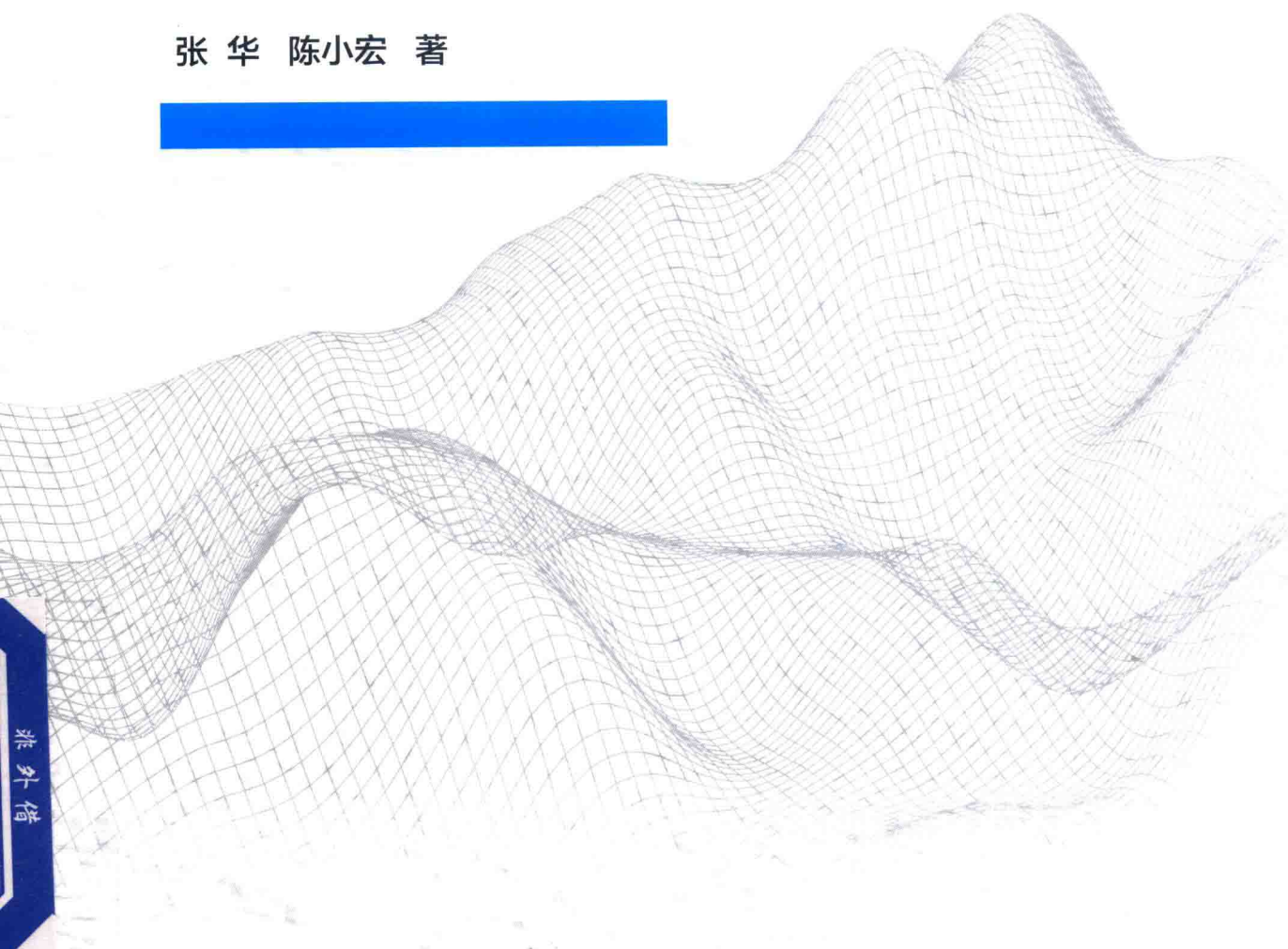




Theory and Method of
Seismic Data Reconstruction

地震数据重建 理论与方法

张华 陈小宏 著



非外借

 科学出版社

地震数据重建理论与方法

张 华 陈小宏 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书基于地震数据重建理论与方法研究,较系统地介绍了数据重建过程中的采样方法、稀疏变换方法以及不同的重建算法。全书共7章,包括绪论、地震数据重建理论基础、基于傅里叶变换的地震数据重建、基于曲波变换的地震数据重建、基于非均匀傅里叶变换的地震数据重建、基于非均匀曲波变换的地震数据重建、地震数据同时重建和噪声压制。对于常用的均匀采样和非均匀采样下的各种地震道缺失重建问题,都采用了相应的有效算法进行数据重建,并且给出了对应的数值模拟和应用实例分析。

本书具有较高的理论价值和实用价值,可以作为高等院校师生和从事应用地球物理及相关专业技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

地震数据重建理论与方法 / 张华, 陈小宏著. —北京: 科学出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-03-055049-1

I. ①地… II. ①张… ②陈… III. ①地震数据-重建 IV. ①P315.63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 265865 号

责任编辑: 张井飞 姜德君 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年11月第一版 开本: 787×1092 1/16

2017年11月第一次印刷 印张: 11 1/4

字数: 300 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

由于采集设备、地形环境以及经济成本的限制，无论是陆地勘探还是海洋勘探，检波点和炮点可能都会偏离最初设计的均匀网格位置，使得地震数据沿空间方向上通常进行不规则欠采样，从而导致采集到的地震数据不完整，出现空间假频。而后续的其他处理方法对地震数据的规则性以及完整性提出了更高的要求。在这种情况下，希望能够发展一种较好的地震数据重建方法，通过利用较少的野外地震数据在随后的室内处理中重建出理想的地震数据，得到同样的地震勘探效果，这样既可以突破传统采样定理的限制，也可以解决地震道不规则缺失，而且可以提高数据采集效率，促进高分辨率地震勘探的发展。

当前国内尚无系统介绍地震数据重建理论方面的专著。本书是在多年研究的基础上，把均匀和非均匀采样下规则和不规则地震数据重建方面的研究整理成文。全书共7章。第1章简要介绍了地震数据重建方法的发展历史和研究现状。第2章阐述了地震数据重建过程中的采样方法、稀疏表示基和求解算法。第3章研究了基于傅里叶变换下的二维到五维地震数据重建方法并讨论了阈值参数选取方法。第4章从时间域和频率域上研究了多尺度多方向曲波变换高精度数据重建。第5章研究了基于非均匀傅里叶变换的不规则地震数据重建。第6章提出线性 Bregman 算法，研究了基于非均匀曲波变换的二维和三维不规则地震数据重建方法。第7章研究了地震数据同时重建和噪声压制方法。

本书主要成果得到了国家自然科学基金项目“基于压缩感知的地震数据重建理论研究”(41304097)和“基于反假频和噪声压制的五维地震数据重建理论研究”(41664006)，江西省杰出青年人才资助计划项目(20171BCB23068)，江西省自然科学基金项目“基于频率域复值曲波变换的快速高精度地震数据重建”(20151BAB203044)和“基于非均匀曲波变换的不规则地震数据高精度重建理论研究”(20171BAB203031)，以及东华理工大学地球探测与信息技术科技创新团队的资助。

本书在撰写过程中得到了中国石油大学(北京)的马继涛副教授、刘国昌副教授，中国地质大学(北京)的高建军副教授，英属哥伦比亚大学的 Haneet Wason 博士和 Mengmeng Yang 博士的帮助。东华理工大学张落毅、杨会、王冬年、刁塑等研究生参与了书中部分内容的研究工作。在此，作者一并致以诚挚的谢意。

由于作者水平所限，书中难免存在不足之处，恳请各位读者、专家及同仁批评指正。

作 者

2017年7月于东华理工大学

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究目的及意义	1
1.2 研究问题分析	2
1.3 国内外研究现状	3
1.4 发展趋势	7
第2章 地震数据重建理论基础	9
2.1 地震数据重建方法原理	9
2.1.1 传统采样定理	9
2.1.2 重建理论基础	9
2.2 压缩采样理论	10
2.2.1 概述	10
2.2.2 核心问题	10
2.3 采样方法	12
2.3.1 互相干噪声评价函数	12
2.3.2 一维采样方式	13
2.3.3 二维采样方式	16
2.4 变换域稀疏约束求解	18
2.4.1 l_2 范数约束	18
2.4.2 l_1 范数约束	19
2.5 地震数据重建算法	20
2.5.1 凸集投影算法	20
2.5.2 阈值迭代法	21
第3章 基于傅里叶变换的地震数据重建	22
3.1 阈值参数的选取	22
3.2 二维数值模拟算例	24
3.2.1 不同阈值重建结果	24
3.2.2 不同采样率的重建效果	27
3.2.3 Jitter 采样重建效果	28
3.2.4 含噪地震数据重建	29
3.2.5 反假频重建	30
3.3 三维数值模拟算例	31
3.3.1 一维和二维采样数据重建	33

3.3.2	反假频重建	38
3.3.3	Jitter 采样重建	40
3.3.4	含噪声数据重建	41
3.4	五维地震数据重建	44
3.4.1	方法简介	44
3.4.2	数据模拟	44
3.5	应用实例分析	48
3.5.1	二维地震资料处理	48
3.5.2	三维地震数据体处理	49
第4章	基于曲波变换的地震数据重建	54
4.1	曲波变换理论	54
4.1.1	连续 Curvelet 变换	54
4.1.2	离散 Curvelet 变换	55
4.2	曲波变换的稀疏度	57
4.3	曲波变换重建原理	60
4.4	阈值参数选择	60
4.5	二维数值模拟算例	61
4.5.1	不同阈值参数重建	61
4.5.2	不同 ε 值重建	64
4.5.3	含噪地震数据重建	65
4.5.4	不同重建算法对比	66
4.6	三维数值模拟算例	68
4.6.1	不同阈值参数重建	68
4.6.2	不同稀疏基重建	69
4.6.3	Jitter 采样方式重建	70
4.6.4	不同重建算法比较	73
4.6.5	含噪地震数据重建	76
4.6.6	反假频重建	78
4.7	频率域数据重建	79
4.8	应用实例分析	84
4.8.1	二维地震资料重建	84
4.8.2	三维地震资料重建	85
第5章	基于非均匀傅里叶变换的地震数据重建	90
5.1	傅里叶变换算子	90
5.2	最小二乘反演	91
5.3	空间域数据重建	92
5.4	数值模拟算例	93
5.5	应用实例分析	98

第 6 章 基于非均匀曲波变换的地震数据重建	100
6.1 理论基础	100
6.2 空间非均匀曲波变换	101
6.2.1 非均匀曲波实现过程	101
6.2.2 线性 Bregman 算法	102
6.3 二维非均匀数值模拟算例	103
6.3.1 规则化重建	103
6.3.2 随机欠采样重建	104
6.3.3 规则欠采样重建	107
6.3.4 含噪地震数据重建	110
6.4 三维非均匀数值模拟算例	111
6.4.1 采样方法	111
6.4.2 三维数据规则化重建	112
6.4.3 三维数据随机欠采样重建	116
6.4.4 三维数据规则欠采样重建	118
6.4.5 不同采样网格重建	119
6.5 应用实例分析	122
6.5.1 二维地震数据重建	122
6.5.2 三维地震数据重建	123
第 7 章 地震数据同时重建和噪声压制	128
7.1 均匀采样数据重建和去噪	128
7.1.1 问题陈述	128
7.1.2 二维数值模型	129
7.1.3 应用实例分析	132
7.1.4 三维数值模型	133
7.1.5 应用实例分析	136
7.2 非均匀采样数据重建与去噪	140
7.2.1 二维非均匀地震数值模拟去噪	140
7.2.2 应用实例分析	149
7.2.3 三维非均匀地震数值模拟去噪	151
7.2.4 应用实例分析	160
参考文献	163

第1章 绪 论

1.1 研究目的及意义

目前,随着油气等资源勘探不断深入,地球物理勘探方法所面临的地质条件和勘探环境也越来越复杂,对野外数据的采集工作也越来越重视。而地震勘探方法作为地球物理勘探中的一种重要油气勘探方法,一直在油气资源勘探中发挥着不可替代的作用,主要包括地震数据采集、数据处理和资料解释三大环节,而其中的野外数据采集是整个地震勘探的基础,所采集到的数据质量好坏也直接决定后续资料处理及解释效果,同时野外采集工作所需的费用也占整个地震项目支出的60%~70%,因此,在实际野外勘探工作中,一方面需要采集到高质量原始地震数据,另一方面也需要提高施工效率,节省勘探成本。

然而,在地震勘探的野外采集过程中,地震数据体的采样已达到了多维,数据采集面临巨大的压力。为了恢复高维的地震数据结构,我们不仅面临尼奎斯特(Nyquist)采样定理的限制,而且也面临由于地震数据采集维数的增加而数据量呈指数增加的压力,同时,在野外数据采集过程中,出于野外地形条件或者项目预算成本的考虑,地震数据沿空间方向上通常进行不规则采样,在陆地上这种情况可能起因于地震道布置时受到建筑物、湖泊、禁采区等复杂地形条件限制,或者人工激发炮点时由于各种原因而产生一定数量的哑炮,也可能起源于不能正常工作的地震道或者受到严重干扰的地震道,在海洋地震勘探中,则可能由于海洋拖缆羽状漂移等引起,从而所采集到的野外地震数据不完整、不规则,出现不同程度的空间假频现象。

这种具有稀疏分布的空间假频地震数据难以满足高分辨率地震勘探的要求,而后续的各种处理工作,如偏移归位、多次波消除、时移地震可重复性处理、不同面元资料的融合等,则对地震数据的规则性和完整性提出了更高要求。一般来讲,满足这些要求最直接也是效果最好的办法当然是在数据采集阶段就开始对采样点进行加密采集,但由于受到野外地形环境的限制,在野外直接对采样点加密采样往往不易实现。因此,在综合考虑野外采集成本以及复杂施工环境的基础上,希望尽可能少地布设炮点和检波器,利用较少的采样数据在随后的规则化反演处理中重建出理想而规则的完整数据,取得与完整数据采样相同的地震勘探效果。这样既可以突破传统采样定理的限制,又可以节省野外成本,同时也可以解决地震道不规则缺失问题,但这种利用极少数据来恢复全部数据的问题,从信息重建的地球物理反演角度来说,显然是欠定的,在数学上很难求解,这也成为目前包括地震信号处理在内的信息技术向进一步发展的瓶颈之一。

然而,在假设地下介质为连续性和可预测性的基础上,在已有的地震道采样间隔内,完全可以通过一定的策略和算法主动重建出所需要的完整而规则的地震道。为此,本书拟基于地震数据重建理论,突破传统采样定理的局限,利用信号具有稀疏性的特点,在数据

采集端采集较少的地震道，降低野外生产成本，提高工作效率，而将节省的成本转移到室内数据重建处理中来，通过利用较少的数据信息获得更多的勘探效果。同时探讨新的高效率高精度地震数据重建方法，压缩数据采集量，减轻存储传输压力，满足后续其他处理方法对数据规则性和完整性的要求，从而得到高信噪比、高分辨率和高保真度的地震资料，以解决目前野外数据采集所面临的缺失道重建问题，因此本书具有重要的研究意义与应用价值。

1.2 研究问题分析

不可否认，传统采样定理是采样过程中所必须遵循的准则，该理论也一直支配着几乎所有信号的采样、处理、存储、传输等过程，然而尽管采样定理是信号处理领域中最基础也是最有效的定律，但并不是最佳的，该定理主要基于信号具有一定的带宽性，而没有利用信号自身具有的结构特性——稀疏性特点。随着社会的不断发展，对信息需求量的增加，所携带信号带宽范围也越来越宽，以此为基础的信号处理框架所要求的信号采样率也越来越小，采样速度也越来越快，解决此采样数量和速率所带来压力的常见方案是对信号进行一定量的压缩，但是，信号压缩工作实际上也是一种资源浪费，因为在采集过程中，所采集的数据中只有小部分是对实际工作有用的，而余下大部分不重要的或者只是冗余的信息则要舍弃，浪费了大量的存储空间和压缩或传输时间。从这个意义而言，可以得到以下结论：带宽并不能本质地表达信号的结构特征，基于信号带宽特性的 Nyquist 采样机制是冗余的或者说是非信息的，即不是最佳的。然而能否利用其他变换空间来描述信号，建立新的信号描述和处理方法的理论框架，在保证原始信息不受损失的前提下，用远低于采样定理所要求的采样率进行信号采样，同时又可以高精度地恢复出原始信号的本来面目呢？答案是肯定的，那就是 Donoho (2004) 所提出的压缩采样理论 (compressive sampling, CS)。

压缩采样理论为解决此类问题提供了一种新的思路，它能够克服传统采样定理的不足，利用大部分信号都具有稀疏性的特点，以远低于传统采样率对信号进行快速采样，从而极大地降低数据采集过程中所带来的如存储空间、速度、经济等成本，而将这种成本转移到数据重建的计算过程中来，也就是转移到室内处理中来。但该理论需要满足三个前提条件：①要求待处理的信号是稀疏的，或者在某个变换域内是稀疏的；②测量矩阵（采样矩阵）是随机的，与稀疏变换基为互不相关，才可能将存在假频混淆的相干噪声转化为与真实频率成分不相干的噪声，从而可以容易地滤除，提取出真实频谱；③通过一定的稀疏促进求解策略来求解该问题，即能够找到一种反演方法对该问题进行求解，从而高精度、高效率地恢复出完整而规则的地震信号，然而在地震勘探中，大部分信号本身并不稀疏，通常都需寻找某种数学变换来稀疏表示地震数据，如余弦变换、傅里叶变换、小波变换、曲波变换等，再配以合适的采样方式，如随机欠采样方式，把由规则欠采样所产生的互相干假频转化成较低幅度的随机噪声，从而将数据重建问题转为更简单的去噪问题，即使只有极少的不完整数据，也有可能恢复出完整的地震数据，使其成为密集而规则的地震道，满足后续其他处理方法要求，其实，这种思想在地球物理领域并不罕见，特别是以往一些

常规重建方法已经运用了该理论。压缩采样理论能够系统地给出一个较为完善的理论框架,从而在地震数据采集,改变由过去地震道被动缺失重建,转变为在野外数据采集时主动缺失部分地震道,再寻找新的地震数据重建方法,以达到节省成本、压缩数据采集量、指导复杂地区数据采集、提高后续处理分辨率的目的。

而对于地震数据的恢复重建,一种广泛使用的方法是基于某种数学变换,然而由压缩采样理论可知,如果地震信号在该数学变换域中越稀疏,代表原始信号的系数越少,则重建效果可能越好,通常做法是选用傅里叶变换,但傅里叶变换属于时间域的整体变换,不能较好地反映出地震数据的局部特征,而后提出的小波变换具有良好的时频分析能力,能稀疏表示地震数据,在地震信号处理中得到了大规模的应用,但是事实也表明,小波变换对于信号奇异性检测,以及图像边界处理等效果有限,在其基础上进一步发展了脊波变换,该稀疏变换适用于描述图像直线特性,但还是不能最佳地表示信号具体特征,实现起来也较为复杂,而目前应用较好的曲波变换更具有局部化识别表示能力,能够更加稀疏地表示地震信号的局部奇异特征,从理论上讲,可以取得更好的重建效果,因此本书在傅里叶变换基础上,重点采用曲波变换来对地震信号进行稀疏表示。另外,根据压缩采样理论可知,要获得理想的重建效果,常用的采样方法(测量矩阵)为随机欠采样方式,以使传统规则欠采样所引入的和真实频率相混淆的假频转化成容易去除的不相干噪声,但单纯随机采样不能控制最大采样间距,可能会造成某些重要信息的缺失,影响重建效果,因此也需完善其他采样方式,在保证采样点随机性的同时,能够控制最大采样间距,并能根据野外地质环境灵活调整,进一步提高数据重建的效果。

一般来讲,地震缺失道重建分为两大类,一类是空间均匀网格采样下地震道缺失重建,包括规则和不规则地震道缺失重建,另外一类是空间非均匀网格采样下的地震道缺失重建,目前大部分地震重建方法的前提条件是空间均匀网格采样,对于直接重建非均匀网格采样下的缺失地震道则效果不佳。但由于野外地形条件的限制或者海上拖缆的羽状漂移,很多情况下地震道常进行空间非均匀网格采样,非均匀网格采样会引起覆盖次数的变化(地下不均匀照明),在叠加成像时会形成扭曲的成像振幅(采集脚印),影响后续成像处理,从而也会加重空间假频现象的出现,为此,需要在常规均匀网格采样下的重建方法的基础上,提出高精度重建算法来解决非均匀网格采样下的缺失道数据重建问题,这也是本节的重点研究范围。

1.3 国内外研究现状

通常在实际工作中处理不规则采样地震数据的方法为拷贝相邻道或是利用相邻道进行线性插值得到空缺道,或忽略空缺道或不考虑实际中的非规则采样点,通过叠加将不同道集放到一个面元上。但这些简单的处理方法常常会出现严重的误差,使后续大多数处理技术得不到很好的处理效果(Canning and Gardner, 1998; 霍志周等, 2013; 唐欢欢、毛伟健, 2014)。地震数据重建是地震数据预处理基本方法之一,主要是通过一定的策略和方法对不规则采样下缺失的检波器或者炮点进行重建处理,恢复出完整的或者采样率更高的原始数据。从20世纪80年代至今,许多国内外的学者对这一问题进行了研究,并发展了

许多高效率的地震数据重建方法，并应用于实际地震数据处理。Larner 和 Rothman (1981) 对不完整地震道恢复和野外地震数据采集设计进行了深入的讨论和研究，随后出现了大量的数据重建方法。目前，主要可以将地震数据重建方法归纳为以下四类。

第一类为基于滤波器方法，该类方法是通过褶积插值滤波器来实现重建的。Spitz (1991) 首先提出了反假频的 $f-k$ 域地震道插值（重建）方法，该方法利用线性同相轴在 $f-k$ 域是可预测的理论，而后 Porsani (1999) 对 Spitz (1991) 的方法进行了改进，提出了 $f-k$ 域半步长预测滤波的地震道插值方法，该方法用偶数道的数据分量来预测奇数道的数据分量，计算量较 Spitz 的方法小，提高了计算效率。Naghizadeh 和 Sacchi (2007) 提出了多步自回归预测滤波方法，对 Spitz 单步预测滤波方法进行了拓展，使其应用范围从只能进行道加密插值扩展到能对不规则缺失道地震数据进行插值重建，并且使其能够进行反假频重建。Naghizadeh 和 Sacchi (2010a) 将该算法扩展到多维情况，提高了重建效果，但这种方法通常将非均匀网格采样数据当作规则数据来处理，并通过高斯窗进行插值，容易造成较大误差，插值结果的不确定性较大。

第二类为波场延拓算子方法。波场延拓的地震数据重建方法基于 Kirchhoff 积分算子，该算子提供了一个非常精确的理论框架来进行地震数据重建。Ronen (1987) 提出了将缺失道作为零道并结合波动方程部分偏移对叠前地震数据进行重建的方法，通过将倾角时差校正 (DMO) 与反 DMO 相结合，为地球物理重建问题的研究提出了一个很好的思路。Canning 和 Gardner (1996) 对 Ronen (1987) 的重建方法进行了改进，将地震数据的时间坐标对数拉伸后在频率-空间域分步实现 DMO 与反 DMO，此方法在避免空间假频方面有较强的优势，但对内存的需求量很大，并且计算效率不高，实用性不是很强。Jager 等 (2002) 对基于 DMO 的地震数据重建方法进行了研究，给出基于数据延拓的地震数据重建方法。Fomel (2003) 采用有限差分的方法进行波动方程数据重建，Kaplan 等 (2010) 建立偏移和反偏移算子，采用最小平方反演方法进行数据重建，得到了较为精确的结果，并且这种方法可以处理非均匀网格采样数据，但前提是需要地下结构的先验信息，计算量非常大，对采样率要求也较高，而且对于较粗网格采样的数据重建效果并不理想。总体来讲，该方法的优点是允许最大程度地利用地下信息，但当地下信息未知或精度较低时就会影响重建结果。然而在大多数情况下，地下信息都是未知的，如速度参数，需要提前采用其他方法求取，但很难获取准确的速度场，从而限制了该方法的广泛应用。

第三类为基于快速降秩方法，该方法将插值问题看作图像填充问题，依据高维地震数据能够用低秩的 Hankel 矩阵来表示的原则进行重建，重建过程就是不断对低秩的 Hankel 矩阵进行去随机噪声过程，是一种最新才发展起来的有效方法，众多学者对此方法进行了研究 (Sacchi, 2009; Trickett *et al.*, 2010; Gao *et al.*, 2013, 2015; Kreimer and Sacchi, 2013; Ma, 2013; Chen *et al.*, 2016a)，并且也都发展到了五维地震数据重建，由于计算速度快，参数设置简单，得到了较好的应用，但该方法在非均匀网格采样下的不规则缺失道重建及其反假频能力方面还有待进一步研究实现。

第四类为基于数学变换方法，这类方法不需要地下结构的先验信息，能够重建规则缺失和不规则缺失地震道，且计算速度快，精度高，一般通过两个步骤来实现地震数据重建：第一步，正确地估算变换域系数。第二步，通过反变换得到理想规则网格上的重建数

据。这类方法主要有 Radon 变换 (Trad *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2010; Xue *et al.*, 2013)、傅里叶变换 (Liu, 2004; Trad, 2009; Curry, 2010; Chiu, 2014)、小波变换 (Choi *et al.*, 2016)、Curvelet 变换 (Herrmann and Hennenfent, 2008; Herrmann, 2010; Mansour *et al.*, 2013)、Seislet 变换 (Liu and Fomel, 2010)、Dreamlet 变换 (Wang *et al.*, 2015) 及数据驱动 (Cai *et al.*, 2014; Liang *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2016; Jia and Ma, 2017) 等。

目前, 基于傅里叶变换的地震数据重建方法已经达到了工业应用水平, 研究成果也较多 (Sacchi *et al.*, 1998; Sacchi and Liu, 2005; Wang, 2002; Gulunay, 2003; Abma and Kabir, 2006; Naghizadeh and Sacchi, 2009, 2010a; Naghizadeh and Innanen, 2011; Zhang *et al.*, 2013)。该方法不需要地质或地球物理假设, 只要求地震数据是空间有限带宽的, 并且计算效率高, 但是重建精度还有待进一步提高, 为此, 在傅里叶变换的基础上, 众多学者开始对 Curvelet 方法进行研究。Hennenfent 和 Herrmann (2006) 对快速离散 Curvelet 变换算法进行改进, 提出了非均匀快速离散 Curvelet 变换, 并成功地应用于对非均匀采样地震数据的去噪, 以及对原来非均匀地震数据进行规则化。Herrmann 和 Hennenfent (2008) 提出了基于 Curvelet 数据重建的稀疏促进反演方法, 成功地实现了含有缺失道的地震数据重建。Neelamani 等 (2010) 提出了复值曲波变换方法, 提高了重建精度。同时针对规则欠采样问题, Naghizadeh 和 Sacchi (2010b) 提出了利用无假频的低频数据反演出有假频的高频数据方法, 从而使该方法应用范围更广。为了提高运算速度, Zhang 等 (2015) 提出了基于曲波变换和新的阈值参数重建方法, 并且从频率域中实现了三维地震数据的重建。在此过程中, 基于曲波变换方法的研究成果也不断涌现出来 (Hennenfent and Herrmann, 2008; Shahidi *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2015a; Górszczyk *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2015)。然而以上的研究只能解决均匀采样下不规则缺失重建问题, 对于非均匀采样下的不规则缺失重建则无能为力, 进一步限制了这些方法的应用范围。

为了解决空间非均匀采样下地震道不规则缺失重建问题, 地球物理领域常规处理方法为共面元叠加, 然而共面元叠加处理方法忽略了每个面元内各道共中心点的真实位置, 改变了部分地震道的振幅和相位, 从而导致部分地震道位置出现严重偏差。另外还有一种方法就是基于波动方程的重建方法, 然而该方法需要地下结构的先验信息, 计算量非常巨大, 对采样率要求也较高, 从而也不能较好地解决该问题。为此, 许多学者采用基于数学变换的重建方法对该问题进行处理, Duijndam 等 (1999) 提出基于傅里叶变换的二维非均匀数据重建方法, 该方法依据合适的最低视速度, 采用最小二乘法来估计均匀傅里叶系数, Hindriks 和 Duijndam (2000) 将其扩展到三维, 实现了基于傅里叶变换的三维非均匀采样重建技术。但是, Duijndam 等 (1999) 的傅里叶重建方法有其局限性, 首先该方法不能重建大于三倍空间采样率的缺失道; 其次重建结果受最低视速度和空间带宽的影响很大, 随着采样间隔的逐渐增大, 重建结果会逐渐变差; 最后就是该方法不具有反假频能力, 从而限制了该方法的广泛应用。Xu 等 (2005, 2010) 采用重新正交化的过程, 提出了基于抗泄露傅里叶变换的重建方法, 并将其推广到高维, 具有较好的反假频能力。同时 Zwartjes 和 Sacchi (2007) 也提出了基于傅里叶变换的非均匀假频地震数据重建方法, 该方法主要采用无假频的低频信息来重建有假频的高频信息, 达到压制假频和恢复缺失道数

据的目的,但当低频信息也具有假频时,该重建方法就会失效。为了进一步利用四维空间信息, Jin (2010) 提出基于阻尼最小范数傅里叶反演下的五维地震数据重建,该方法引入非均匀傅里叶变换方法 (Kunis, 2006; Keiner *et al.*, 2009), 能够重建空间非均匀采样下的不规则缺失地震数据,重建精度高,应用范围较为广泛,但该方法抗假频能力不强。五维地震数据重建方法计算速度较慢,为了加快计算效率, Whiteside 等 (2014) 提出一种谱模式去除方法进行加快速度。同时 Yang 等 (2015) 提出了用快速傅里叶反演策略代替非均匀快速傅里叶变换,采用预条件共轭梯度法来求解最优化问题,从而提高了五维重建方法的效率。尽管如此,以上方法都采用傅里叶变换作为稀疏基,并没有采用曲波变换,而傅里叶变换作为全局变换,只适合近似线性同相轴地震数据或者平稳变化的地震信号。如果不满足这种假设条件,只能对大规模数据体采用分时空窗口的方式进行重建,但是窗口重叠部分重建效果仍然不佳,因此需要采用其他更为优越的稀疏基来解决该问题。

曲波变换能够表征信号的局部细节特征,可以有效地重建非线性同相轴地震数据 (Candès *et al.*, 2006; Herrmann *et al.*, 2007; Ma and Plonka, 2010), 大量研究结果也证明,基于曲波变换的数据重建方法效果显著 (Hennenfent and Herrmann, 2008; Naghizadeh and Sacchi, 2010b; Zhang *et al.*, 2015)。尽管如此,以往基于曲波变换的重建方法应用前提条件仍然是空间均匀采样。而对于空间非均匀采样信号, Hennenfent 等 (2010) 提出了基于二维非均匀曲波变换的数据重建方法,重建的结果也表明该方法效果显著,重建剪度高,但是该方法主要针对二维非均匀地震数据,并没有对三维非均匀地震数据重建进行研究,并且采用的谱梯度算法收敛速度慢 (Ewout and Friedlander, 2008), 参数较多,其重建精度依赖于叠加次数,在工业大数据重建计算中执行困难 (Herrmann *et al.*, 2015)。因此,本书拟提出高效率的线性 Bregman 算法进行重建 (Yin, 2010; Lorenz *et al.*, 2013)。并且为了进一步提高重建精度,将其推广到高维非均匀数据重建,充分利用其他空间已知信息,更好地解决实际数据采集过程中所遇到的采样不足或者采样不均匀等问题。

国内在地震数据重建方面的研究相对较晚,国九英等 (1996) 在频率波数域进行了等道距插值,李冰等 (2002) 提出采用 Laplacian 算子进行光滑约束插值方法,实现了三维地震数据重建。刘喜武等 (2004)、张红梅和刘洪 (2006) 采用 τ - p 变换进行地震数据重建。王维红等 (2007)、王升超等 (2016) 采用加权抛物 Radon 变换方法实现了地震数据重建,但只适应于近偏移距和中偏移距。针对非均匀地震数据重建,孟小红等 (2008) 进行了地震数据重建方面的研究,并且采用傅里叶变换方法,引入最小二乘预条件共轭梯度算法,实现空间均匀和非均匀地震数据重建技术,并且提出了抗假频措施。李信富和李小凡 (2008) 提出分形插值的方法实现了地震数据重建,突出了地震道数据的局部信息,较好地保持了地震数据的总体变化趋势,随后高建军等 (2009, 2011) 在傅里叶变换域采用共轭梯度反演算法,实现了空间非均匀采样的二维和三维地震数据重建技术,张华等 (2012) 采用凸集投影 (POCS) 算法,实现了五维地震数据重建方法,但不具有反假频能力,而陆艳洪等 (2012) 提出了一种基于边缘保持滤波器的地震数据插值方法,该方法具有较好的抗假频能力。石颖等 (2013)、黄小刚等 (2014) 对反假频地震数据重建进行了

研究。刘财等(2013)采用 Seislet 变换实现了地震数据的重建。刘强等(2014)对噪声压制和数据重建的同步处理进行了研究。为了系统研究各种数据重建方法的效果,梁东辉(2015)采用傅里叶变换方法,比较了各种均匀和非均匀数据重建方法效果。周亚同等(2015)提出了一种基于高阶扩散快速行进法进行数据重建。随后冯飞等(2016)、张良等(2017)提出了采用 Shearlet 变换稀疏约束地震数据重建,马继涛等(2016)提出了频率域奇异值分解的地震数据同时插值和去噪方法,王亮亮等(2017)提出了快速 3D 抛物 Radon 变换地震数据保幅重建,都取得了一定的效果。尽管如此,上述所提到的有些方法虽然解决了空间非均匀网格采样的不规则缺失道重建问题,但没有给出较好的反假频方法,并且多数限于二维和三维地震数据重建,重建精度较低,而有些方法虽然较好地解决了假频问题,却不能解决空间非均匀网格采样数据重建问题,对噪声压制的能力也有限。

而在曲波变换方法方面,张素芳等(2006)在简单模型上实现了基于 Curvelet 变换的多次波消除。包乾宗等(2007)利用 Curvelet 变换分离了垂直地震剖面(VSP)剖面中的上行波和下行波,取得了不错的效果。彭才等(2008)提出一种基于 Curvelet 变换的地震数据去噪方法,通过对 Curvelet 系数做简单的阈值处理,即可实现随机噪声的去除。刘国昌等(2011)采用曲波变换的方法实现了二维地震数据的重建,取得了较好的效果。马坚伟(2009)、仝中飞(2010)、唐刚和杨慧珠(2010)应用曲波变换的方法,采用阈值迭代法,实现随机采样及其他采样方式下的二维和三维地震数据重建技术。为了采用其他算法进行重建,唐刚(2010)、曹静杰等(2012)实现了基于曲波变换的投影梯度算法数据重建技术。张华和陈小宏(2013)采用 POCS 算法并提出新的阈值参数,实现了三维地震数据重建方法。同时,徐明华等(2013)基于压缩采样理论,采用谱梯度投影实现了缺失地震数据重构方法,然而该方法计算时间较慢,限制了进一步应用。白兰淑等(2014)基于压缩感知理论在曲波域采用联合迭代法对数据进行重建,快速地恢复了缺失道信息。为了在数据重建的同时对噪声进行压制,曹静杰和王本锋(2015)采用 POCS 方法实现了同时插值和去噪,并提出分段采样方式,都取得了较好的效果,明显优于其他稀疏变换方法,但也仅仅研究二维地震数据的重建。而后张华等(2017a)实现了基于 POCS 算法和曲波变换的三维地震数据同时重建和噪声压制。尽管如此,这些方法尽管精度高,但计算速度还是较慢,与国外相关研究有一定差距。

1.4 发展趋势

分析国内外研究现状会发现,目前数据重建的方法已经发展到了五维,并且已经实现了工业应用,尽管如此,大部分重建方法仍然集中于傅里叶变换下进行,或者采用降秩处理方法,计算效率和重建精度有待进一步提高。但衡量一种方法的优劣还应该考虑以下因素,第一是反假频能力,目前数据采集时由于受到勘探成本制约,采集得到的数据较为稀疏,大多数数据都存在一定程度的空间假频干扰,因此空间假频也是检验一种算法的一个关键因素;第二是抗噪声干扰能力,从更广泛的观点来看,数据重建方法可以被认为是噪声消除的过程,如果原始数据中存在随机噪声或相干噪声,将进一步使重建方法变得复杂;第三是同相轴的曲率,由于大部分地震信号是非线性信号,而如果采用傅里叶变换方

法进行处理,必须采用时空窗的方式逐步重建,因此需要能够表征非线性同相轴特征的稀疏变换;第四是延伸的维数,如果一个多维数据在其中的一个空间维数据采样不足(含有假频),重建算法可以依靠在其他维空间的适当采样来完整地重建出缺失道数据。因此,本书给出的重建方法主要从这四个方面进行论述。

从国内外研究状况可知,目前基于均匀采样下的地震缺失道重建方法研究比较广泛,而对于非均匀采样下的地震数据重建方法则研究较少,并且也只是采用傅里叶变换作为稀疏基;但傅里叶变换作为全局变换,只适合同相轴近似线性或者平稳变化的地震信号,尽管运行速度较快,但重建精度不高,特别是面对采样间距较大的情况下,缺失道不能够有效地恢复。大量研究结果也表明,基于曲波变换的数据重建方法精度高、效果显著。尽管如此,以往基于曲波变换的重建方法前提条件是空间均匀采样,因为根据曲波变换的实现过程可知,常规曲波变换在计算过程中首先要应用傅里叶变换,而傅里叶变换的前提条件是空间均匀采样,从而导致以往曲波变换只能处理均匀采样信号或者只能处理空间均匀采样下的地震缺失道重建问题,而对于空间非均匀采样下的缺失道地震数据则不能直接重建,限制了该方法在不同信号处理领域中的进一步应用。因此迫切需要提出非均匀曲波变换理论并将其应用到非均匀地震数据重建领域中,使该方法既能重建非均匀采样下的地震缺失道,也能重建均匀网格采样下的地震缺失道,并且能够推广到高维,进一步提高数据重建的精度。同时由于野外采集到的地震数据常常受到高频随机噪声干扰的影响,降低了地震记录的信噪比,影响到数据重建方法的效果,而现有的噪声压制方法与数据重建方法仍然都是单独分开进行处理,缺少能够同时进行地震数据重建和噪声压制的方法,因此也需要提出同时进行数据重建与噪声压制的方法或者有效的抗噪声数据重建方法。

第2章 地震数据重建理论基础

2.1 地震数据重建方法原理

2.1.1 传统采样定理

由于带限信号受到采样定理的限制，采样频率必须大于信号最高频率的2倍，即

$$f_T \geq 2f_{T\max}, \text{ 或 } \frac{1}{\Delta t} \geq 2f_{T\max} \quad (2.1)$$

式中， $f_{T\max}$ 为带限信号的最大频率； f_T 为信号的采样频率。

同时，空间域采样波数也必须满足以下条件：

$$f_S \geq 2f_{S\max}, \text{ 或 } \frac{1}{\Delta x} \geq 2f_{S\max} \quad (2.2)$$

式中， $f_{S\max}$ 为原始信号的最大波数； f_S 为空间域信号的采样波数。

因此，若要减少空间假频，最直接的办法就是在野外加密炮点和检波点，降低采样间隔，然而由此导致采集的工作量和勘探成本也会相应增加，降低了工作效率，况且由于野外复杂环境的影响，往往加密地震采样道付出的勘探成本太大。因此这种情况下，可以转变思路，主动缺失地震道，重新设计采样道距和采样道数，既不能影响到施工效率和原始数据质量，也要考虑到在一定误差范围内，可以通过后续高精度重建算法恢复出所缺失的地震道。

2.1.2 重建理论基础

地震数据重建，是在较粗糙采样网格上重建出较精细采样网格数据，在假设地下介质为连续性和可预测性的基础上，在已有的地震道采样间隔内，通过一定的策略和算法主动插值所需要地震道的方法。而实际上，地下各种介质在局部区域多为连续性，很少发生突变现象，因此可以根据已有的数据信息，预测出未知的信息。在野外地震勘探数据采集，由于信号处理中有限性特点，也需要对连续变化的地下介质进行离散采样，而后通过计算机处理使其反映出连续变化的地震波场特征，从而精确地了解地下地层变化情况。然而由于野外条件的限制，不可能获得所有需要的离散化数据采样点，从而存在数据道缺失问题，而缺失的地震道也是在基于地震道之间存在连续性和可预测性的基础上，通过一定的重建方法和手段来进行预测估计，在已有的地震道基础上恢复出采样网格更精细的地震数据体，以满足后续处理的需要，如地震子波估计、多次波消除、速度分析、偏移归位、

时移地震可重复性处理、不同面元资料的融合等。由此可知，能否成功重建出更密的地震数据主要取决于重建算法的效率与精度，这也直接推动了地震勘探重建技术向前发展的方向。目前，常见的地震数据重建方法主要有四类，第一类是基于滤波器方法，第二类是基于波场算子方法，第三类是基于快速降秩方法，第四类是基于数学变换方法。这些方法都有各自的局限性和优点，很难直接回答哪种方法较好，但对于本书来讲，主要采用数学变换方法进行数据重建，然而数学变换方法也较多，在实际处理过程中也产生了较多的重建算法，每种算法都有各自的优缺点。本书重点研究内容主要是利用压缩采样理论，在傅里叶变换的基础上，采用常规曲波变换和非均匀曲波变换，探索一种有效的数据压缩和重建方法，并且与其他重建算法进行对比，在保证重建质量的情况下提高运算速度，使其能够较好地应用到工业生产中去，以解决目前复杂地区数据采集所面临的问题。

2.2 压缩采样理论

2.2.1 概述

随着社会的发展，以带宽有限为基础的信号处理框架要求的采样速率也越来越高，导致采集的硬件设备也面临较大压力。从某种意义上讲，以信号带宽为基础的采样定理有时候并不是最佳的。然而，由于信号在具有带宽特性的基础上也具有一定的稀疏性，基于此，Donoho (2004) 系统地提出压缩采样理论的信号采样方式，之后 Candès (2006) 将其进一步发展，打破了常规尼奎斯特-香农 (Nyquist-Shannon) 采样定理的限制，即在不满足尼奎斯特-香农采样定理的条件下，只需极少的采样点数，同时满足一定的前提条件，仍然可以较好地恢复出原始完整信号。

压缩采样理论指出，当信号满足稀疏条件或者在某个数学变换域是稀疏的，那么就可以用一个与稀疏基不相干的测量矩阵对信号进行采样，利用较少的采样点通过高精度的算法不断优化重建，就可以从较少的采样点中高精度地恢复出原始信号。由此可见，在压缩采样理论框架中，信号的采样速率可以大幅度提高，同时又可以不断地压缩数据，降低野外地震数据采集和储存的成本，从而将该成本转移到室内信号重建中来 (卢雁等, 2012; 宋维琪、吴彩端, 2017)。从理论上讲，只要能找到合适的稀疏表示方式，任何信号都可以进行有效地压缩重建。

2.2.2 核心问题

1) 信号的稀疏表示

假设有一维信号 f ($f \in \mathbf{R}^N$)，长度为 N ，如果是高维数据，则可以通过将其向量化得到这样的一维向量，假设该信号在稀疏基 (如傅里叶变换) ψ 上可以稀疏表示，即