

新一代地震预报专家系统 NGESEP 预报效能的初步研究

蒋春曦 李东升 王 炜

(安徽省地震局, 合肥 230031)

摘 要 利用 40 个地震震例对新一代地震预报专家系统 NGESEP 的预报效果进行检验。比较了使用信度分布图和信度等值线图两种方法预报未来发展地点的效能, 分析了系统对地震三要素的预报结果, 表明该系统具有较高的预报效能。

主题词: 地震预报; 专家系统; 预报效能

0 引 言

专家系统就一个应用知识和推理以解决需要人类专家才能解决困难问题的计算机程序, 它所给出的解应能达到专家的水平。自七十年代推出以 MYCIN 为代表的第一代专家系统(即传统的 ES)后, 八十年代专家系统技术在全球很多领域有了广泛的应用。其间我国地震界的安徽省地震局、国家地震局地球物理所和分析中心于 1989 年分别研制成功了三个地震预报专家系统^[1]; 1992 年安徽省地震局又研制成功“地震现场预报专家系统”^[2]。目前这些系统在我国的地震预报中正发挥着重要作用, 但是上述几个系统都是属于第一代专家系统。

第一代专家系统特征是知识与推理分离的经验系统。其中知识用符号表示, 包括事实、领域知识和控制知识三个层次, 它们来源于知识工程师对专家经验的整理和形式化, 因此第一代专家系统是经验系统。通常一个完整的系统由知识库、推理机和解释器三部分构成。但是第一代专家系统的“瓶颈”问题是知识获取。知识来自符号表示的手工经验获取, 而经验来自专家的主观认识。知识获取效率低, 如果专家经验的谬误以及知识工程师中介的偏差则会造成知识的失真、缺乏和不一致。因此专家系统的发展依赖于学习和推理技术的进步。目前正在兴起的第二代专家系统为解决知识获取的“瓶颈”, 则力图从事实数据中自动提取知识, 即实现机器学习。从而使得学习器、知识库、推理机和解释器成为第二代专家系统的必备主件。

八十年代中期以来, 人工神经网络理论和应用开始在世界范围内重新兴起, 并且在很多领域有着很成功的应用。由于人工神经网络较强的学习功能, 它与专家系统在技术上具有定量分析与定性分析、自动获取知识与手工获取知识的互补性, 因此集两者的学习和推理功能于一体的神经网络专家系统成为第二代专家系统的主流。但是神经网络中

的知识通常隐含在权值中,不易被人们理解与解释,于是近几年来科学家开始将神经网络、模糊系统与专家系统结合起来,以充分发挥各自的优点,这是目前在专家系统和神经网络领域的前沿研究课题。

在这种情况下,我们研制成功了“新一代的地震预报专家系统 NGESEP”(New Generation Expert System for Earthquake Prediction),系统由编辑、学习、推理和解释四个子系统组成,其框图如图 1 所示。该系统将模糊神经网络(模糊联想记忆 FAM 模型)与传统的专家系统技术相结合。系统除具有第一代专家系统的较强符号推理和解释功能外,还具有较强的学习功能。这使得系统可以通过学习器学习得到一批十分有价值的知识。对于其它预报指标,由于样本较少不便学习,因此系统还有大量专家总结得到的知识。由于系统知识表示能力较强,系统知识库中知识十分丰富,同时系统的推理过程也设计得更加合理,系统在某些预报参数的预测中还运用了 BP 神经网络。在预报意见的综合过程中使用了改进的 MYCIN 不精确推理方法,提出可信度密度的概念,并采用可信度分布图和可信度密度等值线的方法预报未来地震发生区域,这些使得系统具有更好的预报效果。本文将检验新一代地震预报专家系统 NGESEP^①以评估该专家系统的预报效能。检验所用异常证据取自系统的实例库,库中存储了《中国震例》^[3]一书及其它文献中的震前异常资料。根据《中国震例》对异常可靠程度给定的类别,异常证据可信度 $CF(E)$ 基本按下面规定给出:Ⅰ类, $CF(E) = 1.0$; Ⅱ类, $CF(E) = 0.75$; Ⅲ类, $CF(E) = 0.5$; Ⅳ类, $CF(E) = 0.25$ 。

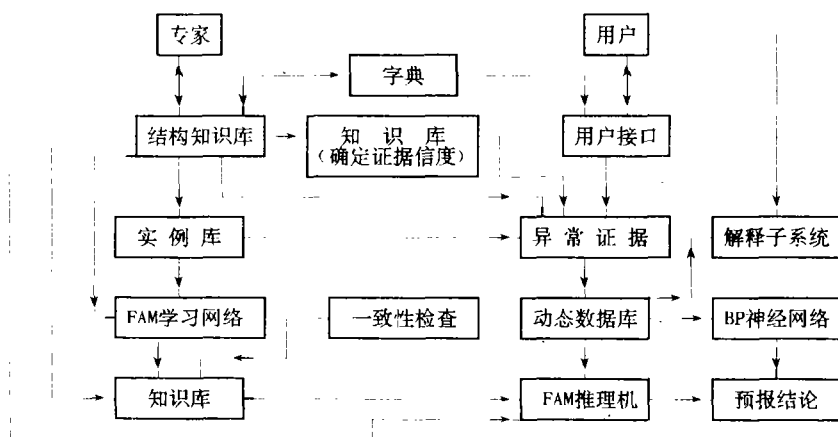


图 1 NGESEP 系统框图

1 关于地震地点的预报效能评估

在发震地点的预报中,由于各项异常的预报区域各不一致,即目标不一致,这样就

^① 王伟、吴耿锋、黄冰树等,新一代地震预报专家系统 NGESEP——基于模糊神经网络和符号的地震预报专家系统,1995(待发表)。

无法用 MYCIN 模型综合,为此本系统将异常所预报区域分为许多独立的预报单元,使之能作为许多独立的事件来处理,然后对于相同的独立事件运用 MYCIN 方法作信度综合,这样便可以得到发生中强以上地震的可信度分布图^[1]。通常我们可以将信度较高的区域视为地震危险区。如果想得到该危险区的发震综合信度,则可将危险区中各个预报单元的信度采用 MYCIN 方法综合得到。震例检验及应用效果表明,采用这种方法预报发震地点是成功的。

但是上述信度分布图中的数值是指在各单位面积中发生中强以上地震的可信度,由于单位面积大小的划分是根据用户的需要设定的,如果大小不一样,则数值将会有很大的差异。为了从整体上把握未来地震的形势,通常我们希望用发震信度等值线的办法来表示,或者说要求空间上的每一点的发震信度是一个确定值。但是每点的发震信度与地图上的每点的高程或平面上某一物理场的强度值是不同的,因为在空间上的某点处发生地震的信度是一个微小量,就好象在某区域中发生事件 A 的概率为 P 时,但在该区域内某处发生事件 A 的概率则是一个微小量一样。为了表示其发生概率的大小就要引入概率密度概念。同样,我们为了能比较直观地用等值线图来表示地震形势在空间上的分布,也需要引入发震信度密度的概念。通常我们认为在某预报地点周围一定范围内(如相邻的 4 平方度内)发生的地震就是我们所要预报的地震,这样我们可以取以某点为中心的相邻 4 平方度范围内的发震信度为该点的发震信度密度(可简称为信度,用 CF_d 表示)。据此我们可以得到预报区域中各点的发震信度密度,并给出发震信度密度等值线图,根据震例检验可取等值线 $CF_d \geq 0.4$ 的区域为异常区。该方法使得对发震地点的预报更加精确、直观,提高了预报效能。

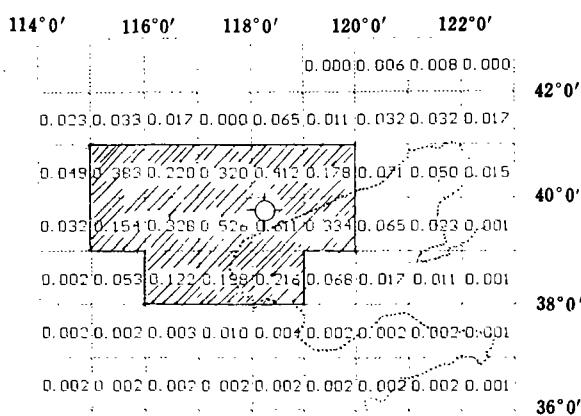


图 2 唐山地震前的可信度空间分布图
和可信度密度等值线图

由上述可知,在 NGESEP 中关于发震地点的预报有两类不同的表示方法,即可根据发震可信度分布图或可信度密度等值线图确定未来发震危险区。系统可以通过实例库获取各震例震前异常并进行推理,分别得到可信度分布图和可信度密度等值线图。图 2 是根据 1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震前的异常资料得到的发生中强以上地震可信度空间分布图,其中阴影区表示发震信度值 $CF \geq 0.1$ 的危险区域。图 2 为相应的可信度密度分布图。本文检验了实例库中的 40 次震例,其结果列于表 1。表中列出了

在两类不同图中震中所在位置的信度值与信度密度值 CF_1 ; 也给出了这两类图中最大信度值和信度密度值 CF_2 。由这些结果分析可知,绝大多数地震发生在可信度分布图 $CF \geq 0.1$ 的危险区内,其比例为 $38/40 = 0.95$; 同时有 $36/40 = 90\%$ 的地震落在可信度密度等值线图 $CF_d \geq 0.4$ 的危险区内。另外,地震通常还发生在可信度分布图中信度最大值区域以及可信度密度等值线图的最大值圈内,其比例分别为 $30/40 = 0.75$ 和 $33/40 = 0.83$ 。

由此可知在对发震地点的实际预报中应取 $CF \geq 0.1$ 或 $CF_d \geq 0.4$ 并且是信度值最大的区域为预报区域。

分析上述两类图的预报效能,从直观上看似乎信度密度等值线最大值区域小于信度分布图。通常我们认为信度最大值越高、其面积越小,则该方法的预报效果也越好。为比较这两类图的预报效能,这里引入空间预报效能比

$$R(CF) = CF/S(CF) \quad (1)$$

式中 CF 为震中所在区域的信度值或信度密度值, $S(CF)$ 为在图中信度大于或等于 CF 的区域总面积(单位:平方度)。显然 $R(CF)$ 越大,其预报效果越好。由于信度密度值是信度分布图中 4 个相邻单位面积中信度值的 MYCIN 和,其危险区划分阈值为 0.4,而信度分布图的危险区划分阈值为 0.1,为比较两者的预报效能,在计算信度密度图的 $R(CF)$ (表示为 $R(CF_d)$)时,为简单起见,取 $CF = CF_d - 0.3$,再代入(1)式计算。检验结果如表 1,表中“—”表示震中未落入 $CF \geq 0.1$ 或 $CF_d \geq 0.4$ 阈值范围内。由表可见:40 个震例中有 10 个震例(表中带 $\times$ 号的地震)的 $R(CF)$ 值高于 $R_d(CF)$ 值;有 2 个震例(表中带 $\approx$ 号的地震)结果相近;其余 28 个震例(表中带 $\checkmark$ 号的地震), $R(CF)$ 值小于 $R_d(CF)$ 值。这表明从总体上说空间信度密度等值线分布图对发震地点的预报效果更为理想。

2 地震三要素的综合预报效能评估

使用 NGESEP 进行实际预报时,通常我们先根据可信度空间分布图圈出 $CF \geq 0.1$ 或者可信度密度等值线图中 $CF_d \geq 0.4$ 阈值的高发震信度区并作为预报区,然后对圈定的预报区进行推理,并给出对该区的综合预报意见。限于篇幅,我们将所做 40 个震例的检验结果和分析结果浓缩于表 2 中。由表可见系统对发震地区的预报结果很好,若以地震落入上述由可信度空间分布图确定的预报区内为报准,则 40 个震例中报准 38 个,报准率达 95%,说明系统对有关空间信息的提取和处理是有效的;在发震时间在预报中,根据我们的研究结果和经验,取信度 $CF \geq 0.4$ 为阈值,认为 $CF < 0.4$ 时在该时段发震可能性不大。根据统计,中期预报成功($CF \geq 0.4$)的有 38 例,占 95%。对于临震预报,可信度是指临震阶段四个子目标的 MYCIN 和。在上述 40 个震例中,系统得到在临震阶段可信度 $CF \geq 0.4$ 的震例有 20 个,报准率为 50%,这表明目前尤其是对 5—6 级中强震的临震预报是困难的。由于中强震的中期向短期预报过渡指标的研究和预报经验不够丰富,系统给出的短期预报的报准率低于中期预报和临震预报;在地震震级的预报中,系统在 40 个震例的震级预报中报准 28 个,报准率为 70%。分析对不同档次震级的预报情况,震级在 5~5.9 档的有 21 个,报准 12 个;在 6~6.9 档的有 13 个,报准 12 个;在 7~7.9 档的有 6 个,报准 4 个。系统对这 3 个震级档地震的报准率分别为 56%, 92% 和 67%,表明系统对 $M_s \geq 6.0$ 级地震的震级预报效果较好。

由上述结果的进一步分析可知,使用本系统对地震进行中期预报以及对发震地点的预报具有较好的效果。而对地震短期预报和临震预报的效果分为两类情况。对 7 级以上强震或部分 6 级以上地震,其短临预报效果较好;但对于一些 5~6 级中强震,则其短临预报效果不够理想,这主要是由于这类地震前所出现的短期和临震异常较少甚至根本不

出现所致。对于震级的预报也同样如此。从总体上看上述预报结果是远高出目前的预报水平, 应该指出的是, 本文所使用的震例库资料是震后总结得到的, 但这也一定程度上反应了目前地震预报的状态和水平。系统也使用了部分曾作出过预报震例的震前发现的异常资料进行推理, 其预报效果十分理想。由于本系统知识丰富、推理过程合理, 可以给出具有一定可信度的预报意见, 因此本系统的研制成功将极大地推进了地震预报由经

表 1 空间预报效能比 R (CF) 值

地震名	发震时间 年 月 日	震中		震级 M_s	信度分布图			信度密度等值线图			
		Lat	Long		CF1	CF2	R (CF)	CF1	CF2	R (CF)	
西吉	70.1203	35.5	105.3	5.5	0.20	0.26	0.033	0.5	0.5	0.4	✓
炉霍	73.0206	31.3	100.2	7.9	0.45	0.45	0.4	0.6	0.6	0.6	✓
海城	75.0204	40.7	122.8	7.3	0.69	0.69	0.6	0.9	0.9	0.4	×
和林格尔	76.0406	40.1	112.1	6.3	0.29	0.29	0.1	0.5	0.5	0.2	✓
龙陵	76.0529	24.33	98.45	7.6	0.45	0.45	0.4	0.6	0.6	0.72	✓
松潘	76.0816	32.42	104.12	7.2	0.12	0.12	0.05	0.5	0.5	0.1	✓
唐山	76.0728	39.38	118.11	7.8	0.61	0.61	0.6	0.9	0.9	1.2	✓
巴音木仁	76.0923	40.05	106.21	6.2	0.27	0.32	0.1	0.6	0.6	0.3	✓
平果	77.1010	23.2	107.3	5.0	0.34	0.34	0.3	0.4	0.4	0.17	×
下关	78.0519	25.3	100.2	5.3	0.43	0.43	0.4	0.4	0.4	0.07	×
固镇	79.0302	33.2	117.6	5.0	0.39	0.39	0.3	0.5	0.5	0.53	✓
普尔	79.0315	23.1	101.1	6.8	0.40	0.40	0.3	0.5	0.5	0.1	×
库车	79.0329	41.5	83.3	6.0	0.13	0.13	0.1	0.6	0.6	0.3	✓
介休	79.0619	37.06	111.54	5.2	0.26	0.26	0.2	0.3	0.4	—	×
溧阳	79.0709	31.3	119.2	6.0	0.65	0.65	0.6	0.8	0.8	0.83	✓
五原	79.0825	41.14	108.07	6.0	0.23	0.23	0.2	0.4	0.4	0.2	≈
道孚	81.0124	31.00	100.10	6.9	0.46	0.46	0.2	0.6	0.6	0.643	✓
丰镇	81.0813	40.30	113.25	5.8	0.37	0.37	0.3	0.5	0.5	0.412	✓
龙南	82.0225	24.44	114.48	5.8	0.03	0.23	—	0.3	0.4	—	≈
海源	82.0414	36.45	105.3	5.5	0.21	0.23	0.05	0.5	0.5	0.15	✓
甘孜	82.0616	31.5	99.51	6.0	0.13	0.13	0.1	0.5	0.5	0.2	✓
剑川	82.0703	26.3	99.5	5.4	0.51	0.51	0.5	0.8	0.8	1.667	✓
呼图壁	83.0303	43.6	86.4	5.4	0.11	0.11	0.025	0.3	0.4	—	×
阜康	83.0601	43.51	88.36	5.3	0.25	0.25	0.2	0.4	0.4	0.336	✓
菏泽	83.1107	35.18	115.36	5.9	0.37	0.37	0.3	0.6	0.6	0.43	✓
武威	84.0106	37.6	102.1	5.3	0.48	0.48	0.4	0.6	0.6	0.8	✓
黄海	84.0521	32.3	121.4	6.2	0.19	0.32	0.01	0.5	0.6	0.013	✓
禄劝	85.0418	25.5	102.5	6.3	0.41	0.41	0.4	0.6	0.6	0.15	×
乌恰	85.0823	39.2	75.4	7.4	0.52	0.52	0.5	0.6	0.6	0.4	×
建水	85.0902	23.36	102.41	5.3	0.29	0.29	0.2	0.3	0.4	—	×
迭部	87.0108	34.1	103.1	5.9	0.12	0.20	0.008	0.4	0.5	0.02	✓
乌什	87.0124	41.3	79.2	6.4	0.28	0.28	0.067	0.5	0.5	0.1	✓
射阳	87.0217	33.55	120.32	5.1	0.27	0.27	0.2	0.4	0.4	0.05	×
库尔勒	88.0526	41.6	85.4	5.2	0.37	0.37	0.15	0.6	0.6	0.4	✓
苏南	88.1122	38.4	99.4	5.7	0.11	0.16	0.014	0.4	0.4	0.025	✓
大同	89.1019	39.6	113.5	6.1	0.13	0.54	0.006	0.5	0.5	0.009	✓
常熟	90.0210	31.4	121.0	5.1	0.45	0.45	0.15	0.8	0.8	1.333	✓
乌苏	90.1025	44.1	83.5	5.2	0.09	0.37	—	0.4	0.5	0.05	✓
柯坪	91.0225	40.2	79.0	6.5	0.54	0.54	0.2	0.8	0.8	1.0	✓
和静	91.0606	42.4	87.2	5.2	0.14	0.39	0.009	0.6	0.6	0.15	✓

验性预报向概率性预报的过渡。

表 2

震例检验结果

对地震三要素的报准率				对不同震级地震的报准率		
中期	临震	地点	震级	5.0~5.9	6.0~6.9	≥ 7.0
95%	50%	95%	70%	56%	92%	67%

3 震例检验

为检验系统的预报效果,本文利用系统对 1990 年 10 月 20 日景泰 6.2 级地震进行预报检验,根据震例总结得到的 41 项异常首先进行全局推理得到可信度分布图和可信度密度等值线图(图 3),取信度大于 0.1 的危险区($35^{\circ}\sim 39^{\circ}\text{N}$, $101^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$)进行分区推理得到如下综合预报结论:

$$M_s \geq 5 \quad M_s \geq 6 \quad M_s \geq 7$$

中期阶段: $CF=0.834$, $CF=0.834$, $CF=0.000$

短期阶段: $CF=0.778$, $CF=0.778$, $CF=0.000$

临震阶段: $CF=0.190$, $CF=0.190$, $CF=0.000$

在以很大可信度进行中期预报的基础上,当前不太可能已进入发生中强以上地震的临震阶段,未来地震的震级可能是 $M_s \geq 6.0$!

根据经验公式得到未来地震震级可能为 6.5 级。

根据 BP 神经网络得到未来地震震级可能为 6.8 级。

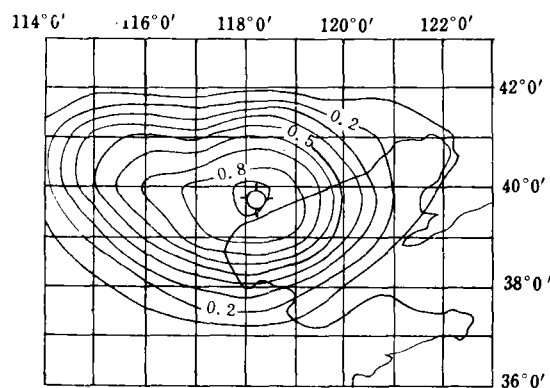


图 3 景泰地震前的可信度密度等值线图

由上述结论可知系统对该地震的预报效果较为理想。地震发生在可信度密度等值线的最高值圈内;其中期和短期预报的信度较高,而临震预报效果较差,这是由于震前的临震异常太少的原因;系统对震级的预报效果也较为理想,使用 BP 神经网络的结果比实际发生震级略为偏大。

4 结 语

本系统是新一代的地震预报的专家系统,系统无论在神经网络、专家系统领域还是在地震预报领域都有不少创新和发展。该系统较之我们以前研制的“地震预报专家系统 ESEP/PC”有突破性进展。该系统将模糊系统、神经网络与专家系统技术相结合,系统除具有第一代专家系统的较强符号推理与解释功能外,还具有较强的学习功能。

系统经大量震例的检验取得较为理想的预报效果。其中,对发震地点的报准率相当好,说明采用的空间信度分布图和等值线表示方法是成功的;对地震中期预报的效果较好,但对 5~6 级中强震的短临预报效果不够理想;在震级的预报中,对 $M_s \geq 6$ 级地震有较高的预报效能。应该指出的是,专家系统依赖于知识,随着观察事实的增多、人类对

地震规律认识的深化和本系统知识库知识的丰富，系统的预报效能将会进一步提高。

(1996 年 5 月 6 日收到初稿)

参 考 文 献

- 1 庄昆元, 王伟, 黄冰树, 等. 地震预报专家系统. 北京: 地震出版社, 1991, 107—120
- 2 王伟, 庄昆元, 黄冰树, 等. 基于知识的地震现场预系统 KPSES. 中国地震, 1994, 10 (1): 89—92
- 3 张肇诚主编. 中国震例. 北京: 地震出版社, 1990.

RESEARCHES ON THE PREDICTION EFFICIENCY OF NEW GENERATION EXPERT SYSTEM FOR EARTHQUAKE PREDICTION

Jiang Chunxi Li Dongsheng Wang Wei

(Seismological Bureau of Anhui Province, Hefei, 230031)

Abstract

In the paper, a new generation expert system for earthquake prediction (NGESEP) is tested by 40 earthquake cases. The contour method and certainty distribution map method are introduced to express the spatial distribution of earthquake occurrence certainty, and the features of two methods are compared. We also analyse the forecast results of NGESEP for the epicenter, time, and magnitude of earthquakes. Results show that the expert system is efficient to forecast the occurrence time, epicenter and magnitude of earthquakes.

Subjectwords: Earquake predictim, Expert syetem, Prediction efficiency