

技术进步

文章编号: 1671- 251X(2009)03- 0031- 06

# D-InSAR 技术在煤矿区沉陷监测中的研究\*

张俊, 汪云甲, 王小辉

(江苏省资源环境信息工程重点实验室(中国矿业大学), 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 文章介绍了近年来 D-InSAR 技术在煤矿区沉陷监测的应用和发展, 探讨了该技术用于监测煤矿区沉陷的可行性、与传统的变形监测技术对比所具有的优势, 并指出了目前该技术在煤矿区沉陷监测中存在的问题及解决方法。

**关键词:** 煤矿区; 沉陷监测; D-InSAR 技术

**中图分类号:** TD327/ 76      **文献标识码:** B

## Research of D-InSAR Technology in Subsidence Monitoring of Coal Field

ZHANG Jun, WANG Yuanjia, WANG Xiaohui

(Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering of Jiangsu Province(CUMT.),  
Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** The paper introduced the application and development of D-InSAR technology in subsidence monitoring of coal field in recent years, discussed the feasibility of the technology used in subsidence monitoring of coal field and its technical superiority by contrasting with the traditional deformation monitoring technology. Finally, it pointed out existed problems and methods of resolution of D-InSAR

收稿日期: 2008- 11- 13

\* 基金项目: 全国百篇优秀博士论文专项资金项目(200348),

国家自然科学基金重点项目(50534050)

**作者简介:** 张俊(1983- ), 男, 中国矿业大学在读硕士研究生,  
现主要从事 InSAR 理论、方法及其应用研究方面的工作。E-mail:  
zjau st@163. com

## 4 结语

虽然神经网络可以学习任意的非线性关系, 但如果将 1 组相关的或非显著的变量选进变量集, 会使网络训练时间加长, 影响预测精度。本文分析了影响标煤耗率的因素, 然后采用基于敏感度分析的变量选择方法计算各个因素对输出的贡献率, 提出了一种基于神经网络的贡献分析法。仿真结果表明, 选择合适的变量, 不仅简化了网络结构, 减少了网络训练时间, 而且提高了网络的预测精度。

## 参考文献:

[1] 高山, 单渊达. 神经网络短期负荷预测输入变量选择

新方法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(22): 41~ 43.

- [2] 高仁祥, 张世英, 刘豹. 基于神经网络的变量选择方法[J]. 系统工程学报, 1998, 2(3): 32~ 37.
- [3] 林开英, 俞集辉. 神经网络短期负荷预测中的数据分析[J]. 重庆大学学报, 2002, 25(9): 5~ 7.
- [4] 杨勇平, 王加璇. 火电机组耗量特性的在线确定与机组间负荷最优分配[J]. 电站系统工程, 1995, 11(3): 18~ 23.
- [5] 王培红. 火电机组运行状态监测与诊断算法研究[D]. 南京: 东南大学, 2002.
- [6] 许世刚, 索丽生. 确定前向神经网络隐层节点数的模糊聚类分析法[J]. 河海大学学报, 2001, 29(3): 17~ 20.
- [7] 姜勇. 基于模糊聚类的神经网络短期负荷预测方法[J]. 电网技术, 2003(2).

technology used in subsidence monitoring of coal field at present.

Key words: coal field, subsidence monitoring, D2InSAR technology

## 0 引言

煤炭资源的开发和利用是一柄双刃剑: 在给人类带来物质财富的同时, 也一定程度上破坏着人类赖以生存和发展的自然环境, 会造成以地表沉陷为代表的地质灾害等<sup>[1]</sup>。资料表明, 我国每年由于煤炭开采损伤土地面积达到 12.5 万公顷左右, 塌陷面积约 2 万公顷左右, 直接经济损失约 20 亿元<sup>[2]</sup>。据不完全统计, 我国因采矿而直接破坏的森林面积极计已达 106 万公顷, 破坏草地面积 26.3 万公顷, 采矿业造成的地面塌陷面积已达 500~600 万亩, 其中耕地为 130 万亩<sup>[1,3]</sup>。煤矿开采沉陷对自然环境和社会环境的影响突出表现在以下几个方面: (1) 破坏地表; (2) 影响生态环境; (3) 危及工用、民用建筑和生活生产设施; (4) 危及公路、铁路交通运输、地面输电线路等。

国际能源机构 2000 年在最新的世界能源发展展望中指出: 2020 年世界煤炭消费量将增加到 50%。按照中国经济可持续发展的要求和中国的能源结构特征, 中国 70% 以上的能源来自煤炭的能源结构, 在相当长的一段时期内能源结构依然是以煤炭为主, 煤炭开采沉陷引起的地质灾害也将长期危害人类。和谐矿区、绿色矿区的发展要求科技工作者进一步加强对煤矿区地表移动规律和矿区塌陷区域的生态环境变迁与演化过程的研究, 为解决安全开采和塌陷区环境综合治理提供科学的依据。因此, 必须利用先进技术来监测和控制地表沉降引起的破坏, 保证矿区的可持续发展。

## 1 D- InSAR 技术的研究现状

自从 1989 年 GRABRIEL 等学者首次论证了 D- InSAR ( Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达差分干涉测量) 可用于探测地表形变以来<sup>[13]</sup>, 在形变监测的诸多领域, 欧美等国家如波兰、意大利、法国等在近 20 年内针对 D- InSAR 技术在地表形变中的应用展开了大量的研究工作, 在理论、算法与应用方面都取得了许多研究成果, D- InSAR 技术得到了迅猛发展。D- InSAR 技术在煤矿区沉陷监测方面亦取得了骄人的成绩。

波兰学者 PERSKI 利用 InSAR 技术对 Upper

Silasia 煤矿开采下沉盆地进行了系统研究<sup>[14]</sup>。法国地质矿物调查所利用 13 张 ERS- 1/2 SAR 影像, 采用 D- InSAR 技术对法国 Gardanne 附近地区煤矿开采沉陷进行了观测研究, 精度达到了厘米级<sup>[15]</sup>。澳大利亚新南威尔士大学和有关单位对 Appin、West Cliff、Picton 三个地方应用雷达差分干涉测量技术进行了煤矿开采沉陷监测研究, 采用的是日本 JERS- 1 L 波段的卫星数据, 在研究中首次引入了 GPS 数据, 并开始 D- InSAR 技术在开采沉陷变形场的定量性研究<sup>[16~18]</sup>。

国内虽然采用 D- InSAR 技术进行形变监测起步较晚, 不过也取得了一些经验与成果, 不少学者进行了基于 D- InSAR 技术的地表形变监测试验。吴立新、姜岩、高均海、王行风、汪云甲等人就 D- InSAR 技术在矿区开采沉陷监测中的应用构想进行了分析, 并针对我国煤矿的特点提出了 D- InSAR 技术在中国煤矿区实际应用中应该注意的问题, 并开展了以唐山矿、开滦矿区、潞安矿区为例的煤矿区地表演变与开采沉陷 D- InSAR 技术监测实验<sup>[10, 19~21]</sup>, 积累了一些有益经验。

相关煤矿区沉陷监测的实践表明, D- InSAR 技术完全满足煤矿区沉陷监测的精度要求, 是水准测量和 GPS 测量的有效补充, 在煤矿区大面积的开采沉陷损害调查及预测方面具有明显优势。

## 2 D- InSAR 技术监测煤矿区沉陷的可行性

### 2.1 理论分析<sup>[4~5]</sup>

D- InSAR 技术的基本原理如图 1 所示, A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 分别为卫星 2 次对同一地区成像的位置(即天线的位置), 2 个天线接收信号的路径分别为 Q 和 Q+, \$Q\$ 测量的相位差为  $U = \frac{4P}{K}DQ$  其中, K 为雷达信号波长。

根据余弦定理有:

$$(Q+ \$Q)^2 = Q^2 + B^2 - 2QB \sin(H - A)$$

式中: B 为基线距; H 为雷达入射角; A 为基线与水平方向的夹角。

由于  $B \ll Q$ ,  $(DQ)^2$  可忽略, 故有  $DQ \approx B \sin(H - A) = B_m$ ,  $B_m$  为基线距沿雷达视线方向的分量, 因此,  $U = \frac{4P}{K}B_m$ 。如果在同一地区获取第二幅干涉图, 该干涉纹图与前一幅干涉纹图的主图象相同(即 Q 和 H

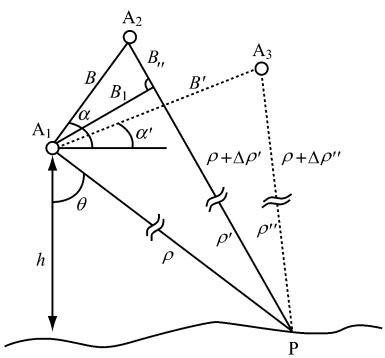


图1 D-InSAR技术的基本原理图

不变),那么这2幅干涉纹图的相位差可相互比较。设第二幅干涉纹图的基线距为 $B_c$ ,基线与水平方向的夹角为 $\alpha$ ,由上述关系式可得 $\frac{4P}{K}B_c \# \sin(H\alpha) = \frac{4P}{K}B_{cM}$ 。

如果在第三次观测期间,地表发生形变,这时相位差信息除与地形有关外,还包括沿雷达视线方向的形变分量,视角稍微有变化,为 $H - \$H$ 此时,2幅干涉纹图的相位差 $\$U$ 为

$$\begin{aligned} \$U &= U - U \\ &= \frac{4P}{K}[B_c \sin(H - \$H - \alpha) - B \sin(H - \alpha)] \\ &= \frac{4P}{K}B_c \sin(H - \alpha) \$H (B - U - B_c) \end{aligned} \quad (1)$$

对式(1)求导,可得到相位相对于地形变化的灵敏度,即:

$$\frac{\frac{\partial U}{\partial H}}{5H} = \frac{4P}{K}B_c \cos(H - \alpha) \quad (2)$$

又有:

$$\$h = hd - hc = Q \cos(H - \$H) - Q \cos H$$

则:

$$\begin{aligned} 5h &= Q \sin H \$H \\ \frac{\frac{\partial U}{\partial H}}{5h} &= \frac{4P}{K} \frac{B_c \cos(H - \alpha)}{Q \sin H} \end{aligned} \quad (3)$$

同样,可得到相位相对于地表形变的灵敏度:

$$\begin{aligned} \frac{\frac{\partial U}{\partial H}}{5Q} &= \frac{4K}{K} (\$Q - \$Q) = \frac{4K}{K} \$e \\ \frac{\frac{\partial U}{\partial H}}{5Q} &= \frac{4P}{K} \end{aligned} \quad (4)$$

比较式(3)和式(4),对于一个合成孔径雷达测量(Synthetic Aperture Radar, SAR)系统来说,式(4)的右边 $4P/K$ 为一个常数,而式(3)的右边则是该常数乘以一个分式。由于斜距 $Q$ 远大于基线 $B_c$ 的值,式(3)右边的值远小于式(4)右边的值,因此,通常利用InSAR技术生成数字高程模型(DEM)

时,精度一般只能达到数米的水平。但是, InSAR技术用于变化的检测时,却能够达到厘米级甚至毫米级的精度。从相位对于地形和形变的不同灵敏度的比较,可以清楚地说明合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术或D-InSAR技术具有检测地表微小形变的能力。

## 2.2 D-InSAR技术监测煤矿区沉陷的优点

煤矿区沉陷形变监测常用的方法主要有常规大地测量、GPS测量、近景摄影测量等<sup>[6]</sup>。这些方法各有优缺点,传统的实地测量方法精度较高但工作量大、成本高,不宜经常进行。GPS测量方法具有定位精度高、观测时间短、观测站之间无需通视且能提供三维坐标等优点,易于自动化监测、自动化数据采集与处理的优势,因而迅速在煤矿区沉陷形变监测中得到广泛应用,是切实可行的好方法,但依然面临水准点的稳定性难以保证,只能进行沉降点、线测量,构成沉降面必须经过数值内插,空间分辨率不高,无法满足几百平方公里全矿区的监测任务,对于煤矿区因开采所造成的动态地表形变监测难以达到理想的效果等问题<sup>[7]</sup>。随着科学技术的不断进步,矿区开采沉陷与形变监测的手段得到了快速发展。作为空间测量技术的一个重要分支))空间对地观测技术特别是SAR技术近些年发展迅速,其中InSAR技术已进入一个全新的阶段,可以利用D-InSAR技术的大尺度连续空间覆盖、高度自动化和高精度监测地表形变的能力来探测地表的微小、缓慢形变。目前,利用遥感卫星多时相的复雷达图象相干信息提取地表垂直形变量,理论上其精度可以达到毫米级。该技术为地表沉陷变形的自动化监测提供了全新方法,具有常规水准测量和GPS测量手段无法比拟的信息量优势(见表1)<sup>[8,10]</sup>。

D-InSAR技术作为新兴的空间测量技术,以其全天时、全天候、自动化、高分辨率、高精度、低成本、快速、准确、大尺度连续覆盖能力,可以进行长期的地表形变监测的特点,使其在地表微小形变的监测中具有巨大的优势,无疑将成为一种未来煤矿区沉陷监测极具潜力的空间对地观测技术<sup>[8~12]</sup>。

## 3 存在的问题

相关研究表明,与地震所引起的明显的地表形变相比,煤矿区由于自身条件的特殊性,地面沉降等所造成地表形变,要么是开采沉陷范围较小,要么是形变变化缓慢,对这种细微的地表形变信号利用

表 1 D-InSAR 技术与水准测量及 GPS 测量方法比较表

测量方式	水准测量	GPS 测量	D-InSAR 技术
沉降信息量	点、线信息	点、线信息	点、线、面信息
形变分量	垂直	水平/垂直	距离向
样本频率( / d)	1~ 10	10~ 30	\ 10 <sup>6</sup>
样本密度	10~ 100	10~ 100	10 <sup>5</sup> ~ 10 <sup>7</sup>
精度	mm	mm	亚毫米、mm
周期/速度	长/慢	较短/快	短/快
作业条件	根据天气	全天候	全天候
成本	高	较高	低
数据处理	慢	快	快

InSAR 技术测量具有挑战性:许多细微的信号需要至少 10 年的干涉图象才能监测到; 煤矿区地表覆被变化迅速引起地表反射特性的变化, 导致干涉相位在时变和地面散射体失相关, 有时甚至得不到有用的干涉图; D-InSAR 技术受大气效应、地形畸变、数据处理过程噪声影响造成形变假象; 系统本身因素, 如 SAR 卫星轨道误差、系统热噪声去相关、多普勒质心去相关、空间基线去相关、时变去相关等影响导致干涉图象质量下降。这些都给 D-InSAR 技术的数据处理和解译带来了很大的困难, 使得雷达差分干涉测量的实际应用精度远远没有达到它的理论精度水平(毫米级), 限制了 D-InSAR 技术在煤矿区沉陷监测的有效应用, 所以煤矿区沉陷监测一直是 D-InSAR 技术应用发展较慢的领域之一<sup>[19]</sup>。为了将 D-InSAR 技术真正应用于煤矿区地表沉陷监测, 提供高分辨率、高精度的地表沉陷监测信息, 从而为研究地表移动规律和煤矿区塌陷区域的生态环境变迁与演化过程、解决安全开采和塌陷区环境综合治理提供科学的依据, 上述问题是 D-InSAR 技术在煤矿区沉陷监测有效应用中所遇到的亟待解决的问题。

#### 4 解决方法

##### (1) 面向矿区沉陷监测的差分相对最优化选取

采用 D-InSAR 技术监测矿区沉陷最大的难题是矿区农田多、植被覆盖率高, 因此, 雷达图象的相关性降低, 难以生成干涉图。解决该问题的方法有 2 个: 一个是采用长波段雷达数据; 另一个是采用重复轨道周期较短的卫星数据。但目前较难同时满足这 2 个条件, 因此, 需在两者之间找到一个平衡点, 即选取矿区开采沉陷监测的最优化差分相对, 避免有了数据不能用和盲目追求波段或短重复周期轨

道数据带来的高成本问题, 提高应用 D-InSAR 技术监测矿区开采沉陷时的应用效果。

##### (2) D-InSAR 技术高精度自动化影像配准与相位解缠

差分干涉雷达数据处理过程中的关键技术))) 影像精确配准是保证输出的干涉条纹具有良好相干性的前提, 配准精度应达到子像元级精度, 其配准精度直接影响最终获取的差分形变量的质量。同时, 应当选择合适的解缠算法, 获取真实的相位结果。D-InSAR 技术的数据处理中要尽量消除导致干涉图质量下降因素的影响<sup>[10]</sup>。

##### (3) 采用基于多源信息集成的 PS-DInSAR 技术监测煤矿区沉陷

传统的 D-InSAR 技术受到时间去相关、基线去相关的严重影响, 导致相干性很差, 在相干性较低的区域, 没法正确完成相位解缠, 进而导致传统 D-InSAR 技术的失效。基于时间序列点目标分析方法的永久散射体合成孔径雷达差分干涉测量(Permanent Scatters D2InSAR, PS2DInSAR)等技术不仅能抑制大气效应和时间去相干对雷达波相位的影响, 而且也可让相位解缠变得简单, 从而提升沉陷监测的精度至毫米级。基于煤矿区沉陷的特点, 以矿区村庄和道路为主要研究对象, 以时间序列 PS-DInSAR 技术监测煤矿区沉陷为主线, 从技术互补性出发分析, 充分发挥 GPS 测量、水准测量等传统监测方法的优点, 校正干涉结果。

##### (4) 精度与可靠性评价

尽管利用 PS-DInSAR 技术可以获取厘米级甚至毫米级精度的观测结果, 但仍需利用常规观测结果对其可靠性进行评价。选择合理的定性或定量分析干涉雷达地表形变监测的误差源和差分干涉图象质量可靠性评价体系的数学模型是可靠性评价的技术关键<sup>[10]</sup>。

基于 PS-DInSAR 技术的煤矿区沉陷形变监测的处理流程如图 2 所示。

#### 5 结语

D-InSAR 技术是传统的合成孔径雷达技术和射电天文学中的干涉测量技术相结合而发展起来的一项新的遥感技术。D-InSAR 技术以其全天时、全天候、自动化、高分辨率、高精度、低成本、快速、准确、大尺度连续覆盖能力、可进行长期的地表形变监测、观测精度可达到厘米级、能够清晰地反映出观测区形变的整体情况等特点, 在各类形变监测应用中

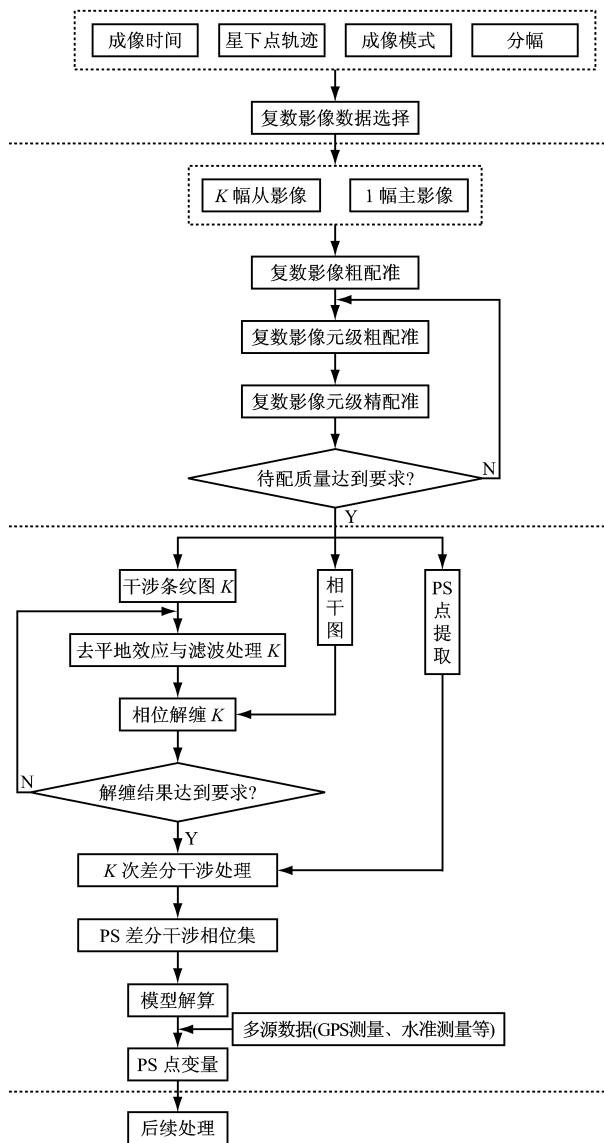


图2 基于PS-DInSAR技术的煤矿区沉陷形变监测的处理流程图

具有传统监测方法无可比拟的技术优势。

虽然目前D-InSAR技术在煤矿区沉陷监测方面的应用受到诸多因素的限制,但为了将D-InSAR技术真正应用于煤矿区地表沉陷监测,很多新理念和方法被相继提出,这些方法包括永久性散射体干涉测量技术(PS)、短基线集(SBAS)、点目标干涉测量分析(IPTA)、人工角反射器(CRT)、相干点目标分析(CTA)以及GPS与InSAR融合技术等,其中很多已经在城市沉降形变监测等方面得到了有效应用,取得了一些可喜的经验和成果。随着卫星雷达系统的不断改进及处理方法的不断提高,D-InSAR技术必将在地球科学及其它学科中发挥更为重要的作用。

### 参考文献:

- [1] 汪云甲. 经济全球化下的矿产资源安全[J]. 煤炭学报, 2002, 27(5): 449~ 453.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2003.
- [3] 国土资源部规划司. 矿产资源规划研究[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- [4] GABRIE A K, GOLDSTEIN R M, ZEBEKER H A. Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry [J]. J. Geophys. Res., 1989, 94: 9 183~ 9 191.
- [5] PERSKI Z. ERS InSAR Data for Geological Interpretation of Mining Subsidence in Upper Silesian Coal Basin in Poland [J]. European Space Agency, (Special Publication) ESA SP, 2000, 478: 151~ 157.
- [6] RAUCOULES D, MAISONS C, CARNEC C, et al. Monitoring of Slow Ground Deformation by ERS Radar Interferometry on the Vauvert Salt Mine (France) Comparisons with Ground-based Measurement [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 88(4): 468~ 478.
- [7] GE Lin2lin, CHANG H, CHUNG H, et al. Mine Subsidence Monitoring: A Comparison among Envisat, ERS and JERS-1 [C]// Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium, 2005, Salzburg, Austria: 953~ 958.
- [8] GE Lin2lin, LI Xiao2jing, CHRIS R, et al. GPS and GIS Assisted Radar Interferometry [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2004, 70(10): 1 173~ 1 177.
- [9] CHANG H, GE Lin2lin. D2InSAR for Mine Subsidence Monitoring Using Mult2source Satellite SAR Images [C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium of 2005 IEEE International Proceedings, 2005: 1 742~ 1 745.
- [10] 吴立新, 高均海, 葛大庆, 等. 工矿区地表沉陷D-InSAR监测实验研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2005(8): 778~ 781.
- [11] 姜岩, 高均海. 合成孔径雷达干涉测量技术在矿山开采地表沉陷监测中的应用[J]. 矿山测量, 2003(1): 5~ 7.
- [12] 王行风, 汪云甲, 杜培军. 利用差分干涉测量技术监测煤矿区开采沉陷变形的初步研究[J]. 中国矿业, 2007, 16(7): 77~ 80.
- [13] 吴立新, 高均海, 葛大庆, 等. 基于D-InSAR的煤矿区开采沉陷遥感监测技术分析[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(2): 22~ 25.

文章编号: 1671- 251X(2009)03- 0036- 04

# 指标体系法通用评价软件的开发与应用<sup>\*</sup>

杨应迪, 张国枢, 秦汝祥

(安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 文章以 VB6.0 和 Access 数据库为平台、采用模块化程序设计技术, 设计了一种以指标体系法为基础的通用评价软件, 介绍了该软件的设计思路、结构及基本功能。该软件可适用于不同类型的评价指标体系, 具有专家评分统计、指标权重的重新分配与自动计算、评价操作、报表和图形输出、数据库管理等功能。实例验证该软件具有较高的实用价值。

**关键词:** 指标体系法; 通用软件; 指标代码; 评价; 指标权重

**中图分类号:** TD672; TP319      **文献标识码:** B

## Development of General Evaluation Software of Indicator System Method and Its Application

YANG Yingdi, ZHANG GuoShu, QIN RuXiang

(College of Energy Sources and Safety of Anhui University of Science and Technology,  
Huainan 232001, China)

**Abstract:** The paper designed a kind of general evaluation software based on indicator system taking VB6.0 and Access database as platform and using technology of modular program design. It introduced design idea, structure and basis functions of the software. The software could be used in different evaluation indicator systems, which had the functions such as statistic of experts' mark, redistribution and automatic calculation of indicator weighting, evaluation operation, output of reports and figures and database management. The example proved that the software had higher use value.

**Key words:** indicator system method, general software, indicator code, evaluation, indicator weighting

收稿日期: 2008- 11- 27

\* 基金项目: 安徽省高校科技创新团队计划资助项目(矿业安全技术 2006KJ005 TD), 十五攻关资助项目(2001BA803B0415)

作者简介: 杨应迪(1983- ), 男, 河南南阳人, 安徽理工大学能源与安全学院在读博士研究生, 现主要从事煤矿通风安全及评价方面的研究工作。E-mail: ydyang1979@163.com

## 0 引言

评价是一项较为复杂的系统工程, 它的显著特点是层次复杂、结构性强、处理的信息量大, 要想对其中的任何一种事物做出客观、公正、合理的评价, 都需要从多个方面入手, 也就是说其参与评价的指

- [14] ZEBKER H A, ROSEN P A, GOLDSTEIN R M, et al. On the Derivation of Coseismic Displacement Fields Using Differential Radar Interferometry: The Lander Earthquakes [J]. *J Geophys. Res.*, 1994, 99(B10): 19 617~ 19 634.
- [15] 廖明生. 雷达干涉测量原理与信号处理基础 [M]. 北京: 测绘出版社, 2000.
- [16] 邹友峰, 邓喀中, 马伟民. 矿山开采沉陷工程 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [17] 高均海. 开采沉陷 GPS 观测试验及技术方法研究 [J]. *矿山测量*, 2003(3): 31~ 33.
- [18] 陈基炜. 应用遥感卫星雷达干涉测量进行城市地面沉降研究 [J]. *测绘通报*, 2001(8): 13~ 15.
- [19] 马超, 单新建. 星载合成孔径雷达差分干涉测量(D-InSAR)技术在形变监测中的应用概述 [J]. *中国地震*, 2004, 20(4): 410~ 417.
- [20] 王超, 张红, 刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [21] 舒宁. 雷达干涉测量原理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.