

## 孔间地质特征推断的新方法

郑俊杰 汪益基

(武汉地基处理中心)

本文首先评述了目前工程中常用的几种孔间地质特征的推断方法, 然后对灰色系统中的建模方案加以修改, 最后提出了将灰色系统理论应用于孔间地质特征推断的方法。该法计算简便, 结果合理, 可供工程地质勘察技术人员参考。

**关键词** 勘探孔 地质特征 灰色系统方法



工作方法

在漫长的地质时期里, 地壳经历了一系列演变过程, 形成了多种类型的地质构造、地貌及复杂的岩石和土。由于内外地质作用的不确定性, 使得岩土工程中所遇到的地质特征(如层面、夹层等), 均带有较强的随机性。工程勘察的目的就是通过采用各种物理、机械的方法, 探测深层地质特征, 探明岩土的工程性质, 为工程建设服务。但是, 在工程勘察过程中, 受时间和经济的因素限制, 一般仅能钻探、触探为数不多的孔, 如从这较少的数据资料来推断孔间地质特征, 并求推断合理可靠则应在方法上进行探讨。

### 常见的孔间地质特征推断方法

常见的推断方法有: 直线相连法、曲线拟合法、马尔科夫链方法和采样定理方法。下面分别将这 4 种方法予以简要评述。

**1. 直线相连法<sup>(1)</sup>**: 是目前工程界使用最多的方法, 即在钻探孔之间用直线相连作为近似的地质层面。该法虽然简洁, 但有较大缺欠, 主要是不光滑的连接线与光滑渐变的地质层面这一物理机制相矛盾, 而且它也

否定了孔间地质的随机特性, 钻孔外的野外试验总量的增加不能增强所作推断的置信度。

**2. 曲线拟合法<sup>(1)</sup>**: 首先假定层面的变化特征, 如多项式等, 然后根据钻探孔资料, 确定特征曲线的未知系数, 即可得到层面的几何方程。曲线拟合得到的层面是光滑的, 与实际地质特征的物理背景相符合。另外, 测点数目的增加, 也使结果的置信度更高。此法的最大缺点在于人为因素较大, 结果的优劣与个人经验直接相关。但在没有更简洁而且理论严密的方法之前, 该法作为权宜之计是可推荐使用的。

**3. 马尔科夫链方法<sup>(2)</sup>**: 认为层面的变化特征可用马尔科夫链来描述, 其参数空间为离散的距离, 状态空间可以是层面高程或者是层面高层变化的斜率。由起始的概率分布和概率转移矩阵可完全确定一马尔科夫链, 因此也即确定了层面的变化特征, 其关键是转移概率矩阵的获得。在获得转移概率矩阵后, 可以任意选取一初始分布, 利用计算机产生一系列随机数, 据其所相应的状态即可获得一随机界面, 此界面即为所求。此随机界面的概率特征由转移概率矩阵表述。该法最大优点是它较充分地考虑了地质特征

本文 1993 年 1 月 19 日收到, 于纯烈编辑。

的随机性。在转移概率矩阵的计算过程中，需要有足够丰富的采样值才能用频率值来代替概率值。该法在工程中较难应用。

**4. 采样定理方法<sup>(3)</sup>：**把地质层面可看作一随机过程，而钻孔勘探是对此随机过程进行采样。当一个具有各态历经性的随机过程，其样本函数经历了足够长的“时间”时，则认为此样本函数经历了各种可能性态。该法通过采样定理确定采样间隔，也即钻孔之间的距离为多大时，可从采样值得出该随机过程的概率统计特征。采样定理的应用条件较为严格，对于实际工程所遇到的地质特征往往不能看作是均方连续的平稳过程，而且采样定理应用于地质资料的推断还存在着其他的困难。

本文应用灰色系统方法进行孔间地质特征的推断，即将地质层面这一随机过程视为灰色过程，建立灰色系统模型对孔间地质特征进行推断。该法避开了繁琐的理论和计算，只需对较少的原始数据重新生成，使无规律或规律性较差的原始数列变成具有较强规律性的新数列，然后建立模型，也称为灰色系统建模方法。

### 灰色系统建模

灰色系统理论中的建模方法，简单实用，它能用少量数据建模并在许多领域得到了广泛的应用。用得较多的是一阶单变量灰色模型 (Grey Model)，即 GM (1, 1) 模型。

#### 1. 原灰色 GM (1, 1) 模型

对于一规律性不强的离散序列  $x^{(0)}(i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , 用累加生成变换成近似地按规律变化的生成序列

$$x^{(1)}(i) = \sum_{k=1}^i x^{(0)}(k) \quad (1)$$

$i=1, 2, \dots, n$

这样的生成可作  $m$  次，但一般仅作 1

次累加生成。

然后用生成序列构造常微分方程

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (2)$$

这是一阶 1 个变量的微分方程模型，记

$$\bar{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix}, \text{按最小二乘法求 } \bar{a}.$$

$$\bar{a} = (\bar{B}^T \bar{B})^{-1} \bar{B}^T \bar{Y} \quad (3)$$

其中

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix}$$

$$\bar{Y} = [x^{(0)}(2) \ x^{(0)}(3) \ \dots \ x^{(0)}(n)]^T$$

微分方程的解为

$$\bar{x}^{(1)}(i) = (x^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-a(i-1)} + \frac{u}{a} \quad (4)$$

对  $\bar{x}^{(1)}(i)$  作累减生成变换得原序列的平滑值  $\bar{x}^{(0)}(i)(i \leq n)$  和预测值  $\bar{x}^{(0)}(i)(i > n)$ , 即

$$\bar{x}^{(0)}(i) = \bar{x}^{(1)}(i) - \bar{x}^{(1)}(i-1) \quad (5)$$

#### 2. 改进的灰色 GM (1, 1) 模型

由于原灰色系统建模过程中要求自变量  $i$  取正整数，这使其在某些问题的应用上受到了限制。例如在工程地质勘察中，各触探孔或钻探孔由于非等间隔导致在建模中自变量不能取正整数。因此必须对原灰色模型进行修改才能将它应用于孔间地质特征的推断。

设有一序列  $x^{(0)}(P_i)(P_i$  为正实数)，设  $i_p$  为小于  $P_i$  并且与  $P_i$  最接近的正整数  $\Delta P_i = P_i - i_p$ 。

由于  $x^{(0)}(P_{i-1})$ 、 $x^{(0)}(P_i)$  均为白数，应用灰数均值化方法可求出  $i_p$  点数值。

$$x^{(0)}(i_p) = \frac{i_p - P_{i-1}}{P_i - P_{i-1}} x^{(0)}(P_i) + \frac{P_i - i_p}{P_i - P_{i-1}} x^{(0)}(P_{i-1}) \quad (6)$$

对序列  $x^{(0)}(i_p)$  作累加生成, 若  $P_i$  为正整数, 则  $P_i = i_p$ , 于是

$$x^{(1)}(i_p) = \sum_{k=1}^{i_p} x^{(0)}(k) \quad i_p = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$P_i$  不为正整数的生成序列

$$x^{(1)}(P_i) = x^{(0)}(i_p) + (P_i - i_p)x^{(0)}(P_i) \quad (8)$$

于是  $P_i$  不为正整数时, 常微分方程为

$$\frac{dx^{(1)}(P_i)}{dP_i} + ax^{(1)}(P_i) = u \quad (9)$$

记  $\bar{a} = [a \quad u]^T$ , 则  $\bar{a} = (\bar{B}^T \bar{B})^{-1} \bar{B}^T \bar{Y}$ ,

其中

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(P_1) + x^{(1)}(i_{P_1})] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(P_n) + x^{(1)}(i_{P_n})] & 1 \end{bmatrix}$$

$$\bar{Y} = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \\ x^{(0)}(P_i) \\ \vdots \\ x^{(0)}(P_n) \end{bmatrix}$$

改进灰色 GM (1, 1) 模型的解为

$$\bar{x}^{(1)}(t) = [x^{(0)}(1) - \frac{u}{a}] e^{-a(t-1)} + \frac{u}{a} \quad (10)$$

这里,  $t$  为正实数。

对  $t$  不为正整数时, 改进灰色 GM(1, 1) 模型的平滑值  $\bar{x}^{(0)}(t) (t \leq P_n)$

和预测值  $\bar{x}^{(0)}(t) (t > P_n)$  由下式计算

$$\bar{x}^{(0)}(t) = \frac{\bar{x}^{(1)}(i_t) - \bar{x}^{(1)}(t)}{i_t - t} \quad (11)$$

式中  $i_t$  为与  $t$  最接近的正整数。

## 算 例

设在距某点 5m、11m、15m、20m 处有 4 个钻孔, 已探明填土下面为轻亚粘土, 各钻孔中填土与轻亚粘土的交界处的标高分别为 10.0m、10.8m、11.2m、12.0m。为计算简便, 取距离的相对值为 1、2.2、3、4, 取标高的相对值为 1.00、1.08、1.12、1.20, 于是原始序列  $x^{(0)}(P_i)$  为

$$\begin{aligned} x^{(0)}(1) &= 1.00 & x^{(0)}(2.2) &= 1.08 \\ x^{(0)}(3) &= 1.12 & x^{(0)}(4) &= 1.20 \end{aligned}$$

首先采用前述的灰数均值化方法求出正整数点  $i=2$  处的值  $x^{(0)}(2)$  为 1.06, 于是

$$x^{(0)}(i_p) = (1.00, 1.06, 1.12, 1.20)$$

$$x^{(1)}(i_p) = (1.00, 2.06, 3.18, 4.38)$$

$$x^{(1)}(P_i) = (1.00, 2.296, 3.18, 4.38)$$

计算  $\bar{B}$  和  $\bar{Y}$  矩阵, 由  $\bar{a} = (\bar{B}^T \bar{B})^{-1} \bar{B}^T \bar{Y}$  求出

$$\bar{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.058735183 \\ 0.954790224 \end{bmatrix}$$

常微分方程的解为

$$\bar{x}^{(1)}(t) = 17.25585e^{0.0587352(t-1)} - 16.25585 \quad (12)$$

由式 (12) 计算的  $\bar{x}^{(1)}(t)$  与累减生成的  $\bar{x}^{(0)}(t)$  及百分误差  $q$  列于下表。

$P$	1	2	2.2	3	4
$x^{(0)}(P)$	1.00	2.06	2.296	3.18	4.38
$\bar{x}^{(1)}(P)$	1.00	2.04388	2.26012	3.15091	4.32491
$x^{(0)}(P)$	1.00	1.06	1.08	1.12	1.20
$\bar{x}^{(0)}(P)$	1.00	1.04388	1.08118	1.10703	1.17410
$q$ (%)	0	1.520	0.109	1.158	2.158

从上述计算结果可看出,拟合的精度是比较高的。由微分方程解的公式可获得孔间的任意平滑值和孔外的递推值。

灰色系统理论由于利用生成变换,将一组无规律的数据变得有规律。灰色系统建模避开研究对象表面的复杂性,用少数数据即可建立简单实用的模型,而且其拟合、平滑的精度较高,用来递推和预测也是可行的。

由于统计推断是在不掌握完全信息条件下的推断,即所掌握的信息不足以确定问题的唯一解,因此,就提供了建立多种推断方法的可能。理论过于严密、计算繁琐的方法往往伴随的是严格的先决条件。例如在应用上面提到的采样定理时,地质特征必须视为一均方连续的平稳过程,事实上这个条件是

难以满足的。单纯追求简洁的方法可能会使结果的精度不甚理想。好的方法应在理论的严密性和计算的简洁程度之间达到平衡。灰色系统方法满足了这种要求,它可作为工程地质勘察人员推断孔间地质特征的一种参考计算方法。

#### 参考文献

- [1] 利人,《统计推断理论基础及其应用》,群众出版社,1982。
- [2] E. M. Ali, etl, Stochastic model of flow through stratified soils. Journal of the geotechnical engineering div. ASCE. Vol. 106, No676, June, 1980.
- [3] 闵华玲,《随机过程》,同济大学出版社,1987。
- [4] 邓聚龙,《灰色系统》(社会·经济),国防工业出版社,1985。

### A New Way to Deduce Geologic Features between Boreholes

Zheng Junjie Wang Yiji

At first, several methods of deducing geologic features between boreholes, which are commonly used in engineering, are reviewed in this paper. Then constructing model method in grey system theory is modified. Finally the authors put forward grey system method of deducing geologic features between boreholes. The computation is simple and convenient, the results are reasonable. It may be used by engineering investigation technicians.

(上接第 55 页)

美国通用电气公司于 1957 年研制成功立方氮化硼, 1958 年产量为 130 万克拉, 1969 年产量达 1300 万克拉 (CBN500、CBN510 型), 产品售价 2.5 美元/克拉。随后研制适合各种结合剂需要的万能型立方氮化硼。据美国《技术见识》(Technical Insights)报道, 1991 年世界立方氮化硼产量 4~5 亿克拉, 其年增长率为 15%, 在整个硬质材料中增长率是最高的。立方氮化硼用于制作切削锯片的占 50%, 磨砂轮占 20%, 印模铸具占 20%, 剪刀用具占 7%, 其他特殊用途占 3%。主要生产立方氮化硼的国家是美国 (年产 2.52~3.15 亿克拉), 占世界产量的 63%, 其次是英国和独联体国家。美国立方氮化硼消耗量也占世界第一

位。美国市场立方氮化硼的售价为 0.65 美元/克拉。

我国立方氮化硼的研制和生产起步较晚。70 年代末, 中国科学院物理所和广东 701 所曾用爆炸法合成立方氮化硼。另外, 北京、郑州、河北等地一些磨料研究所、人造金刚石厂家, 也曾经试制立方氮化硼, 但品质与技术尚未达标, 需要进一步试验研究。

总之, 对于立方氮化硼这种新型超硬材料的研制和生产, 我认为应有赶超意识, 努力发展这种新型超硬材料, 加快步伐, 走向市场, 以适应磨削钢材、精制建筑石材、制作锯片、磨砂轮、切削刀具及研磨料的需要。