基于灰色 GM(1,1)模型的煤矿安全事故灾变预测及算法

梅牡丹[1,2], 袁树杰[1,2], 魏　巍[3]

(1. 安徽理工大学 能源与安全学院，安徽 淮南 232001；2. 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室，安徽 淮南 232001；3. 安徽理工大学 计算机科学与工程学院，安徽 淮南 232001)

摘　要:煤矿由于自身的生产特点,安全事故比较突出,我国煤矿事故死亡人数是世界上主要产煤国煤矿死亡人数的 4 倍以上。文章运用灰色预测法对某煤矿的安全事故死亡事故频率(FAFR)进行灾变预测,判断该煤矿下一个职工死亡事故频率高峰期出现的时间,并给出相应的算法,为制定完善的煤矿安全政策及煤矿安全预警控制系统提供决策依据。

关键词:煤矿安全；事故预测；GM 模型

中图分类号:TD7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-8725(2010)12-0091-03

Prediction of Coal Mine Disastrous Accidents Based on Gray GM(1, 1) Model and its Algorithm

MEI Mu-dan[1,2], YUAN Shu-jie[1,2], WEI Wei[3]

(1. School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Key Laboratory of Safe and Efficient Exploitation in Coal Mining of Ministry of Education, Huainan 232001, China; 3. School of Computer Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract:A coal mine has a lot of more mishaps for its own production features. the number of the coal mine accident deaths in China is more 4 times than coal mine deaths in the world's major coal mine country, Fatal Accident Frequency Rate of miner in certain area was forecasted by gray prediction method, the peak time of the next Fatal Accident Frequency Rate of miner was determined, and the corresponding algorithm was given to provide the basis of decision-making for perfect mine safety policy and safety early warning control system.

Key words:mine safety; accident prediction; GM model

0　前言

我国煤矿安全事故的发生受多种因素影响,其发生时间是随机的,但它具有一定的统计规律性。为此,可利用灰色系统理论中的“灾变预测”方法来预测煤矿安全事故的矿工死亡事故频率高峰期发生的时间。

长期以来,虽然我国已不断建立和完善煤矿安全生产监督管理体制,但是我国的煤矿事故依然频频发生,煤矿死亡事故频率一直居高不下。因此,有必要掌握其发生的规律及其出现高峰期的时间,从而人们可以提前准备并制定相应措施来预防事故的发生。

1　灰色灾变预测的原理

灰色预测是指利用 GM 模型对系统行为特征的发展变化规律进行估计预测,对在特定时区内发生事件的未来时间分布情况做出研究等，所谓灾变预测实质上是异常值预测，这里的异常值是指 FAFR 数值达到一定程度，即达到对人身安全与工业生产有一定的影响。

灾变预测就是根据离散随机数找出灾变值，形成灾变序列,再得出相应的灾变日期数列,将灾变日期数列经过数据生成(累加生成、累减生成、均值生成、级比生成)变为随机性被显著削弱而较有规律的生成数,建立 GM(1,1)模型,解决了微分方程建模问题。

2　灰色 GM 模型灾变预测方法

灰色系统理论是基于关联空间、光滑离散函数等概念定义灰导数与灰微分方程，进而用离散数据列建立微分方程形式的动态模型,灰色系统理论用于预测煤矿事故时,一般选用 GM(1,1)模型,是一阶的一个变量的微分方程。

2.1　灾变日期数列的确定

给定原始数据列,如果指定某个定值 ζ,这个 ζ 称作阈值,凡是大于这个阈值的异常值就称为灾变值,然后将这些灾变值挑出来组成另组一数列,则称这一数列为灾变数列。根据灾变数列找出对应的灾变日期,组成灾变日期数列。

2.2　数据的检验与处理

首先,为了保证建模方法的可行性,需要对灾变日期数列做必要的检验处理。设原始灾变日期数列为:

$$x^{(0)}=(x^{(0)}(1),x^{(0)}(2),\cdots,x^{(0)}(n))$$

计算数列的级比:

$$\lambda(k)=\frac{x^{(0)}(k-1)}{x^{(0)}(k)},k=2,3,\cdots n$$

如果所有的级比 $\lambda(k)$都落在可容覆盖$(e^{-\frac{2}{n+1}},e^{\frac{2}{n+2}})$内，则数列 $x^{(0)}$可以作为模型 GM(1,1)的数据进行灰色预测。否则,需要对数列 $x^{(0)}$做必要的变换处理,使其落入可容覆盖内。即取适当的常数 c,作平移变换:

$$y^{(0)}(k)=x^{(0)}(k)+c,k=1,2,\cdots,n$$

则使数 $y^{(0)}=(y^{(0)}(1),y^{(0)}(2),\cdots,y^{(0)}(n))$的级比:

收稿日期:2010-05-17;**修订日期**:2010-08-27

作者简介:梅牡丹(1984-),女,安徽巢湖人,安徽理工大学安全技术及工程专业 2008 级硕士研究生,研究方向:安全评价与安全管理,E-mail:mudan200420531@163.com。

$$\lambda_y(k)=\frac{y^{(0)}(k-1)}{y^{(0)}(k)}\in X,k=2,3,\cdots n$$

2.3 建立模型

设已知原始灾变日期数列为：$x^{(0)}=(x^{(0)}(1),x^{(0)}(2),\cdots x^{(0)}(n))$，做1次累加(AGO)生成数列：

$$x^{(1)}=(x^{(1)}(1),x^{(1)}(2),\cdots x^{(1)}(n))$$

其中 $x^{(1)}(k)=\sum_{i=1}^{k}x^{(0)}(i),k=1,2,\cdots,n$

求均值数列：

$$z^{(1)}(k)=0.5x^{(1)}(k)+0.5x^{(1)}(k-1),k=2,3,\cdots,n$$

则 $z^{(1)}=(z^{(1)}(2),z^{(1)}(3),\cdots z^{(1)}(n))$。于是建立灰微分方程为：

$$x^{(0)}(k)+az^{(1)}(k),k=2,3,\cdots,n$$

得到相应的灰色微分方程GM(1,1)的白化方程：$\frac{dx^{(1)}}{dt}+ax^{(1)}(t)=b$,$a$,$b$ 为待定系数。

记 $\hat{u}=(a,b)^T$，

$$Y=\begin{bmatrix}x^{(0)}(2)\\x^{(0)}(3)\\\vdots\\x^{(0)}(n)\end{bmatrix},B=\begin{bmatrix}-z^{(1)}(2)&1\\-z^{(1)}(3)&1\\\vdots&\vdots\\-z^{(1)}(n)&1\end{bmatrix}$$

则由最小二乘法求得最小二乘解

$$\hat{u}=(a,b)^T=(B^TB)^{-1}B^TY$$

将求取的参数带入白化方程中，得到离散响应方程式(1)：

$$\hat{x}^{(1)}(k+1)=\left(x^{(0)}(1)-\frac{b}{a}\right)e^{-ak}+\frac{b}{a},k=1,2,\cdots,n-1$$

还原到原始数据得式(2)：

$$\hat{x}^{(0)}(k+1)=\hat{x}^{(1)}(k+1)-\hat{x}^{(1)}(k)=(1-e^{a})\left(x^{(0)}(1)-\frac{b}{a}\right)e^{-ak},k=1,2,\cdots,n-1$$

式(1)和式(2)称为GM(1,1)模型的时间响应函数，它是GM(1,1)模型灰色预测的具体计算公式。

2.4 模型的精度检验

根据预测值要对模型进行精度检验，只有通过检验的模型，方可进行灾变预测。模型的精度检验方法有级比偏差值检验法、关联度检验法、后验差检验法等。文中介绍最常用的后验差检验法。

设残差为：

$$\varepsilon^{(0)}(k)=x^{(0)}(k)-\hat{x}^{(0)}(k),k=1,2,\cdots,n$$

式中 $\hat{x}^{(0)}(k)$——通过预测模型得到的预测值。

残差均值：$\bar{\varepsilon}^{(0)}=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\varepsilon^{(0)}(k)$

残差方差：$s_1^2=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(\varepsilon^{(0)}(k)-\bar{\varepsilon}^{(0)})^2$

原始数据均值：$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}x^{(0)}(k)$

原始数据方差：$s_2^2=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(x^{(0)}(k)-\bar{x})^2$

计算后验差指标 c 和 p：

后验差比值：$c=s_1/s_2$

小误差概率：$p=p\left\{\left|\varepsilon^{(0)}(k)-\bar{\varepsilon}^{(0)}\right|<0.6745s_1\right\}$

根据指标 c 和 p 的值，可从表1查出精度检验等级。

表1 精度检验等级表

预测精度等级	c	p
1级(好)	$c\leqslant0.35$	$p\geqslant0.95$
2级(合格)	$0.35<c\leqslant0.50$	$p\geqslant0.80$
3级(勉强)	$0.5<c\leqslant0.65$	$p\geqslant0.70$
4级(不合格)	$c>0.65$	$p<0.70$

2.5 预测预报

由模型GM(1,1)所得到的指定时区内的预测值，根据实际问题的需要，给出相应的预测预报，预测下一个异常值出现的时间。

3 灾变预测的应用研究

根据1996-2009年某煤矿总人数和事故死亡人数统计情况，计算出这14年该煤矿矿工死亡事故频率(FAFR)(见表2)，运用灰色灾变预测法预测FAFR下一个高峰期出现的时间，并给出灾变预测相应的算法设计。

表2 FAFR值(每年以365×8h计)

年份	FAFR	年份	FAFR
1996	3.15	2003	3.37
1997	3.34	2004	2.83
1998	3.12	2005	3.46
1999	2.97	2006	3.14
2000	3.69	2007	3.06
2001	3.08	2008	3.01
2002	2.95	2009	3.77

根据以上近14年的FAFR值求得该区FAFR的平均值是3.21，所以文中规定灾变预测的阈值 $\zeta=3.21$，并认为FAFR≥ζ 为死亡事故频率高峰期，预测下一次FAFR高峰期出现的时间。

第一步：灾变日期数列的确定

写出FAFR初始数据：

$Q^{(0)}$=(3.15,3.34,3.12,2.97,3.69,3.08,2.95,3.37,2.83,3.46,3.14,3.06,3.01,3.77)

由于满足 $Q^{(0)}(i)\geqslant3.21$ 的 $Q^{(0)}(i)$ 即为灾变值，易得灾变数列为：$Q_\zeta^{(0)}$=(3.34,3.69,3.37,3.46,3.77)

其对应的灾变日期数列为：

$$x^{(0)}=(1997,2000,2003,2005,\ 2009)$$

第二步：级比检验

$$\because\lambda(k)=\frac{x^{(0)}(k-1)}{x^{(0)}(k)}$$

$\therefore\lambda=(\lambda(2),\lambda(3),\lambda(4),\lambda(5))=(0.9985,0.9985,0.999,0.998)$

由于所有的 $\lambda(k)\in[0.716\,5,1.330\,7]$，故可用 $x^{(0)}$ 作满意的GM(1,1)建模。

第三步：GM(1,1)建模

为了建模中计算的方便，在这里以1995年为基准，将1996-2009年分别用1~14来表示，表示1995年之后的第1~14年，则对应的灾变日期数列 $x^{(0)}$ 可表示为：

$$x^{(0)}=(2,5,8,10,\ 14)$$

对 $x^{(0)}$ 作一次累加得

$$x^{(1)}=(2,7,15,25,39)$$

构造数据矩阵 B 及数据向量 Y

$$B=\begin{bmatrix}-4.5&1\\-11&1\\-20&1\\-32&1\end{bmatrix}\quad Y=\begin{bmatrix}5\\8\\10\\14\end{bmatrix}$$

计算 $\hat{u}=(a,b)^T=(B^TB)^{-1}B^TY=(-0.314\,7\ \ 3.939\,3)^T$

得到 $a=-0.314\,7,b=3.939\,3$

则GM(1,1)的白化方程为：

$$\frac{dx^{(1)}}{dt}-0.314\,7x^{(1)}(t)=3.939\,3$$

求解得离散响应方程为：

$$\hat{x}^{(1)}(k+1)=\left(x^{(0)}(1)-\frac{b}{a}\right)e^{-ak}+\frac{b}{a}=\left(2+\frac{3.939\,3}{0.314\,7}\right)e^{0.314\,7k}-\frac{3.939\,3}{0.314\,7}=14.5e^{0.314\,7k}-12.5$$

由上面的离散响应方程可算得 $\hat{x}^{(1)}(k+1)$，其中取 $\hat{x}^{(1)}(1)=\hat{x}^{(0)}(1)=x^{(0)}(1)=2$，利用数据还原公式：$\hat{x}^{(0)}(k+1)=\hat{x}^{(1)}(k+1)-\hat{x}^{(1)}(k)$

将 $\hat{x}^{(1)}(k+1)$ 计算值作累减还原，得到灰色预测结果(见表3)。

根据灰色预测值计算后验差指标 c 和 p，得后验差比值 $c=$

$s_1/s_2=0.081$，小误差概率 p：$p=p\left\{\left|\varepsilon^{(0)}(k)-\bar{\varepsilon}^{(0)}\right|<0.6745s_1\right\}=0.91$

查精度检验等级表 1，c 和 p 的精度分别为好和合格，则该模型预测精度为合格级。

第四步：预测结果评价

表 3　计算数据表

序号	$x^{(0)}$	$x^{(1)}$	灰色预测值		
			$\hat{x}^{(0)}$	$\hat{x}^{(1)}$	$\varepsilon^{(0)}$
1	2	2	2	2	0
2	5	7	5.36	7.36	-0.36
3	8	15	7.35	14.71	0.65
4	10	25	10.06	24.77	-0.06
5	14	39	13.79	38.56	0.21
6			18.89	57.45	
7			25.87	83.32	

根据表 3 可知预测的第 6 个和第 7 个数据分别为

$$\hat{x}^{(0)}(6)=18.89,\hat{x}^{(0)}(7)=25.84$$

由于 18.89 与 14 相差 4.89，而 14 对应的是 2009 年，这表明下一次该煤矿矿工死亡事故频率（FAFR）高峰期将发生在 2013 年下半年。

4　灾变预测的算法实现

由于灰色预测过程中含有大量复杂的数据计算，所以为了计算的方便和准确，这里给出计算的 MATLAB 程序如下：

```
Clc, clear
q=[3.15,3.34,3.12,2.97,3.69,3.08,2.95,3.37,2.83,3.46,
3.14,3.06,3.01,3.77] ;
x0=find(q>=3.21);
x1=cumsum(x0);
n=length(x0);
lamda=x0(1:n-1)./x0(2:n)
range=minmax(lamda)
for i=2:n
z(i)=0.5*(x1(i)+x1(i-1));
end
B=[-z(2:n) ',ones(n-1,1)];
Y=x0(2:n)';
u=B\Y
x=dsolve('Dx+a*x=b','x(0)=x0');
x=subs(x,{'a','b','x0'},
{u(1),u(2),x1(1)});
yuce1=subs(x,'t',[0:n-1]);
digits(6),y=vpa(x) yuce=[x0(1),diff(yuce1)];
epsilon=x0-yuce     %计算残差
```

5　结束语

虽然该地区下一次煤矿矿工死亡事故频率高峰期出现在 2009 年的 4年之后，但是该煤矿安全事故职工 FAFR 仍保持较高的趋势，该地区的煤矿安全形势依然严峻。因此，该地区要加大煤矿矿工安全的投入，加强安全监督，健全煤矿施工安全法制制度并严格执行，特别是在 2013 年，进一步完善煤矿安全事故的预防措施。

参考文献：

[1]　邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1987.

[2]　高忠红,赵耀江.利用灰色灾变理论预测矿井瓦斯涌出最大时间[J].煤炭技术,2005,24(12):37-39.

[3]　刘思峰,党耀国,方志耕.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版,2004.

（责任编辑　王凤英）

收稿日期:2010-03-15;**修订日期**:2010-08-27

作者简介:杨宁波(1981-)，男，重庆人，助理工程师，河南理工大学安全科学与工程学院 06 级硕士研究生，从事矿山安全工作，E-mail: ynbisthebest@163.com。