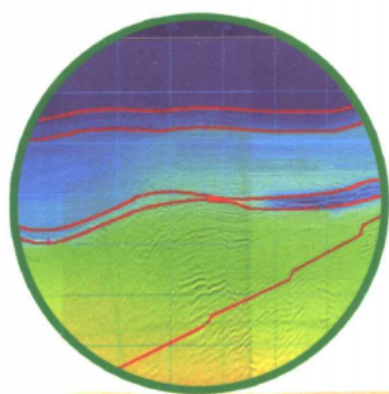


# 油气勘探

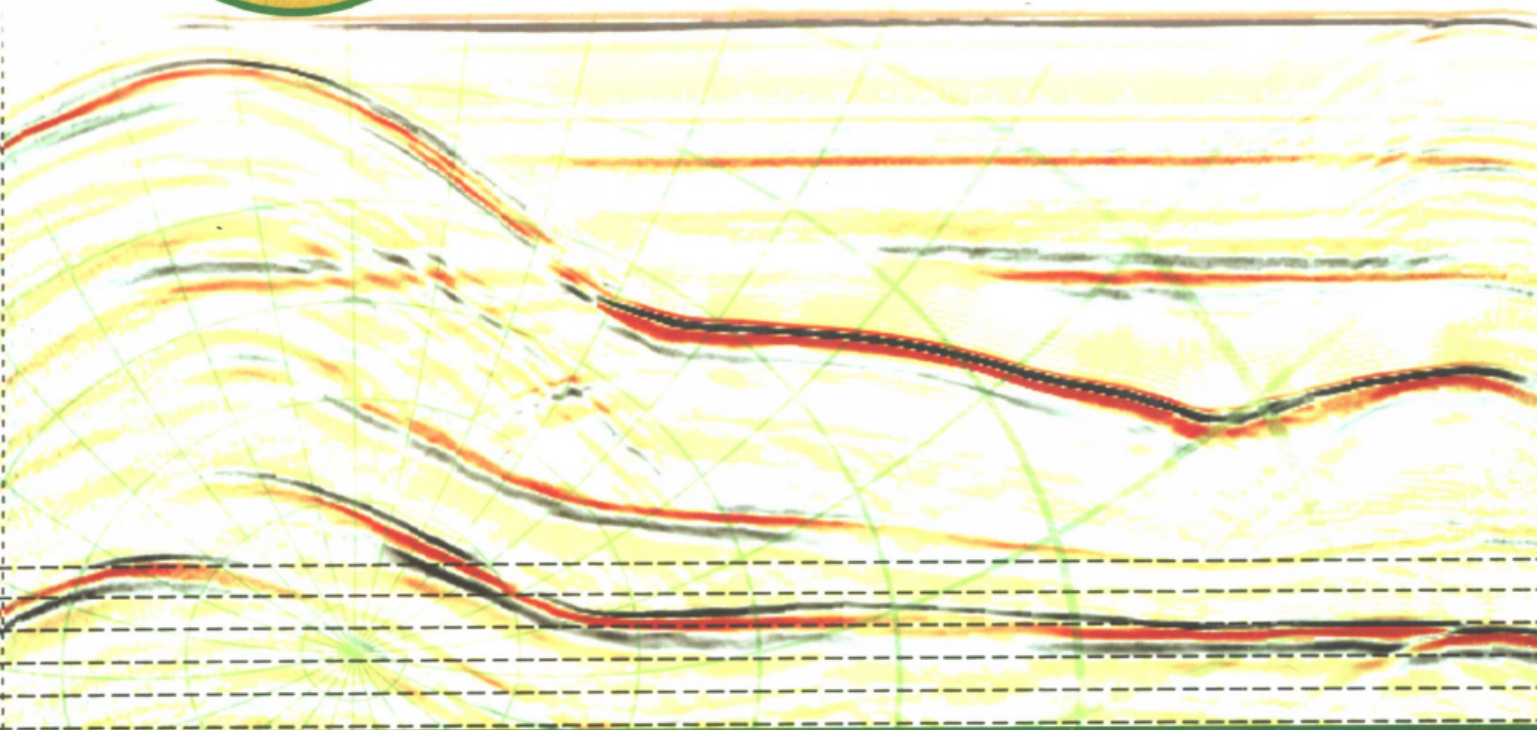
# 地震物理模型

# 图集



YOUQIKANTANDIZHEN  
WULIMOXINGTUJI

李剑峰 赵群 等著



石油工业出版社

# 油气勘探

## 地震物理模型

### 图集

YOUQIKANTANDIZHEN  
WULIMOXINGTUJI

责任编辑：王焕弟  
责任校对：王群  
封面设计：[子]中子画艺术设计

ISBN 7-5021-5637-2



9 787502 156374 >

ISBN 7-5021-5637-2/TE · 4288  
定价：198.00元

# 油气勘探地震物理模型图集

李剑峰 赵 群 等著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书按照波场模拟、构造模拟、地层—岩性模拟、缝洞储层模拟、井中地震物理模拟和应用案例模型六大类进行编排，集中展示了中国石化石油勘探开发研究院南京石油物探研究所物理模型实验室自成立以来长期研究工作的成果。

本书可供从事油气勘探的科技工作者和高等院校师生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

油气勘探地震物理模型图集 / 李剑峰等著.  
北京: 石油工业出版社, 2006.9

ISBN 7-5021-5637-2

I. 油…

II. 李…

III. 油气勘探: 地震勘探—物理模型—图集

IV. ① P618.130.8-64

② P631.4-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 084910 号

---

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](http://www.petropub.cn)

发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京晨旭印刷厂

---

2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

889 × 1194 毫米 开本: 1/16 印张: 10

字数: 253 千字 印数: 1—1000 册

---

定价: 198.00 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



# 序

超声地震物理模型实验通过对地震波在各种复杂地质体中的传播进行室内模拟观测,并根据观测结果进行地震学研究,从而为推动地震学理论和应用的发展做出特殊贡献。当前中国的油气田勘探和开发面临其他国家很少遇到的起伏多变的地表条件和深部储层地质结构多重叠合的情况。地面观测到的地震波异常不规则,造成地震资料处理解释上的困难,从而产生不正确的地质解释,对油气圈闭和储层产生误判。超声地震物理模型实验室的工作可为解决此类难题提供基础性的研究和分析问题的佐证。根据实际地震观测资料的地质解释建立的油气田模型一旦被实验室观测所证实,将为进一步的勘探开发提供方案。如二者不一致,说明地震解释方案不完善,还可以通过第二轮的模拟试验来修正解释方案。除了解释之外,地震物理模拟数据对有效的观测方案设计和处理方法的创新研究都是可贵的论证依据。

建立于1982年的南京石油物探研究所物理模型实验室20年来矢志不渝,积极进取,从成立之初的“积木式”组合仪器观测发展到目前的高精度三维定位全自动数据采集,已成为一个国际性的先进实验室。实验室已经成长为集物理模拟、数值模拟、岩石物理测试和野外采集方案实验为一体的比较完备的、开放性的地震实验室,积累了大量的物理模型实验数据和丰富的模型制作、数据采集经验。本书将南京石油物探研究所物理模型实验室20年来取得的大量成果做了一次全面的展示,收录了各类物理模型一百多个,包括波场模拟、构造模拟、地层—岩性模拟、缝洞储层模拟、井中地震物理模拟和应用案例模型六大类。相信这些模型的物理模拟对很多从事油气勘探的科技工作者具有学习和参考价值。

中国目前的油气勘探所面临的难题前所未有的。随着要求地震解决这些难题的迫切性的强化,物理模型实验技术必将不断完善并向应用领域不断拓展。从理论探讨到实践研究,从技术创新到成果验证,物理模型实验有着不可替代的作用。

本书是一本从物理模拟角度研究各种不同介质的地震波理论、观测技术和分析处理解释一体化的资料性读物。我们将从中得到新知,进而推动创新性的技术研究。因此这是一本地球物理界值得阅读的参考书,在此向大家推荐此书。

马在田

2006年7月7日

# 前 言

随着超声模型实验技术的发展,尤其是随着超声换能器技术、模型材料及模型制作技术、模型观测技术的不断发展和完善,物理模型技术将可以更加逼真地模拟现实中存在的各种观测方式,从而开拓出更加广阔的应用空间。中国石化石油勘探开发研究院南京石油物探研究所物理模型实验室正在从以下几个方面努力提升实验研究水平。

(1) 换能器技术。主攻减小换能器的尺寸和降低换能器的频率两个方向。换能器的尺寸严重地影响换能器的应用环境,只有较小的尺寸才可以更方便地观测各种复杂模型,才会有较好的耦合性能。较低频率的换能器使我们有可能在制作模型的时候根据相似性原理选用较大的比例尺,从而制作更为逼真的模型。

(2) 模型材料和制作技术。在当前的科研生产中,模型材料的选择和制作技术已经成为物理模拟研究的瓶颈问题。塔河油田的碳酸盐岩孔缝洞型储层埋藏深度在5000m以下,随机发育的大型溶洞和连通这些溶洞的裂缝体系共同构成有效的储集空间。研究这种缝洞体系的地震响应特征是有效地识别储层和设计合理的开发方案的基础性工作。选择何种材料、如何制作才能建造出更加逼真的模型,是生产实践给我们提出的要求。本书展示了一些初步的研究成果,但还有很多问题需要加以研究和解决。

(3) 观测方式的改进。我国未发现油气资源埋藏的地区几乎都是山地,包括西部和南方广大的地区。这些地区必须解决的首要问题就是起伏地表问题。在开展起伏地表物理模型研究时,不能采用传统的水槽观测,而应直接对固体模型进行观测,这样才能更加逼近野外生产实际。研究固体模型观测的问题将是下一阶段模型研究的重点之一。

(4) 室内观测和野外观测的结合。人造模型毕竟无法完全等同于野外实际情况,因此,选择情况已知、条件良好的野外试验场将会为我们搭起一座实验室和生产现场之间的桥梁。如果能够找到条件理想的野外试验场地,其地质现象丰富,地下情况清楚,那么诸如模型材料的制作等前述很多问题就迎刃而解。当然,有些情况可遇而不可求,目前正在朝这个方向努力,构筑“实验室—试验场—野外生产现场”三位一体的研究体系。

中国油气勘探所面临的许多问题都是前所未有的世界级难题,这就要求我们必须从基础工作做起。南京石油物探研究所物理模型实验室所肩负的责任将越来越重,成果也会越来越多。本书的出版只是一个开端,今后我们还会陆续推出新的版本,不

断地将我们的研究成果奉献给热心关注中国油气勘探事业的各方面的领导和科技工作者，为我国油气资源的新发现做出我们的贡献。

本书所展示的内容是中国石化石油勘探开发研究院南京石油物探研究所物理模型实验室自成立以来长期研究工作的成果，是南京石油物探研究所全体科技人员特别是历届实验室工作人员和支持、参与模型实验的国内外专家学者集体智慧的结晶。整理出版本书的目的就是要把多年来积累下来的成果奉献给社会，回报所有参与、关心和支持模型实验技术的科技人员。

本书共收录各类模型 131 个，并按照波场模拟、构造模拟、地层—岩性模拟、缝洞储层模拟、井中地震物理模拟和应用案例模型六大类进行编排，下分 29 个小类，读者按照从大类到小类的检索方法，可以很容易地查到感兴趣的模型，从模型的名字就能够知道模型的内容。南京石油物探研究所物理模型实验室建立了专门的物理模型数据库，按照本书所列的分类方法存储了所有的模型实验原始数据。有兴趣的读者可以来电来函索取，欢迎国内外的广大科技工作者使用。

自南京石油物探研究所物理模型实验室成立以来，包括欧庆贤、万有林、朱铨、赵廷寿、郭建等在内的历任领导和上级有关主管部门的领导都对实验室的建设给予了持续的关怀和支持；已经离退休和在职的实验室工作人员更是兢兢业业，十几年如一日艰苦奋斗、刻苦钻研，为实验室的发展做出了卓越的贡献。中国石化石油勘探开发研究院成立后，南京石油物探研究所的物理模型实验室建设得到了长足的发展，装备水平大幅度提高，在大量科研任务的支持下，研究水平也不断提高。研究院原院长关德范、原总工程师赵廷寿、现任院长金之钧、副院长曲寿利等领导及各职能部门都给予了大力的支持；中国石油化工股份有限公司原高级副总裁牟书令、原高级副总裁曹湘洪、科技发展部副主任张永刚、处长许卫平对实验室的建设关怀备至，除经费投入外，更是对技术的发展走向、研究思路等诸多方面给予了指导；众多长期合作的兄弟单位和科研院所、高等院校也对实验室的发展给予了多方面的关注和支持。正是以上各方面领导、专家、同志们的大力支持，南京石油物探研究所物理模型实验室才有今天欣欣向荣的大好局面。本书所展示的内容包含了他们的心血。此外，南京石油物探研究所管路平、赵改善、曹辉、朱成宏、严建文、杨勤勇、方伍宝、胡中平和研究所学术委员会的许多同志都从不同的侧面直接或间接地参与了本书的编辑出版工作。在此书出版之际，特向以上提到的以及其他一些没有提到的有关领导、专家学者和同志们致以真诚的谢意。

# 目 录

绪论(Introduction) .....	(1)
1 波场模拟(Wavefield modeling) .....	(14)
1.1 多次波(Multiple wave) .....	(15)
1.2 绕射波(Diffracted wave) .....	(17)
1.3 回转波(Turning wave) .....	(22)
1.4 断面波(Fault plane wave) .....	(24)
1.5 转换波(Converted wave) .....	(25)
1.6 横波分裂(Shear-wave splitting) .....	(26)
1.7 全波测井(Full-wave logging) .....	(27)
1.8 多孔介质中的声波(Acoustic waves in porous media) .....	(28)
2 构造模拟(Structure modeling) .....	(29)
2.1 背斜模型(Anticlinal model) .....	(30)
2.2 向斜模型(Synclinal model) .....	(36)
2.3 断层模型(Fault model) .....	(39)
2.4 复合构造模型(Compound structure model) .....	(50)
3 地层—岩性模拟(Stratigraphy—lithology modeling) .....	(54)
3.1 地层模型(Stratigraphy model) .....	(55)
3.2 岩性模型(Lithology model) .....	(68)
4 缝洞储层模拟(Fracture—cave modeling) .....	(73)
4.1 裂缝模型(Fracture model) .....	(74)
4.2 溶洞模型(Cave model) .....	(94)
4.3 缝洞组合模型(Fracture—cave model) .....	(103)
5 井中地震物理模拟(VSP & Crosswell modeling) .....	(107)
5.1 VSP 模型(VSP model) .....	(108)
5.2 井间地震模型(Crosswell model) .....	(110)



6	应用案例模型(Models from case studies)	(123)
6.1	玄武岩模拟(Basalt modeling)	(124)
6.2	膏岩模拟(Anhydrite modeling)	(128)
6.3	广角地震模拟(Wide angle seismic modeling)	(129)
6.4	三维缝洞模拟(3D fracture-cave modeling)	(132)
6.5	风化面模拟(Weathering surface modeling)	(136)
6.6	高陡构造模拟(High-angle structure modeling)	(140)
6.7	起伏地表模拟(Ragged surface modeling)	(144)
6.8	煤田陷落柱模拟(Coalfields collapsed column modeling)	(145)
6.9	海洋二维地震模拟(2D marine seismic survey modeling)	(146)
6.10	陆上复杂二维地震模拟(2D complicated land seismic modeling)	(148)
	参考文献	(151)



# 绪 论

(Introduction)



## 引言

“超声地震物理模型”常常被表述为“超声地震物理模拟”，建立“模型”就是为了“模拟”，模型(model)和模拟(modeling)尽管含义不尽相同，但在中外文专业期刊或杂志中经常交错使用来表示几乎相同的内容，读者一看就明白，不会引起任何误解。因此，我们在本书中交错使用了模型和模拟这两个词，含义差别一看即明。

地震物理模拟研究是指利用物理模型对地震及有关现象特别是波动现象进行研究。它是实验地震学的一个重要组成部分，国外文献称之为“模型地震学”(Model Seismology)。模型地震学研究中最普遍使用的方法是超声波方法，故常称为超声地震模拟。

《辞海》中对“模型”的解释为：实物，设计图或设想，按比例、生态或其他特征制成的同实物相似的物体，供展览、观赏、绘画、摄影、试验或观测等用。常用木材、石膏、混凝土、塑料或金属等材料制成。《新华字典》对“模型”的解释为：依照原物或计划中的事物(如建筑)的形式做成的物品。《辞海》对“模拟”的解释为模仿。在《现代科学技术词典》中，“模拟”的解释为：一个物理变量，它保持同另一个变量在某一特定的范围内有相同的比例关系，例如，一个温度可用一个电压来代表，后者就是前者的模拟。可见，模拟或者模型的基本含义就是用一个东西(一般是简单一些的东西)按照一定的相似性要求去“代表”另一个(往往是复杂一些的)东西，从而满足人们的某种特殊需要(如观赏、研究等)。模拟一词最早见于《北齐书·魏收传》：“江南任昉，文体本疏，魏收非直模拟，亦大偷窃”。

宏观而论，模型(或者模拟)作为一种思维方式，发展源远流长，可以说伴随着人类从野蛮走向文明的全过程。其发展过程大致可以分为逐渐上升的三个阶段。最初阶段的模型或者模拟思维方式在人类产生的初期就已经存在。人类的先民们通过观察和模仿自然界中的一些现象，使自己逐渐积累知识，发展壮大。如模仿鸟类“筑巢而居”，模仿野兽“洞穴而居”，这种直觉的自然的“模拟式”思维方式是人类快速进步的根本，使人类能够很快地超越“动物界”。这种思维方式是普遍存在的而且一直伴随着人类成长的各个阶段。随后，模拟(或者模仿)的思维方式逐渐上升到艺术层面，人们模仿大自然的美景制造出各种艺术作品来点缀和美化日常生活，把大千世界的千姿百态和五彩缤纷搬上画布、挂上墙壁、摆进厅堂，从而逐渐产生了各种各样的艺术形式如绘画、雕塑等。最典型的是中国的山水盆景艺术，盆景能够“移天缩地，盆立大千”，将大自然优美景色浓缩于一盆之中，“一勺则江湖万里，一峰则太华千寻”，以少胜多，以小见大，达到“咫尺之内而瞻万里之遥，方寸之中乃辨千寻之峻”的艺术效果。这些都运用了“缩龙成寸”、“小中见大”的“模拟”艺术手法。随着科学的发展，模拟的思维方式被逐渐应用到科学研究中来，人们学会用抽象简化的模型观察研究复杂的自然现象，或用一种人类熟知的事物去模拟研究另一种人类未知的事物，用经济的方式模拟昂贵的对象等。大到天体模型，小到原子模型，复杂的有高楼大厦和建筑桥梁的力学模拟、地球模拟、天气模拟、核武器模拟等等，可以说模拟或者模型手段是科学研究中一种常用的手段。

地球物理模拟又有其不同于一般物理模拟的特殊性。譬如桥梁的力学模拟，可以精确地知道所用材料的力学特性，模拟结果也可以通过直接对桥梁受力状况的测量得到验证；天气模拟也有同样的情况，空中每一个点的风力、湿度等参数理论上都可以精确地测量，模拟的结果也可以通过精确的测量得到验证。但地球物理模拟不同，我们不可能钻到地下去精确地测量地下地层每一点的各种参数及其纵横向变化情况，地下数千米深处地震波场传播情况的模拟结果也无法得到精确的验证。这充分说明了地球物理

模拟的难度,这种难度一方面对地球物理模拟提出了更高的要求,另一方面说明了地球物理模拟的重大价值。

广义的地球物理模拟包括固体地球物理和勘探地球物理两大分支学科中的模拟研究。其基本原理就是使物理原型遵循物理的和几何的相似准则,依照一定的比例因子,在实验室内建造一个相似模型,观测所建造的模型中的地球物理场的特征。通过对条件已知的、理想化了的模型中的地球物理场的观测,建立起模型介质的结构、构造、物理性质及其变化规律与地球物理场的特征及其变化之间的关系。这一关系可以推广应用到从物理原型上观测到的地球物理场,从而实现对物理原型的研究和探测。地球物理模型实验是固体地球物理和勘探地球物理基础理论和方法技术研究的重要手段。

地球物理模拟实验中,所模拟的介质体物理原型,可以是整个地球,或者是地壳、上地幔,也可以是区域或局部的地质构造,甚至是一种类型的断层和单一岩层、岩性的局部变化,以及矿体的赋存等。所观测的地球物理场,可以是超声(地震)波或电磁波,也可以是热、电、磁、重力场的分布,还可以是岩(体)、(混凝)土样品的力学性质和放射性质,或者是它们在高温高压下的光、电磁及声辐射特性等。地球物理模型研究的另一个重要内容,是研究样品的岩石性质、力学性质与其他物理性质的关系,从而为探测地下岩性提供实验依据。由此还派生出岩土检测技术,可用于坝基和坝体、桥梁和桥墩,以及洞室等各种工程中的岩土力学性质的原位测试和无损检测。由此可见,地球物理模型实验直接或间接地服务于基础地质—地球物理的调查研究、能源和矿产资源的探测、地质灾害和地震预报、工程地震、大型建筑的地基和构件强度测试等,与国民经济和国计民生有关的众多领域密切相关。地震超声物理模拟是地球物理模拟实验技术领域最重要也是最活跃的组成部分之一。

近年来,由于计算机的广泛使用和计算技术的发展,在地球物理学研究中,人们常常使用数值模拟的方法,即数学模型。数学模型和物理模型都是物理原型理想化的结果,但两者各有所长。数学模型需要事先知道被研究对象的数学描述,模型制作相对容易,而且可以随意修改,但计算得到的地球物理场往往受先验认识的限制而与实际地球物理场存在这样和那样的差别。物理模型在选择模型材料和模型制作方面难度较大,制成的模型也很难修改,但是,一旦模型制作成功,观测方式选定后,所观测到的地球物理场就不受先验认识的影响。因此,将两种模型实验结合起来,可以互相取长补短,促进地球物理学模型实验研究的发展。

## 地球物理模型研究的发展历史

地球物理模型研究的起源最早可以追溯到20世纪初期。20世纪20年代,英国地球物理学家E. C. Bullard提出了用超声波模拟地震波,在小尺度模型上研究地震学问题的设想。日本的寺田寅彦所做的瑞利波实验是最早的地震模型实验之一。1927年, Terada和Tsuboi(1927)利用琼脂做过一个模型,他们用电磁脉冲做震源,观察了诸如地震波随深度变化以及传播路线上断层和河道的影响等情况,同年, Tsuboi(1927)还利用一个二层模型对瑞利波的散射和传播路径进行了研究。1936年, Rieber(1936)利用电火花震源拍摄了波前在空气中通过曲面和尖形边界时P波反射和绕射的图像。1939年, Schimidt(1939)发表了一篇文章,用暗线摄像技术记录了半透明层状模型界面上波的反射、折射和绕射波波前。他是第一个验证了波由低速介质入射到高速介质时所产生的折射波曲面波前的学者。这种波在Schimidt发表文章之前,一直没有被人们直观地认识到。

20世纪40年代末50年代初,电子技术迅速发展,钛酸钡及锆钛酸铅等压电陶瓷器件问世,大大推

动了超声波在各个方面的应用，同时也推动了地震模型实验的系统研究，仪器、模型材料和实验方法都取得较大进展。Kauffman 和 Roeve (1951) 曾建立了一套在实验室条件下研究瞬变波的仪器，他们还利用一个简单的蜡质模型辨认了反射波、折射波和面波。Evans 等 (1954) 和 Levin, Hibbard (1955) 研究了震源和接收器的尺寸所导致的标定问题，认为对模型实验进行适当的标定可以有效地研究实际情况下的波动过程。美国学者 J. Oliver (1954) 等利用 Love 的平面应力理论系统地阐明了二维地震模型理论。美国、前苏联等国家的地球物理学家先后用超声波成功地进行了一些地震模型实验，模型地震学在地震学和地震勘探等领域得到快速的发展和应用。

Angona (1960) 的论文可能是第一篇讨论专门为解决勘探问题而设计的模型的文章。这篇论文所讨论的模型是一个用多种弹性材料制成的二维模型，所用的材料包括有机玻璃、铜、铝、钢和环氧树脂。速度的变化是通过把不同材料的薄片胶结在一起来实现的。调整各层薄片的厚度，可以使制成的模型的复合速度在一切介质的速度范围内变化。

Hall (1956) 指出，模型尺寸按比例缩小决定了激发源的频率成分必须改变。1000 : 1 的线度缩小比例要求反射地震法 5 ~ 100Hz 的工作频率按比例变为 5 ~ 100kHz，这就要求我们在模拟实验中使用高频激发源。

20 世纪 60 年代至 70 年代初，模型地震学研究取得了相当丰富的成果。1966 年和 1972 年，各国地球物理学家两次在布拉格附近的利比利斯堡召开了模型地震学专题讨论会，发表了许多重要成果，如德国学者 I. Behrens 等 (1971, 1972) 成功进行的一阶不连续面上波传播的运动学、动力学模拟研究等。在这一时期，国外学者还进行了天然地震震源辐射特征等一系列基础地震学实验工作。这一阶段的一个重要贡献是，人们认识到把模型浸在水槽中研究反射波是一种理想的方法，从而初步形成了日后被广泛应用的基于水槽的“French-Marcoux-Matzuk”模型系统。

20 世纪 70 年代，物理模型研究的重点是单界面的地质系统。震源激发的能量以水为介质传播，在水和模型的界面上形成反射并被记录下来，实验的目的是为了得到界面的正确成像。另一个被广泛关注的问题是模型材料的研究。人们曾实验研究过石蜡、黄铜和各种塑料，最终发现硫化硅橡胶比较适宜。同时，随着科学技术的迅速发展，地震模型实验的手段得到了显著加强。例如，计算机数据采集使超声地震模型实验摆脱了胶片感光记录，大大提高了实验效率和数据处理分析能力。先进的实验装置和数据采集系统使超声地震模型实验能够模拟更为复杂的地质构造问题，从而引起了人们更大的兴趣。1977 年，在数十家公司的赞助下，美国休斯敦大学超声地震模型实验室正式建立，很快就在石油地球物理勘探问题的模拟方面进行了大量的工作，取得了一系列成果。俄罗斯科学院、荷兰 Delft 科技大学、加拿大的 Calgary 大学等都相继建立了地震物理模型实验测试系统，地震物理模型实验技术进入稳定发展阶段。

我国的地球物理模型实验研究是在新中国成立之后才起步的，大致可以分为以下几个阶段。

20 世纪 50 年代初、中期是起步阶段。这一时期的工作主要是在刚成立的地质勘探院校中建立模型实验室，用以培训学生在地球物理勘探技术方面的基本技能，为我国地球物理专业人才的培养发挥了重要作用。

20 世纪 50 年代后期至 60 年代中期，是物理模型实验由单纯为教学服务向教学和科研服务转变的新时期。北京大学、地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所、中国科学院地球物理研究所等单位相继建立了模型实验研究室，从前苏联引进或自行研制超声仪，开展了固体二维模型实验和液—固体三维模型实验等一批超声地震模型实验研究。

1975年,湖南湘潭无线电厂与北京大学协作,研制了我国第一批由厂家批量生产的声波仪。我国大多数超声地震模型实验和声波工程测试工作都使用过该仪器及其改型换代产品。

20世纪70年代后期以来,超声地震模型实验进入了一个全面发展而又富有成果的阶段。继北京大学于1978年率先恢复超声地震模型实验室之后,全国各地先后建立了70余个实验室,南京、上海、北京、长春等地建起了6个大中型水槽超声地震模型实验系统,装备达到或部分超过国外同类实验室的水平。

从20世纪80年代开始,国内的一些行业科研单位和院校也都相继建立了大型地震物理模型测试系统。南京石油物探研究所于1983年设计完成了一套大型高精度地震物理模型定位系统和数据自动控制采集系统;同济大学于1985年由多家单位赞助建立了物理模型实验系统。此后,长春地质学院、石油大学(北京)等院校也相继建立了物理模型实验室,推动了国内地震物理模型实验研究的广泛开展。

南京石油物探研究所物理模型实验室始建于1982年,成立之初只有3个人,分别负责仪器、制模和观测。实验室采用“积木式”组合仪器进行实验。一台仪器,两个换能器。仪器为湖南湘潭无线电厂SYC-2型声波岩石参数测定仪(晶体管集成电路、数显记时、双线示波,可进行一发双收,发射脉冲宽度可调)和50kHz压电陶瓷换能器。模型采用的是单一板状材料。实验得到的只是透射波的模拟(照相)记录。

1984年,经过两年的不断建设,实验设备和观测方式都有所改进。发射仪为SYC-3型声波岩石参数测定仪,数据可以打印记录,并与计算机(Z80型)配合使用。自制刻有尺度水箱(1m×0.5m×0.7m)。采用水中观测反射波,8位A/D转换,采样率0.5μs,记录长度512μs,数据存储存储在5in的120K软盘上。完整地采集一道需要一分多钟时间。物理模型实验室初具规模。

在“六五”期间,南京石油物探研究所物理模型实验室承担了国家“六五”第二十项重点科技攻关项目“南方海相碳酸盐岩地区油气普查勘探技术方法研究”中的“地震模型和物性测定方法研究(W-5-7A)”课题。该课题的重要内容之一是与南京工学院合作开发研制“DM-2085型微机控制三维坐标定位仪及数据采集系统”。该系统历经三年研制成功,一举实现了模型实验的自动化。自行研制了换能器,频率范围为50kHz至1MHz。采用大型水槽(2m×1.8m×3m),一个星期可采集一条二维线。实现了南京石油物探研究所物理模型实验室发展的第一次飞跃。实验室人员也得到了加强,最多时达16人。由于整体实力的提高,此后,实验室陆续开展了一系列的基础研究工作和面向生产的应用模型研究工作,发表了相当数量的文章,其中不乏国内首创的研究成果。如在国内最早开展的横波分裂物理模型实验研究及P波方位各向异性物理模型实验研究,实验获得的结果在当时被认为处于国际领先水平。这为南京石油物探研究所物理模型实验室在国内外赢得了一定的声誉。

南京石油物探研究所在并入中国石化石油勘探开发研究院后,物理模型实验室迎来了第二个飞跃发展阶段。在中国石化科技部和石油勘探开发研究院的大力支持下,对原有地震物理模拟采集系统进行了大规模改造。经过持续数年的开发、研制和引进,建成了目前国内领先的超声地震模拟数据采集系统。该系统包括测头定位跟踪系统、压力测试系统和三维表面测试系统,23位、20MHz采样的A/D转换,采样率和采样点数可调。数据采集方式实现连续不间断采集,每分钟350道数据(每道10000个样点)。提高了定位精度,缩短了测试时间,提高了实验应用能力。同时,完善了从岩石物理测试到模型制作的一系列配套设备,为开展各种复杂的模型实验、更逼真地模拟各种野外观测系统创造了条件。实验室科技力量配备更加齐全,包括了模型制作、模型观测、数据分析、岩石物性测试、数值模拟及野外观测施工等各类专业人员。

## 油气勘探地震物理模型图集

现在的中国石化石油勘探开发研究院南京石油物探研究所物理模型实验室是一个国际性的开放性实验室。拥有包括大型（固体、水中实验两用）高精度三维地震快速数据采集系统（图1）、数据分析处理解释系统、正演数值模拟系统、复杂模型制作系统（包括大型雕刻机）、高温高压岩石物理参数测试系统（包括岩样制作）、192道浅层地震仪（图2）、八级三分量数字检波器 VSP 测井系统，以及围绕这些设备

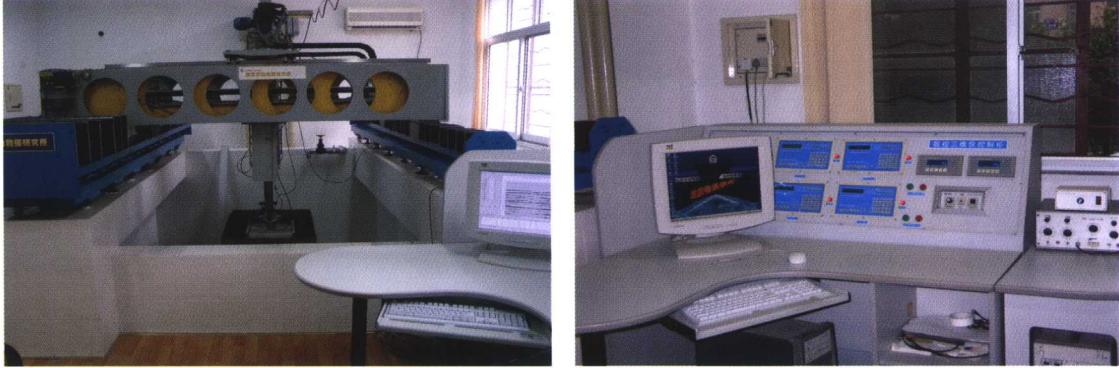


图1 南京石油物探研究所物理模型实验室地震物理模拟三维定位及数据采集系统

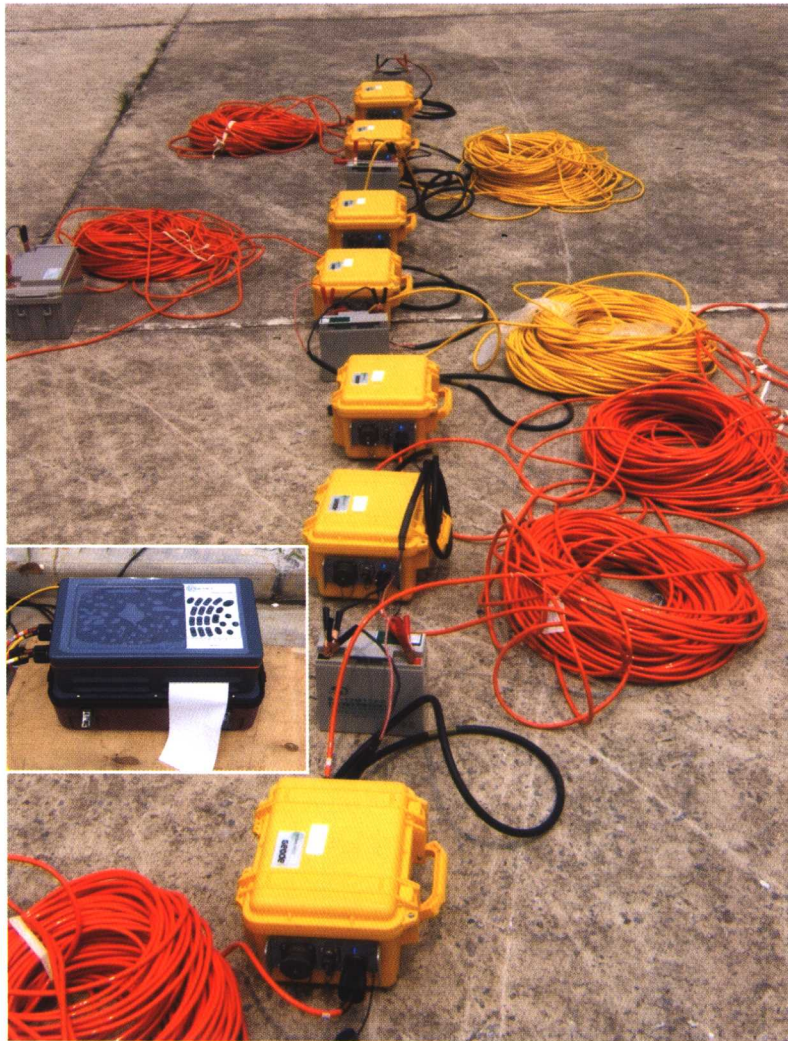


图2 192道浅层地震仪

配置的专业研究人员。形成了一个从岩性测试、模型制作、模型实验、数据分析、野外大比例尺模型实测到井下VSP测量的完整的、综合的研究体系。能够承担从复杂波场基础理论研究、勘探地震技术到开发地震技术的全方位的研究工作。

改革开放以来,随着科学技术的迅速发展,物理模型技术有了很大的提高。特别是计算机技术的飞速发展使得物理模型技术得以与计算机技术紧密结合,实现了记录数据数字化,得到了与野外地震生产一样的数字记录,使模型实验与实际生产紧密地联系起来。地震物理模型实验也从一般的室内理论研究发展到了直接为野外生产服务。

## 超声地震物理模拟的基本原理

超声地震物理模拟实验以无量纲波动方程的不变性为理论基础,按照几何尺度和物理参数的相似性准则,选择适当的模型材料,建造小尺度的物理模型,用超声波在模型中的传播模拟地震波在地下介质中的传播。在模型上观测取得数据,再通过震相识别和震相分析,研究波的运动学和动力学特征,进而解决与波传播相关的各种问题。因此,相似理论、模型材料和模型建造、实验仪器和观测技术,以及震相识别和震相分析,构成了超声地震物理模型实验的基本理论和方法。

### 超声地震物理模拟的相似性准则

相似性准则是地震物理模型的基础。正确模拟地震波传播的物理过程和现象应考虑下述相似性原则:

- (1) 发生在模型中的物理过程与原形中的物理过程服从同一自然规律,可以用相同的物理方程描述;
- (2) 描述模型与原型的物理量应相似;
- (3) 模型与原型的空间条件和时间条件应相似。

超声地震物理模拟利用超声波在模型介质中的传播模拟地震波在地下介质中的传播,二者具有相同的波动传播机理,同样可以用波动方程来描述。同时在开展模型实验时完全模仿野外地震勘探的真实生产过程,具有很好的相似性。

开展物理模拟实验时必须考虑如下三方面因素:

(1) 模型按比例缩小所带来的问题。一般模型的大小都受一定的空间条件的制约,比如要能够放在水槽之内或者加工设备能够容纳的大小,因此模型都是根据具体的模拟对象按照一定的线度比例缩小制作的。

(2) 模型介质的物性参数要尽可能与所模拟对象的物性参数一致,这些参数包括速度、密度、泊松比、弹性模量,以及孔隙度、含流体饱和度等。

(3) 野外地震勘探实际使用的地震波频率只有10~100Hz(随着数字检波器的出现,频带在不断拓宽),这实际上决定了地震勘探对地下地层的分辨能力。也就是说,在实际的地震勘探中,地震波长相对于勘探地层的尺度关系是既定的。模型实验一定要考虑这个因素,模型的尺度按比例缩小的时候所用的超声波的频率必须按比例增加。只有这样才能与地震勘探有很好的相似性。

用波动方程可以推导出一系列的相似性比例关系,在很多文献中可查阅到相关公式,这里不再赘述。在实际的模型实验中,一般首先要选择模型制作材料,使模型的物性参数(如速度等)与被模拟对象的相应参数尽可能相同。在物性一致的情况下(如模型速度与地层速度相同),比例因子的选择有两种方式:



(1) 根据尺度比例确定模拟实验的超声频率。根据研究对象的大小可采用  $10^{-2} \sim 10^{-7}$  的尺度比例因子, 如果模拟常规地震 ( $10 \sim 100\text{Hz}$ ), 则模拟实验的震源频率应当为常规地震频率的  $10^2 \sim 10^7$  倍, 即  $1 \sim 10^6\text{kHz}$ 。

(2) 根据模拟实验的超声频率确定模型的尺度比例因子。实验室采用的超声波频率一般在  $10^4 \sim 10^7\text{Hz}$  范围之内, 而地震勘探中地震波主频约在  $10 \sim 10^2\text{Hz}$  范围之内, 后者的波长大约是前者波长的  $10^2 \sim 10^7$  倍, 按照几何尺度和物理参数的相似性准则, 一般可以选用  $10^{-2} \sim 10^{-7}$  倍的尺度比例因子来制作模型。

### 模型材料的选择和模型制作

选择符合相似性要求的模型材料, 将原型转换为模型, 是超声地震模型实验的关键技术之一。根据问题的需要, 一般可以选择现有的固体、液体或气体材料来构造各种固体、液体、气体、固体—液体、固体—气体模型。当现有材料不能满足相似性要求时, 还需要通过粘合、钻孔(填塞)和混合等方法调节材料的密度、波速等物性指标, 形成一些新型复合材料, 以弥补现有材料的不足。

建造模型时, 可针对模型的种类和材质采用相应的成型技术。建造固体模型常用粘合法、浇铸法和夹具法。粘合法选用适当的粘合剂把各个部件粘合在一起组成模型; 浇铸法将易熔材料加热熔融为液态, 浇注到模具内与其他部件结合, 冷却后模型即铸为一体; 夹具法先在各预制部件的接触面上涂加耦合剂, 然后用特制的夹具以夹、挤、压等方式将各部件固定组合在一起。液体模型建造的关键在于把不同液体分开, 同时又不影响界面的耦合。实践证明, 用聚乙稀薄膜做分隔物是较好的方法之一。

### 实验仪器和观测技术

仪器和换能器的组合与实验效果有密切关系。应该对仪器、换能器进行系统标定, 掌握系统的频带范围、灵敏度和换能器的方向特性等指标。其中换能器的方向特性对于超声地震模型实验的观测方案设计尤为重要。

超声换能器按其偏振极化特性可分为横振动型和纵振动型两种。前者对平行其端面某一方向的振动反应最为灵敏; 后者则对其端面法线方向上的振动最敏感。此外, 在发射电压作用下, 横振动型换能器与纵振动型换能器在辐射特征上有显著区别。只有通盘考虑模型的结构、尺度、介质性质和震相的质点振动方式, 选配适当的换能器组合, 调整换能器与模型的耦合方式, 才能获得满足震相识别和震相分析的实验记录。

### 震相识别分析与传播规律研究

以不同的振动方式, 经过不同的传播路径, 由震源到达测点的地震波动称为震相。震相可由其运动学和动力学两方面的特征描述。波动传播的路径及其距离和时间的关系称为运动学特征; 而波动的质点振动方式、振幅、相位、频率等称为动力学特征。

超声地震物理模型实验中的震相识别主要是正演识别, 即按照实验模型的介质条件、震源和观测点的相对位置, 运用地震学的基本理论进行震相分析, 做到对震相的特征心中有数; 然后, 再仔细分析观测记录, 运用各种方法揭示震相的运动学、动力学特征, 并与理论分析结果相对照, 从而识别确认震相。