

利用人工神经网络推断曲线间的空间关系

刘亚彬¹⁾ 刘大有¹⁾ 王金鹤²⁾

¹⁾(吉林大学计算机科学与技术学院, 符号计算与知识工程教育部重点实验室, 长春 130023)

²⁾(青岛海信集团公司, 青岛 266071)

摘要 在利用综合信息进行矿产预测中, 航磁和重力图件一阶导数极值线(曲线)分别反映了地质体的磁性和密度断裂, 为了推断不同深度地质体的断裂构造、产状和规模, 需要对不同延拓高度、不同方向的航磁和重力曲线进行比较, 以推断它们之间的空间关系是否相似, 只有相似的曲线所反映的断裂才是可靠的. 为了能够自动进行这种推理分析, 给出了曲线间空间关系推理的神经网络方法, 并且与传统的曲线间空间关系的判断方法进行了比较. 结果表明, 利用神经网络方法进行曲线间空间关系分析所得到的判断结果与权威地质专家的判断非常吻合, 在实际应用中取得了令人满意的效果.

关键词 空间关系 相似 模糊逻辑 神经网络

中图法分类号: TP18 TP391.7 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2002)01-0063-06

Reasoning of Spatial Relation Between Curves by Neural Network

LIU Ya-bin¹⁾, LIU Da-you¹⁾, WANG Jin-he²⁾

¹⁾(College of Computer Science and technology, Jilin University Symbol Computation and Knowledge Engineering, Key Laboratory of the Ministry of Education, Changchun 130023)

²⁾(HISENSE Group Co. Qingdao 266071)

Abstract In the field of synthetic information forecast for mineral product, extremum lines (curves) of the first order differential coefficient of aeromagnetic and gravitational maps reflect the ruptures of magnetism and the densities of geologic bodies respectively. In order to deduce the rupture conformation, the similarities of attitude and size of geologic bodies in different deepness, curves of aeromagnetic and gravitational maps in different deepness and directions must be compared; only those ruptures of reflection with similar curves are reliable. In order to deduce and analyze the situation automatically, in this paper, we first introduced the conventional estimation approach of spatial relation between curves. Later on, we also described the Neural Networks approach of reasoning of spatial relation between curves. The result indicate that these estimations of spatial relations between curves obtained by the Neural Networks approaches matched perfectly with the estimations of authoritative geological experts, and achieved triumphs in practical applications.

Keywords Spatial relation, Similar, Fuzzy logic, Neural networks

0 引言

空间推理是指利用空间理论和人工智能技术对空间对象建模、描述和表示, 并据此对空间对象间空

间关系进行定性或定量分析和处理的过程. 目前, 空间推理已被广泛应用于地理信息系统、机器人导航、高级视觉、自然语言理解、工程设计和物体相对位置的常识推理等领域, 是人工智能领域的一个研究热点^[1~3].

在综合信息矿产预测中,航磁和重力图件是建立综合信息找矿模型十分重要的信息,它们分别反映了地质体的磁性和密度差异,航磁和重力图件一阶导数极值线(与直线比较接近的曲线)分别反映了地质体的磁性和密度断裂,但是,一条航磁或重力曲线尚不足以说明其表示的磁性或密度断裂是否可靠地存在.在实际工作中,需要对不同延拓高度(500m,1 000m,3 000m,5 000m)、不同方向($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$)的航磁和重力曲线进行比较,以推断它们之间的空间关系是否相似,其中,相似的曲线所反映的断裂是可靠的^[4,5].

权威地质专家认为:如果两条曲线间的距离近、方向差别小,并且可比度(后面定义)高,则可以认为两条曲线相似.

根据所处理曲线的特点,本文选择带有属性的矢量数据模型^[6]来表示这些曲线.描述曲线数据模型结构的关系格式如下:

曲线标识	可靠程度	航磁/重力	延拓高度	方向	X-Y 坐标逻辑记录
------	------	-------	------	----	------------

其中,曲线标识是曲线的标识符;可靠程度表明曲线所表示的断裂是实际断裂的可能性,其初值是由地质专家给出的,如果有其他的曲线与之相似,它的可靠程度值会增加;航磁/重力表明曲线是航磁或重力曲线;延拓高度表明曲线的延拓高度;方向表明曲线的求导方向.

但是这里应该强调的是,因为航磁和重力曲线中,包含有模糊性和不确定性,所以曲线间空间关系的推理,应能处理模糊性和不确定性,而以往地质专家在用传统方法(文中介绍的)推断曲线间的相似关系时,没有充分考虑航磁和重力曲线中包含的模糊性和不确定性,因而存在着许多不足,例如,缺乏对模糊性和不确定性的描述与处理,还有主观性和随意性较强等等.

1 传统的曲线间空间关系判断方法

文献[7]中给出了一种传统的曲线间空间关系判断方法,为了与本文的研究工作比较,这里先对该方法进行一下简单介绍:对于任意一条曲线 P ,以 P 为中心,作一个宽为 ξ 的带,称为 P 的 ξ 带,记为 $P(\xi)$,如图1(a)所示,带的宽度 ξ 是由地质专家给定.若某曲线 Q 位于 $P(\xi)$ 内,则认为 Q 与 P 相似,否则认为 Q 与 P 不相似,但该方法存在下述问题,

现举例说明如下:

(1)在图1(b)中,某一很短的曲线 Q 虽然位于 $P(\xi)$ 内,但是方向与 P 相差很大,对此,传统的曲线空间关系判断方法会认为 Q 与 P 相似,但实际上这种情况下的 Q 与 P 并不相似.

(2)在图1(c)中,某一曲线 Q 的大部分在 $P(\xi)$ 内,且 Q 在 $P(\xi)$ 内的部分不仅与 P 距离很近,并且方向也基本相同,但由于 Q 不是全部在 $P(\xi)$ 内,因而传统方法会给出 Q 与 P 不相似的判断,但实际上这种情况的 Q 与 P 是相似的.

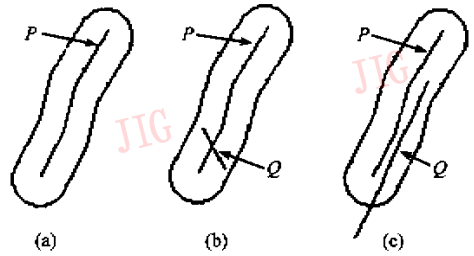


图1 传统的曲线间空间关系判断方法示意图

2 模糊参数的选择与模糊推理规则的形式

2.1 相关定义

定义1 令 P 是一条与直线比较接近的曲线,以 P 的两个端点连线为对角线的两条边与 X 轴平行的矩形 S_P 称为由曲线 P 确定的区域.

定义2 令由曲线 P 所确定的区域为 S_P ,由曲线 Q 所确定的区域为 S_Q , $S_{PQ}=S_P \cap S_Q$ (即 S_{PQ} 为 S_P 和 S_Q 的共同区域)称为曲线 P 和 Q 的I类共同区域.若 $S_{PQ}=\emptyset$ (\emptyset 表示空集),则称曲线 P 和 Q 无I类共同区域.

定义3 令曲线 P 和 Q 同时顺时针旋转 45° 后得到的曲线分别称为 P' 和 Q' , $S_{P'Q'}=S_{P'} \cap S_{Q'}$ 称为曲线 P 和 Q 的II类共同区域.若 $S_{P'Q'}=\emptyset$,则称曲线 P 和 Q 无II类共同区域.

定义4 如果曲线 P 和 Q 之间,既无I类共同区域,又无II类共同区域,则曲线 P 和 Q 不相似.

定义5 曲线 P 和 Q 之间,有I类或者II类共同区域是曲线 P 和 Q 相似的必要条件.

定义6 曲线 P 和 Q 之间的可比度定义为

$$\eta = \sqrt{\frac{2 \times \text{area}(S_{PQ})}{\text{area}(S_P) + \text{area}(S_Q)}}$$

或者

$$\eta = \sqrt{\frac{2 \times \text{area}(S_{P'Q'})}{\text{area}(S_P) + \text{area}(S_Q)}}$$

其中, $\text{sqrt}()$ 是求平方根函数, $\text{area}()$ 是求面积函数。

2.2 描述曲线间空间关系的参数

文中的曲线反映了地质体的磁性和密度断裂, 而地质专家则根据曲线之间的距离、方向差和可百度来推断曲线间的空间关系. 对于具有 I 类或 II 类共同区域的曲线 P 和 Q , 可用下面一组参数来描述曲线之间的空间关系. 在图 2 中, 令曲线 P 和 Q 所确定的区域分别为 S_P 和 S_Q 或者 $S_{P'}$ 和 $S_{Q'}$, 曲线 P 和 Q 的 I 类或 II 类共同区域为 S_{PQ} 或 $S_{P'Q'}$, 令曲线 P 与 S_{PQ} 或 $S_{P'Q'}$ 的交点为 A, D , 在曲线 P 上取 B, C 两点, 使 $\text{length}(\widehat{AB}) = \text{length}(\widehat{BC}) = \text{length}(\widehat{CD})$, \widehat{AB} 表示连结 A 和 B 的曲线段, $\text{length}()$ 是求曲线段或直线段长度的函数; 然后过 A, B, C 和 D 分别作与它们的切线垂直的直线, 这些直线与曲线 Q 的交点分别为 E, F, G 和 H , 令

$$k_1 = \max(\text{length}(AE), \text{length}(BF), \text{length}(CG), \text{length}(DH))$$

$$k_2 = \text{mean}(\text{length}(AE), \text{length}(BF), \text{length}(CG), \text{length}(DH))$$

其中, $\max()$ 和 $\text{mean}()$ 分别是求最大值和平均值的函数. 直线段 AB, BC, CD, EF, FG 和 GH 与水平方向夹角分别为 $\theta_{11}, \theta_{21}, \theta_{31}, \theta_{12}, \theta_{22}$ 和 θ_{32} , 令

$$\theta_1 = \max(\text{abs}(\theta_{11} - \theta_{12}), \text{abs}(\theta_{21} - \theta_{22}), \text{abs}(\theta_{31} - \theta_{32}))$$

$$\theta_2 = \text{mean}(\text{abs}(\theta_{11} - \theta_{12}), \text{abs}(\theta_{21} - \theta_{22}), \text{abs}(\theta_{31} - \theta_{32}))$$

其中, $\text{abs}()$ 是求绝对值函数。

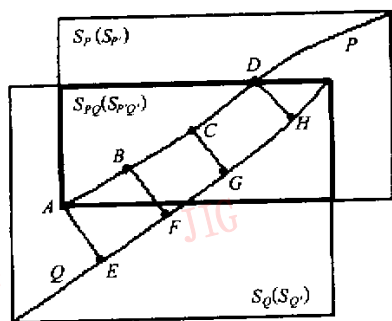


图 2 描述曲线间空间关系的参数

2.3 模糊推理规则的形式

参数 k_1 和 k_2 反映了曲线 P 和 Q 之间的距离关系 r_{PQ_D} , θ_1 和 θ_2 反映了曲线 P 和 Q 之间的方向关系 r_{PQ_E} , η 反映了曲线 P 和 Q 之间的可百度. 由此, 在综合信息矿产预测中, 就可以说, 根据 $k_1, k_2, \theta_1, \theta_2$ 和 η 就能推断曲线 P 和 Q 间的空间关系 r_{PQ_S} .

为了使规则操作简便、一致, 本文采用如下规则

表示形式: 规则的各个前件之间只有 AND 关系, 而没有 OR 关系, OR 关系用有相同后件的规则来表示. 本问题中规则的形式为:

Rule<规则名>

IF <对象 1><操作符 1><对象描述符 1>[(值 1)] AND

<对象 2><操作符 2><对象描述符 2>[(值 2)] AND

...

THEN <对象 n><操作符 n><对象描述符 n>[(值 n)]

[<规则强度>]

其中, “操作符”可以是“is”、= 或 \neq . “对象描述符”可以是普通的描述符 (\emptyset 、“YES”和“NO”, 也可以是 *short*, *small* 和 *high* 之类的模糊集合. 如果“对象描述符 i ($i=1, \dots, n$)”是普通的描述符, 则“(值 i)”是 1, 这时规则中可以不写“(值 i)”项; 如果“对象描述符 i ”是模糊集合, 则“(值 i)”是“对象 i ”对相应模糊集合的隶属度. 规则强度 $C \in [0, 1]$, 如果规则强度值是 1, 则规则中可以不写规则强度项. 在本问题的推理规则中, 值 $n = \text{规则强度} C \times (\text{值} 1 \wedge \text{值} 2 \wedge \dots)$, 其中, \wedge 是模糊与运算符. 本问题的规则库中有如下 9 条推理规则, 其中, 规则 7 与权威地质专家给出的相似定义是一致的.

Rule01: IF $S_{PQ} \neq \emptyset$ THEN $B = 1$.

Rule02: IF $S_{P'Q'} \neq \emptyset$ THEN $B = 1$.

Rule03: IF $S_{PQ} = \emptyset$ AND $S_{P'Q'} = \emptyset$ THEN $B = 0$.

Rule04: IF $B = 0$ THEN $r_{PQ_S} = \text{NO}$.

Rule05: IF $B = 1$ AND k_1 is *short* ($\mu_{\text{short}}(k_1)$) AND k_2 is *short* ($\mu_{\text{short}}(k_2)$)

THEN r_{PQ_D} is *short* ($\mu_{\text{short}}(r_{PQ_D})$) (C_1).

Rule06: IF $B = 1$ AND θ_1 is *small* ($\mu_{\text{small}}(\theta_1)$) AND θ_2 is *small* ($\mu_{\text{small}}(\theta_2)$)

THEN r_{PQ_E} is *small* ($\mu_{\text{small}}(r_{PQ_E})$) (C_2).

Rule07: IF r_{PQ_D} is *short* ($\mu_{\text{short}}(r_{PQ_D})$) AND r_{PQ_E} is *small* ($\mu_{\text{small}}(r_{PQ_E})$) AND η is *high* ($\mu_{\text{high}}(\eta)$)

THEN r_{PQ_S} is *similar* ($\mu_{\text{similar}}(r_{PQ_S})$) (C_3).

Rule08: IF $\mu_{\text{similar}}(r_{PQ_S}) \geq T$ THEN $r_{PQ_S} = \text{YES}$.

Rule09: IF $\mu_{\text{similar}}(r_{PQ_S}) < T$ THEN $r_{PQ_S} = \text{NO}$.

其中, C_1, C_2 和 C_3 分别表示 Rule05、Rule06 和 Rule07 的规则强度, $\mu_{\text{short}}, \mu_{\text{small}}, \mu_{\text{high}}$ 分别是曲线属于 *Short, Small, High* 等模糊集合的隶属度, B 是标志位, 当曲线 P 和 Q 之间有 I 类或者 II 类共同区域时, $B = 1$; 否则, $B = 0$, 即此时, P 和 Q 不相似. T 是由地质专家给出的阈值, 当 $\mu_{\text{similar}}(r_{PQ_S}) \geq T$ 时, P 和 Q 相似; 否则, P 和 Q 不相似. $\mu_{\text{short}}(), \mu_{\text{small}}()$ 和 $\mu_{\text{high}}()$ 的定义如下:

$$\mu_{short}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \leq \alpha \\ e^{-(x-\alpha)/a}, & \text{if } x > \alpha \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_{small}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \leq \beta_1 \\ (x-\beta_1)/(\beta_2-\beta_1), & \text{if } \beta_1 < x < \beta_2 \\ 0, & \text{if } x \geq \beta_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{high}(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq \gamma_1 \\ (x-\gamma_1)/(\gamma_2-\gamma_1), & \text{if } \gamma_1 < x < \gamma_2 \\ 1, & \text{if } x \geq \gamma_2 \end{cases} \quad (3)$$

在式(1)、(2)和(3)中, α 、 β_1 、 β_2 、 γ_1 和 γ_2 是决定 μ_{short} 、 μ_{small} 、 μ_{high} 相应隶属度的参数,其初值是由地质专家给定的。

3 曲线间空间关系推理的神经网络方法

3.1 用前向神经网络处理模糊逻辑

定义 7 令 $\mu_0, \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ 分别是模糊命题 p, p_1, p_2, \dots, p_n 的隶属度真值,其中

$$\mu_i \in [0, 1], i = 0, 1, \dots, n$$

(a_i, b_i) 是连接 p_i 和 p 的权值对,则一个简单的模糊逻辑前向网络如图 3 所示^[6]。

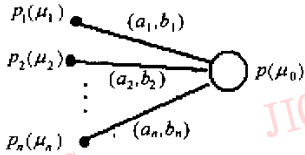


图 3 一个单层模糊逻辑神经网络图

根据 n 个命题 p_1, p_2, \dots, p_n , 就能计算出命题 p 的隶属度真值 μ_0 为

$$\mu_0 = \left| \left| \bigvee_i (\mu_i a_i) \right| - \left| \bigvee_i (\mu_i b_i) \right| \right| \quad (4)$$

图 4 左部的神经网络可以简化为右部的形式,其中, \vee 是模糊或运算符

$$\begin{aligned} a'_1 &= a_1 |a - b|, & b'_1 &= b_1 |a - b|, \\ a'_2 &= a_2 |a - b|, & b'_2 &= b_2 |a - b| \end{aligned} \quad (5)$$

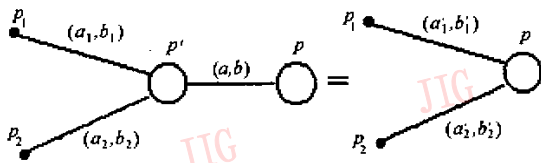
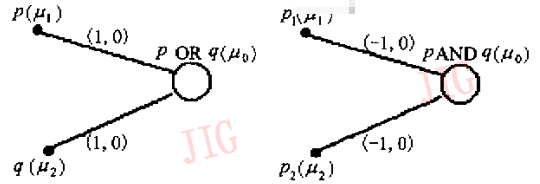


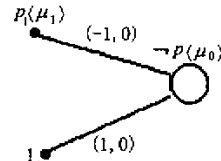
图 4 模糊逻辑神经网络的简化

模糊逻辑连接词可以用神经网络实现。根据式(5)可以求出图 5 中 $p \text{ OR } q$ 、 $p \text{ AND } q$ 和 $\neg p$ (其中

OR、AND 和 \neg 分别表示或、与和非)的真值分别为 $\mu_0 = \mu_1 \vee \mu_2$; $\mu_0 = \mu_1 \wedge \mu_2$ 和 $\mu_0 = 1 - \mu_1$ 。



(a) 模糊 OR 神经网络 (b) 模糊 AND 神经网络



(c) 模糊 NOT 神经网络

图 5 用神经网络实现模糊逻辑连接词

3.2 利用神经网络方法推断曲线间的空间关系

一个由式(1)形式的推理规则组成的基于规则的系统,可以通过一个前向神经网络来实现它,其输入层、输出层和隐层分别编码为 IF 部分、THEN 部分和连接词部分,然后,每个输入节点对规则的左部进行编码,而每个输出节点对规则的右部进行编码,隐层节点用于激活其他规则中具有相同前提的其他组合。考虑到所有的规则和基于规则的神经网络实际上就是一个嵌套的 AND 和 OR 的网络^[6],因此,根据前面介绍的内容,包含一组模糊规则的产生式系统可以被表示为一个前向神经网络。这里,神经网络的层数对应于层次规则库中层数,隐层单元的数目对应于规则的数量。规则强度被编码为网络的连接权值。这样曲线间空间关系推理问题就可以通过图 6 所示的神经网络来表示。在图 6 中,神经网络的层数为 4 层, $H_i (i = 1, \dots, 9)$ 表示隐层单元,并且 i 与规则编号相对应。

3.3 神经网络的训练和曲线间空间关系推理的实验结果

模糊规则的获取是模糊系统设计的关键,而且选择的隶属函数是否合适,对模糊系统的性能也有极大影响^[8]。IF-THEN 规则来自于对专家经验的总结,相应的隶属函数要根据实验结果逐步修正,这是一项相当费时费力的工作。一旦相应的隶属函数确定了,IF-THEN 规则也就确定了。在本问题中,训练神经网络的目的就是要确定 $\alpha, \beta_1, \beta_2, \gamma_1, \gamma_2, C_1, C_2$,

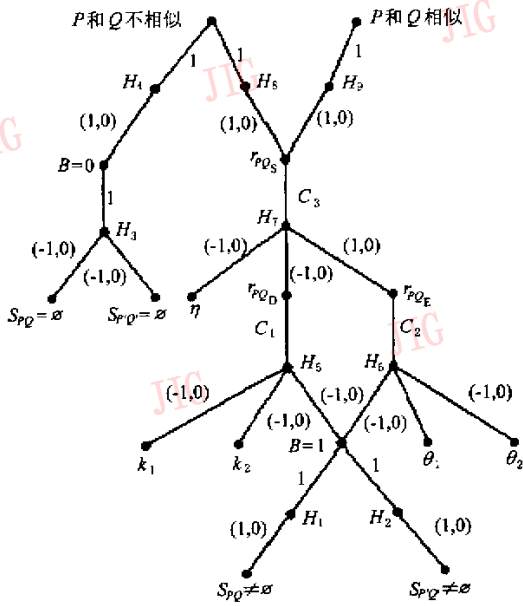


图 6 推断曲线间空间关系的模糊神经网络

C_3 和阈值 T 的值. 本文选取新疆萨尔布拉克地区的航磁和重力数据资料作为测试数据, 并进行神经网络方法与传统方法的对比实验, 令 100 个相似的曲线对中, 能够作出正确推断的为 S_Y 个; 100 个不相

似的曲线对中, 能够作出正确推断的为 S_N 个.

采用传统方法推断曲线间的相似关系时, 参数 ξ 与 S_Y 和 S_N 的关系如图 7 所示. 从图 7 中可以看出: 无论 ξ 如何取值, 都无法使 S_Y 和 S_N 的值同时很大. 通过不断调整 ξ 的值来反复实验, 本文所得到的最好的结果是 $S_Y=70, S_N=78$, 这个结果显然是不能令人满意的.

在训练推断曲线间空间关系的神经网络时, 可先选取 200 个事先已经由地质专家判断过的有 I 类或 II 类共同区域的曲线对, 作为教师信号来训练神经网络, 其中, 100 个曲线对是相似的, 100 个曲线对是不相似的; 然后再取与传统方法相同的样本对进行测试, 在这 200 个样本对中, 利用神经网络方法能够作出正确推断的为 199 个, 而用传统方法能够作出正确判断的只有 148 个. 可见, 在推断曲线间的空间关系时, 神经网络方法明显优于传统方法, 在实际应用中收到了非常令人满意的效果. 这种方法不仅可以用于比较航磁和重力图件, 以及推断不同深度地质体的断裂构造、产状和规模, 而且还可以把航磁图件、重力图件、遥感信息和化探信息进行综合比较, 推断出更为重要的控矿信息.

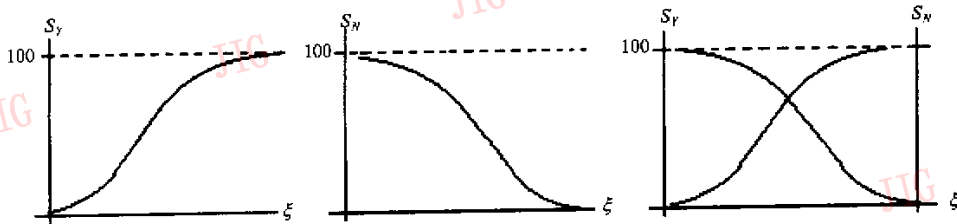


图 7 参数 ξ 与 S_Y 和 S_N 的关系

4 结束语

模糊逻辑与神经网络相结合不仅可以用于知识表示和推理, 还可以用于处理包括遥感图象的识别和分类在内的空间信息. 例如, 采用 BP 算法的多层前向神经网络可以用于分类卫星图象^[9,10]、绘制植被地图^[11,12]和对云的类型进行分类^[13]等.

参考文献

- 刘亚彬, 刘大有. 空间推理与地理信息系统综述[J]. 软件学报, 2000,11(12):1598~1606.
- Jochen Renz, Bernhard Nebel. On the complexity of qualitative

- spatial reasoning: A maximal tractable fragment of the region connection calculus[J]. Artificial Intelligence, 1999,108(1-2): 69~123.
- Jochen Renz. A canonical model of the region connection calculus [A]. In: Proceedings of the 6th International Conference Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'98)[C], Trento, Italy, June 1998;330~341.
- 王世称, 王於天. 综合信息译解原理与矿产预测图编制方法 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 1989.
- 杨永华, 曹绪言, 肖克言等. 数学地质方法[M]. 长春: 东北师范大学出版社, 1992.
- Yee Leung. Intelligent spatial decision support systems[M]. ISBN 3-540-62518-6, New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1997.
- 郭金梅. 综合信息矿产预测物探关联解译过程研究及模拟实现

[D]. 长春: 吉林大学, 1999.

- 8 刘增良, 刘有才. 模糊逻辑与神经网络?? 理论研究探索[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1996.
- 9 Tzeng Y C, Chen K S, Kao W L *et al.* A dynamic learning neural network for remote sensing application[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1994, 32(10):1096~1102.
- 10 Fischer M M, Gopal S, Stauffer P *et al.* Evaluation of neural pattern classifiers for remote sensing application[R]. Discussion paper 46. Department of Economic and Social Geography, Vienna University of Economics and Business Administration, 1995.
- 11 Yoshida T, Omtua S. Neural network approach to land covers mapping[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*. 1994, 32(10):1103~1109.
- 12 Wang F. Towards a natural language user interface: An approach of fuzzy query[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*. 1994, 8(2):143~162.
- 13 Argialas D P, Harlow C A. Computational image processing models: An overview and perspective[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1990, 56(6):871~886.

刘亚彬 1965年生, 副教授, 1993年获吉林工业大学工学硕士学位, 现为吉林大学计算机软件专业的博士研究生. 主要研究方向为知识工程和空间推理.

刘大有 1942年生, 教授, 博士生导师. 主要研究领域为知识表示和知识工程、agent系统、空间推理、专家系统和GIS等.

王金鹤 1963年生, 博士, 副教授. 主要研究方向为模式识别与图象处理.