



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

郭旭炜,杨晓琴,柴双武,等.基于变异函数的地表沉陷动态预计模型研究[J].煤炭科学技术,2021,49(9):159-166. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.09.023

GUO Xuwei, YANG Xiaoqin, CHAI Shuangwu, et al. Study on surface subsidence dynamic prediction model based on variogram [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 159-166. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.09.023

# 基于变异函数的地表沉陷动态预计模型研究

郭旭炜<sup>1</sup>,杨晓琴<sup>1</sup>,柴双武<sup>1</sup>,郭文朋<sup>2</sup>,梁永图<sup>2</sup>

(1.太原理工大学 矿业工程学院,山西 太原 030024;2.中国石油大学(北京),北京 102249)

**摘要:**矿产资源开采引起的地表沉陷,危及人类生命和财产安全,研究地表沉陷随时间变化的动态过程对防治采空区地表建筑物变形破坏具有重要的指导意义。为了准确描述因开采引起的地表随时间变化的动态过程,基于变异函数理论,建立动态预计模型,并对其进行理论分析和试验验证。结合概率积分法相关理论知识推导出地表下沉时间,将其代入变异函数的变程中,为使模型描述地表点随时间变化的下沉量、下沉速度、下沉加速度符合地表下沉规律,对变异函数模型取不同的指数,并结合4个矿区下沉数据进行对比分析。研究结果表明:当模型分子指数H=4时,该模型预计下沉时间与概率积分法计算出的下沉时间接近,且分母指数K与地表点下沉时间呈正比关系,因此得出模型的最佳指数为H=4,K为待拟合值,进而提出了一种基于变异函数的地表沉陷动态预计模型;通过与2个矿区工作面实测数据对比分析得出:该模型预计地表点下沉量的均方误差分别为0.027、0.026、0.039 m,相对中误差分别为1.69%、1.62%、2.44%,最大下沉速度误差分别为4.7%、6.1%、8.1%,下沉速度均方误差分别为0.0014、0.0010、0.0014 m/d,相对中误差分别为6.16%、4.46%、6.36%;预计采空区地表随时间变化的下沉过程与实测基本符合;结果证实该基于变异函数的地表沉陷动态预计模型在描述地表点下沉量、下沉速度、下沉加速度,具有实用价值。

**关键词:**变异函数;采动;下沉时间;动态预计;地表沉陷

中图分类号:TD325.2 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2021)09-0159-08

## Study on surface subsidence dynamic prediction model based on variogram

GUO Xuwei<sup>1</sup>, YANG Xiaoqin<sup>1</sup>, CHAI Shuangwu<sup>1</sup>, GUO Wenpeng<sup>2</sup>, LIANG Yongtu<sup>2</sup>

(1. School of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Surface subsidence caused by mining of mineral resources endangers the safety of human life and property. Studying the dynamic process of surface subsidence changes with time is of great guiding significance for preventing and controlling the deformation and destruction of surface structures in goafs. In order to accurately describe the dynamic process of surface change with time caused by mining, theoretical analysis and experimental verification about mining subsidence are carried out based on the variogram theory. Based on the theoretical knowledge of probability integral method to deduce the time of surface subsidence which was put into the range of the variogram. In order to make the model conformed to the law of surface subsidence when described the subsidence, velocity and acceleration of the surface point changed with time, a model using different indices was combined with the subsidence data of the four mining areas to conduct a comparative analysis. It was found that when the model molecular index H was 4, the expected sinking time was the closest to the time calculated by probability integral method, and the denominator index K was proportional to the sinking time, so the best index of the model was: H=4, K was the value to be fitted and then a dynamic prediction model based on variogram is proposed. The result is obtained through comparison and analysis with the measured data of the working faces in the two mining areas, it is concluded that the mean square errors of the predicted subsidence quantity of the model are 0.027, 0.026 and 0.039 m; the relative median errors are 1.69%, 1.62% and 2.44%,

收稿日期:2020-12-25;责任编辑:曾康生

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51504159);山西省自然科学基金资助项目(2016012002)

作者简介:郭旭炜(1994—),男,山西阳泉人,硕士研究生。E-mail:1260219108@qq.com

通讯作者:杨晓琴(1978—),女,甘肃会宁人,副教授,博士。E-mail:yangxiaoqin@tyut.edu.cn

and the errors of the maximum subsidence speed are 4.7%, 6.1% and 8.1%; the mean square errors of the surface sinking velocity are 0.001 4, 0.001 0 and 0.001 4 m/d, respectively, the relative median errors are 6.16%, 4.46%, 6.36%, respectively; the subsidence process changes with time of goaf surface is basically consistent with the measured subsidence process. The experimental results show that model conforms to the law of surface subsidence when it was used to describe the subsidence, velocity and acceleration and surface subsidence, and has practical value.

**Key words:** variogram; mining activity; time of surface subsidence; dynamic predictions; surface subsidence

## 0 引言

地下开采引起地表下沉是一个随时间和空间变化的复杂过程<sup>[1-2]</sup>,为确保采空区上方建(构)筑物的安全性,及时采取合理的预计和保护措施显得尤为重要。目前国内文献主要研究的开采沉陷动态预计模型主要包括:Knothe 函数模型<sup>[2-5]</sup>、Weibull 函数模型<sup>[6-8]</sup>、正态分布模型<sup>[9-10]</sup>等。

崔希民等<sup>[2]</sup>以 Knothe 函数为基础,探讨了时间影响系数  $c$  的确定方法,并给出了  $c$  的取值范围,建立了动态预计模型。胡青峰等<sup>[4]</sup>基于崔希民的模型进行改进,结合概率积分法对时间影响系数  $c$  进行推导。常占强等<sup>[3]</sup>通过分析 Knothe 函数表达地表下沉速度和加速度的缺陷以及地表下沉规律,提出将地表下沉过程一分为二的思想。以最大下沉速度出现的时间点(下沉总时间的 1/2)为依据分为前后两部分,第 1 部分描述下沉速度由零增至最大,第 2 部分描述下沉速度由最大下降至零的过程,以原始 Knothe 函数的导数表示后半段,对称地表示出前半段即为下沉速度式,对其积分便为地表下沉动态预计式。张兵等<sup>[5]</sup>以常占强的理论为基础进行优化,解决了原时间函数在分段处函数值与理论值不一致以及原时间函数最终不收敛于 1 的问题。涂许航等<sup>[7]</sup>、王伟等<sup>[8]</sup>采用 Weibull 函数预计模型对矿区进行预计,解决了最大下沉速度对应的下沉值与最大下沉值比值为定值的问题。张兵等<sup>[10]</sup>研究了基于正态分布的动态预测模型。李春意等<sup>[9]</sup>讨论了正态分布的完备性。张凯等<sup>[11]</sup>对正态时间函数模型进行了优化。但笔者分析研究发现,地表下沉受开采速度、开采深度、地质条件等众多因素影响,其模型参数固定化,参数单一化会造成精度损失,从而可能引起下沉速度、下沉加速度表达与实际不符的问题。

一些学者应用不同的方法对工作面推进速度与地表下沉的关系进行了研究。谢广祥等<sup>[12]</sup>采用相似材料模拟法分析了不同推进速度对工作面上覆岩层的影响;王方方等<sup>[13]</sup>采用 Knothe 函数模型分析了不同推进速度下地表随时间变化的下沉规律。贾

新果等<sup>[14]</sup>根据多个实测站实测数据,分析总结了工作面推进速度与地表移动的关系。宁永香等<sup>[15]</sup>分析了推进速度对地表建筑物的影响。

上述地表动态预计模型未很好解决参数单一化,固定化以及模型表达不完整的问题。鉴于此,笔者借鉴变异函数中高斯模型的建模思路,综合概率积分法求解出地表下沉时间,对比分析出普遍适用于地表下沉模型的参数,从而建立地表下沉动态预计模型。

## 1 变异函数模型的构造

### 1.1 坐标系的建立

建立半无限开采时间坐标系,如图 1 所示,坐标系分为地面坐标系和地下时间坐标系。地面坐标系原点  $x-o$  的位置为地下开切眼处向上垂直延伸至与地表的交点,回采方向为  $x$  轴的正方向,纵坐标表示下沉量,向下为正。地表坐标系用于表示地表观测点的位置。地下时间坐标系以开切眼为原点  $s-o$ ,横坐标  $s$  与地上坐标系相对应,并将回采距离  $s$  用回采时间  $t$  表示,回采工作面推进速度  $v_t$ ,即  $t=s/v_t$ 。

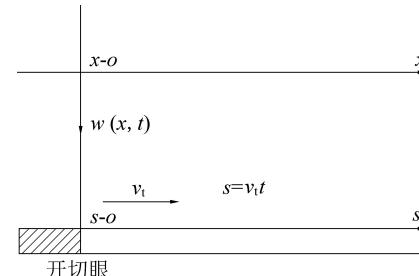


图 1 半无限开采时间坐标系

Fig.1 Coordinate system of time in semi-infinite mining process

### 1.2 地表下沉规律

采动过程中地表沉陷变形全过程分为 3 个阶段<sup>[16]</sup>,即初始下沉阶段、活跃下沉阶段、衰减下沉阶段。其判断依据为地表点下沉速度:开采初期,当地表点下沉速度未达到 1.67 mm/d 时为初始下沉阶段;下沉速度大于 1.67 mm/d 时为活跃下沉阶段;下沉速度再次低于 1.67 mm/d 为衰减下沉阶段。地表点下沉曲线随时间变化呈“Z”字形,其下沉速度曲线近似于正态分布曲线,其变化趋势为  $0 \rightarrow v_{\max} \rightarrow 0$ ,

下沉加速度的变化趋势为  $0 \rightarrow a_{\max} \rightarrow 0 \rightarrow a_{\min} \rightarrow 0$ 。

### 1.3 函数模型构造

采用数字特征分析技术可以概括区域一些特征量的全貌,而变异函数则能反应局部范围和特定方向上的特征变化。由于变异函数能透过其随机性反应区域变化量的结构性,因此,变异函数也称为结构函数<sup>[17]</sup>。在半无限开采动态预计中,下沉时间函数可以表示为任一时间  $t$ ,相距  $|\Delta t|$  的 2 个区域化变量值  $Z(t)$  及  $Z(t+\Delta t)$  的增量方差,表达式为

$$2\gamma(t, \Delta t) = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} [Z(t) - Z(t + \Delta t)]^2 dt \quad (1)$$

式中:  $\gamma(t, \Delta t)$  称为半变异函数,简称为变异函数;  $\Omega$  为变量的作用域。

当  $Z(t)$  在动态预计中可表示为预计点  $t$  时刻的下沉量,  $Z(t+\Delta t)$  表示为预计点  $t+\Delta t$  时刻的下沉值。将式(1)拟合高斯理论模型,得到其通式为

$$\begin{cases} \gamma(t, \Delta t) = 0, \Delta t = 0 \\ \gamma(t, \Delta t) = C_0 + C(1 - e^{-\frac{\Delta t^2}{A^2}}), \Delta t > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)对应的曲线图像如图 2 所示,图中  $C_0$  称为金块效应,其表示当  $\Delta t$  很小时,在  $t$  和  $t+\Delta t$  时下沉量的变化;  $C$  称为总基台值,表示某区域化变量在研究范围内变异的强度<sup>[17]</sup>,  $A$  为变程。

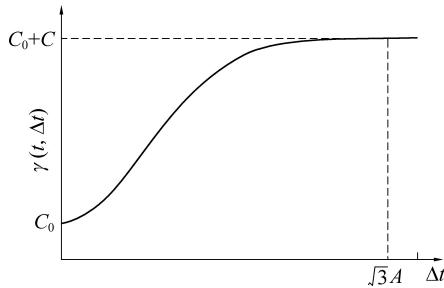


图 2 高斯模型的变异函数曲线

Fig.2 Curve of variogram of gaussian model

根据下沉规律可知:初始开采的下沉量为 0,而该曲线模型在  $\Delta t = 0$  时并不符合下沉规律。因此将式(2)标准化:取  $C_0 = 0$ ,  $C = w_0$  ( $w_0$  为最大下沉量),则式(2)可表示为

$$\begin{cases} \gamma(t, \Delta t) = 0, \Delta t = 0 \\ \gamma(t, \Delta t) = w_0(1 - e^{-\frac{\Delta t^2}{A^2}}), \Delta t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)的下沉曲线满足由开采引起的地表下沉规律,但下沉速度和下沉加速度曲线与实际略有偏差,如图 3a 所示。因此对式(3)做进一步优化:首先用参数  $H, K$  分别表示  $\Delta t$  和  $A$  的指数,选用《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》中 4 组矿区数据<sup>[18]</sup>,采用式(4)计算出下沉时间,见表 1。

表 1 各矿区参数

Table 1 Parameters of each mine area

矿井	$v_t/(m \cdot d^{-1})$	$r/m$	$\omega_0/m$	下沉时间/d
东梁矿二井	1.0	47.872 3	0.651 9	119.743 7
清河门三坑	1.6	24.545 5	0.920 9	43.783 5
大磁矿 22111	1.5	33.613 4	0.719 6	60.747 9
十一井	2.0	92.400 0	4.741 4	137.271 2

注: $v_t$  为工作面推时速度; $r$  为主要影响半径。

当地表下沉前和下沉达到最大值后的下沉速度都为零,且连续 6 个月下沉值不超过 30 mm 时(即下沉速度  $v_x$  为 0.000 16 m/d),可认为地表移动期结束<sup>[19]</sup>。便于计算,取下沉速度为 0.000 1 m/d 时,认为是地表下沉初始和结束阶段,因此令  $v_x(t_0) = 0.000 1$ ,求出 2 个  $t_0$  即为下沉速度等于 0.000 1 m/d 的时间,  $|t_1 - t_2|$  即地表从开始下沉到下沉达到最大值的时间  $T$ ,即

$$T = |t_1 - t_2| = \frac{2r \sqrt{-\ln[r/(10000v_t w_0)]}}{\sqrt{\pi} v_t} \quad (4)$$

将每个矿区数据代入式(3),并取不同指数绘制下沉图像,结果如图 4 所示,当指数  $H=4$  时,下沉量达到最大时对应的时间与采用概率积分法计算出的时间最为接近,且指数  $K$  与下沉时间成正比关系。因此,为简化模型,令  $H=4, K$  为待拟合参数。便于表示,令  $t=0, \Delta t$  表示为  $t$ ,得出式(5)为地表下沉的初始式。式(5)的下沉曲线,下沉速度曲线,下沉加速度曲线如图 3b 所示,即

$$\begin{cases} w(t) = 0, \Delta t = 0 \\ w(t) = w_0(1 - e^{-\frac{t^H}{A^K}}), \Delta t > 0 \end{cases} \quad (5)$$

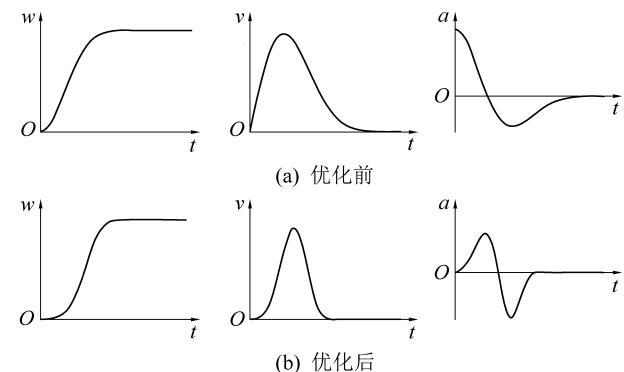


图 3 优化前后变异函数的下沉、速度、加速度曲线

Fig.3 Subsidence, velocity and acceleration images of variograms before and after optimization

由图 2 可知,地表从开始下沉到下沉达到最大值的时间(即曲线达到最大值  $C_0+C$ )为  $\sqrt{3}A$ 。下沉所用的时间可以通过概率积分法相关知识求解,得式(6)概率积分法下沉式,即

$$w(x) = w_0 \int_0^\infty \frac{1}{r} e^{-\pi \frac{(s-x)^2}{r^2}} ds \quad (6)$$

将式(6)中的工作面推进距离  $s$  由推进速度  $v_t$  和推进时间  $t$  表示, 可得出概率积分时间函数模型, 即式(7)

$$w(x) = w_0 \int_{t_0}^t \frac{v_t}{r} e^{-\pi \frac{[v_t(t-t_0)-x]^2}{r^2}} dt \quad (7)$$

式中:  $r$  为主要影响半径, m;  $s$  为工作面推进距离,

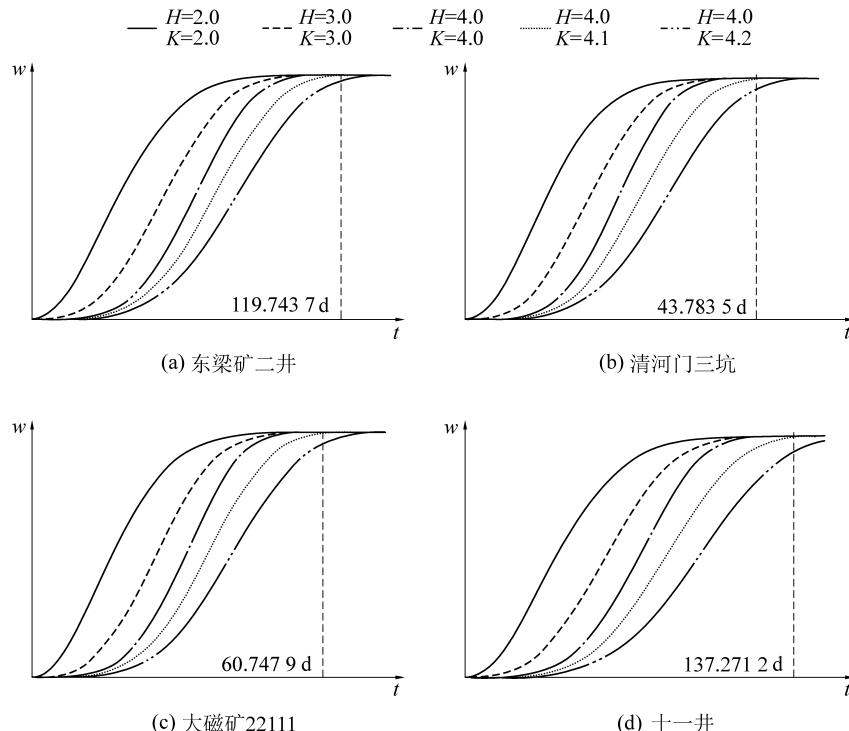


图4 不同指数的模型曲线

Fig.4 Model curves for different exponentials

下沉时间  $T$  与变程间的关系有, 注意到  $T = \sqrt{3}A$ , 所以  $A = T/\sqrt{3}$ , 并代入(4)式可得到基于变异函数的开采沉陷下沉预计函数模型, 即

$$\begin{cases} w = w_0 \varphi \\ \varphi = 1 - \exp \left[ - (t - t_0)^H \frac{3^{\frac{K}{2}}}{T^K} \right] \end{cases} \quad (9)$$

式(9)对  $t$  求导可求出地表下沉速度式为

$$v_x(t) = \frac{dw}{dt} = \frac{3^{\frac{K}{2}} H w_0 \exp \left[ - \frac{3^{\frac{K}{2}} (t - t_0)^H}{T^K} \right] (t - t_0)^{H-1}}{T^K} \quad (10)$$

式(10)对  $t$  求导可求出地表下沉加速度式为

$$a = \frac{d^2 w}{dt^2} = \frac{3^{\frac{K}{2}} H w_0 D (t - t_0)^{H-2} (H-1)}{T^K} \quad (11)$$

$m; x$  为地表检测点坐标,  $m; t$  为开采时间,  $d; t_0$  为监测点开始下沉的时间,  $d$ 。

将式(7)对  $t$  求导可求出基于概率积分法的下沉速度式为

$$v_x(t) = \frac{\partial w(x, y)}{\partial t} = \frac{w_0 v_t e^B}{t} \quad (8)$$

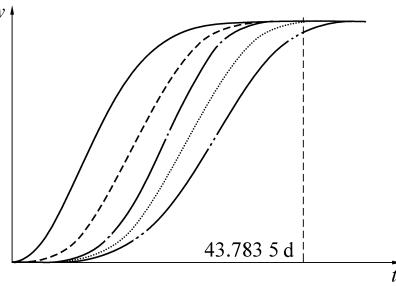
$$\text{其中, } B = -\pi \frac{[v_t(t - t_0) - x]^2}{r^2}$$

$$H=4.0$$

$$K=4.1$$

$$H=4.0$$

$$K=4.2$$

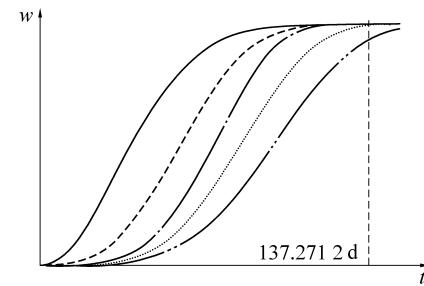


$$H=4.0$$

$$K=4.1$$

$$H=4.0$$

$$K=4.2$$



$$H=4.0$$

$$K=4.1$$

$$H=4.0$$

$$K=4.2$$



$$H=4.0$$

$$K=4.1$$

$$H=4.0$$

$$K=4.2$$

$$m = \pm \sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{n - 1}} \quad (12)$$

$$f = \frac{|m|}{w_0} \times 100\% \quad (13)$$

矿区相关参数见表2,采用基于变异函数的预计模型分别对23号点位、28号点位和34号点位下沉量、下沉速度、下沉加速度进行预计,预计曲线如图5、图6、图7所示,同时与实测数据进行误差对比分析,结果见表3。其中实测下沉速度 $v_s$ 以及对应时间的计算方法见式(14)、式(15),实测下沉加速度0.5单位以及对应时间的计算方法见式(16)、式(17)。

$$v_s = \frac{w_i - w_{i-1}}{t_{w,i} - t_{w,i-1}} \quad (14)$$

$$t_v = \frac{t_{w,i} + t_{w,i-1}}{2} \quad (15)$$

$$a_s = \frac{v_i - v_{i-1}}{t_{v,i} - t_{v,i-1}} \quad (16)$$

$$t_a = \frac{t_{v,i} + t_{v,i-1}}{2} \quad (17)$$

式中: $w_i$ 为第*i*次监测的下沉值,m; $w_{i-1}$ 为第*i-1*次监测的下沉值,m; $t_{w,i}$ 和 $t_{w,i-1}$ 分别为 $w_i$ 、 $w_{i-1}$ 对应的监测时间,d; $t_v$ 为下沉速度对应的时间,d; $v_i$ 、 $v_{i-1}$ 、 $t_{v,i}$ 、 $t_{v,i-1}$ 、 $t_a$ 同理。

由表3可知,23号点不同时间下沉预计的均方误差为0.027 m,相对中误差为1.69%;28号点不同

表2 地表沉降动态参数

Table 2 Dynamic parameters of surface subsidence

$v_s/(m \cdot d^{-1})$	$r/m$	$K$	$M/m$	$q$	$\theta/(^\circ)$	$t_0/d$ (点 23/28/34)
4.5	210	4.31	3	0.54	9	88/109/129

注: $r$ 为主要影响半径; $M$ 为开采厚度; $q$ 为下沉系数; $\theta$ 为煤层倾角; $t_0$ 为监测点下沉起始时间。

时间下沉预计的均方误差为0.026 m,相对中误差为1.62%;34号点不同时间下沉预计的均方误差为0.039 m,相对中误差为2.44%。根据实测资料计算分析,23号点最大下沉速度出现的时间段为第153 d到第183 d,为期30 d下沉了0.682 m,其下沉速度为0.022 70 m/d;28号点最大下沉速度出现的时间段为第183 d到第223 d,为期40 d下沉了0.896 m,其下沉速度为0.022 40 m/d;34号点最大下沉速度出现的时间段为第223 d到第250 d,为期27 d下沉了0.594 m,其下沉速度为0.022 00 m/d。变异函数模型计算出来的最大下沉速度为0.023 77 m/d。通过式(18)可计算模型预计最大下沉速度( $v_p$ )与实测最大下沉速度 $v_s$ 分别相差4.7%、6.1%、8.0%,下沉速度与下沉加速度预测精度见表4,由于采用取中值的方法计算下沉速度和加速度时间点,因此存在一定的误差,下沉加速度的计算更是由于误差累计使得预计与实际相差较大。

$$\omega = \left| \frac{v_p - v_s}{v_s} \right| \times 100\% \quad (18)$$

表3 23、28、34号点下沉量实测值与预测值对比

Table 3 Comparison between measured data and prediction data of subsidence at point 23,28,34

时间/d	23号点			28号点			34号点		
	实测 值/m	预测 值/m	$[\Delta\Delta]/m^2$	实测 值/m	预测 值/m	$[\Delta\Delta]/m^2$	实测 值/m	预测 值/m	$[\Delta\Delta]/m^2$
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0	0	0	0
88	0.010	0	0.000 100	0	0	0	0	0	0.000 081
129	0.041	0.040	0.000 001	0.038	0.002	0.000 766	0.031	0	0.000 961
153	0.198	0.239	0.001 681	0.048	0.053	0.000 030	0.050	0.005	0.002 025
183	0.880	0.836	0.001 936	0.314	0.381	0.004 500	0.138	0.119	0.000 361
223	1.450	1.521	0.005 041	1.210	1.254	0.001 900	0.706	0.811	0.011 025
250	1.570	1.597	0.000 729	1.514	1.556	0.001 700	1.300	1.371	0.005 041
270	1.590	1.600	0.000 100	1.600	1.596	0.000 013	1.538	1.556	0.000 324
300	1.595	1.600	0.000 025	1.600	1.600	0	1.581	1.599	0.000 324
328	1.600	1.600	0	1.600	1.600	0	1.600	1.600	0
370	1.600	1.600	0	1.600	1.600	0	1.600	1.600	0
430	1.600	1.600	0	1.600	1.600	0	1.600	1.600	0
476	1.600	1.600	0	1.600	1.600	0	1.600	1.600	0

表4 23、28、34号点实测值与预测值对比

Table 4 Comparison between measured data and prediction data of subsidence at Point 23, 28, 34

项目	23号点		28号点		34号点	
	<i>m</i>	<i>f</i> /%	<i>m</i>	<i>f</i> /%	<i>m</i>	<i>f</i> /%
下沉速度 $v_s$ /(m·d <sup>-1</sup> )	0.0014	6.16	0.0010	4.46	0.0014	6.36
加速度/(m·d <sup>-2</sup> )	$2.52 \times 10^{-4}$	42.11	$2.94 \times 10^{-4}$	76.09	$3.48 \times 10^{-3}$	80.86

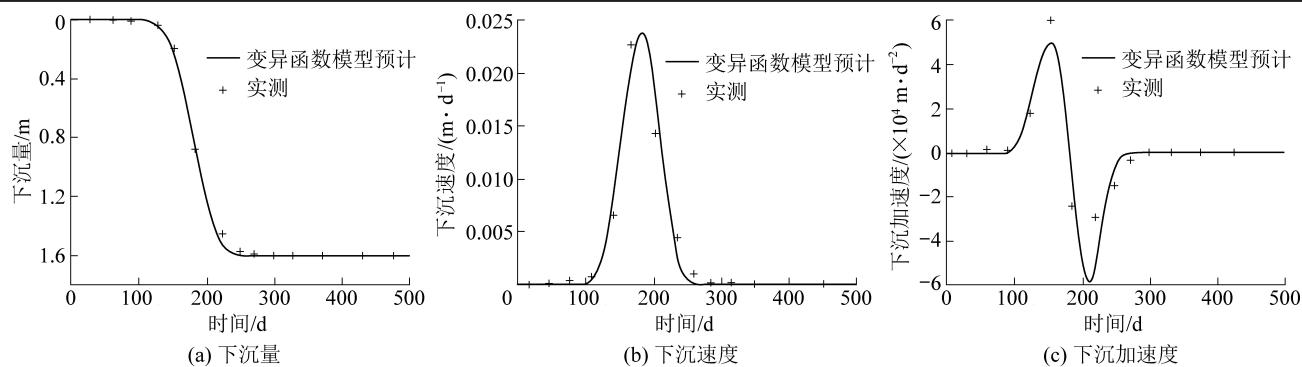


图5 23号点下沉量、下沉速度、下沉加速度

Fig.5 Subsidence, velocity and acceleration images at point 23

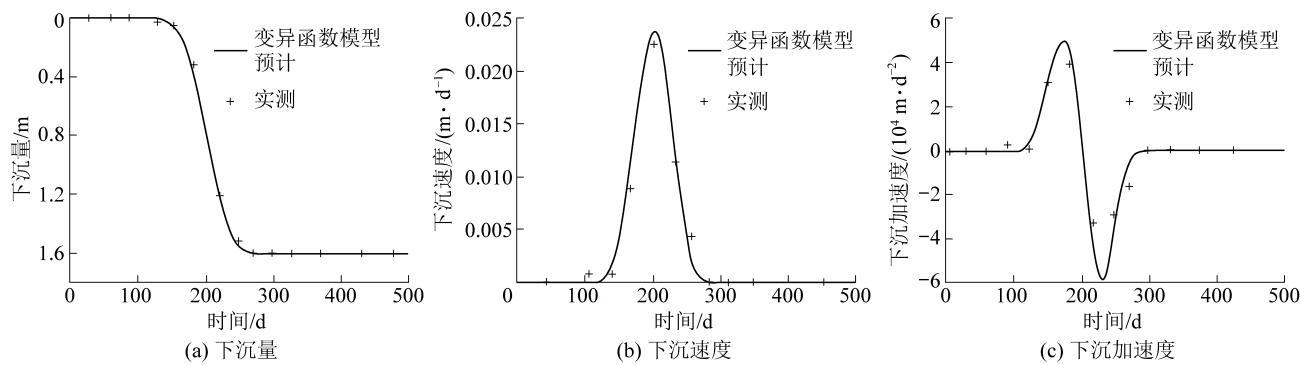


图6 28号点下沉量、下沉速度、下沉加速度

Fig.6 Subsidence, velocity and acceleration images at point 28

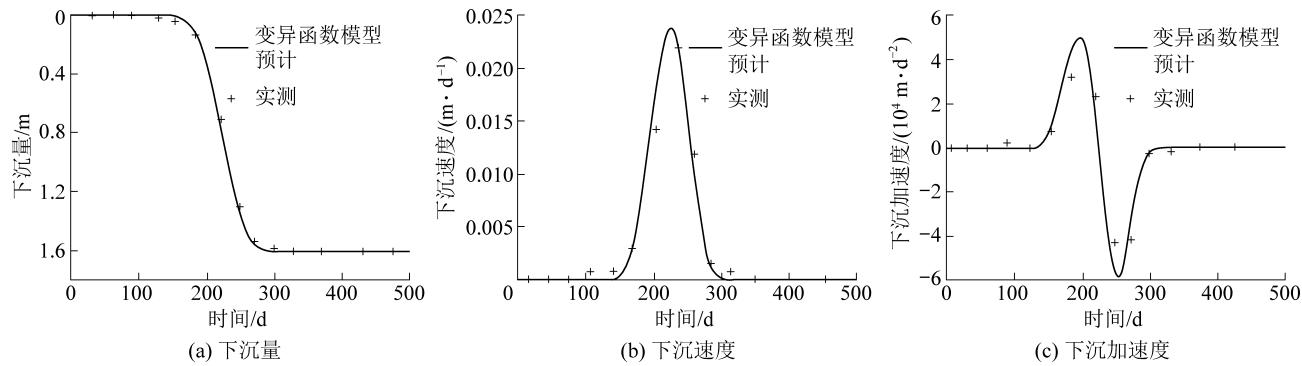


图7 34号点下沉量、下沉速度、下沉加速度

Fig.7 Subsidence, velocity and acceleration images at Point 34

## 2.2 实例二

某矿5034工作面,走向长1303 m,回采时间为2016年9月—2017年6月,工作面采用综采(走向长壁一次性采全高)采煤工艺,观测时间为2017年1月—2018年5月。观测站的布设从距离开切眼546 m处开始布设。坐标系以沿观测线起点为原

点。由于只布设了半条观测线(未开采部分),所以下沉曲线图只有一半,因此重点对该部分进行预计。工作面参数见表5。因为地表下沉在2018年3月29日达到稳定,故选取之前5个时间点下沉量进行对比,如图8所示。

表5 地表沉降动态参数

Table 5 Dynamic parameters of surface subsidence

$v_t/(m \cdot d^{-1})$	$r/m$	$K$	$M/m$	$q$	$\theta/(^\circ)$
4.2	125	3	5.82	0.77	3

实测下沉量与本文模型预计结果如图8所示,模型预计下沉满足地表下沉一般规律,预计下沉过程与实测基本符合。但实测下沉盆地处呈现凸型,其原因可能为在布设观测线时,该区域已发生下沉。

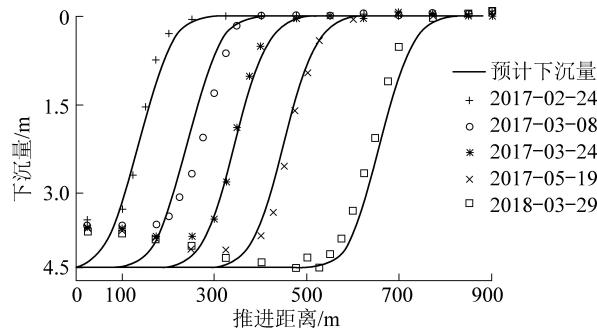


图8 走向线地表动态下沉

Fig.8 Surface dynamic subsidence of strike line

### 3 结 论

1)分析现有模型存在的问题:参数单一、最大下沉速度对应的下沉值与最大下沉值的比值为定值、下沉速度与下沉加速度曲线与实际地表下沉速度与加速度不符。

2)应用概率积分法推导出地表下沉时间式,并应用变异函数模型结合地表下沉时间式建立了下沉模型。通过对不同指数的下沉模型对比分析,得出结论:当模型分子的指数  $H=4$  时,预计下沉时间与采用概率积分法计算出的时间最为接近,且分母指数  $K$  与下沉时间成正比关系,因此采用  $H=4$ ,  $K$  为待拟合参数的方法建立半无限开采地表下沉动态预计模型。

3)通过实例验证,对比分析出基于变异函数的预计模型对2038工作面3组数据的下沉量、下沉速度和下沉加速度的预计中其形态不仅符合地表下沉规律,而且下沉量的均方误差最大为0.039 m,最小为0.026 m;相对中误差最大为2.44%,最小为1.62%;下沉速度均方误差最大为0.001 4 m/d,最小为0.001 0 m/d;相对中误差最大为6.63%,最小为4.46%;最大下沉速度误差最大为8.0%,最小为4.7%。但由于计算方法以及累计误差导致由实测下沉量计算的下沉加速度与预计结果相差较大。5034工作面走向线的下沉预计满足地表下沉规律,能够描述地表随时间变化的动态过程。

### 参考文献(References):

- [1] 朱广铁,沈红霞,王立国. 地表动态移动变形预测函数研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(9):1889-1895.  
ZHU Guangyi, SHEN Hongxia, WANG Liguo. Study of dynamic prediction function of surface movement and deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (9): 1889-1895.
- [2] 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):453-456.  
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): 453-456.
- [3] 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 surface subsidence the improved Knothe time function[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (9): 1496-1499.
- [4] 胡青峰,崔希民,康新亮,等. Knothe时间函数参数影响分析及其求参模型研究[J]. 采矿与安全工程学报,2014,31(1):122-126.  
HU Qingfeng, CUI Ximin, KANG Xinliang, et al. Impact of parameter on Knothe time function and its calculation model[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31 (1): 122-126.
- [5] 张兵,崔希民. 开采沉陷动态预计的分段Knothe时间函数模型优化[J]. 岩土力学,2017,38(2):541-548,556.  
ZHANG Bing, CUI Ximin. Optimization of segmented Knothe time function model for dynamic prediction of mining subsidence[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (2): 541-548,556.
- [6] 何国清,马伟民,王金庄. 威布尔分布型影响函数在地表移动计算:用碎块体理论研究岩移基本规律的探讨[J]. 中国矿业学院学报,1982,27(1):4-23.  
HE Guoqing, MA Weimin, WANG Jinzhuang. Application of influence function of Weibull distribution to the precalculation of ground surface movement: a study on the fundamental law of ground movement based on the elasic theory[J]. Journal of China Institute of Mining and Technology, 1982, 27(1):4-23.
- [7] 涂许杭,王志亮,梁振森,等. 修正的威布尔模型在沉降预测中的应用研究[J]. 岩土力学,2005,26(4):621-623,628.  
TU Xuhang, WANG Zhiliang, LIANG Zhenmiao, et al. Study on application of modified Weibull model to settlement prediction of foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (4): 621 - 623,628.
- [8] 王伟,卢廷浩. 基于Weibull曲线的软基沉降预测模型分析[J]. 岩土力学,2007,28(4):803-807.  
WANG Wei, LU Tinghao. Study on prediction model of soft foundation settlement based on Weibull curve[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (4): 803-807.
- [9] 李春意,高永格,崔希民. 基于正态分布时间函数地表动态沉陷预测研究[J]. 岩土力学,2016,36(S1):108-116.  
LI Chunyi, GAO Yongge, CUI Ximin. Progressive subsidence pre-

- diction of ground surface based on the normal distribution time function [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 36(S1): 108–116.
- [10] 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.
- [11] 张凯, 胡海峰, 廉旭刚, 等. 地表动态沉陷预测正态时间函数模型优化研究 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 235–240.  
ZHANG Kai, HU Haifeng, LIAN Xugang, et al. Optimization of surface dynamic subsidence prediction normal time function model [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 235–240.
- [12] 谢广祥, 常聚才, 华心祝. 开采速度对综放面围岩力学特征影响研究 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 963–967.  
XIE Guangxiang, CHANG Jucai, HUA Xinzhu. Influence of mining velocity on mechanical characteristics of surrounding rock in fully mechanized top-coal caving face [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 963–967.
- [13] 王方方, 李鹏宇, 路绪杰. 开采速度与地表动态下沉速度及加速度的关系模型研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(10): 207–210.  
WANG Fangfang, LI Pengyu, LU Xujie. Research on the speed and surface mining subsidence velocity and acceleration of dynamic relationship model [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018, 41(10): 207–210.
- [14] 贾新果, 宋桂军, 陈凯. 工作面推进速度对地表沉陷动态变形影响研究 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 208–214.  
JIA Xinguo, SONG Guijin, CHEN Kai. Study on influence of mining face advancing velocity on progressive surface subsidence and deformation [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 208–214.
- [15] 宁永香, 焦希颖. 回采速度对地表动态移动变形值的影响 [J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(11): 74–76.  
NING Yongxiang, JIAO Xiying. Mining speed influenced to surface ground dynamic displacement and deformation [J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(11): 74–76.
- [16] 黄乐亭, 王金庄. 地表动态沉陷变形的三个阶段与变形速度的研究 [J]. 煤炭学报, 2006, 31(6): 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(6): 420–424.
- [17] 林振山, 袁林旺, 吴得安. 地学建模 [M]. 北京: 气象出版社, 2003: 111–113.
- [18] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000: 121–129.
- [19] 谢飞鸿, 张立杰. 开采沉陷可视化计算方法与工程应用 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2015: 70.
- [20] 郭旭炜, 杨晓琴, 柴双武. 分段 Knothe 函数优化及其动态求参 [J/OL]. 岩土力学, 2020(6): 1–8 [2020–05–21]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2019.1567>.  
GUO Xuwei, YANG Xiaoqin, CHAI Shuangwu. Optimization of segmented Knothe function and its dynamic parameter calculation [J/OL]. Rock and Soil Mechanics, 2020(6): 1–8 [2020–05–21]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2019.1567>.