

56.292

地震勘探数字技术

第一册

科学出版社

内 容 简 介

地震勘探是石油勘探的主要方法,为了更精确地处理地震勘探资料,必须采用数字技术。本书第一册介绍有关数字技术的数学基础,如富里叶变换、复变函数、概率论等。第二册将介绍滤波技术,第三册将介绍有关讯息提取、讯息分析及建立地下地质模型等内容,第四册将介绍数字处理软设备、某些地震勘探数字处理新技术和展望等内容。

本书可作为大专院校师生和地震勘探及数字处理工作者参考用。

地 震 勘 探 数 字 技 术

第 一 册

燃料化学工业部石油地球物理勘探局计算中心站
北 京 大 学 数 学 力 学 系 编
成 都 地 质 学 院 物 探 系
华 东 石 油 学 院 勘 探 系

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1973 年 10 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1974 年 11 月 第 二 次 印 刷 印张: 12 1/2

印数: 8,001—15,040 字数: 285,000

统一书号: 13031·144

本社书号: 263·13—1

定 价: 1.30 元

序

在毛主席的无产阶级革命路线指引下,我国的社会主义革命和社会主义建设正在出现一个新的高潮。我国的石油勘探和工农业其他战线一样,正在蓬勃地向前发展。

地震勘探数字技术是近十几年来出现的一项先进技术,是地震勘探发展的方向。我国广大石油工人和革命技术人员遵照伟大领袖毛主席关于“我们必须打破常规,尽量采用先进技术,在一个不太长的历史时期内,把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国”的教导,发扬“自力更生,艰苦奋斗”的革命精神,使我国地震勘探数字技术飞速地向前发展。

为了适应我国石油勘探蓬勃发展的需要,促进地震勘探数字技术的进一步发展,我们编写了这本书,以供从事地震勘探及数字处理工作的有关同志参考。

本书共分四册。第一册为数字处理数学基础,介绍了地震勘探数字处理必要的数学基础知识。其中,除第八章到第十章有关计算数学部分主要供从事程序工作的同志参考外,其余各章可供方法和程序方面的同志共同参考;第二册为数字滤波技术,介绍有关数字滤波和相关分析等改善讯息的基础数字处理方法;第三、四册叙述有关讯息提取、讯息分析及建立地下地质模型、数字处理软设备等内容。

由于地震勘探数字技术涉及的知识面较广,本书仅着重介绍地震勘探数字处理的方法原理。至于有关电子计算机及程序设计知识请参阅有关文献。为节省篇幅,除十分必要,将不专门叙述地震勘探的基础知识和模拟磁带地震的方法。

本书是由燃料化学工业部石油地球物理勘探局计算中心站、北京大学数学力学系、成都地质学院物探系和华东石油学院勘探系共同编写的。

由于我们对马列的书和毛主席著作学习不够，知识水平有限，实践经验尚少，而编写时间又很仓促，因此，书中一定会存在不少缺点和错误。我们恳切地希望同志们提出批评和指正。

在编写过程中，得到中华人民共和国国家计划委员会地质局、湖北地质学院和燃料化学工业部其他有关单位的大力协助，在此特致以深切的谢意。

一九七二年十二月二十六日

目 录

绪 论	1
第一章 富里叶级数	12
§ 1. 引言	12
§ 2. 正弦波及其合成	12
§ 3. 复数表示法	14
§ 4. 正交函数系	18
§ 5. 富里叶级数的引进和举例	25
§ 6. 巴什瓦等式和平方逼近	35
第二章 富里叶变换	39
§ 1. 富里叶变换的引进和举例	39
§ 2. 富里叶变换的几个基本性质	46
§ 3. 褶积	49
§ 4. 离散富里叶变换	52
§ 5. 脉冲函数	56
附录 拉普拉斯变换	58
第三章 二维富里叶级数和二维富里叶变换	67
§ 1. 引言	67
§ 2. 二维富里叶级数	68
§ 3. 二维富里叶变换	69

§ 4. 褶积	70
第四章 频谱分析	72
§ 1. 频谱	72
§ 2. 谱密度	76
§ 3. 抽样定理	79
§ 4. 时间序列的频谱	82
第五章 复变函数	86
§ 1. 引论	86
§ 2. 分式线性函数	90
§ 3. 解析函数	95
§ 4. 复变函数的积分	102
§ 5. 哥西定理和哥西公式	104
§ 6. 台劳级数和罗朗级数	111
§ 7. z -变换	120
§ 8. 回路积分与留数计算	126
第六章 极值问题和优选法	138
§ 1. 函数的极值	138
§ 2. 最小二乘法	143
§ 3. 优选法	146
§ 4. 变分法	151
§ 5. 在一种不均匀介质中的射线问题	159
第七章 矩阵	164
§ 1. 矩阵及其运算	164
§ 2. 逆矩阵	171
§ 3. 矩阵的转置	176

§ 4. 矩阵的秩	180
§ 5. 矩阵的特征值与特征向量	182
第八章 线性代数方程组解法和高次方程的缪勒求根法	192
§ 1. 主元素消去法(高斯消去法)	192
§ 2. 简单迭代法	196
§ 3. 赛得尔迭代法	199
§ 4. 托布里兹矩阵求逆	201
§ 5. 实系数多项式求根的缪勒方法	208
附录 克莱姆法则	216
第九章 离散域上的正交多项式及函数最佳逼近的若干方法	219
§ 1. 引言	219
§ 2. 契比雪夫多项式	220
§ 3. 离散域上的函数逼近	228
第十章 数据处理中几种提高计算速度的方法	237
§ 1. 快速富里叶变换	237
§ 2. 矩阵的分解	249
§ 3. 沃希函数	257
第十一章 概率论	269
§ 1. 随机事件和概率	269
§ 2. 概率的性质	274
§ 3. 随机变量及其分布	283
§ 4. 几种常用的概率分布	289
§ 5. 多维随机变量	294

§ 6. 随机变量的数字特征——数学期望和方差	304
§ 7. 随机变量函数的分布函数和数字特征	311
§ 8. 大数定理和中心极限定理	322
第十二章 数理统计	329
§ 1. 样本、小概率原理	329
§ 2. 参数估计	332
§ 3. 假设检验	344
§ 4. 方差分析	349
§ 5. 回归分析	355
第十三章 随机过程	360
§ 1. 随机过程的概率分布和统计参数	360
§ 2. 随机过程的滤波、能谱和功率谱、遍历性	366
§ 3. 平稳随机过程	374
§ 4. 多维随机过程	384

绪 论¹⁾

一

地震勘探是石油与天然气勘探的重要手段。根据地震勘探与其它地球物理资料,可以判断地下岩层的地质产状及岩石的物理性质,并为钻探提供井位。

建国以来,我国石油地震勘探事业,在毛主席的革命路线指引下,得到了巨大的发展。但是,随着我国社会主义建设对石油及天然气需要的不断增长,勘探任务越来越大,加上测区地质地球物理条件越来越复杂,现有地震勘探水平,还不能满足要求。因此,迫切需要“打破常规,尽量采用先进技术”,实现地震勘探数字化。恩格斯说:“**社会方面一旦发生了技术上的需要,则这种需要就会比十数个大学更加把科学推向前进。**”可以预料,我国地震勘探数字化进程,将以非常可观的速度向前发展。

地震勘探的发展进程,大致可以分为三个阶段:即光点记录,人工资料整理;模拟磁带记录,基地回放半自动整理;数字磁带记录,并用数字计算机进行灵活性大、精确度高、分辨率强,表达形式多样化的自动化处理。

近年来由于数字计算机的广泛应用,地震勘探的数字处理技术,已取得很大的进展。在速度参数方面,速度分析与静

1) 这篇绪论,目的是对地震数字技术作一概括的介绍,内容比较广泛,初次阅读时,只要求了解大概说些什么就行了。绪论中不少内容,有待于在阅读全书后,结合实际工作,进行讨论,批评和分析。

校正的研究,正向更高精度要求进展。应用通讯理论处理地震资料的研究,应用概率论等方法建立地下模型的研究,以及应用绕射理论的新成象技术的研究,均已取得显著的成就。

在六十年代早、中期,由于数字计算机的引进,地震资料的处理与分析,已由广泛流行的单纯地对于讯号的改善移向自动地提取并分析反射讯息以及建立地下模型。最近几年在成象过程中,发展了新的直接的所谓数字偏移技术。数字处理研究的重点,还有向新的成象技术转移的趋势。彩色地震剖面以及立体构造图的出现,为地震数字处理增添了新的内容。这对于岩石吸收性质的研究,以及在断层推断解释方面,均有新的启示。目前这些方面虽还处于初级阶段,由于它的独特的直观性能,前途是大有希望的。

在探索解释工作自动化方面,借助于记忆监视系统,人机联作系统等软、硬设备,地质解释人员,已能较满意地联机工作,评价、检验资料,并修改各种假设。机器对解释人员发出的审查,已能适时响应。并且还可用已知资料为准则,自动求出最佳处理参数,从而在一定程度上避免了数字处理过程中可能发生的弊端。

为适应数字处理与分析的需要,野外施工方法上也发生了相应的变化,主要是用更大的排列,更多的记录道数,更高次的迭加,以及宽线地震法和三维面积勘测。目的是取得更精确的速度和静校正估量值,改善记录剖面的讯噪比,获得更深层的资料。三维地震面积勘探,有利于侧面能量的空间归位,在方法上没有多次覆盖那样严格的条件。对复杂地形和地质区域有一定的适应性,加上新的成象技术的进展,现正充满着活力。在接收装置方面,将有更多的 48 道系统投入使用,最大排列长度可达 4800 米,但进一步增大,将受到勘探深度以及处理和解释大倾角反射资料能力的限制。

二

地震资料的数字处理,大体上沿着三个系统发展。进展的重点由数字处理初期盛行的讯息改善系统,移向自动讯息提取、分析系统。近来对新的成象技术系统的研究,受到普遍的注意,是一个很重要的趋势。

地震法可以被看成是一个特殊的以地层为传输讯道的通讯系统,因此可以广泛引用通讯理论以解决有关地震讯息的改善和提取问题。然而在地震法和通讯系统之间还有本质上的差异。一般通讯系统都具有一个共同的特点,即一个已知讯号发射后,一般均能从接收到的包含干扰的讯息中,知道期望讯号的全部参数。而在地震法中,送入地下的是一个宽频带尖脉冲讯号,由于地层的吸收这个讯号的高频部分就发生衰减,以致接收到的讯号形状与发射讯号之间已很少相似。不仅如此,发射讯号在地震法中往往不是可控的,而且在一般情况下,发射的讯号也不是已知的。由于这些原因,地震法就不能从接收到的讯号中,预先知道那一个是需要的讯号。为此,必须根据地震波在地下传播的特殊情况,研究出一套特殊的地震讯息改善与自动提取的数理统计方法。所以,地震数字处理方法中,通常都以很大的篇幅研究地震子波的提取,以及应用预测分解或相关分析的估算方法,求取期望讯息。

讯息改善系统,包括一维、二维数字滤波,最佳滤波,反鸣震与反褶积滤波,以及共深度点迭加等。方法的效果是产生一个地下界面图形的时间剖面图。这种图形的优点是处理速度快,并能客观地使解释人员得到地下产状的概念。缺点是它不能充分发挥地震方法的全部潜力。然而,讯号改善是数字处理的基本手段,同时,时间剖面仍为解释的重要依据,所以,在讯号改善领域,近来也不断发展。

在反褶积过程方面,主要是研究提高反射层的分辨率,所研究内容包括:自适应或变时的,多道与非白噪声的,以及自动提取反褶积因子或其他方面的反褶积过程。预测理论在反褶积过程中的应用,提高了反褶积处理的实用价值。

在门式滤波方面,锐截止门的研究已比较成熟,研究的重点已移向自动求取最佳权函数。方法是多样化的,如利用讯息的自、互相关谱,计算反射讯号的讯噪比,从而用扫描的方法自动选择最佳权函数,这样就把最佳滤波的理论应用于门式滤波权函数的选择。这些方法在一定程度上解决了求期望讯息的困难问题。

在最佳滤波方面有不少发展,运用多次覆盖资料中地震子波重复出现的统计性质以及讯息频谱的基本差异,从而区分讯号与干扰,达到自动提取期望讯息的目的。所谓地震维纳滤波器,其基本概念认为在不同的地震道上,我们要提取的有效子波与要压制的干扰子波都是大致不变的,都是可以用讯号与干扰的功率谱表示出来的,而这些谱又是可以统计估算的。这种滤波器的本身可以随着地震记录时间段的不同而加以改变,这样便能在一定程度上,把讯号与干扰的非平稳性考虑进去。

多道滤波在理论上并不比单道滤波复杂。问题是:一方面多道滤波的运算工作量大,占贮存量多,但处理效果不比一般迭加剖面好多少;另一方面,次数较高的多次覆盖已能显著提高讯噪比,因而降低了对最佳处理的需要。所以,多道滤波尚未得到广泛的重视。但在一般低次数迭加地区,以及某些干扰地区,普通迭加不能提供高质量的资料,因此,人们仍将在多道滤波这个领域里不断努力,进行研究。

时空域滤波对于消除高速规则干扰,具有特殊的作用。它在干扰已定性的情况下,对清除干扰保存有用讯息,具有显著

的成效。但是,在复杂地质条件下,几组波往往同时在记录上出现。在这种讯号与干扰真假难辨的情况下,我们应用时、空域二维滤波应慎重进行。尽管如此,由于它具有独特的作用,仍处于发展阶段。

在共深度点迭加领域,对于应用最佳权系数和滤波方法以改善迭加讯噪比,在国外仍受到应有的重视。最近在改进迭加剖面质量方面,方法是多种多样的。主要的是采用对每一个共深度点迭加段均进行速度扫描分析,在共深度点迭加过程中,根据给定的速度组,自动扫描选择最佳速度迭加。这种所谓自适应最佳扫描速度迭加方法,已证明可以大幅度提高迭加剖面质量。在多次波特强地区,一般共深度点迭加剖面尚不能有效消除,在这种情况下,采用所谓多次波迭强减法,即先用突出多次波的迭加方法,得到所谓强多次波剖面,然后从迭加剖面中减去强多次波剖面,这样,就能对于多次波予以有效的消除。为了使参与迭加的道充分发挥作用,可以采用自适应道均衡加权迭加,即对不同炮检点的共深度点道,以及同一道的不同到达波,采用振幅均方根值等方法加权,以平衡记录道振幅的悬殊,改进迭加讯噪比。水平迭加与垂直迭加可以联合应用,以提高共深度点迭加次数,例如用十二次水平迭加,四次垂直迭加,就可以组成四十八次共深度点迭加。这种多样化高次数共深度点迭加的方法,在激发次数不同而干扰背景显著变化时,是有成效的。这些对共深度点迭加所作的重要改进,使它在一般平缓地层区,仍为基本的数字处理方法。

讯息自动提取系统,包括沿测线自动提取反射到达时,反射波正常时差及均方根速度,反射波的振幅、波形、波组、频谱特征。经过适当的分析,这些资料可以用作计算层速度,以研究岩层变化,判断砂页岩比值,鉴定礁块,估算岩层孔隙率,在

有利条件下,还可推断油、气、水界面等;还可建立三维地层模型,以研究沉积层密度与地层尖灭,薄层系列等;以及建立三维地下构造模型,等等。

沿测线连续自动提取反射到达时,主要借助于自动检测与层位对比,即在一维或二维检测振幅极值。一维方法简便易行,但不适合于复杂的构造与低讯噪区,对非标准层次,一般不能合适地检测。二维方法是在时间、正常时差域,或时间倾角域,用时移迭加的方法来扫描反射道集,并用求极值的方法确定振幅极值。时间、正常时差法的优点,可以在检测的同时,自动求取速度资料。时间、倾角域法的优点,在于检测的同时提高了讯噪比,且可分解倾角干涉,有利于复杂地质区的检测。用概率方法进行自动检测的办法,首先是根据能量、频率、反射特征以及同相轴的准则,将地震讯号分解为多维参变量;然后进行统计分析,求取反射信息。概率检测法运用了波的动力学特点,有利于迭加干涉区的检测。三维检测正在发展,方法兼备上述优点。即由一组相加输出道组成,每组都有不同的正常时差与倾角参数,它们取自几个相邻深度点的未迭加过的记录道集,在这个空间里检测振幅极值,同时取得一个波的到达时振幅、正常时差与倾角的估值,将其与相邻估值对比,即所求反射段。由于方法的运算工作量很大,要用与此适应的快速,大容量计算机。这种方法还提供了更多的地下资料,具有以前的方法所难达到的时空分辨率。所建立的地下模型,在数字处理中,是一项重大的技术发展。

利用真振幅值求取反射系数讯息,与层速度、衰减系数配合起来,可以推算沉积层密度,还可作出反射系数、衰减系数、真振幅值、层速度值以及地下返回能量的等值线图,以利地下层位的对比、断层的判定,以及三维地下模型的解释。

自动层位对比是建立地下模型的重要手段。方法是根据

层位中断区二侧正常区的大量已知讯息,包括反射的能量、性质与频率,以及关于层位连续性的准则,运用数理统计方法,以判断二侧相应层位的关系。进一步,还可应用多元分析与相关检查的办法,辅助最优化断层判断。至于断层性质及参数的判别,有赖于断区异常波的空间归位,这是我们面临的更重要更有意义的课题。

讯息提取系统虽已取得几种效果,但期望实现全盘的自动解释,为时尚早。然而与单纯的讯息改善系统相比,除了运算工作量将急剧上升外,可以预见,沿着自动讯息提取系统发展,将比沿着传统的时间剖面发展要快得多。虽然自动讯息提取还处于发展的中途,但发展方向比较明确。由于讯息自动提取通常以讯息改善为基础,所以时间剖面也有它独特之处。总之,两大系统将同时相应发展。

近几年来,发现了新的成象技术,这就是二维、三维偏移迭加,或叫数字偏移、脉冲全息图、总体偏移等。处理的实质是将地面得到的地震记录或波场强度转变为地下反射体或散射体的象。广泛流行的共深度点迭加,是一种在镜面反射的假设之下所进行的成象过程。这种方法,只适用于平缓地层。地质结构越复杂,共深度点迭加成象的质量就越低。当地震波场主要是由绕射能量构成时,成象即被破坏。偏移迭加的出现,就是为了克服这种缺陷,使得在复杂的地质情况下,能够提供反射面或散射体的二维或三维地震映象。可以说,偏移迭加的方法在实现迭加的时候已经体现了偏移,从而直接获得记录讯息的空间归位,这和一般时间剖面在迭加后再进行偏移是很不相同的。偏移迭加和共深度点的迭加偏移相比较,讯噪比改善了,而又不损害对断层的分辨率,因而有利于检测与判断若干错动的断层。但是偏移迭加由于野外资料的限制,只能在二维范围内实现,而能量返回地面却是三维的,

所以还存在侧面能量归位问题。因此,在三维全息地震资料未成为野外基本方法之前,偏移迭加只能作为共深度点迭加的一个重要补充。虽然三维偏移迭加还处于发展初期,但由于它本身的特点,未来的成就是可以预见的。

参数估计的可靠程度,是数字处理的关键。现代的速度分析——包括速度谱、速度扫描、垂向与横向的速度场分析,等等——几乎在每一个点均进行,因此,可沿着反射层在空间连续对比速度资料。高精度的速度分析可以显著改善迭加剖面的质量,有效地减去多次波,从而提高一次波的分辨率。更重要的是,高精度的速度分析还可提供岩性与油气界面的研究资料。正是由于这些缘故,速度分析的研究,一直在进行。研究地下地层模型的细节,所要求的均方根速度的精度,高达0.1%,比一般最佳迭加速度高一个数量级。由此可见,速度分析的精度,决定了数字处理的水平,所以当前在速度分析方面,主要目标是研究速度精度的提高及其误差来源问题。

在自动静校正方面,主要是利用多次覆盖资料的重复性,在不知道表层结构参数时,提取炮检点的静校正估量值。方法是利用共深度点组内道间时差,利用同炮、检距各道间的时差,以及利用同炮点异检点与同检点异炮点各道间的时差。这些时差既可以分别应用,也可以联合应用。但是,这种方法只有在讯噪比高、表层变化为随机过程时,才能生效。对于缓慢起伏的表层条件,必须另行考虑控制点校正。当记录讯噪比低、风化层很厚,以及潜水面深度变化时,一般静校正法均难适应。看来解决适应多种表层条件的校正问题,还有待于进一步研究。

三

地震资料的数字处理,就基础理论方面而言,在五十年代

就已有适用的理论提出了。但是在地震勘探方面, 数据处理的实现, 直到六十年代中期才初步形成。此后, 为了使物探资料的数字处理成为经济可行, 研究了相应的计算方法与专用设施。在计算方法方面, 快速富里叶变换的出现大大减少了原来的繁琐的计算。在递归滤波方面也有了相应的更新, 为使时空二维滤波成为可行, 设计了新型的二维多段分析解法, 等等。

地震数字处理系统, 计算速度是很重要的, 数字处理技术能否实现, 决定于计算方法是否切实可行。但是, 单靠计算方法提高速度是受局限的。还必须有相应的专用软设备与专用设施。

实现地震资料数字处理, 必须首先对地震勘探中要解决的工程问题, 建成相应的物理模型。物理模型的好坏, 决定数字处理的成败。但要实现物理模型, 还必须化为相应的数学模型, 并制定相应的数学方法, 才能在计算机上实现地震资料处理。为此, 在研究建立物理模型的同时, 必须解决数字处理中的基本数学方法问题, 包括函数论、概率论、计算方法、微分方程等。为此, 在讨论数字处理之前, 以相当的篇幅讨论基本数学方法与概率方法。为通讯理论的数学方法与概率方法在地震数字处理中的应用, 奠定必要的基础。这就是本书第一册的目的。

各种数字滤波与自动检测、层位对比的数学模型, 涉及面很广。本书第二册只讨论其中关于数字滤波数学模型的基本原理, 所依据的假定, 一般均为较理想的条件。在自动层位对比以及新的成象技术方面的数学模型, 还涉及物理模型的建立问题, 将在本书第三册以足够的篇幅, 予以讨论。

数学模型以及相应的数学方法, 在计算机上以最高速度合理运转, 有赖于通用、专用软设备的组成与实现。所谓专用