

文章编号: 0253 - 9993 (2005) 04 - 0467 - 05

灰色关联分析在竖井冻结壁“窗口” 事故处理中的应用

杨松林¹, 王梦恕¹, 周晓敏^{1,2}

(1. 北京交通大学 土木与建筑工程学院, 北京 100044; 2. 煤炭科学研究总院 北京中煤矿山工程有限公司, 北京 100013)

摘 要: 根据测温孔和冻结器的纵向测温, 提出采用灰色关联法进行数据分析. 通过孔与孔的关联度计算来评价各冻结器的工作效果, 确定薄弱的冻结器方位, 然后根据关联度离差和总关联度随深度的变化, 确定冻结壁在深度方向的薄弱环节. 运用灰色关联分析对竖井冻结壁“窗口”事故实例进行了对照分析, 验证了理论的实用性.

关键词: 冻结凿井; 关联度; 灰色系统; 测温

中图分类号: TD262.11; O159 **文献标识码:** A

Application of grey correlative analysis for disposal of the freezing wall “ window ” accident

YANG Song-lin¹, WANG Meng-shu¹, ZHOU Xiao-min^{1,2}

(1. School of Civil & Architecture Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing China Coal Engineering Co., Ltd, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: According to longitude temperature supervision on freeze pipe and monitoring hole, put forward a new method called grey correlative to analyze the temperature data. The working effect of freezing pipe was evaluated by calculating the grey correlative degree (GCD), defined the location of the weaken freeze pipe. Besides, based on the change of deviation squares of GCD and total GCD with the depth, the weaken location of freezing wall was indicated along the shaft. A case of “ window ” accident of freezing wall was analyzed with GCD method, and the practical value was verified.

Key words: ground freezing shaft sinking; correlative degree; grey system; temperature inspection

人工地层冻结是解决流砂、淤泥等软弱含水流动地层地下施工的特殊工法, 通过在地层中间隔布置冻结器, 低温盐水循环, 向地层供冷, 使得地层从常温下变成负温和坚硬的冻土. 地层冻结工法在我国已有近 50 a 的历史, 技术上也日趋成熟, 但地下水流动常常导致冻土不交圈事故, 工期延期^[1,2], 例如山东里彦煤矿主副井冻结, 内蒙建昌营煤矿罐笼井冻结等. 这些事故用传统的测温孔检测方法是难以发现的. 近年来, 在工程实践中发展了一种在冻结器中进行纵向测温的技术方法, 以此来诊断和处理工程事故, 但该技术目前尚未建立完备的基础理论, 数据分析方法缺乏科学性, 而且由于大量的随机影响因素, 传统的解析理论难以适用, 因此迫切需要研究新冻结壁温度场监控理论.

收稿日期: 2004 - 10 - 18

作者简介: 杨松林 (1958 -), 男, 贵州贵阳人, 硕士, 副教授. Tel: 010 - 51688207, E - mail: slyang@center.njtu.edu.cn

1 冻结壁状态监控方法和理论依据

研究冻结壁温度场的传统方法是以前苏联特鲁巴克教授的单孔冻结稳态理论为基础^[1]，建立如图 1 所示的冻结壁温度场模型，推导出冻土区温度分布函数公式为

$$T_f(x, y) = T_p \ln \frac{\sqrt{E^2 + L^2}}{2 \sqrt{x^2 + y^2}} \bigg/ \ln \frac{\sqrt{E^2 + L^2}}{d_p} \left(-\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}, -\frac{\sqrt{L^2 + E^2}}{2} \leq y \leq \frac{\sqrt{L^2 + E^2}}{2} \right), \quad (1)$$

式中， T_f 为冻土区温度场函数； T_p 为冻结管壁的温度； E 为冻土墙厚度； L 为孔间距； d_p 为冻结管直径。

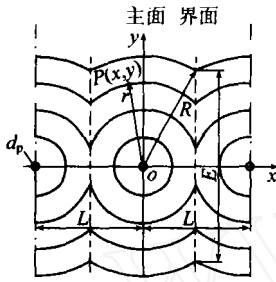


图 1 冻结壁稳态温度场模型
Fig. 1 Transient-free temperature field model

在冻结孔附近设置测温孔，通过测温孔内的检测温度数据，由式 (1) 来计算冻结的厚度。这就是传统的温度场监控方法。但是测温孔只能反映一孔之见，所以我国井巷工程施工规范规定，一般在冻结深度大于 200 m 井筒布置测温孔数量不少于 3 个。

在实际工程中，冻结壁的发展受到各冻结器的能量调节、地下水流动、冻结孔间距、地层导热性能等多种因素的影响，地层内部看不见摸不着，对地层冻结壁发展过程的掌握始终是不完全把握的，用现代控制理论来说，工程系统是个“黑箱”，如何增加认识系统的信息量是工程监控的技术途径。

文献 [3] 研究了在瞬时停冻后，冻结器中心温度变化和冻结壁厚度之间的关系，提出了利用冻结器纵向测温来解冻结壁内部情况的新方法。

$$v = \frac{dT}{dt} \bigg|_{r=0} = a \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R^2} \right), \quad (2)$$

式中， v 为温度上升速度； R 为冻土半径； a 为冻土导温系数； γ 为停冻前冻结壁初始温度场相关系数。

因工程中存在大量的随机因素，式 (2) 还很难直接应用，但其意义在于揭示了冻结器纵向测温数据的实质价值，就是充分利用冻结器来实施对冻结壁温度场的全面监控，从而增加了系统信息的输出。那么系统的大量信息输出需要科学的信息处理技术，以便提取更有价值的部分为工程建设服务。

2 纵向测温数据灰色关联分析的原理

灰色理论^[4]将系统状态的输出称为序列，因此沿着深度方向输出的温度数据就是一种数据序列。这里把测温孔和冻结器纵向测温数据整理成下列序列：

$$\begin{aligned} T_1(h) &= \{ t_1(1), t_1(2), t_1(3), \dots, t_1(M) \}, \\ T_2(h) &= \{ t_2(1), t_2(2), t_2(3), \dots, t_2(M) \}, \\ &\dots \\ T_i(h) &= \{ t_i(1), t_i(2), t_i(3), \dots, t_i(M) \}, \\ &\dots \\ T_N(h) &= \{ t_N(1), t_N(2), t_N(3), \dots, t_N(M) \}, \end{aligned}$$

式中， h 为纵向测点深度或序号， $h = 1, 2, \dots, M$ ； i 为冻结孔的孔号， $i = 1, 2, \dots, N$ 。

灰色理论中关联度定义借用了几何相似的概念，假设将这些序列绘制在以时间横坐标的二维直角坐标系上，如图 2 所示，如果序列 $T_1(h)$ 曲线和序列 $T_2(h)$ 曲线比较平行或相似，则称 $T_2(h)$ 和 $T_1(h)$ 关联度大，记为 γ_{12} ，若曲线 $T_3(h)$ 和 $T_1(h)$ 相似性较小，曲线 $T_4(h)$ 和 $T_1(h)$ 相似性最差，则有 $\gamma_{12} > \gamma_{13} > \gamma_{14}$ 。这里把 $T_1(h)$ 称为母因素序列， $T_2(h)$ 、 $T_3(h)$ 和 $T_4(h)$ 称为子因素序列。

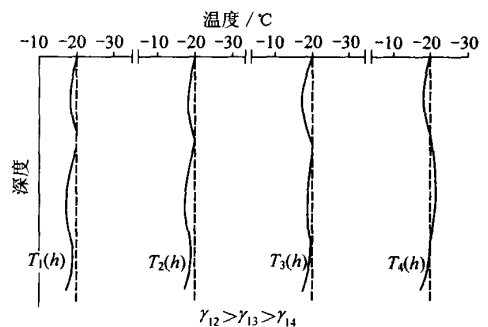


图 2 关联度定义的几何意义
Fig. 2 Geometry meaning of grey correlative degree

为了评价冻结壁的整体状况，可以通过各个冻结器测温数据的关联度来分析。例如在理想情况下，各个冻结器流量分配均匀，地层情况条件也一致，它们之间的测温曲线应该是完全一样的，关联度应该很好。根据温度场测温数据，引入斜率关联度的相关概念和定义。

关联系数 (t) ：设序列 $X(t)$ 和 $Y(t)$ ， X, Y, R, t, T ，则

$$(t) = \frac{1}{1 + \left| \frac{1}{x} \frac{x(t)}{t} - \frac{1}{y} \frac{y(t)}{t} \right|}, \tag{3}$$

式中， $x(t) = x(t+1) - x(t)$ ； $y(t) = y(t+1) - y(t)$ ； $t = (t+1) - t = 1$

$$y_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_{ik} - \bar{y}_i)^2}, \quad x_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_{ik} - \bar{x}_i)^2},$$

式中， x_i, y_i 分别为 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 序列的标准差。

(t) 的性质： $0 < (t) < 1$ ； $X(t)$ 和 $Y(t)$ 在 t 时刻的斜率越接近， (t) 就越大，自身和自身的关联系数为 1； (t) 和几何形状有关，而与起始位置无关。

关联度定义：

$$r_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^{N-1} (t) \quad (t = \{1, 2, 3, \dots, N-1\}).$$

斜率关联度的主要特点：原始数据不需选择参考点和标准化，便于计算机处理，且对于检测条件的限制也较小；原始数据中含零或负值时计算不受影响，因此工程数据应用的适应性好；关联度的分辨率高。

每一个冻结器既可看成母因子也可看成子因子，这样就形成一个关联矩阵；是一个主对角元素为 1 的对称矩阵，即

$$\begin{matrix} \text{孔号} & 1 & 2 & \dots & n-1 & n \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \dots \\ n-1 \\ n \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & \dots & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} & \dots & & & \end{matrix} \tag{4}$$

对于上面的矩阵，可以借助方差分析来研究冻结壁的整体情况。矩阵中的元素 r_{ij} 表示第 i 和 j 孔之间的关联度，显然 $r_{ij} = 1$ ， r_{ij} 越接近 1， i 和 j 孔之间的工况就越接近， $r_{ij} < r_{ik}$ ，说明 k 孔冻结情况比 j 孔更接近 i 孔情况；第 i 孔的平均关联度 $\bar{r}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij}$ ，反映出 i 孔和其他孔关联的综合程度，体现 i 孔在整体中所处的状态；冻结器总体平均关联度 $\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij})$ ，反映整个冻结壁中各个冻结器效果的平均情况， \bar{r} 越接近 1，说明冷量分布、地层条件等工况和条件越相近；各孔关联度的偏差总平方和 $S^2 = \sum_{i=1}^n (r_{ij} - \bar{r})^2$ ，自由度为 $n-1$ ，它从离散性角度反映各冻结工况的差异大小， S^2 越小，工况越平均；参量 r_{ij}, \bar{r}_i, S^2 等均是时间（或深度）的函数，即在不同的深度分段内分析时，上述参量将发生变化，这种变化能直接体现出客观条件，如地下水流、岩性等条件的变化。

3 实例分析

内蒙古赤峰市建昌营煤矿主井净直径为 4.5 m，表土层厚 74.9 m，含水层主要是垂深为 20~50 m 的砾石地层，冻结深度为 141 m，布置圈径为 8.5 m，开孔间距为 1.16 m，冻结孔 23 个，盐水温度为 -25~

- 30 . 当积极冻结超过设计工期, 测温孔的温度都已达到设计温度时, 水文孔仍未冒水, 说明井筒冻结壁未交圈, 随即井筒试挖出水, 验证上述结论之后, 为了查找原因, 对井筒全部冻结器进行纵向测温检, 部分数据见表 1, 首先发现 23号冻结孔的供液管在 30 m处有个软的堵塞物, 因此肯定冻结壁不交圈和 23号孔异常有关, 但需要判断具体的冻结壁“天窗”位置, 并采取措施. 经过对所有纵向测温数据分析, 最终确认了冻结壁在 38 m左右, 沿着 1~22号孔之间和 7~9号孔之间存在过水流动窗口.

表 1 内蒙古建昌营煤矿主井冻结器纵向测温

Table 1 Lengthwise temperature survey along freeze pipe of main shaft in Jianchangying mine, Neimenggu

孔号	深度 /m					
	20	35	40	45	50	55
1	- 13.9	- 10.5	- 13.2	- 13.4	- 13.3	- 14.5
2	- 15.0	- 12.2	- 12.8	- 12.8	- 13.0	- 13.9
3	- 16.6	- 14.1	- 14.2	- 14.0	- 13.8	- 14.5
4	- 15.0	- 11.4	- 12.8	- 12.7	- 12.3	- 13.2
5	- 16.3	- 14.9	- 15.0	- 14.6	- 14.7	- 15.7
6	- 16.8	- 14.6	- 15.5	- 15.8	- 15.6	- 16.9
7	- 16.8	- 13.4	- 15.5	- 15.7	- 15.0	- 17.2
8	- 17.2	- 13.8	- 15.7	- 16.0	- 15.5	- 17.4
9	- 16.6	- 12.5	- 16.5	- 16.6	- 16.0	- 18.1
10	- 18.7	- 15.9	- 18.0	- 18.3	- 17.8	- 19.2
11	- 17.3	- 15.7	- 16.5	- 16.2	- 15.7	- 18.2
12	- 18.3	- 16.9	- 16.5	- 15.0	- 13.9	- 17.5
13	- 17.6	- 15.6	- 15.6	- 15.3	- 13.8	- 17.8
14	- 17.7	- 16.3	- 16.2	- 15.8	- 15.3	- 17.4
15	- 16.1	- 15.4	- 15.7	- 15.5	- 14.9	- 17.4
16	- 17.4	- 15.5	- 15.5	- 15.3	- 14.9	- 16.6
17	- 17.8	- 15.7	- 15.8	- 15.8	- 14.9	- 17.4
18	- 17.6	- 16.4	- 15.9	- 15.2	- 14.3	- 18.1
19	- 17.7	- 16.7	- 17.2	- 16.7	- 15.7	- 18.4
20	- 15.4	- 14.0	- 14.4	- 14.5	- 14.0	- 16.4
21	- 17.0	- 13.8	- 15.5	- 15.8	- 15.2	- 17.4
22	- 12.5	- 9.1	- 12.0	- 12.2	- 12.2	- 15.0

下面用灰色关联理论进行分析. 首先可以确定 23号孔失效, 相邻的冻结孔 22、1号孔之间是冻结壁“窗口”的一个首选位置. 通过关联分析找出对应的“窗口”位置.

确立以 22、1号孔为母因素, 对表土含水层深 55 m以上的冻结器纵向测温数据, 采用斜率关联度法进行分析, 1、22号关联度高的冻结孔就有可能是冻结壁薄弱孔位. 图 3为以 1、22号孔为母因素, 每

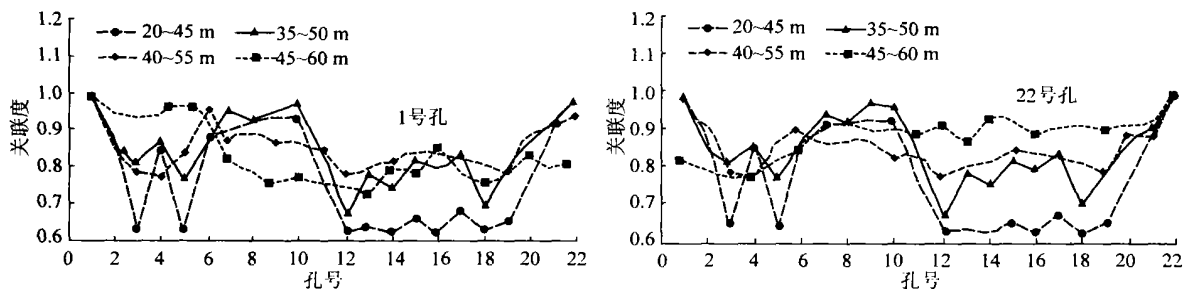


图 3 1、22号孔关联度分布

Fig. 3 Correlative rate distribution of No. 1 and No. 22

15 m 深作一次关联分析，可以看出，7~10 号和 1, 22 号的关联度特别高。说明地下水流是沿着 1, 23, 22 号和 7~10 号形成通道。所以冻结孔之间的关联分析能确定不正常冻结壁窗口的方位。

图 4 为关联度总离差平方和分布，从离散性角度分析，35~50 m 离散性最大，而且是 5~10, 1, 22 号孔的离散性较大。离散性大，反映出温度变化大。这为判断深度方向冻结壁窗口提供了依据。图 5 为总平均关联度随深度的变化，可以看出，35~50 m 处的总平均关联度最低，说明是异常地段，因此平均关联度大小也是判断冻结壁异常的方法之一。

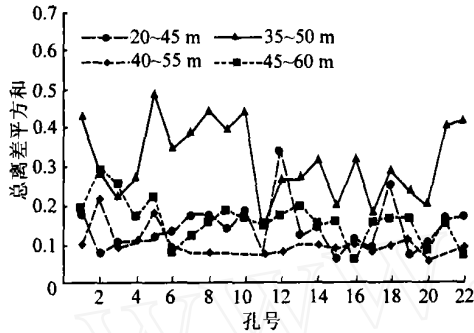


图 4 关联度总离差平方和分布

Fig. 4 Distribution of deviations square sum of correlative rate

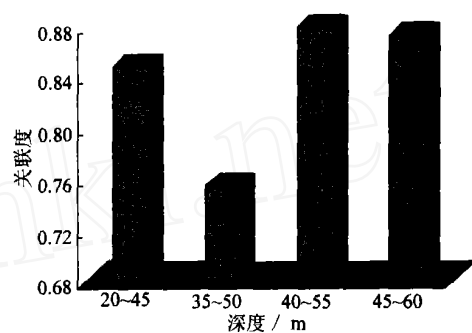


图 5 总平均关联度随深度的变化

Fig. 5 The change of total average correlative rate with depth

工程实际中对垂深 30~50 m 地下砾石地层进行灌浆处理，通过降低地下水流速，确保了冻结壁的愈合，事故得到了针对性处理。在开挖过程中，冻结壁“窗口”位置得到实证，1, 23, 22 与 8, 9 号孔在垂深 35~38 m 处有冻结壁窗口修复的痕迹，和关联度分析完全一致。

4 结 论

测温孔和冻结器的纵向测温是了解井筒的局部和整体冻结情况的技术手段。采用斜率关联度分析是纵向测温数据信息处理的一种实用方法，是灰色理论在地层冻结工程中的一种应用。冻结器之间纵向测温数据的关联度分析反映了冻结器冻结效果的相对好坏，是判断“薄弱窗口”方位的依据，而总关联度离差平方和及总平均关联度随深度的变化是判断“薄弱窗口”垂直位置的依据。

每一个冻结器的正常工作是井筒冻结顺利的必要保证，它受到冻结器供冷量、地下水流动、地层导热性能等诸多主客观因素的影响，将冻结器纵向温度检测和测温孔检测数据结合起来，起到了点面结合的综合效果。

参考文献：

- [1] 特鲁巴克. 冻结凿井法 [M]. 周文安, 马光弟, 孙辑正, 等译. 北京: 煤炭工业出版社, 1958. 119~145.
- [2] 中国煤炭学会矿井建设委员会. 地层冻结工程技术和应用 [A]. 中国地层冻结工程 40 周年论文集 [C]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995. 199~205.
- [3] 周晓敏. 冻结器纵向测温判断冻结壁厚度的研究 [J]. 煤炭学报, 2003, 28 (3): 162~166.
- [4] 袁嘉祖. 灰色系统理论及其在应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1991. 16~38.