

中国自然科学核心期刊
全国地震科技期刊评比优秀奖
第18卷 第6期A

ISSN 1003-3246
CODEN DDGYEQ
Vol 18 No 6 A

地震地磁观测与研究

SEISMOLOGICAL AND GEOMAGNETIC
OBSERVATION AND RESEARCH

1997

ISSN 1003-3246



9 771003 324004

国家地震局地球物理研究所 主办
中国地震学会地震观测技术专业委员会

PDG

地震地质观测与研究

第 18 卷 第 6 期(A)

目 次

地震核查与地震研究

许绍燮 (1)

地下爆炸的矩张量反演

倪江川 陈运泰 吴忠良 王培德 王 璋 柯兆明 (5)

用 ICHAM 方法对东哈萨克斯坦地下核爆炸的识别研究

王碧泉 王春珍 范洪顺 付丽萍 陈佩燕 (14)

地下核爆炸识别判据 m_b/M_s 及其分类器的研究

边银莉 黄汉明 王春珍 (23)

东哈萨克斯坦试验场地下核爆炸记录图特征及识别判据的研究

王春珍 王碧泉 付丽萍 (3)

核爆炸模式识别系统 PRSNE

范洪顺 王碧泉 边银莉 王春珍 陈佩燕 付丽萍 黄汉明 韩志强 (41)

核爆炸地震数据库系统

朱文林 张 昱 黎 明 张德存 吴忠良 牟其铎 (50)

利用尾波估计地下核爆当量

姚栋华 马云生 张天中 (55)

用 Lg 波和 P 波数字化资料鉴别与当量估计东哈萨克斯坦核爆炸的方法研究

林邦慧 李大鹏 王海军 张 兵 (60)

核爆炸强地震信号测量方法

李学政 雷 军 (70)

计算机网络系统安全认证机制的研究初探

姚栋华 张伯明 (78)

识别核爆炸的可靠性分析

王碧泉 范洪顺 边银莉 王春珍 (82)

责任编辑 李瑞芬

本文辑收到日期: 1997-09-15

编者按 地震核查是全面禁止核试验(CTBT)的国际监测系统(IMS)中目前最有效的方法之一,在我国有许多科技工作者为此努力工作,并不断取得新进展,为我国国防建设做出了突出贡献。由于核查研究涉及到保密问题,因此,学术交流和发表论文的范围和机会较小。考虑到核查研究深入发展和科技人员个人进步的需要,在不违反保密原则的前提下,选择了部分研究论文刊登,并仅限核查有关人员交流使用,不公开发行。

地震核查与地震研究^{*}

许绍燮

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

1 核爆炸试验与地震研究

第一颗原子弹试验爆炸,就受到了地震学研究的关注。美国著名地震学家 Gutenberg 测得其起爆时间是 1945 年 7 月 16 日 12 h 29 min 21 s(G.C.T)。可能这也就是第一颗原子弹最精确的零时了。因为试爆当局计时的精度是 15 s,而 Gutenberg 的走时精度为 2 s。

1946 年 7 月 24 日在比基尼珊瑚岛附近进行了第一次水下原子弹爆炸。在爆心距为 69.0°到 78.6°之间的 8 个地震台记录上获得了清楚的 P 到时,第一次给出了 J.B 走时表的平均残差为 -1.8 ± 0.8 s。以后又获得了 P 波走时残差为负的结果,数值约为 -2 s。这是地震学家第一次有机会精确校验 J.B 走时表。

Bullen K E 作为 IASPEI 主席,在 1957 年 9 月 IASPEI 的多伦多大会上,发表了“在原子时代的地震学”的演说。作为一个处于顶层的地震学家,他已经洞察到地震研究可从核爆炸试验中得益。在会议期间获悉美国预告了 1957 年 9 月 19 日将在内华达试验场进行首次地下核试验,这就是以后称为“Rainier”的地下核爆炸。也是美国当局第一次预告起爆时间的核爆炸。又是地下爆炸,又是事先知道起爆时间,这对地震研究的重要性是更上了一层楼。许多地震学家,离开 IASPEI 会场去野外布设观测仪器。

但是另一方面,国际社会对核爆炸试验对环境的污染,国际气氛的毒害日益不满,禁止核试验的呼声也与日俱增。

1958 年 8 月,一些国际的科学家聚会日内瓦,讨论了用地震方法侦察地下核试验的问题,以为全面禁止核试验提供核查监测手段。

1958 年日内瓦会议的结论是乐观的。但是次年的进一步地下核试验发现了许多难点,使当时侦察地下核试验蒙上了阴影。

美国迅即投资 2 亿美元,开展十年“维拉”计划,期望从全面提高地震学的水平来攻克

^{*} 国家地震局地球物理研究所论著编号 97A0083

地震核查的难关。各国地震学家也都分头全力以赴,持续经历了40个春秋。

1976年日内瓦裁军会议(CD)组织了GSE(审议关于检测和识别地震事件的国际合作措施特设科学专家小组)。GSE(1976~1996)组成的20年中,召开了45届大会,组织了3次全球大规模的地震监测技术试验,对设想中的未来全面禁试条约(CTBT)的地震核查国际监测系统(ISMS)进行了实际试验。特别是第3次试验GSETT-3的成功经验,为CTBT的IMS创建了样板。

1996年9月联合国大会通过CTBT(全面禁止核试验条约)。9月24日5个核大国率先签约,以后已相继有130多个国家签字。CTBT禁止任何核武器试验或任何其他核爆炸。可靠的核查是条约有效的保证。对地下核爆炸试验的监测主要依靠,甚至唯一依靠地震核查。CTBT所认可的地震核查国际监测系统(ISMS),是以GSETT-3为样板的产物。这是集全世界地震学家积40年的经验,特别是GSE专家20年集中精力努力的结晶。

2 当代全球最均衡、最精致、最快速的地震监测系统——ISMS

基本遵照GSETT-3的成功经验,CTBT条约约定的ISMS由基本均匀分布在全球的,经过仔细挑选的50个基本(α)地震台与119个辅助(β)地震台组成。基本台中有23~31个是台阵。其他的 α 台与 β 台均为三分向单台。基本台的数字化监测数据经数字通讯链路,实时送到国际数据中心(IDC)。辅助台的数据须经IDC藉拨号电话索要才应答,但全过程也无需人介入。IDC在GSETT-3期间设在美国Arlington,在ISMS中建于Vienna。IDC负责数据的收集、处理、存档与分发。它的主要产品是REB(修正事件报告)与SSEB(经标准筛选的事件报告)。50个 α 台的波形数字数据实时传到IDC后,首先是震相自动检测。然后经震相组合、定位,确定事件,产出AEL(根据 α 台的事件清单)。根据AEL的参数。IDC有程序可以自动计算判定 β 台中有哪些台站也可能记录到这一次事件,并计算出震波到达这些台站的时段。IDC计算机有功能借拨号电话自动向这些 β 台索要这一时段的波形数据。 β 台的记录数据都存放在该台的计算机中,过了第7天才允许脱机另存磁盘。故一旦IDC通过拨号电话Auto DRM向其索要指定的波段时,凡7天内的数据, β 台都能自动应答。IDC在收齐 β 台的数据后,再结合原 α 台的数据,再次重新自动测定事件参数,编出ABEL(根据 α 台+ β 台的事件清单)。AEL,ABEL是用计算机全自动处理的。由于从震相检测到震相组合都可能出错,故形成ABEL后,须经有经验的分析人员,人机结合检查。经分析人员修正以后成为正式产品REB(修正事件报告)。一般AEL需历时1小时,ABEL需历时4小时,REB则需时间42~72小时。SSEB是经标准筛选后的事件报告。标准筛选留下了爆炸可能性较大的一些事件。识别核爆的判据主要用体波震级与面波震级的差别,震源深度,不同震相的相对激发与它们的频谱比,以及波形的复杂性等。IDC的产品以及各 α 、 β 台的原始数据,都可供成员国自由索取。或事先预订,由IDC主动发送。ISMS的设计监测能力是全球陆区 $m_b 4.0$,相当于在硬岩中地下爆炸1KT。定位要求误差在1000 km²以内。据GSETT-3的经验,要达到这一要求,尚需经历较长年月的调试与标定。但对一些主要试验场的监测能力,可确信远优于上述指标。对海洋地区的监测能力稍弱,特别是对南半球大洋地区。但结合CTBT的另一种核查手段——水声监测,放在海洋中的水声仪,可以提高对海洋地区的监测能力。

回顾五六十年代，美国为了侦察核爆炸试验，在全球布设了 125 个世界标准地震台。由于采用了统一的仪器，高精确的时间服务，集中分析图纸，使全球的地震定位精度均衡地上了一个大台阶。这一进步，使地震分布本身就勾划出了全球板块的格局，为以后在地学界创立“板块理论”树立了不可替代的支柱。若是说五六十年代为核侦察而建设的世界台网，它仅从地震波的运动学特征为“板块理论”建立了不可磨灭的功勋；那么今天 90 年代建起的当代全球最均衡、最精致、最快速的 ISMS 地震监测系统，它必将从地震波的动力学特征为地学开拓更为辉煌的明天。

3 现代地震观测技术的进步几乎均与地震核查有关

回顾现代地震观测技术的进步几乎均与地震核查的需求有关。

要在远距离检测到核爆炸试验，提高地震台站检测的灵敏度是地震核查的第一需求。各种能提高地震台站检测灵敏度的措施，都不惜成本地一一成为科学家的试探对象。

50 年代最灵敏的地震仪是用电流计照相记录。当时电子放大器水平不高，在地震波的频段，电子线路的噪声还很大，直接放大做不到。为了远距离侦察弱信号，创制了在电流计后，再经光电放大的高灵敏地震仪。当然这一过渡时期并不长，至六七十年代，电子技术长足进步，低噪音的超低频放大器已可满足地震仪的直接放大了。地震仪采用了电子线路后，对高灵敏的检测已不再受地震仪的限制了。地震学家发现，地基的常时脉动，地动本底噪音成为提高检测灵敏度的拦路虎。

人们曾尝试过井下地震仪与海底地震仪。井下可以避开地表的风吹草动；洋面虽有海浪涛天，但海底是风平浪静的。实践结果是，虽各有一些特定的优点，但潜力都不大。于是台阵成了热点，各种各样的台阵都被试验了，有圆的，方的，三角形的，五角星的，多边形的，十字交叉的等等。好心的非地震学家说，不必全世界到处设地震站，只要建一个大大的台阵就行了，可以把全球都管起来。于是投资上亿美元的有 625 个子站组成的大孔经台阵 LASA 进行了实践。复杂的处理方法，需将讯号传到 2 000 km 外的 MIT 处理。可是实践的结果，并不如人意。检测能力的提高并不太大。以致 LASA 难以继续维持。

上天不负有心人，台阵在七试八试中，终于发现一个叫 NORESS 的高频小圆阵，竟然测到了 4 000 km 外哈萨克斯试验场的一次数百吨的爆炸。后来俄国人也说，2 000 km 外的 NORESS 可以测到他们新地岛试验场的 2.5 级地震，相当于 TNT10 吨的爆炸。同时也有资料表明，前苏联的 Bororoge (BRV) 台可以测到一万公里外的美国内华达试验场的 $M_{\text{L}}3.9$ 的核爆。这些进展具有特别重要的意义，据此表明了，现代的地震监测技术，已可在国门外监测一个国家的爆炸当量小到千吨的核爆炸试验了。

在发展台阵技术中，数字化，大动态是必不可少的，自动处理，计算机化更是先决条件。如同在第 2 节中已经提到的，ISMS 的精致程度确实无愧于代表当代地震观测的最高水平。它所取得的全面进步，是地震核查长期需求，持续促进的结果。

4 中国的核查地震研究

当国际上全面关注地震核查的时期，美国投资 2 亿美元启动“维拉”计划之时，中国也

不失时机,于1959年,在当时的中国科学院地球物理研究所组建第七研究室,开展用地震方法侦察地下核爆炸的研究。促进筹建七室的另一背景是1956年夏,美国在太平洋马绍尔群岛进行了一系列大规模核试验。前苏联来我国广州、上海、北京3个地震台上设置了微气压计与核爆炸侦察地震仪。我国实际上已经先期涉足了这一领域。

1964年我国第一次核爆炸试验,七室承担了用地震方法测定核爆当量的任务。为此我们先期在爆点附近进行了一系列化爆模拟试验。最后测得当量所达到的精度,至今仍属于一流水平。起爆零后,乌鲁木齐地震台的数据必报周恩来总理,为总理决策新闻公布提供依据。

1965年3月20日中央专委决定设置320任务。七室组建了对核试验侦察的速报体系。24小时值守,一般在爆后一二小时,即可通报试验参数。1965年12月24日13时,首次成功地速报了前苏联的一次地下核试验爆炸。以后据统计,对前苏联谢米帕拉金斯克试验场与新地岛试验场的地下核爆炸,侦察成功率均在90%以上。

90年代初,以国家地震局地球物理研究所为主的地震工作者,通过与美国合作,以一二年的短时间,迅速建立了可与国际互联的卫星传送地震监测体系。依靠这一系统,使我国以高起点的姿态参与了GSE的第2次与第3次联试:GSETT-2, GSETT-3。与GSE专家同共为CTBT的IMS创立了样板。建在国家地震局地球物理研究所的国家数据中心, GSE NDC与建在美国Arlington的国际数据中心, GSE IDC可以通过这一体系,24小时不间断的传送数据。中国监测的地震数据从这里送往世界;全世界的地震活动,我们也从这一窗口,数小时一清二楚。自1991年5月起,这一中国GSE NDC与国际GSE IDC的地震数据交换渠道,基本上连续工作,从未间断。在国家地震局地球物理研究所大厅中设置的,全球与全国逐日地震活动显示屏幕,就是这一系统所获取信息的一点展示。

1994年CTBT谈判开始。地震学家负责磋商ISMS(全球地震监测系统)。中国地震代表团,以自己积累的,近40年的实践经验,提出了中国的主张。特别在当不公正地对待我国,有损我国重大利益时,我国地震学家能够据理力争。为了强化我们的论点,以理服人,我们总要大量搜集资料,充分组织论据,有时甚至达到了具有创新的水平。使对手在科学面前感到理屈词穷。再如关于国际数据中心(IDC)应对可疑事件进行筛选的问题,个别大国欲垄断其技术优势,反对IDC进行这种服务,一切识别工作都要各国自己去做。这对技术落后的国家是不公平的,他们无能力处理每天面临的大量数据。中国率先站出来指出,反对IDC做筛选工作是没有道理的。并提出了关于IDC具体做筛选的中国建议方案。尽管个别大国力图千方百计否定中国方案,但在CD各国表态中,除了两个有分析实力的国家外,其他各国都赞同中国的主张——IDC应对事件进行筛选。最后终于将筛选方案写入了条约议定书。IDC主席之友,在总结谈到筛选问题时,还特别用中国话发音“筛选”两字,以示对中国首创的尊重。筛选这一识别禁区的冲破,也是我国核查地震研究40年积累的功夫的回报。

Seismic verification and earthquake research

Xu Shaoxie

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, Beijing 100081, China)

地下爆炸的矩张量反演^{*}

倪江川 陈运泰 吴忠良 王培德
王 璋 柯兆明

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

摘要 用 DCS-302 三分向数字盒式磁带加速度仪记录到的一次地下爆炸的近震源数字宽频带记录反演了爆炸源的地震矩张量。对加速度记录做两次积分得到了位移地震图。反演中采用了均匀半无限弹性介质计算格林函数。反演结果表明爆炸源的主要成分是各向同性分量,其震源时间函数与天然地震的震源时间函数差别很大。由谱分析得出地面位移谱的拐角频率为 1.8 Hz,进而推算出该地下爆炸的等效震源的弹性半径约为 0.4 km。分析了由矩张量反演得到的结果,发现伴随着爆炸过程还出现了岩石介质的张性碎裂。分析表明,在无需对震源机制引入先验假定的情况下,通过矩张量反演得到的关于人工地震的震源性质的结论是可信的。

主题词 地下爆炸;地震矩张量;反演;近震源;宽频带

引 言

关于爆炸型震源的力学性质的研究,至少可以追溯到 30 年代(例如 Jeffreys, 1931; Kawasumi and Yosiyaama, 1935; Sharpe, 1942a, b)。40 年代以后,由于众所周知的实际意义,许多作者又对这一问题进行了多方面的研究(例如 Blake, 1952; Pinney, 1954)。70 年代在震学领域中引入了地震矩张量的概念。矩张量的引入使得在一级近似的意义上将地震记录、震源和传播路径三者之间的关系归结为一个线性问题成为可能(Gilbert, 1970; Backus and Mulcahy, 1976a, b; Stump and Johnson, 1977; Aki and Richards, 1980; Doornbos, 1982),而无需对震源机制引入先验的假定。通过地震波形记录的线性反演可以得到关于震源性质的客观的、完整的描述,有关概念及其反演技术在天然地震和人工地震的震源性质的研究中得到广泛的应用(例如 Doornbos, 1982; 倪江川, 1987; 倪江川等, 1991a, b)。80 年代以来,近震源宽频带记录在地震震源研究中的应用得到越来越多的重视。数字记录的大动态、高精度、尤其是宽频带的优点,为震源性质的研究提供了极大的方便。使用近震源宽频带记录进行地下爆炸源的地震矩张量反演的工作(例如 Stump and Johnson, 1981, 1984)也因此成为当前地震学研究中的一个重要内容。

在一次地下爆炸试验中,国家地震局地球物理研究所近场强地面运动研究组在距爆炸

* 国家地震局地球物理研究所论著编号 97A0095

中心几 km 范围内布设了由 DCS-302 三分向数字盒式磁带加速度仪组成的小孔径流动台网,进行了近震源观测工作。本文利用这次观测得到的数字记录,采用与 Stump 和 Johnson (1981, 1984) 类似的、由本文作者独立地发展起来的地震矩张量反演技术(倪江川, 1987; 倪江川等, 1991a, b; 吴忠良等, 1994b), 在对震源机制不附加任何先验假定的情况下研究这次地下爆炸的性质。

1 观测资料

DCS-302 三分向数字盒式磁带记录加速度仪的采样率为 100 sps, 动态范围为 112 dB, 其振幅特性、相位特性和脉冲响应在 Chen et al (1992) 和吴忠良等 (1994b) 的文章中已有叙述。在实际资料的处理中, 作者对加速度记录连续作两次积分以求得位移地震图。为了消除数据中因两次积分而放大的低频噪声, 采用 4 极 Butterworth 滤波器对资料进行了 1.5~30.0 Hz 的带通滤波。资料分析中将 NS, EW 分向和竖直分向记录转换到 Z, R, T 坐标系中, 其中 Z 为竖直向, 以向下为正; R 为径向, 以离源为正; T 为横向, 以从源向外看顺时针为正。

小孔径流动台网由 5 个台站组成, 其中台站 No. 3 因记录质量问题无法使用。图 1 表示了台站和爆心的位置。图 2 给出了 4 个台站上的宽频带加速度记录和经过两次积分得到的宽频带位移记录, 图中每组记录自上而下依次为 Z, R, T 分向。

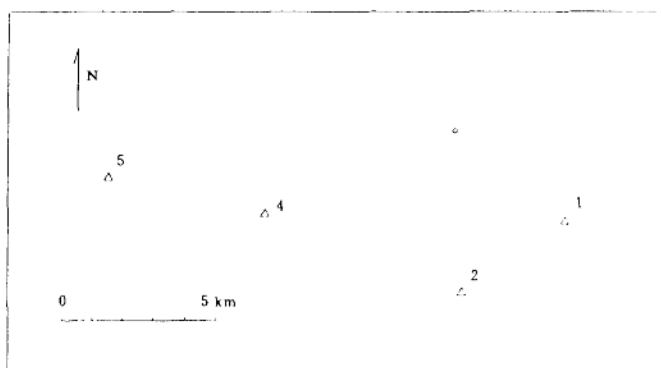


图 1 台站和爆心的位置

值得注意的是, 由于 DCS-302 加速度仪主要是为天然地震的近震源观测而设计的, 触发设置的问题使记录在初至附近发生限幅。图 2 中以台站 No. 1 为例, 给出了记录限幅的细节。限幅造成的“丢头”现象给直接使用加速度记录进行矩张量反演带来了相当大的困难。为了处理这个问题, 我们使用在另外一次爆炸观测中获得的、没有出现限幅的记录(图 3a)进行模拟试验, 该台站的震中距, 与本文所研究的小孔径台网的情况相近。在图 3 中, 每组记录自上而下依次为 Z, R, T 分向。参照图 1 中记录的限幅的情况, 首先对图 3a 中 Z 分向记录进行人为的截断(图 3b), 图 3c, 3d 分别给出了完整记录和截断记录的振幅谱, 可以看到其频谱特性在高频端(频率高于 10 Hz 时)有明显的差异, 在低频端却是相似的。

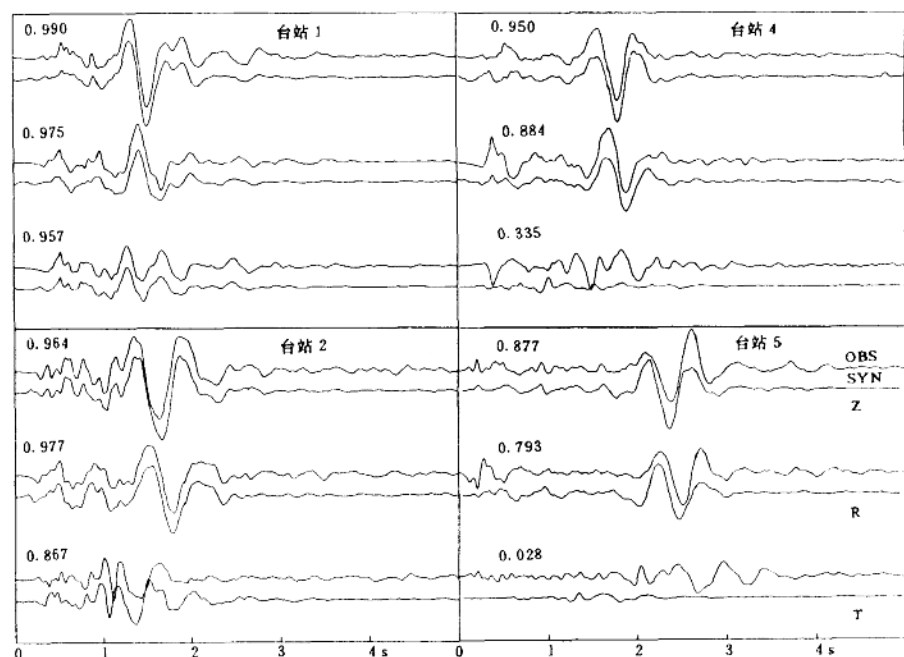


图 2 各台站上的三分向加速度记录(上)和位移记录(下)。对每组记录,自上而下依次为 Z, R, T 分向,各道记录的长度为 6 s。图中以台站 No. 1 的 Z 分向为例给出了限幅的细节

图 3e 和图 3f 进一步给出了两组记录经过两次积分得到的位移地震图,可以看到位移地震图的差别主要出现在初至附近,而后续的记录基本相同。这样得到的结论是,只要在反演中不考虑初至附近的波形,即可得到满意的反演结果;即使考虑了该部分波形,由于它在整个波形中所占比例很小,对反演结果的影响也不特别严重。此外,如果试图对波形中丢失的信息进行某种意义上的推测的话,那么结合图中残余波形的斜率和理论地震图的计算结果也可以看出,位移记录中丢掉的部分的相对幅度,是随震中距的增加而减小的,也即对反演影响较大的记录,是震中距较小的台站上的记录。

2 地震矩张量反演

图 4 给出了各台站上的 Z, R 分向记录的位移谱,位移谱是由加速度谱除以 ω^2 直接得到的。从图中可以较好地确定其拐角频率的大小。对 4 个台站的 Z, R 分向记录的位移谱的分析表明,位移谱的拐角频率 f_c 平均为 1.8 Hz。若取介质的 S 波速度为 2.5 km/s,则由拐角频率 f_c , 剪切波速度 β 和弹性半径 a 之间的关系

$$a = 2\beta / (2\pi f_c) \quad (1)$$

可估计出弹性半径约为 0.4 km。这一数值比小孔径台网的震中距范围小得多。位移记录的优势频率的数量级为 1 Hz, 相当于剪切波的优势波长约为几 km。在这种情况下,可以使用

点源近似来描写爆炸源的地震学性质。此时弹性介质中 r 处沿 i 方向的位移谱可以表示为 (Stump and Johnson, 1977; 倪江川, 1987; 倪江川等, 1991a, b)。

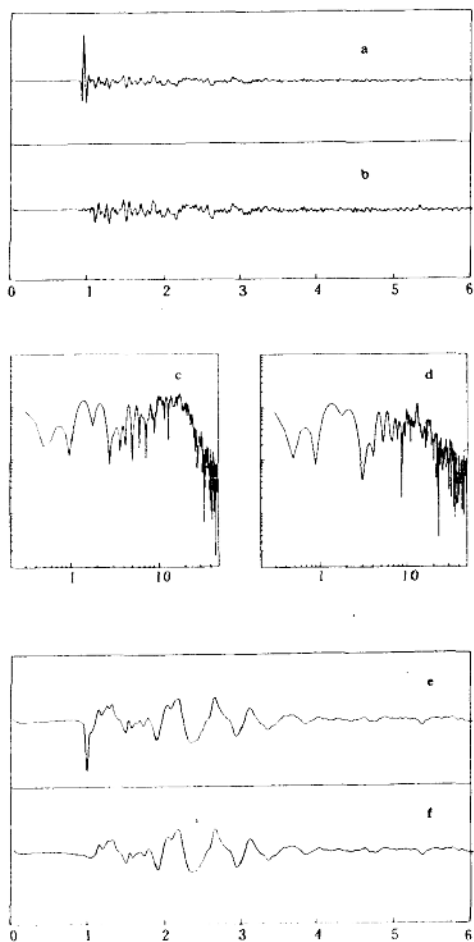


图3 关于限幅问题的数字实验。说明参见正文

相与观测资料的震相的到时一致, 我们根据各台站的震源距和观测地震图上各震相的相对到时调整介质波速, 所以反演时所用的 P 波速度和 S 波速度结构是当地介质结构的一个粗略的近似。

$$\dot{U}_i(r, f) = \dot{G}_{ij,k}(r, f; r') \cdot \dot{M}_k(f) \quad (2)$$

式中 f 表示频率, $\dot{M}_k(f)$ 表示地震矩张量谱, $\dot{G}_{ij,k}(r, f; r')$ 是格林函数 $G_{ij}(r, t; r', t')$ 相对于 k 方向的源点坐标的偏导数的谱, 格林函数 $G_{ij}(r, t; r', t')$ 定义为对于一定的介质模型, 在 t' 时刻 r' 处沿 j 方向作用的单位脉冲力在 t 时刻 r 处产生的 i 方向的位移。由于 $\dot{M}_k$ 是对称的二阶张量, 所以可以通过引入一个向量

$$\begin{aligned} \dot{M} = \\ \langle \dot{M}_{11}, \dot{M}_{12}, \dot{M}_{13}, \dot{M}_{22}, \dot{M}_{23}, \dot{M}_{33} \rangle^T \end{aligned} \quad (3)$$

而将(2)式改写为

$$\dot{U}_i = \dot{X}_{ij} \cdot \dot{M}_j \quad (4)$$

其中 $\dot{X}_{ij}$ 为 $\dot{M}_j$ 的系数, 它是格林函数谱 $\dot{G}_{ij,k}$ 的线性组合。

反演中采用均匀半无限弹性介质内部的集中力所激发的位移场问题即兰姆问题的解作为格林函数。兰姆问题的解析解及相对于源点坐标和场点坐标的偏导数可用 Cagniard De Hoop 方法求得 (Johnson, 1974)。由于采用了均匀半空间模型, 所以反演对于震源深度的分辨率不高。我们在反演时, 根据实际资料给定震源深度。在没有当地介质结构的详细资料的情况下, 为使计算得到的合成地震图的震

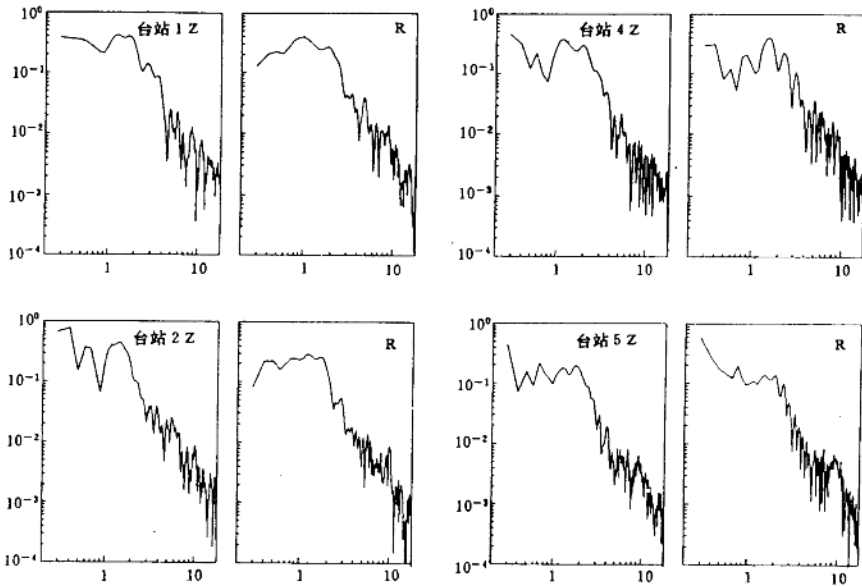


图 4 各台站记录的位移谱, 其中横轴单位为 Hz, 纵轴单位为 m/Hz

3 反演结果

图 5 给出了反演得到的、作为时间函数的地震矩率张量的 6 个独立分量(上图)和地震矩张量的 6 个独立分量(下图)。可以看出构成这次地下爆炸源的地震矩张量的主要部分是 M_{11} , M_{22} 和 M_{33} 分量, 其中 M_{33} 较大, 而 M_{11} 和 M_{22} 几乎相等。在另外三个分量中, M_{13} 和 M_{23} 稍大。为了进一步分析震源的性质, 图中还给出了爆炸分量(EP)、剪切分量(DC)和补偿线性向量偶极分量(LD)的时间变化。可以看出各向同性分量是爆炸源的主要部分, 在地震矩张量中, 爆炸分量、剪切分量和补偿线性向量偶极分量的峰值之比约为 1.2 : 0.7 : 0.3, 明显地以爆炸分量为主。图 6 给出了根据反演结果做出的合成地震图与观测地震图的比较, 图中观测地震图在上, 理论地震图在下, 每个台站的记录自上而下依次为, Z, R, T 分向。作为参考, 图中还给出了各台站记录的最大振幅和理论地震图的最大振幅以及各条记录拟合的相关系数。可以看出, 反演结果可以很好地解释 Z, R 分向记录(相关系数在 0.9 左右), 然而 T 分向的记录却没有得到同样好的解释, 这从侧面说明, 反演得到的作为矩张量的主要部分的各向同性分量基本上是可信的, 而非各向同性分量的结果却有较大的不确定性。必须指出, 由于所用介质模型相当简单, 所以那些看上去拟合得很好的波形的细节以及与此相应的震源时间函数的细节未必有意义。

在近震源记录的模拟和反演过程中, 在不了解当地介质结构细节的情况下, 采用均匀

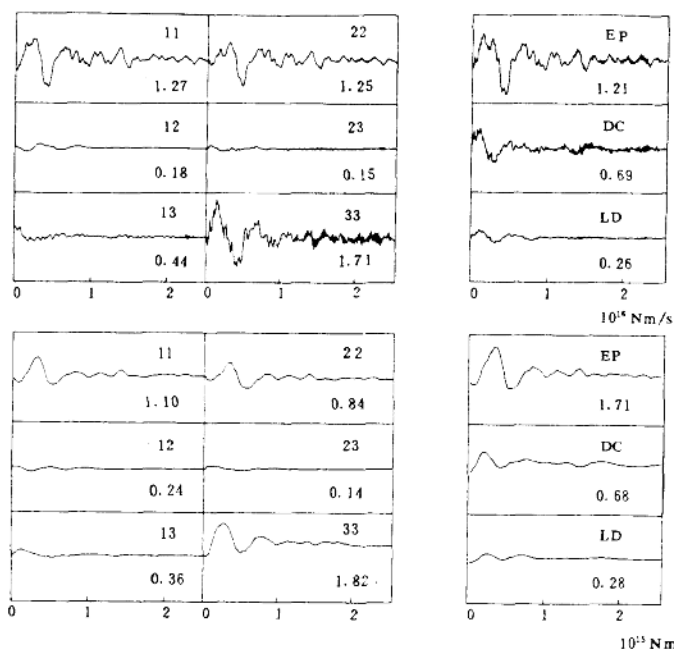


图5 反演得到的地震率张量(上)和地震矩张量(下)。图中时间以s为单位,地震率张量的各独立分量以同一单位表示,地震矩张量的各独立分量也以同一单位表示

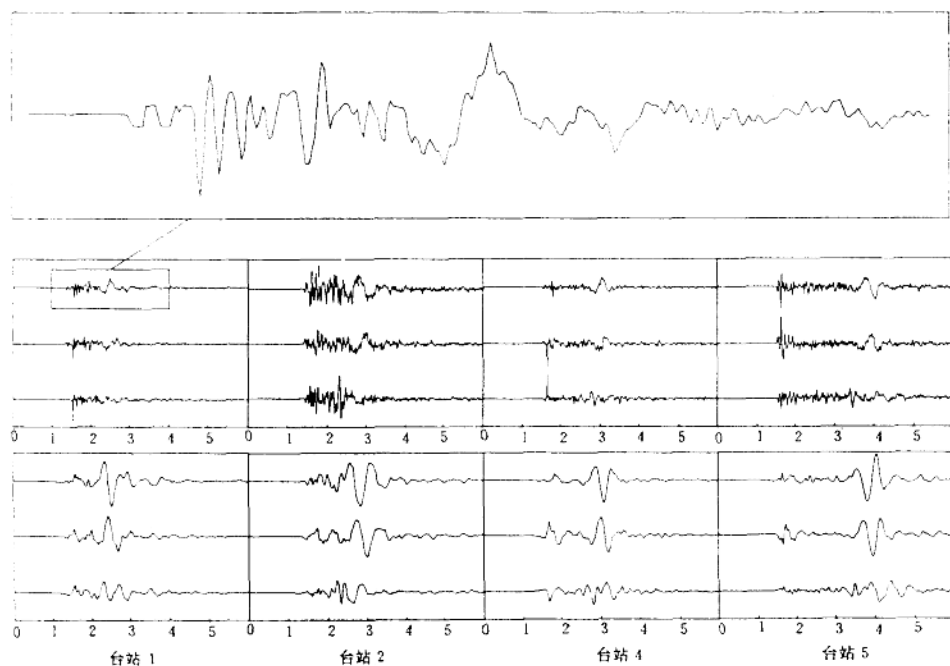


图6 观测地震图与根据反演结果做出的理论地震图的比较。对图中每道记录,观测地震图在上,理论地震图在下

半空间模型是一个有用的近似。研究表明, 采用均匀半无限介质的格林函数进行爆炸事件的近震源记录的矩张量反演, 可以较好地约束各向同性分量的幅值及其主要的变化趋势, 非各向同性分量的反演结果却不一定是可靠的(Stump and Johnson, 1981; 1984)。据此我们可以推测, 虽然反演得到的地震矩率张量的时间变化的细节不一定是有意义的, 然而作为一个积分结果的地震矩张量的各个独立分量的幅值, 特别是幅度较大的 M_{11} , M_{22} , M_{33} 三个分量, 基本上确定了这次地下爆炸事件的震源性质, 而从事件鉴别的角度说, 在没有附加任何关于震源机制的先验假定的情况下, 由矩张量反演得到的关于这次事件的震源性质的结论是颇具说服力的。同时, 由此得到的地震矩张量的主要部分的时间变化, 也基本上反映了这次地下爆炸的震源过程。从图 5 可以看出, 与天然地震的地震矩张量的时间变化相比, 地下爆炸具有很不相同的性质。一个明显的差别是地下爆炸的震源时间函数不是单调上升的。这个结果与以往关于爆炸源的震源时间函数的研究结果(例如 Rodean, 1981)是一致的, 而且如果简单地假定弹性半径上的压力函数取 Mueller-Murphy 经验函数的形式(Mueller and Murphy, 1971; Murphy and Mueller, 1971)即可得出与此相似的矩张量的时间变化。地下爆炸的震源时间函数问题是地震学中的重要问题之一(例如 Helmberger and Hadley, 1981)。近年来, 这方面的研究越来越多地强调结合具体实例的反演计算(Denny and Goodman, 1990; Chun et al, 1991)。近震源宽频带记录的使用使本文给出的结果在这方面研究中具有较强的说服力和较重要的参考价值。

4 讨论与结论

近震源宽频带记录的波形反演结果表明, 所研究的爆炸源的主要部分是各向同性分量。反演结果还证实, 地下爆炸的震源时间函数与天然地震差别很大, 这一点在地下爆炸的地震图模拟和波形反演工作中是很重要的。谱分析结果给出地面位移谱的拐角频率为 1.8 Hz, 由此推算出该爆炸的等效震源的弹性半径约为 0.4 km。

从反演结果可以看出, 这次地下爆炸震源的地震矩张量的主要部分是 M_{11} , M_{22} 和 M_{33} 分量, 其中 M_{33} 较大(图 5)。这一现象的一个可能的原因是碎裂(Rodean, 1981; 吴忠良等, 1994a)。由爆炸产生的球面波通常仅包含压缩成分。在弹性半空间中, 压缩波与自由表面相互作用并发生反射, 岩石在反射波和入射波作用下发生非弹性的张性断裂即碎裂。由于爆炸的震源深度很浅, 所以在一般的地下爆炸试验中, 碎裂与爆炸几乎是同时发生的。作为一级近似, 碎裂可以看成是在 $x_3 = \text{const}$ 平面内出现张裂的情况, 此时地震矩张量的不为零的分量之比为

$$M_{11} : M_{22} : M_{33} = 1 : 1 : (\lambda + 2\mu)/\lambda \quad (5)$$

也就是说, 碎裂的结果相当于引入了一个位于爆炸源正上方的张裂源(Day and McLaughlin, 1991), 张裂矩张量的大小正比于张裂位错。总的矩张量则是 $e_1e_1 + e_2e_2 + e_3e_3$ 的爆炸分量和 $e_1e_1 + e_2e_2 + [(\lambda + 2\mu)/\lambda]e_3e_3$ 的张裂分量的迭加, 这里 e_i 是基向量。由于如前所述的反演本身的不确定性, 对这个问题还有待进一步的研究。采用更接近实际的介质结构模型之后, 对张裂源的大小可能会给出不同的估计。但从目前的结果上看, 张裂源分量的存在是可以肯定的。

爆炸可能触发原已积累起来的构造应力的释放(例如 Wallace, 1983)。从地震矩张量的

角度说,构造应力释放的过程相当于爆炸震源中剪切分量的时间变化过程。由图5可以看出,对于这次爆炸,在扣除了张性矩张量之后,余下的剪切分量已所剩无几,因此可以推断,这次爆炸并没有引发足够大的构造应力释放事件。

从本文给出的结果可以看出,将矩张量反演的技术应用于地下爆炸源的震源性质的研究,不仅可以在无需对震源机制作先验假定的情况下给出震源性质的客观描述,而且可以给出关于爆炸源中可能存在的非各向同性分量;同时,近震源宽频带数字记录在震源研究中的优势也十分明显。显然在这方面有很多值得做的工作。

本项工作完成于1987年(倪江川,1987),文中涉及的野外观测工作是在国家地震局科技监测司的支持下完成的。工作过程中,作者得到国家地震局地球物理研究所近震源强地面运动研究组王鸣和中国数字地震台网(CDSN)技术管理研究室[牟其铎]等专家的帮助。在此作者谨向他们表示衷心的感谢。

参考文献

- 倪江川,陈运泰,陈祥熊. 1991a. 地震矩张量及其反演. 地震地磁观测与研究, 12(5): 1~17
- 倪江川. 1987. 人工爆炸和天然地震的矩张量反演. 硕士学位论文. 北京: 国家地震局地球物理研究所, 77
- 倪江川, 陈运泰, 王鸣, 吴明熙, 周家玉, 王培德, 吴大铭. 1991b. 云南禄劝地震部分余震的矩张量反演. 地震学报, 13(4): 412~419
- 吴忠良, 陈运泰, 牟其铎. 1994a. 核爆炸地震学概要. 北京: 地震出版社, 140
- 吴忠良, 陈运泰, 倪江川, 王培德, 王鸣. 1994b. 近震源宽频带记录的地震矩张量反演. 地震学报, 16(2): 141~152
- Aki K and Richards P G. 1980. Quantitative Seismology: Theory and Methods. San Francisco: H Freeman, 1 & 2: 932
- Backus G E and Mulcahy M. 1976a. Moment tensor and other phenomenological descriptions of seismic sources (I) Continuous displacement. Geophys J R astr Soc, 47: 301~329
- Backus G E and Mulcahy M. 1976b. Moment tensor and other phenomenological descriptions of seismic sources (II) Discontinuous displacement. Geophys J R astr Soc, 47: 341~361
- Blake F G Jr. 1952. Spherical wave propagation in solid media. J Acoust Soc Amer, 24: 211~215
- Chen Y T, Zhou J Y and Ni J C. 1991. Inversion of near-source broadband accelerograms for the earthquake source-time function. Tectonophysics, 197(1): 89~98
- Chun K Y, Zhu T F and West G F. 1991. Teleseismic P wave attenuation and nuclear explosion source functions inferred from Yellowknife Array data. J Geophys Res, 96: 12083~12097
- Day S M and McLaughlin K L. 1991. Seismic source representations for spall. Bull Seism Soc Amer, 81: 191~201
- Denny M D and Goodman D M. 1990. A case study of the seismic source function; Salmon and Sterling reevaluated. J Geophys Res, 95: 19705~19723
- Doornbos D J. 1982. Seismic moment tensors and kinematic source parameters. Geophys J R astr Soc, 69: 235~251
- Gilbert F. 1970. Excitation of the normal modes of the Earth by earthquake sources. Geophys J R astr. Soc, 22: 223~226
- Helmberger D L and Hadley D M. 1981. Seismic source function and attenuation from local and teleseismic observations of the NTS events JOROM and HANDLEY. Bull Seism Soc Amer, 71: 51~67
- Jeffreys H. 1973. On the cause of oscillatory movement in seismograms. MNRAS Geophys Suppl, 2: 407~416
- Johnson L R. 1974. Green's function for Lamb's problem. Geophys J R astr Soc, 37: 99~131
- Kawasumi H and Yosiya R. 1935. On an elastic wave animated by the potential energy of initial strain. Bull Earthq Res Inst, Tokyo Univ, 13: 496~503
- Mueller R A and Murphy J R. 1971. Seismic characteristics of underground nuclear detonations. I. Bull Seism Soc Am, 61: 1675~1692
- Murphy J R and Mueller R A. 1971. Seismic characteristics of underground nuclear detonations. II. Bull Seism Soc Am, 61:

1693~1704

- Pinney E. 1954. Surface motion due to a point source in a semi-infinite space. Part 2. *Zisin*, 25: 333~342
- Rodean H C. 1981. Inelastic processes in seismic wave generation by underground explosions. In: Husebye E S and Mykkeltveit S (eds), *Identification of Seismic Sources—Earthquake or Underground Explosion*, Dordrecht: D Reidel Publ Co, 97~196
- Sharpe J A. 1942a. The production of elastic waves by explosion pressures. 1. Theory and empirical field observatoin. *Geophysics*, 7: 144~154
- Sharpe J A. 1942b. The production of elastic waves by explosion pressures. 1. Results of observation near an exploding charge. *Geophysics*, 7: 311~321
- Stump B W and Johnson L R. 1977. The determination of source properties by the linear inversion of seismograms. *Bull Seism Soc Amer*, 67: 1489~1502
- Stump B W and Johnson L R. 1981. The effect of Green's functions on the determination of source mechanisms by the linear inversion of seismograms. In: Husebye E S and Mykkeltveit S (eds), *Identification of Seismic Sources—Earthquake or Underground Explosion*, Dordrecht: D Reidel Publ Co, 255~268
- Stump B W and Johnson L R. 1984. Near-field source characterization of contained nuclear explosions in tuff. *Bull Seism Soc Amer*, 74: 1~26
- Wallace T C, Jr. 1983. Long Period Regional Body Waves. Ph D Dissertation, California Institute of Technology, 141~172

Moment tensor inversion of underground explosion

Ni Jiangchuan, Chen Yuntai, Wu Zhongliang, Wang Peide, Wang Zhang and Ke Zhaoming

(*Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, Beijing 100081, China*)

Abstract

Near-source broadband digital recordings of an underground explosion recorded by DCS-302 three-component digital cassette accelerographs, were inverted for the moment tensor of the underground explosion source. The accelerograms were integrated twice to obtain the displacement seismograms. Green's functions were calculated for a homogeneous semi-infinite elastic medium. The inverted results indicate that the main part of the explosion source is the isotropic component, and that the source-time function of the underground explosion is quite different from that of the spontaneous earthquake. The corner frequency of the displacement spectra for the ground motion of the explosion source obtained by spectral analysis is 1.8 Hz, and the equivalent elastic radius of the explosion source is estimated to be 0.4 km. An analysis of the results from moment tensor inversion shows that during the explosion process tensional spalling occurred in the environmental rock. It is pointed out that the results about the underground explosion obtained from moment tensor inversion without imposing a prior constraints on the focal mechanism of the seismic source are convincing.

Key words: underground explosion, seismic moment tensor, inversion, near source, broadband

用 ICHAM 方法对东哈萨克斯坦 地下核爆炸的识别研究

王碧泉 王春珍 范洪顺 付丽萍 陈佩燕

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

摘要 将地下核爆炸和天然地震的识别问题转化为典型的模式识别问题。对东哈萨克斯坦的 13 次地下核爆炸及其附近地区的 11 次天然地震,提取了 5 个定量特征,并用 ICHAM 模式识别方法进行了识别。结果表明识别的效果较好;C 检验、U 检验和对特征的控制试验均表明结果较为稳定。用单个判据识别和用模式识别方法进行综合识别的效能分析表明,用模式识别方法综合识别可以改进识别的效果。

主题词 地下核爆炸;模式识别;ICHAM 方法;识别判据

引言

最近 30 多年来迅速发展起来的模式识别学,现在已广泛应用于文字、图形、声音等的识别;天气、地震、经济等预报;生物、医学、社会科学、管理科学等;以及工业、农业等各个领域。

模式识别就是通过大量信息对复杂对象(或样品)进行学习、判断和寻找规律,这一过程就是学习和分析过程。通过这一过程得到分类器;然后对未知对象进行识别,称为识别或预测过程。简单地,可认为模式识别就是对所研究的对象(或样品)进行分类。模式识别的流程如图 1 所示。

30 多年前,在 1960 年日内瓦专家会议时,普遍认为识别地下核爆炸是一件遥远的事情,时至今日,识别地下核爆炸已取得了飞跃的进展。然而要识别每一次地下核爆炸、尤其是那些小当量的和采用了隐蔽技术的核爆炸则并非易事,人们所找到的一些判据并非都是确定性的,而且识别和反识别技术还在不断地竞争。

本文目的是将模式识别方法应用于地下核爆炸和天然地震的识别,希望采用这种对大量信息、多维数据进行综合处理的方法后,能够改进识别的效果。本文对东哈萨克斯坦地下核爆炸识别的结果表明:识别效果较好,控制试验的结果较稳定,且用模式识别方法综合识别可以改进识别的效果。

1 方 法

本文采用王碧泉等(1988 年)改进的 ICHAM 模式识别方法进行识别。ICHAM 是改进的连续 Hamming 方法的简写,该方法较之原始的 Hamming 方法及连续 Hamming 方法有两点改进:① 它适用于更为一般的样品分布情况,即每类样品可以是团状分布,也可以不是团状分布。② 改进了对 Hamming 核的计算方法,使之处于方差较小的这一类样品的中心,从而能更好地代表这一类样品。其主要计算步骤是:① 将连续特征数据标准化;② 确定需计算那一类样品的 Hamming 核;③ 计算 Hamming 核 Z ;④ 计算各样品至 Hamming 核的距离 $d_i(X, Z)$;⑤ 进行分类识别。

关于该方法的细节可参看有关的文献(王碧泉等,1988 年),在此不详述。

2 样品和特征

2.1 研究问题的转化

我们所研究的问题是识别地下核爆炸和天然地震。前已叙及,简言之,模式识别就是对所研究的对象(或样品)进行分类。自然地,可将事件分为两类:第一类是地下核爆炸;第二类是天然地震。发生一次事件后,我们的任务就变为用模式识别方法识别它是那一类事件。这样就将所研究的问题转化为典型的模式识别的分类问题。

2.2 样品的选取

将一次地下核爆炸或一次地震作为一个样品。我们选取了东哈萨克斯坦试验场的 13 次地下核爆炸作为第一类样品,并取该试验场附近地区的 11 次天然地震作为第二类样品,它们的位置如图 2 所示。如此,第一类样品数 $N_1=13$,第二类样品数 $N_2=11$,总样品数 $N=24$ 。

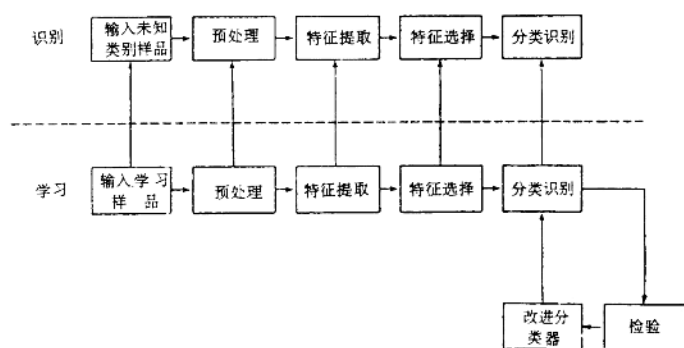


图 1 模式识别流程

2.3 特征的提取

模式识别是在专家已有认识和经验的基础上,利用所获得的数据,应用数学方法自动