

刘今子 著

低渗透非均质油藏 构型参数反演理论方法

DISHENTOU FEIJUNZHIYOU CANG
GOUXINGCANSHU FANYAN LILUN FANGFA

 冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

低渗透非均质油藏构型 参数反演理论方法

刘今子 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2018

内 容 提 要

本书是一本有关低渗透油藏渗透率非均质构型渗流特征影响理论及方法的专著。全书共分7章,分别系统地阐述了低渗透非均质油藏实验研究,表征方法理论研究,考虑非均质渗透率构型的低渗单相、两相、井网类型以及全油藏条件下的渗流数学模型及特征理论研究等。书中除了对基本渗流数学模型叙述外,还重点阐述了低渗透非均质油藏的不同渗透率构型对产能计算的影响和反演优化构型参数的方法运用,并且通过数值模拟的实例进行应用研究。

本书适合石油工程技术人员、科学技术工作者、石油院校教师及大学生、研究生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

低渗透非均质油藏构型参数反演理论方法/刘今子著. —北京:
冶金工业出版社, 2018. 9

ISBN 978-7-5024-7896-4

I. ①低… II. ①刘… III. ①低渗透油层—油田开发
IV. ①TE348

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 217337 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 夏小雪 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 郭惠兰 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7896-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市汇鑫印务有限公司印刷
2018 年 9 月第 1 版, 2018 年 9 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 7.25 印张; 122 千字; 108 页

32.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)



前 言

低-特低渗透非均质油藏开发是我国大部分油田当前和今后相当长时期面临研究的主要课题。尤其，我国面临严峻的能源形势，原油对外依存度持续上升，2017 年甚至超过 72%，守住 2 亿吨原油自给能力底限的国家石油安全红线，急需在油田开发基础理论上取得一定的突破。我国在吉林、大庆、胜利等低-特低渗透非均质油田的开发过程中，积累了大量的开发经验。然而，总体上，并未形成统一的认识和合理开采低-特低渗透非均质油藏的有效理论方法。其中，低渗透储层的非均质性对产能的影响研究，不仅对发展低渗透储层非均质特征渗流数学模型理论，研究低渗透储层产能与启动压力梯度间的机理和规律，同时对推动储层渗流理论研究的进展也具有十分重要的意义。

本书基于低渗透储层的启动压力梯度函数，构建非线性渗透率分布构型，阐述不同渗透率构型对产能计算的影响和反演优化构型参数的方法运用，形成利用生产动态资料反演构型参数的算法，并且通过数值模拟的实例进行应用研究，有利于储层精细描述理论的发展和油田挖潜措施的确定。

目前，已出版的有关低渗透非均质油藏针对渗透率构型渗流特征研究的图书较少，大部分是对低渗透非均质油藏的实验描述

和数值模拟。希望本书的出版能为石油科技、工程技术人员、大专院校师生在研究低渗透非均质油藏有关渗流特征的学习和应用中起到积极的推动作用。

本书获得国家自然科学基金项目（驱油相自扩大波及体积提高采收率新方法，51834005）和东北石油大学研究生教育教学改革研究项目（JYCX_JG10_2018）的联合资助。

由于时间仓促及作者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

著 者
2018 年 9 月

目 录

1 绪论	1
1.1 前言	1
1.2 低渗透油藏渗流特征研究概论	2
1.3 低渗透油藏非均质特性研究概论	5
1.4 非均质油藏渗流反问题研究概论	7
1.5 反问题算法研究现状	9
1.6 小结	10
2 低渗储层物理特征实验研究	12
2.1 前言	12
2.2 实验方法及过程	12
2.3 实验结果及分析	13
2.3.1 非均质低渗储层串联组合水驱实验	13
2.3.2 低渗储层的启动压力梯度影响实验	15
2.3.3 低渗储层的水驱油实验	16
2.3.4 低渗储层的油水两相相渗实验	21
2.4 小结	24
3 低渗储层物理特征及表征方法理论研究	25
3.1 前言	25
3.2 低渗储层启动压力梯度数学模型	26
3.2.1 单相渗流的启动压力梯度数学模型	26
3.2.2 两相渗流的启动压力梯度数学模型	27

3.3 低渗储层物理特征参数-地质分布构型和区域分布特征	27
3.3.1 低渗储层物理特征参数-地质分布构型	27
3.3.2 低渗储层物理特征参数-区域分布特征	28
3.4 低渗储层物理特征参数区域分布多尺度划分标准	30
3.4.1 小尺度——注采单元划分储层参数区域分布	30
3.4.2 中尺度——井网单元划分储层参数区域分布	31
3.4.3 大尺度——全油藏（井组或区块）储层参数区域分布	31
3.5 油藏数值模拟的常用计算方法	31
3.6 小结	32
4 考虑非均质渗透率构型的低渗单相渗流数学模型研究	33
4.1 前言	33
4.2 低渗储层的单相渗流产能计算模型	33
4.3 低渗储层基于渗透率构型的单相渗流产能计算模型	35
4.4 低渗储层基于渗透率构型的单相渗流反演参数优化算法	37
4.5 低渗三维单相渗流反演数学模型	38
4.5.1 多层流量计算方法	38
4.5.2 三维单相渗流反演算法	38
4.6 实例分析	39
4.6.1 非均质构型对产能的影响	39
4.6.2 基于生产动态资料反演渗透率构型参数	40
4.7 小结	41
5 考虑非均质渗透率构型的低渗两相渗流数学模型研究	43
5.1 前言	43
5.2 低渗储层的两相渗流产能计算模型	43
5.3 相渗曲线特征参数优化反演方法	44
5.3.1 函数型相渗曲线特征优化反演算法	47
5.3.2 数值型相渗曲线特征神经网络反演计算方法	48
5.3.3 实例分析	50
5.4 低渗储层基于渗透率构型的两相渗流产能计算模型	52

5.5	低渗储层基于渗透率构型的两相渗流反演参数优化算法	52
5.6	低渗储层的三维两相渗流反演数学模型	53
5.6.1	多层流量计算方法	53
5.6.2	多层计算相渗曲线	53
5.6.3	三维两相渗流反演算法	54
5.7	实例分析	55
5.7.1	非均质构型对产能的影响	55
5.7.2	基于生产动态资料反演渗透率构型参数	56
5.8	小结	57
6	井网类型下非均质渗透率构型的低渗渗流数学模型研究	59
6.1	前言	59
6.2	低渗储层反五点井网的渗流特征数学模型	60
6.2.1	五点井网模式	60
6.2.2	实例分析	61
6.3	低渗储层矩形井网的渗流特征数学模型	63
6.3.1	矩形井网模式	63
6.3.2	实例分析	66
6.4	低渗储层七点井网的渗流特征数学模型	70
6.4.1	七点井网模式	70
6.4.2	实例分析	71
6.5	低渗储层九点井网的渗流特征数学模型	73
6.5.1	九点井网模式	73
6.5.2	实例分析	75
6.6	低渗储层菱形九点井网的渗流特征数学模型	79
6.6.1	菱形九点井网模式	79
6.6.2	实例分析	83
6.7	小结	88
7	非均质渗透率构型的低渗储层全油藏渗流特征理论研究	89
7.1	前言	89

7.2 单层低渗储层的全油藏渗流特征理论研究	89
7.3 多层低渗储层的全油藏渗流特征理论研究	92
7.4 低渗储层的全油藏多尺度反演渗透率构型参数优化算法	93
7.5 小结	93
参考文献	94

1 绪 论

1.1 前言

随着世界经济发展和科技进步对能源的需求逐年增大,使得石油工业面临前所未有的机遇和挑战。现有的油田勘探与开发技术水平都已达到较高的程度,勘探难度日益加剧。只有对油气勘探理论与技术进行创新性的不断深入探索和研究,才能适应经济发展和科技进步的需求,才能促进油气勘探开发事业的可持续科学发展。

近6年来,中国能源对外依存度上升较快,国内原油生产与消费缺口从2.5亿吨增加到3.58亿吨,原油增产压力不断加大,对外依存度从55.2%上升到65.5%。我国早已成为除美国之外的第2大石油消费国,年进口的原油量已接近国内石油的年产量。因此,中国应该坚持“立足国内”的油气发展方针,树立兼顾安全和效益的石油安全观,变产量目标为原油自给能力目标,守住2亿吨原油自给能力底限,加强战略保障。

储量是石油上游业务赖以生存和发展的基础,是保障国家能源安全的根基所在。我国石油工业的“四高”现象有:我国经济增长对石油持续的高需求,中国石油勘探开发始终保持高强度,中国石油工业建设始终维持高速度,中国下一步勘探开发将面临高难度。

尤其是历经几十年发展,各油气田勘探程度越来越高,资源品质劣质化趋势越发明显,寻找规模优质储量的难度持续升级。20世纪90年代开始,我国油气勘探整体进入以岩性油气藏为主的阶段。“十二五”期间,我国已探明石油储量中,低渗、超低渗储量占70%,低丰度储量占90%以上,整体进入低品位资源勘探阶段。

国内低渗透油田石油地质储量丰富。据初步统计,渗透率小于50mD的非稠油低渗透储层中,未动用储量占全国未动用储量总数的50%以上。低

渗透油田虽然地质条件差、开发难度大,但随着我国经济的快速发展,对石油产品的需求越来越大,低渗透油田的丰富石油储量越来越受到关注,研究低渗透下非均质储层的结构特征、影响因素就越发重要。

低-特低渗透储层开发是我国大部分油田面临研究的主要课题,对这类储层的研究是国内外当前和今后相当长时期开发的重点。我国在长庆、吉林、大港、大庆、胜利等低渗透和特低渗透油田的开发过程中,积累了一些开发认识和经验。但是,总体上,未形成统一的认识和合理开采低渗透和特低渗透油田的有效方法。

由于低-渗透和特低渗透储层地质条件差,孔隙极其微小,很大一部分流体在渗流过程中被毛管力和黏滞力所束缚不能参与流动,只有能参与流动的流体才是开发中亟待确定和认识的问题。因此,开发低-渗透和特低渗透油田,首先应做好渗流规律的认识和开发潜力评价的工作。

在油藏勘探和开发的实际过程中,由于油藏具有非均质性,使得相邻不远处的两口井的生产动态特征经常表现出显著的区别。甚至,用肉眼观察这两口井取出的岩样,就能发现其具有明显不同的性质。

针对低渗透和特低渗透储层的开发研究,一直是国内外油气田开发的重点和难点。其中,低渗透储层的非均质对产能的影响,更是重中之重,不仅对发展低渗透储层非均质特征渗流数学模型理论,研究低渗透储层产能与启动压力梯度间的机理和规律,同时对推动储层渗流理论研究的进展也具有十分重要的意义。

虽然实际油藏的非均质特性严重,但是现有的油藏工程计算公式采用的都是基于渗透率和厚度均值变化,并没有深入研究油藏参数在非均值变化情况下的压力和产量之间的非线性关系,也未探索井网或全油藏的参数区域连续性非线性变化对渗流特征的影响。

本研究基于低渗透储层的启动压力梯度函数,通过建立非均质储层的非线性渗透率分布构型,构建低渗透非均质储层下渗透率分布构型参数优化反演数学模型,并建立利用生产动态资料反演构型参数的算法,可以实现利用生产动态资料的压力和产量,确定储层渗透率分布的形态,有利于储层精细描述理论的发展和油田挖潜措施的确定。

1.2 低渗透油藏渗流特征研究概论

低渗透储层一般是指储层空气渗透率小于 50mD 的储层。近几年,低渗

透和特低渗透储层在新增探明储量中所占的比例越来越大,已经成为增储建产的主要组成部分^[1~3]。中石油勘探开发研究院为行业确立新的砂岩储层分类标准,采用覆压基质渗透率指标对砂岩储层进行分类:不小于 50mD 为高渗、10~50mD 为中渗,1~10mD 为低渗,0.1~1mD 为特低渗,不大于 0.1mD 为致密。新标准中明确指明是覆压条件,不是常压条件。

我国一般将渗透率在 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下的油田称为低渗透油田。研究表明,低渗透储层具有非达西型渗流特征,其主要特点是:

(1) 低渗透储层具有启动压力梯度,呈非达西型渗流特征。

(2) 低渗透储层渗透率对原油采收率具有明显影响。

实验研究表明,对一般中高渗透储层,渗透率基本不影响原油采收率;当渗透率降低至某个界限后,对采收率产生明显影响,渗透率越低,影响越大,其采收率也就越低。

1983 年,西安石油学院的阎庆来等人^[4]总结低渗透油层中单相液体渗流特征的实验结果,提出在较低速度下为非达西渗流规律,渗流曲线存在非线性段,渗透率越低,非线性断延伸越长,曲线曲率越小,启动压力梯度越大;在较高渗流速度下为具有初始压力梯度的拟线性流动。1985 年,冯文光、葛家理^[5]研究单一介质、双重介质中低速非达西渗流问题,求得压力动态。陈永敏^[6]分别测试四块人造胶结岩心的不同黏度模拟油渗流特性以及五块不同渗透率砂岩的水渗流特性,得出低渗透岩石具有明显的启动压力梯度和非线性低速渗流特性。冯文光、葛家理^[7,8]通过研究发现,单一介质、双重介质以及考虑续流和趋肤效应时非达西低速不稳定渗流及凹形压力恢复曲线进行研究,这是国内对考虑启动压力梯度的低速非达西渗流试井问题最早进行的研究。之后,程时清等人^[9~11]也对低速非达西渗流的试井分析问题进行了研究。黄延章等人^[12,13]通过大量的实验资料,在单相流的基础上进一步对低渗低速非达西多相流问题进行了研究,提出低渗透油田相渗曲线的计算方法,并引用常用的两种近似方法,积分法和压力导数平均法来求低渗透不稳定渗流问题的近似解析解,还对低渗和高渗两种低速非达西渗流的区别进行概括;给出低渗透油层中油水渗流的基本特征:当压力梯度在比较低的范围内,渗流曲线呈下凹型非达西渗流曲线;当压力梯度较大的时候,渗流速度呈直线增加;直线段的延伸与压力梯度轴的交点不经过原点,该点称为平均启动压力梯度;渗流特

征与渗透率和流体性质有关,渗透率越低,或者原油黏度越大,下凹型非达西曲线延伸段延伸越长,启动压力梯度越大;黄延章还提出渗流流体的新概念。阎庆来^[14]通过油水两相渗流实验结果发现,低渗透油层中油水两相渗流,油水过渡带比高渗透要长,渗透率越低,过渡带越长,这是与高渗透油层不同的地方,说明低渗透油层中油水两相渗流规律与高渗透不同。程时清等人^[15]对低速非达西油水两相渗流的数值模拟问题进行了研究,建立数学模型,并采用有限差分法对数学模型求解,通过实例计算发现:非达西渗流情况下的产油量远小于达西渗流;相同含水率下,非达西渗流时的采油指数较达西渗流时小;降低表皮系数可提高油井产量和采油指数,减缓产水量上升速度。此外,国外学者也对低渗透非达西渗流特征描述和渗流理论进行过很多类似的研究^[16~26]。

邓英尔等人^[27~29]研究了具有启动压力梯度的油水两相渗流时开发指标的计算方法、垂直裂缝井两相非达西椭圆渗流的开发指标计算方法及启动压力梯度对低渗透油田注水开发的影响。宋付权等人^[30]也研究了低渗透储层水驱油两相渗流问题。目前,国内对油水两相启动压力梯度的实验研究鲜有进展,一些学者^[31~50]均是仿照单相流体“压差-流量”法测定两相流体渗流时不同含水饱和度下的启动压力。

对于低渗透油藏渗流数学模型及求解方面,国内外也有很多相关的工作^[51~69]。

1997年,冯曦^[70]建立了基于低速非达西渗流规律的固定边界试井模型,并用幂级数求解法求得模型的解析解,在计算压力降落试井标准曲线时,根据流体从静止到流动所需的启动压差确定不同时刻对应的流动区域半径,再用固定边界模型解析解计算井底压力与时间的对应关系,以此作为动边界模型试井曲线的一种数值逼近。应用这种特殊求解方法进行分析计算,发现低速非达西渗流试井模型的一些重要动态特征。李凡华^[71]在低渗透储层中,含启动压力梯度的压力传播并非瞬时达到无穷远,其渗流规律与达西流的渗流规律差别很大,提出准确描述含启动压力梯度的非达西渗流的试井分析模型,用一种稳定性极好的数值计算方法求得了无限大和有界储层的典型曲线,并分析其特征,为正确认识低渗透油气藏的特殊规律提供方法。1999年,宋付权^[72]认为低渗透储层的渗流不符合达西定律,其明显的特点是存在启动压力梯度。为测量启动压力,以质量守恒定

律为基础,推导出压力恢复稳态测压法求解启动压力梯度的公式。2000年,程时清^[73]研究非均质径向储层低速非达西渗流动边界问题的数值解,然后给出含启动压力梯度和地层流量分布的井底压力及其导数关系式,讨论启动压力梯度和动边界对压力曲线的影响。2000年,贾永禄^[74]基于这种生产实际问题,建立近井区为双孔介质达西渗流,远井区为存在启动压力梯度的低速非达西渗流模型的特殊复合油气藏渗流模型,同时考虑了井筒变井储问题及外边界有界的情况,通过求解模型,分析压力动态特征,制作特殊开采方式下的试井分析样板曲线,为特低渗透油气藏的地层参数反求提供新的模型和方法。2001年,宋付权^[75]针对低渗透岩心稳定时间长,流量精确测量困难的问题,设计一种用非稳态渗流测压方式求解岩心的启动压力梯度的方法;理论方面,考虑启动压力梯度和动边界的影响,建立低渗透岩心中液体的不稳定渗流方程,并用数值有限差分的方法求解,得到岩心封闭端的不稳定无量纲压力曲线。2002年,刘曰武^[76]描述和评价确定低渗透储层启动压力梯度的三种方法,重点介绍低渗透储层试井分析确定启动压力梯度的方法和实际应用意义,给出低渗透储层试井分析模型与常规中高渗透储层试井分析模型的对比。2008年,蔡明金^[77]在运动方程中加入启动压力梯度,考虑地层渗透率随压力的变化而变化,建立应力敏感带启动压力梯度均质低渗透储层试井解释模型,应用预估校正法对所形成的非线性抛物型方程进行线性化,采用追赶法进行求解。2008年,李松泉^[78]建立考虑启动压力梯度和介质变形的特低渗透储层单相和油水两相非线性渗流数学模型,对于单相渗流,给出定产量、变产量和定流压条件下模型的解;对油水两相非活塞驱替,给出分流量方程、油水前缘位置方程及压力、产量方程,并给出求解方法。

目前,国内外这方面的研究,一直将启动压力梯度中的渗透率作为常数,拟合或回归启动压力梯度与渗透率的关系,进行产能计算^[79~89]。

1.3 低渗透油藏非均质特性研究概论

储层的非均质性指储层参数在平面乃至三维空间的变化规律,是储层表征的核心内容。对于不同非均质条件下的油气藏,国内外学者进行了一系列的研究,既有从理论角度的深入剖析、室内物理实验的模拟,也有丰富的矿场开发经验总结,还有现在应用广泛的数值模拟。

从非均质物理模型实验方面,何顺利、李中锋^[90]等人建立不同的非均质线性模型,认为平面非均质模型单向渗流时,剩余油饱和度和驱油效率与岩心渗透率无关,而与岩心所处位置密切相关。李宜强、隋新光等人^[91]在纵向非均质大型平面模型上进行了聚合物驱油物理模拟实验,实验表明与层间非均质地层相比,在聚合物驱后,通过进一步提高驱替相的波及体积来挖潜层内非均质地层顶部剩余油的潜能更大。李中锋、何顺利等人^[92]对不同的三维非均质模型进行水驱油试验,发现:纵向非均质模型的水驱油采出程度最高,平面非均质模型的水驱采出程度最低,剩余油最高;平面非均质模型中2个渗透层间窜流是剩余油过多的主要因素,运用微凝胶调驱后,可改善水驱波及体积,大幅度提高采出程度。胡勇、朱华银等人^[93]建立高、低渗“串联”气层物理模型和实验模拟方法,模拟平面非均质(近井高渗、外围低渗)气层衰竭开采时压力传播及边界剩余压力特征、高低渗气层供气特征、单井生产动态特征和配产对气井生产的影响,为研究类似低渗气藏开发开辟新的研究思路和方法。对于“近井高渗、外围低渗”气层的非均质模型,压力将以“漏斗”形式传播,高渗气层压力下降快,低渗气层压力下降相对缓慢,且实验废弃压力时低渗气层边界仍具有较高剩余压力。对于非均质气层,外围低渗气层应存在渗透率下限,渗透率低于下限的气层,采用常规衰竭方式开采,其储量难以得到较好动用。

从数学模型方面,李其深等人^[94]将非线性分形理论应用于描述储层非均质渗流中,建立了双渗分形储层的渗流数学模型,通过正交变换方法得到模型的精确解。向开理等人^[95]将分形几何理论应用于渗流力学,详细描述了不等厚分形复合储层的不稳定渗流试井分析理论及数学建模方法,讨论了模型的求解方法并给出3种典型边界条件下模型在Laplace空间的解析解。程时清等人^[96]研究低渗透储层低速非达西油水两相渗流的反问题,建立基于动态信息的储层敏感系数计算模型,给出井底压力和水油比关于渗透率和孔隙度的敏感系数的有效算法。程时清等人^[97]将地质统计学方法引入到油气藏参数识别中,建立初始油气藏孔隙度、渗透率参数和压力拟合的目标函数,实现了一种有效反求非均质低渗透储层参数的方法。

从数值模拟方面,柴乃序^[98]对非定常、非均匀多孔介质中水驱油两

相渗流进行了数值模拟,从理论上论证高注低采比低注高采更能提高采收率。周煦迪等人对^[99]储层渗透率纵向非均质性分布的六个参数进行数值模拟研究,得到如下结果:反旋回型的储层水驱采收率高于正旋回型储层;变异系数越大,储层的水驱采收率越低; K_v/K_h 值(垂直渗透率与水平渗透率之比)对正、反旋回型储层水驱采收率的影响规律不同;最大渗透率层的位置是影响正旋回型储层水驱采收率的重要因素。喻高明等人^[100]运用一维两相流动理论来研究水驱油过程的规律,重新推导一套非均质储层水驱开采时各项指标的计算公式,改正了原有方法在无因次时间处理上的错误,大大提高了预测精度。李捷、邱勇松等人^[101,102]研究低渗透油层注水开发层间突进现象,针对表外油层的储层特性,利用低渗透储层渗流的基本理论,推导出表外油层注水开发时水驱前缘的流动公式,为避免这一现象提供了理论依据。于开春等人^[103]按沉积微相选用相对渗透率曲线,将精细地质研究成果应用到数值模拟中,数值模拟结果表明:用相控方法建立的地质模型,能反映各个单砂层的平面分布特点及对流体平面流动的控制。何应付、尹洪军^[104]利用扰动边界元方法分析任意形状非均质储层的不稳定渗流的压力动态。尹洪军、贾俊飞等人^[105]建立考虑源(汇)影响的任意形状非均质储层稳定渗流的数学模型,采用区域剖分边界元方法对其进行求解,获得了任意形状、复杂边界条件下非均质储层内的压力分布,绘制相应的压力剖面图。

虽然国内外学者对储层的非均质性进行大量研究,但并未有成熟的描述储层非均质性的渗流数学模型,未形成完整的反映非均质性渗透率构型的储层渗流理论。

1.4 非均质油藏渗流反问题研究概论

现阶段,研究储层表征非均质特征的动静结合方法,以反问题理论为基础,利用实测或动态数据结合先验数据,反求储层地层参数分布,主要分为两大方向:地震测井技术和试井分析。

第一个方向:地震测井技术是利用静态数据(测井、岩心、地震和地质)产生的离散参数值,把动态数据作为约束条件,结合地质统计学的插值方式,建立描述储层的参数分布。

从20世纪初开始到50年代,地球物理方法和技术的不断发展,建立多

种求解反演问题的定量计算理论,奠定测井和地震研究的理论基础。

20 世纪 60 年代, G. E. Backus 和 J. F. Gilbert^[106,107] 发表一系列的重要文章,奠定近代地球物理反演理论的基础,称之为 Backus-Gilbert 理论。

20 世纪 70 年代, R. A. Wiggins^[108] 用矩阵将 Backus-Gilbert 理论表达为离散形式, D. D. Jackson^[109] 用广义逆理论详细探讨线性反演问题在各种情况下的解。

20 世纪 80 年代,这一阶段,地震测井取得深入的进展使之应用于实际。1983 年, D. W. Oldenburg^[110] 最先将线性规划应用于地球物理反演问题,得到具有极小结构波阻抗反演结果。1987 年, A. Tarantola^[111,112] 从概率统计的角度,直接引入先验的协方差矩阵和数据误差的数据协方差等先验信息到反演计算公式中,形成广义反演方法。

20 世纪 80 年代后期,从测井与地震的频率特性考虑, R. D. Martinez^[113] (1988 年) 提出了多井参数约束的联合宽带反演方法。另外, L. R. Lines, S. Treitel^[114] (1982 年), D. A. Cooke 和 W. A. Schneider^[115] 等学者从不同的认识角度,进一步发展和完善了地球物理反演理论。

20 世纪 90 年代初, M. K. Sen 和 P. L. Stoffa^[116] 等人使遗传算法广泛用于一维地震波形反演。M. Sambridge^[117,118] 等人用遗传算法实现了对地震反演多参数的优化问题。F. Boschetti^[119,120] 等人对遗传算法的应用进一步研究。J. L. Baldwin^[121] 将神经网络首先应用于测井解释, M. D. McCormack^[122] 等人推广神经网络的应用。1998 年, Z. Liu^[123] 用神经网络直接从地震数据预测测井属性,将神经网络用于建立地震数据和测井属性之间的函数关系,使得基于智能算法的地震测井联合反演成为可能。D. Hampson^[124] 等人将神经网络方法成功用于地震多参数外推测井属性。

国内学者也做了大量的工作,韩波^[125,126],傅红笋^[127,128],刘克安^[129~132],张新明^[133~135] 等人进行基于双相介质波动方程建立孔隙率反演算法的研究。张亚敏^[136]、邹冠贵^[137]、刘爱群^[138] 等人用波阻抗反演孔隙度。伍先运^[139]、侯春会^[140] 等人利用声波场理论研究反演储层渗透率。黄捍东^[141] 等人利用小波分析技术反演储层厚度。杨斌^[142]、李达^[143]、杨松桥^[144] 等人进行储层参数非线性反演方法的研究。

但是,用地震测井反问题方法表征储层参数分布的局限性在于:用地球物理方法求渗透率大都必须依据岩心分析或其他资料,而且精度不高,只能