

分形与石油

王城辉 廖淑华 编著



石油工业出版社

登录号	087427
分类号	TJ
种次号	014

分形与石油

王域辉 廖淑华 编著



国家自然科学基金资助项目

5256/03



石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

分形几何是描写复杂现象的有力工具。本书介绍了近年来分形几何理论及其在石油工业中应用的发展。主要内容包括:分形理论初步;沉积岩孔隙空间的分形结构;储集层非均质性的分形分析;粘滞指进现象、侵入渗流、裂缝油藏与油气藏分布的分形方法以及 $1/f$ 地质学等。

本书对于石油、地质、地震专业的院校师生和广大科技工作者了解和研究分形理论及其应用是一本很好的入门读物和参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

分形与石油 / 王域辉等编著

—北京:石油工业出版社,1994.11

ISBN 7-5021-1095-X

I.分…

II.王…

III.分形几何—应用—石油工业

IV. TE-03

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 32 开 $8\frac{7}{8}$ 印张 191 千字 印 1—2000

1994 年 11 月北京第 1 版 1994 年 11 月北京第 1 次印刷

定价: 9.00 元

序

近十几年来，分形几何这门新的理论受到了石油科技界的广泛重视。特别是最近三四年间，它已经在油藏地质模型的建立、地震资料的处理、储集层孔隙结构的分析和渗流机理的探索等诸多方面取得了很好的成绩。分形几何应用已成为国际著名学术会议，如 AAPG（美国石油地质师协会）年会、SPE（石油工程师学会）技术会议的讨论专题。我国石油科技界积极开展分形应用研究，也已取得了一批有实用价值的成果。

分形理论在应用中初试锋芒，显示出它旺盛的生命力，从而引起我国石油工业界各方面人士的浓厚兴趣和高度重视。但由于这是一门刚刚起步的新技术，绝大多数技术干部对它还很陌生，当前很有必要大力普及推广。王域辉等老师编写的本书正好适应了这一形势的需要。

国内已出版过几本介绍分形理论和它在某些领域应用的小册子，但结合石油工业实际应用的分形书籍这还是第一本。

本书以流畅易懂的文笔、浅近生动的实例深入浅出地介绍了有关分形的基本知识，因此只想了解分形基本思想和实用方向的管理干部从中可以得到思想方法的训练。同时，本书又按石油专业分门别类收集了大量应用实例，详尽介绍了分形几何的应用途径，公式有推导，数据有图表，这又可使有志于开展此方向研究的科技人员从中获得宝贵的启示，迅

速走向前沿。

据我所知，王域辉老师是我国石油行业中倡导和从事分形研究的先行者之一。他以科学的敏锐性抓住了这一新事物的脉搏。如果不是早在多年以前就注意这一问题，不可能在短时间内写成内容丰富的这本书。从这个意义上讲，我作为推荐者希望它在石油地质行业中尽快得到推广应用，更希望出版社能以只争朝夕的精神使本书早日问世，以飨广大读者。

裘恽楠

1993.10.6 于北京

前 言

近来，已经有愈来愈多的石油科技工作者关心分形及其与石油工业的关系这个问题。特别是从“石油消息”报 1993 年 5 月开始开展“分形等技术笔谈”讨论以来，研究和应用分形的热潮已经兴起。为了使广大石油科技工作者对此有一个概略的了解，我们编写了这本书。

分形理论是一门崭新的学科，它正处于迅猛发展的时期；同时，它又有待完善，有许多问题等待人们去探索、去解决。但是，重要的是分形几何已为我们认识大自然提供了锐利的武器，为我们揭示大自然的奥秘开拓了宽阔的道路，同时也为我们解决复杂问题打开了一扇方便的大门。

近年来，在石油工业的各个领域运用分形成果累累，其涉及的范围之广出人意料，以至于可以说在石油科学技术之中分形无处不在。本书只选取了与石油工业联系最密切的部分作一粗略的介绍。

我们选材的目的还在于，通过具有代表性的事例能使读者从中了解分形理论的基本精神和处理问题方法的要领。如果这样做还有助于读者从新的角度思考自己所遇到的实际问题，以致能举一反三、触类旁通，那么作者将感到莫大的鼓舞。

本书的结构是这样安排的。第一章介绍一些必要的预备知识。第二章详细介绍有关分形的基本概念、经典分形和近年来研究得十分活跃的多重分形。

第三章介绍沉积岩孔隙空间的分形结构。传统的欧氏几何对于孔隙空间的描述虽然唯象而平均地解释了某些实验规律，但由于其出发点根本偏离了孔隙结构的无规性和复杂性，所以得到的解释不能反映孔隙形成演化的复杂过程。而且就唯象规律的解释而言，它也有很大的局限性。对于用分形几何研究孔隙结构的目前状况，我们在本章中作了初步介绍。应当说，对于沉积岩的节理和裂纹等的分形研究也有许多工作进展，限于篇幅我们就不一一细述了。

随着石油勘探工作的进展，目前摆在勘探工作者面前的一个重要问题是：由于边远地区（如沙漠）和海洋地区钻井成本极其昂贵，怎样才能以少量探井查明勘探地区的地质和物性分布情况。石油开采工作中弄清储集层非均质性已经成为提高采收率的关键。为此，我们在第四章里介绍分形几何中的时间序列分析—— R/S 分析方法及其在储集层非均质性方面的应用。我们将看到，分数布朗运动和分数高斯噪声分布可以恰当地反映储集层性质激烈起伏的特点。这些分布具有自仿射性质，并且具有长程相关的特点。这是我们可以利用局部数据建立某种储集层二维和三维剖面的根据。在此模型上建立的分形插值方法，已为描述储集层参数分布提供了一个崭新而有效的工具。如果使用现行实践的方法，需要用 20~30 口井的资料才能描绘出地层物性剖面，但用分形方法却只需要 2~3 口井的资料就可以达到同样的目标。

第五章介绍粘滞指进现象的分形理论。由于多孔介质中粘滞指进现象极其复杂，至今仍然没有一个完善的理论。分形理论从新的角度来研究粘滞指进，得出了很有价值的结论，这对二次采油工作可起很好的推动作用。除了在油田开发中实用的公式外，我们还介绍了粘滞指进与有限扩散凝聚

(DLA) 模型之间的关系。有限扩散凝聚模型对于地质中的许多生长和凝聚现象都是一个很好的模型。

第六章中介绍了与两相流驱替有关的另一种现象——侵入渗流。渗流理论是物理上解决连续相变问题的有力工具，它不仅很好地解释了两相流驱替的侵入渗流，同时也为解释岩石的物性如渗透率、电阻率等问题奠定了很好的基础。

天然裂缝油藏在现有油藏中占有很大的比重。在石油工程中有时还需要人为制造一些裂缝（如压裂工艺）以提高石油采收率。在第七章中，我们简要介绍裂缝的分形性质及其在试井工作中的应用。最近，已有很多用分形理论研究裂缝的论文发表。限于本书篇幅，有关裂缝开度等问题，我们只好略去不讲了。

分形在石油工业中的应用研究日渐广泛，涉及范围也在不断扩大，众多的研究成果本书难以一一容下，因而在第八章扼要介绍了其它方面的工作进展，如：油气聚集大小和空间的分形分布、岩石结构中元素的多重分形分布、酸化虫孔中的分形现象、重油开采中沥青烯的分形凝结、地球物理测井地质解释和标度噪音及地震波反射中的分形现象。这样做的目的是希望有助于读者了解全貌，开拓思路，更好地把分形理论与自己的实际工作联系起来。为方便读者进一步查阅，本书还在各章之后提供了有关的参考文献。

本书由廖淑华编写第一、二章，其余各章由王域辉完成，最后由王域辉统稿。实在，那句“时间紧迫、水平有限，缺点和错误在所难免，不妥之处万望读者不吝指教”的套话对于我们也依然适用。

这本书的写作得到国家自然科学基金委员会、中国石油天然气总公司储层协调组的大力支持。蒋其凯、石宝珩、裘

恽楠、沈平平同志给予我们许多鼓励和帮助。特别是裘恽楠同志为本书的审定花费了不少心血，作者在此对他们一并表示由衷的感谢！

王域辉 廖淑华

1993年10月于江汉石油学院

目 录

绪言	(1)
第一章 预备知识	(4)
§ 1.1 集合论简介	(4)
§ 1.2 函数、映射和变换	(13)
§ 1.3 相似变换和仿射变换	(18)
§ 1.4 概率与统计基本知识	(21)
第二章 分形数学	(33)
§ 2.1 引言	(33)
§ 2.2 什么是分形	(38)
§ 2.3 分维数的几种定义	(49)
§ 2.4 几种经典分形实例	(64)
§ 2.5 团簇分形	(92)
§ 2.6 高维分形	(97)
§ 2.7 多重分形测度	(102)
第三章 沉积岩孔隙空间的分形结构	(123)
§ 3.1 引言	(123)
§ 3.2 经典孔隙模型和分形孔隙模型	(124)
§ 3.3 沉积岩的特点	(126)
§ 3.4 测定沉积岩孔隙分形结构的实验方法	(127)
§ 3.5 沉积岩孔隙空间分形结构层次	(135)
§ 3.6 沉积岩分形结构的生成机理	(140)
§ 3.7 沉积岩孔隙空间分形结构与成岩作用	(142)

§ 3.8	沉积岩孔隙分形结构与岩石物性	(143)
第四章	储集层的非均质性	(147)
§ 4.1	赫斯特经验规律与 R/S 分析	(148)
§ 4.2	随机行走与布朗运动	(151)
§ 4.3	分数布朗运动	(160)
§ 4.4	分形插值方法	(167)
§ 4.5	储集层非均质性的分形描述	(175)
第五章	粘滞指进	(183)
§ 5.1	赫尔·肖元胞中的粘滞指进	(184)
§ 5.2	粘滞指进和驱替性能预测	(192)
§ 5.3	多孔介质中的粘滞指进	(196)
§ 5.4	粘滞指进与有限扩散凝聚	(199)
第六章	渗流现象	(205)
§ 6.1	引言	(205)
§ 6.2	四方点阵的座渗流	(206)
§ 6.3	在 p_c 处的无限大团簇	(210)
§ 6.4	渗流团簇的自相似性与重正化方法	(213)
§ 6.5	相关长度 ξ	(218)
§ 6.6	渗流主干	(220)
§ 6.7	侵入渗流	(223)
第七章	裂缝油藏	(233)
§ 7.1	裂缝分形性质及其测定	(234)
§ 7.2	天然裂缝油藏的双重介质模型	(237)
§ 7.3	常一约佐斯模型	(238)
§ 7.4	常一约佐斯模型的实际应用	(247)
第八章	无处不在的分形	(254)
§ 8.1	油气聚集的分形结构	(255)

§ 8.2	沉积岩微结构中的元素分布	(258)
§ 8.3	酸化虫孔	(260)
§ 8.4	原油沥青烯沉淀	(261)
§ 8.5	地球物理测井地质解释	(263)
§ 8.6	标度噪音和地震波反射	(266)

绪 言

大自然丰富多采，仪态万千，充满着复杂性。

满天星斗的夜空启迪着宇宙的无穷深邃，显微镜下的岩石揭示了地球千百万年的形成演化，奇峰异石、杂花寒树编织出如画的风光……可以说，没有复杂多变的现象就不成其为大自然，也就没有虎虎生生的地球生命和人类社会！

如何看待大自然的复杂性呢？各行各业的人都会用职业的眼光和自己的语言来描述它。至于用科学的观点刻画它们，则经历了多少代人前赴后继的卓绝努力，才逐步建立和完善起一整套经典的理论。

长期以来，人们采用的经典方法其主要精神是：第一，抓住问题的主要矛盾，忽略次要矛盾，即保留所谓影响问题的最主要的因素，而略去一些“细节”。例如，把山峦轮廓看成一条光滑的曲线，把翻腾奔泻的河川视为静静流淌的水面等等。事实上，如果要把影响事物的因素无论巨细统统考虑进去，就会在实际问题面前束手无策，裹足不前。第二，对具体问题进行分析。“弹琴看对象”，采取就事论事的办法。针对实际问题的某一方面性质去建立模型，解决一个急迫的具体问题。

经典理论所创造的现有技术曾给整个工业包括石油勘探开发带来空前的繁荣，开创出人类文明灿烂辉煌的时代。然而，在人类的光辉成就证实经典理论强大威力的同时，也日益暴露出经典理论所固有的弱点。因为，采用传统的框架处

理问题时，不论建立什么样的模型，都会有理论与实际时而相符、时而背离的情形，其不确定性实在太大。这不能不使科学家和工程师们常常处于迷茫之中。人们一直在冥思苦索，寻找着新的突破。

近十几年来，混沌理论和分形几何的发展使人们豁然开朗，它为上述问题的解答找到了正确的方向。原来，经典方法忽略了许多似乎并不紧要的“细节”，即它实际上过分强调了所处理问题的光滑性、渐变性和连续性。而大自然所揭示的问题，其中也包括石油工业中的实际问题，其本质则是粗糙的、突变的和间歇的。现在人们已经认识到，混沌不是随机现象而是对初始条件敏感的决定性现象；传统方法所忽略的“细节”，也并不都是无关紧要的因素。“差之毫厘，失之千里”。在混沌现象中，这些所谓细节却会起着“秤砣虽小压千斤”的关键作用。分形几何就是描述自然现象其中也包括混沌现象最恰当的工具。

分形几何最中心的思想是研究对象的自相似性。一条具有自相似结构的复杂曲线，它的无论多么小的部分都和整条曲线一样复杂。因此，对于分形结构而言，不存在任何特征尺度；用通常的长度、面积和体积去测量它就失去了意义，进而强调光滑性的微积分对它也失去了法力。另一方面，从自相似的观念出发，人们还惊奇地发现，分形几何体不再固守维数必为整数的阵地了，维数可以取分数值！的确，分形几何是真正描写复杂现象和刻画大自然的几何学。从传统的观点和经验看来，描写复杂现象的理论，其方法必然十分复杂繁冗。事实上，以自相似为核心的分形几何却揭示出，可以用简单的迭代繁衍出极其复杂的自然现象。自然界似乎正是按“一生二、二生三、三生万物”的规律在运行。换句话

说，从分形几何的观点看，并不存在什么复杂现象，复杂现象只是传统观念的结论。分形体系的自相似性还有一个重要的特点，即局部和整体的相关性，或系统内部的长程相关性。因此，“一滴水可以见到太阳”，从解剖一个麻雀可以知道所有麻雀的共同特性。这样的认识是符合实际的，它也就成为了分形几何之所以广泛应用的基础。

分形几何的思想为被复杂现象所困扰的石油工程师们带来了新鲜的空气和锐利的武器。近年来，分形几何在石油地质、岩石物性、石油勘探、开发和运输诸方面已经得到广泛应用，许多研究成果已取得十分明显的经济效益。我国许多石油科技工作者在积极开展分形应用研究的工作中，也已经取得了一批很有意义的成果，这更进一步证明了分形几何这门学科的强大威力。

第一章 预备知识

分形几何作为一门新的数学学科正处于发展阶段。目前，分形几何所涉及的基本概念主要借助于点集拓扑⁽¹⁾、测度论⁽²⁾和概率统计学⁽³⁾等较为成熟的数学学科。为了使读者在学习本书和阅读有关文献时不致发生困难，我们首先简要陈述一下必要的知识⁽⁴⁾，但对此不加以论证。

§ 1.1 集合论简介⁽⁵⁾

集合论作为数学的一个分支是 19 世纪末及 20 世纪初才开始蓬勃发展起来的。德国数学家康托 (Cantor) 是科学的集合论的奠基人。目前，集合论的思想已经渗透到所有的数学分支。集合论的基础知识对于我们理解分形几何也是不可缺少的。

一、集合的基本概念

1. 集合与元素

集合论中最基本而又简单的概念是“集合”。集合概念是通过抽象化的途径产生的，它是不能加以精确定义的数学概念之一。

一般来说，集合是具有某种属性的事物的全体，或是一些确定对象的汇总。与集合概念不可分割的另一个概念是集合的元素，它是构成集合的事物或对象。

集合也简称集。以下是几个集合的例子。

例 1 汽油、煤油和柴油 (属于石油产品集合)；

例 2 大庆油田全体职工；

例 3 全体奇数；

例 4 平面上满足方程 $x+y-1=0$ 的所有点的集合，这是一条直线上的全部点。

集合的元素有多有少。一般地，我们把元素个数为有限数的集合称为有限集，而元素个数为无限多个的集合则称为无限集合，前面的例 1 和 2 是有限集合，而例 3 与 4 则是无限集合。

通常，我们表示集合用大写字母 A 、 B 、 C ……，而表示集合中元素则用小写字母 a 、 b 、 c ……。若元素 a 是集合 A 中的元素，则用 $a \in A$ 表示，读作 a 属于 A 。但若 a 不是 A 中的元素，则用 $a \notin A$ 表示，读作 a 不属于 A 。如我们用 I 表示全体奇数的集合时，可知 $3 \in I$ 而 $\frac{1}{2} \notin I$ 。

2. 集合的表示法

表示一个集合可用列举法或描述法。

用列举法时，需按任意顺序列出集合的所有元素，然后用花括号括起来。例如上面例 1 的集合可表示为

{汽油，煤油，柴油}

这时，必须注意逐一列出集合的所有元素，不可重复也不可遗漏。

用描述法表示集合时，必须抓住集合中元素具有的特征，即各元素共同满足的条件或法则。如上面的例 3 可以表示为