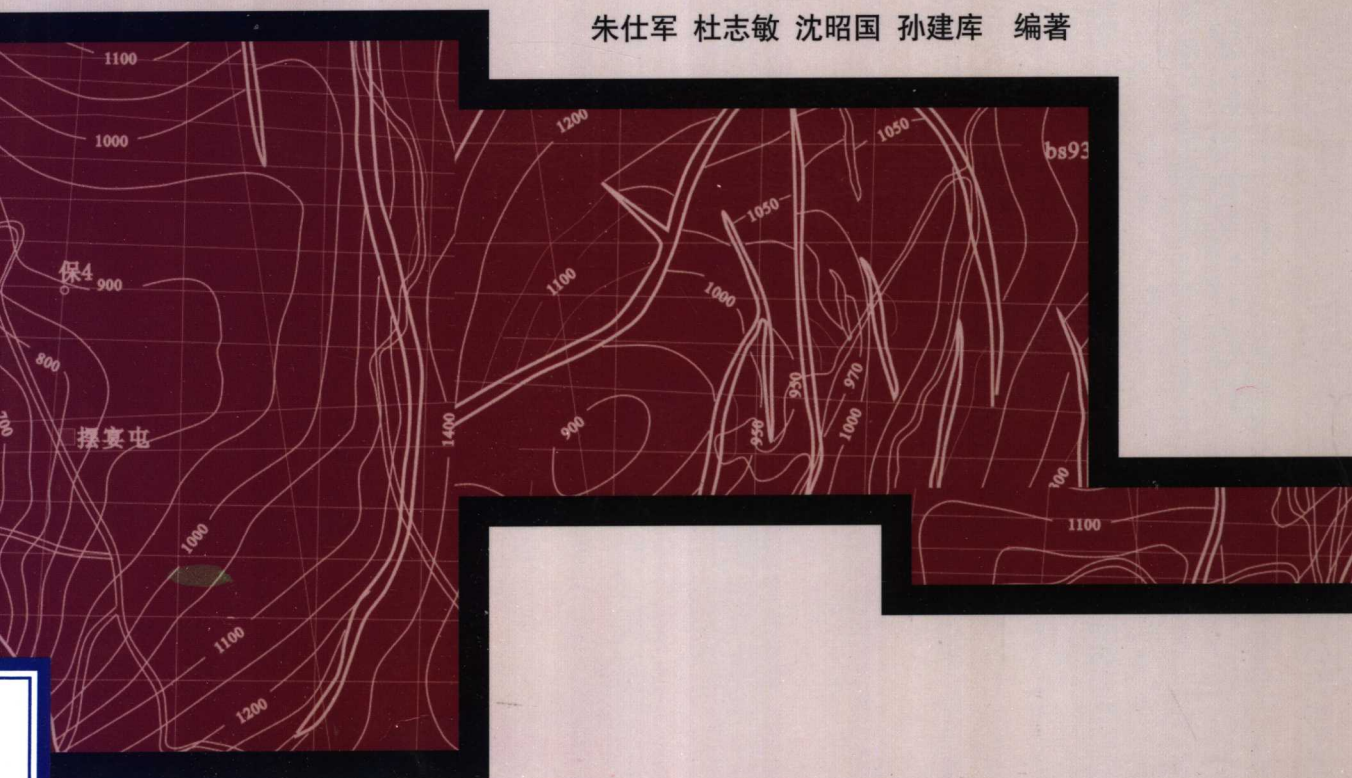


CHUCENG DINGLIANG JIANMO

储层定量建模

朱仕军 杜志敏 沈昭国 孙建库 编著



石油工业出版社

四川省重点学科建设项目（编号：SZD0414）资助

储层定量建模

朱仕军 杜志敏 沈昭国 孙建库 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

近年来兴起的储层随机模拟技术在解决储层非均质性研究方面表现出较大的潜力,已成为表征储层非均质性的主要工具之一。但储层随机模拟计算得到的结果都是一些等概率的多个模拟实现,具有很大的不确定性。本书在前人研究的基础上,针对不同勘探和开发阶段存在的实际问题,以地质、测井和地震资料为依据,以地震波阻抗反演和随机模拟技术为手段,以储层非均质性定量建模为研究对象,建立起了一套系统的储层非均质性定量建模的理论和研究方法,为储层非均质性定量建模研究探索了一些新方法和新途径。

本书可供从事油气勘探开发研究的科研、技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

储层定量建模/朱仕军等编著.
北京:石油工业出版社,2005.5
ISBN 7-5021-5058-7

- I. 储…
- II. 朱…
- III. 储集层-定量分析-建立模型-研究
- IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 032760 号

储层定量建模

Chuceng Dingliang Jianmo

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

总 机:(010) 64262233 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印刷

2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:6

字数:150 千字 印数:1—1000 册

定价:22.00 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

第一章 绪论	(1)
第二章 提高地震资料分辨率	(6)
第一节 小波变换提高信噪比	(6)
第二节 能量补偿提高分辨率	(17)
第三章 地震相分析	(21)
第一节 地震相分析方法	(22)
第二节 地震相分析的定量化方法	(25)
第三节 地震相的沉积相解释	(27)
第四章 地震波阻抗宽带约束反演	(29)
第一节 地震波阻抗反演原理	(29)
第二节 地震波阻抗反演方法	(30)
第三节 宽带约束反演混合优化算法	(35)
第四节 技术关键	(39)
第五章 地震约束储层随机建模方法研究	(42)
第一节 问题的提出	(42)
第二节 随机模拟算法与克里金算法的主要区别	(43)
第三节 随机模拟原理	(45)
第四节 序贯高斯模拟方法	(46)
第五节 模拟退火随机模拟	(51)
第六节 地震约束下的波阻抗随机模拟	(55)
第七节 Cokriging 方法预测储层孔隙度	(59)
第六章 应用研究分析	(68)
第一节 区域地质概况及反射层位标定	(68)
第二节 沉积相研究	(69)
第三节 储层横向预测	(76)
第四节 圈闭评价与储量计算	(84)
参考文献	(86)

第一章 绪 论

在油气田的勘探评价和开发阶段,储层研究以建立定量的三维地质模型为目标,这是油气勘探开发深入发展的要求,也是储层研究向更高阶段发展的体现。现代油藏经营管理的两大支柱是油藏描述和油藏数值模拟。油藏描述的最终结果是油藏地质模型,而油藏地质模型的核心是储层地质模型。要科学地进行精细油藏描述、油藏工程管理以及油藏数值模拟均需要建立三维储层地质模型。油藏数值模拟需要一个把油藏各项特征参数在三维空间的分布定量表征出来的地质模型,且油藏数值模拟成败的关键在很大程度上取决于三维储层地质模型的准确性。

在石油和天然气工业发展的初期,世界上油气勘探的主要对象是背斜构造。1917年发现委内瑞拉马拉开波湖玻利瓦尔油区的地层油气藏,1930年又发现美国的东得克萨斯大油气田,并查明为地层油气藏。自此以后,地层油气藏日益引起了人们的重视。特别是近一二十年来,随着勘探开发技术的不断发展,新技术、新方法的不断引入,在世界各地发现的地层油气藏越来越多。

目前在世界石油和天然气的产量、储量中,岩性地层油气藏占有很大比重。综合世界上可采储量超过 5×10^8 bbl的巨型油田和 3.5×10^{12} ft³的巨型气田,在总数为134个油、气田中,43%的石油储量和30%的天然气储量是在岩性地层圈闭中。在我国,从区域地质构造特征来看,地壳运动的多周期性决定了沉积岩系剖面中,沉积间断及各种不整合现象甚多。在东部地台区的古生界沉积中,这个特点很明显。而广泛发育在各沉积盆地中的中、新生代陆相沉积,与下伏老地层为不整合接触,其本身岩性变化大,各种成因的砂岩体普遍分布,形成了各种类型的岩性地层油气藏。

这种岩性地层类型的油气藏是在各种复杂地质因素综合作用下而形成的,因而具有外在的隐蔽性和内在的复杂性,这种隐蔽性和复杂性在储层分布空间上表征为各种尺度和规模的非均质性。虽然当前油藏描述方面的研究已经很深入,提出了很多先进的方法,发表了大量的论文和论著。但是,能真正解决岩性地层油气藏非均质性的方法仍不成熟。特别是缺乏可靠的井间参数的预测和描述方法。由于这些原因,致使油藏描述的结果不能客观地反映地下储层的空间分布规律以及它们之间的相互连接、叠置关系,这势必造成不正确的储量估算、产量预测、采收率估计及井网部署。而这些工作紧密联系着开发方案设计、投资决策等重大经济活动。

由于岩性地层油气藏在外形和内部结构上受多种因素影响,如沉积、成岩、构造作用等,极不规则且复杂多变,其非均质性表现为结构的复杂性和分布的随机性,其储层预测及定量建模存在相当大的难度。截至目前为止尚无成熟的理论和研究方法。测井资料虽然能精细刻画储层特征,但稀疏,不能准确描述井间储层特性。地震资料虽然能够反映井间储层的变化特性,但受地震资料分辨率的限制。近年来出现的随机模拟技术,可从不同程度上解决以上存在的问题。随机模拟产生的结果是多个可选的、等概率的储层模型实现,这些实现表达了储层各种尺度上的变化特征和内部结构,是细致的、高分辨率的、数字化的、定量的储层表征方式。但这些数字特征并不是储层物性参数的精确值,仍然存在着不确定性。特别是

在勘探初期井少的情况下,随机模拟更不能发挥其特长。因此,在勘探开发的不同阶段,如何解决储层非均质性描述及定量储层建模问题仍是目前世界储层非均质性研究的难点和前沿课题。

鉴于国际上对油气资源需求的不断增长,油气在整个能源结构中仍占有相当大的比例,世界范围内油气的勘探开发活动依然活跃。由于勘探目标和勘探开发条件日益复杂,其风险和难度不断增加。因此寻找一种能解决储层非均质性描述的储层建模方法是一亟待解决的问题。

近年来,人们越来越认识到,要经济有效地开发油气田,仅靠传统的资料(测井、岩心和生产历史资料),已经显得很不够了。无论是开发新的油田,还是在老油田上钻加密井、扩边井和试井,乃至提高油气采收率,综合使用地震资料能较完整地刻画油藏的特征,改善油藏管理。

随着地震技术的进步,用测井资料作为控制和标定,充分利用面积上密集的地震资料、特别高分辨率的地震反射资料和测井约束的地震波阻抗反演资料,能够把对储层的分辨率提高到米级。将这些资料和方法融合到能够模拟储层非均质性的随机建模技术中,可以揭示储层在岩性、物性和含油气性的各向异性或非均质性特点,揭示砂体的空间展布及在纵横向上的变化规律,为精细油藏描述、油藏数值模拟提供更加符合实际地质特点的三维定量地质模型,有利于寻找隐蔽的、复杂的油气后备资源,有利于开发方案的制定及注采井网的部署,为提高油气采收率提供充分可靠的依据。

一、地震波阻抗反演方法研究现状

从原理上讲,地震反射同相轴仅仅代表的是一个界面,可以通过井资料标定来粗略地研究储层砂体的分布,但不能反映砂体的厚度和岩性变化。要从地震技术上根本说明这个问题,必须依靠波阻抗反演数据体。

从地震记录中获取具有真实地质意义的地质参数,一直是石油地质学家和地球物理学家的研究目标,各种地震反演技术正是在这一实际需求的刺激之下兴起的。早期,福斯特(Faust, 1951)和 R. E. 怀曼(Wyman)证明在地质、地球物理和岩石物理的几种测量结果之间存在联系,特别是岩石速度变化是三个重要地质因素的函数[岩性(孔隙度和流体成分)、地质时代和深度]。随着地震数据采集的数字化和计算机技术的发展,在20世纪70年代早期,亮点技术作为第一个直接检测地下油气存在的技术进入石油界。强振幅、相位反转、平点、时间滞后、阴影带等,成为发现许多新油气田的“第二信号”。继1977年Beitzel在第47届SEG年会上发表的题为“Understanding Seismically Derived Impedance Logs”论文之后,第二个在物探界引起震动的是地震反射记录的波阻抗反演技术。此时的反演方法是反射地震记录与标准的零相位地震子波做反褶积处理,将地震反射记录反演成地下地层反射系数,并将此反射系数转换成波阻抗曲线,是一种直接反演方法。在当时的地震储层横向预测中取得了很大的成功。但由于这种反演方法是直接根据地震反射记录进行的,其分辨率很低,并且反演的结果在很大程度上与地震子波提取的精度有很大的关系。因此,此时的波阻抗反演结果,只在勘探阶段被加以利用,无法用于指导油气田的开发生产工作。为了提高波阻抗反演的分辨率和准确性,很多地球物理工作者为此做了大量的研究工作。如: D. W. Oldenburg 和 Colin Walker 的最大熵(MED)及自回归(AR)方法; B. Ursin 和 O. Holberg 的最大自然反褶积(MLD)方法; Marc Lavielle 的贝叶斯估计反褶积(BED)方法; D. A. Cooke 和 W. A. Schneider 的广义线性反演(GLI)方法等,都取得了很好的效

果。这方面有代表性的工业化软件是美国 Landmark 公司的 G-log。波阻抗是储集岩的一种主要物性参数，具有低的多解性和更高的储层横向预测精度，可以较准确地建立砂体解释模型和储层含气性解释模型，能够获得较准确的砂体厚度和波阻抗平面分布图，达到储层横向预测的目的。随着波阻抗技术在勘探开发领域中应用成功实例的增多，地震波阻抗反演由此受到世界范围的广泛关注。从 20 世纪 80 年代中后期，由于地震处理方法技术的不断改进和完善，地震资料信噪比、分辨率得到了很大的改善，有望得到更高质量的地震波阻抗资料，各种新方法、新技术、新算法不断深入到这个领域。在这阶段的专业文献中，这方面的文章不断出现。其中最有代表性的方法就是模型波阻抗反演方法。这种方法避开了地震数据带限问题，可以将波阻抗反演的分辨率提高到储层级，这是波阻抗反演划时代的里程碑。尽管如此，反演结果的可信性在很大程度上取决于初始模型的选取及地震数据的信噪比，致使存在多解性，并且收敛速度也受到很大影响。为了克服以上问题，相继出现了有井约束的宽带约束反演 (BCI) 技术和各种优化算法。这方面具有代表性的论文如：周竹生的宽带约束反演；S. Gluck 的地层反演方法；D. Carron, E. P. Schlumberger 的井中和地面的井控地层反演；Brac T 的利用地层模型解释先验信息进行反演；R. D. Martinez 的多参数约束反演方法；Cornish B E 的高分辨储层模型随机反演等。以上文献都从不同的角度和计算方法提高了波阻抗反演的分辨率，降低了多解性，发展至此形成了日臻成熟的波阻抗反演技术。其相应的工业化软件也出现很多，如 Seislog, Parm, Strata, CCFY, ISIS, Jason 等等，正在世界各地油田的勘探开发生产过程中广泛使用。这些都是基于模型的测井宽带约束反演，只是所用的算法和加进约束条件的方法有所区别。最近几年各种最优化方法引入到波阻抗反演中，各种各样的混合优化算法相继出现，这方面的工作主要是在解决计算精度的同时提高算法收敛速度，减少反演的多解性。国内也有不少的学者在这方面做了大量的研究工作，如姚振兴、姚姚的模拟退火方法，李晶的遗传算法等优化方法。这些方法对波阻抗反演的稳定性和收敛速度都有很大的改进。

尽管如此，波阻抗反演方法仍然存在这样或那样的不足，如算法复杂，实现困难；初始模型不准，存在多解性；地震子波提取误差，影响计算精度；抗干扰能力差，难以收敛等等，因此仍需要不断改进，提出新的、更好的方法。

二、国内外储层随机模拟研究现状

储层随机模拟技术是油藏描述的一项基础研究，也是油藏开发地质学的重要内容。目前，随机模拟技术主要用于油藏开发中、后期的精细油藏描述，并发展了一套比较成熟的理论和技术。

随机模拟方法的出现是油藏描述的必然产物。在 20 世纪 70 年代末至 80 年代初，斯伦贝谢公司首先研制了油藏描述软件系统。从此，储层表征非均质性定量研究伴随油藏描述就开始了。80 年代初，油藏描述的基本方法是以测井资料为主，对关键井进行分析研究，对储层的非均质性表征通常在油藏描述的基础上，通过常规数理统计参数或变异函数的某些指标（或参数）进行描述。当时，油藏描述研究主要提供能反映储层纵向连续性的单井综合评价结果，以成果图和数据表的形式，提供能反映储层几何形态、储层属性参数在二维、三维空间变化的全油田综合研究成果，各种参数的趋势网格图和等值图。80 年代末，油藏描述进入了多学科油藏描述阶段，此时，油藏描述主要运用测井、地震、油田地质和岩心资料以及生产测试等资料，通过对这些资料的综合分析研究，提供能刻画储层特征参数图件。该阶段的油藏描述技术仍然以点的描述为基础，建立的储层地质模型为概念模型或静态模型。

虽然在井间储层描述中引入了地震技术，但限于当时的勘探技术和地震资料分辨率，对复杂类型的油气藏往往使提供的模型在一定程度上失真或不完善。进入 90 年代，油藏描述逐渐向多学科一体化发展，地质、物探、测井研究人员与油藏工程师协同工作，发展边缘科学及计算机的“地学平台”，以多种应用数学方法贯穿始终，如应用统计、人工智能、专家系统、随机模拟等等。特别是随机模拟方法的出现，对储层非均质性的研究上到了一个新的台阶。因此，随机模拟技术是随着油藏描述技术的不断发展而逐渐涌现出来的，它的出现标志着对储层非均质性研究取得了一定程度的进展。

1988 年，石油工程师学会（SPE）在瑞士的 Grindenward 举办了关于储集层表征的研讨会。在这次研讨会上，许多的学者讨论了有关储集层表征中随机模拟方法的各种思想。这些思想在当时都是很新的且大多未经过检验。其中有些想法还没有应用到实践中，仅仅是一些有创造性的构想。当时还对随机模拟方法是否与油藏模拟有关存在着争议。尽管这样，地质学家、地球物理学家和油藏工程师们已意识到随机模拟方法在储层描述上的应用会取得突破性的进展。1991 年，SPE 在科罗拉多州 Crested Butte 召开的第二届储集层表征会对随机模拟方法的实用价值进行了检测，对 1988 年 Grindenward 研讨会上提出的所有具体方法，通过实际储集层的实例研究都得到了应用，并且在 Crested Butte 研讨会上的争议焦点不再是随机模拟方法是否有用，而是如何应用这些方法。由此确定了随机模拟在储层表征中的地位。

从此以后，国外研究人员开始大量致力于储层随机建模的研究工作。在 1987—1999 年期间，随机模拟技术在欧洲及美国的石油工业中获得巨大的发展，各种方法的理论与应用研究的文献大量问世，仅在石油工程师协会（SPE）各种会议上发表的涉及随机模拟的文章，从 1994 年开始，每年几乎都在 30 篇左右。1996 年 SPE 专门召开了储层建模会议，其他的会议和期刊也有大量文献，如 AAPG 期刊及其会议、国际数学地质会议等。1990 年召开的第十三界国际沉积大会拟订的第一个技术讨论题目便是储层沉积学和地质模型（Reservoir Sedimentary and Geologic Modelling）。因此储层地质模型从此已属于石油开发地质学的研究范畴，是当前油藏描述的目的和归属，也是油藏描述的重点和难点。在此期间出现了一大批模拟储层非均质性的方法。1988 年，A. G. Journel 和 F. G. Habert 提出了一种随机指示模拟，主要研究储层物性的空间连通性。1990 年，两人又对这种方法进行了改进，提出了一种新方法——序贯指示模拟，这种方法计算时间短，与数据的吻合程度高。1994 年，Raull del Valle G. 将分形理论用于对裂缝性储层的数值模拟中。Dominique Berta、H. H. Hardy 和 R. A. Beier 等研究了一些储层物性的分形分布并将这种分布应用于油藏模拟中。J. L. Hand, Chung - Tien Yang 和 A. K. Chopra 将序贯高斯模拟、序贯指示模拟和截断高斯模拟与传统的储层描述技术进行了比较，认为这几种技术确实比传统的技术更能体现储层结构的复杂性。1995 年，Akhil Datta - Gupta, Larry W. Lake 和 Tgray A. Pope 通过序贯模拟退火方法利用岩心和测井数据的空间结构性和示踪剂数据描述了渗透性介质的非均质性。1997 年，Joseph Olarewaju, Saleem Ghorri, Alhasan Fuseni 和 Mohammed Wajid 利用分形模拟对裂缝密度进行了随机模拟。为克服传统网格放大带来的误差，Yann Gautier 和 Benoit Noetinger 将重正化群技术应用用于非均质性储层模拟中来，并用此技术对流体流动路径进行了识别。1999 年 Philippe Lamy, Richard L. Chambersd 等将地震数据引入到随机模拟中，极大地减少了随机模拟结果的不确定性，为定量随机模拟开辟了一条新的路径。目前，在国内还没见到相应的文章发表。

在国内，随机模拟技术用于油气储层表征方面，现在还处于起步阶段。西安石油学院的张团峰、王家华等人在引进国外资料的基础上，研制了一套储层地质统计分析系统（GA-SOR2.0），可用于建立储层模型。中国石油勘探开发研究院刘明新等人在“八五”期间利用分形理论进行了储层建模研究。胜利油田“八五”期间在其研制的油藏描述软件中也加入了随机建模内容。石油大学纪发华（1994）在其博士论文中利用随机建模技术对油藏特征做了研究，利用序贯指示模拟、模拟退火研究了渗透率的空间分布。文健（1995）在其博士论文中讨论了随机建模技术应用上的个别问题。陈亮（1996）在其博士论文中在虚拟井技术上利用随机建模技术对井间剩余油分布做了预测。西南石油学院的冯国庆（2001）在其博士论文中对现在流行的随机模拟方法进行了深入的分析和创新，并对实际油田资料进行了计算分析，得到了一些很有启迪的结论。

虽然随机模拟技术在最近十几年发展很快，但是从本质上讲随机模拟方法是在地质统计学的理论上发展起来的，它是以大量已知数据为前提。高分辨率的测井数据可以精确刻画储层纵向上的特征。但是在横向上，由于缺乏数据而难以进行，特别是在勘探初期只有几口井的情况下。并且由随机模拟得到的结果都是一些等概率的多个模拟实现，仍然具有很大的不确定性。如何解决储层横向非均质性问题的研究，如何从这些等概率的多个模拟实现中确定出与实际地质情况相符的定量非均质性模型，已成为目前世界上储层非均质性研究的热点和前沿课题。

第二章 提高地震资料分辨率

目前我国各油气田区已经转入隐蔽油气藏的深挖细找阶段，其储层厚度大多数只有几米、十几米，在常规地震勘探中它们都属于薄层范围。对于这类油气藏的勘探与开发首先应提高地震资料的分辨率，没有足够的分辨率，很难在储层研究及油气藏描述方面有所作为。因此在储层研究及油气藏描述中，需要先进行提高分辨率的处理，使薄储层能在地震记录上被识别、分辨、追踪出来。

第一节 小波变换提高信噪比

提高地震数据信噪比，在地震勘探中具有重要的实际意义。信噪比的高低直接影响到地震资料数据处理质量，特别是高分辨率处理及地震储层参数反演等储层预测方法。提高分辨率的前提是压制噪声，提高信噪比。一般地震资料处理在提高分辨率的同时常常降低信噪比，而提高信噪比的处理又常常降低分辨率。利用小波变换后的时分分频特性来处理地震资料，可以在提高信噪比的基础上，提高分辨率。

一、信噪比与分辨率

图 2-1 上部为地震道的频谱图。图中涂黑的阴影为信号 (S)，空白的部分为噪声 (N)。图 2-1 下部为信噪比图。在低频段和高频段，信噪比较低，在中频段信噪比较高。定义信噪比大于 1 的频带为有效频宽，如果信噪比小于或等于 1，则为无效频宽。

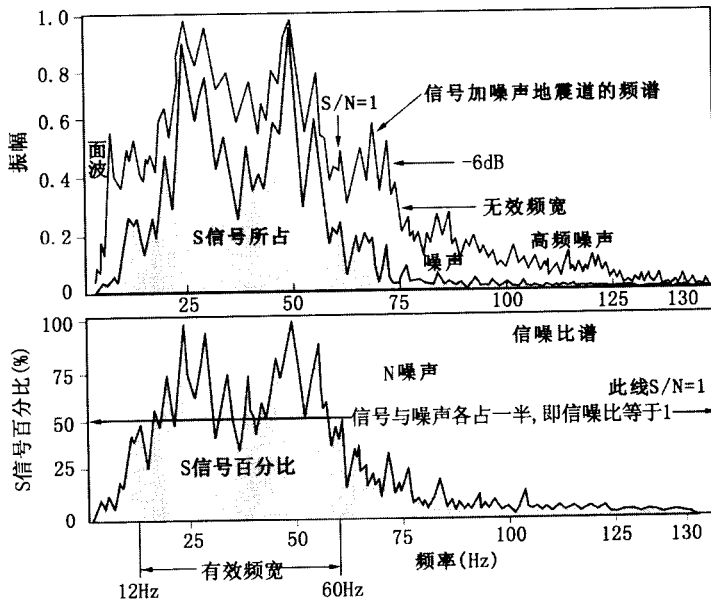


图 2-1 信号和噪声在各个频率成分中的比例及有效频宽的定义

图 2-2 为测井反射系数的振幅谱 (a) 和井旁地震记录的振幅谱 (b)。可以看出, 测井反射系数振幅谱的频带宽度远远大于井旁地震记录振幅谱的宽度, 这正是测井资料的分辨率远远高于地震资料的分辨率的原因。

为了提高地震资料的分辨率, 就必须拓宽地震资料的频宽。目前提高分辨率的常用方法是各种反褶积方法。由于反褶积算子对信号和噪声是一视同仁的, 所以反褶积以后, 无效频宽中的噪声较其中的信号放大的更大, 拓宽的频带实际上是无效频带 (如图 2-3)。反褶积后尽管谱向高频带拓宽了, 但信噪比并未发生变化。而信噪比是分辨率的基础, 为此, 在作高分辨率处理时, 必须

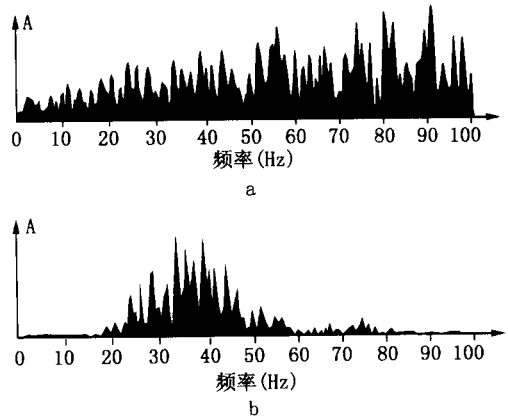


图 2-2 测井反射系数的振幅谱 (a) 和地震记录的振幅谱 (b)

先进行压噪处理, 尤其是压制对拓宽频带有显著影响的高频噪声, 提高信噪比。

常规的压噪是频域滤波, 而频域滤波在通带以外压制噪声的同时, 信号也被压制, 与高分辨率处理拓宽有效频带形成矛盾。从图 2-1 可知, 不同频率成分, 其信噪比是不同的, 这就要求在压制噪声时应分频处理。同时, 由于地震信号在地层的传播过程中, 随着时间的增加, 信噪比也随之变化。所以, 也要求在压噪时应分时处理。实施分时分频压噪使通带外噪声受到压制, 而信号得到保留, 为地震信号的高分辨率处理奠定了基础。因此, 有效的压噪是高分辨率处理中的首要环节。

小波变换可以使信号的分解精细到信号信息的任意细节, 这为分时分频处理创造了条件。

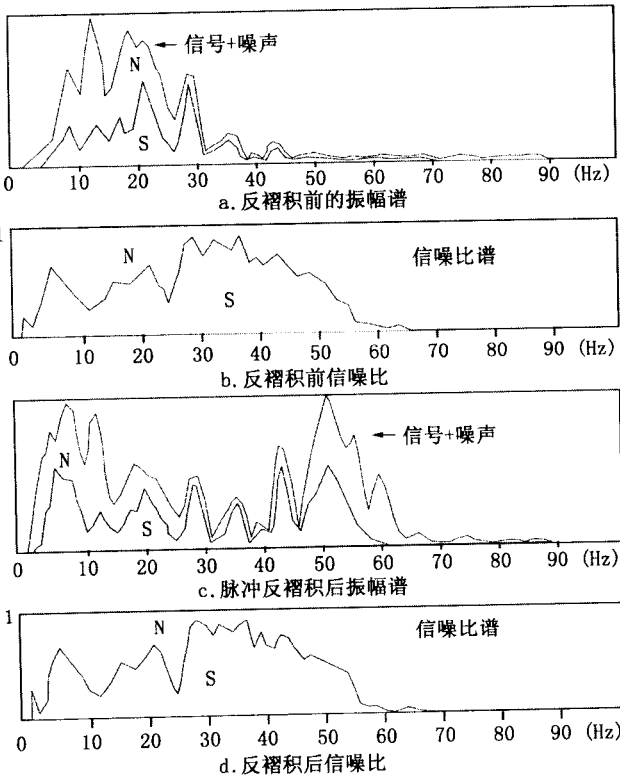


图 2-3 反褶积前后信噪比谱的变化情况

二、小波变换分时分频除去高频噪声

1. 小波变换的理论思想

由于傅里叶分析是一种纯频率分析, 在时间域上毫无局部化可言。而窗口傅氏变换采用高斯函数作为时间局部化最优窗, 其窗口面积和性状都不变, 如图 2-4。因此, 分辨率不能随频率变化而变化。小波变换采用面积不变, 但性状随频率可调的最优窗, 如图 2-5。

在低频有较高的频率分辨率，在高频有较高的时间分辨率，这有利于信号的分时分频处理。

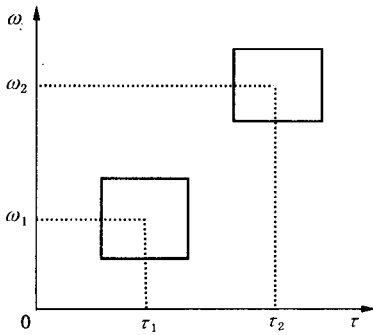


图 2-4 Gabor 时间-频率窗

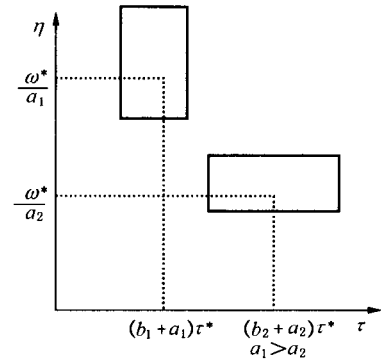


图 2-5 基小波时间-频率窗

设 Ψ 是定义在 $(-\infty, +\infty)$ 上的能量有限函数，构成平方可积信号空间记为 $\Psi \in L^2(R)$ ，则按如下方式生成函数族 $\{\Psi_{a,b}\}$ ：

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad -\infty < b < +\infty \quad a > 0 \quad (2-1)$$

式中， $\Psi(t)$ 称为基本小波函数， $\Psi_{a,b}(t)$ 是通过基本小波 Ψ 伸缩和平移而生成的，称为小波基函数，式中 a 为尺度参数， b 为平移参数。

对任意信号 $f(t)$ ，其连续小波变换 (WT) 定义为信号与小波基函数的内积：

$$\begin{aligned} \text{WT}(f(t); a, b) &= W_f(a, b) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\Psi_{a,b}(t)} dt \\ &= |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \end{aligned} \quad (2-2)$$

式中， $-\infty < b < +\infty, a > 0$ 。

从信号 $f(t)$ 的小波变换 $W_f(a, b)$ 反演出小波变换前的信号 $f(t)$ 的过程称为小波反演变换或重构 (IWT)。其反演公式为

$$f(t) = C_{\Psi}^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) W_f(a, b) \frac{da db}{a^2} \quad -\infty < b < +\infty \quad (2-3)$$

式中， $C_{\Psi} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$

2. 小波分析的 Mallat 算法

Mallat 算法是 Mallet 在 Burt 和 Adelson 图像分解和重构的塔式算法的启发下，基于多分辨分析框架，提出了现今以他的名字称谓的算法，如图 2-6。该算法在小波分析中的地位就像 FFT 在经典傅里叶分析中的地位一样。它利用很多种不同性质的正交小波基。其中由一般的尺度函数 g 构造平移正交尺度函数 ϕ 、共轭滤波器 $H(\omega)$ 、转向滤波器 $G(\omega)$ 与小波函数 Ψ ，且给出了信号（即函数）分解为不同频率通道算法及其重构算法，即 Mallat 算法。

设 $\{V_j\}$ 是一给定的多分辨率分析, 且 $\phi(t)$ 、 $\Psi(t)$ 分别为相应的尺度函数和小波函数, 对于某一数字信号记录 $f(t)$ 有如下的分解式:

$$f(t) = A_j f(t) = A_{j+1} f(t) + D_{j+1} f(t) \quad (2-4)$$

其中 $A_{j+1} f(t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} C_{j+1,m} \Psi_{j+1,m}(t) \quad (2-5)$

$$D_{j+1} f(t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} D_{j+1,m} \phi_{j+1,m}(t) \quad (2-6)$$

而 $C_{j+1,m} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h_{k-2m} C_{j,k} \quad (2-7)$

$$D_{j+1,m} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} g_{k-2m} D_{j,k} \quad (2-8)$$

引入无穷矩阵 $\mathbf{H} = (H_{m,k})$ 、 $\mathbf{G} = (G_{m,k})$, 其中 $H_{m,k} = h_{k-2m}$ 、 $G_{m,k} = g_{k-2m}$, 则式 (2-7)、(2-8) 可简写为

$$C_{j+1} = \mathbf{H}C_j; D_{j+1} = \mathbf{G}D_j \quad (2-9)$$

式 (2-9) 便是 Mallat 算法的塔式分解式, 称 C_{j+1} 、 D_{j+1} 为信号在 2^j 分辨率下的离散逼近和离散细节。

由式 (2-9) 经适当的数学处理后, 得到 Mallat 重构算法为

$$C_j = H^* C_{j+1} + G^* D_{j+1} \quad (j = J, J-1, \dots, 1) \quad (2-10)$$

式中, H^* 和 G^* 为 \mathbf{H} 和 \mathbf{G} 的共轭算子。

3. 地震信号的小波分解和重构

设地震信号为 $f(t)$, 则有

$$f(t) = A_{n_1} f(t) = \sum_{m \in Z} C_{n_1,m} \phi_{n_1,m}(t) \quad (2-11)$$

式中, 数列 $\{C_{n_1,m}\}$ 具有有限长度 N_{n_1} 。按 Mallat 算法, 式 (2-11) 可分解成不同的频道

$$f(t) = A_{n_2} f(t) + \sum_{n=n_1+1}^{n_2} D_n f(t) \quad (2-12)$$

其中 $A_{n_2} f(t) = \sum_{m \in Z} C_{n_2,m} \phi_{n_2,m}(t) \quad (2-13)$

是信号 f 的频率低于 2^{-n_2} 的成分, 而

$$D_n f(t) = \sum_{m \in Z} D_{n,m} \Psi_{n,m}(t) \quad (2-14)$$

是 f 的频率介于 2^{-n} 和 $2^{-(n-1)}$ 之间的成分, 式 (2-13) 和式 (2-14) 的系数可按如下的塔式算法递归得到:

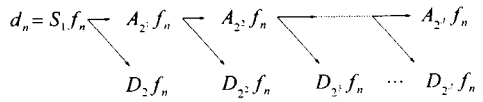
$$C_{n+1} = \mathbf{H}C_n \quad (2-15)$$

$$D_{n+1} = \mathbf{G}C_n \quad (n = n_1, \dots, n_2 - 1) \quad (2-16)$$

这里 \mathbf{H} 和 \mathbf{G} 分别为低通滤波器和高通滤波器。

根据小波分析可将信号 $f(t)$ 分解成低频 (小于 2^{-n_2}) 成分 $A_{n_2} f(t)$ 和频率介于 2^{-n} 和 $2^{-(n-1)}$ 之间的成分 $D_n f(t)$ ($n_1 - 1 \leq n \leq n_2$); 每一频率成分 $A_{n_2} f$ 和 $D_n f$ 又分解成具有相同频率区不同相位的成分。如果尺度函数 ϕ 与小波函数 Ψ 的能量分别集中在 $t = a$ 和 $t = b$ 附近, 则式 (2-13) 中的 $C_{n,m} \phi_{n,m}$ 和式 (2-14) 中的 $D_{n,m} \Psi_{n,m}$ 的能量分别集中在 $t = 2^n (m + a)$

a. 分解算法



b. 重构算法

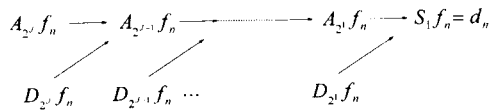


图 2-6 Mallat 分解和重构算法

和 $t = 2^n (m + b)$ 附近。由此可见，时空域中的分辨率随频率的大小而调节，高频者精密，低频者粗疏。若按 Mallat 分解算法，式 (2-1) 将 $f(t)$ 分解成式 (2-12) 和式 (2-14)。根据具体的先验知识，就能区分有效信号和噪声，将噪声相应的 $C_{n_2, m}$ 和 $D_{n, m}$ ($n_1 + 1 \leq n \leq n_2$) 置零。或者以调整新的序列 \tilde{C}_{n_2} 和 \tilde{D}_n ($n_1 + 1 \leq n \leq n_2$)，再按 Mallat 重构算法

$$\tilde{C}_{n-1} = \mathbf{H} * \tilde{C}_n + \mathbf{G} * \tilde{D}_n \quad (n = n_2, n_2 - 1, \dots, n_1 + 1) \quad (2-17)$$

得到去噪后的信号

$$\tilde{f}(t) = A_{n_1} \tilde{f}(t) = \sum_{m \in Z} \tilde{C}_{n_1, m} \phi_{n_1, m}(t) \quad (2-18)$$

在地震资料处理中采用式 (2-17)、式 (2-18) 来去噪和提高分辨率。

4. 小波函数的选择

1) B-样条小波函数

在小波变换的实际应用中通常选择与构造如下三种形式的小波，其一是 Daubechies 紧支集小波，其二是 Battle-Lemarie (B-样条) 正交小波，其三是 Gaussian 指数小波。其中尤以 Daubechies 紧支集小波应用最广。这是因为此类小波构造方便，能给解决实际问题带来许多方便。但从频率域滤波这一角度来看，选择 B-样条正交小波要比另外两种更为适合。这是因为 B-样条小波的尺度函数 $\phi(t)$ 、小波函数 $\Psi(t)$ 以及它们的傅立叶变换 $\hat{\phi}(\omega)$ 、 $\hat{\Psi}(\omega)$ 都是对称的或反对称的，因此具有线性相位或广义线性相位。Daubechies 紧支集小波除 Harr 系外都不具备上述性质，而 (广义) 线性相位在滤波器设计中是经常需要的。对于 Gaussian 型小波，则多半是从满足

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dx = 0 \quad (2-19)$$

的方程出发在时域寻找小波函数 $\Psi(t)$ ，通常由高斯函数求导得到。用上节的方法对信号进行分解与重构，不但需要作为带通滤波器的小波函数 $\Psi(t)$ ，还需要作为低通滤波器的尺度函数 $\phi(t)$ ，而 Gaussian 型小波并不直接提供 $\phi(t)$ 的构造办法，因此用来滤波很不方便。通过频谱分析还可以看出，Gaussian 型的 $\Psi(t)$ 作为带通滤波器远不如 B-样条的 $\Psi(t)$ 。后者对滤波而言具有更好的频谱特性。图 2-7 给出了 5 阶 B-样条小波的 $\hat{\phi}_5(\omega)$ 和 $|\hat{\Psi}_5(\omega)|$ ，图 2-8 给出了 Gaussian 型的 Marr 小波

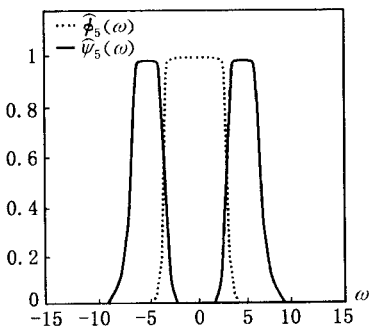


图 2-7 $\hat{\phi}_5(\omega)$ 与 $|\hat{\Psi}_5(\omega)|$ 曲线

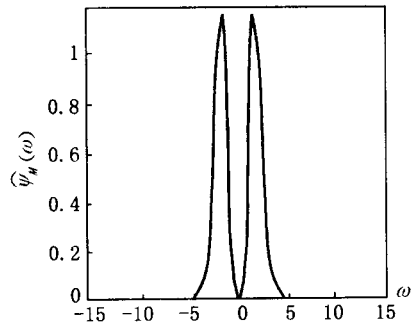


图 2-8 $|\hat{\Psi}_M(\omega)|$ 曲线

$$\Psi_M(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}(x^2 - 1)e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (2-20)$$

的频谱 $|\widehat{\Psi}_M(\omega)|$ 。

2) B-样条小波的构造

设 $\chi_{[0,1]}(t)$ 是区间 $[0, 1)$ 上的特征函数, 则 r 阶 B-样条函数由如下的多次褶积求得

$$g(t) = \chi * \chi * \dots * \chi \quad (r+1 \text{ 项}) \quad (2-21)$$

$$\widehat{g}(\omega) = \left(\frac{1 - e^{i\omega}}{i\omega}\right)^{r+1} \quad (2-22)$$

令

$$\widehat{\phi}(\omega) = \widehat{g}(\omega) \left(\sum_{k \in \mathbb{Z}} |\widehat{g}(\omega + 2k\pi)|^2\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2-23)$$

则可以证明 $\phi(t)$ 满足正交 MRA 中尺度函数的条件。令

$$H(\omega) = \frac{\widehat{\phi}(2\omega)}{\widehat{\phi}(\omega)} \quad (2-24)$$

则相应的小波函数的傅里叶变换为

$$\widehat{\Psi}(\omega) = e^{-i\frac{\omega}{2}} \overline{H}\left(\frac{\omega}{2} + \pi\right) \widehat{\phi}\left(\frac{\omega}{2}\right) \quad (2-25)$$

当 r 为奇数时, $\widehat{\phi}(\omega)$ 可简化为实偶函数。因此, 选择奇数阶 B-样条小波显然比偶数阶 B-样条小波要方便得多。

5. 小波变换时分频去除高频噪声

1) 地震信号二进小波变换

对于 $\Psi \in L^2$, 取式 (2-2) 中的 $a = 2^j$, $j \in \mathbb{Z}$ (整数集), 若存在常数 $0 < A < B < \infty$, 使

$$A \leq \sum_{j \in \mathbb{Z}} |\Psi(2^{-j}\omega)|^2 \leq B$$

则定义地震信号 $f(t)$ 的二进小波变换是函数序列

$$W_{2^j} f(t) = f(t) * \Psi_{2^j}(t) = \frac{1}{2^j} \int_{\mathbb{R}} f(x) \Psi\left(\frac{t-x}{2^j}\right) dx \quad (2-26)$$

地震信号 $f(t)$ 可以从它的二进小波变换中恢复出来

$$f(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \int_{\mathbb{R}} W_{2^{-j}} f(b) \{2^j \chi[2^j(t-b)]\} db \quad (2-27)$$

其中函数 $\chi(t)$ 称为重构小波, 且满足条件 $\sum \widehat{\phi}(2^j\omega) \widehat{\chi}(2^j\omega) = 1$, $\phi(\cdot)$ 为相应的尺度函数。式 (2-26)、式 (2-27) 为地震信号的二进小波变换对 (图 2-9、图 2-10、图 2-11)。

2) 小波变换去噪方法

由于二进小波分解具有时频特性, 它可将信号从时域变换到时频域, 并且其频域是依照二进划分成频带。利用二进小波的这个特性, 可以将地震信号按频带分解成若干记录, 针对地震记录在各频带的不同特点实施取噪处理。

图 2-12 和图 2-13 为小波去噪流程图。首先对地震记录进行二进小波变换, 形成多分量地震记录, 然后在每一个分量地震记录上依次对相邻道进行相关分析, 把相关分析值作为

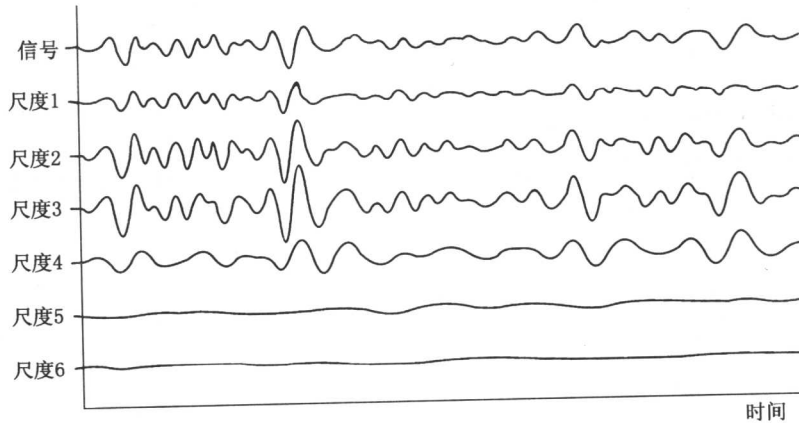


图 2-9 地震信号二进小波分解

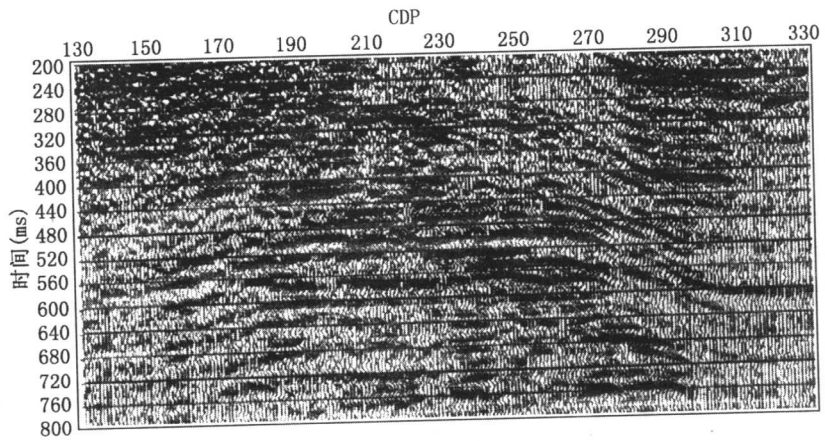


图 2-10 尺度为 1 时的 BS9317 小波变换剖面

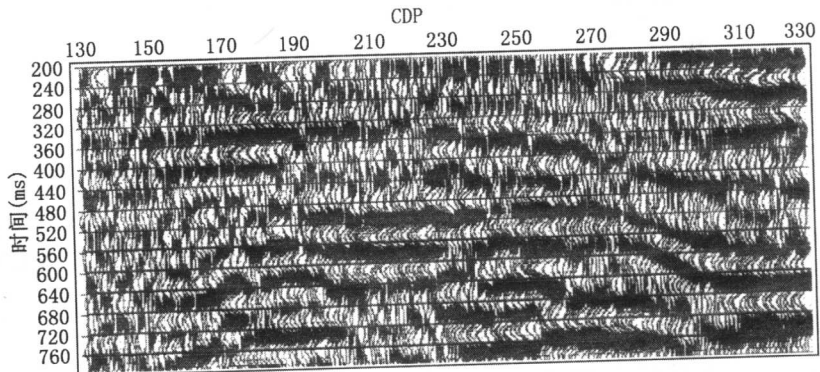


图 2-11 尺度为 5 时的 BS9317 小波变换剖面

权值对每个道进行加权处理，小波反变换形成去除高频噪声后的地震记录剖面。

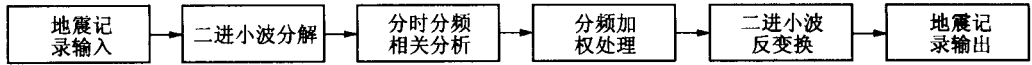


图 2-12 二进小波除去随机噪声流程图

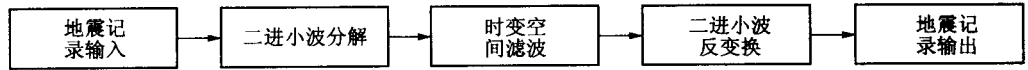


图 2-13 二进小波除去相干噪声流程图

三、利用瞬时吸收率进行高频噪声的剔除

设地震记录通过反褶积后可用下式表示：

$$y_{ijk}(t) = \zeta_k(t) * \Delta_{ij}(t) + n_{ij}(t) * W_{ij}(t) \quad (2-28)$$

式中 $\Delta_{ij}(t)$ 为剩余子波, $W_{ij}(t)$ 为反褶积算子, $n_{ij}(t)$ 为炮点、检波点、磁带、仪器及其他硬件所生成的噪声, $\zeta_k(t)$ 为第 k 个共中心点的反射系数序列, i 为炮点号, j 为检波点号; k 为共中心点号。

式 (2-28) 第一项由于在反褶积时, 需要加入一定的白噪声序列, 所以剩余子波的频率振幅在高频段还保留一定的吸收作用, 即 $[\Delta_{ij}(f)] < 0 \quad (f > f_{\max})$, 同时反射系数序列一般近似为白噪声序列, 其谱密度为常数, 所以有

$$[\zeta_k(t, f) \cdot \hat{\Delta}_{ij}(f)]'_f \leq 0 \quad (f > f_{\max}) \quad (2-29)$$

第二项中, $n_{ij}(t)$ 是高频噪声和随机噪声, 在作反褶积时会严重放大, 这是叠加数据上生成放大脉冲的主要原因, 其作用可表示为

$$[n_{ij}(t, f) \cdot W_{ij}(f)]'_f > 0 \quad (f > f_{\max}) \quad (2-30)$$

定义瞬时吸收率为

$$K_{ijk} = \sum_{f_m \geq f_{\max}} \frac{\Delta X_{ijk}(t, f_m)}{\Delta f} \quad (2-31)$$

式中, $\Delta X_{ijk}(t, f_m) = H[X(t, f_m) - X(t, f_{m-1})]$, 这里 $H[\cdot]$ 表示希尔伯特变换的包络项, $X_{ijk}(t, f_m)$ 为小波的多分辨率分析道, $\Delta f = f_m - f_{m-1}$ 。所以有如下判别准则:

$$K_{ijk} \begin{cases} \leq 0 & \text{信号} \\ > 0 & \text{噪声} \end{cases} \quad (2-32)$$

即: $K_{ijk} \leq 0$ 为信号 (大于一定信噪比的信号); $K_{ijk} > 0$ 可能是高频噪声。

瞬时吸收率检测剔除高频噪声的实现步骤:

- (1) 将地震记录进行小波变换, 得到各尺度的时频记录, 为分时分频创造条件;
- (2) 根据时频记录求取瞬时吸收率;
- (3) 由高频噪声的判别标准, 根据瞬时吸收率在各个时频记录上剔除高频噪声;
- (4) 将去噪后的时频记录进行小波变换, 重构出去噪后的记录。

此滤波方法多用于提高分辨率反褶积之后去除高频噪声。

四、模型及实例分析

1. 模型分析

采用两种模型来验证小波和瞬时吸收率压噪的有效性: ①层状介质模型; ②楔状介质模型。