

计算地球物理丛书之一

# 应用地震 层析成像

杨文采 李幼铭 等编著

地质出版社

P315.3  
Y-843

计算地球物理丛书之一

# 应用地震层析成像

Applied Seismic Tomography

杨文采 李幼铭 等编著

地质出版社

775653

(京)新登字 085 号

## 内 容 提 要

这是一本为勘探界和工程界从事实际工作的工程师和有关专业大学生、研究生编写的关于地震层析成像的书。本书系统地介绍了地震层析成像的原理、方法、算法、应用技术和经验。本书分原理、方法和应用三大部分。本书邀请了国内几位研究地震 CT 多年的专家分头撰写，内容深入浅出，凡学过大学工程数学的读者都可顺利阅读全书。书中也包含有几篇全面评述和报导地震 CT 应用效果的文章，可供领导和技术管理人员参考。

计算地球物理丛书之一  
**应用地震层析成像**  
杨文采 李幼铭 等编著

\*  
责任编辑：曹 玉

地质出版社出版发行  
(北京和平里)

北京地质印刷厂印刷  
(北京海淀区学院路 29 号)

新华书店总店科技发行所经销

\*

开本：787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张：15 字数：350000  
1993年9月北京第一版·1993年9月北京第一次印刷  
印数：1—1500册 定价：9.95元

ISBN 7-116-01271-0/P·1061

## 论文作者一览表

- 杨文采：地质矿产部北京计算中心高级工程师、中国科学院地球物理研究所客座研究员。
- 李幼铭：中国科学院地球物理研究所研究员。
- 李世雄：安徽大学数学系教授（合肥）。
- 刘家琦：哈尔滨工业大学数学系教授、研究生院副院长。
- 顾本立：南京东南大学生物医学工程系教授。
- 尹 峰：南京东南大学物理系讲师。
- 黄联捷：中国科学院地球物理研究所博士生。
- 吴如山：中国科学院地球物理研究所研究员。
- 马在田：中国科学院学部委员、上海同济大学海洋地质系教授。
- 杜剑渊：地质矿产部北京计算中心工程师。
- 黄金莉：水利部长办物探队工程师。

# 序 言

“应用地震层析成像”是我们献给读者的一本文集，一共十篇文章。内容既相关联而又相对独立。进入 90 年代以来，地震层析成像已渗入应用地球物理界各个部门。在地质勘探、采矿工程、石油开发和水利电力各部门也都受到重视。因此，请有关方面的专家共同撰写一本文集，献给直接从事这方面工作的工程技术人员和感兴趣的领导、教师和大学生研究生，就成为编者的共同心愿。

本文集中的十篇文章，虽公式和图都各自独立编号，但内容有分工又有联系。第一篇杨文采的文章是引导性的综述，偏重概念而不涉及数学公式，面对所有的读者。第二篇李世雄的文章精辟而且全面地介绍了层析成像的理论基础。第三篇刘家琦的文章系统地介绍利用地震走时反演介质波速的各种算法。第四篇顾本立的文章全面地讨论了衍射地震层析成像的原理和方法。这四篇文章成为本文集的第一单元，即基本概念、原理、方法和算法。

由第五、六和七三篇文章组成的第二单元，是专门为从事地震 CT 研究的科研工作者和研究生编写的提高单元，讨论的是地震层析成像中最困难的问题：非均匀介质的成像。由于地球介质通常具有宽尺度的非均匀性，地震层析成像属于非线性反问题，目前还不能找到一种万能的成像方法，来应用于不完全投影和带误差的地震数据。这三篇文章分别从三个不同的角度讨论非均匀介质中地震层析成像的理论和方法，代表了当前这一问题的主要研究趋势。在实际应用中，非均匀介质成像的问题还可通过逐级线性化的办法来解决，这种方法在第九篇文章中还可以看到。

第三单元包括三篇文章，都涉及到实际应用。第八篇马在田的文章精辟地介绍了反射地震中构造成像的方法。第九篇介绍杨文采和杜剑渊用于实际成像的一套方法技术，以及在煤矿及地下电站工程中应用的实例。第十篇刘家琦的文章介绍了地震层析成像在长江三峡工程中应用的效果。

在本书出版之际，我们感谢中国自然科学基金委员会和中国地震学联合基金会等机构对地震 CT 研究的积极支持，感谢中国地球物理学会的关心和促进。我们预祝地震层析成像在 90 年代在我国迅速开花结果，为国民经济建设发挥应有的作用。

杨文采

(中国地球物理学会层析成像和  
波动理论学科组召集人)

李幼铭

(中国地球物理学会计算  
地球物理学科组召集人)

1992年 2 月

# 目 录

## 序言

I. 地震层析成像及其应用	杨文采 (1)
一、关于层析成像	(1)
二、数据采集和处理	(2)
三、成像方法	(5)
四、地震层析成像的应用	(8)
参考文献	(10)
II. 计算机层析成像方法的基本概念与方法	李世雄 (11)
引言	(11)
一、基于射线理论的层析成像方法	(11)
二、基于波动方程反演的散射层析成像方法——包络法的推广与应用	(29)
参考文献	(34)
III. 走时地震层析成像的方法技术	刘家琦 (36)
一、成像问题中的病态线性代数方程组解法	(36)
二、射线追踪技术	(47)
参考文献	(69)
IV. 地球物理衍射 CT	顾本立 (70)
一、引言	(70)
二、波动方程及其一阶近似	(71)
三、完全投影下的衍射 CT 反演	(75)
四、不完全投影下的反演及处理方法	(83)
五、衍射 CT 的分辨率	(92)
六、增进容许的速度差异	(94)
七、2.5 维问题	(102)
八、衍射 CT 实验研究	(103)
九、结束语	(109)
参考文献	(109)
V. 反演二维非均匀介质背景中速度扰动的波动方程层析成像方法	尹 峰 李幼铭 (111)
一、引言	(111)
二、基本物理量定义及非均匀介质中反散射重建公式	(112)
三、Green 函数的计算方法	(113)
四、渐近射线理论	(114)
五、Maslov 渐近理论与刘维尔定理	(119)

六、积分方程的离散化形式	(131)
七、波动方程系数反问题的建立及反演迭代格式	(135)
八、计算机模拟试验	(137)
参考文献	(140)
<b>VI. 广义全息术和多维逆散射</b> 黄联捷 吴如山 李幼铭	(142)
一、引论	(142)
二、Rayleigh-Sommerfeld 全息术	(145)
三、广义全息术	(146)
四、多角度广义滤波反传播	(150)
五、多频率广义滤波反传播	(151)
六、Fourier 衍射切片定理	(152)
七、多角度滤波反传播	(153)
八、多频率滤波反传播	(156)
九、时域广义滤波反传播	(158)
十、时域滤波反传播	(158)
十一、结论	(159)
参考文献	(160)
<b>VII. 非线性波动方程地震反演的方法原理及问题</b> 杨文采	(164)
一、正演问题	(164)
二、数据和模型变化率间的关系	(166)
三、迭代算法和拟合均方差	(167)
四、最小化算法	(169)
五、总结	(172)
参考文献	(172)
<b>VIII. 地震偏移成像理论的新进展</b> 马在田	(174)
一、序言	(174)
二、高阶单程上行波方程的阶数分裂法原理	(175)
三、使用双程波方程的地震偏移成像方法	(177)
四、实用地质效果	(180)
五、结论	(188)
参考文献	(188)
<b>IX. 高分辨率地震层析成像和级联法</b> 杨文采 杜剑渊	(189)
一、如何提高地震层析成像的分辨率	(189)
二、散射地震层析成像的原理	(191)
三、影响成像结果的因素——反射地震的例子	(196)
四、级联法——跨孔地震的例子	(207)
五、振幅层析成像——煤矿陷落柱探测的例子	(211)
六、应用实例	(218)
七、结论	(221)

参考文献.....	(222)
X. CT技术在工程物探中的应用.....	黄金莉 刘家琦(223)
一、长江三峡地质、地球物理概况.....	(223)
二、地震层析成像的应用.....	(224)
结论.....	(230)



# I. 地震层析成像及其应用

杨 文 采

这是一篇关于地震层析成像在地质勘探和矿产开发中应用全面评述的文章，分四个部分。首先讨论地震层析成像的有关概念；然后分析数据采集和处理中的一些问题；并对成像方法作概评；最后，对地震层析成像的应用作总体评述。本文的目的是从物理学的角度出发，把现今我们对地震层析成像的认识总结一下，以便建立起一个定性的框架，使读者阅读下面几篇理论文章时有所导引。文中小标题，约有一半是提问式的标题，是常常听到的关于地震CT研究的疑问。当然，我只能依靠自己的思考来回答这些问题，其中欠妥之处在所难免，应参考下面诸篇文章求得更准确和深刻的论证。

## 一、关于层析成像

### 1. 什么是层析成像

利用光敏材料，把从物体表面反射的光波记录下来，这就是照相及录像，这种成像方式属于表面成像。另一种是在不切开物体或人体的情况下对其内部结构成像，这种成像的方式又可分为全息成像和层析成像。全息成像技术主要用于对物体内部目标的轮廓成像，而层析成像是将物体进行逐层剖析成像，相当于把物体切成片，然后照相。层析成像是成像技术发展到目前的最高阶段。所谓CT技术乃是计算机辅助层析成像的简称。

不“打开”物体，而了解它的内部结构，常用的办法是用波穿透物体，让波带出关于物体内部的信息。波动现象分为电磁波和机械波两大系列，例如X射线CT属于电磁波层析成像系列，超声CT属于机械波层析成像系列。

电磁法勘探和地震勘探分别使用电磁波或地震波，能否把它们称为层析成像呢？目前还不能。因为这些方法还没有达到对地球内部结构进行“逐层剖析”所要求的分辨率。但是，利用层析成像的原理和方法可以改进它们的数据采集方式，并提高这些方法的分辨率，使之用于地球内部精细结构的探测。

从物体内部图像重建的角度看，一张物体切片的图像是两个空间变量 $(x, y)$ 的函数，称为图像函数，记为 $f(x, y)$ ，用不同方向的入射波“照射”物体，观测到的波场信息至少是入射波方向 $\theta$ 和观测点位置 $\rho$ 两个变量的函数，称为投影函数，可记为 $u(\rho, \theta)$ 。1917年数学家拉当证明：已知所有入射角 $\theta$ 的投影函数 $u(\rho, \theta)$ 可以恢复唯一的图像函数 $f(x, y)$ ——拉当变换，这个定理后来成为层析成像的理论基础。总之，层析成像不仅利用波作为探测手段，而且要同时利用各种不同方向投射的波场信息，否则就不叫层析成像。

### 2. 为什么要研究地震层析成像

地震层析成像的主要目标，是确定地球内部的精细结构和局部不均匀性。这不仅可以促进地球科学的发展，而且还可以解决许多地质勘探中和矿产资源开发中的难题。既然电

磁波和地震波都可以用于地球层析成像，为什么主要兴趣集中在地震层析成像上？

第一个原因是岩石地震波的速度与岩石性质有比较稳定的相关性，适合用来对地球内部成像，而岩石的电学性质（如电阻率和介电系数）变化范围很大，与岩石孔隙中的流体关系密切，因而不利于直接用于岩性和构造的成像，反之，对找水或确定孔隙流体饱和度等专门问题，电磁层析成像反而比地震层析成像有效。

第二个原因是对于主要探测频段的电磁波，其衰减比地震波大得多，对于矿产勘探和采矿工程来说，探测目标的尺度为几米到几百米，对应地震波的波长约为几十米，即频率为数拾赫芝。这种频带的地震波在不松散的岩石中传播几公里后衰减一般不超过 120 dB，接收起来没有困难。反之，相应波长的电磁波频段为  $10^6$  到  $10^8$  Hz，在岩石中传播几十米以后就可能衰减 100 dB，难以穿透几百米的岩层。

第三个原因是电磁波的速度太快<sup>①</sup>，反映波速的到时参数在小尺度内难以测量。地震波速度为每秒几公里，不仅振幅和到时都易于测量，而且不同的震相可以在记录上区分开，可提供极其丰富的信息。

### 3. 地震层析成像在 90 年代能否取得突破性应用效果

虽然医学 CT 的成就令人信服，但地球探测的环境不像人体探测那样简单可控，地球构造也远不如人体那么有规律。因此，不少人认为地震层析成像做起来太难，目前还谈不上实际应用。是不是真的如此？

其实，早在 10 年前就有人在北欧的煤矿上进行了地震层析成像试验，并取得了良好效果。在 80 年代后期，美国国家技术研究所、加拿大多伦多大学在几个油田上做了跨孔地震层析成像试验；我国长江流域规划办公室和西安煤研所也分别在三峡及大同煤矿进行了地震层析成像试验。此外，地矿部物化探所也在三个金属矿上进行了少量试验，都取得了肯定的效果。

地震层析成像可分为跨孔采集、坑道采集、单孔采集及地面采集四种数据采集方式，其中后三种可采用常规的地震仪及震源进行。跨孔采集用的井中震源已由中国科学院电工所研制出来，接收仪器也已由地矿部物化探所研制出样机，可下井 1000 余米，井距 300m 左右。除了深层油气储层探测外，地震层析成像数据采集技术不存在很大困难。

在数据处理和地震层析成像方法研究上，“七五”期间国家自然科学基金和地震科学联合基金对地震层析成像进行了重点资助，使我国建立了一支很强的理论研究队伍，取得了出色的研究成果，并产生了国际影响。我国不仅拥有可用于成像的大中型计算机系统，而且一些早期用于图像重建的算法（如代数重建）已被普遍使用。因此，目前在地质勘探和采矿工程中推广地震层析成像技术并不存在不可克服的困难，关键在于找准问题，积累经验 and 筹集开展现场试验的资金。

## 二、数据采集和处理

### 1. 数据采集的方式和观测系统

对地震层析成像而言，数据采集的原则是：在使投影数据尽可能完全的前提下，保证

<sup>①</sup> 真空中电磁波的速度  $c = 3 \times 10^8$  m/s，介质中波速  $v = c/n$ ； $n$  为介质的折射率，对一般岩石  $n$  在 1—5 之间。

对探测目标成像的分辨率。完全的投影数据指的是探测区域内每一个像元都有从 $0^\circ$ 到 $180^\circ$ 范围内的多条射线通过。例如,在封闭的坑道网中布置适当的炮点和接收器系统,就有可能取得投影完全的地震记录。如果以跨孔方式采集数据,当井深与井间距之比趋于无穷大时,也可取得投影完全的地震记录。投影尽可能完全在跨孔方式中指的就是井孔要深一些。如两孔相距100m,探测目标是50—100m处的基岩危体,则井孔要打到130m以上,才能取得尽可能完全的投影数据。

在常规地震勘探中,主要使用地面反射和VSP(垂直地震剖面)的观测方式。它们都不能取得完全的投影数据。因此,严格来说,它们都不属于层析成像的观测系统,但可参考层析成像的原理来反演介质的某些物理参数(称为层析成像反演)。广义上看,叠前反射记录和非零偏VSP记录都包含了不同角度入射的地震波的信息,也可以认为属于投影不完全的层析成像系统。不过,层析成像的采集原则要求反射地震的排列应尽可能长,VSP的震源应有多组,并且有一组尽可能远离井孔,以便尽可能增加投影的角度范围。

什么时候使用VSP方式?VSP方式用得最多的是海上石油勘探,因为钻井平台成本太高,钻孔密度小,跨孔方式的地震采集很少有可能做。在陆地上探查的时候,如果探测目标离井不远,而且倾角较大,深部又有经过标定的反射界面,则用大偏移距VSP方式有利于对目标成像。值得注意的是VSP成像的区域很不规则,在设计观测系统时最好用射线追踪方法扫描一下成像范围。对于反射方式来说,为了应用地震CT的原理,要求较长的检波器排列,可以用道集资料进行准确波速成像的深度,一般不超过排列长度。

跨孔方式是典型的地震层析成像观测系统,本节的余下部分将主要对它作进一步讨论。

## 2. 跨孔方式采集系统的参数选择

典型的跨孔系统要求孔深不小于两孔间距。一个井孔放置震源,另一个井孔放接收器。系统的主要参数为炮间距及接收器间距,直接决定了成像时像元的大小。

在成像时,为计算方便多用均匀的矩形网格划分探测区域,形成一个个尺度大致相同的像元,并把像元内介质的平均波速作为其中心点的波速。因此,像元的宽度乃是成像时可分辨尺度的极限,对走时反演成像方法来说,最终的图像分辨率大约为3—5个像元宽度。为了提高成像的分辨率,当然希望像元越小越好。但是,像元的尺寸又受震源间距和接收器间距的限制,因为一个像元最少要有一条射线通过,否则这个像元没有存在的意义。

在最简单的情况下,设介质基本上均匀,炮和检波器平行排列,间距都为 $\Delta z$ ,个数都为 $N$ 。以 $\Delta z$ 为像元的边长,则在矩形的成像域内有两个像元只有一条射线通过,而位于中心的像元却有 $N$ 条射线通过,可见射线的分布是很不均匀的。如果介质不均匀,则可能出现有的像元不存在射线对应的情况,然而旋转一下划分像元的网格则有可能使每一个像元都有射线通过。有许多应用的场合要求炮间距大于接收器间距,这时像元宽度应比接收器间距大一些。

我认为,在确定炮间距和接收器间距的比值之后,要用试凑法求合适的观测参数。也就是说,给定不同的像元,然后在计算机上计算每个像元通过的射线数目,然后适当旋转网格,直到每个像元都有射线通过而且射线数目相对比较均匀时为止。由于成像的空间分辨率和通过像元的射线数目以及方向有关,均匀射线数目对应比较均匀的成像分辨率。

确定像元宽度之后,再看看这样的观测系统能否满足分辨率的要求。如果探测对象在成像平面上呈等轴状,如陷落柱或溶洞等,直径为 $l$ ,它等于目标的特征尺度 $l$ 。为满足

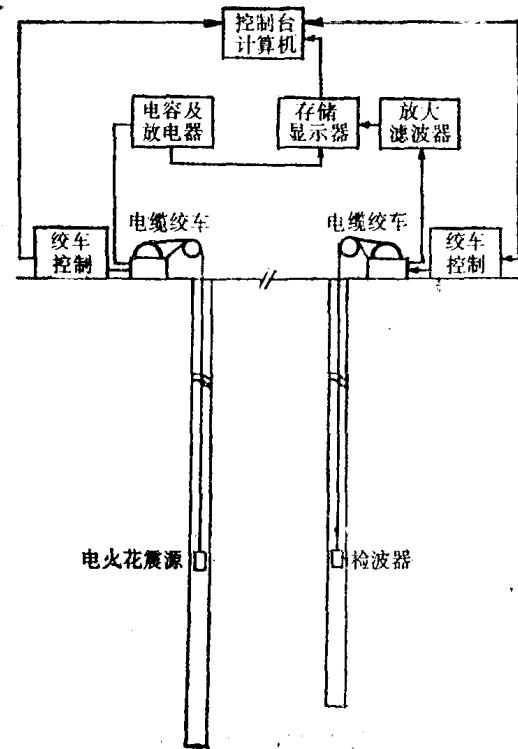
成像分辨率要求，像元宽度必须小于或等于特征尺度  $L$ 。如果仅用走时资料作层析成像，像元宽度最好小于  $4/3$ 。在多数情况下，探测对象（如裂隙或破碎带）沿某一方向延伸，这时物体的特征尺度与其长短轴长度和延伸方向有关，计算比较复杂。设  $l$  为目标短轴长度， $b$  为长短轴长度之比， $\theta$  为其长轴与井孔的夹角，可以参考以下经验公式计算探测目标的特征尺度：

$$L = l(1 + b \sin^2 \theta / 2) / 2$$

同样，像元宽度，必须小于  $L$ ，对走时最好小于  $L/3$ 。从上式可以看到，当  $\theta = 0^\circ$ ，即目标平行井孔时， $L$  取极小值，这时射线大部分与目标垂直，对成像不利。可通过增加地面方向的排列接收辅加的地震信号，来提高成像的分辨率。

### 3. 跨孔地震层析成像的设备

在 I 图 1 中显示了用电火花震源作浅层跨孔地震 CT 的一种数据采集系统，分井中震源、井中接收器排列及地面控制接收系统三大部分。



I 图 1 跨孔地震层析成像的数据采集系统示意图

采用电火花震源。如孔深大于 1 km 电容器必须下井，否则电能 在电缆中消耗过大而减少有效激发能量

在坑道之间进行地震 CT 时，用几十克的炸药做震源是可行的。煤矿中也常用防爆震源。爆炸源是典型的点震源，波形好，操作简单，但是在井中使用受到限制。因此，目前采用最多的是电火花震源。

在图 1 中电火花震源发生器包括下井的电缆和电极，以及地面的发电机及大容量电容器组。由控制台发出脉冲信号激发电容器放电，击穿电极形成电弧而产生震动。目前，中国科学院电工所已生产能量为  $1-60 \times 10^4$  J 的各种电火花发生器，频带可达 1 kHz 以上，基本上能满足 1 km 以上浅层地震 CT 采集对纵波震源的要求。他们正在研究把电容器组下井的技术，以便把下井震源的深度加大到 2—3 km。

电火花震源的优点是高效、不损坏井壁和便于控制。对 100—200 m 范围内的浅部工程探测，用几万焦耳的小电火花震源就可以了。

除了波形不标准之外，电火花震源的主要不足之处是很难定向的。目前，西方正在研究用换能器或压电陶瓷做井中定向震源，并开始了现场试验。

井中的接收器可选用水听器（用于充有液体的井）或带有抓贴装置的井中检波器（用于下套管的井孔），以三分量组合的检波器串或下井探头为最佳。如果没有如 I 图 1 所示的专门的计算机来控制绞车和地震仪，也可用人工控制绞车及固定源和接收器深度，并用勘探中通用的数字地震仪来接收信号。这种人工控制的采集系统效率很低，而且由于频带的限制，信号波形常有失真，不利于用波场信号成像。

在采集操作中，最重要的是使源和接收器与井壁保持良好的耦合。在干的裸井中悬空或摇晃的检波器肯定收不到好的信号，在坑道中检波器和岩石之间要加粘合物（如建筑上用的腻子）。加大震源能量还不如改善耦合条件，这是地震 CT 采集的一条主要经验。

#### 4. 跨孔地震 CT 记录的编辑和处理

常见的处理包括编辑、显示、初至拾取、滤波及震相分离等。编辑时，按炮点依次把对应不同深度的记录显示出来，剔除废道并作内插，然后把每个炮点号、坐标、对应接收道数及坐标记入信息库。初至波走时拾取可以在微机上用鼠标器或数字化仪来做。这时应把地震记录放大显示，以便准确地找出起跳点，建立走时数据库。要利用波场资料时，还要做线性滤波（如频率滤波，F-K 滤波等），对分离出来的有效波，决定用于波场成像的时窗，切除不需要的干扰波。

关于波场成像对应的处理，与使用地震仪的类型，环境噪音和探测目标特性有关，似乎不可能有固定的模式。例如，用逆散射方法对波速扰动成像时，首先要找出散射体的地震响应在哪里。这种响应有时表现为明显可辨的散射波组，或与直达波等其它震相干扰的响应形式，有时仅表现为直达波的散射衰减等。对于不同的响应方式应该采用不同的处理手段增加记录的信噪比。这些都是正处于研究中的问题。

## 三、成像方法

### 1. 成像方法的种类与选择

成像方法是本书讨论的主要内容，以后各篇文章都要作详细介绍，这里仅作概略评述，为阅读以下各篇起个引导。

层析成像的方法可按输入资料的不同分为三大类：（1）输入直达波走时资料的成像方法，对介质波速或波慢成像；（2）输入某种波的最大振幅或某个波组的平均振幅，对介质视吸收多数或散射系数成像；（3）输入一定时窗内的接收地震波场和背景波速对介质波速扰动成像。这三类方法可分别简称为走时反演成像，振幅反演成像及波场反演成像。从算法上来说，振幅反演和走时反演都属于求解积分方程的问题，可以化为相似的代数方程组求解（详见本书杨文采与杜剑渊的文章）。所用的算法是基本相同的。波场成像属于偏微分方程反问题，主要有衍射 CT 和逆散射 CT 两大类方法（参见本书李世雄和顾本立等人的文章）。

那么，选用什么方法成像呢？我们建议首先做走时反演成像，如果不能完全满足工程上的要求，再根据记录的特征选用振幅反演或波场反演成像。走时反演成像发展最早，算法最成熟，如使用得当可分辨尺度为 3 个像元宽度的目标，计算成本也较低。如果地震记录噪音较大，拾取走时数据的误差必然较大，则可能发现成像结果方差大、分辨率不够高的情况。这时要认真分析地震波场的特征。如果不同共炮点记录上能找到不随空间位置变化的同源散射波，则可以把它提取出来，用作波场反演成像。如果找不到明显的散射震相，但可以发现直达波或其它震相的振幅的异常变化，也可以采用振幅反演成像的方法，提供介质视吸收系数的图像，以补充走时反演成像的不足。波场振幅的异常变化可能有许多因素，如非固结工程危体或天然气等流体对地震波的吸收，探测目标的强散射等等，有时可以提供很重要的信息。但是，振幅数据与检波器耦合条件有关，要求精心施工和细微

地处理。

## 2. 关于走时反演成像算法的评述

走时反演成像方法较多，常见的有反投影技术 (BPT)，代数重建技术 (ART)，联合迭代重建技术 (SIRT)，共轭梯度最小二乘法 (CGLS)，正交分解最小二乘法 (LSQR) 以及最大熵 (ME) 法等。其中主要的算法参阅刘家琦的文章。

BPT、ART 和 SIRT 是 70 年代初期发展起来的三种老算法，当时计算机内存不够大，这些方法就是针对小内存的困难而设计的。BPT 方法分辨率太低，只用于粗略扫描的场合。下面会看到层析成像问题最后归结为求解一个线性化的方程组，其系数矩阵是大型稀疏的。早期，小计算机存放不下这个矩阵，只好用迭代的方法，使矩阵逐行进入计算机内存来求解这个线性方程组，ART 和 SIRT 的优点就在这里。一般来说，ART 法计算速度快一些，但有时不收敛。SIRT 稳定性好，但计算成本高一些。值得注意的是，这些算法原是与直线追踪相适应的，其中的迭代指的是解大型稀疏矩阵方程组的内部迭代。到 80 年代，人们考虑到介质波速扰动对射线的作用，认识到走时反演成像是个非线性问题，其系数矩阵要不断修正。这种修正可称之为外部迭代，以区别于求解线性方程组的内部迭代。同时，由于射线弯曲而且分布很不均匀，系数矩阵常常病态，因此发展了共轭梯度 (CGLS) 和正交分解 (LSQR) 等方法。对于非病态的线性方程组，这两种算法完全等效；对病态方程组，LSQR 等法更稳定些。如果你有这两种新方法的软件和弯曲射线追踪的程序，则不必再去做 ART 或 SIRT 的成像，因为这样做并不能提供更多的信息。

最后要指出的一点是，如果有内存很大的计算机，可以直接用广义线性反演方法求解走时反演成像的方程组，而不必经过内部迭代。从原理上看，用随机逆等方法直接求解线性方程组可以得到比迭代算法更好的成像结果 (更好指的是分辨率更高而方差更小)。关于随机逆法可参看本文集 III。

最后要讨论一下走时反演取得的波速图像的准确性。假如围岩是均匀介质，波速为 2000 m/s，而目标是波速为 1600 m/s 的小洞。在最理想的情况下，走时成像结果对应小洞处的波速约为 1750 m/s。如果用外部迭代不断修改射线路径，也可以使小洞处的波速降至 1600 m/s，但这时在小洞外边将出现假像，如高速晕圈等。总之，为了避免假像造成的解释错误，我们不能得到目标的准确波速，而只能辨别出波速相对变化的范围。产生波速估计不准确的原因很多，如投影数据不完全，信号频带及空间采样率有限等，在实际施工时很难避免。因此，在工程勘察时要考虑波速成像结果的准确程度，不宜直接用这些数据来计算岩石的工程力学性质及强度指标。

## 3. 关于反投影和反拉当变换

层析成像的理论问题是如何由投影数据重建图像，简称为图像重建。上面已经说过，投影指的是图像函数的拉当变换 (对直线) 或广义拉当变换 (对弯曲射线)，那么反投影或反拉当变换都是图像重建的数学描述。它们是不是一码事？这里反拉当变换指的是求拉当变换或广义拉当变换的逆。

利用投影公式反推得到的反投影算子，一定包含图像重建的最基本的运算，因此反投影可以称为最简单的图像重建 (如 BPT)，也是拉当变换逆算子的核心部分。完整的图像重建是用反拉当变换表示的，其中必定包含有反投影，也包含有诸如像滤波等其它变换算子。总之，找到反投影算子便可以成像，要从理论上看成像的效果如何，还必须推导 (广

义) 拉当变换的逆。

#### 4. 反射地震 CT 和地震偏移成像

在反射地震勘探中, 经常用到偏移成像这个词, 很容易与层析成像混淆在一起。其实, 虽然都是对地球成像, 但两者成像的对像和方法是有很大区别的 (参见本书马在田的文章)。

首先, 根据层析成像的含义, 反射地震 CT 所用的数据必须随入射角变化, 即用广角的叠前地震数据; 而对偏移来说, 无论是叠前的道集记录, 还是叠后的平面波场数据都适用。从所用方法来说, 地震 CT 的原理是求广义拉当变换的逆, 而偏移的原理是波场外推 (延拓)。最后, 从地球模型或成像结果来看, 偏移所成的像反映的是地球波阻抗的间断面, 而且是时间剖面 (即用波传播的双程反时代表深度), 而地震 CT 应给出波速分布的空间图像。

反射地震层析成像是 80 年代兴起的研究领域, 它的目标和潜力都比偏移成像高。但是, 由于发展历史短和不成熟, 目前成像的分辨率还没有达到偏移的水平, 因此应用还不像偏移那样广泛。而且, 利用反射走时的地震 CT 要求从大量的地震道集中拾取走时, 很花费人力和机时, 推广有一定的困难。此外, 基于逆散射原理的反射波场层析成像在早期得到的成像结果与偏移差别不大, 而且原理上也有一定的共同性, 因此给人们一个错误的印象, 即波场 CT 就是偏移, 而逆散射中的参考波速就是偏移速度。现在, 多数人已意识到反射地震 CT 与偏移的区别, 并努力研究超越地震偏移的反射 CT 方法。

关于地震 CT、偏移和反演的关系, 有人提出了一个公式: 地震 CT + 偏移 = 反演。我认为这种看法不够准确。除去采集和处理的内容, 地震 CT 中图像重建是地球物理反演中的一部分内容, 这在上文已详细讨论过。狭义的地震 CT 指的是利用走时数据作为投影的一种地震 CT, 由于用于计算走时的程函方程是在波速梯度很小时对波动方程的简化, 因此走时地震 CT 只能给出变化连续的地球图像。在反映具有层状结构的沉积盆地时, 它缺乏的正是用偏移成像取得的波阻抗间断面。从这个意义上看, 走时地震 CT + 偏移 = 反演是可以理解的, 因为两者的总和才能同时反映地球内部介质的突变和渐变。但是从原理上看, 考虑波场的地震 CT 就是反演, 而不必再加什么偏移。

#### 5. 地震 CT 成像的问题和发展方向

地震层析成像是地球科学研究中的新领域, 理论和方法还很不成熟, 尤其是波场成像的理论与实际应用之间还有一定距离。除了定向震源等采集装置和数据处理方法正在加紧研究之外, 成像理论中也还有许多问题需要进一步探索。

首先是不完全投影数据的 CT 成像问题。在跨孔地震层析成像中, 由于孔深限制, 投影角度一般在  $\pm 50^\circ$  之内, 反射地震排列的投影角可能更小, 小于  $\pm 25^\circ$ 。用这样的数据能否达到层析成像应有的分层剖析的效果, 应该从理论上加以研究 (参见李世雄和顾本立等人的文章)。

有人提出将数据外推使之成为完全投影的数据, 但是外推的计算依赖于具体的地球模型, 它正是我们不甚清楚而要去成像的对像。有人研究投影数据不完全对成像分辨率的影响, 推导计算最小投射角的允许范围, 用以指导数据采集的工程设计。这方面的研究工作今后还需进行。

另一个严重问题是地球介质高度的非均匀性, 这种不均匀性已超出了现今成像方法的

假设条件。例如，走时反演要做射线追踪，而射线理论只适用于波速在一个波长范围内变化很小的场合。地震勘探中波的主频一般不超过 100 Hz，对应波长为几十米，而岩层常在几米，甚至几十厘米内发生明显变化。在波场反演时，目前多用博恩近似或莱托夫近似把方程线性化，这时要假定波速的变化比波速本身小一个级次（称为小扰动假设）。实际上，工程危体或天然气层等探测目标的波速差可能很大，并不符合小扰动条件。因此，研究“大扰动”的反演成像问题会成为近期地震 CT 研究的一个焦点。由于这个问题是一个典型的非线性问题，与非线性科学的发展密切相关。

还有一个重要的研究方向乃是多分量投影资料的处理和成像。随着定向震源的研究成功，地震采集逐渐向 9 分量发展，多分量地震层析成像理论研究很快会提到日程上来。目前，对单向震源和三分量接收资料的层析成像已发表了一些研究成果，指出转换波信号的利用可以提供井间介质的更多信息。如果 9 分量采集成为现实，则还可以对介质的各向异性等新参数成像，提供探测对象的更多信息。

## 四、地震层析成像的应用

### 1. 地震层析成像和地球科学

当今，板块构造学说虽然被普遍接受，但地球科学中许多基本问题仍然争论不休。例如，板块运动驱动机制问题，如果热点假说成立，则在热点附近，地幔将具有柱状的不均匀结构；反之，如果热对流模式是正确的，则地幔剖面应体现相应的对称环状结构，它们都与热流分布有关。由于地震波速对温度变化比较敏感，对地幔波速扰动进行层析成像，为了解地幔结构、研究板块驱动机制等问题都很有意义。

总的来说，目前地球科学的发展要求了解地球内部的精细结构，而地震层析成像是目前了解地球内部精细结构的唯一有希望的手段。目前，全球性的地震台网已经建立，而且已经积累了比较完整的天然地震资料。初步的层析成像研究发现地球内部具有高度的不均匀性。但目前计算机的容量和算法不够先进，不能充分利用尽可能多的地震数据来提高成像的分辨率。例如，地幔对流说存在单层对流还是双层对流的分歧，即在深度 650 km 附近的密度界面到底是相变界面还是化学成分界面的问题。如果上下地幔的分界面是相变界面，它将促进地幔对流；反之如果是物质成分的分界面，它将阻挡和分隔地幔对流。有人曾试图用地震层析技术圈定消减带内洋壳下插的深度。如果下插洋壳明显地穿过 650 km 的界面，则间接证明了相变假说及不存在双层对流模式。遗憾的是，由于所用的数据还不够多，成像结果不够清晰，这一结果尚未被广泛接受。

### 2. 地震层析成像和能源勘探开发

地震勘探是找石油天然气的最主要方法。其实，常规地震勘探并不是直接找油气，而是找有利于油气聚集的构造圈闭。由于油气勘探的深入，容易找的构造圈闭大多已被找到，找油气的方向又逐渐转向其它的圈闭类型，如地层岩性圈闭。找岩性圈闭实质就是对反映地下岩石性质的地震波速（或波阻抗）成像，属于地震层析成像的范畴。此外，对已开发油田来说，提高产量的关键在于提高采收率。例如，如果能把采收率从目前的 30% 提高到 40%，等于给我国增加了几个大型油田。提高油田采收率的技术关键在于搞清油气储层孔隙率、渗透率和饱和度随空间和时间的分布，从而使采用最合理的开采方案成为可



能。近年来，跨孔地震层析成像与四维地震等技术构成了一门新兴的学科——开发地震学。它已成为油气储集层描述和动态监测的最主要手段。

地震层析成像不仅最早应用于煤田勘探，而且在采煤工程中有更重要的作用。目前我国已广泛开展综合机械化采煤（简称综采），综采前要求在盘区内（大小一般为  $600\text{m} \times 1000\text{m}$ ）确定稳定的煤层，其断面大于  $3\text{m} \times 3\text{m}$ ，开采方向上不能有障碍物。如果综采过程中发现障碍而不得不退回，一次就损失 20 万元。据统计，仅太原西山矿务局四个矿的煤层中陷落柱给综采造成的经济损失每年就达 1 千万元。由于其它方法的穿透深度都难以达到 1000m，目前把盘区内探测前方陷落柱的任务寄托在地震层析成像上。此外，地震层析成像在探测小断层等其它综采障碍方面也已取得良好效果。

### 3. 地震层析成像在工程地质和灾害地质中的应用

举世瞩目的长江三峡高坝电站工程，在技术上也带来严峻的挑战。例如，开挖近 200m 深的船闸航道，将有几万人在狭窄的航道底部施工，万一两侧高边坡发生塌方，则后果不堪设想。因此，必须在施工同时查清高边坡两侧地质构造和工程危体，然而，像岩石裂缝等许多工程危体的尺度很小，常规的勘探难以奏效。长江流域规划办公室预见到地震层析成像在工程危体探测中的重要作用，“七五”期间已在现场开展了地震层析试验，肯定了地震层析成像的效果。在水利工程方面，我国有许多水库和河堤要堵漏防灾，探测其中裂缝的任务十分艰巨，而地震层析成像以其分辨率高受到广泛重视。

此外，随着核电工业的发展，核废料日益增多，何处安放核废料早已成为许多西方国家极为关注的问题，并提出星外空间、深海和陆地深井三个方案。星外空间成本太高，放入深海危害生物和污染占地球表面 70% 的海洋，在陆地上也很难找到不危害人类生存的地方，因为放射性物质极易污染水源和地表。早在 70 年代末期，地震层析技术就被用来确定适用存放核废料的致密花岗岩的内部构造，选择核垃圾库的最佳场所。

### 4. 地震层析成像与金属矿勘探开发

地震勘探在金属矿的应用目前主要限于沉积矿产，这是因为反射地震在地球成层状时才能取得好的效果。金属矿区复杂的地质构造和地形给地震采集和数据处理增加了许多困难，加上地震勘探比其他物探方法成本高，因此应用不普遍。

然而，随着勘探程度的深入，勘探深部盲矿的问题变得越来越迫切，像我国东部的许多重要铜矿区和贵金属矿区，浅部矿体已经采完，而搞清深部地质构造和勘探深部盲矿又缺乏奏效的方法，因此地震方法在金属矿上的应用研究又被提到日程上来。然而，由于常规地震勘探是针对层状沉积盆地上找构造圈闭发展起来的，而金属矿构造复杂，矿体常是鸡窝状等复杂形态，无论在理论上还是方法技术上都无法把已有地震勘探理论直接套用于金属矿区，而只能求助于地震层析成像。从原理上看，地震层析成像不依赖于层状地球模型，可用于探测各种类型的不均匀体，比较适用于金属矿勘探。近年来的试验表明，可能是由于构造变动和蚀变等原因，金属矿体的纵波速度一般比围岩低 10% 到 30%，存在开展地震层析成像的前提条件。充分利用老矿区坑道和钻孔多的特点，开展方式灵活的数据采集并研究相应层析成像反演算法，可望在“八五”期间取得地震层析成像在深部金属矿勘探中的效果。同时，地震层析成像的资料还可以用于矿山工程地质和水文地质研究，为设计合理的开采方案提供基础资料。