

最优化试井分析 方法及应用

尹洪军 编著

ZUIYOUHUA SHIJING FENXI

FANGFA JI YINGYONG

石油工业出版社

责任编辑：闫熙照 付红

责任校对：黄京萍

封面设计：曾晓爱

ISBN 7-5021-4295-9



9 787502 142957 >

ISBN 7-5021-4295-9 / TE · 3015

定价：25.00 元

最优化试井分析方法及应用

尹洪军 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书详细调查了已有的试井分析最优化方法,在此基础上进行了各种改进的试井分析最优化方法的研究。应用灰色系统理论建立了一种优于常规线性回归分析的压力恢复曲线续流段校正的灰色关联分析方法。针对以往典型曲线难以区分早期形态相似性的缺点,研究了适用于早期试井分析的理论图版,并分析了曲线特征。深入研究了非线性回归自动拟合试井分析方法和遗传算法理论,提出了一种将自适应遗传算法与非线性回归分析相结合的混合式最优化试井分析方法——HAGAL 方法。

本书适合各类石油工程技术人员、科研工作者、高等学校有关专业师生以及研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

最优化试井分析方法及应用/尹洪军编著.

北京:石油工业出版社,2003.7

ISBN 7-5021-4295-9

I. 最…

II. 尹…

III. 试井-分析

IV. TE353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 047505 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京华正印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 7.75 印张 148 千字 印 1—800

2003 年 7 月北京第 1 版 2003 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-4295-9/TE·3015

定价:25.00 元

前 言

本书详细调查了已有的试井分析最优化方法，在此基础上进行了各种改进的试井分析最优化方法的研究，主要包括：

(1) 应用灰色系统理论建立了一种优于常规线性回归分析的压力恢复曲线续流段校正的灰色关联分析方法。该方法主要与观测点的趋势有关，而受观测点数量的影响较小。在一定条件下，该方法能够对早期试井资料进行合理的解释。

(2) 针对以往典型曲线难以区分早期形态相似性的缺点，研究了适用于早期试井分析的理论图版，并分析了曲线特征，为深入研究试井分析特别是早期试井分析的最优化方法奠定了坚实基础。

(3) 研究了非线性回归自动拟合试井分析方法。运用罚函数、归一化、乔理斯基分解和线搜索等综合辅助手段，研究出了一种性能良好的最小二乘法(M—L法)。运用多元线性回归方法研究出了一种受错误观测点影响小的最小绝对值(Least Absolute Value, 简称 LAV) 法。给出了初始参数的估计方法和置信区间的确定方法，分析对比了 M—L 法和 LAV 法的收敛性和搜索速度。

(4) 深入地研究了遗传算法理论。通过对遗传算法的理论基础——模式定理的分析，揭示了遗传算法运行过程的隐含并行性。应用有限马尔柯夫(Markov)链分析了基于二进制编码和浮点数编码遗传算法的全局收敛性和收敛速度。

(5) 研究了一种自适应遗传算法(AGA)。与简单遗传算法(SGA)相比，自适应遗传算法(AGA)能够在搜索最优参数过程中，根据解群体对环境的适应能力，自适应地改变遗传算法的交叉概率和变异概率以保证解群体的多样性和收敛能力，并采取最优保存策略，提高了算法搜索速度和全局收敛性。

(6) 在上述研究基础上，提出了一种将自适应遗传算法与非线性回归分析相结合的混合式最优化试井分析方法——HAGAL 方法。该方法集非线性回归算法和遗传算法之所长，充分发挥了遗传算法搜索速度快、全局寻优能力强和非线性回归算法局部搜索能力强的优点，有助于降低试井解释特别是早期试井解释中存在的不惟一问题。

本书中得到的最优化方法，对于油藏描述和油气田开发工程中的各种有关优化问题都具有普遍的参考价值。

目前已出版不少有关工程优化方面的图书，但专门论及试井分析优化方面的

书籍尚不多见，希望本书能为试井分析技术的进一步发展起到积极的促进作用。

本书涉及的研究内容曾得到大庆石油学院博士导师翟云芳教授的指导，作者在此表示深深的谢意。

限于水平，书中难免有疏漏或不足之处，敬请读者批评指正。

尹洪军

2003 年春于大庆

目 录

第一部分 绪 论

第一章 引 言	(3)
1.1 概 述	(3)
1.2 主要研究内容	(6)
第二章 非线性回归最优化试井分析的研究与进展	(8)
2.1 非线性回归最优化试井分析的发展概况	(8)
2.2 非线性回归最优化试井分析的特点	(9)
第三章 遗传算法的研究历史和现状	(11)
3.1 遗传算法的研究概况	(11)
3.2 遗传算法的理论及方法的研究现状	(13)
3.2.1 遗传算法参数的选择	(13)
3.2.2 编码方法	(14)
3.2.3 基因操作	(14)
3.2.4 数学理论与性能分析问题	(15)
3.3 遗传算法的特点	(15)

第二部分 最优化方法的基本理论

第四章 一般的最优化方法的基本理论	(19)
4.1 引 言	(19)
4.2 最优化问题的提法与分类	(19)
4.3 基本知识	(20)
4.3.1 正定矩阵	(20)
4.3.2 乔理斯基 (Cholesky) 分解	(20)
4.3.3 正定矩阵的判别	(21)
4.3.4 梯度与海色矩阵	(22)
4.3.5 凸集与凸函数	(22)
4.4 罚函数法	(23)

4.4.1	外罚函数法	(23)
4.4.2	内罚函数法	(24)
4.4.3	外罚函数法和内罚函数法的优缺点	(26)
4.5	非线性规划寻优方法概述	(26)
4.6	非线性最小二乘问题	(27)
4.6.1	小余量算法	(28)
4.6.2	大余量算法	(30)
第五章	灰色系统关联分析方法	(32)
5.1	引 言	(32)
5.2	灰色系统关联分析方法	(32)
第六章	遗传算法的基本原理	(34)
6.1	引 言	(34)
6.2	遗传算法的基本术语	(34)
6.3	遗传算法的基本步骤	(35)
6.4	遗传算法的基本原理	(36)
6.4.1	基于二进制编码的遗传算法	(36)
6.4.2	基于浮点数编码的遗传算法	(39)
6.5	遗传算法的数学分析	(40)
6.5.1	基本概念	(40)
6.5.2	模式定理分析	(42)
6.5.3	遗传算法中的隐含并行性	(45)

第三部分 混合的最优化试井分析方法 (HAGAL)

第七章	早期试井资料的灰色系统关联分析方法	(51)
7.1	引 言	(51)
7.2	压力恢复曲线续流段校正的基本理论	(51)
7.3	压力恢复曲线续流段校正的灰色关联分析方法	(53)
7.4	小 结	(54)
第八章	非线性回归自动拟合试井分析方法	(58)
8.1	引 言	(58)
8.2	数学模型及其解	(58)
8.2.1	早期渐近分析	(61)
8.2.2	早期试井分析理论图版的绘制及其形态特征的分析	(63)

8.3 非线性回归算法	(64)
8.3.1 Newton 方法	(64)
8.3.2 Gauss—Newton 方法及其改进方法	(66)
8.3.3 M—L 方法	(67)
8.3.4 LAV 方法	(68)
8.4 压力梯度的计算	(70)
8.5 初始参数的确定方法	(70)
8.6 置信区间估计	(71)
8.6.1 置信区间	(71)
8.6.2 t 分布 (学生分布)	(72)
8.6.3 解释参数的置信区间估计	(73)
8.7 实例分析	(73)
8.8 小 结	(78)
第九章 遗传算法的性能分析	(79)
9.1 引 言	(79)
9.2 基于二进制编码的遗传算法的收敛性分析	(79)
9.2.1 有限马尔柯夫链 (Markov)	(79)
9.2.2 简单遗传算法的收敛性	(82)
9.3 基于浮点数编码的遗传算法的收敛性分析	(87)
9.3.1 离散化方法的研究	(88)
9.3.2 收敛性分析	(90)
9.4 遗传算法的收敛速度估计	(90)
9.5 小 结	(92)
第十章 基于自适应遗传算法的混合式最优化方法 (HAGAL)	(93)
10.1 引 言	(93)
10.2 自适应遗传算法 (AGA) 的基本原理	(94)
10.2.1 自适应遗传算法 (AGA) 的概述	(94)
10.2.2 自适应的交叉概率和变异概率	(94)
10.3 基于自适应遗传算法的混合式最优化试井分析方法 (HAGAL)	
.....	(96)
10.3.1 自适应遗传算法的实现策略	(96)
10.3.2 基于自适应遗传算法的混合式最优化试井分析方法 (HAGAL)	
.....	(98)

10.4 实例分析.....	(100)
10.5 小 结.....	(107)
结 论.....	(109)
附录 A 有约束最小二乘回归公式.....	(110)
附录 B 改进的最小二乘法 M—L 回归方法.....	(112)
附录 C 符号说明.....	(114)
参考文献.....	(115)

第一部分 绪 论

第一章 引言

1.1 概述

在油藏描述和模拟中，常常是要根据输入输出的信号来推断，反求地层的各种参数。最优化技术的引入大大有助于人们对未知世界的预测更合理。试井分析是油藏描述的一个重要组成部分，最优化方法的引入对试井分析质量的提高是十分重要的。在人类社会和科学研究中，每当人们遇到问题时，往往首先找到问题的解，再努力改进所找到的解，直至力争获得问题系统的最优解，特别是全局最优解。油藏工程几十年的发展历程正是如此。

试井分析包含两个步骤：(1) 定义油藏（或井）的系统，即识别油藏模型；(2) 计算该系统的控制参数，即试井资料的分析解释。模型识别可以通过地质、地震、测井及岩心等资料的综合分析，或从模型库中已有的目标模型中获取。模型一经选定，就要确定油藏参数。这一步是通过试井资料的解释而获得的。本书主要是针对试井解释中油藏参数的优化分析问题而展开的。

一个完整的实测试井资料，以均质油藏为例，应当包括早期、中期和晚期三段数据，如图 1-1、图 1-2 所示。早期段数据受到井筒和油藏参数的影响，主要反映井筒附近的动态。它在双对数图上导数曲线呈现“驼峰”状，在半对数曲线图上是一条曲线；中期段数据只受油藏参数影响，反映油藏总的动态。它在双对数图上导数曲线是一条水平线；在半对数曲线图上是一条斜线。这种中期直线段也称为无限作用径向流动直线段；晚期段数据受油藏参数及油藏边界条件制约，以边界影响为主，在双对数图上发生上翘或下跌；在半对数图上呈现为曲线。由此看来，利用中期段数据来解释油藏参数是最直接、最简单的。

早在 20 世纪 50 年代，不稳定试井分析方法就是以中期压力资料为主，将实测井底压力和相应的时间数据，绘制成半对数曲线，找出直线段进行分析，这就是以霍纳（Horner）和米勒—戴斯—哈钦森（MDH）为主创立的常规试井分析方法。这种方法原理简单，易于使用。但只有当测试资料出现中期径向流直线段时，这种方法才有效可用。

从 20 世纪 60 年代末到 70 年代，国外开始研究现代试井分析方法。主要是在双对数坐标图上绘制无因次压力与无因次时间关系的压力典型曲线。将实测数

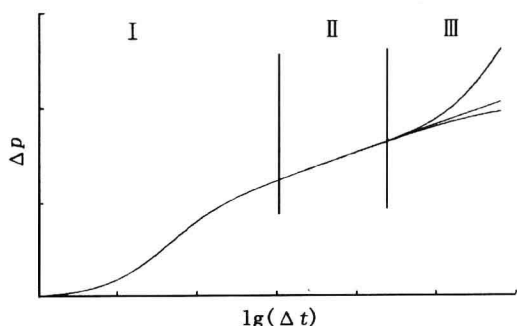


图 1-1 半对数试井曲线

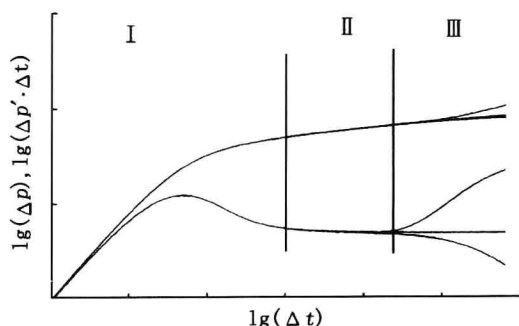


图 1-2 双对数试井曲线

据在双对数图上与压力典型曲线拟合，从而得到油藏特性的定量信息。这种方法与常规试井分析方法相比，具有很大的优越性，因为它可以分析早、中、晚各个时期的完整试井曲线，获得井底附近和油藏等详尽的信息。但压力典型曲线具有较低的分辨率，容易人为造成解释结果的多解性。

直到 20 世纪 80 年代，试井资料的解释方法才有了突破性的进展，就是在压力典型曲线上增加了压力导数为代表的新压力函数。由于压力导数曲线具有较高的分辨率，因此在油藏模型识别和参数求解中都起着重要的作用。而这一新进展，从理论模型求解到解释方法始终是依靠计算机辅助下获得的，习惯上被称为现代试井理论和解释方法，平时也称之为典型曲线拟合匹配方法。但这一方法在解释早期试井资料时，往往由于早期试井曲线的相似性，难以提供惟一的解释结果。只有当实测资料具有比较完整的早、中、晚期合格的数据时，使用这一方法才能得到合理的有关参数。

然而，在实际测试中，经常由于各种原因而得不到用于识别油气藏特征的有用的中、晚期信息。尤其是在低渗透油藏中，续流时间很长而延迟了中期资料的出现。如果要得到全部信息，则必然会要关井很长时间，对生产造成比较大的影响。为此，早期试井资料的分析成为人们十分关注的问题。

不少学者经过许多探索和研究，提出了一些早期试井资料的分析方法。但由于续流量描述的不确定性和解释参数的不惟一性，应用效果不太理想。目前较为常见的早期试井分析主要是采用局限性较大的各种半经验方法和压力恢复曲线续流段校正方法。后者以叠加原理和褶积理论为依据，目标是对早期试井数据资料进行处理，力图消除井筒储存效应和续流效应的影响，将续流段曲线校正成直线，以使径向流直线段提前出现。但在实际应用中，压力恢复曲线续流段校正方法遇到的最大问题，就是不同区块、不同类型井的续流量变化规律难以准确描

述，不具有普遍意义，在使用中受到一定的限制。

以上不论哪一种方法都需要人工干预，分析结果往往因人而异。近十几年来，人们越来越重视对试井自动拟合和智能分析等最优化方法的研究。由于计算机技术的迅速发展和测试仪器精度的不断提高，使这些方法的实现成为可能。尽管最优化方法很多，但比较适合于试井解释参数的最优化方法主要有三种：灰色系统关联分析方法、非线性回归分析方法和遗传算法。其中以非线性回归分析最为常见。其他两种方法，特别是遗传算法还处于起步阶段。其他智能分析方法，如神经网络、专家系统等由于方法本身的特点主要用于油藏模型的识别方面。

这些最优化分析技术的研究使现代试井分析的理论方法进入了一个崭新的历史发展阶段，对于试井资料特别是早期试井资料的可靠分析具有十分重要的意义。

试井解释应是一个选择最优化的过程，即选择最佳参数使实测曲线与理论曲线达到最佳拟合，因此选择确定合理、准确有效的最优化方法，对试井解释至关重要。近年来非线性回归分析技术的发展很快，日益普遍地用于估算油藏参数。非线性回归（nonlinear regression）也称为自动典型曲线拟合或自动试井分析。与典型曲线分析法一样，该方法一次可以拟合整个实测数据。但这种方法完全不同于以往的计算机图形辅助分析技术，它是用数学算法使实测数据与选定的油藏模型拟合，减少了人为因素的影响。在众多的非线性回归自动拟合试井分析方法中，以最小二乘法（LS）、最小绝对值法（LAV）为代表的方法应用最为普遍，并取得了良好的应用效果。尽管如此，这些方法仍然属于寻找局部最优解的方法，难以解决试井解释结果的不惟一问题。当初始参数的估值远离实际解时，这些方法可能获得毫无意义或局部最优的解释结果。如何获得全局最优的解释结果开始成为人们寻求的目标，而值得考虑的方法就是遗传算法。

在 20 世纪 60 年代，人们从生物进化过程中获得启迪，提出了在思路和方法上别开生面的全新的优化搜索算法——遗传算法。与传统的优化方法相比遗传算法具有非常强的解决各类复杂问题的能力，具有广泛的适应性与优良的鲁棒性（robust），引起了各学科专业的广泛兴趣。特别是近几年，随着计算机技术的迅速发展，遗传算法越来越受到国际学术界的普遍重视。国际上许多专业会议都设有遗传算法专题，而且从 1985 年开始每两年举办一届关于遗传算法的国际会议。至今遗传算法已成为 20 世纪 90 年代在国际上受到普遍重视的算法之一。

由于遗传算法的整体搜索策略和在优化计算时不依赖于梯度信息，所以其应用研究领域日益广泛，尤其适合于处理传统搜索方法难以解决的高度复杂的非线性问题。遗传算法作为一种全局性智能搜索的现代最优化算法，开始在油气田勘

探开发方面崭露头角，应用于地球物理、气举采油和油田开发设计方案等优化问题中，而在试井分析方面的应用尚不多见。

尽管经过几十年的理论实践及应用研究获得了大量的应用成果，然而，遗传算法的理论基础还比较薄弱，相对于其鲜明的生物学基础，遗传法的数学基础还有待于完善，适合于不同学科特点的更具科学有效的方法还需要进一步研究。虽然遗传算法具有许多其他方法所不具备的优点，但遗传算法更擅长全局搜索而局部搜索能力却不足。

对此，本书全面调查和研究了各种最优化方法，并逐个地对它们在试井分析中的应用进行了研究。在对各种方法的研究结果进行深入对比的基础上，提出了一种将遗传算法与非线性回归分析相结合的混合式最优化试井分析方法（HAGAL）。该方法针对遗传算法和非线性回归分析的特点，扬长避短，充分发挥了遗传算法搜索速度快、全局寻优能力强和非线性回归算法局部搜索能力强的优点，最终获得最佳的试井解释结果。本书中得到的新的最优化方法，对于油藏描述和油气田开发工程中的各种有关优化问题都具有普遍的参考价值。

1.2 主要研究内容

本书详细调查已有的试井分析最优化方法。在此基础上，进行了各种改进的试井分析最优化方法的研究。

应用灰色系统理论建立了一种优于常规线性回归分析的压力恢复曲线续流段校正的灰色关联分析方法。该方法主要与观测点的趋势有关，而受观测点数量的影响较小。在一定条件下，该方法能够对早期试井资料进行合理的解释。

针对以往典型曲线难以区分早期形态相似性的缺点，研制了适用于早期试井分析的理论图版，并分析了曲线特征。为深入研究试井分析，特别是早期试井分析的最优化方法奠定了坚实的基础。

研究了非线性回归自动拟合试井分析方法。运用罚函数、归一化、乔理斯基分解和线搜索等综合辅助手段，研究出了一种性能良好的最小二乘法（M—L法）。运用多元线性回归方法研究出了一种受错误观测点影响小的最小绝对值法（Least Absolute Value，简称 LAV 法）。给出了初始参数的估计方法和置信区间的确定方法。分析对比了 M—L 法和 LAV 法的收敛性和搜索速度。

深入地研究了遗传算法理论。通过对遗传算法的理论基础——模式定理的分析，揭示了遗传算法运行过程的隐含并行性。应用有限马尔柯夫（Markov）链分析了基于二进制编码和浮点数编码遗传算法的全局收敛性和收敛速度。

提出了一种将自适应遗传算法（AGA）与非线性回归分析（M—L 或 LAV）

相结合的混合式最优化试井分析方法 (HAGAL)。该方法集非线性回归算法和遗传算法之所长,充分发挥了遗传算法搜索速度快、全局寻优能力强和非线性回归算法局部搜索能力强的优点,有助于降低试井解释特别是早期试井解释中存在的多解问题。通过实测资料分析,取得了良好的效果。