

文章编号:1000-582X(2009)07-0804-05

# 基于观测资料的沉陷盆地主断面曲线拟合

曹树刚<sup>1</sup>,刘玉成<sup>1,2</sup>,刘延保<sup>1</sup>,李勇<sup>1</sup>,王军<sup>1</sup>

(1. 重庆大学西南资源开发与环境灾害控制工程教育部重点实验室,重庆 400030;

2. 毕节学院采矿工程系,贵州毕节 551700)

**摘要:**针对现有的开采沉陷预计的剖面函数具有表达式过于复杂,坐标原点、参数在实际使用时较难确定等缺点,研究矩形采空区上方地表沉陷观测数据的特征,提出一种新的开采沉陷预计的主断面拟合函数。这种新的拟合函数表达式简单,在实际工作中容易确定相关参数。某矿山的实测资料验证说明,提出的拟合函数与实测资料吻合程度较高。

**关键词:**地下采矿;地表沉陷;预测模型;剖面函数

中图分类号:TD173.4

文献标志码:A

## Curve fitting of main section for subsidence basin by observing data

CAO Shu-gang<sup>1</sup>, LIU Yu-cheng<sup>1,2</sup>, LIU Yan-bao<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of China Southwest Resource Excoitation and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. Department of Mining Engineering, Bijie University, Guizhou Bijie 551700, P. R. China)

**Abstract:** The existing section function for mining subsidence prediction has several shortcomings, such as complex expression, uncertainty of coordinates origin and parameters in application. The features of observing data in the ground subsidence of rectangular goaf are studied and a new fit function of main section is proposed for mining subsidence prediction. This new function has some merit that the mathematical formula is simple and the parameter is also easy to identify in practices. It is proved that the results of this new function is fit well with on-site survey.

**Key words:** mining underground; subsidence; prediction model; section function

地下采矿引起的地表沉陷是矿区主要的地质灾害之一。地表沉陷产生的裂缝和裂隙会破坏地下和地表的水系,山区矿山的移动会引起山体滑坡等<sup>[1-6]</sup>。因此,开采沉陷预计是矿山地表灾害防治的主要研究内容之一。目前开采沉陷的预计方法主要有基于随机介质理论的概率积分法和基于实测资料的典型曲线法和剖面函数法<sup>[1-4]</sup>。其中剖面函数法是利用大量的实测资料,建立开采沉陷盆地走向或者倾向主断面方向下沉曲线的数学表达式,其研究

方法属于唯象法<sup>[4-6]</sup>。由于是建立在大量的实测资料基础上,剖面函数法对于特定的矿山具有较好的适用性。目前,代表性的剖面函数主要有负指数函数、双曲正切剖面函数。这些剖面函数虽然比较符合特定的矿山,但对于层状矿体开采而言,用以上剖面函数表达的形式过于复杂,有些参数在实际使用时较难确定<sup>[5-6]</sup>。层状矿体地下开采,采空区大致为规则的矩形,充分采动时的沉陷盆地分布在回采区域的上方,与开采中心左右对称,并远大于开采的范

收稿日期:2009-01-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50674111)

作者简介:曹树刚(1955-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事采矿工程方向的研究,(Tel)023-65111706;

(E-mail) caosg@cqu.edu.cn。

欢迎访问重庆大学期刊社 <http://qks.cqu.edu.cn>

围;主断面上地表的移动和变形量最大;地表沉陷盆地的等值线一般是以采空区中心为对称的椭圆<sup>[1]</sup>。基于以上条件下的开采沉陷盆地的特征,提出了一种新的剖面沉陷曲线的拟合函数。

## 1 主断面拟合曲线

充分采动时,沉陷盆地的主断面上一般取地表下沉量最大点处的地表点为坐标原点, $x$ 轴为煤层的走向, $y$ 轴为煤层的倾向, $z$ 轴为地表最大下沉方向。根据实测资料<sup>[1]</sup>,在主断面上,由最大沉陷点到沉陷盆地的边界,地表的最大下沉量是逐渐递减的。因此,走向主断面上的剖面函数可用最大下沉量乘以某一从最大下沉点向沉陷盆地边界开始衰减的函数,即

$$w(x) = w_m F(x), \quad (1)$$

式中: $w(x)$ 为主断面剖面函数; $F(x)$ 为主断面待定函数; $w_m$ 为主断面最大沉陷量。

当开采煤层倾角较大时,主断面上的下沉曲线不完全对称,可采用分段函数的形式建立主断面下沉预计的剖面函数,即在走向主剖面方向以最大下沉点为界,分别建立前、后下沉曲线的剖面函数,在倾向主剖面方向分别建立上山侧和下山侧的剖面函数。

取走向剖面线上下沉量最大的点为坐标原点,规定走向方向在最大下沉点一侧为坐标轴正方向,则走向剖面下沉函数为

$$w(x) = \begin{cases} w_m F(x_1) & x_1 \geq 0, \\ w_m F(x_2) & x_2 \leq 0. \end{cases} \quad (2)$$

在倾向剖面上以最大下沉点为界,上山方向规定为正方向,下山方向规定为负方向,则上山和下山方向的剖面函数

$$w(y) = \begin{cases} w_m F(y_1) & y_1 \geq 0, \\ w_m F(y_2) & y_2 \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

倾斜煤层矩形工作面开采时,走向主断面地表下沉等值线在最大下沉点两侧基本对称,对称性表现在剖面线中心处下沉量最大,两个边界下沉量为0。由文献<sup>[1]</sup>可知,煤层的倾角越大,对称性越差;倾角越小,对称性越好。取主断面的下沉曲线的数学表达式如下

$$F(x) = (1 - \frac{x^2}{r^2})^k, \quad (4)$$

式中: $r$ 为沉陷影响半径; $k$ 为拟合参数。

当开采缓倾斜煤层,地表下沉曲线在走向和倾向主断面上对称性较好,地表下沉的剖面函数可用式(4)表示。若现场实测主断面上最大沉陷点到边

界点的距离为 $r$ ,则将(4)式代入(1)式就得到主断面的剖面函数表达式

$$w(x) = w_m (1 - \frac{x^2}{r^2})^k, \quad (5)$$

式中: $w_m$ 为剖面线上最大沉陷量; $k$ 为拟合参数。则主断面上倾斜 $i(x)$ 的计算公式为

$$i(x) = \frac{dw(x)}{dx} = -\frac{2kxw_m}{r^2} (1 - \frac{x^2}{r^2})^{k-1}. \quad (6)$$

主断面上曲率 $k(x)$ 的计算公式为

$$k(x) = \frac{d^2w(x)}{dx^2} = \frac{2kw_m}{r^2} (1 - \frac{x^2}{r^2})^{k-1} \left[ \frac{(2k-1)x^2 - r^2}{r^2 - x^2} \right]. \quad (7)$$

令式(7)等于零,计算出

$$x_0 = \begin{cases} \frac{r}{\sqrt{2k-1}}, & x > 0, \\ -\frac{r}{\sqrt{2k-1}}, & x < 0. \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入 $k(x)$ ,得出

$$k(x) = \begin{cases} < 0, & 0 < x < x_0, \\ > 0, & x < x < r, \\ < 0, & -x_0 < x < 0, \\ > 0, & -r < x < -x_0. \end{cases} \quad (9)$$

以上推导及式(9)式表明, $\pm \frac{r}{\sqrt{2k-1}}$ 为主断面上的2个拐点。

主断面水平移动 $U(x)$ 的计算公式为

$$U(x) = -B \frac{2kxw_m}{r^2} (1 - \frac{x^2}{r^2})^{k-1}, \quad (10)$$

式中: $B$ 为水平移动系数,可根据文献<sup>[1]</sup>确定。

当煤层倾角较大时,地表下沉曲线在最大沉陷点两侧对称性较差,则主断面的剖面函数为可用分段函数表达,将式(4)代入式(2)或(3),得到主断面的剖面函数的表达式

$$\begin{cases} w(x_1) = w_m (1 - \frac{x_1^2}{r^2})^{k_1}, & x_1 \geq 0, \\ w(x_2) = w_m (1 - \frac{x_2^2}{r^2})^{k_2}, & x_2 \leq 0. \end{cases} \quad (11)$$

式中: $k_1$ 为最大沉陷点右侧拟合参数; $k_2$ 为最大沉陷点左侧拟合参数。相应的倾斜值、曲率及拐点,可按式(6)~(9)分别求得。

在一定的矿山开采条件下,剖面函数(5)和(11)中参数 $w_m$ 、 $r$ 可以通过实测得到,参数 $k$ 可以利用一定数量的实测数据拟合。对于确定的矿山开采条件,其他参数不变时,随着 $k$ 的变化,剖面曲线形状也发生变化(图1),即当 $k > 0$ 时,随着 $k$ 的增大,曲线越来越陡。因此,对于实际观测的下沉剖面,可以

根据实测数据拟合出适合的下沉曲线(图 1)。

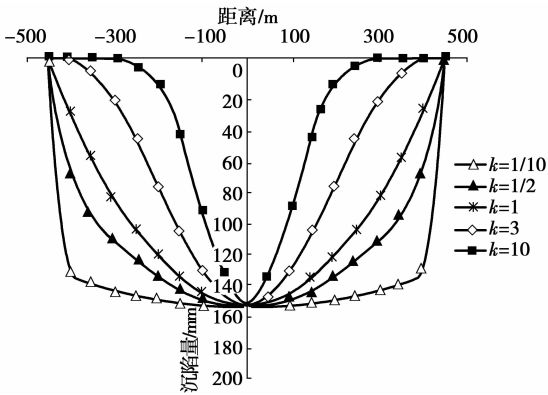


图 1 不同的  $k$  对应的剖面函数曲线示意图

在实际使用时,  $k$  可以用最小二乘或用以下方法拟合确定。通过以采空区中心正上方中点的走向和倾向主断面上的任意测点  $i(x_i, y_i)$ , 测得的沉陷量表示为  $w(x_i)$ , 根据式(5)可反算出

$$k_i = \frac{\lg w(x_i) - \lg w_m}{\lg(1 - \frac{x_i^2}{r^2})}, \quad (12)$$

其中:  $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

利用  $n$  个测点的沉陷量及到中心点的距离  $x$ , 由式(12)依次求得  $k_i$ , 然后进行算术平均

$$k = \frac{k_1 + k_2 + \dots + k_n}{n}. \quad (13)$$

式(5)中  $r$  在实测中根据沉陷为 0 或者小于 10 mm 的边界点到中心点的长度可以确定  $r$  和  $k$  [2], 也可以在取得边界角的条件下计算得到 [1-2]。

$$r = \frac{L_1}{2} + H \cos \delta_0, \quad (14)$$

式中:  $L_1$  为采空区走向或者倾向长度;  $H$  为最大采深;  $\delta_0$  为边界角。

以上参数可根据实测确定。式(5)中  $w_m$  为最大下沉量, 可实测得到, 或者用经验公式求得。经验公式有多种, 其中如下的经验公式被实践证明适用于中国多数煤田 [1]

$$w_m = mq \cos a, \quad (15)$$

其中:  $m$  为煤层的厚度;  $q$  为下沉系数, 可根据实测计算确定;  $a$  为煤层倾角。

## 2 实例验证

铁山南煤矿 25 号煤层平均厚度为 0.55 m, 倾角为  $30^\circ \sim 46^\circ$ , 上覆岩层平均厚度为 185 m, 采用走向长壁法开采, 工作面走向长度为 366 m, 倾向长度为 70 m; 在该采区上部地表分别布置一条走

向和倾向观测线, 走向观测线观测点间距 50 m, 倾向观测线观测点间距 40 m, 先后进行了 12 次观测, 观测范围内地表较平坦, 观测数据来源于文献 [15]。因该煤层的倾角较大, 走向和倾斜方向主断面的下沉曲线对称性较差。因此, 利用前面的有关公式, 以最大下沉点为中心, 以沉陷基本稳定时的实测数据分别建立了走向左、右侧走向主断面拟合函数, 见式(16), 和倾向上、下山方向拟合函数, 见式(17)。实测结果和预测结果的对比分别见图 2 和 3。走向和倾向沉陷量的计算值和实测值分别见表 1 和 2。

由表 1 和 2 可知, 走向主断面上实测值与计算值的最大误差为 25.7 mm, 说明在走向主断面上最大下沉点中心左、右侧分别建立的两个拟合函数的计算值与实测值吻合较好; 倾向主断面上实测值与计算值的最大误差为 41.9 mm, 在倾向上山侧方向的预测值与实测值吻合较好, 但下山方向的实测值与预测值有一定的差别, 这是因为地形的影响。由相关文献 [1-2] 可知, 在开采沉陷观测中将观测值小于等于 10 mm 的点视为 0 点, 由此可知, 的拟合曲线计算值与实测值误差较小, 精度较高。

由(8)式计算出在走向剖面线上 2 个拐点分别在离最大沉陷点 209.8 和 -237.2 m 处; 在倾向剖面线上 2 个拐点分别在离最大沉陷点 107.3 和 -93.5 m 处。

$$\left. \begin{aligned} w(x_1) &= 154.6 \left(1 - \frac{x_1^2}{450^2}\right)^{2.8}, & x_1 \geq 0, \\ w(x_2) &= 154.6 \left(1 - \frac{x_2^2}{450^2}\right)^{2.3}, & x_2 \leq 0, \end{aligned} \right\} (16)$$

$$\left. \begin{aligned} w(y_1) &= 155.7 \left(1 - \frac{y_1^2}{450^2}\right)^{9.3}, & y_1 \geq 0, \\ w(y_2) &= 155.7 \left(1 - \frac{y_2^2}{350^2}\right)^{7.5}, & y_2 \leq 0. \end{aligned} \right\} (17)$$

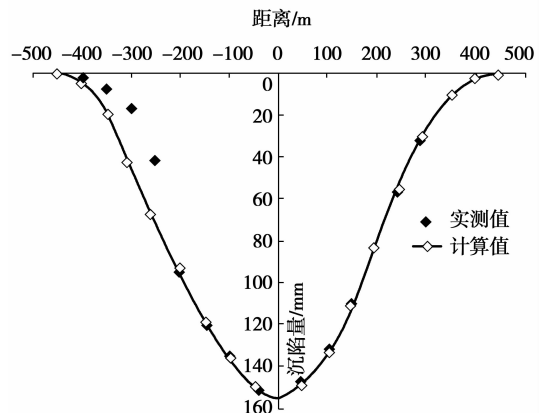


图 2 走向主断面实测及拟合曲线图

表1 走向主断面实测与预测数据对照表

走向坐标/m	实测值/mm	计算值/mm	绝对误差/mm
450	0	0	0
400	3.5	2.0	1.5
350	10.4	11.5	1.1
300	34.7	29.8	4.9
250	57.5	55.0	2.5
200	83.7	83.5	0.2
150	108.9	111.2	2.3
100	131.8	134.2	2.4
50	147.9	149.3	1.0
0	154.6	154.6	0
-50	152.6	150.2	2.4
-100	135.1	137.6	2.5
-150	120.9	117.9	3.0
-200	95.0	93.2	1.8
-250	40.4	66.1	25.7
-300	15.1	40.0	11.7
-350	6.6	18.3	2.4
-400	1.9	4.3	0.6
-450	0.6	0	0

续表2

倾向坐标/m	实测量/mm	计算量/mm	绝对误差/mm
400	2.4	0	2.4
200	19.6	20.0	0.4
150	48.8	52.0	3.2
100	112.3	97.0	15.3
50	151.6	139.0	12.6
0	155.7	155.7	0
-50	128.3	141.8	13.5
-100	96.4	106.5	10.1
-150	69.7	64.4	5.3
-200	48.4	29.9	18.5
-250	44.8	9.8	35.0
-300	43.8	1.9	41.9
-350	12.0	0	12.0

### 3 结 论

1)分析了缓倾斜层状矿体充分采动时的沉陷盆地在倾向和走向的特征,以观测剖面线上沉陷量最大的点为坐标原点,建立了一种新的剖面曲线的拟合函数,该函数比常用的负指数函数、双曲函数等类型的剖面函数具有表达形式简单、参数容易取得,且在观测数据充分时坐标原点容易确定等优点。

2)建立的剖面拟合函数也适用于倾角较大的层状矿体开采造成的地表的沉陷,即可用分段函数的形式分别建立沉陷量最大点两侧的分段拟合。

3)矿山沉陷观测实例证明了提出的拟合曲线模型具有实用性,可在实际沉陷观测研究中采用。

4)当地形比较平坦的矿区的实测数据较多时,采用拟合公式进行地表沉陷拟合研究,拟合精度较高,而对于地形高程变化较大的矿区,垂直方向的地表沉陷量变化大,不适合采用文中的公式对地表沉陷曲线进行拟合。

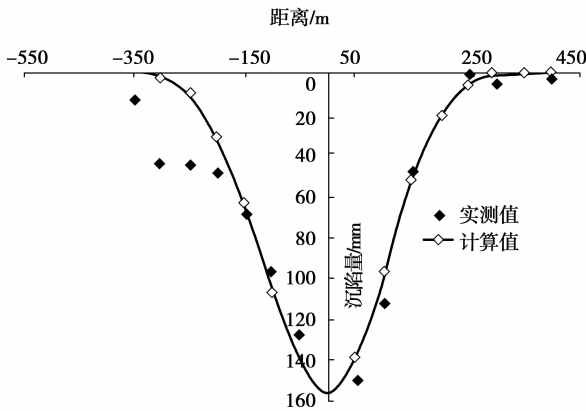


图3 倾向主断面实测值及拟合曲线图

表2 倾斜主断面实测与预测数据对照表

倾向坐标/m	实测量/mm	计算量/mm	绝对误差/mm
400	2.4	0	2.4
350	1.1	0	1.1
300	4.6	0.7	3.9
250	1.6	5.0	3.4

#### 参考文献:

[1] 何国清,杨伦,凌赓娣,等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1991.  
 [2] 沈光寒,李白英,吴戈,等. 矿井特殊开采的理论与实践[M]. 北京:煤炭工业出版社,1992.  
 [3] 夏玉成,孙学阳,汤伏全. 煤矿区构造控灾机理及地质环境承载能力研究[M]. 北京:科学出版社,2008.  
 [4] 梅松华,盛谦,李文秀,等. 地表及岩体研究进展[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(增1):4535-4538.

- MEI SONG-HUA, SHENG QIAN, LI WEN-XIU, et al. Research advances in surface and rock-mass movement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(sup1): 4536-4538.
- [5] SINGH R O, YADAV R N. Prediction of subsidence due to coal mining in Raniganj coalfield, West Bengal, India [J]. Engineering Geology, 1995, 39 (1/2): 103-111.
- [6] AMBROZIC T, TURK G. Prediction of subsidence due to underground mining by artificial neural networks [J]. Computers & Geosciences, 2003, 29 (5): 627-637.
- [7] 郝延锦, 吴立新, 戴华阳, 等. 用弹性板理论建立地表沉降预计模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 2958-2961.
- HAO YAN-JIN, WU LI-XIN, DAI HUANG-YANG, et al. Establishing a ground settlement prediction model with elastic slab theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (sup1): 2958-2961.
- [8] 薛守义. 弹性力学[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2005.
- [9] 郝延锦, 戴华阳, 周文国, 等. 大采深全断面地表沉降预测模型[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 25(4): 494-497.
- HAOYAN-JIN, DAI HUANG-YANG, ZHOU WEN-GUO, et al. Study ground subsidence prediction model for full section and deep mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 25(4), 494-497.
- [10] 徐阳, 杨兴云. 空间解析几何及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006
- [11] 谢飞鸿, 王锦山, 尹伯悦, 等. 开挖沉陷地表变形可视化计算分析系统研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1202-1206.
- XIE FEI-HONG, WANG JIN-SHAN, YIN BO-YUE, et al. A visual calculation analysis and evaluation system for mining induced surface subsidence [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7): 1202-1206.
- [12] 陈大才, 王容生, 邓学举, 等. 喻家碛矿区地表移动规律分析[J]. 煤矿开采, 1999, 37(4): 62-64.
- CHEN DA-CAI, WANG RONG-SHENG, DENG XUE-JU, et al. The law of the ground movement of Yujiabian coal mine [J]. Journal of coal mining, 1999, 37(4): 62-64
- [13] 曹树刚, 刘延保, 黄昌文, 等. 近水平煤层开采地表移动规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1), 74-77.
- CAO SHU-GANG, LIU YAN-BAO, HUANG CHANG-WEN, et al. Study into the rule of surface movement in flat seam exploitation [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1), 74-77.
- [14] 刘玉成, 曹树刚, 刘延保. 缓倾斜煤层矩形采空区地表沉陷盆地模型[J]. 中国矿业, 2008, 17(6) 73-76.
- LIU YU-CHENG, CAOSHU-GANG, LIU YAN-BAO. The subsidence basin model under rectangular goaf due to mining gentle-inclined coal seam [J]. Journal of China Mining Magazine, 2008, 17(6) 73-76.
- [15] 杨守国. 矿山地表移动预计系统及其在铁山南煤矿中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.

(编辑 赵静)

(上接第 797 页)

- [12] 宋燎原, 王平, 张海峰, 等. 静态电磁场边值问题计算方法[J]. 大学物理, 2007, 16(8): 23-26.
- SONG LIAO-YUAN, WANG PING, ZHANG HAI-FENG, et al. Analysis methods of static electromagnetic field problems [J]. College Physics, 2007, 16(8): 23-26.
- [13] SUN M, WESSEL B L, ROCHE P A, et al. Computer simulation of volume conduction based data communication channel for neuroprosthetic devices [C] // 2nd International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering, March 16-19, 2005, New York, USA. [S. l.]: IEEE, 2005: 426-429.
- [14] ROSELL J, COLOMINAS J, PERERI U, et al. Skin impedance from 1 Hz to 1 MHz [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1998, 35(8): 649-652.
- [15] ISRAEL Z C, AGUST M E, CARLOS A S. Measurement of skin-electrode impedance for a 12-lead electrocardiogram [C] // 2005 2nd International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Sep 7-9, 2005, Mexico City, Mexico. [S. l.]: IEEE, 2005: 193-195.
- [16] SCANLON W G, BURNS J B, EVANS N E. Radiowave propagation from a tissue-implanted source at 418 MHz and 916.5 MHz [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2000, 47(4): 527-534.

(编辑 李胜春)