

文章编号:1671-251X(2015)06-0010-04

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.06.003

贾新果.基于蚁群算法的开采沉陷计算参数反演[J].工矿自动化,2015,41(6):10-13.

# 基于蚁群算法的开采沉陷计算参数反演

贾新果<sup>1,2,3</sup>

(1.煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院,北京 100013;2.煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;3.北京市煤矿安全工程技术研究中心,北京 100013)

**摘要:**针对开采沉陷计算参数反演方法存在早熟收敛现象、容易陷入局部最优解的问题,提出将蚁群算法运用于开采沉陷计算参数反演:首先对反演参数的搜索空间进行离散,将参数反演问题转化为组合优化问题,然后建立了基于最大-最小蚁群算法的概率积分法计算参数反演流程。应用实例表明,蚁群算法对观测站测点缺失具有较强的抗干扰能力,较最小二乘法和模矢法有较好的拟合效果。

**关键词:**开采沉陷;参数反演;蚁群算法;概率积分法

中图分类号:TD327

文献标志码:A

网络出版时间:2015-05-29 12:23

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20150529.1223.003.html>

Calculation parameters inversion of mining subsidence based on ant colony algorithm

JIA Xinguo<sup>1,2,3</sup>

(1.Mine Safety Technology Branch,CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;  
2.State Key Laboratory of Coal Resource High Efficient Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 3.Beijing Mine Safety Engineering Technology Research Center, Beijing 100013, China)

**Abstract:**For problems of premature convergence and easily fall into local optimal solution existed in inversion method of calculation parameters of mining subsidence, ant colony algorithm was applied to calculation parameters inversion of mining subsidence. Firstly, search space of inversion parameter is discretized, thus parameter inversion problem is transformed into combination optimization problem, and then flow of calculation parameters inversion of probability integral method based on max-min ant colony algorithm is established. Application results show that the ant colony algorithm has strong anti-interference ability for missing data of measuring points, which has better fitting effect than least square method and pattern search method.

**Key words:**mining subsidence; parameter inversion; ant colony algorithm; probability integral method

## 0 引言

为提高沉陷计算的准确性,一些学者对开采沉陷计算参数与地质采矿条件(如开采方法、覆岩岩性、结构、矿层倾角、采动程度、冲积层厚度等)之间的定性、定量关系进行了大量研究<sup>[1-8]</sup>。然而受设备、成本等方面的制约,对开采沉陷计算参数进行准

确测量十分困难,使得计算参数值往往与实际值相差很大。因此,利用观测站实测资料,对开采沉陷计算参数进行反演,已越来越受到研究者重视。目前,开采沉陷计算参数反演方法主要有特征点求参、曲线拟合求参、空间问题求参、正交试验设计法求参、最小二乘法求参<sup>[1]</sup>、模矢法求参<sup>[1]</sup>和遗传算法求参<sup>[8]</sup>等,但这些方法一般存在早熟收敛现象,容易陷

收稿日期:2015-04-10;修回日期:2015-05-19;责任编辑:盛男。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51404139)。

作者简介:贾新果(1980—),男,河北邢台人,助理研究员,硕士,主要从事矿山开采沉陷损害与综合防治技术研究方面的工作,E-mail:jia\_xinguo@163.com。

入局部最优解。蚁群算法<sup>[9]</sup>属于随机类搜索算法,是一种具有正反馈、自组织、较强鲁棒性和本质上并行等特点的算法。本文将蚁群算法引入开采沉陷计算参数反演领域,以矿区开采沉陷计算方法中应用较为广泛的概率积分法<sup>[10-11]</sup>为例,给出了基于蚁群算法的概率积分法计算参数反演的具体实现,并通过应用实例验证了其可行性和有效性。

## 1 基于蚁群算法的概率积分法求参

### 1.1 问题描述

常用的开采沉陷计算参数位移反分析计算模型为

$$\begin{cases} [\mathbf{K}]\{A\} = \{F\} \\ \min T(\mathbf{P}) = \sum_{d=1}^M [W_d(\mathbf{P}) - W'_d]^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $[\mathbf{K}]$  为与开采沉陷计算参数相关的刚度矩阵;  $\{A\}$  为测点下沉值或水平移动值列阵;  $\{F\}$  为测点等效下沉值或水平移动值列阵;  $T(\mathbf{P})$  为目标函数,  $\mathbf{P}$  为开采沉陷计算参数向量;  $M$  为测点总数;  $W_d(\mathbf{P})$  为第  $d$  个测点基于  $\mathbf{P}$  的计算下沉值或水平移动值;  $W'_d$  为第  $d$  个测点的实测下沉值或水平移动值。

概率积分法计算参数有 8 个: 下沉系数  $q$ 、主要影响角正切  $\tan \beta$ 、水平移动系数  $b$ 、开采影响传播角  $\theta_0$ 、左拐点偏移距  $S_L$ 、右拐点偏移距  $S_R$ 、上拐点偏移距  $S_U$ 、下拐点偏移距  $S_D$ 。设  $\mathbf{P} = (q, \tan \beta, b, \theta_0, S_L, S_R, S_U, S_D)$ ,  $B$  为  $\mathbf{P}$  的搜索空间, 则式(1)可描述为在 8 维空间  $B$  中找一个向量  $\mathbf{P}_0$ , 使目标函数  $T(\mathbf{P}_0)$  的值最小。

### 1.2 搜索空间离散

蚁群算法适合于求解组合优化问题, 因此, 需将式(1)的连续变量优化问题转化为组合优化问题。离散搜索空间  $B$  的方法<sup>[12]</sup>: 将  $\mathbf{P}$  中的第  $n$  ( $n=1, 2, \dots, 8$ ) 个计算参数  $P_n$  的取值范围分为  $M_n$  段, 用每一段中点的值代替该段的值。搜索空间  $B$  被离散成了含有有限个向量的离散空间。参数  $P_n$  的离散程度越高, 计算精度也越高。

### 1.3 蚁群算法实现

设  $m$  为蚂蚁总数;  $(i, j)$  为从元素  $i$  到元素  $j$  的连线, 称为边;  $\tau_{ij}(t)$  为  $t$  时刻边  $(i, j)$  上信息素浓度;  $t$  时刻包含边  $(i, j)$  的路径共有  $g_{ij}(t)$  条; 路径  $w$  对应的目标函数为  $T_w(\mathbf{P})$ ; 若路径  $w$  包含边  $(i, j)$ , 记成  $w \supset (i, j)$ ; 在  $t$  时刻, 边  $(i, j)$  对应的  $T_w(\mathbf{P})$  的标准差为  $\sigma_{ij}(t)$ 。  $m$  只蚂蚁同时完成 1 步(从一个元素到达另外一个元素)时, 时间步自动加 1。  $m$  只蚂蚁

完成对所有 8 个元素的访问后, 算法完成 1 个循环。

初始时刻, 将  $m$  只蚂蚁随机放在离散后的搜索空间  $B$  中。蚂蚁  $k$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ) 在运动过程中, 根据  $\tau_{ij}(t)$  与  $\eta_{ij}(t)$  决定其下一步运动方向。其中  $\eta_{ij}(t)$  为元素  $i, j$  的能见度, 用于防止算法早熟收敛, 取  $\eta_{ij}(t) = \sigma_{ij}(t)$ 。在  $t$  时刻, 蚂蚁  $k$  由元素  $i$  转移到元素  $j$  的概率为

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\sigma_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{k \in D_k} [\tau_{ik}(t)]^\alpha [\sigma_{ik}(t)]^\beta} + h & j \in D_k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $D_k$  为当前蚂蚁  $k$  可以选择向其移动的计算参数编号,  $D_k = \{N - T_k\}$ , 其中  $N$  为 8 维向量, 元素为 8 个计算参数编号,  $T_k$  为 8 维动态向量, 记录到当前为止蚂蚁  $k$  已经访问过的计算参数编号;  $h$  为小的常数, 避免蚂蚁以零概率选择对应  $\sigma_{ij}(t)$  较小的边;  $\alpha, \beta$  为控制信息素浓度与转移期望相对重要性的参量。

在蚁群完成 1 个循环后, 对每条边上的信息素浓度进行更新:

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}^{\text{best}_{ij}} \quad (3)$$

$$\Delta \tau_{ij}^{\text{best}_{ij}} = 1/f(s^{\text{best}}) \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为外激素残留系数;  $f(s^{\text{best}})$  为迭代最优解。

参数  $\alpha, \beta, \rho$  的最佳组合可由试验确定<sup>[13]</sup>。同时, 为避免搜索过程中发生停滞状态, 参照最大-最小蚁群系统<sup>[13]</sup>, 对每条边上的信息素浓度  $\tau_{ij}(t)$  做如下限制:

$$\tau_{\min} \leq \tau_{ij}(t) \leq \tau_{\max} \quad (5)$$

式中:  $\tau_{\max}$  为在每个选择点上, 其中一个解元素上的信息素浓度;  $\tau_{\min}$  为所有其他可选择的解元素上的信息素浓度,  $\tau_{\min} = 0.02\tau_{\max}$ 。

$\tau_{\max}$  按式(6)选取:

$$\tau_{\max} = \max \sum_{i=1}^t \rho^{t-i} (f(s^{\text{gb}}))^{-1} \quad (6)$$

式中:  $f(s^{\text{gb}})$  为渐进的最大值估计。

基于最大-最小蚁群算法的概率积分法计算参数反演流程如图 1 所示。其中,  $C$  为迭代次数,  $C_{\max}$  为最大迭代次数。

## 2 应用实例

处于平顶山矿区的某矿 22071 工作面走向长 1 760 m, 斜长 176 m, 煤层倾角  $21^\circ$ , 采高 3.6 m, 采深 717~780 m, 第四系黄土夹卵石层厚度 20.86~41.23 m, 平均厚度 35 m, 其下为泥岩、砂质泥岩、细

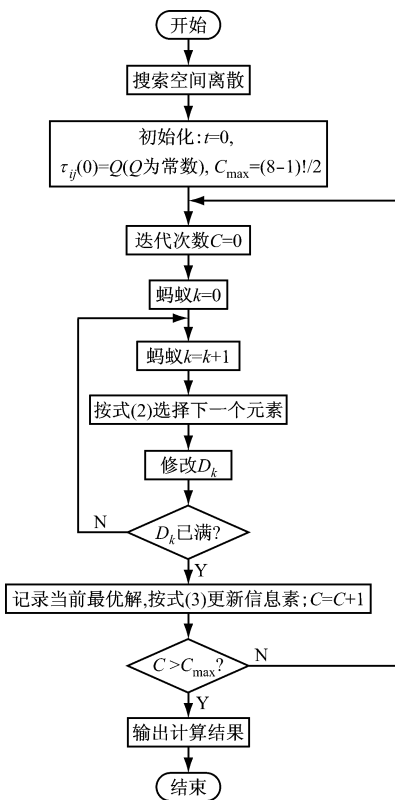


图 1 基于最大-最小蚁群算法的概率积分法  
计算参数反演流程

砂岩、煤层等岩层,属中硬岩层。开采时间为2005 年 12 月至 2007 年 12 月,推进速度约 61 m/月,采用全陷法管理顶板。

某矿 22071 工作面观测站布置如图 2 所示。观测线总长 2 205 m,共布置控制点 3 个,工作测点 73 个。其中,走向观测线长 1 470 m,工作测点 48 个;在工作面西侧设半条(下山)倾向观测线,倾向观测线长 735 m,工作测点 25 个。观测时间为 2005 年 11 月至 2008 年 8 月,共观测了 35 次,在观测期间,观测线上测点缺失比较严重,走向观测线缺失 22 个测点,倾向观测线缺失 6 个测点,但观测数据仍能反映 22071 工作面地表沉陷状况。

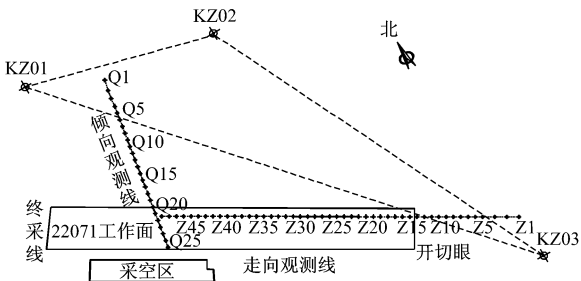


图 2 某矿 22071 工作面观测站布置

倾向观测线和走向观测线的部分实测下沉曲线分别如图 3、图 4 所示。倾向观测线实测最大下沉值为 815 mm(Q12 测点),走向观测线实测最大下沉值为 510 mm(Z43 测点)。通过分析所得的实测数据,该观测站地表沉陷规律可采用概率积分法计算模型来描述。

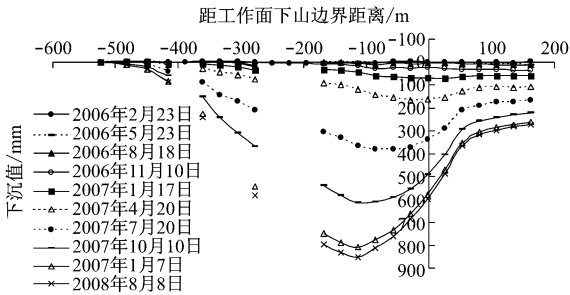


图 3 倾向观测线部分实测下沉曲线

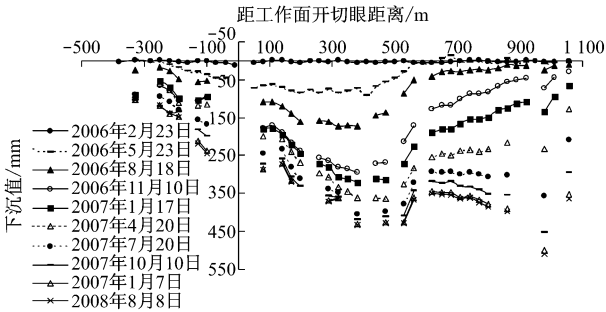


图 4 走向观测线部分实测下沉曲线

将获得的 45 个下沉值和 45 个水平移动值作为观测值。概率积分法计算参数取值范围和参数离散数目见表 1。蚁群规模  $m=100$ ,  $\alpha=1$ ,  $\beta=1$ ,  $\rho=0.8$ 。

表 1 概率积分法计算参数取值范围和参数离散数目

| 项目   | $q$       | $b$     | $\theta_0/(^\circ)$ | $\tan \beta$ | $S_L/m$ | $S_R/m$ | $S_U/m$ | $S_D/m$ |
|------|-----------|---------|---------------------|--------------|---------|---------|---------|---------|
| 取值范围 | 0.25~1.00 | 0.2~0.5 | 70~90               | 1.0~3.0      | -50~50  | -50~50  | -50~50  | -50~50  |
| 离散数目 | 150       | 60      | 20                  | 100          | 50      | 50      | 50      | 50      |

利用蚁群算法得到的倾向观测线和走向观测线的下沉拟合曲线分别如图 5、图 6 所示,可看出拟合效果较好。需要指出的是,图 5 中倾向观测线上山

一侧测点拟合值与实测值最大相差 142 mm,这是由于反演中未考虑临近采空区的残余沉陷变形影响所致。

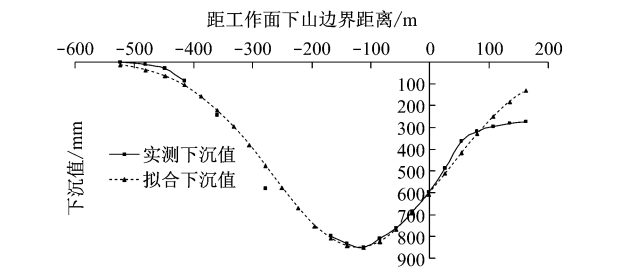


图5 倾向观测线下沉拟合曲线

为考察蚁群算法的有效性,与最小二乘法、模矢法和遗传算法反演计算结果进行对比,见表2。采用蚁群算法时,倾向观测线拟合中误差为51 mm,相对中误差(相对于实测最大下沉值)为6.1%;走向观测线拟合中误差为23 mm,相对中误差为

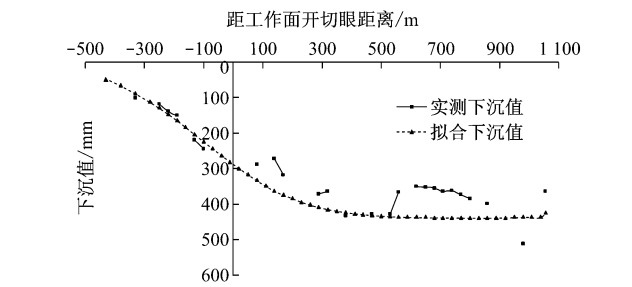


图6 走向观测线下沉拟合曲线

5.3%。从整条观测线的拟合误差上来看,蚁群算法拟合效果优于最小二乘法和模矢法,与遗传算法相当,蚁群算法能有效解决开采沉陷计算参数求参问题。

表2 不同算法反演计算结果对比

| 方法    | $q$  | $b$  | $\theta_0/(^{\circ})$ | $\tan \beta$ |      | 拐点偏移距/m |       |       |       | 拟合中误差/mm |    |
|-------|------|------|-----------------------|--------------|------|---------|-------|-------|-------|----------|----|
|       |      |      |                       | 倾向           | 走向   | $S_L$   | $S_R$ | $S_U$ | $S_D$ | 倾向       | 走向 |
| 最小二乘法 | 0.65 | 0.28 | 79.2                  | 2.36         | 1.83 | —       | -6.1  | -4.7  | 22.3  | 86       | 48 |
| 模矢法   | 0.62 | 0.34 | 75.8                  | 2.02         | 1.46 | -7.3    | -12.9 | -22.8 | 10.4  | 73       | 35 |
| 遗传算法  | 0.57 | 0.24 | 75.5                  | 2.15         | 1.12 | -11.5   | -18.7 | -26.1 | 7.7   | 50       | 26 |
| 蚁群算法  | 0.57 | 0.26 | 75.5                  | 2.11         | 1.63 | -15.0   | -19.0 | -23.0 | 7.0   | 51       | 23 |

3 结语

提出了基于蚁群算法的概率积分法计算参数反演的求参方法。应用实例表明,采用蚁群算法能较 good 地进行概率积分法模型计算参数求取,可有效避免算法早熟收敛现象,对观测站测点缺失具有较强的抗干扰能力。本文对基于蚁群算法的开采沉陷计算参数反演仅是一种初步研究,该方法求参的准确性、稳定性、反演结果精度与参数取值范围和离散数目的影响关系,以及蚁群算法与其他算法(如遗传算法)结合用于开采沉陷计算,将是进一步研究的方向。

参考文献:

[1] 吴侃,葛家新,王铃丁,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.

[2] 郭文兵,邓喀中,邹友峰. 概率积分法预计参数选取的神经网络模型[J]. 中国矿业大学学报,2004,33(3): 322-326.

[3] 柴华彬,邹友峰,郭文兵. 用模糊模式识别确定开采沉陷预计参数[J]. 煤炭学报,2005,30(6):701-704.

[4] 邹友峰. 开采沉陷预计参数的确定方法[J]. 焦作工学院学报:自然科学版,2001,20(4):253-257.

[5] 郭广礼,汪云甲. 概率积分法参数的稳健估计模型及

其应用研究[J]. 测绘学报,2000,29(2):162-165.

[6] 查剑锋,郭广礼,赵海涛,等. 概率积分法修正体系现状及发展展望[J]. 金属矿山,2008,26(1):15-18.

[7] 耿德庸,钟惟林. 用岩性综合评价系数P确定地表移动的基本参数[J]. 煤炭学报,1980,5(4):13-25.

[8] 查剑锋,冯文凯,朱晓峻. 基于遗传算法的概率积分法预计参数反演[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(4):655-659.

[9] COLORNI A, DORIGO M, MANIEZZO V. Distributed optimization by ant colonies [C]// Proceedings of the 1st European Conference on Artificial Life, Paris, 1991:134-142.

[10] 何国清,杨伦,凌虞娣. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1991.

[11] 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.

[12] 朱合华,刘学增. 基于蚁群算法的土石坝土体参数反演[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(8):1411-1416.

[13] 于嘉鹏,王成恩,王健熙. 基于最大-最小蚁群系统的装配序列规划[J]. 机械工程学报,2012,48(23): 152-166.

[14] CORNE D, DORIGO M, GLOVER F. New ideas in optimization[M]. London: McGraw-Hill, 1999.