

全国地球物理勘探学术报告之一

地震资料数字处理的进展与展望

——兼论地震讯息的利用

报 告 人：范祯祥

参加写作人：郑仙种 郑玉瑩 金孟哲 周兴元

查中圻 徐忠范 钱 新 梁茂贵

中国地震局地球物理研究所图书馆

顾功叙 遗赠

专家赠书/刊纪念

石油工业部石油地球物理勘探局

一九七八年十一月

地震资料数字处理的进展与展望

——兼论地震讯息的利用

目 录

一、引论	1
二、地震数字处理的数学模型及其进展	11
提高讯噪比的处理	12
数字频率滤波	12
去假频问题	15
离散卡而曼滤波	16
递归维纳滤波	21
提高分辨率的处理	23
脉冲整形反褶积	24
气枪反褶积	25
频率域反褶积	26
同态反褶积	27
三、地震波动力学讯息的研究与利用	37
反射波振幅讯息的研究	37
反射波振幅讯息的影响因素	39
波前扩散	39
地层吸收	43
散射	45

中间界面的透射·····	45
反射界面特征·····	46
地震波吸收系数讯息·····	47
地震波的频谱分析·····	48
瞬时相位和瞬时频率·····	48
平均加权频率·····	54
最大熵谱分析与自回归分析·····	55
高保真处理·····	62
四、反射界面声阻抗讯息的研究与利用·····	64
声阻抗曲线的转换技术·····	65
数学模型·····	65
地层反褶积·····	68
速度的低频成分·····	68
构造反褶积与地震记录的反演·····	69
声阻抗曲线迭代法计算·····	73
五、岩性异常与岩层物理组成比例的统计分析·····	78
利用速度讯息估算岩层物性组成比例·····	78
利用反射波形讯息圈闭岩性异常·····	80
六、井下参数合成分析的数学模型·····	87
应用声波测井的合成分析·····	88
深时转换(重采样)·····	88
脉冲响应函数 $\xi(t)$ 的求取·····	89
应用视电阻率曲线$r(H)$求取$\xi(t)$的数学方法·····	94
地震子波模型·····	96
具有混合相位特征的广义子波·····	96
具有最小相位特征的广义子波·····	96

合成记录.....	97
实例评介.....	97
七、波动方程归位数学模型及其进展.....	103
波动方程偏移有限差分法.....	104
波动方程的推导.....	104
波动方程偏移差分法原理.....	106
差分方程的建立及其解法.....	108
程序实现中值得注意的问题.....	118
频率波数域波动方程偏移.....	118
有限差分法的推广.....	118
波数域偏移归位.....	120
F—K空间的偏移.....	123
迭加前的偏移.....	124
三维偏移问题.....	125
参考文献.....	126
附图.....	127

一、引 论

六十年代早期,勘探地震学引进了通讯、讯息、计算机科学领域的先进成就,促使地震技术向数字化方向发展。进展的主要方面,是发展了数字处理技术,以及提高讯息采集的质量。

地震讯息采集的质量,主要体现在利用反射讯息重复出现的统计性质,增多同一讯息点的重复观测次数,并向三维空间发展。近十年来,讯息采集量增长了近三百倍,处理地震数据的能力增长了约五百倍,计算机的运行速度增长了约一千倍。在采集系统方面,常规地震仪器常用一百道观测系列,三维采集仪器已达一千道系列。常用的复盖次数为不少于二十四次,四十八次以上的重复观测系统,在复杂资料采集区,为提高资料采集的质量起着决定性的作用。

在地震数据处理方面的进展,已从标志六十年代水平的构造地震学跃向了地层地震学,油藏地震学,储量开发地震学。它们主要表现在地震波讯息的充分利用方面,特别是利用井下及实验室实测的地球物理参数,从已知推未知地进行综合分析研究。

发展地震应用理论与计算机处理能力

运用地震方法研究判断岩层物性,以及油藏的存在与否,进一步用于储量开发方案的确定,是地震技术上的一次革命。虽然,就基础理论而言,它在五十年代已有文章论述,但直到六十年代后期,计算机科学及数理统计理论的引用,发展了数据处理的应用理论,数字地震技术才逐步地从单纯勘探地下构造形态,进展为勘探地下构造中所蕴藏的炭氢物。有代表性的为亮点、暗点、平点技术的发展;在井下与实验室实测参数的综合利用下,岩层孔隙度,含油、气饱和度,体积模量等储量计算参量引入了地震波讯息提取行列,从而有可能从已知推未知地提高了数字处理的水平,实现了用地震技术计算储量并进一步确定油、气开发方案。有代表性的是广义声阻抗技术的发展;在复杂构造区,反射讯息的正确归位是主要矛盾,归位判别的准则,随着动力学讯息的研究与利用,已从时间场归位进展为波强场归位,发展了波动方程归位技术,并正在向三维空间波强场归位方面研究进展。声学全息理论,光干涉学,量子力学等近代物理的最新成就,已向地震学渗透,发展了富氏全息地震学,通过富氏变换实现反射聚焦运算,以求取反射系数讯息,并实现波动场归位;量子地震学的研究,对地层物性进行概率描述,扩大了概率统计学在地震数字处理中的应用,使庞大的三维讯息量,得以在波动场实现归位,这种发展趋势,在讯息采集量日益增加的情况下,富有生命力,符号位处理技术,是其中一个内容;近年来还发展了横波讯息的研究,为在孔隙岩中利用地震波速度研究孔隙形状,孔隙中含液体的性质,含油、水饱和度等,以及纵、横波速度比与油、气藏的关系方面,为用地震方法研究油田开发确定油、气藏储量,提供了新的途径。

地震数字技术中的最新成就,均以提高勘探油、气藏的效率为衡量准则,每一项新

的进展，往往是在发现原有讯息利用上的缺陷，从而在发掘新的讯息利用上作出了贡献。一般来说，地震波讯息的利用程度，象征着数字处理水平的高度。

目前，我国地震资料的采集与处理，主要是考虑应用地震波的旅行时间讯息，以构组水平迭加与迭加偏移剖面，主要用于解释地下地质构造的存在与否，而不能直接判断其中含油、气与否。这说明我们还处于构造地震勘探阶段。

我国数字地震技术，与国外先进水平的主要差距，在于地震波讯息的利用程度方面。虽然，我们在地震资料常规处理方面，就点上而言，处理的数量与质量，均已接近或赶上国外先进水平。但是，由于我国计算机科学水平跟不上发展的需要，地震数字处理能力，仅相当于国外十年前的量级，因此，仅有的处理能力，疲于应付简单的常规处理，动力学讯息与三维归位的研究与发展，显然受到现有计算机处理能力的限制。这是一个方面。更重要的方面，无疑是地震数字处理应用理论的研究太薄弱。如果没有我们自己的地震处理应用理论的研究与发展，就不可能指导数字处理水平跃上世界先进水平的高峰。这就启示我们，发展我国地震数字处理技术，主要是研究发展地震数字处理的应用理论，以及计算机设备的处理能力。在这个基础上相应发展应用程序等程序系统，以及处理技术。

结合我国油藏特点综合利用地震讯息

我国石油地质勘探，研究发展了陆相古潜山等油藏的应用理论。这种古潜山式块状油藏，储于浸蚀切割所造成的古喀斯特山峰，而古喀斯特灰岩的地震波速度远大于盖于其上的砂泥岩生油层，因此，用于研究一般油藏的反射波归位处理模型，只能处理较大的潜山面形态，而很难研究潜山内幕；于是对潜山内幕中另一压力系统的油藏研究，必然造成一定的困难。古潜山式油藏是与裂缝溶洞富集带相关联的块状油藏。含液体特别是含碳氢物的缝缝洞洞，与含干涸填充物的裂缝溶洞，在地震波动力学讯息标志上，有明显的差异；裂缝溶洞发育的富集带与非富集带之间，地震讯息特别是动力学讯息标志，有更为明显的差异。对这类地区油藏勘探与数字处理，在国外未见实例，引进技术只能给我们以提示，为此，必需注意发展适合我国油藏特点的相应处理技术。离开我国油藏特点研究处理的数学模型，将华而不实；离开动力学讯息的充分利用，单纯研究构造形态，将会产生井位判断确定上的错误。

在地震勘探资料中，包含有地震波旅行时间讯息；及地震波真振幅（相对振幅、波强包络），频率（瞬时频率、平均频率、中心频率、全频率谱），速度（相对速度、绝对速度、层速度、均方根速度），反射系数，相位与视极性，声阻抗（高频成份声阻抗，全成份声阻抗），低频幅谱比，相邻层反射振幅比，波组峰值间平均能量比，吸收系数，波形特征等近二十种动力学讯息；以及孔隙度，油、水饱和度，密度，渗透率等井下十多种地层物理参数讯息；以及横波利用等。能否综合研究利用这些讯息进行数字地震地质解释，是地震勘探能否从构造地震学跃向地层、油藏、储量开发地震学的关键。也是本文论述的重点。

在构造地震学中，主要应用地震波的旅行时讯息，对其他十多种动力学讯息均没有作为讯息加以利用。只是利用迭加速度、频率谱作为迭加参数。从讯息利用角度来看，这是一个很大的浪费。

但是，动力学讯息的充分利用，必需结合井下物理参数与实验室岩芯标本测定参数相辅进行。所以，取全取准每个井的物理参数是能否正确利用动力学讯息的首决条件。所需的井下物理参数包括声速测井，密度测井，电阻率测井，自然电位测井，感应测井， γ 射线测井，中子测井，微电极测井等。同时，在重点地区进行有机泥浆取芯，在实验室内进行常温常压及高温高压条件下的，高度物理相似率的参数测定，包括岩层孔隙度，孔隙形状，孔隙纵横比，孔隙谱，含油、水饱和度，岩层密度，基质密度，岩石容积密度，含液体密度，基质模量，岩石颗粒体积模量，有效静态体积模量，纵波速度，横波速度，弹性系数等。由于目前未能对每个井测全所有参数，地球物理实验室尚待建成，因而参数测定只能部份进行，所以，动力学讯息定量应用于油藏、岩性、储量开发的研究，实际上是有困难的。从这一点讲，我们同国外先进水平还有十年左右的差距。由此提示我们，发展我国地震数字处理技术，必需取全取准地质、地球物理、井下地球物理的讯息与参数资料，才能收到预期效果。争取用八年左右的时间，接近、赶上世界先进水平。

油、气蕴藏的动力学讯息标志

勘探地震学是介于物理声学与地质学之间的一门边缘科学。也可以说，它是以地层为传输讯道的通讯理论系统。特别是地震数字处理技术，它可以是计算机科学数据处理中的一个重要分支，也可以说它是应用数学的一个分支。勘探地震学的发展，实际上是在不断引进通讯学、声学、讯息学，计算机科学、数学、弹性力学等学科的先进成就，用以研究地震数字处理应用理论的发展过程。

近十年来发展起来的地层地震学，是介于地震学与地质学之间的一门边缘科学，它是用地震相方法研究地层的地层学，是地质学的一个分支。地震地层学研究的基本出发点，是综合研究地震相序列，及其相应的动力学特征，结合古地史资料与盆地沉积模型的研究，以判断岩相、岩性的横向变化。研究地震相序列的目的，是确定沉积单元的类型及其地质年代，包括判别地震剖面上的不整合面，如古喀斯特浸蚀面或沉积间断面；对每个地震相序列的分析，可以根据其周期性的终断，结合古生物资料判断陆棚、斜坡、盆地古环境等，且可较精确地判断沉积时的水深；在地震相研究的基础上，结合相应的地震波动力学讯息，判断岩石物性的变化。地震地层学的研究，可以取得高质量的地层等厚图、地震岩相图、地质岩相图、经过压实校正的层速度图、含砂量百分比图、储油层预测图、柱状地层含油、气预测图等。地震地层学虽属于地层学的研究领域，但它是以占有大量地震剖面资料，以提取地震相讯息序列为基础的，不仅需要地层学领域的古生物资料，还必需有相应的地震波动力学讯息标志辅助地震相类型的判断，以及岩性的判断，涉及大量的地震应用技术。从这一点讲，也可以说它是研究地层中反射讯息

特点的地震学。在各学科互相渗透的现代科学研究中,很难也没有必要绝然划分。一般地说,侧重于用地震相讯息研究地层的地质学分支来说,称为地震地层学;而侧重于研究地震动力学讯息标志,以确定地层岩石物性与油、气藏范围的地震学,相对于构造地震学而言,称为地层地震学,它标志地震学发展的新阶段实质上它是地质学与地震学研究发展过程中必然出现的一门边缘科学。

在地震应用理论的研究发展中,有代表性的是地震反射波波强场归位前后的振幅讯息,速度讯息,频率讯息,反射界面讯息,以及相应的高保真处理技术的研究。

地震反射波的振幅讯息研究,发展了有代表性的亮点、暗点、平点技术。亮点技术主要是综合利用反射波的振幅等动力学讯息以直接判断炭氢物的蕴藏位置。所谓亮点,狭义地说是指地下炭氢物的存在,造成反射波振幅讯息相对增强的点。它概括了由于炭氢物存在所形成的一系列动力学讯息标志。这些标志除了反射振幅变化外,还包括反射波极性反转,吸收系数增大,频率降低,速度降低,纵、横波速度比异常等;以及气—油,气—水接触面的反射等地震波运动学标志。这些标志反映炭氢物的重要性虽有所不同,但都有它的特点,任何一个讯息标志都不是仅与地下炭氢物存在有关,而必需综合各种讯息标志加以多方面判断分析,才能有所成效。

油藏地震学是介于油田地质学与地震学之间的一门新兴的边缘科学。它是以地震波动力学讯息在炭氢物蕴藏区的特有标志,研究地下油藏运移及储集、生成、盖层等条件,以圈闭含油、气面积的油田地质学。它是油田地质学的一个分支;也是勘探地震学发展到直接判别油、气藏存在与否的油藏地震学。

地震波真振幅讯息,在动力学讯息标志中占首要地位。反射波的振幅与反射界面的反射系数有关,反射系数与反射界面两侧介质的波阻抗有关,且由其波阻抗之差来决定。波阻抗差越大,反射振幅越大。若地震波从较疏介质射入较密介质时,反射系数大于0,反射波与入射波的极性相同;反之,反射系数小于0,极性相反。

岩层的波阻抗讯息,取决于岩层的密度与速度,岩层的密度主要由岩石的基质成份,孔隙度,含流体的成份与含量来决定。由于油、气、水等流体的密度小于岩石基质的密度,因而岩石孔隙中含有流体,特别是含有炭氢物时,岩层密度将显著降低,且当岩石中含炭氢饱和度一定时,岩石中的密度随孔隙度的增大而减小。

地震波的速度,在油、气、水等流体中传播时,比在岩石基质中为低;在含油特别是含气中更低。因此,当岩层孔隙中含有炭氢物时,传播速度将明显降低,且随岩层中孔隙度的增大而降低。所以岩层中含炭氢物时,波阻抗显著减小,波阻抗差相对增大,反射振幅增强。

岩层反射系数的代数值,随着反射界面两侧岩层物性与含流体的性质而变化。如以体积密度方程与时间平均方程计算密度与速度,并给定岩层压力与流体压力,从理论计算可知,在页岩—含气砂岩,页岩—含油砂岩,与页岩—含水砂岩界面的反射系数,它们的反射系数代数值均随着孔隙度的增大而减小,其中页岩—含气砂岩随孔隙度的减小最快,含油与含水砂岩次之,其值相近,当页岩—含气砂岩的孔隙度为13%时,其反射系数为0,反射完全消失,出现暗点;当孔隙度小于13%时,反射系数为正,孔隙度大

于13%时,反射系数为负,反射波极性反转;当孔隙度为22%时,页岩—含气砂岩与页岩—含水砂岩的反射系数的绝对值相等,反射波强度相同,极性相反;当孔隙度大于22%时,页岩—含气砂岩的反射系数的绝对值逐渐增大,反射波振幅增强,出现亮点,反射极性反转。用同样方法与参数计算油、气、水流体接触面的反射系数,在气—油—水的顺序情况下,反射系数均为正,油—水界面的反射系数较小,一般很难识别;气—油、气—水界面反射系数均很强,但二者差异甚小,且与页岩—含气砂岩界面的强反射系数符号相反,当气层很薄时,两者的能量将部份或全部抵消,反而出现暗点。

地震反射波振幅,不仅与反射界面的反射系数有关,同时还与地震波的激发、传播、接收等一系列因素有关,包括激发与接收条件,波前发散,吸收,散射,中间界面透射损失,微屈多次反射,反射波振幅随入射角变化,界面聚焦,岩相变化,以及噪声干扰等。这些因素所造成的反射波振幅的横向变化,目前,是用一个常数因子予以校正。这些影响因素对真振幅讯息的提取来说,是必需加以校正的,但对其中某些因素来说,是可以作为讯息加以利用的,如波前发散,吸收,散射等讯息。

地震波波前发散讯息,是由于地震波在地下均匀介质中传播时,波前面是一个以震源为中心的球面,随着传播距离的增大,波前面不断地扩张,由震源发出的总能量通过一个表面积不断扩大的球面积,如从震源发出的总弹性能量是不变的,那么,通过波前单位面积的能量密度将逐渐减小。由于地震波的振幅与波前面上单位面积的能量密度平方根成正比,所以,随着距离的增大,波前面不断扩张,使地震波的振幅不断减弱。从波前发散因子计算可知,地震波在连续介质中由于波前发散所引起的地震波振幅衰减比在均匀介质中要快,那末,地震波在通过古潜山式的缝缝洞洞时,地震波的衰减幅度必然异于平常。这一点可考虑从数理统计概念出发加以利用。

地震波的吸收讯息,是当地震波在地下岩层介质中传播时,由于实际的岩层是非完全弹性的,地震波产生不可逆的能量消耗,这一种附加衰减,当吸收系数与频率成正比时,地震波在单位波长上的吸收,与岩石的非完全弹性有关,而与地震波的频率无关。但是,岩层的吸收系数,随频率呈线性变化,使地震波的振幅随频率的增加呈指数衰减,且高频振动比低频振动衰减得快。当频差在100:10时,振幅衰减比为90:1,即高频振幅的衰减比低频振幅衰减快90%,且频差越大,振幅衰减的比率越高。吸收对真振幅的附加衰减,是需要加以校正的,但是吸收系数讯息是可以加以利用的。

岩层吸收系数讯息变化范围,比速度讯息变化范围大得多。当频差为5:200^{Hz}时,吸收系数变化范围可达一百倍。在含油气的砂岩中,吸收系数将相应显著增大,所以,地层的吸收系数,能更灵敏地反映出地下油、气藏的存在。地震波吸收系数平面分布图,可以用于圈闭油、气藏范围。

地震波的频率讯息,是反映炭氢物的一个重要标志。由于地层的吸收作用,地震波的频谱随着传播距离的增长,低频成份相对丰富,如对一尖脉冲性质的地震波,在岩层对高频吸收的影响下,随着传播距离的增大,尖脉冲的峰值振幅逐渐减小,脉冲波形逐渐展宽而呈光滑形。在含炭氢物的砂岩中,由于含炭氢的吸收系数增大,地震频谱减低的现象更加明显。所以,当地震波穿过含炭氢砂岩时,其频率将显著降低。地震波瞬时

频率、平均频率、中心频率、全频谱等频率讯息可用于判断岩性变化与炭氢物的存在。平均频率剖面可以反映局部岩性的横向变化，储集层流体的横向变化，以及透射脉冲形状的变化。其中最灵敏的是反映透射脉冲形状的横向变化，它可能反映界面上部复盖层中的油，气聚集有关，频率的降低，往往反映炭氢物存在的可能性。

地震波的瞬时频率、瞬时相位、瞬时振幅等讯息可以对地震剖面进行细微的解释。地震波在传播过程中，由于波前发散，地层吸收等作用，其振幅与频谱均在不断地发生变化。研究其变化，将有助于地震剖面的解释。由于目的层在地震剖面上所占的时间很短，用一般富氏变换法研究其频谱，效果欠佳，所以用希尔伯特变换研究瞬时频率。经过希尔伯特变换后的记录道，其总能量与变换前的总能量相等，即变换前后的振幅谱是相同的，但相位差 90° ，由此可以求出瞬时刻的相位，它对地震岩相的研究是有帮助的。在研究地震反射层连续性、相位变化与极性反转方面，瞬时相位有它独特的作用。瞬时频率反映了地震波瞬时刻的主频，瞬时频率剖面上频率显著降低的部分，与炭氢物存在有密切关系。同时，瞬时频率剖面有利于反映对断层、尖灭、超复及其他不整合面的判断，对研究岩相变化是有帮助的。瞬时振幅即反射波组的包络线，它反映波强讯息。它们对地震波的衰减规律，以及为实现真振幅的保真恢复，提供了有益的讯息。

低频幅谱成份比，是频率讯息中的重要讯息。因 $12-14^{112}$ 的振幅谱占全频谱面积中的百分比，可以检验高频成分减少量，而高频成份的减少可能是由于其上部地层中油、气吸收所引起的。 $12-14^{112}$ 频谱成份对反映炭氢物很敏感。

地震反射波的波强讯息，低频幅谱成份比讯息，平均频率讯息，相邻反射面反射真振幅比讯息，以及反射波组的主峰间平均带通能量比讯息，宜联合应用。这五种讯息标志代表了炭氢物判断的五个主要方面，把它们综合显示在采色地震图上，可以较有效地判断油气藏范围。

地震波的速度讯息，是岩层的重要物理特性，不同的岩石类型有不同的速度值，含油、气的砂岩或其他岩层，有明显的低速特征，据速度的水平分布规律划分岩性，确定层位，为直接判断油、气藏提供可能性。以反射成像为判别准则的速度分析，与表征岩石物性的真速度总是有区别的。虽然，Dix 先生作了很多努力，提出用迭加速度与双程反射时间计算层速度，但是，由于假设条件不适合大多数地层剖面情况，应用这种方法造成的误差往往是很大的，特别是没有归位的反射波的速度分析，所计算的层速度，在复杂地震剖面上是没有实际意义的。虽然，有人提出利用波前曲面来计算地下速度参数等新方法，但还是不能给出较薄地层的速度讯息。直到最近声阻抗转换技术的发展，在井下声速测井、密度测井与中子测井等岩层物理参数的配合下，取得精确度较高的速度讯息。一般来说，判别岩性变化与圈闭油藏的速度讯息精度，需要在 $0.2-0.5\%$ 左右。

声阻抗技术是最近几年发展起来的用于寻找、圈闭油、气藏的有效手段，它在圈闭油、气藏方面的成功率，高于亮点、平点、暗点技术。

声阻抗讯息，实际上是速度讯息从已知到未知的正演与反演，通过井下实测的速度讯息与地震记录转换的速度讯息的对比与逐次逼近，结合地质柱状剖面资料进行比较，

确定速度值范围与相应地层的定量关系,沿地震测线扩展出去,以展示地震剖面上各种岩性的分布,从而判断岩性岩相的变化与含碳氢物的分布情况。

声阻抗曲线技术,是以地震记录与测井曲线之间的相互转换为基础的。测井参数合成地震记录技术,可以把声速测井曲线转换为人工合成地震记录;反过来应用声阻抗曲线技术,可以把相应的地面观测地震记录转换为测井曲线。合成技术是根据声速曲线,密度曲线,以及计算出的声阻抗曲线,反射系数曲线,用给定的地震子波与之褶积,即可得合成记录,从合成记录上可以研究合成的反射波组与相应柱状地层岩性间存在的明显对应关系,为判断目的层反射的存在及其波形特点提供有力的依据。

声阻抗曲线技术,是对野外地震记录进行高保真处理,特别是地层反褶积处理,得到近似的反射系数曲线,算出近似的声阻抗曲线。结合密度测定资料,算出地层的近似声速曲线,并以声速测井曲线为准则进行逐次校准,即得伪速度测井曲线。在井下声速曲线控制下,对井间伪速度曲线进行逐次最佳逼近,取得三维空间速度分布讯息。在实验室测定的孔隙度等储量计量计算参数的配合下,即可估算碳氢物蕴藏范围及其储量,为油田开发方案提供依据。

由于在地震记录道中缺乏高频与低频成分,特别是 $8-10^{11}\text{X}$ 以下的低频讯息。因此,地震记录转换所得的声阻抗与速度讯息中,缺少真正的低频讯息。但是,由于伪速度曲线的转换过程实际上是一种积分处理,它能增强低频成分,这种低频成分由于累计误差及噪音的存在,一般来说是不可靠的,必需用低截滤波加以过滤,即得没有低频成分的相对速度。相对速度是描述岩性变化及反映碳氢物范围的主要讯息,在相对速度剖面上有着明显的显示。为了补偿速度曲线中的低频讯息,对相应的地震资料进行精确的速度分析,求得均方根速度,再计算出层速度,且对层速度进行 $8-10^{11}\text{X}$ 低通滤波,即得低频讯息。用声速测井曲线经过低通滤波取得的低频成分加以校准,加到相对速度讯息上,即得绝对速度讯息。绝对速度能更准确地反映速度随岩层深度变化的规律,是地层本身真速度。

声阻抗技术的核心,是速度讯息的研究与利用。要取得 $0.2-0.5\%$ 精度的速度讯息,是很困难的,综合利用各种速度讯息进行研究分析,有利于精度问题的解决。如声阻抗讯息包括相对声阻抗,绝对声阻抗;速度讯息包括均方根速度,层速度,相对速度,绝对速度等;把它们显示在同一条测线上,进行综合解释,才能对岩性变化与碳氢物范围作出可靠的判断,这种显示一般是用采色分别标志的。

必需指出,以地震相研究为基础的地震地层学,是以大量的常规处理剖面为主进行的;而以动力学讯息研究为基础的油藏与储量地震学,是以高保真处理剖面为基础的。为此,必需研究相应的高保真处理技术。

注意研究高保真处理技术

高保真处理技术涉及全套常规处理内容的保真化,但其核心内容为真振幅相对保持的精度,地震子波的提取与相应的反褶积保真度,速度低频成分的精度。以及波动场归位

的振幅保真度。其中地震子波的保真提取与波强场归位是技术关键。

为使地震波的振幅正比于反射系数，且用以为动力学讯息的研究基础，保真的相对真振幅处理是基本条件，影响振幅变化的因素很多，除反射系数因素保存外，其他影响因素必需以一常数因子予以消除。但是，有些因素的影响，单从记录本身是无法估计的，要借助一些其他资料或通过反复处理来实现。其中吸收损失可以归结到地层的滤波作用中去，不单独补偿。此外，层间多次影响很难作严格地补偿，但它主要影响纵向上的精度，而对我们来说，剖面的横向变化比纵向变化更有意义，因此，作一些近似的处理，还是有价值的。

地震讯号由震源激发后，受到震源附近破坏带、地层滤波、反射界面的分布性质、采集系统等因素影响。虽然有些因素很难严格用数学模型表达，但是，通常的反褶积技术已能有效地消除采集系统与震源的影响，而留下的主要因素是地层与界面反射系数的影响，后者正是我们所希望提取的讯息。为了克服地层的滤波作用，研制了地层反褶积处理技术。

地层反褶积是将地震记录道表示成一组近似反射系数的记录道，通过最小平方法，用测井参数合成的记录道与地震记录道进行直接比较而计算反褶积算子。它是在有测井资料的地区，从声波测井与密度测井获得反射系数序列，将测井资料由深度序列换算为时间序列，与时间剖面对比，用复数域的频谱除法提取地震子波，在柱状图上划分主要层次，以求出它们的反褶积算子。横向上由井下参数作控制点。在没有井的地区，可以采用同态反褶积与构造反褶积以提取地震子波。

同态反褶积是用对数分离法提取地震子波的一种理想的数学方法。它是假设地震子波在空间、时间上是稳定的，而反射系数在时间上有随机性，当所取的空间道数足够多且范围足够大时，认为反射系数的复数谱均值为零，取多道平均可近似地求出子波。这样，可以认为深、浅层的子波变化，是由于地层滤波作用所引起的。同态反褶积的优越性在于将地震记录的最大相位部份与最小相位部份严格区分开。如能将子波与反射系数，在相位上趋向两极化，则用同态反褶积提取保真子波或反射系数，将取得更好的结果。但是，如何把反射系数与子波有效分离或近似分离，即如何定出正确的低频截止限，这一点在实际上是很困难的。因为反射系数序列与子波序列的首尾点很接近甚或重叠，给子波提取造成困难。但是，当地面与第一层反射界面间距很大时，则反射系数序列与子波序列的分离程度加大，有利于子波的正确提取。如果我们能将地面与第一层反射间距人为地加大，那末同态反褶积提取子波的实用价值将显著提高。

为了使所提取的子波更逼真，最大熵概念引入了反褶积技术，发展了最大熵或鞍点熵反褶积，使维纳反褶积技术更臻于完善。在维纳反褶积的实现中，为使反射系数白噪声化的假设更逼真而缩短所建立的时窗长度，但由于时窗缩短自相关步移窗外补零，造成子波自相关的失真，这是一个矛盾。鞍点熵引用最大熵谱分析概念，自采取予测原理取代窗外补零，优化子波自相关矩阵，从而使所假设的条件得到更好的满足，使子波提取更逼真。同时，不需要最小相位的假设前提。在实现时，采用向前予测与后推予测所产生的平均功率最小的条件下确定予测误差滤波器的系数，当予测距离为一时，滤波器的

系数等价于所求的反子波。由于缩小时窗长度，截去了不必要的谐波，限制了干扰的混入，取得展宽的频谱，以及高讯噪比，从而取得分辨率的提高与反射系数的相对增强，得到高保真的子波。看来，鞍点熵反褶积是子波提取技术中值得研究发展的新课题。

在保真处理技术中，滤波的自适应性对高保真子波的提取是很重要的，如航天技术中的卡而曼滤波，以及我们为改进卡而曼滤波而研究的递推维纳滤波。

卡而曼滤波的优越性，在于它可以用于线性时变非平稳系统，且能推广到非线性系统，由于采用递推计算式便于在计算机上实现。但它要求事先定出基本地震子波的状态空间方程。这一点是有困难的。一般是根据相应的测井资料，对反射函数作回归分析，递推解出各地层的反射系数，提取地震子波。这一点在没有井的地区是不容易实现的。

我们研究用比较容易确定的协方差来取代状态方程，并仍然采用递推计算式，可以较逼真地实现自适应保真滤波，这种递推维纳滤波方法，在地震数字处理中是有前途的。

在保真处理中，高保真的反射波归位，必需在波动场进行，波动场归位可以保持反射波的频率成份与反射特征，并能提高复杂地质区的资料质量。

波动方程归位处理，是在波动场进行的。既有波的运动时间，又有波的运动强度，兼具了波的运动学特征与动力学特征。

目前，波动方程归位法，已有三种，即有限差分法，克希霍夫积分法，频率、波数域的推广差分法；正在研究的有波动方程的有限元解法，以及小参数法波动方程归位。目前，常用的是差分法。

就归位质量而言，频率域波动方程归位是较好的，但它变速困难。在实现时是采用对时间剖面进行变速时—深转换，以解决它的变速困难，且在深度剖面上用快速二维付氏变换实现推广差分法波动方程归位。方法的优越性在于运算速度较时间域差分法快十倍左右，且克服了波散现象，从而提高了归位质量。但空间伪频现象仍然存在，这一点可考虑在二维快变过程中用空间内插与去伪门滤波等特殊处理程序得到部份解决以至解决。这是一个很有发展前途的波动场归位技术。

差分法波动方程归位，由于数学上的弱点，它只能等步长地实现延拓，同时对反射界面采取线性逼近，这对地震波归位来说，是不能令人满意的。有限元法在结构与热传导方面已取得成功的进展，它具有可变延拓步长与三角形逼近的优点，用它来解波动方程将能取得满意的结果。但是，用有限元法解波动方程，在数学上还未过关，我们正准备与数学家结合起来攻下这一课题。

差分法与积分法波动场归位，均采用与光学类似的模型，把地下作为一个均匀的介质，反射界面作为置于这个均匀介质中的半透明的挡板，然后根据波由这个挡板反射回地面的记录来寻找反射界面的位置。但实际的物理模型并不是这样。反射界面不是均匀介质中的挡板，而是非均匀介质的间断面。若根据地面记录以确定地下介质的速度分布，从而获得速度剖面或介质的分界面，以这样的物理模型给出它的数学模型与实际求解方法将是有意义的。它是一个由超定条件确定波动方程的反问题，同时，是一个非线性问题，解时用小参数法把问题线性化，再用克希霍夫积分把这样一个线性化的近似问

题化为积分方程，在一些特殊情况下求得这个积分方程的解。在层状介质的假定下，利用波至时间特征，给出了速度估计公式，从而对记录质量较差的地区，提供了利用记录获得速度讯息的可能性。在利用时间剖面取得二维速度分布后，即可得到偏移深度剖面。这种小参数法波动方程归位处理，是北大数力系最近提出的思路，我们认为有进一步研究实践的必要。

本文从我国数字处理实际情况出发，对上述各方面的论点，分六大专题论述并给出相应的数学模型。它总结了我院最近的方法研究成果。由于我们掌握的国外资料很少，水平也低，有些问题还来不及深入研究，甚或还有错误的地方，但为了起抛砖引玉的作用，我们还是提作会议报告，请同志们批评指正。

本文由范祯祥、郑仙种、郑玉莹、金孟哲、周兴元、查中圻、徐忠范、钱新、梁茂贵集体写作。全文由范祯祥执笔写成。文中引用了龚升教授、牟永光教授、程乾生、陈亚晰老师的材料，在此致以谢意。

本文是继我院研究报告集第一集“向全国科学大会献礼专集”之后的方法总结，在一集上已论述过的数学模型，在此未作讨论。

二、地震数字处理的数学模型及其进展

目前数字处理中,常用的处理手段除辅助程序模块外,有动校正,静校正,振幅校正,门式滤波与二维滤波,迭加与加权迭加,脉冲反褶积与波形反褶积,相干加强与匹配滤波,振幅恢复与动态均衡,速度分析,模型分析,频率分析,等三十多种方法模块,其中主要模块的数学模型附于文后。这些模块围绕着提高讯噪比与提高分辨率来设计的,也就是说,迭加前处理是为了同相、等幅迭加,迭加后处理为了显示出清晰而具有高分辨率的反射同相轴并抑制其他无用讯息。

在数字滤波方面,目前的进展已经由研究截尾误差、离散误差、伪门与折迭频率而发展起来的镶边滤波,正在向自适应最佳滤波方向发展,近年来从航天技术领域引入了卡而曼滤波,这就在准确选定随时修正地震道滤波因子以提高记录讯噪比方向开辟了一条途径。卡而曼滤波是一种线性最小方差滤波,可以实时地进行自适应滤波处理。

卡而曼滤波的优越性,在于它可以用于线性时变非平稳系统,且能推广到非线性系统,由于采用递推计算式,便于在计算机上实现。但是它要求事先定出基本地震子波的状态空间模型,这一点如在有测井资料的地区,是很难实现的。

我们在这里提出用比较容易确定的协方差取代状态方程,且仍然采用递推计算式,我们认为能实现这种功能的递推维纳滤波方法,在地震数字处理中很有发展前途。

近年来在反褶积,子波处理方面的研究成果,推动了数字处理技术的发展。在常规处理中广泛采用的脉冲反褶积与波形反褶积,它们的假设前提以及给定子波的要求,对地震勘探的实际状态很难适应,所以,反褶积效果还不理想。所发展的同态与予测反褶积,虽然从理论上能够提取反射子波与分离反射系数,但两种方法都需要关于脉冲相位特征的假定,予测反褶积的困难在于正确定出纯相位的全通滤波器,它把最小相位估计变为正确的脉冲估计;在同态反褶积中,困难在于确定复对数谱序列的截止频率,它将产生一个正确的脉冲估计,它们没有能得到关于地震脉冲估计问题的完全解。最小(最大)熵反褶积的优点是加强了反射系数,突出了主要反射层,它是目前统计滤波中研究发展的一个重要课题。地层反褶积是采用声速测井与密度测井资料取得反射系数序列,用已知的反射系数序列计算地层反褶积因子,用这种因子进行反褶积处理,能够较逼真地进行子波处理。但是要求有密集的井下参数资料,在没有井的情况下,可直接从反射记录中求取地震子波,即在频率域用构造反褶积求取地震子波,但是可靠程度总不如在有井下资料地区,用井中参数求取子波来得逼真。这就向我们提示一个重要问题,要提高处理水平,必需有测井资料及实验室标本测定资料,从已知推未知,才能真正充分发挥地震波讯息的作用。为此,在有井的地区,应取全取准声速测井,电阻率测井,中子测井,地震速度测井,密度测井以及孔隙度等等资料,才能保证地震勘探跃向油藏勘探的新水平。没有这样的基本条件保证,仍然在未知因素中回旋,我们勘探水平的提高,随着地质任务的复杂化,将会受到严重的影响。

提高讯噪比的处理

在地震讯息采集过程中,所记录的地震讯息沿地壳中许多不同的路径到达,它们来自多种震源,其中包括讯号与噪音。提高讯噪比处理就是把讯号从噪音中分离出来,这就要靠滤波来实现。滤波器包括频率滤波器与维纳滤波器。

频率滤波器是在选择通过某些频率成份的任意基础上设计的。同时,相位特征也要遵从一定的要求,而不管讯号与噪音的具体特征。维纳滤波是一种最佳滤波,它是根据讯号与噪音的特征设计的,也就是实际输入讯号与期望输出讯号之间按最小平方误差判断原则设计的。这里给出几种多重约束自适应滤波,如卡而曼滤波,递推维纳滤波的数学模型。

数字频率滤波

设地震记录 $x(t)$ 是 t 的连续函数,当我们以时间 Δ 为采样间隔时,可得时间序列 $x(n\Delta)$ 。 $x(n\Delta)$ 的频谱是以 $\frac{1}{\Delta}$ 为周期的对称函数,为了对 $x(n\Delta)$ 进行滤波,常采用带通滤波,这种带通滤波的频谱由于不连续,所以,相应的时间序列衰减很慢,这使滤波效果受到影响,解决的办法就是把带通滤波变成镶边带通滤波。

数字滤波是一种从总讯息中分离出期望讯息的统计方法,它可以在频率域进行也可在时间域进行,时间域滤波因子 $h(n\Delta)$ 由理想滤波因子 $\tilde{h}(n\Delta)$ 与加权因子 $p(n\Delta)$ 相乘得到,即

$$h(n\Delta) = \tilde{h}(n\Delta)p(n\Delta)$$

理想带通滤波因子表达式〔=〕为

$$\tilde{h}(n\Delta) = \frac{2\sin\pi(f_2 - f_1)n\Delta}{\pi n\Delta} \cdot \cos\pi(f_1 + f_2)n\Delta$$

用三次曲线镶边的带通滤波因子表示式〔=〕为

$$\begin{aligned} \tilde{h}(n\Delta) = & \frac{4}{(f_4 - f_3)^2} \cdot \frac{\sin\pi(f_3 + f_4)n\Delta \cdot \sin^2\pi \frac{f_4 - f_3}{2}n\Delta}{(\pi n\Delta)^3} \\ & - \frac{4}{(f_2 - f_1)^2} \cdot \frac{\sin\pi(f_1 + f_2)n\Delta \cdot \sin^2\pi \frac{f_2 - f_1}{2}n\Delta}{(\pi n\Delta)^3} \end{aligned}$$

为节省计算时间,具体计算式为

$$\tilde{h}(n\Delta) = \frac{1}{[(f_3 + f_4) - (f_1 + f_2)]\pi\Delta n} \left[\sin(f_3 + f_4)\pi n\Delta \right]$$

$$\left(\frac{\sin \frac{f_4 - f_3}{2} \pi n \Delta}{\frac{f_4 - f_3}{2} \pi n \Delta} \right)^2 - \sin(f_1 + f_2) \pi n \Delta \left(\frac{\sin \frac{f_2 - f_1}{2} \pi n \Delta}{\frac{f_2 - f_1}{2} \pi n \Delta} \right)^2 \quad (1-1-1)$$

式中 f_1, f_2, f_3, f_4 , 分别表示滤波门的低截, 低通, 高通, 高截限止值。式 (1-1-1) 即为目前处理中常用的滤波模型, 滤波因子与 $(n\Delta)^3$ 成反比, $\tilde{h}(n\Delta)$ 随 t 的增加而迅速衰减, 因子尾部接近于零, 截尾误差较小。一般取因子长度为 120ms—200ms, 当 $f_3 \leq 2f_2$ 时, 滤波因子衰减较慢, 因子长度要相应增长。加权因子的取法很多 [], 实用中可取下列中的一个, 即:

$$p(n\Delta) = \cos \frac{\pi n}{2N}$$

$$p(n\Delta) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi n}{N} \right)$$

$$p(n\Delta) = 0.56 + 0.44 \cos \frac{\pi n}{N}$$

$$p(n\Delta) = e^{-\lambda N^2} \cos \frac{\pi n}{2N}$$

式中 λ 可取得使 $e^{-\lambda N^2} = \beta$, 即 $\lambda = -\ln \beta / N^2$, 其中 β 可事先给定, $0.1 \leq \beta \leq 0.2$, 于是所用的滤波因子为

$$h(n\Delta) = \tilde{h}(n\Delta) p(n\Delta) \quad n = 0, \pm 1, \dots, \pm N$$

设地震记录为 $X(n\Delta)$, 则滤波表达式为

$$y(n\Delta) = h(n\Delta) * x(n\Delta) = \sum_{s=-N}^N h(s\Delta) x(s\Delta - n\Delta)$$

当采用时变滤波时, 在区间 $[t_1, t_2]$ 与 $[t_2, t_3]$ 之间建立一个拼接区间 $[t_2 - L, t_2 + L]$, 在区间 $[t_1, t_2 + L]$ 上用 $h_1(t)$ 对 $x(t)$ 滤波得 $y_1(t)$ 。在区间 $[t_2 - L, t_3]$ 上用 $h_2(t)$ 对 $x(t)$ 滤波得 $y_2(t)$ 。在区间 $[t_2 - L, t_2 + L]$ 上由 $y_1(t)$ 与 $y_2(t)$ 拼接成一新曲线, 拼接表达式为

$$\tilde{y}(t_2 - L + m) = \frac{2L - m}{2L} y_1(t_2 - L + m) + \frac{m}{2L} y_2(t_2 - L + m),$$

$$m = 0, 1, 2, \dots, 2L$$

同样, 在滤波区间 $[t_2, t_3]$ 与 $[t_3, t_4]$ 之间可仿照上法, 依次类推。在总的处理范围 $[t_1, t_{k+1}]$ 内, 在拼接区间的滤波结果应为拼接曲线, 不属于拼接范围的滤波结果应为原有的滤波曲线, 最后即得时变滤波结果。

数字滤波在频率域的实现, 可先求取 $[t_1, t_2]$ 上讯号 $X(t)$ 的频谱, 即取 K 使 $2^{K-1} < t_2 - t_1 + 1 \leq 2^K$ 。当 $t_2 - t_1 + 1 < 2^K$ 时, 把 $x(t_1), x(t_1 + 1), \dots, x(t_2)$ 后面补 $2^K - (t_2 - t_1 + 1)$ 个 0, 使之变为具有 2^K 个数。利用快速富氏变换得频谱