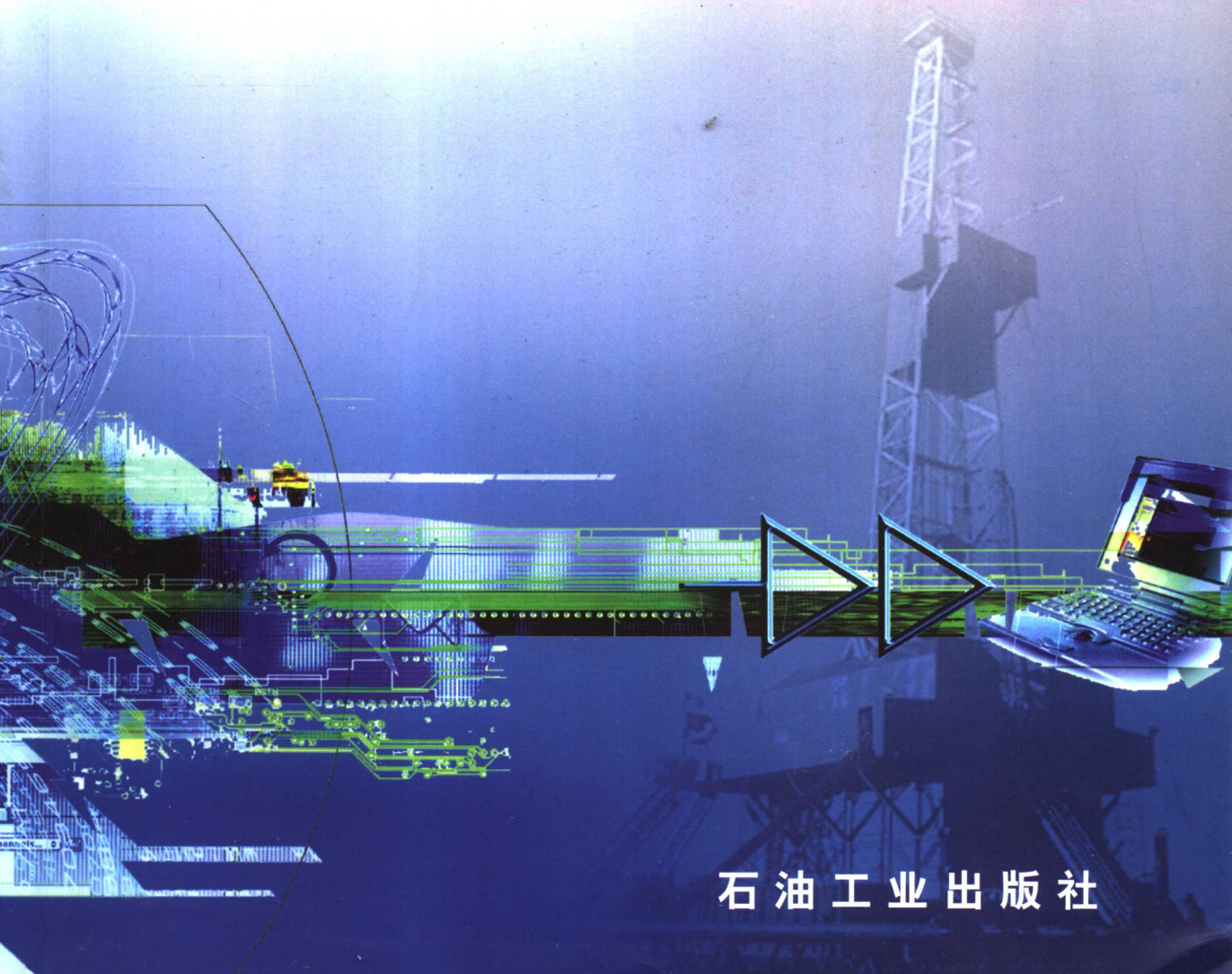


陈钦雷 吴洪彪 刘立明 著

四维试井 理论及应用

SIWEI SHIJING LILUN JI YINGYONG



石油工业出版社

四维试井理论及应用

陈钦雷 吴洪彪 刘立明 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书提出并建立了油藏四维试井的理论和分析方法。油藏动态信息源的分布,信息的采集、再现和再生构成了四维试井的理论体系,三维多相渗流计算和时间推移及空间延拓试井分析的实现,是四维试井分析的主要内容。应用四维试井理论和分析方法,能够获得更接近于真实油藏生产实际情况的动态参数,除可得到较以往更为准确的地层渗透率、地层压力分布和地层伤害程度等参数外,还可算出地层含油饱和度的分布情况。书中用四维时空的新思路所建立起来的试井新理论和新方法,丰富和发展了油气田开发工程学科领域的理论和工程技术实践,具有借鉴和参考价值。本书可供油气田开发工程学科与地质、水文等相关学科的教师、研究生、本科生,以及油气田开发工程等领域的研究和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

四维试井理论及应用/陈钦雷等著.

北京:石油工业出版社,2006.10

ISBN 7-5021-5397-7

I. 四…

II. 陈…

III. 试井-研究

IV. TE353

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第160707号

四维试井理论及应用

陈钦雷 吴洪彪 刘立明 著

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.cn

发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2006年10月第1版 2006年10月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:8.25

字数:208千字 印数:1—1000册

定价:30.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

目 录

绪论·····	(1)
参考文献·····	(3)

第一篇 压力监测系统优化部署

第 1 章 压力监测系统优化部署的理论·····	(7)
1.1 压力监测系统优化部署理论模型·····	(7)
1.2 优化方法·····	(8)
1.3 模拟退火算法基本原理·····	(10)
1.4 基本算法·····	(10)
1.5 模拟退火算法与压力监测系统优化·····	(18)
1.6 算法实例与分析·····	(19)
1.7 小结·····	(24)
参考文献·····	(25)

第二篇 三维多相渗流试井的实现

第 2 章 非结构网格的生成机制·····	(29)
2.1 阵面推进法的一般原理·····	(29)
2.2 新网格点的确定·····	(30)
2.3 三角形大小控制·····	(31)
2.4 后处理·····	(33)
2.5 PEBI 网格·····	(34)
参考文献·····	(36)
第 3 章 自适应网格·····	(37)
3.1 自适应网格的误差度量·····	(37)
3.2 油相方程的离散·····	(38)
3.3 水相方程的离散·····	(39)
3.4 气相方程的离散·····	(41)
3.5 网格误差度量的两个向量·····	(43)
3.6 网格误差度量方法的确定·····	(45)
3.7 不合格网格的处理·····	(48)
参考文献·····	(51)
第 4 章 试井产量模型·····	(52)
4.1 油井指数·····	(52)

4.2 单相流产量模型	(53)
4.3 多相流产量模型	(56)
4.4 产量模型与控制离散方程的耦合	(59)
4.5 产量模型的验证	(61)
参考文献	(65)
第 5 章 多相渗流试井分析	(66)
5.1 油、气两相渗流试井分析	(66)
5.2 油、气、水三相渗流试井规律	(78)
5.3 多层、多相渗流测试实例与模拟分析	(82)
参考文献	(87)

第三篇 四维试井科学计算方法的建立

第 6 章 时间推移试井	(91)
6.1 问题的提出	(91)
6.2 时间推移试井的研究内容及途径	(92)
6.3 时间推移试井理论模型	(93)
6.4 神经网络基本原理	(94)
6.5 利用神经网络进行时间推移试井分析	(98)
6.6 时间推移预测试井实例分析	(100)
6.7 考虑注采比影响的时间推移试井分析方法	(104)
参考文献	(110)
第 7 章 空间延拓试井	(111)
7.1 问题的提出	(111)
7.2 空间延拓试井的可行性	(111)
7.3 空间延拓试井的基本原理	(112)
7.4 空间延拓试井分析理论	(120)
7.5 实例分析	(122)
7.6 小结	(126)
参考文献	(126)

绪 论

了解和掌握油藏内部的动静态信息及其变化规律,是提高油田开发科学水平和开发经济效益的前提和基础。进行油藏动态监测是了解油层内部动静态信息的基本途径,而试井则是油藏动、静态监测诸方法中最为简便、经济和有效的方法,所以各油田每年都要投入大量的人力、物力和财力来进行试井测试,以期得到油层内部真实的测试资料或基础数据,并以这些测试资料为基础数据或信息源,进而分析解释出地层参数在三维空间的分布和随时间的变化规律。每年所能得到的测试资料非常之多,这些资料的解释成果在生产和科研上发挥着巨大作用。但是我们也常常会碰到,当应用这些资料的解释结果来解决油田开发和注采工程上的问题时,会产生不够理想甚至是失败的结果,这就使得大量的测试资料在生产和科研上发挥的作用受到很大限制,造成了宝贵信息资源的严重浪费。是什么原因造成了这种局面呢?原因是多方面的,归纳起来,主要原因是如下的一些方面。

首先是监测井点布置的不够合理,缺乏全局和长远的考虑。

一个油藏或独立的开发单元是一个整体,若在部署动态监测井点时缺乏全局和长远的考虑,监测井点的布置在空间位置上没有合理的间隔开,所测得资料缺乏相互的关联;再加上监测的时间间隔不恰当,不同时间的测试数据衔接不上,常常会使得所测得的数据代表性差,在应用上就受到严重限制。对于那些未进行监测的井点,在确定其参数时,如果再采用不够恰当的方法,如采用人为外推的方法,或应用插值等一些简单算法,这样求得的参数就更缺乏准确性。把这样的参数用于分析、解决生产实际问题时,就可能产生不够理想甚至错误的结果。

二是现行的大部分试井分析方法较为简单。

我们知道,真实的油藏是立体或三维的,发生在油藏内部的流体渗流也是三维流动,并且许多油藏的地层内,常常是油、气、水多相流体同时存在,所以最为典型的情况就是多相流体的三维渗流。但是,以往的油藏工程研究和计算,因为面对三维多相渗流,在研究特别是计算起来甚为复杂,常常把三维问题简化成了二维甚至一维问题,三相渗流也往往被简化成两相甚至单相渗流。试井分析问题也是一样,以往大量的试井分析方法,不论是 20 世纪五六十年代发展起来的常规试井分析方法,还是七八十年代发展起来的现代试井分析方法,多是把三维问题简化为二维或平面问题,并在平面径向渗流理论的基础上发展起来了这些分析方法。因而应用这些方法来计算解释较为复杂的问题时,无疑会产生较大误差。

三是未考虑地层参数随时间所发生的变化。

随着生产和时间的推移,油田开发将不断进行调整,开发方式与注采方式以及注采工程和各种各样的施工、作业,井底附近以至地层内部其结构状况已不断发生并将一步发生变化,加上长期的注水或注入其他液、固驱替剂或工作剂,不仅流体流态、相态会发生变化,也会促进井底及地层内局部产生变化。在上述情况下,如果试井解释模型和分析方法不随之做相应改变,那么所得结果就不再附合目前地层的实际情况,在应用来分析计算和解决问题生产问题时,自然就不会产生好的结果。

四是在分析计算时把本来相互关联的参数割裂了开来。

前已述及，一个油藏或独立的开发单元是一个整体，其静态参数特别是动态参数之间，在空间和时间上是有一定关联或相互影响的，但是以往的分析计算方法，在对各个井的相应参数进行计算时，多是各自独立计算，没有考虑它们之间可能存在的关联或相互影响，这也就影响了所得参数的准确性。

上述这些现象与生产发展的要求越来越不适应，随着油田开发深度和难度的增加，开发调整和新开发方式、新注采方式及工程施工的实施，都要求对每一口井的地层动、静态参数及其随时空变化的规律有更准确的了解，以适应生产发展需要。

近几年来，针对上述问题，本书作者也在进行各种探索，其中之一是进行了试井新理论和新分析方法的研究，提出并建立了四维试井理论和分析方法。特别是刘立明博士和吴洪彪博士，在其博士生期间做了较为系统和深入的创新研究。本书就是在他们博士学位论文的基础上又参阅了其他文献后完成的。

在本书中，系统地考虑了信息源的分布、信息的录取与信息再现和信息的再生，把这个一般方法与试井问题结合起来，在原有试井理论的基础上，考虑试井信息在三维空间的分布和时间维上的变化，建立了四维试井理论体系。以四维试井理论体系为主线开展研究，从压力监测系统的优化部署，到动态参数在三维空间上的分布，从时间推移试井分析到空间延拓试井分析均进行了系统研究，在试井问题上实现了从信息源的分布到信息的录取，再到信息的再现和再生的一体化。

具体说来，首先是从压力监测系统的优化部署入手，把模拟退火算法应用到压力监测系统的组合优化上，研究压力监测系统的优化部署方法，实现科学、经济地布置监测井点。从三维多相渗流模型出发，考虑多层并考虑层间窜流，建立了三维试井数值模拟模型，模拟计算中采用了混合非结构网格，对三维多相渗流方程组进行数值逼近，这样不仅能有效消除方形网格在计算中由于网格取向效应所造成的误差，而且提出和建立了非结构网格离散精度的度量方法，并进而建立了度量方法与网格调节机制的协调，形成了自适应网格理论体系；还建立了适应单多层与单多相情况的试井产量模型，并通过与控制方程相耦合，形成了一套更精细的模拟计算方法。利用神经网络技术进行时间推移试井分析方法的研究，能够给出空间任意一点在不同时刻的试井信息预测计算方法。把地质统计学理论与试井理论结合起来，进行空间延拓试井分析方法研究，给出了利用已监测井点的信息，确定非监测井点信息的科学计算方法，实现了由单井四维试井分析向多注采井区块四维试井分析的延拓。通过引入单井注采比，在上述计算中还可以考虑注采状况对试井分析的影响。

应用上述的四维试井分析方法，不仅可以更准确地计算地层参数，而且可以计算出地层压力的分布和地层含油饱和度的分布。所以，四维试井理论和分析方法的建立，不仅大大拓展了试井分析的功能，而且还形成了一套能更精细地进行油藏数值模拟计算的方法。

本书分为三篇共7章。

第一篇第1章，论述了压力监测系统优化部署的理论，建立了理论模型，给出了优化部署的计算方法。主要解决从油藏的全局需要和长远利益出发来部署监测井点的问题，克服或消除以往片面或盲目进行动态监测，致使许多测试资料浪费的状况。经科学计算所确定的动态参数，能更准确地反映油藏的真实情况。

第二篇包括第2章至第5章，主要论述三维多相渗流试井分析方法的理论基础及分析方法的实现，分别是非结构网格的生成机制、自适应网格和试井产量模型以及三维多相渗流试井分析方法的实现，这一篇是四维试井得以实现的科学基础。

第三篇包括第6章和第7章，分别是时间推移试井分析方法和空间延拓试井分析方法。这一篇科学计算方法的建立，是使四维试井得以完整实现的关键环节。

上述内容构成了较为完整的四维试井理论体系和四维试井分析方法。

在分别论述四维试井理论和分析方法的同时，每一章和重要的节之后，都附有计算或应用实例，这些实例绝大多数都来自油田的生产实际。这也表明，书中所提出和建立的理论和方法，是从生产实践中抽象出来，又回到生产实践中去，最终目的是为了分析、研究和解决生产实际问题。

科学技术的发展是无穷无尽的，特别是应用科学技术领域，随着生产的发展要更快一些，但是任何一种科学技术在解决生产实际问题方面，都不可能是一劳永逸的，也不可能包罗万象。试井领域也是一样，在生产实际中有许多新问题在等待着人们去研究和解决。我们也衷心地期待着能有更多更好的新理论、新方法被创造出来。

对于本书中所存在的问题、缺点或错误，真诚欢迎读者不吝赐教，并批评指正。

参 考 文 献

- 陈钦雷，郎兆新，张丽华. 1982. 油田开发原理与分析方法. 北京：石油工业出版社
- 刘立明. 2001. 数值试井理论研究. 博士学位论文，北京：中国石油大学
- 刘立明，陈钦雷. 2001. 试井理论发展的新方向——数值试井. 油气井测试，10（2）
- 刘能强著. 1985. 实用现代试井解释方法. 北京：石油工业出版社
- 栾志安等译. 1987. 试井分析方法. （美）小罗伯特 C. 厄洛赫编. 北京：石油工业出版社
- 《试井手册》编写组编. 1992. 试井手册. 北京：石油工业出版社
- 同登科，陈钦雷等著. 2003. 非线性渗流力学. 北京：石油工业出版社
- 吴洪彪. 2002. 四维试井理论研究. 博士学位论文，北京：中国石油大学
- 钟松定编. 1991. 试井分析. 山东东营：石油大学出版社
- Martin J C. 1959. Simplified Equations of Flow in Gas Drive Reservoirs and the Theoretical Foundation of Multiphase Pressure Buildup Analysis. Trans AIME, 216; 309~311
- Perrine R L. 1956. Analysis of Pressure Buildup Curve. Drill and Prod., Prac. API

第一篇

压力监测系统优化部署

第 1 章 压力监测系统优化部署的理论

油田注采系统压力是各监测井点压力水平高低的综合反应，不仅与每口井的压力有关，而且还与每个压力监测井点的相对位置紧密相关。如果压力监测井点部署合理，则就能够正确地反应油藏的真实地层压力水平，反之就会产生偏差，影响油田动态分析的准确性。本章充分考虑每口井的产量、地层系数，以及空间相对位置的关系，利用“模拟退火算法”对压力监测系统的优化部署进行了系统的研究，给出了压力监测系统优化部署的具体方法，从而实现了科学、经济地布置压力监测井点。

1.1 压力监测系统优化部署理论模型

针对某一具体的开发区块，在某一开发阶段油、水井井数是确定的，井位也是确定的，若给定该区块监测井点的数量（或是比例），给定约束条件，则即可对压力监测井点的部署进行优化。而优化首先是要确定监测井点的约束条件，即要满足局部优化，更要满足整体最优。

1.1.1 物理模型

作为一个压力监测井点，首先就是要具有代表性，而这一代表性主要体现在局部邻域压力值的代表性，即监测井点的压力值基本上等价于其所在区域的压力平均值（与其周围代表井点的压力平均值相同）。而压力值的大小与该井的产量、油层条件（流动系数）等密切相关。此外，在空间位置上，即平面上也必须具有一定的代表性，周围监测井点的压力可以以其为参考。另外，油层的渗透率、伤害状况等都要具有代表性。从上述的分析可以看出，作为压力监测的井点必须满足以下约束条件：

- （1）平面上代表性，与各井点的距离的方差之和为最小；
 - （2）油层性质上的代表性，与各井点的物性差异最小，即与其代表的周围的非监测井点的流动系数方差之和为最小（如区块的粘度是常数，则为地层系数）；
 - （3）产量（采出、注入）上的代表性，即与各井点的产量的方差之和为最小。
- 此外还可以根据需要加入相应的其他约束条件。

1.1.2 数学模型

从压力监测系统优化的物理模型的约束条件中可以看出，实际上要解决的是一个多目标优化问题。事实上上述 3 个约束条件也决定了某井是否能成为压力监测井点的期望值的大小，期望值越大，则成为压力监测井点的可能性就越大。

假设某区块共有采油井 N 口，任一口井的井位坐标、流动系数、产量分别表示为：

井位坐标： $p_u(x_i, y_j)$ ，其中 x_i, y_j 分别为压力为 p_u 井的横坐标和纵坐标。

井间距离： $d_w = \vec{p}_u(x_i, y_i) - \vec{p}_v(x_m, y_n)$ ，压力为 p_u 井到压力为 p_v 井的距离的均差为：

$$\bar{d}_u = \frac{\sum_{v=1}^n d_w}{n} \quad (1.1)$$

方差为：

$$E_d = \frac{\sum_{v=1}^n [d_{uv}]^2}{2n} \quad (1.2)$$

井的流动系数： $m_u(x_i, y_j)$ ，为压力监测井点的流动系数，则流动系数的均差为：

$$m_{uv} = \frac{\sum_{v=1}^n (m_u - m_v)}{n} \quad (1.3)$$

方差为：

$$E_m = \frac{\sum_{v=1}^n [m_u - m_v]^2}{2n} \quad (1.4)$$

产量： Q_u 为第 u 口井的产量， Q_v 为与该井相邻井的产量，则产量均差为：

$$\bar{q}_u = \frac{\sum_{v=1}^n (Q_u - Q_v)}{n} \quad (1.5)$$

方差为：

$$E_q = \frac{\sum_{v=1}^n [Q_u - Q_v]^2}{2n} \quad (1.6)$$

压力监测井点的期望值为：

$$E_u = \lambda_1 E_d + \lambda_2 E_m + \lambda_3 E_q \quad (1.7)$$

则系统总方差为：

$$E = \frac{\sum_{u=1}^m E_u}{2m} \quad (1.8)$$

其中， m 是监测井点点数， $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分别为井间距离、流动系数和产量的权值，且有：

$$\sum_{i=1}^3 \lambda_i = 1 \quad (1.9)$$

权系数的大小与整体要求的主次程度有关，可以是等权，也可以不是等权。哪一项重要，需要重点考虑，则权就大一些，否则就小一些，这要根据油田开发需要而定。本章的研究目的主要是寻找满足最小方差 E 的条件，达到整体最优。

1.2 优化方法

不同的井网形状有不同的求解方法，主要体现在区域划分和搜索方法上，目前主要有行列井网、面积井网（五点法、九点法、七点法、反九点法等）。

1.2.1 区域划分方法

压力监测系统的优化，是有多个约束条件的，因此这也就决定了其数学模型是一个非线性

性的规划模型。而非线性规划的特征就是在满足一组非线性约束和变量的非负数限制条件下, 来求多个变量的线性函数的值, 因此一旦问题变成唯一的形式后, 就可以采取算法求其最优解。

从非线性规划模型的目标函数或约束条件的非线性特征可以知道, 局部最优解并不一定就是全局最优解, 因此求解难度要比线性优化问题的求解难度大得多。目前求解非线性规划的方法均可以看成是一种迭代解法, 其基本思路是从某近似点 x^k 出发, 在该点选定一个搜索方向 P^k , 计算区域目标函数值, 从而求得累加函数值。然后再以下一点为起点进行搜索, 确定局部区域, 并计算其相应的函数值。依此类推, 算出多个分法的目标函数值, 并进行比较, 求其极小值。最难处理的就是区域的划分方法, 显然如果区域划分好了, 则就可以在每个区域寻找局部最优解了。但每个区域的最优解累加, 却未必是整体的最优解, 因此重要的就是要寻找一种合适的区域划分方法。

对于压力监测系统部署, 总井数为 N , 监测井数为 M , 则每个区域应包括 $m_{od} (N/M)$ 口井。首先是按每个中心点 (监测井点) 划分区域, 按 x 方向进行选点, 然后去掉其所代表的井点。达到边界时, 再进行第二轮选点。依此类推, 直到求出整体最优解为止。存在的主要问题是容易产生局部最优, 而得不到整体最优解。

1.2.2 组合优化算法

压力监测系统优化问题, 实质上是一个组合优化问题, 也是一个 NP 完全问题, 由数学理论可知这类问题是很难利用常规的方法进行求解的。组合优化问题的目标就是要从多个组合可行解中求出最优解。本章主要是利用数学的语言精确描述压力监测系统的组合优化问题, 并假定其可行解集是有限的或可数的无限, 同时解的质量可以量化, 因而可以比较不同解间的质量差异。

组合优化问题有 3 个基本的要素: 变量、约束条件和目标函数。在求解过程中选定的基本参数称为变量, 对变量取值的种种限制称为约束, 表示可行方案衡量标准的函数称为目标函数。

假定油田有 N 口井, 总产量是 $Q(t)$, 控制监测井点的总产量是 $Q^*(t)$, 每口井的地层系数是 $(Kh)_i$, 有效厚度为 h , 每口井的产量为 Q_i , R 为监测比例, 若该油田是行列井网, 部署压力监测系统, 目标要求如下:

- (1) 产量不多于 $Q^*(t)$;
- (2) 监测井数是 $M = \text{int}(N \times R)$ 口; N 是总井数, R 是监测比例。

约束条件:

- (1) 产量方差为最小;
- (2) 地层系数方差为最小;
- (3) 空间距离 (邻域) 方差最小。

上述问题即是一个有 3 个约束条件的组合优化问题。限定解空间为所有可行解的集合, 即:

$$S = \{N_1, N_2, \dots, N_N | w_1 N_1 + w_2 N_2 + w_3 N_3 + \dots + w_n N_n \leq m, w_i \in \{0, 1\}\} \quad (1.10)$$

$w_i = 1$, 表示第 i 口井被选为监测井, $w_i = 0$ 表示第 i 口井不是监测井点, 初始解选为 $(0, 0, \dots, 0)$ 。

目标函数表示为:

(1) 产量方差最小的监测井点函数:

$$\min [f(M_1, M_2, \dots, M_n)] = f_1 q_1 + f_2 q_2 + \dots + f_n q_n \quad (1.11)$$

(2) 空间距离方差最小的函数:

$$\min [g(M_1, M_2, \dots, M_n)] = g_1 d_1 + g_2 d_2 + \dots + g_n d_n \quad (1.12)$$

(3) 地层系数方差最小的函数:

$$\min [h(M_1, M_2, \dots, M_n)] = h_1 (Kh)_1 + h_2 (Kh)_2 + \dots + h_n (Kh)_n \quad (1.13)$$

同时要满足 $w_1 N_1 + w_2 N_2 + w_3 N_3 + \dots + w_n N_n \leq Q^*$, $w_i \in \{0, 1\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, N_i 是每口井的产量。上述问题即是在给定的约束条件下, 求目标函数的最优值问题。

上述组合优化问题也可以表示为一个对偶 (S, f) , 其中解空间 S 为可行集, 目标函数 f 是一个映射, 定义为: $f: S \rightarrow R$, 求目标函数最小值问题称为最小化问题。使目标取得最优值的那个解, 就称为这个组合优化问题的最优解, 在组合优化问题的近似算法中还要涉及邻域和局部最优解的问题。

1.3 模拟退火算法基本原理

1.3.1 邻域结构

定义: 设 (S, f) 是组合优化问题的一个实例, 则一个邻域结构是一个映射: $N: S \rightarrow 2^S$ 。

其含意是对每个解 $i \in S$, 有一个解的集合 $S_i \in S$ 。如果这些解在某种意义上是“邻近” i 的, 则这个集合 S_i 就称为 i 的邻域。每个 $j \in S$, 称为 i 的一个邻近解, 同时约定 $j \in S_i \Leftrightarrow i \in S_j$ 。

对于压力监测井点就是要先搜索邻域结构, 如果邻域结构选好了, 则可以进行局部搜索寻找最优解了。

1.3.2 局部最优

定义: 设 (S, f) 是组合优化问题的一个实例, 而 N 是一个邻域结构, $i \in S$ 称为 i 为最小化问题 $\min f(i)$, $i \in S$ 的局部最优解, 若 $f(i) \leq f(j)$, 对所有 $j \in S_i$ 成立。

定义: 设 (S, f) 是组合优化问题的一个实例, 而 N 是一个邻域结构, 称 N 为恰当的, 若对每个只要 i 是关于 N 局部最优的, 那么 i 也一定是整体最优的。

1.4 基本算法

1.4.1 局部搜索算法

局部搜索算法是一种通用的近似算法, 在工程上应用得比较多, 其基本原理就是在邻近解中进行迭代, 使目标函数逐步优化, 直到达到最优。

局部搜索算法具有通用性和灵活性, 只要给定组合优化问题实例 (S, f) , 给出其中的映射关系、解的产生器, 设定邻域结构, 则就可以实现局部搜索算法。存在的主要问题是由于在大多数情况下, 无法设定恰当的邻域结构, 所以得到的最终解只是某个局部最优解, 并不一定是整体最优解。同时最终解的质量还依赖于初始解的选择, 初始解选择的好, 则收敛的效果就

好,反之则可能导致解不收敛。对大多数组合优化问题来说,不存在选择初始解的准则,算法执行时的初始解往往是随机选取的,它可能导致低质的最终解。算法的时间复杂性取决于问题性质与邻域结构的复杂程度。对许多问题来说,其时间复杂性很难确定,例如采用 N_2 邻域结构求解压力监测系统问题时,最坏情况下的时间复杂性就是一个悬而未决的问题。

针对上述问题,就应该寻求一种收敛性能较好,解的稳定性强的算法,以改进局部搜索算法中的不足。

1.4.2 改善局部搜索算法性能的途径

针对上述局部搜索算法存在的问题,可能对其进行改进。在保证局部搜索算法通用性和灵活性的前提下,可以通过以下方案来进一步提高最终解的质量:

(1) 对大量初始解执行算法,再从中选优,可能求和最优解,但计算量比较大;

(2) 引入更复杂的邻域结构,使算法能对解空间的更大范围进行搜索,但这就意味着要以花费更多的计算时间为代价;

(3) 改变局部搜索算法只接受优化解迭代的准则,在一定限度内接受恶化解,从而拓宽解的选择范围。

事实上第一种方案由于受到运行时间的限制,不可能对所有解施行。因而最终解仍然是某个局部最优解;第二种方案需要对求解问题的透彻了解,而专注于某类问题又将使局部搜索算法失去通用性而成为一种专用算法;第三种方案需要确定新的接受准则,这使局部搜索算法演变为一种新的算法——模拟退火算法。本章主要是介绍模拟退火算法的原理,并将其应用到压力监测系统优化中。

1982年,KirkPatrick等人将退火原理应用到组合优化领域中,提出了一种解大规模组合优化问题,特别是NP完全组合优化问题的有效近似算法——模拟退火算法(Simulated Annealing Algorithm),这源于对固体退火过程的模拟。采用Metropolis接受准则,并采用一组称为冷却进度表的参数来控制算法的进程,在冷却进度表中可以控制运算的时间、运算终止的准则、搜索的方向等,从而使算法在多项式时间里给出一个近似最优解。

这一算法具有好多优点,可以解决压力监测系统的组合优化问题,但它在应用过程中也同样要考虑参数的优选和准则的确定。固体退火过程的物理图像和统计性质是模拟退火算法的物理背景,Metropolis接受准则使算法能够跳离局部最优的“陷井”,而冷却进度表的合理选择则是算法应用的前提,这与最终解的质量紧密相关。

1.4.3 Metropolis 准则

固体在恒定温度下达到热平衡的过程可以用Monte Carlo方法进行模拟。Monte Carlo方法的特点是算法简单,但必须大量采样才能得到比较精确的结果,因而计算量很大。从物理系统倾向于能量较低的状态,而热运动又妨碍它准确落入最低态的物理图像出发,采样时着重取那些有重要贡献的状态,则可以较快地达到较好的结果。在压力监测系统的优化部署上进行大量的采样也是不现实的,而且压力监测又不具有可重复性。因此也同样要进行优化,选取具有重要的代表性的井点作为压力监测井点。1953年,Metropolis等人提出重要性采样法,他们用下述方法产生固体的状态序列。

先给定以粒子相对位置表征的初始状态 I , 作为固体的当前状态,该状态的能量假设是 E_i , 然后用摄动装置使随机选取的某个粒子的位移随机地产生一微小变化,得到一个新状态 j , 新状态的能量是 E_j 。如果 $E_j < E_i$, 则该新状态就作为“重要”状态。如果 $E_j > E_i$, 则考虑到热运动的影响,并且依据固体处于该状态的几率来判断该新状态是否为“重要”状

态。由于固体处于状态 i 和 j 的几率的比值等于相应 Boltzmann 因子的比值，即： $r = \exp\left(\frac{E_i - E_j}{KT}\right)$ ，其中 r 是一个小于 1 的数。判断方法如下：用随机数发生器产生一个 $(0, 1)$ 区间的随机数 ζ ，若 $r < \zeta$ ，则新状态 j 作为重要状态，否则舍去。若新状态 j 是重要状态，就以 j 取代 i 成为当前状态，否则仍以 i 为当前状态，再重复以上新状态的产生过程。

在大量迁移（固体状态的变换称为迁移）后，系统趋于能量较低的平衡状态，固体状态的概率分布趋于 Gibbs 正则分布。高温下可接受与当前状态能差较大的新状态为重要状态，而在低温下只能接受与当前状态能差较小的新状态为重要状态。这与不同温度下热运动的影响完全一致，在温度趋于零时，就不能接受任一 E_j 的新状态了。上述接受新状态的准则称为 Metropolis 准则，相应的算法称为 Metropolis 算法，这种算法的计算量显著减少。这也是模拟退火算法可以应用到生产实际中的主要原因。

对于压力监测系统的优化部署而言，也同样是需要不断地产生新解，然后进行比较、判断，从中选出整体最优的解的集合。因此与上述机理相似，也同样可以进行求解。

1.4.4 模拟退火算法

1982 年，Kirkpatrick 等首先把固体退火过程与组合优化问题联系起来，并把 Metropolis 准则引入到组合优化过程中，并最终得到一种对 Metropolis 算法进行迭代的组合优化算法，这种算法模拟固体退火过程，称之为“模拟退火算法”。

设组合优化问题的一个解 i 及其目标函数 $f(i)$ 分别与固体的一个微观状态 i 及其能量 E_i 等价，令随算法进程递减其值的控制参数 t 担当固体退火过程中的温度 T 的角色，则对于控制参数 t 的每一取值，算法持续进行“产生新解—判断—接受/舍弃”的迭代过程，就对应着固体在某一恒定温度下趋于热平衡的过程，也就是执行了一次 Metropolis 算法。与之相类似，模拟退火算法用 Metropolis 算法产生组合优化问题解的序列，并由与 Metropolis 准则对应的转移概率 P_t ：

$$P_t(i \Rightarrow j) = \begin{cases} 1 & \text{若 } f(j) \leq f(i) \\ \exp\left[\frac{f(i) - f(j)}{t}\right] & \text{其他} \end{cases} \quad (1.14)$$

确定是否接受从当前解 i 到新解 j 的转移。开始时让 t 取较大的值（与固体的溶解温度相对应），在进行足够多的转移后，缓慢减小 t 的值（与缓缓降温相对应），如此重复，直到满足某个停止准则时算法终止。因此，模拟退火算法，可看作为递减控制参数时 Metropolis 算法的迭代。

模拟退火算法依据 Metropolis 准则接受新解，因此除接受优化解外，还在一个限定范围内接受恶化解，这正是模拟退火算法与局部搜索算法的本质区别所在。开始时 t 值相对较大，可能接受较差的恶化解，随着 t 值的减小，只能接受较好的恶化解，最后在 t 值趋于零值时，就不再接受任何恶化解了。这就使模拟退火算法既可以从局部最优的“陷井”中跳出，更有可能求得组合优化问题的整体最优解，又不失简单性和通用性。此外，模拟退火算法的收敛速度显然取决于冷却进度表中的参数 t_k 和 L_k ($k = 0, 1, 2, \dots$) 的选择。所以说模拟退火算法应用的好坏关键是取决于冷却进度表的选取。

1.4.5 模拟退火算法与局部搜索算法的差异

从两种算法的进程可以看出，本质差异就在于不同的接受准则和停止准则。由于算法的整体性态是由算法进程的始点、方向和终点唯一界定，在邻域结构和随机数序列给定的前提