

文章编号: 0253 - 9993 (2005) 05 - 0589 - 04

灰色系统理论在矿井瓦斯涌出量预测中的应用

伍爱友, 田云丽, 宋 译, 何利文

(湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: 以预测矿井瓦斯相对涌出量为研究目的, 通过灰色系统的建模、关联度分析及残差辨识为基础, 建立了灰色系统理论模型, 并将该模型应用到某矿瓦斯涌出量预测分析中, 对该矿历年相对瓦斯涌出量进行了灰色生成, 建立了灰色预测系统; 由后验差检验结果、对照精度检验等级可知, 灰色系统预测矿井瓦斯涌出量的拟合精度好, 预测结果正确可靠, 反映出了矿井瓦斯涌出量的客观存在与发展态势.

关键词: 灰色理论; 瓦斯涌出量; 预测; GM (1, 1) 模型

中图分类号: TD712.6 **文献标识码:** A

Application of the grey system theory for predicting the amount of mine gas emission in coal mine

WU Ai-you, TAN Yun-li, SONG Yi, HE Li-wen

(School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to predict the relative amount of mine gas emission, a model of grey system theory was built based on modelling grey system theory, analyzing association degree, and discriminating distinction. Used this model to analyze and predict the amount of mine gas emission and creating the grey emission amount of some coal mine, the grey predicting system of coal mine was built. It is shown that grey system theory can image the impersonality exit and develop posture of the amount of mine gas emission, because it has the virtue in link precision of forecast result due to checkout dispatch and comparison precision test degree.

Key words: grey theory; amount of mine gas emission; prediction; grey model (1, 1)

煤炭是我国一次能源的主体, 煤炭行业又是高危险行业, 高瓦斯和瓦斯突出矿井占一半左右^[1], 煤矿安全是整个工业安全生产的重中之重. 2004年第四季度以来, 国有大型煤矿连续发生 3起特大瓦斯爆炸事故, 2005-02-14辽宁阜新矿业集团孙家湾煤矿发生特大瓦斯爆炸事故, 给人民的生命财产造成重大损失, 在国内外造成严重影响. 因此, 准确地预测矿井瓦斯涌出量, 对预防煤矿恶性事故的发生, 保证煤矿的安全生产具有重要意义. 从国内外研究现状来看, 矿井瓦斯涌出量预测的方法可以分为 3类^[2]: 第 1类是建立在数理统计基础上的矿山统计法, 依据瓦斯涌出量随开采深度变化的统计规律, 外推到预测新区; 第 2类是以煤层瓦斯含量为基本预测参数的瓦斯含量, 得到矿井或某一预测范围的涌出量预测值; 第 3类是以瓦斯地质条件为预测指标的瓦斯地质数学模型, 以数量化理论为基础, 建立瓦斯涌出量的数学模型. 然而, 由于矿井瓦斯涌出规律和涌出量因地而异, 而且影响瓦斯涌出量的地质因素也很多, 这些因素

收稿日期: 2005-03-14

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (02JJY2176)

作者简介: 伍爱友 (1975-), 男, 湖南娄底人, 讲师, 硕士研究生. Tel: 0732-8290040-8017, E-mail: aywu@hnust.edu.cn

之间的非线性关系错综复杂,难以控制,所以对矿井瓦斯涌出量预测存在着较大的困难.在这种情况下,探索一条能够准确预测瓦斯涌出量发展需要的全新途径势在必行.

灰色系统是邓聚龙教授提出的一种新的系统理论^[3],利用灰色系统理论的主要优点是通过一系列数据生成方法(直接累加法、移动平均法、加权累加法、遗传因子法、自适性累加法等)将本没有规律的、杂乱无章的或规律性不强的1组原始数据序列变得具有明显的规律性,解决了数学界一直认为不能解决的微积分方程建模问题.显然,灰色系统理论应用到矿井瓦斯涌出量的预测中,不仅具有高度的概括性,而且使预测精度高,具有明显的确定性.

1 GM(1,1)模型的基本原理与分析过程

灰色系统预测是从灰色系统的建模、关联度及残差辨识的思想出发,获得的关于预测的新概念、观点和方法.将灰色系统理论用于矿井瓦斯涌出量预测中,一般选用一阶的1个变量的灰色系统理论微分方程模型(GM(1,1)模型).灰色系统的预测分析过程一般可分为灰色生成、求参计算以及精度检验.

1.1 灰色生成(I-AGO)

设 $x^{(0)}$ 为原始离散数据序列, $x^{(0)} = \{x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}\}$, 其中 N 为序列长度, 对其进行一次累加生成处理数据列 $x_k^{(1)}$ 的表达式为

$$x_k^{(1)} = \sum_{j=1}^k x_j^{(0)} \quad (k = 1, 2, \dots, N). \quad (1)$$

令 $x^{(1)}$ 为生成序列, $x^{(1)} = \{x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_N^{(1)}\}$, 则以生成序列 $x^{(1)}$ 为基础建立灰色的生成模型为

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

称式(2)为一阶灰色微分方程,记为GM(1,1),其中 a , u 为待辨识参数.

1.2 求参计算

设 \hat{a} 为参数向量, B 为灰色序列矩阵,且 $\hat{a} = [au]^T$, $y_N = [x_2^{(0)}, x_3^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}]^T$ 及

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} [x_1^{(1)}(1) + x_1^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2} [x_1^{(1)}(2) + x_1^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2} [x_1^{(1)}(n-1) + x_1^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix}.$$

最小二乘解可由式(3)求得,即

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T y_N = \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{u} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

离散响应量 $\hat{x}_{k+1}^{(1)}$ 可由以下方程求得,即

$$\hat{x}_{k+1}^{(1)} = \left(x_1^{(1)} - \frac{u}{a} \right) e^{-ak} + \frac{u}{a}, \quad (4)$$

其中 $x_1^{(1)} = x_1^{(0)}$. 将 $\hat{x}_{k+1}^{(1)}$ 计算值作累加还原,即得到原始数据的估计值为

$$\hat{x}_{k+1}^{(0)} = \hat{x}_{k+1}^{(1)} - \hat{x}_k^{(1)}. \quad (5)$$

GM(1,1)模型的拟合残差中往往还有一部分动态有效信息,可以通过建立残差GM(1,1)模型对原模型进行修正^[4,5].

1.3 残差检验

一般以实测值为基础计算其相对误差.当误差较大而且不能满足实际需要时,可利用其残差系列来建立一个修正模型,消除误差.记0阶残差为: $\hat{x}_i^{(0)} = x_i^{(0)} - \hat{x}_i^{(0)}$, $i = 1, 2, \dots, n$, 其中 $\hat{x}_i^{(0)}$ 为通过预测模

型得到的预测值，则残差均值和残差方差为

$$\bar{\tau}^{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i^{(0)}, S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\tau_i^{(0)} - \bar{\tau}^{(0)})^2. \quad (6)$$

原始数据的均值和方差为

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i^{(0)}, S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^{(0)} - \bar{x})^2. \quad (7)$$

计算的后验差检验比值 c 和小误概率 P 分别为

$$c = S_1 / S_2, P = P \left\{ \left| \tau_i^{(0)} - \bar{\tau}^{(0)} \right| \leq 0.674 5 S_2 \right\}. \quad (8)$$

按照式 (8) 两项指标，可从表 1 中查出精度检验等级^[6]。

表 1 精度检验等级

Table 1 Grade of exam ine precision

预测精度等级	P	c
好	>0.95	<0.35
合格	>0.80	<0.45
勉强	>0.70	<0.55
不合格	0.70	0.65

2 基于 GM (1, 1) 的某矿井瓦斯涌出量预测分析

矿井瓦斯涌出量的大小受许多因素的影响，各因素之间的关系错综复杂，表现为既非确定的，也非随机的，而是一种模糊的系统状态。某煤矿四矿区近 10 a 的矿井瓦斯涌出量的实测数据见表 2

表 2 某煤矿四矿区矿井相对瓦斯涌出量统计

Table 2 Statistic of gas relative emission of 4th ward of some coal mine

年 份	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
相对瓦斯涌出量 /m ³ · (t · d) ⁻¹	2.685	4.095	2.725	4.700	2.837	4.223	4.883	5.400	2.675	3.053

2.1 相对瓦斯涌出量统计数据的灰色生成

取表 2 中 10 a 的相对瓦斯涌出量为原始离散数列，即

$$x^{(0)} = (2.685 \quad 4.095 \quad 2.725 \quad 4.700 \quad 2.837 \quad \dots \quad 3.053).$$

由式 (1) 可得其累加生成数据列为

$$x^{(1)} = (2.685 \quad 6.780 \quad 9.505 \quad 14.205 \quad 17.042 \quad \dots \quad 37.276).$$

2.2 相对瓦斯涌出量预测系统的建立

由累加生成数据列，可建立数据矩阵 B ， y_w 为

$$B = \begin{bmatrix} -4.7325 & 1 \\ -8.1425 & 1 \\ \dots & \dots \\ -35.7495 & 1 \end{bmatrix}, \quad y_w = [4.095 \quad 2.725 \quad 4.700 \quad 2.837 \quad \dots \quad 3.053]^T.$$

由式 (3) 得

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.248 \\ 0.912 \end{bmatrix}, \quad \frac{\hat{u}}{\hat{a}} = -3.677.$$

其预测模型为

$$\hat{x}_{k+1}^{(1)} = 6.36e^{0.248k} - 3.677.$$

计算结果见表 3

表 3 相对瓦斯涌出量统计分析
Table 3 Statistic data analysis of gas relative emission

年份	序号	$x^{(0)}$	$x^{(1)}$	灰色预测		
				$\hat{x}^{(1)}$	$\hat{x}^{(0)}$	$\epsilon^{(0)}$
1994	1	2.685	2.685	2.685	2.685	0
1995	2	4.095	6.780	4.473	1.788	2.307
1996	3	2.725	9.505	6.767	2.294	0.431
1997	4	4.700	14.205	9.707	2.940	1.760
1998	5	2.837	17.042	13.474	3.767	-0.930
1999	6	4.223	21.265	18.301	4.827	-0.604
2000	7	4.883	26.148	23.486	5.185	-0.302
2001	8	5.400	31.548	28.327	4.841	0.559
2002	9	2.675	34.223	33.462	5.135	-2.460
2003	10	3.053	37.276	37.735	4.273	-1.220
2004	11			42.737	5.002	
2005	12			47.562	4.825	
2006	13			53.738	6.176	

2.3 后验差检验

由式 (6), (7) 可得到残差均值与残差方差分别为

$$\bar{\tau}^{(0)} = 3.1225, S_1 = 1.3981, \bar{x}^{(0)} = 3.7276, S_2 = 4.1464$$

则

$$c = S_1/S_2 = 0.3372 < 0.35, P = P\left\{ \left| \frac{\epsilon_i^{(0)}}{\bar{\tau}^{(0)}} - \bar{\tau}^{(0)} \right| < 0.6745S_2 \right\} = 1 > 0.95$$

2.4 矿井瓦斯涌出量灰色预测结果分析

由后残差检验结果, 对照表 1 可知, 灰色系统预测拟合精度为好, 预测结果正确可靠. 进一步对 2004 年该矿井相对瓦斯涌出量测量可知, 灰色预测值与实际测量值基本吻合, 说明对矿井未来瓦斯涌出量预测都不会有太大的误差 (10%), 除非开采方式改变或地质条件变化才有可能造成测量结果的失真情况.

3 结 语

应用灰色系统理论建立矿井瓦斯涌出量 GM (1, 1) 模型, 通过残差检验, 得到其灰色系统预测拟合精度好, 预测结果正确可靠, 能够反映矿井瓦斯涌出量的客观存在与发展态势. 利用灰色系统进行预测的最大优点是: 数学模型简单易于建立, 采用数据少, 预测精度高. 灰色模型的建立过程中应注意时间序列的连续性. 如何为灰色模型中灰色参数赋予比较准确的地质意义, 还有待进一步研究.

参考文献:

- [1] 伍爱友, 蔡康旭. 矿井内因火灾危险性的模糊评价 [J]. 煤炭科学技术, 2004, 32 (7): 34~38.
- [2] 伍爱友, 肖红飞, 王从陆, 等. 煤与瓦斯突出控制因素加权灰色关联模型的建立与应用 [J]. 煤炭学报, 2005, 30 (1): 58~62.
- [3] 邓聚龙. 灰色系统基本方法 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987.
- [4] 肖有才, 张秀成, 顾志民. 浅埋型矿涌水量预测预报的灰色模型 [J]. 中国安全科学学报, 2004, 14 (5): 18~20.
- [5] 李正平, 张金钟, 李晏喜, 等. 系统动态安全评价与预测的灰色方法 [J]. 沈阳航空工业学院学报, 1997, 14 (3): 53~59.
- [6] 邓聚龙. 灰色预测与决策 [M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1986.