

震后趋势决策支持系统 PTDSS

庄昆元¹, 黄冰树², 王 炜¹, 章 纯¹

(1. 上海市地震局, 上海 200062; 2. 上海材料研究所, 上海 200479)

摘要: 介绍了作者研制的“震后趋势决策支持系统 PTDSS”的构成及预报效果. 该系统使用模糊联想记忆 FAM (Fuzzy Associative Memory) 模型将神经网络与模糊系统结合起来, 使之具有第 2 代专家系统的学习功能. 系统知识库中除存有专家多年来总结的有关地震现场预报的知识外, 还通过系统学习得到了一批十分有意义的、目前专家尚未总结的知识. 震例检验的结果表明该系统有较好的预报效果.

关键词: 震后趋势决策; 支持系统; 模糊联想记忆模型; 预报能力

中图分类号: P315.75 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2001)04-0404-06

0 引言

按照中国地震局重新修订的《地震现场震情分析指南》, 我们研制了“震后趋势决策支持系统 PTDSS”. 该系统所研究和解决的问题是地震的现场预报. 一次较强地震发生后, 地震现场预报以及应急决策的正确与否, 直接关系到社会的稳定、经济的发展和人民生命财产的安全. 为了在震情紧张时给政府部门作出科学的决策提供依据, 有效地减轻地震灾害, 就需要对震情趋势迅速作出准确的判断. PTDSS 就是这样一个用于震后趋势判断决策的支持系统. 该系统主要采用地震学方法, 即主要根据序列本身提供的信息, 在数据处理结果的基础上依据我国地震现场预报的经验进行推理, 进而作出预报. 本文介绍了该系统的构成及其预报效果分述如下.

1 PTDSS 系统的构成

本系统由地震现场数据处理系统、专家系统、数据库、地震定位系统和地震现场工作大纲等五部分组成(图 1).

1.1 数据处理子系统

本部分目的在于能迅速地对各类数据(主要是地震序列数据)进行计算和处理, 提取各项预报指标作为专家系统推理的证据. 系统根据重新修订的“地震现场震情分析指南”所提供的各类方法并收集了其它有效的预报指标, 编写了相应的计算处理程序, 共有计算地震序列基本参数、绘制序列震中分布图、 $\sum E-t$ 、 $\sum E-\lg(t)$ 图、序列 $M-t$ 、 $N-t$ 、 $E-t$ 图以及计算序列 b 值、 h 值、 U 、 K 值和使用频次曲线、强余震等待时间等判断震情趋势的计算程序 16 个. 该子系统具有较强的图形功能和人机交互功能, 用户可根据系统提示, 采用人机交互方式在图形上确定

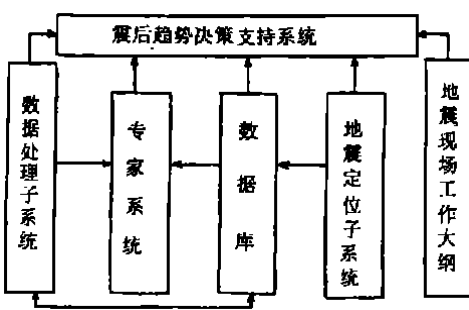


图 1 系统构成框图

Fig. 1 Framework of PTDSS.

一些曲线的异常时段和空间分布图像的某些特征等。各程序将产生相应结果的数据文件、图形文件和直接用于专家系统推理的证据文件。该子系统既可以对数据库系统检索形成的数据文件进行处理,也可以对用户利用其它编辑方式形成的数据文件进行加工处理。数据库、数据处理系统和专家系统这 3 部分实现了模块之间的紧密联系。本部分由若干个独立的功能模块组成(图 2)。

子系统中的简要自动处理由一些常用和比较有效的数据处理程序组成,其运行方法与自动处理相同,目的在于到达现场后通过简要处理就能对震情趋势迅速作出一个基本判断。

1.2 地震现场预报专家系统

本部分主要由编辑(知识获取和知识库)、学习、推理和解释 4 个子系统组成。根据数据处理系统的计算结果以及知识库中的专家经验,采用人机交互的方式对序列地震活动趋势进行判断和预报。主要回答:该序列是否为前震或余震序列;若为前震序列,其后可能发生的主震三要素如何;若为余震序列,下次强余震的三要素如何;序列类型以及序列活动趋势等 6 方面的问题。

1.2.1 编辑子系统

本部分的作用在于组织专家知识建立知识库和数据库。为此首先要解决的问题是知识表示的方法^[1]。要求对预报知识的表示既能准确,又要灵活,同时知识库也要便于修改、扩充或重新建立。因此我们按工具系统要求,将知识分为结构知识和推理知识 2 类。推理知识则用“框架”来表示断言,以“规则”为骨架建立断言间的关系,称这类知识表示方法为“规则/框架”知识表示法。该表示法的结论部分可以是一些确定目标也可以为函数表达式。

通过该子系统学习得到的知识由“主规则”及相应的 FAM 规则(模糊规则)构成。其中“主规则”仍采用“规则/框架”知识表示法;FAM 规则通过定义输入输出论域中的模糊子集和隶属度函数来实现。在知识库中除了贮存通过机器学习得到的一批十分有价值的知识外,还有根据重新修订的“地震现场震情分析指南”和许多专家总结得到的大量地震现场预报经验。各条知识的可信度由一些统计结果及国内一些有经验的地震现场预报专家确定。考虑到某些预报结论(如序列类型判断)具有互斥性,因此在这些结论的可信度中引入了负值。震情趋势判断中的部分知识还存在着知识可信度随时间变化的问题,如根据某些指标(如最大地震与次大地震之差 ΔM)预报序列类型时,其规则的可信度将随着序列持续时间增长而变大,这里通过异常证据可信度随时间的变化解决了这一问题。

1.2.2 学习子系统^[9]

该子系统具有良好的机器学习功能,克服了传统专家系统关于知识获取的“瓶颈”问题。众所周知,神经网络的一个重要特征就是具有良好的学习功能,但是其学习结果往往隐含在权值

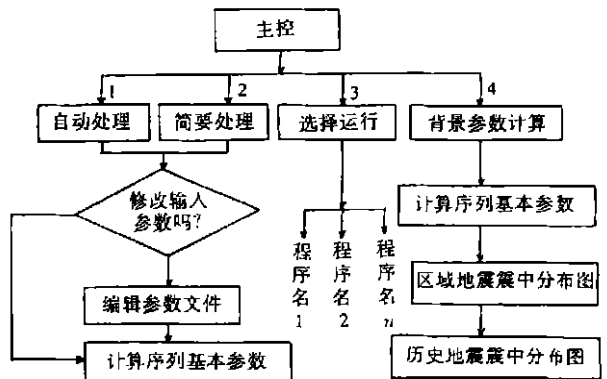


图 2 数据处理子系统结构框图

Fig. 2 The framework of data processing subsystem.

中,不便人们理解与解释;而模糊系统通过模糊语言变量可以很好地表达专家知识,但是它不具有学习功能.本系统使用模糊联想记忆 FAM (Fuzzy Associative Memory)模型,将神经网络与模糊系统结合起来,既使之具有良好的学习功能,又使得知识易于人们理解以及专家系统进行解释.该模型的学习采用自适应矢量量化 AVQ (Adaptive Vector-Quantization)竞争学习算法,通过对实际震例资料的积空间聚类可得到某预报指标的“主规则”及相应的模糊规则(FAM 规则).系统还针对地震实例库中样本通常不多的特点,使用随机数作为初始突触向量,并且将 Kohonen 自组织映射算法^[4,6]的思想引入到学习中,使得学习结果较为稳定.通过本子系统的学习得到了一批十分有意义的、目前专家尚未总结出的知识.

1.2.3 推理子系统^[1,6]

本部分的作用是依据知识库中的知识,使用数据处理子系统所得到的异常证据,或在推理过程中采用人机交互的方法输入一些证据,通过推理得到对震情趋势的判断意见.

系统的推理过程如图 3 所示.这里 E_a, \dots, E_m 表示证据;①和②即为第一层次的推理目标,它们表示“当前序列是否为前震序列”或“余震序列”;③~⑥为第二层次的推理目标,它们分别表示“主震三要素预报”、“下次余震三要素预报”、“地震序列类型”和“序列地震趋势预报”.在推理过程中我们把序列类型分为主震型、孤立型、双震型和震群型 4 大类.

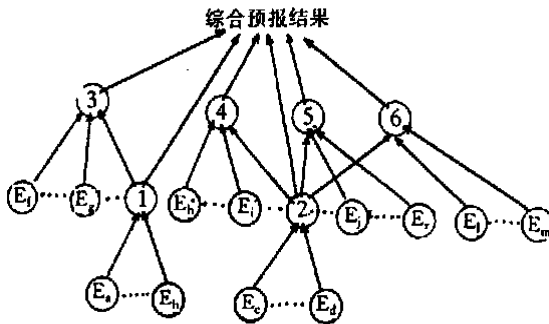


图 3 震后趋势预报推理过程树状图
Fig.3 Reasoning tree for post-earthquake tendency prediction.

合,对当前时间已经超过部分预报期间的情况,研究了在其后发震信度的变化问题.其推理过程的树状图如图 4 所示.

1.2.4 解释子系统^[1]

本子系统主要通过记录在推理过程中所使用的规则、证据、结论及其它方面的一系列信息,来回答用户提出的诸如使用了哪些知识,使用了哪些异常证据,为什么会得出这一结论等 6 个方面问题,使用户对推理过程有一个透彻的了解.

它具有优良的人机交互功能,用户可以方便地根据屏幕的提示来使用系统的各类功能,输入各类资料,包括修改和输入知识及规则,以建立适合本地区使用的专家系

推理机具有正向和反向推理的功能,它可通过使用数据处理系统的结果直接进行推理;也可以先由用户送入已知的各类属性和参数,然后进行推理;在不输入任何参数的情况下推理过程也可以通过人机交互实现.为避免人机交互过程中的遗忘,在推理过程中可直接调出数据处理系统产生的图形文件或数据文件供用户参考.推理机还使用了目标网的动态调度方法,这将大大提高推理效率.该子系统可使用学习得到的 FAM 规则及专家总结的规则这 2 类知识进行有效的推理与综

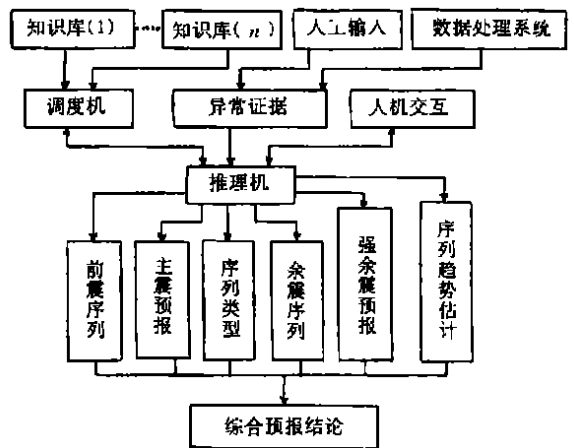


图 4 推理子系统结构框图
Fig.4 The framework of reasoning subsystem.

统,了解系统的工作过程及推理结果.此外,该子系统还具有对知识库的一致性检查功能.

1.3 数据库

现场震情分析中使用大量的数据,如区域地震目录、序列地震目录、历史地震目录、地震震相和前兆数据等.设置本部分的目的在于对上述各类数据进行管理.

1.4 地震定位子系统

本部分的功能在于使用一些地震现场常用的方法进行地震定位.它包括了解析法、石川法和交切法等适合于一些不同震相的定位程序.系统特别推荐用解析法进行定位,只要输入适合于本地区的地壳速度结构模型就能给出好的定位结果,即使台站偏于一边也无妨.该子系统图形功能强,可通过人机交互定位,使用方便、直观.

1.5 地震现场工作大纲

本部分存贮了中国地震局科技监测司发布的“地震现场工作大纲”及其各类表格.用户可以通过屏幕阅读“大纲”指导我们的工作.

地震现场预报专家系统的总体结构见图 5.

2 系统对震例的检验

该系统为震后地震数据处理及趋势判断提供了有力的工具,但系统的质量好坏和水平高低需通过实际地震序列的检验.由于该系统建成后我国发生的较强地震序列很少,缺少检验的机会.为弥补这一缺陷,我们用对已发生的部分地震序列进行了回顾性预测,以检验本系统的使用效果.下面将就检验方法、效果分述如下.

2.1 资料与方法

2.1.1 资料

选取自 1973 年以来记录较全的 15 个地震序列.这些序列的地震记录较全,其中 $M_L \geq 7$ 地震 6 次, $6 \leq M_L \leq 7$ 地震 6 次和 3 次 $5 \leq M_L \leq 6$ 地震(表 1).使用序列目录的起始震级取古登堡关系式呈线性部分的最小震级.当序列中地震太多时,起始震级可适当提高.

2.1.2 检验方法

震情判断贯穿于序列全过程,因此我们对序列的检验都是自序列初期开始,从序列开始一天之内、一天、二天……逐步向后进行.检验时间长短一般根据序列持续时间长短、强余震的持续时间而定.对 7 级以上地震,检验时间一般自序列开始至 2 个月以上,有些甚至 3~4 个月;而对 5~6 级地震一般为一个月左右.

检验时主要运行系统的第一、二和三部分,即先运行“数据处理系统”,然后运行“专家系统”进行推理,最后运行解释子系统,详细了解推理的全部结果以及推理结论是如何得到的.当某推理结论的可信度 $CF \geq 0.4$ 时,则认为该结论有一定的可能性成立,当 $CF < 0.4$ 时,则认为该预报结论不成立.

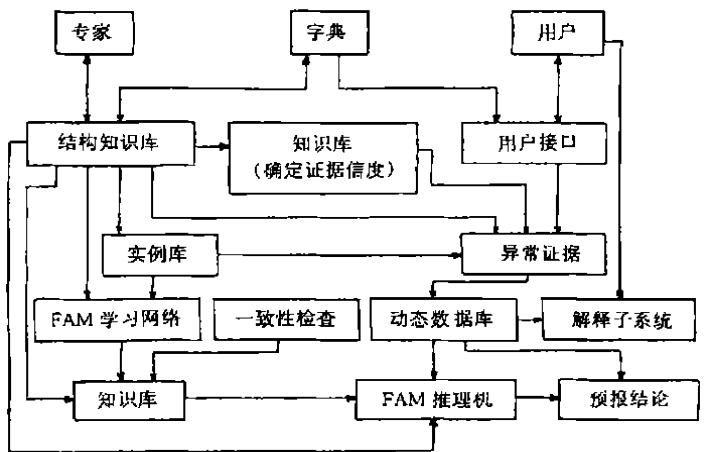


图 5 地震预报专家系统总体结构框图

Fig. 5 The framework of earthquake prediction expert system.

表1 地震序列参数

发震日期	震中位置		发震地点	主震 震级 (M_L)	检验用 起始震 级(M_L)	序列 类型	有无 前震
	北纬	东经					
1973-06-19	28°48'	122°48'	四川 马边	5.5	1.8	震群型	有
1975-02-04	40°39'	103°36'	辽宁 海城	7.4	2.0	主震型	有
1976-05-29	24°37'	98°50'	云南 龙陵	7.4	3.0	双震型	有
1976-07-28	39°38'	118°11'	河北 唐山	7.9	3.0	主震型	无
1976-08-16	32°42'	104°05'	四川 松潘	7.3	2.3	双震型	无
1979-07-09	31°27'	119°15'	江苏 溧阳	6.3	1.0	主震型	无
1981-08-13	40°30'	113°25'	内蒙 丰镇	5.8	1.4	孤立型	无
1984-01-06	37°59'	102°10'	甘肃 九条岭	5.8	1.0	主震型	有
1984-05-21	32°38'	121°35'	南 黄 海	6.3	2.0	震群型	有
1985-04-18	25°51'	102°49'	云南 禄劝	6.5	2.0	主震型	无
1988-11-06	22°50'	99°43'	云南 澜沧	7.6	2.0	震群型	无
1989-04-16	30°00'	99°24'	四川 巴塘	6.9	1.5	双震型	有
1989-10-18	39°57'	113°50'	山西 大同	6.1	1.5	震群型	有
1990-04-26	36°07'	100°08'	青海 共和	7.0	1.5	主震型	无
1990-10-20	37°07'	103°36'	甘肃 景泰	6.4	1.5	主震型	无

2.2 系统对实际序列的检验结果

2.2.1 余震序列及序列类型的检验结果

地震现场预报中首先是要判别序列为前震或余震序列以及该序列的类型. 由表1可知, 在所检验的15个序列中, 有7个具有前震. 但这7个序列中除海城地震的前震序列时间较长、前震数量较多外, 其它6个序列的前震要么时间较短、仅几个小时; 或者前震很少而无法进行预报. 对于海城地震, 根据前震序列资料使用本系统可以对前震与主震发生时间做出较好的预报. 下面我们将就当在序列最大地震发生后一天、二天、三天和五天时, 利用本系统推断“序列为余震序列”以及其“序列类型”的情况进行分析. 表2列出了利用该系统在序列最大地震发生后不同时间所推出的结果, 表中给出了在不同可信度范围内的震例个数. 对于序列类型判断, 表中给出的结果为对各序列相应实际类型的推理结果.

表2 最大地震后利用PTDSS系统对余震序列及序列类型的判断情况(序列个数与百分比)

距序列最大 地震的时间	余震序列								序列类型							
	$CF < 0.4$		$0.4 \sim 0.6$		$0.6 \sim 0.8$		$0.8 \sim 1.0$		$CF < 0.4$		$0.4 \sim 0.6$		$0.6 \sim 0.8$		$0.8 \sim 1.0$	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
1天	—	—	7	47	7	47	1	7	3	20	5	33	7	47	—	—
2天	—	—	2	13	10	67	3	20	3	20	2	13	7	47	3	20
3天	—	—	—	—	6	40	9	60	1	7	2	13	5	33	7	47
5天	—	—	—	—	4	27	11	73	1	7	1	7	4	27	9	60

由表2可知, 序列最大地震发生后一天即可对当前序列是否为余震序列做出一定判断; 当二天时, 对大部分序列判断其为余震序列的可能性较大; 当3~5天后, 则大部分序列判断其为余震序列的可能性变为很大. 对于序列类型的判断, 情况与此类似. 值得指出的是对松潘和巴塘二次双震型序列在序列初期对类型的判断效果不好, 往往要等到第二次主震发生方能对序列类型做出正确判断. 这是由目前的预报水平和能力所限, 在实际预报中的情况也是如此.

综上所述,利用PTDSS系统,通常在序列最大地震发生后2~3天,便可对当前序列是否为余震序列以及序列类型作出较好的判断.

2.2.2 强余震预报效果的检验

震情趋势判断的另一个重要内容是对未来可能发生的强余震(包括双震型序列的第二主震)作出预报.在对强余震的预报中,最主要的是关于强余震发生时间的预报.至于强余震发生地点,由于7级以下地震的余震区尺度较小,预报价值不大,仅当主震震级大于7.0级时方有意义.而对强余震的震级大小,由于目前的预报方法和经验尚不多,进行较准确的预报尚有一定难度.因此检验系统对强余震的预报效果时,将着重讨论对强余震发生时间的预报效果.

检验将包括2类:一类是关于预报强余震的效果,这是我们着重研究的;另一类是关于预报无强余震的效果检验,本研究在这方面所取样本相对前者较少.在检验中对所预报的强余震震级作如下规定:对7级以上地震序列,一般取5级以上的余震作为强余震;对6级以上序列,取4级以上余震为强余震;对5级以上序列,取3~3.5级以上余震为强余震.对具体地震序列还将视实际情况而定.关于强余震的预报时间作如下规定:在序列前期(主震发生后20天之内),某一预报时刻($CF \geq 0.4$)之后2天内若有所规定的强余震发生,则认为报准;而在序列中期(主震发生20天之后),某一预报时刻之后3天内有强余震发生,则认为报准.对于其后数天内无强余震预报的时间规定也同上.

表3为按上述规定对15次地震序列预报效果的统计.从这72次的预报中可以得到:

$$\text{报有震报准率} = 26/33 = 0.79$$

$$R \text{ 评分} = 0.79 - 12/39 = 0.48$$

上述分析表明,利用PTDSS系统对强余震进行预报

是十分有价值的.

3 结束语

PTDSS是在“基于知识的地震现场预报系统”^[5]和“新一代地震预报专家系统”^[9]的基础上建立起来的震后趋势决策支持系统,它是具有机器学习功能的第2代专家系统.将神经网络与模糊系统的结合,充分发挥各自的优点,这是近年来的事,Kosko^[2,3]做了开创性工作.本系统的研制成功,使得自适应地学习地震现场预报知识成为可能.该系统既有一般专家系统所具有的功能,还提供了建造专家系统的工具,既具有较强的解释能力,又具有较强的学习功能.通过对实际震例的检验,表明该系统具有良好的预报效果.

应当指出的是,虽然在实际检验过程中笔者试图尽可能地客观,由于是震后进行检验,地震序列的发震情况已知,因此实际检验结果中可能仍带有一定的人为因素,一些评分可能略为偏高.但是本检验中所使用的预报方法主要是基于序列地震目录,在现场预报中还可加入其它方面的一些有效方法,如一些地震运动学与动力学参数或若干效果较好的前兆方法,其预报效果还可能有所提高.

[参考文献]

(下转 411 页)

表3 强余震预报效果检验的统计

预报情况	地震实况		Σ
	无震	有震	
无震	27	7	34
有震	12	26	38
Σ	39	33	72

- [10] 张元东. 1987、1988、1989 年重要天象[J]. 地震, 1987 (3): 58—59; 1988 (1): 59—60; 1989 (2): 79—80.

THE ASTRONOMICAL CONDITION OF EL NINO

YANG Xue-xiang

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Science, Beijing 100012, China)

Key words: El Nino; Volcano activity; Rotation of the earth

(上接 409 页)

- [1] 庄昆元, 王伟, 黄冰树, 等. 地震预报专家系统[M]. 北京: 地震出版社, 1991.
- [2] Kosko B. Neural Network and Fuzzy System——A dynamical system approach for machine intelligence[M]. Englewood Cliff; Prentice Hall, 1991.
- [3] Kosko B. Fussy Associative Memories. Kendel A (edited). Fuzzy Expert System[C]. Reading, MA, Addison-Wesley, 1987.
- [4] Kohonen T. Self-Organization and Associative Memory[M]. Berlin, Springer-Verag, 1984.
- [5] 王伟, 庄昆元, 黄冰树, 等. 基于知识的地震现场预报系统 KPSES[J]. 中国地震, 1994, 10(1): 89—92.
- [6] 王伟. 模糊联想记忆神经网络模型在地震预报中的应用[J]. 地震学报, 1997, 19(3): 254—260.
- [7] 张肇诚. 中国震例[M]. 北京: 地震出版社, 1990.

POST-EARTHQUAKE TENDENCY DECISION SUPPORT SYSTEM

ZHUANG Kun-yuan¹, HUANG Bing-shu², WANG Wei¹, ZHANG Cun¹

(1. Seismological Bureau of Shanghai, Shanghai 200062, China;

2. Shanghai Institute of Material, Shanghai 200479, China)

Abstract: According to the requirement of “Instruction for Earthquake Situation Analysis at Site” (revised by Seismological Bureau of China), a system PTDSS (Post-Earthquake Tendency Decision Support System) was built which combined with data processing, earthquake locating, expert system and database as one system. In this system, FAM (Fussy Associative Memory) model is used to make this system having function of self-learning, the main characteristic of second generation expert system. In the knowledge base not only many experts’ experiences are collected; but also many valuable new knowledge learnt by system itself is included which is meaningful for tendency decision making up and up to now it is still not summarized by prediction expert. The results of examination for earthquake cases show the system possesses good prediction ability.

Key words: Post-earthquake tendency decision; Support system; Fuzzy associative memory model; Prediction ability