

开采沉陷动态预计的正态分布时间函数模型研究

张 兵^{1,2} 崔希民¹ 胡青峰³

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083; 2. 石家庄学院资源与环境科学学院,河北 石家庄 050035;
3. 华北水利水电大学资源与环境学院,河南 郑州 450045)

摘 要: 使用常用的 Knothe 时间函数进行煤炭开采所引起的地表动态下沉预计时,其反映的地表下沉速度和下沉加速度与地表实际下沉规律不相符,基于此,可引入一种新的时间函数—正态分布时间函数,对该时间函数值的变化范围和变化规律进行了详细对比,给出了正态分布时间函数用于地表动态预计时参数的确定方法,并利用该时间函数对某矿区地表下沉实测数据进行了对比预测。研究表明:正态分布时间函数的下沉速度和下沉加速度与地表动态下沉规律是相吻合的;当进行不同精度的动态预计时,合理选择函数的形态参数非常重要;在某些矿区,利用正态分布时间函数进行动态预计比使用双参数 Knothe 时间函数进行预计更符合地表移动的变化规律,预计结果也更为可靠。

关键词: 开采沉陷; 正态分布时间函数; 动态预计; Knothe 时间函数

中图分类号: TD325 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)04-0140-06

Study on normal distributed time function model to dynamically predict mining subsidence

Zhang Bing^{1,2}, Cui Ximin¹, Hu Qingfeng³

(1. School of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
2. School of Resources and Environmental Science, Shijiazhuang University, Shijiazhuang 050035, China;
3. School of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: When a conventional Knothe Time Function was applied to predict the surface ground dynamic subsidence caused by the coal mining, the surface ground subsidence speed and subsidence acceleration reflected were not fitted with the actual subsidence law of the surface ground. Based on the circumstance, the paper introduced a new time function - normal distributed time function. A detail comparison analysis was conducted on the variation scope and variation law of the time function value. The normal distributed time function was provided to the method to determine the surface ground dynamic predicted time parameters. The time function could be applied to the comparison prediction on the real measured data of the surface ground subsidence in a mining area. The study showed that the subsidence speed and the subsidence acceleration of the normal distributed time function could be fitted with the surface ground dynamic subsidence law. When a different accuracy dynamic prediction was conducted, the morphological parameters of the rational selected function would be very important. In a mining area, the normal distributed time function applied to the dynamic prediction would be closely fitted to the variation law of the surface ground movement than the prediction with the double parameters Knothe Time Function and the predicted results would be more reliable.

Key words: mining subsidence; normal distributed time function; dynamic prediction; Knothe Time Function

0 引 言

矿山开采实践以及大量的现场实测数据都表

明,地表移动变形是一个复杂的时间和空间过程^[1-6],从地下开采工作面开始推进,经过一定的时间后,在受影响的区域内各个地面点都会经历

收稿日期: 2015-12-28; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2016.04.028

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51474217); 国家自然科学基金青年基金资助项目(41301598)

作者简介: 张 兵(1979—)男,河南潢川人,讲师,博士研究生。Tel: 18131136056 E-mail: zhb1020@126.com

引用格式: 张 兵,崔希民,胡青峰.开采沉陷动态预计的正态分布时间函数模型研究[J].煤炭科学技术,2016,44(4):140-145,174.

Zhang Bing, Cui Ximin, Hu Qingfeng. Study on normal distributed time function model to dynamically predict mining subsidence [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 140-145, 174.

“开始移动—剧烈移动—移动逐渐停止”的全过程。事实上,受开采影响的地表各点的移动和变形过程不但取决于地面点的空间位置,还与开采时间、开采方式、岩石的物理力学性质、矿床的埋藏条件等有着密切的关系,研究开采沉陷随时间变化的动态过程,不但可以随时掌握地表移动与变形的分布规律,还可以实时得出最大变形值出现的时间和空间位置,对研究开采速度、开采方式对地表下沉动态过程的影响规律以及保护地表建筑物的安全使用,及时制定建筑物的维修与加固方案和确定实施时间等都有重要的指导意义^[7-10]。当前,我国地表下沉动态预计多采用 Knothe 时间函数,很多学者也都对 Knothe 时间函数进行过深入的研究,崔希民等^[11-12]研究了 Knothe 时间函数影响系数的确定方法,结合概率积分法,提出了基于 Knothe 时间函数的概率积分动态预计方法,推导了动态预计公式;刘玉成等^[13]研究了 Knothe 时间函数以及其他能用于地表动态预计的时间函数,分析了各函数的优缺点,并对 Knothe 时间函数进行了改进;常占强等^[14]为了提高 Knothe 时间函数的预计精度,提出了改进的分段 Knothe 时间函数模型;王军保等^[15]采用岩石力学非常流变模型,将 Knothe 时间影响系数看作非常量,对 Knothe 时间函数模型进行了改进。上述研究成果对我国地表动态沉陷预计研究与应用实践起到了积极的推动作用。笔者主要研究和分析另一种时间函数—正态分布时间函数,该时间函数在我国还鲜见应用。通过对该时间函数特征进行深入研究和分析,探讨利用该时间函数进行动态预计时的参数选取与确定方法,最后用某矿的地表实测数据进行验证,证明该时间函数模型在我国采矿区进行动态预计的可行性。

1 常用时间函数对比

确定一个函数是否可以作为动态预计的时间函数,需要清楚地了解地表沉陷随时间的发展变化规律。大量的实测资料分析表明,地表的下沉可以分为 3 个阶段^[15-16]。

1) 当地表下沉速度不大于 1.67 mm/d 时,称为下沉初期,此时工作面的开采尺寸一般达到 $(1/4 \sim 1/2) H_0$ (H_0 为平均开采深度),地表点开始受到采动的影响,下沉量与下沉速度都是从 0 开始逐渐增大。

2) 当地表下沉速度大于 1.67 mm/d 时,称为下沉活跃期,地表下沉速度快速增加、下沉量迅速增大。

3) 当地表下沉速度又下降到小于 1.67 mm/d 时,称为下沉衰退期,此时地表下沉量依然在增加,但增加缓慢,直至趋于稳定。

总体来说,理想的可用于动态预计的时间函数必须要具备 3 个特征:①地表下沉从 0 开始并最终趋于稳定,下沉量达到最大后不再增加,相应的时间函数值应在 0 1 内变化;②对应于下沉活跃期,时间函数值应为从 0 1 迅速变化的阶段,时间函数曲线的斜率应比初始期和衰退期明显增大;③对应于下沉衰退期,时间函数曲线斜率逐渐减小,直至为 0,时间函数值达到 1 后便不再增加。

1.1 Knothe 时间函数

Knothe 时间函数是由波兰学者 Knothe 在 1952 年提出的,主要基于下面的假设,即某一时刻的地表下沉速度 v_t 与地表最终的静态下沉值 W_0 之差成比例。具体公式为

$$v_t = \frac{dW(t)}{dt} = c [W_0 - W(t)] \quad (1)$$

式中: t 为工作面开挖时刻到预计时刻的时间长度,通常以月或天为单位; $W(t)$ 为 t 时刻地表动态下沉值, $W_0 - W(t)$ 为 t 时刻到地表沉陷稳定后的潜在下沉量; c 为模型参数,也称时间常数,其取值与采矿区上覆岩层的物理力学性质密切相关。

考虑到在开采未进行时的边界条件: $t = 0$ 、 $W(t) = 0$,对式(1)进行积分,可推导出公式为

$$W(t) = W_0(1 - e^{-ct}) \quad (2)$$

$$\text{令} \quad K(t) = 1 - e^{-ct} \quad (3)$$

式(3)便是 Knothe 时间函数的表达式。

时间函数的一阶导数表示的是下沉速度,二阶导数表示的是下沉加速度,地表沉陷的实际规律是^[11]:下沉速度 v 要符合 $0 \rightarrow +v_{\max} \rightarrow 0$ 过程,加速度要符合 $0 \rightarrow +a_{\max} \rightarrow 0 \rightarrow -a_{\max} \rightarrow 0$ 过程。

图 1 给出了时间常数 $c = 1$ 时, Knothe 时间函数及其下沉速度 $K'(t)$ 和下沉加速度 $K''(t)$ 的函数图像,当 c 不等于 1 时,其函数图像形态与 $c = 1$ 是一致的。从图像中可以看出, Knothe 时间函数除满足函数值在 0~1 内变化外,其下沉速度和下沉加速度都不能反映地表实际的移动过程。

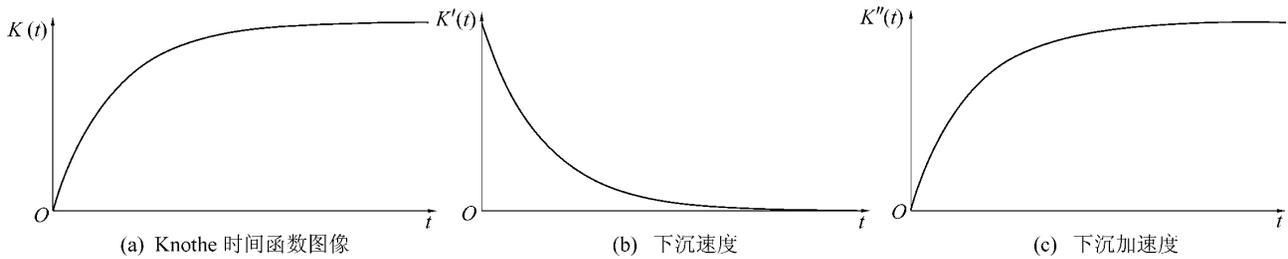


图1 Knothe 时间函数及其下沉速度和下沉加速度函数图像

Fig. 1 Figure of Knothe Time Function and its subsidence velocity and acceleration

1.2 双参数 Knothe 时间函数

针对 Knothe 时间函数在下沉速度和加速度方面与实际地表下沉规律不符的情况,为了提高其预测精度和适用性,刘玉成等^[13]对 Knothe 时间函数进行了研究,提出了在 Knothe 时间函数的基础上加一个幂指数,这样,Knothe 时间函数就有了 2 个参

数 c 和 n , 将其定义为“双参数 Knothe 时间函数”具体函数形式见式(4)。

$$K(t) = (1 - e^{-ct})^n \quad (4)$$

双参数 Knothe 时间函数及其下沉速度和下沉加速度的图像如图 2 所示。

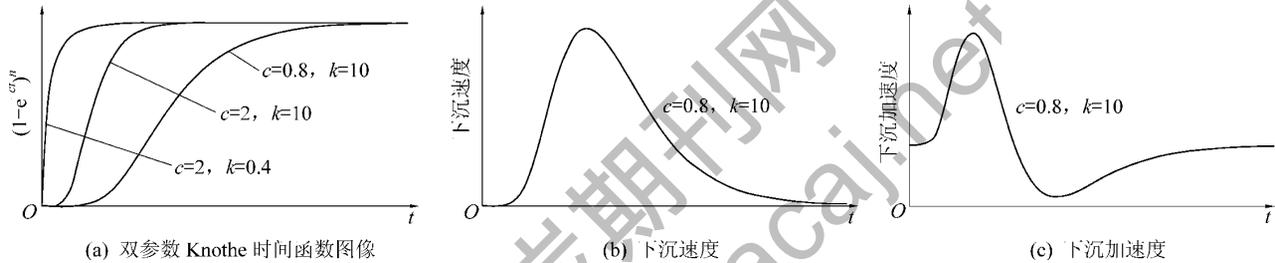


图2 双参数 Knothe 时间函数及其一阶导数和二阶导数的函数曲线

Fig. 2 Curves of double parameters Knothe Time Function and its first derivative and second derivative

从图 2a 可以看出,当加入幂指数 n 后,通过调节 n 的值,可以改变下沉时间函数的形态,这样,根据开采区上覆岩层的物理力学性质、开采深度、速度、开采方法等的不同,只要能够合理地确定 c 和 n 的值,便可以用它进行动态变形预计。由于改进后的 Knothe 时间函数的图形形态变化更为多样,因此扩大了 Knothe 时间函数的应用范围。从图 2b 及图 2c 可以看出,双参数 Knothe 时间函数的下沉速度(一阶导数)和下沉加速度(二阶导数)符合 $0 \rightarrow +v_{\max} \rightarrow 0, 0 \rightarrow +a_{\max} \rightarrow 0 \rightarrow -a_{\max} \rightarrow 0$ 这一规律,在理论上更符合地表动态下沉的实际过程。需要指出的是,只有参数 n 的取值大于 1 时,下沉速度和下沉加速度才符合上述规律,否则,其只会改变图 2a 的函数形态,不能改变下沉速度和下沉加速度的形态;另外,在实际应用中,Knothe 函数时间系数 c 的确定本就不易,当又引入一个参数 n 时,参数的确定将更加困难,因此也同时增加了函数的使用难度。

布,在物理、数学和工程等领域都有着非常广泛的应用,其数学表达式如下:

$$F(x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (5)$$

式中: x 为变量; μ 为均值; σ 为标准差。

正态分布函数的图像特征如图 3a 所示。从图 3a 可知,其函数值符合上述 3 个特征,即,函数值在 01 之间变化;函数值从 01 有迅速增加的阶段;函数值在后半段慢慢趋近于 1,直到等于 1 后不再增加;因此可以初步判断,正态分布函数可以作为地表动态预计的时间函数。

下沉速度 v 为正态分布函数的一阶导数,也即“正态分布密度函数”,其表达式见式(6),下沉加速度 a 为其二阶导数的表达式,见式(7)。

$$v = F'(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

$$a = F''(x) = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} (x - \mu) e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

根据前面的叙述可知,正态分布函数作为时间函数,其一阶导数表示的是下沉速度,函数表达式见

2 正态分布时间函数及其参数确定

2.1 正态分布时间函数

正态分布(Normal Distribution)又称为高斯分

式(6),二阶导数表示的是下沉加速度,表达式见式(7),式中变量含义与公式(5)同,式(6)、式(7)的函数图像如图 3b 和图 4 所示。

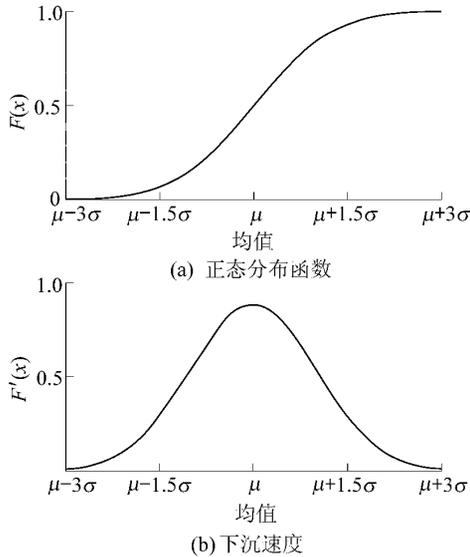


图 3 正态分布函数及其下沉速度曲线

Fig. 3 Curves of normal distribution Time Function and its subsidence velocity

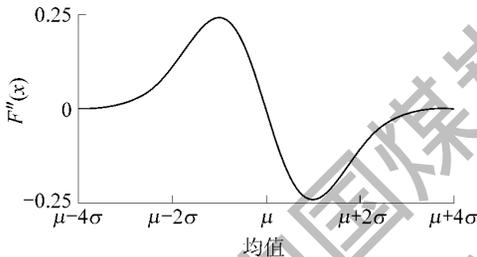


图 4 正态分布时间函数下沉加速度曲线

Fig. 4 Curves of subsidence acceleration of Normal Distribution Time Function

从图 3b 和图 4 可知,正态分布时间函数的下沉速度和下沉加速度完全符合: $0 \rightarrow +v_{max} \rightarrow 0$, $0 \rightarrow +a_{max} \rightarrow 0 \rightarrow -a_{max} \rightarrow 0$ 这一地表实际下沉规律,并且完全是中心对称的,这与概率积分法预计时的地表下沉速度变化趋势是吻合的,因此,在理论上正态分布时间函数完全可以用于地表下沉的动态预计,并且与 Knothe 和改进的 Knothe 时间函数相比^[12-14],正态分布时间函数更符合实际地表动态下沉全过程的规律。

2.2 正态分布时间函数参数确定

为了建立正态分布时间函数变量 x 与实际开采时间过程之间的关系,首先定义 3 个变量^[17]: 第 1 个变量用 τ_r 表示,称为延迟时间,是指从工作面开始推进到地表下沉开始显现所经历的时间;第 2 个

变量用 τ_l 表示,是指从工作面开始推进到开采达到充分采动所经历的时间;第 3 个变量用 τ_s 表示,指从地表下沉开始显现到开采达到充分采动,地表下沉值达到最大值时所经历的时间。为了建立正态分布均值 μ 和标准差 σ 与 τ_r 和 τ_s 之间的关系,引入参数 δ ($\delta > 0$)。根据概率分布密度函数的意义:横轴区间 $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ 内包含的面积为 68.27%,横轴区间 $(\mu - 1.96\sigma, \mu + 1.96\sigma)$ 内包含的面积为 95.45%,横轴区间 $(\mu - 2.58\sigma, \mu + 2.58\sigma)$ 内包含的面积为 99.73%。在 τ_r 时刻,地表的下沉刚刚开始,其下沉量和下沉速度都趋于 0,参照图 3b,可以假设 τ_r 为

$$\tau_r = \mu - \delta\sigma \Rightarrow \sigma = (\mu - \tau_r) / \delta \quad (8)$$

δ 的取值需要根据开采实际情况来确定。同理,也可假设 τ_l 为

$$\tau_l = \mu + \delta\sigma \quad (9)$$

根据 τ_r 和 τ_s 的定义可得

$$\tau_s = \tau_l - \tau_r = 2\delta\sigma \Rightarrow \sigma = \tau_s / 2\delta \quad (10)$$

结合式(8)和式(10)可得:

$$\mu = \tau_r + \tau_s / 2 \quad (11)$$

式(10)和式(11)将均值 μ 和标准差 σ 与开采沉陷的时间参数建立了联系。将式(10)和式(11)代入式(5),可得式(12)为

$$F(t) = \frac{2\delta}{\tau_s \sqrt{2\pi}} \int_{\tau_r}^t e^{-\frac{2\delta^2(t-\tau_r-\frac{\tau_s}{2})^2}{\tau_s^2}} dt \quad (12)$$

式(12)便是可用于地表动态下沉的正态分布时间函数,假设延迟时间 $\tau_r = 0$, $\tau_s = 20$ 月,当 $\delta = 1, 2, 3, 4$ 时,式(12)的函数图像如图 5 所示。

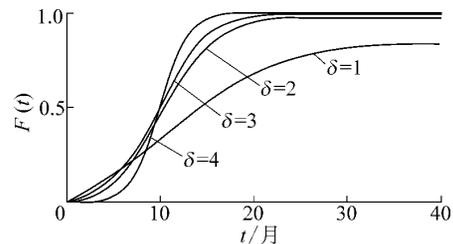


图 5 δ 取不同值时正态分布时间函数图像

Fig. 5 Curves of Normal Distribution Function when δ takes different values

从图 5 可知,当 δ 取不同的值时,时间函数值最终并不都能趋近于 1。随着 δ 取值由大到小,时间函数值趋近于 1 的误差也就越来越大,这说明了 δ 取值越小,越不适合作为动态预计的时间函数。因为其不符合时间函数值在 0~1 变化的特点。误差产生的原因是,正态分布时间函数的积分区间为 (τ_r, t) ,并不

是在 $(-\infty, +\infty)$ 区间内进行积分 根据定义 实际应用中 t 的取值为 $\tau_r + \tau_s$ 根据式(10)可知 δ 取值越大 τ_s 值也就越大 因此 积分区间 $[\tau_r, t]$ 的范围也就越大 函数值就会越来越趋近于 1。

通过以上分析可知 在进行精度要求不高的动态预计时 δ 可以等于 2 当预测精度要求较高时 δ 取大于等于 3 是合适的 但当 $\delta = 1$ 时 不能用正态分布时间函数进行动态预计。

3 工程实例验证

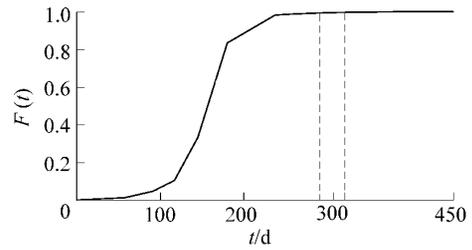
1990年10月—1992年3月 阳泉二矿对 8403 综采工作面开采引起的地表沉陷进行了较系统的现场观测 取得了观测资料; 现以实际观测的最大下沉点 62 号点作为预测的研究对象 用正态分布时间函数对其下沉过程进行预测。

预测前 首先要确定正态分布函数的时间参数 τ_r 、 τ_s 和 δ 延迟时间 τ_r 不影响时间函数值与图形形态 在实际预测时可以令 $\tau_r = 0$ 。 τ_s 和 δ 的值需要根据实测数据反算求得 图 6a 是根据实测地表下沉数据和观测时间的关系反算求取的正态分布时间函数形态。根据 τ_s 的定义 并考虑观测时间间隔及观测误差 τ_s 的区间为 290~320 d 取其平均值 305 d 作为预测参数 τ_s 的值; τ_s 确定后 代入式(12) 在 δ 取大于 1 的不同值时绘制函数曲线如图 6b 所示。

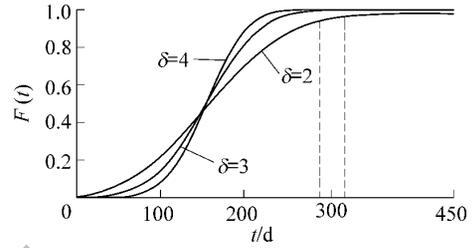
对比图 6a 和图 6b 反算时间函数形态与 $\delta = 4$ 时的理论函数形态最为吻合 因此确定 $\delta = 4$ 。需要指出: 根据实测数据求得的预计参数 可以用于该矿区或类似地质条件和采矿条件的矿区进行动态预计。参数确定好之后便可对 8403 综采工作面 62 号点的下沉过程进行动态预测。

为了验证预测结果的可靠性 将其与刘玉成等^[18]采用双参数 Knothe 时间函数进行预测的结果进行对比 对比分析结果见表 1 和如图 7 所示。从图 7 可以看出 当采用双参数 Knothe 时间函数进行预测时 其在下沉开始的前 60 d 和下沉 300 d 以后的预测结果是可靠的 但在中间阶段预测值与实际下沉值相差较大 不能反映地表动态移动全过程; 当采用正态时间函数进行预测时 不但在开始阶段和最后阶段预测结果较好 在中间阶段除个别点误差较大外 总体较为吻合。

为了直观评价预测结果的质量 通常采用标准误差或称为均方根误差作为衡量预测值与观测值之



(a) 实测值反算时间函数形态



(b) $\tau_s=305$ 时不同 δ 对应的函数形态

图 6 反算时间函数形态和理论函数形态对比

Fig. 6 Contrast between back calculation time function and theory time function

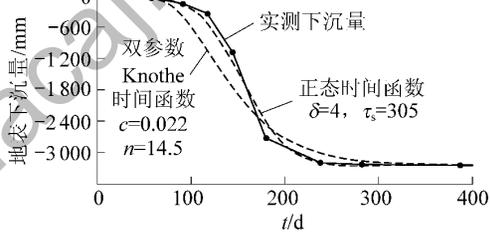


图 7 正态分布时间函数与 Knothe 时间函数预测对比

Fig. 7 Contrast of prediction results between Konthe Time Function and Normal Distribute Time Function

间偏差的标准。在假定实测数据不包含测量误差的基础上 分别对两种方法所求得的预测值和观测值之间的误差进行标准误差 m 和相对误差 f 分析 计算采用式(13)和式(14)。

$$m = \pm \sqrt{[\Delta\Delta]/(N-1)} \quad (13)$$

$$f = |m|/W_0 \quad (14)$$

式中: Δ 为 62 号监测点预测值与实测值之差; N 为观测次数; W_0 为下沉的最大值。

通过表 1 可知 采用双参数 Knothe 时间函数进行预计的标准误差为 351.69 mm 预计的相对误差为 10.79% 而采用正态分布时间函数进行预测 标准误差为 141.10 mm 相对误差为 4.33% 这充分说明了在该地质采矿条件和开采条件下 采用正态分布时间函数进行地表下沉预测的精度较高 误差较小。

表 1 双参数 Konthe 时间函数与正态分布时间函数预测对比

Table 1 Contrast of prediction results between double parameters Konthe Time Function and Normal Distribute Time Function

观测日期	相对时间/d	实测下 沉量/mm	双参数 Konthe 时间函数预计		正态时间函数预计	
			下沉量/mm	误差/mm	下沉量/mm	误差/mm
1990-10-10	0	0	0	0	0	0
1990-12-07	58	-40	-28.3	11.7	-18.49	21.51
1991-01-09	91	-151	-397.4	-246.4	-151.66	-0.66
1991-02-04	117	-335	-1 031.9	-696.9	-510.04	-175.04
1991-03-04	145	-1 089	-1 770.9	-681.9	-1 260.61	-171.61
1991-04-08	180	-2 721	-2 464.6	256.4	-2 377.28	343.72
1991-06-05	238	-3 193	-3 015.4	177.6	-3 191.23	1.77
1991-07-19	282	-3 230	-3 163.8	66.2	-3 245.13	-15.13
1991-11-01	387	-3 247	-3 248.5	-1.50	-3 247.00	0
1992-03-05	512	-3 258	-3 257.40	0.60	-3 258.00	0
均方根误差	—	—	—	351.69	—	141.10
预计相对误差	—	—	—	10.79%	—	4.33%

4 结 论

1) 在分析 Konthe 时间函数和双参数 Konthe 时间函数优缺点的基础上,对比研究了正态分布函数的特征,如将其用作动态预计时间函数,其下沉速度符合 $0 \rightarrow +v_{\max} \rightarrow 0$ 、下沉加速度符合 $0 \rightarrow +a_{\max} \rightarrow 0 \rightarrow -a_{\max} \rightarrow 0$ 的变化过程,这与实际地表下沉规律完全吻合,证明了在理论上正态分布时间函数较常用的 Konthe 时间函数更具优越性。

2) 正态时间函数的参数 δ 取值越小,时间函数值趋于 1 的误差也就越大,通过分析得出:当 $\delta = 1$ 时,不能用其进行动态预计,当预测精度要求不高时,可以用 $\delta = 2$ 进行预测,当预测精度要求较高时, δ 应取大于或等于 3 的值。

3) 通过对阳泉二矿 8403 工作面地面监测站 62 号点实测数据进行对比预测研究,表明:只要预计参数选取合理,利用正态分布时间函数能够较好的预测地表动态下沉,总体上,比用双参数 Konthe 时间函数(改进的 Konthe 时间函数)的预测精度高。

参考文献 (References):

- [1] 何国清,杨伦,凌庚娣,等.矿山开采沉陷学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1995.
- [2] 吴侃,葛家新,王玲丁,等.开采沉陷预计一体化方法[M].徐州:中国矿业大学出版社,1998.
- [3] Cui Ximin, Wang Jiachen, Liu Yisheng. Prediction of progressive surface subsidence above long-wall coal mining using a time function [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 2001, 38 (7): 1057-1063.
- [4] 郝延锦,吴立新,戴华阳.用弹性板理论建立地表沉陷预计模型[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S1):2958-2962.

- Hao Yanjin, Wu Lixin, Dai Huayang. Establishing a ground settlement prediction model with elastic slab theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2006, 25(S1): 2958-2962.
- [5] 彭小沾,崔希民,臧永强,等.时间函数与地表动态移动变形规律[J].北京科技大学学报,2004,26(4):341-344.
- Peng Xiaozhan, Cui Ximin, Zang Yongqiang, et al. Time function and prediction of progressive surface movement and deformation [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2004, 26(4): 341-344.
- [6] 李春意,陈洁.岩移观测数据处理及曲面拟合参数求取研究[J].煤炭科学技术,2012,40(11):98-102.
- Li Chunyi, Chen Jie. Study on data processing of rock strata displacement observation and parameters calculation of curved surface fitting [J]. Coal Science and Technology 2012, 40(11): 98-102.
- [7] 宋利杰,韩永斌.非主断面地表移动观测站布置及求参方法研究[J].煤炭科学技术,2015,43(10):148-151.
- Song Lijie, Han Yongbin. Study on observation station layout of non principal cross section surface movement and parameter calculation method [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(10): 148-151.
- [8] 黄乐亭,王金庄.地表动态沉陷变形规律与计算方法研究[J].中国矿业大学学报,2008,37(2):211-215.
- Huang Leting, Wang Jinzhuang. Research on laws and computational methods of dynamic surface subsidence deformation [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(2): 211-215.
- [9] 李德海.覆岩岩性对地表移动过程时间影响参数的影响[J].岩石力学与工程学报,2004,23(22):3780-3784.
- Li Dehai. Influence of cover rock characteristics on time influencing parameters in process of surface movement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2004, 23(22): 3780-3784.
- [10] 高延法,贾君莹,李冰,等.地表下沉衰减函数与塌陷区稳定性分析[J].煤炭学报,2009,34(7):892-896.

(下转第 174 页)

- 2000: 940-976.
- [13] 罗永美.煤分子结构中氢键的理论研究[D].贵阳: 贵州大学, 2010.
- [14] Painter P C, Sobkowiak M, Youtcheff J. FT-IR study of hydrogen bonding in coal[J]. Fuel, 1987, 66(7): 973-978.
- [15] Wang Guangheng, Zhou Anning. Time evolution of coal structure during low temperature air oxidation [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22: 517-521.
- [16] Lin Xiongchao, Wang Caihong, Keiko Ideta. Insights into the functional group transformation of a Chinese brown coal during slow pyrolysis by combining various experiments [J]. Fuel, 2014, 118: 257-364.
- [17] 周剑林, 王永刚, 黄鑫等. 低阶煤中含氧官能团分布的研究[J]. 燃料化学学报, 2013, 41(2): 134-138.
- Zhou Jianlin, Wang Yonggang, Huang Xin *et al.* Determination of O-containing functional groups distribution in low-rank coals by chemical titration [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2013, 41(2): 134-138.
- [18] Li Wu, Zhu Yanming, Chen Shangbin. Research on the structural characteristics of vitrinite in different coal ranks [J]. Fuel, 2013, 107: 647-652.
- [19] 朱学栋, 朱子彬, 韩崇家等. 煤中含氧官能团的红外光谱定量分析[J]. 燃料化学学报, 1999, 27(4): 335-339.
- Zhu Xuedong, Zhu Zibin, Han Chongjia *et al.* Quantitative determination of oxygen-containing functional groups in coal by FT-IR spectroscopy [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1999, 27(4): 335-339.
- [20] 郭朝令, 屈卫东, 杨宏民等. 电站锅炉燃煤特性的热重分析法研究[J]. 华中电力, 1999, 12(4): 6-8.
- Guo Chaoling, Qu Weidong, Yang Hongmin *et al.* Study in coal combustion property of power plant boiler by thermo-gravity analysis [J]. Central China Electric Power, 1999, 12(4): 6-8.
- [21] Cao Weiguo, Cao Wei, Peng Yuhuai. Experimental study on the combustion sensitivity parameters and pre-combusted changes in functional groups of lignite coal dust [J]. Powder Technology, 2015, 283: 512-518.
- [22] 宋绍勇. 煤热解动力学及其机理的实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2002.
- (上接第145页)
- Gao Yanfa, Jia Junying, Li Bing *et al.* The attenuateon function of surface subsidence and stability analysis due to mining [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 892-896.
- [11] 崔希民, 陈立武. 沉陷大变形动态监测与力学分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [12] 崔希民, 缪协兴, 赵英利等. 论地表移动过程的时间函数[J]. 煤炭学报, 1999, 24(5): 453-455.
- Cui Ximin, Miao Xiexing, Zhao Yingli *et al.* Discussion on the time function of time dependent surface movement [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(5): 453-455.
- [13] 刘玉成, 曹树刚, 刘延保. 改进的Konthe地表沉陷时间函数模型[J]. 测绘科学, 2009, 34(5): 16-31.
- Liu Yucheng, Cao Shugang, Liu Yanbao. The improved Knothe time function for surface subsidence [J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(5): 16-31.
- [14] 常占强, 王金庄. 关于地表点下沉时间函数的研究: 改进的克诺特时间函数[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1496-1499.
- Chang Zhanqiang, Wang Jinzhuang. Study on time function of subsidence The improved Knothe Time Function [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1496-1499.
- [15] 王军保, 刘新荣, 刘小军. 开采沉陷动态预测模型[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 517-521.
- Wang Junbao, Liu Xinrong, Liu Xiaojun. Dynamic prediction model for mining subsidence [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 517-521.
- [16] 黄乐亭, 王金庄. 地表动态沉陷变形的3个阶段与变形速度的研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(4): 420-424.
- Huang Leting, Wang Jinzhuang. Study on the three stages and deformation velocity of dynamic surface subsidence deformation [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(4): 420-424.
- [17] Alvarez Fernandez M I, Menendez Diaz A, Alvarez Vigil *et al.* The influence of time on subsidence in the Central Asturian Coalfield [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2007, 66(8): 319-329.
- [18] 刘玉成. 开采沉陷的动态过程模型研究[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2013.