

文章编号: 1673-3363-(2013)01-0107-05

山区采动滑移模型的统一预测参数研究

韩奎峰^{1,2}, 康建荣², 王正帅², 吴侃¹, 张蒙²

(1. 中国矿业大学国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 江苏师范大学测绘学院, 江苏 徐州 221116)

摘要 针对山区滑移模型预测参数选取困难的问题, 提出了山区滑移模型统一预测参数的求解方案。在收集、分析山西省主要矿区 14 个具有代表性的地表移动观测站数据的基础上, 将山区采动滑移模型预测参数和相同地质采矿条件下的概率积分法最大下沉预测值作为控制向量, 以最大下沉实测值作为输出向量, 采用最小二乘非线性拟合优化算法求解, 得到了统一预测参数($A=7.63$, $P=1.60$, $t=3.40$)。实例分析结果表明, 应用统一预测参数进行山区开采沉陷预计得到的下沉、水平移动预测值的平均相对误差分别为 9% 和 21%, 满足工程精度要求。

关键词 山区; 开采沉陷; 地表移动观测站; 概率积分法; 地表滑移预测模型; 统一参数

中图分类号 TD 327

文献标志码 A

Uniform prediction parameters for ground movement model in mountain area caused by coal mining

HAN Kui-feng^{1,2}, KANG Jian-rong², WANG Zheng-shuai², WU Kan¹, ZHANG Meng²

(1. Key Laboratory for Land Environment and Disaster Monitoring for SBSM,

China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. School of Geodesy & Geomatics, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract In this paper, in view of the difficulty to choose prediction parameters of ground movement model in mountain area caused by coal mining, the solution scheme of the uniform prediction parameters for ground movement model were put forward. After collecting and analyzing the ground movement data of 14 representative observation stations in Shanxi Province, then considering the uniform prediction parameters of the model and the maximum subsidence values predicted by probability integral method as the control vector, and the maximum measured subsidence values as the output vector, the uniform prediction parameters were finally obtained, that is, $A=7.63$, $P=1.60$, and $t=3.40$, by using least squares nonlinear fitting optimization algorithm. The example analysis results show that the average relative errors of the predicted subsidence values and horizontal movement values were 9% and 21%, respectively, when using the uniform prediction parameters, which can meet the demands of engineering precision.

Key words mountain area; mining subsidence; ground movement observation station; probability integral method; ground movement prediction model; uniform parameter

收稿日期: 2012-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51074139); 国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室开放基金项目(LED2011B10); 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 韩奎峰(1975-), 男, 山东省夏津县人, 博士, 讲师, 从事山区开采沉陷预计及防治方面的研究。

E-mail: hkfougao@126.com

Tel: 0516-83536832

我国有三分之一的煤矿位于山区,山区煤矿开采引起了地表塌陷、山体滑坡、水土流失和地下水位下降等负面效应。随着国家对矿区环境治理力度的加大,山区煤矿塌陷区治理工作也逐渐受到重视。矿区开采沉陷预计工作是山区煤矿塌陷区环境治理的关键环节,1985年,何万龙和康建荣教授^[1]首先构建了可以付诸应用的山区地表移动变形预计模型。目前,基于实测数据的参数反演方法包括最小二乘方法、曲线拟合法、空间问题求参法、正交试验设计求参法、模矢法、支持向量机的方法等^[2-4]。上述方法得到的滑移预测模型参数只适用于一个煤矿或者一个工作面,并不具有普适性。按工程类比法确定的参数主要依赖于专家经验,具有较大的随意性。而如果利用先进的数学方法和计算机技术以求解山区滑移模型中数学和地质采矿背景不明确的参数值,则可以为山区滑移量预计提供方便,且所求参数也有着较好的可移植性。

1 山区沉降预计模型及参数分析

1.1 山区沉降预计模型

山区滑移预测模型^[5]是根据采动滑移机理、滑移移动变形关系以及滑移向量分析,并结合大量实测数据综合分析得来的,包含5个地表移动变形指标预计模型,分别是下沉、水平移动、倾斜、曲率和水平变形值预计模型。根据工程经验,下沉值是分析、考量地表移动变形特征最重要的指标,本文从下沉值预计模型入手开展研究。下沉值预计模型根据叠加原理而建立,包含2部分,其中一部分是类似地质采矿条件下平地开采沉陷下沉预计值,另一部分是山区采动引起的地表滑移下沉预计值。山区采动引起的下沉值预计模型如下:

$$W'(x, y) = W(x, y) + D_{x,y} \left\{ P(x) \cos^2 \phi + P(y) \sin^2 \phi + P(x) P(y) \sin^2 \phi \cos^2 \phi \tan^2 \alpha'_{x,y} \right\} W(x, y) \tan^2 \alpha'_{x,y} \quad (1)$$

其中:

$$P(x) = 1 + A \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{r} + P\right)^2\right] + W_m \exp\left[-t\left(\frac{x}{r} + P\right)^2\right] \quad (2)$$

$$P(y) = 1 + A \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{r} + P\right)^2\right] + W_m \exp\left[-t\left(\frac{y}{r} + P\right)^2\right] \quad (3)$$

式(1)~(3)中, $W'(x, y)$ 为点 (x, y) 的山区采动地表开采下沉预计值; $W(x, y)$ 为相同地质采矿条件下平地下沉预计值; $D_{x,y}$ 为山区地表特性系数; ϕ 为山区地表点的倾斜方位角(以预计坐标系为基准); x, y

为地面点在预计坐标系中坐标; r 为开采影响半径; $\alpha'_{x,y}$ 为地表预计点处的坡度; W_m 为相同地质采矿条件下平地预计最大下沉值; A, P 和 t 为滑移影响函数参数。

1.2 预计模型参数分析

由式(1)~(3)并结合《规程》可知,该模型中平地概率积分法预计模型部分共有8个参数: $q, b, \tan\beta, \theta, S_{上}, S_{下}, S_{左}, S_{右}$, 每个参数都具有明确的数学或者地质采矿含义;滑移预计模型部分也有8个参数: $D_{x,y}, \phi, x/r, y/r, \alpha'_{x,y}, A, P$ 和 t , 其中 x/r 和 y/r 用于确定地面点相对于工作面的位置。我国在各矿区建立了约2 000个地表移动观测站,得到了大量的观测数据,《规程》中给出了各个矿区的平地概率积分法预计模型参数的经验公式和参考取值,在山区开采沉陷预计时可以参照选用。滑移预计模型中的 $D_{x,y}, \phi, x/r, y/r$ 和 $\alpha'_{x,y}$ 等5个参数称为地面点的地表特性参数,具有明确的数学或地质采矿意义,开采沉陷预计时,可以获得准确参数值; A, P 和 t 等3个参数称为滑移模型函数参数,需要在建模前来配置,无明确的数学和地质采矿意义,《规程》只给出了取值范围,分别为 $[2\pi, 5\pi], [0.5, 2]$ 和 $[\pi, 15\pi]$, 在具体应用时,只能在给定的取值区间内凭经验选定,致使山区滑移预计工作具有一定的盲目性和随意性^[6]。

根据分析可知,山区开采沉陷下沉值预计模型是一个较复杂的模型,其16个预计参数中,有13个参数具有明确的数学和地质采矿背景,在开采沉陷预计工作中,可以根据实际地质、采矿条件准确给出。而另外3个参数只能凭经验给出。

2 山区采动滑移模型统一预测参数的求解

2.1 最小二乘非线性拟合优化算法

目前模型求参普遍采用最小二乘拟合的方法,并且能够取得令人满意的结果^[7-8],《规程》规定计算滑移预测模型参数采用最小二乘拟合方法。最小二乘拟合算法的数学模型如下

$$\min \frac{1}{2} \|F(x, xdata) - ydata\|_2^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [F(x, xdata) - ydata_i]^2$$

$$\text{S.T. } V_1 \leq x \leq V_2 \quad (4)$$

其中, $xdata$ 和 $ydata$ 是输入、输出向量,且二

者之间的关系为： $ydata=F(x,xdata)$ ， V_1 和 V_2 是输入向量的区间上下界向量。用(4)式所述算法就可以得到符合 V_1 和 V_2 约束的输入向量的优化解。Matlab 是目前通用的数学计算工具软件之一，它提供了丰富的拟合、优化计算函数，本研究拟利用 Matlab 编写计算程序完成含区间参数的山区采动滑移模型统一预测参数向量的求解工作^[9-12]。

2.2 山区采动滑移模型统一预测参数求解模型

山西省有阳泉、西山等多个山区矿区，各矿区建立了大量的地表移动观测站，取得了丰富的观测成果，为本研究提供了坚实的数据基础。为求得山区采动滑移模型统一预测参数，本文选择了具有典

型意义的 14 个地表移动观测站的观测成果作为基础展开研究，这些观测站在地质采矿条件、山区地表地形及覆岩和第四系属性条件等方面均具有代表性，基本涵盖了影响山西省山区煤矿开采地表移动的多个因素的各种情况。将 14 个观测站的部分成果进行归纳汇总，见表 1，其中第 2 列为观测站名称，第 3~7 列为滑移模型参数(不包含 A 、 P 和 t 3 个参数)。根据《规程》中提供的概率积分法预计参数进行了相同地质采矿条件下平地的开采沉陷预计，得到 14 个观测站平地最大下沉预测值(不包含地表滑移引起的下沉量)，列入表 1 的第 9 列。

表 1 14 个山区观测站参数及数据处理结果
Table 1 14 Parameters and data processing results of the observation stations

序号	观测站	观测站滑移参数					最大下沉量/mm	
		$\alpha'_{x,y}/(^{\circ})$	$D_{x,y}$	$\varphi(^{\circ})$	x/r	y/r	实测值	平地预计值
1	西曲 12209	10~30	-0.2~+1.0	0~360	0~15	0~5	2860	2530
2	西曲 22101	0~6	-0.1~+0.3	0~360	0~15	0~5	1893	1806
3	西铭 32814	10~25	-0.4~+1.5	0~360	0~15	0~5	847	969
4	镇城底 12105	3~25	-0.2~+0.6	0~360	0~15	0~5	1537	1678
5	镇城底 12101	10~30	-0.3~+1.0	0~360	0~15	0~5	2272	2121
6	官地 42203	10~25	-0.2~+0.6	0~360	0~15	0~5	1241	658
7	嘉乐泉 1208~10	7~40	-0.2~+0.6	0~360	0~15	0~5	2769	1753
8	西铭 32903	10~30	-0.3~+1.0	0~360	0~15	0~5	849	951
9	阳三矿 721001	16~16	-0.1~+0.3	0~360	0~15	0~5	1096	936
10	阳泉二矿 40201	10~20	-0.3~+1.0	0~360	0~15	0~5	1645	1205
11	阳泉四矿 4187C	15~40	-0.4~+1.5	0~360	0~15	0~5	1577	1370
12	阳泉四矿 4187A	20~30	-0.4~+1.5	0~360	0~15	0~5	983	1048
13	阳泉 109A	10~26	-0.3~+1.0	0~360	0~15	0~5	1131	1062
14	阳吴家掌 A 线	10~30	-0.2~+0.6	0~360	0~15	0~5	1204	969

根据表 1 中的第 8 列和第 9 列数据可知，每个观测站的最大下沉实测值相比平地最大下沉预测值相差约 10%，说明了山区滑移预计的必要性。观测站的下沉值均采用水准测量进行观测，精度高，经常把它作为分析开采沉陷规律的最重要的数据，在平地概率积分法求参工作中一般采用下沉值来求取预计参数。观测站的最大下沉值是开采沉陷对地表影响程度的重要表征，它是多个影响开采沉陷的因素对地表移动产生影响结果的集中反映。利用多个观测站的最大下沉值作为分析对象，可以实现对这些观测站影响开采沉陷的多个因素的高度抽象，从而得到更为一般的结论。如果用最大下沉值作为分析对象，用式(1)~(3)作为目标函数，用式(4)作为求解算法，就会造成目标函数中部分参数变成

区间参数，比如 $D_{x,y}$ 、 φ 、 x/r 、 y/r 、 $\alpha'_{x,y}$ 、 A 、 P 和 t 就有各自的取值区间，还有一部分参数不属于区间参数，比如概率积分法预计模型中的 q 、 b 、 $\tan\beta$ 、 θ 、 $S_{上}$ 、 $S_{下}$ 、 $S_{左}$ 、 $S_{右}$ 。表 1 中根据各个观测站的实际情况列出了部分区间参数的取值范围， A 、 P 和 t 的取值区间上文已列出。本文利用含区间参数的最小二乘非线性拟合优化算法可以满足本研究的需要。

综上，本研究所采用优化算法的输入向量 $xdata$ 共选定了 8 个区间参数和 1 个常数项，8 个区间参数分别为 x_1 ：地表特征系数 $D_{x,y}$ ； x_2 ：地面点倾斜方向角 φ ； x_3 ：参数 A ； x_4 ：参数 P ； x_5 ： x/r ； x_6 ：参数 t ； x_7 ： y/r ； x_8 ：地形趋势面倾角 $\alpha'_{x,y}$ ； x_9 ：常数项，为最大下沉平地概率积分法预计值。输出向

量 $ydata$ 为各观测站最大下沉实测值。这些参数的区间范围根据表 1 和《规程》设置如下, 见表 2。

表 2 参数区间值
Table 2 Interval value of the parameters

参数	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
区间	$[-0.5, 1.5]$	$[0, 360]$	$[2\pi, 5\pi]$	$[0.5, 2]$	$[0, 15]$	$[\pi, 15\pi]$	$[0, 5]$	$[0, 40]$

2.3 Matlab 计算程序及参数计算

根据输入、输出向量的定义和《规程》提供的滑移下沉量预计模型如式(1)~(3)以及式(4)的算法, 在 Matlab 环境下编写含区间参数的最小二乘非线性拟合优化求解程序。程序流程图见图 1。

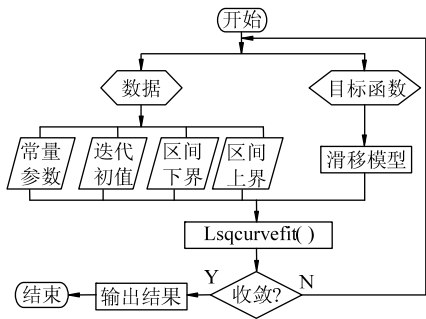


图 1 Matlab 程序流程图
Fig.1 Flow chart of the Matlab program

根据 Matlab 程序计算要求, 首先生成 4 个向量, 第 1 个是常量参数向量, 根据上文论述, 此向量等于 $W(x,y)-W'(x,y)$, 即表 1 中第 9 列和第 8 列数据之差; 第 2 个是迭代初值向量, $x_1, x_2, x_5, x_7, x_8(D_{x,y}, \varphi, x/r, y/r, \alpha'_{x,y})$ 分别取表 2 所列区间中间值, A, P 和 t 按照《规程》给定的初值取值; 第 3 个和第 4 个向量分别为区间参数的区间下、上界, 按照表 2 所列区间进行取值。将滑移模型函数作为优化计算目标函数, 读入上述 4 个向量值, 设置合适的收敛判断条件, 本文收敛容许误差取 1×10^{-10} , 收敛允许误差判断次数取 1 000, 执行优化计算程序, 即可得到滑移模型预计参数的优化解。经计算, 迭代步数为 450 时算法收敛, 得到了参数向量的优化结果, 见表 3。

表 3 参数计算结果
Table 3 Calculation results of the parameters

参数	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
结果	0.05	201.63	7.63	1.60	13.80	3.40	2.25	33.61

表 3 中所列区间参数均得到一个优化计算结果, 根据上文分析, 其中 A, P 和 $t(x_3, x_4$ 和 $x_6)$ 3 个参数值在山西省山区煤矿滑移预计时具有普适

性和可移植性, 避免了取值的盲目性。为符合具体工作面的个体差异, 保证预计精度, 其余滑移预计模型参数在选择时根据开采工作面的实际地质采矿条件选定, 无需采用表 3 中的计算结果。这样山区开采沉陷滑移预计模型就得到了完善, 为参数合理选取提供了科学依据, 提高了工作效率。

3 验证算例

根据研究目标, 本研究成果必须满足内符合和外符合精度要求。根据上文, 参数计算结果满足内符合精度要求。外符合精度是考察参数计算结果的外延性指标, 即所得 A, P 和 t 这 3 个参数在除样本工作面之外的工作面进行开采沉陷预计时仍能取得令人满意的预计精度。为验证 A, P 和 t 这 3 个参数的外符合精度是否满足要求, 选择某矿一个工作面的观测站 A 线为例进行验证。该工作面属典型的山区开采。

工作面倾角 9° , 走向长度为 750 m, 倾向长度 180~240 m, 采深为 60~150 m, 平均采深 120 m, 平均煤厚为 3 m。观测站 A 线有 20 个观测点, 观测数据完备, 经过数据处理, 得到了每个点的最终下沉观测值, 并且根据地表特性和地形条件提取了 $D_{x,y}, \varphi$ 和 $\alpha'_{x,y}$ 3 个参数的值, 主要影响半径 r 的大小参考《规程》, 工作面尺寸根据采掘工程平面图得到。

概率积分法预计参数参考《规程》; 滑移模型的 A, P 和 t 参数: $A=7.63, P=1.60, t=3.40$ 。经预计得到了 A 线 20 个观测点的下沉和水平移动预计值, 图 2 是实测值和预计值的对照图。

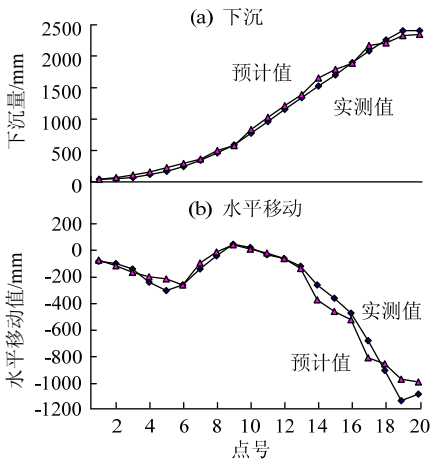


图 2 实测值和预计值对比图
Fig.2 Comparison between measured values and prediction values of subsidence and horizontal movement

从图2中看出下沉值和水平移动值预计结果和实测结果符合较好。按照工程经验, 山区地表移动预计的下沉和水平移动误差应在10%~20%^[1]。即

$$|\Delta w_i|/|w_i'| \leq 0.1; |\Delta u_i|/|u_i'| \leq 0.2 \quad (5)$$

根据观测实测值和预计值及(5)式计算出的 $|\Delta w_i|/|w_i'|$ 和 $|\Delta u_i|/|u_i'|$, 分别进行统计分析, $|\Delta w_i|/|w_i'|$ 的最大值为0.34, 最小值为0, 平均值为0.09, 只有5个点的预测数据超限, 75%的预测结果符合精度要求, 且5个超限点位于下沉曲线拐点附近, 符合概率积分法预计特点, 总体精度满意; 另外, $|\Delta u_i|/|u_i'|$ 的最大值为0.70, 最小值为0, 平均值为0.21, 有6个点的预测数据超限, 70%的预测结果符合精度要求, 水平移动预测结果略高于误差要求, 总体精度较高。应用实例表明, 用本研究获得的山区采动滑移模型统一预测参数开展预计工作, 精度满足要求。

4 结 论

1) 基于山西省14个典型山区煤矿地表移动变形观测站的地质采矿条件、实测沉降值及概率积分法沉降预计值, 建立了山区采动滑移模型统一预测参数(A , P 和 t)的非线性优化模型, 其优化结果为: $A=7.63$, $P=1.60$, $t=3.40$ 。

2) 实例分析表明, A , P 和 t 满足内、外符合精度要求, 下沉、水平移动预测值平均相对精度为9%和21%, 满足工程精度要求, 具有较高实用价值。

3) 本研所得到的山区地表滑移模型统一预测参数值具有科学性和普适性, 拓展了《规程》给出的山区开采沉陷预计模型的应用范围, 可广泛应用于山西省主要矿区。本研究所采用求取地表滑移模型预测参数的方法在其它山区矿区具借鉴意义。

参考文献:

- [1] 康建荣, 何万龙, 胡海峰. 山区采动地表变形及坡体稳定性分析[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002: 42-64.
- [2] 李春意, 崔希民, 何荣, 等. 开采沉陷预计中三维空间曲面拟合参数的研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 420-424.
LI Chun-yi, CUI Xi-min, HE Rong, et al. Research on fitting parameters of 3D surface in mining subsidence prediction[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 420-424.
- [3] 葛家新. 地表沉陷预计参数求取及其分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2004, 21(1): 78-82.
- [4] GE Jia-xin. Getting and analyzing of parameters for ground subsidence prediction[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2004, 21(1): 78-82.
- [5] 韩奎峰, 武娟, 冯遵德. EXCEL 计算概率积分法预计参数[J]. 测绘科学, 2011, 36(6): 250-252.
- [6] HAN Kui-feng, WU Juan, FENG Zun-de. Calculate predicted parameters of probability integral method using EXCEL[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(6): 250-252.
- [7] 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: 112-130.
- [8] 蓝航, 张华兴, 姚建国, 等. 山区地表采动沉陷预计的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 912-916.
- [9] LAN Hang, ZHANG Hua-xing, YAO Jian-guo, et al. Numerical simulation of mining subsidence predict of mountain surface[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(9): 912-916.
- [10] ZHU Li-min, DING Han. A uniform approach for least-squares surface fitting[J]. Science in China, 2004(Supp): 72-78.
- [11] 王正帅, 邓喀中. 概率积分法参数辨识的多尺度核偏最小二乘回归方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊): 3863-3870.
- [12] WANG Zheng-shuai, DENG Ka-zhong. Parameters identification of probability-integral method based on multi-scale kernel partial least-squares regression method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Supp): 3863-3870.
- [13] 李培现, 谭志祥, 齐公玉, 等. 基于 MATLAB 的开采沉陷预计系统[J]. 中国矿业, 2008, 17(11): 72-75.
- [14] LI Pei-xian, TAN Zhi-xiang, QI Gong-yu, et al. Mining subsidence prediction system based on MATLAB[J]. China Mining Magazine, 2008, 17(11): 72-75.
- [15] 吴戈. 曲线拟合法解算采矿下沉参数的精度及参数可识别程度的分析[J]. 阜新矿业学院学报: 自然科学版, 1995, 7, 14(3): 22-25.
- [16] WU Ge. The precision of curve fitting method and identifiability of parameters[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 1995, 14(3): 22-25.
- [17] 史贤俊, 廖剑, 马长李, 等. 基于 MATLAB 的广义最小二乘参数辨识与仿真[J]. 计算机与数字工程, 2009, 238: 173-175.
- [18] SHI Xian-jun, LIAO Jian, MA Chang-li, et al. GLS parameter identification and simulation based on Matlab [J]. Computer & Digital Engineering, 2009, 238: 173-175.
- [19] 欧阳明松, 徐连民. 基于 MATLAB 的试验数据拟合[J]. 南昌工程学院学报, 2010, 29(4): 24-28.
- [20] OUYANG Ming-song, XU Lian-min. Fitting method of test data based on Matlab[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2010, 29(4): 24-28.