

多属性决策及 D-S 证据理论 在底板突水决策中的应用

韩 进¹, 施龙青¹, 翟培合¹, 李术才², 于小鸽¹

(1. 山东科技大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266510; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘要: 针对煤矿底板突水包含很多不确定因素和时空随机性的特点, 探索多属性决策理论在底板突水预测中应用研究。采用案例统计与专家分析相结合的方法, 赋予影响底板突水各种因素的权重, 建立突水概率指数法的融合规则, 提出突水概率指数法预测采场工作面底板突水的新方法。在获得底板突水概率指数的基础上, 基于 D-S 证据理论, 建立由突水、临界、不突水、不确定组成的识别框架, 构建以富水性指数、构造指数、隔水层指数、水压指数、矿压指数为证据体的突水融合决策模型。通过在肥城煤田实例应用, 说明经证据体的多次融合, 能够提高突水概率的可信度, 降低不确定性, 证明基于多属性决策和 D-S 证据理论建立的工作面底板突水两级融合决策模型的有效性和可行性。

关键词: 采矿工程; 多属性决策; D-S 证据理论; 底板突水; 两级融合决策模型

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 2 - 3727 - 06

APPLICATION OF MULTI-ATTRIBUTE DECISION AND D-S EVIDENCE THEORY TO WATER-INRUSH DECISION OF FLOOR IN MINING

HAN Jin¹, SHI Longqing¹, ZHAI Peihe¹, LI Shucai², YU Xiaoge¹

(1. College of Information Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China; 2. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract: In view of characteristics of coal mine water-inrush from floor containing a lot of uncertain factors and time-location randomness, the multi-attribute decision-making theory in the prediction of water-inrush from floor applied research is explored. With case statistics and expert analysis, the weights are governed to the factors which affect water-inrush from floor. The fusion rule is established for water-inrush probability ratio, and a new method of water-inrush probability ratio is put forward for water-inrush from floor. It provides a technique for decision-making water-inrush from floor with water-inrush probability ratio. Based on the D-S evidence theory, the frame of discernment including water-inrush, critical condition, no water-inrush and uncertain information, is proposed and the water-inrush integration decision-making model is established considering aquifer water-bearing ratio, structure ratio, water-resisting layer thickness ratio, underground water pressure ratio and underground pressure ratio as evidences. With the practical application examples in Feicheng coal field, it shows that the degree of confidence of water-inrush probability can be improved and indeterminacy is reduced by several times of information fusion, and the validity and feasibility of proposed model are proved.

收稿日期: 2008 - 09 - 22; **修回日期:** 2009 - 03 - 19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50539080); 山东省自然科学基金资助项目(Y2007F46); 教育部博士学科点专项科研基金项目(20070424005); 教育部科学技术研究重点项目(108158)

作者简介: 韩 进(1968 -), 女, 博士, 2008 年于上海大学控制理论与控制工程专业获博士学位, 现任教授, 主要从事信息融合、嵌入式计算控制等方面的教学与研究工作。E-mail: shnk123@sohu.com

Key words: mining engineering; multi-attribute decision; D-S evidence theory; water-inrush from floor; two-step information fusion decision-making model

1 引言

采场底板突水预测预报及决策技术研究一直是承压水上采煤的重大课题。煤层底板突水问题的实质是底板透水安全性评价问题。煤层底板突水现象不仅取决于一定的水文地质条件，而且受到大量非确定性随机因素的干扰。突水的发生具有包含很多不确定因素。底板突水点的位置和突水发生时间具有很强的随机性特点。随着煤炭开采向纵深化发展，与 20 世纪 80 年代相比，目前煤层开采难度更大，技术要求更高，因此对底板突水决策技术提出了更精的要求。面对因素复杂、量纲不一、定性定量同时并举的底板突水问题，笔者以肥城煤田底板突水为研究背景，将多属性决策和 D-S 证据理论引入到采场工作面底板突水理论研究中，采用如图 1 所示的决策技术路线，探索一种底板突水预测预报及决策新方法。

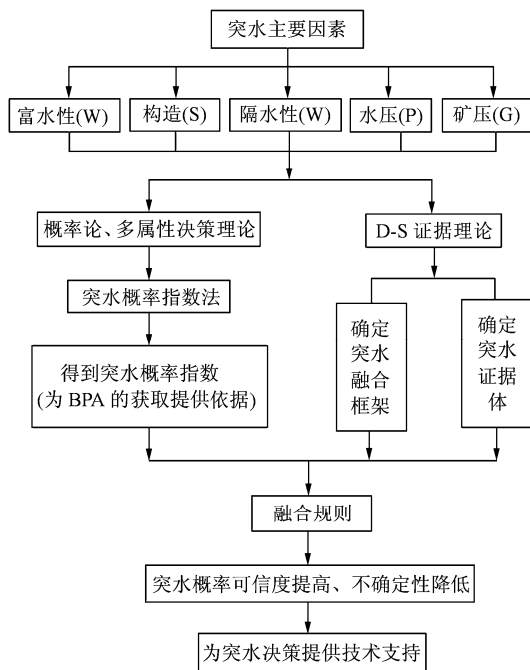


图 1 决策技术路线

Fig.1 Decision-making course

2 基于多属性决策的底板突水概率指数法

突水概率指数是基于多属性决策理论，将影响

底板突水的主要因素构建成决策矩阵，并采用统计概率与专家打分相结合的赋权方法赋予决策矩阵中各属性权重，从而实现将影响底板突水的主要因素所起的作用进行定量化^[1, 2]，最终通过一定的数学模型获得总体突水量化指数。

2.1 突水决策矩阵的构成

根据大量突水统计资料分析，影响底板突水的主要因素可归纳为：富水指数 W ，构造指数 S ，隔水层指数 R ，水压指数 P ，矿压指数 G 。数据预处理采用 0 - 1 变换与专家打分相结合的方法确定。由此构造的肥城煤田底板突水规范化决策矩阵如表 1 所示。

表 1 突水决策矩阵及决策结果

Table 1 Decision matrix and decision result of water-inrush from floor and decision result

工作面类型	W	S	R	P	G	E
杨庄矿 9101 工作面	0.90	0.8	0.50	0.60	0.50	0.795 0
大封矿 9204 工作面	0.80	0.6	0.50	0.80	0.40	0.690 0
陶阳矿 9901 工作面	0.75	0.6	0.50	0.70	0.40	0.660 0
陶阳矿 9507 工作面	0.95	0.4	0.50	0.90	0.80	0.730 0
国庄矿 - 210 北大巷	0.80	0.5	0.50	0.90	0.80	0.685 0
大封矿 10204 工作面	0.90	0.4	0.80	0.90	0.85	0.737 5
国庄矿 8010 工作面	0.80	0.4	0.45	0.95	0.90	0.657 5

2.2 权重及突水概率指数的获取

突水概率指数的获取采用概率统计与专家打分(至少由 10 位专家打分取平均)相结合的最低层目标权重的方法。由于“加权和”可以在各种权重之间有线性补偿作用，所以突水概率指数 E 采用“加权和”决策，决策规则为： $E = P_w W + P_s S + P_r R + P_p P + P_g G$ 。突水概率指数构成如图 2 所示，

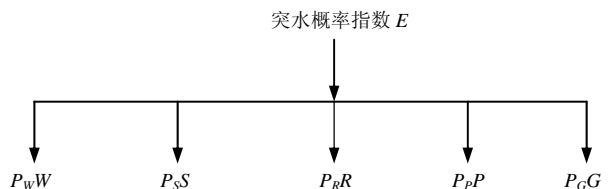


图 2 突水概率指数构成

Fig.2 Structure of probability coefficient for water-inrush

图中： $P_w = 0.05$ ， $P_s = 0.30$ ， $P_r = 0.10$ ， $P_p = 0.05$ ， $P_g = 0.05$ 。由突水案例概率统计和专家打分

给出, 它们反映了影响肥城煤田底板突水的主要因素含水层的富水性、煤田构造、底板隔水层、含水层水压及矿山压力在底板突水中所起的作用大小。

2.3 决策结果

基于表 1 决策矩阵、图 2 给出的权重及概率指数的获取, 采用加权和法中的层次分析法, 得到如表 1 所示的决策结果 E 。

通过大量案例计算得出 0.65 是肥城煤田矿井发生突水的最小突水概率指数。也就是说, 在肥城煤田, 如果个工作面的突水概率指数在 0.65 以上, 专家就会判断突水。尽管这一方法在肥城煤田底板突水预测预报中简单易行, 但利用这种方法所得出的结论可信程度有多大则需要进一步研究。显然, 利用突水概率指数预测煤矿底板突水的准确性及可靠性受到两个重要因素影响: 一是影响底板突水的各种因素, 二是计算突水概率指数的数学模型。

3 基于 Dempster-Shafer 证据理论的底板突水决策

突水概率指数法中影响突水的五个主要因素 W, S, R, P, G 的数值反映的仅仅是“突水”概率, 也就说反映的仅仅是突水可能性的大小, 而实际生产中人们对某种事物的决策存在一定的模糊性认识

或不确定的认识, 具体到矿井底板突水问题对“不突水”、“不确定”的概率在突水概率指数法中得不到任何反映。这不符合人们正常思维的决策方式。

D-S 证据理论是概率论的推广, 具有比概率论更弱的公理体系和更严谨推理过程, 能够更加客观地反映事物的不确定性^[3, 4]。作为一种决策融合推理手段, 日益广泛地应用于人工智能领域, D-S 证据理论恰恰能弥补上述突水概率指数法的不足^[5, 6]。

3.1 基于 D-S 证据理论的底板突水融合决策

D-S 证据理论信息融合决策过程如图 3 所示^[7, 8], 主要分为以下几个步骤^[9~11]:

- (1) 在深入分析决策问题的基础上, 构造系统的命题集^[12~14], 即系统的识别框架 $\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$ 。
- (2) 针对目标信息系统, 构建基于识别框架的证据体 $E_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。
- (3) 根据所搜集的各证据体资料, 结合识别框架中各命题的特点, 确定出各证据体的基本概率赋值 $m_j(A_j) (j=1, 2, \dots, K)$ 。
- (4) 由基本概率赋值 $m_j(A_j)$, 分别计算单证据体作用下识别框架中各命题的信度区间 $[Bel_j, Pl_j]$ 。
- (5) 利用 D-S 合成规则计算所有证据体联合作用下的基本概率赋值 $m(A_j)$ 和信度区间 $[Bel, Pl]$ 。
- (6) 根据具体问题构造决策规则。

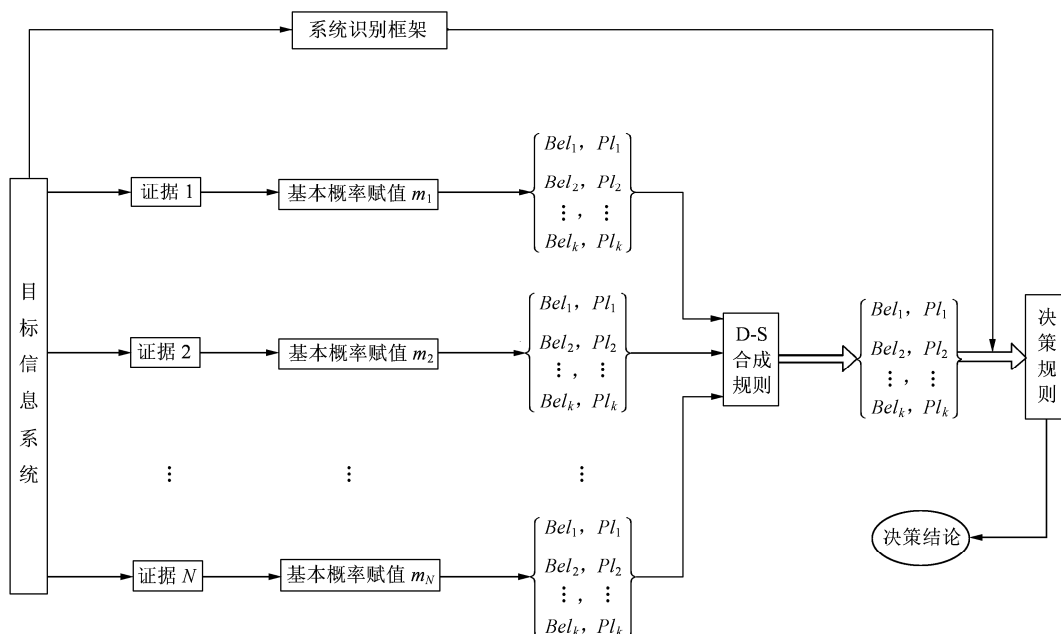


图 3 信息融合决策过程^[7, 8]

Fig.3 Process of information fusion^[7, 8]

(7) 根据决策规则得出决策结论。

3.2 底板突水数据融合模型

以陶阳煤矿 9901 工作面为例。由突水因素分析确定：系统的识别框架 $\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_k\} = \{\text{突水, 临界, 不突水, 不确定}\} = \{a, b, c, \theta\}^{[15-17]}$ ；证据识别框架的证据体 $E_i = \{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5\} = \{W, S, R, P, G\} (i=1, 2, 3, 4, 5)$ 。各证据体的基本概率赋值 $m(j) (j=a, b, c, \theta)$ 如表 2 所示，由专家结合统计案例给出。

表 2 基本概率赋值和数据融合表

Table 2 Basic probability evaluation and data fusion

主要因素	$m(a)$	$m(b)$	$m(c)$	$m(\theta)$	特征分类结果
E_1	0.400 0	0.150 0	0.400 0	0.050 0	不定
E_2	0.600 0	0.200 0	0.100 0	0.100 0	突水
E_3	0.300 0	0.300 0	0.300 0	0.100 0	不定
E_4	0.400 0	0.100 0	0.400 0	0.100 0	不定
E_5	0.400 0	0.150 0	0.450 0	0.000 0	不突水
E_{12}	0.681 3	0.120 9	0.186 8	0.011 0	不确定
E_{123}	0.678 4	0.127 1	0.191 9	0.002 7	不确定
E_{1234}	0.734 7	0.055 5	0.209 5	0.000 3	突水
E_{12345}	0.741 0	0.021 1	0.237 9	0.000 0	突水

3.3 基于 D-S 证据理论的数据融合

根据 D-S 证据理论，对表 2 中影响突水的 5 个主要因素 $\{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5\} = \{W, S, R, P, G\}$ 进行融合^[18, 19]，其结果见表 2。

以 E_{12} 计算过程^[20-22]为例：

$$c = 1 - \sum_{A_k \cap E_i = \emptyset} m_1(A_k)m_2(E_i) = \sum_{A_k \cap E_i \neq \emptyset} m_1(A_k)m_2(E_i)$$

$$c_1 = 1 - [0.4(0.2 + 0.1) + 0.15(0.6 + 0.1) + 0.4(0.6 + 0.2)] = 1 - 0.545 = 0.455$$

$$c_1^{-1} = 2.1978$$

$$E_{12}(a) = 2.1978 \times (0.4 \times 0.6 + 0.4 \times 0.1 + 0.6 \times 0.05) = 2.1978 \times 0.31 = 0.6813$$

$$E_{12}(b) = 2.1978 \times (0.15 \times 0.2 + 0.15 \times 0.1 + 0.2 \times 0.05) = 2.1978 \times 0.055 = 0.1209$$

$$E_{12}(c) = 2.1978 \times (0.4 \times 0.1 + 0.4 \times 0.1 + 0.1 \times 0.05) = 2.1978 \times 0.085 = 0.1868$$

$$E_{12}(\theta) = 1 - E_{12}(a) - E_{12}(b) - E_{12}(c) = 1 - 0.6813 - 0.1209 - 0.1868 = 0.011$$

由融合结果可知，陶阳煤矿 9901 工作面经过 4 次融合后， $m(a)=0.7410$ ，不确定性 $m(\theta) \approx 0$ ，由此可判定 9901 工作面为突水。

表 1 中其他 6 个工作面通过上述相同的方法，经过最多 4 次融合后， $m(a)$ 数值明显提高，不确定性 $m(\theta)$ 趋于 0。

3.4 融合结果分析

通过表 2, 3 还可以看出，仅用单一的证据对突水的安全性进行识别信任程度比较低，很难准确识别突水的类型^[23]；而利用多证据体的融合信息对突水的安全性进行识别，可以有效地提高突水安全性的正确识别率。从突水安全性识别的实例中可以看出，随融合证据的增加 $m(\theta)$ 明显减小，5 个证据最多经过四次融合后的 $m(\theta)$ 接近“0”，比单一的证据信息的不确定性大大降低，说明多证据信息的融合减小了突水安全性识别的不确定性；同时经过 4 次融合后“突水”的可信度为 0.741，其差距随证据的增加也更加明显，使融合后的基本概率分配较融合前各证据信息的基本概率分配具有更好的可分性^[24]；最后基于最大组合的 BPA，确定突水类型为“突水”，从而提高了矿井水害安全决策系统对突水类型的分类识别能力。此实例说明了 D-S 证据理论用于矿井突水预报的融合处理是可行的。同时也说明必须选择矿井突水敏感的特征信息作为证据信息才能有利于系统的特征识别和进行突水的决策。

4 案例决策结果对比与分析

突水概率指数法所解决的只是对开采工作面底板突水可能性大小的判断，而这种判断的可信程度则要通过 D-S 证据理论的应用来进一步确定，这样就提高了对工作面底板是否会发生突水判断结论的准确性。以上采用突水概率指数法和 D-S 证据理论对肥城煤田陶阳煤矿 9901 工作面底板突水案例进行了分析与决策。突水概率指数法得出的突水概率指数 $E = 0.66$ ，由专家按决策规则判别为突水，但专家所判断突水结论的可信度大小是未知的，即无法获得突水概率指数 E 的可信度。而基于 D-S 证据理论，经过多次融合后(见表 3)，得出陶阳煤矿 9901 工作面“突水”的 BPA 即 $m(a)=0.7410$ ，“临界突水”的 BPA 即 $m(b)=0.0211$ ，“不突水”的 BPA 即 $m(c)=0.2379$ ，“不确定”的 BPA 即 $m(\theta) \approx 0$ 。由此在突水概率指数 $E = 0.66$ 的基础上，判别陶阳

煤矿 9901 工作面突水的支持度为 0.741 0, 即突水概率指数为 0.66 的可信度为 74.1%, 为决策的可靠性提供了有力的支持。实践证明, 肥城煤田陶阳煤矿 9901 工作面在开采过程中发生了 $347 \text{ m}^3/\text{h}$ 的底板突水, 决策结果与实际相符合。由此可知, 基于突水概率指数法和 D-S 证据理论的 2 级底板突水决策模型, 对于帮助现场技术人员对具体工作面底板是否会发生突水的有效判断, 具有一定的实际指导意义和应用价值。

5 结 论

(1) 介于矿井底板突水是涉及因素复杂、量纲不一、定性定量同时并举的特点, 将现代信息融合理论和技术运用到矿井底板突水预测理论研究之中是一种新的探索。该方法能够为现场技术人员对工作面底板是否会发生突水的决策提供一种辅助方法。

(2) 实践证明, 尽管突水概率指数法能够较好地指导现场人员判断底板是否会发生突水, 但不能给出这中判断的可信度。而基于多属性决策和 D-S 证据理论的底板突水两级决策模型, 不仅能够给出突水的概率, 而且能够给出对应概率的可信度, 这就为现场科技人员正确决策增加了依据。

(3) 实例应用证明, 经证据体的多次融合, 能够提高突水概率的可信度, 降低不确定性, 证明基于多属性决策和 D-S 证据理论建立的工作面底板突水 2 级融合决策模型在肥城煤田的应用是有效的和可行的, 对现场矿井水害的防治具有一定的指导意义。

参考文献(References):

- [1] 韩 进, 朱 鲁, 程久龙. 煤矿水害预测软件开发[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(5): 589 - 591.(HAN Jin, ZHU Lu, CHENG Jiulong. Software development for forecasting inundation in the coal mine[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003, 22(5): 589 - 591.(in Chinese))
- [2] 施龙青, 韩 进, 宋 扬, 等. 用突水概率指数法预测采场底板突水[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(5): 442 - 444.(SHI Longqing, HAN Jin, SONG Yang, et al. Forecast of water inrush from mining floor with probability indexes[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1999, 28(5): 442 - 444.(in Chinese))
- [3] 康耀红. 数据融合理论与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1997.(KANG Yaohong. Data fusion theory and its applications[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 1997.(in Chinese))
- [4] 刘同明, 夏祖勋, 解洪成. 数据融合技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.(LIU Tongming, XIA Zuxun, XIE Hongcheng. Data fusion technology and its application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.(in Chinese))
- [5] 刘晓明, 赵明华, 王昌衡. 基于专家系统和证据理论的路面破损原因评价方法研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(7): 41 - 44.(LIU Xiaoming, ZHAO Minghua, WANG Changheng. Study on evaluation method for pavement deterioration causes based on expert system and evidence theory[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(7): 41 - 44.(in Chinese))
- [6] 韩立岩, 周 芳. 基于 D-S 证据理论的知识融合及其应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(1): 65 - 68.(HAN Liyan, ZHOU Fang. Knowledge fusion based on D-S evidence theory and its application[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(1): 65 - 68.(in Chinese))
- [7] 孙 锐, 孙上媛, 葛云峰. 基于 D-S 证据理论的基本概率赋值的获取[J]. 现代机械, 2006, (4): 22 - 23.(SUN Rui, SUN Shangyuan, GE Yunfeng. How to obtain the basic probability evaluates in D-S theory[J]. Modern Machinery, 2006, (4): 22 - 23.(in Chinese))
- [8] 何 兵, 郝爱民, 赵沁平. 一种基于不确定信息的决策方法[J]. 计算机学报, 2004, 27(2): 281 - 285.(HE Bing, HAO Aimin, ZHAO Qinqing. A decision making method based on uncertain information[J]. Chinese Journal of Computers, 2004, 27(2): 281 - 285.(in Chinese))
- [9] 王永成, 王宏飞, 杨成梧. 目标属性信息相关时融合识别的实现方法[J]. 兵工学报, 2005, 26(3): 338 - 342.(WANG Yongcheng, WANG Hongfei, YANG Chengwu. Method of implementation of fusing correlated attribute information in target recognition[J]. Ordnance Journal, 2005, 26(3): 338 - 342.(in Chinese))
- [10] 吴 蔚, 张海波, 王道席. 基于多证据融合模型的洪水预测研究[J]. 水力发电, 2005, 31(12): 22 - 24.(WU Wei, ZHANG Haibo, WANG Daoxi. Study of flood prediction based on multi-evidential fusion model[J]. Hydroelectric Power, 2005, 31(12): 22 - 24.(in Chinese))
- [11] XU L J, CHEN Y Z, CUI P Y. Improvement of D-S evidential theory in multisensor data fusion system[C]// Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou: [s.n.], 2004: 3 124 - 3 128.
- [12] 陈良周. 信息融合中的随机集理论及其在目标识别中的应用研究

- [博士学位论文][D]. 上海: 上海交通大学, 2006.(CHEN Liangzhou. Information fusion of random set theory and its application to target recognition of applied research[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2006.(in Chinese))
- [13] 李宏坤. 基于信息融合技术船舶柴油机故障诊断方法的研究与应用[博士学位论文][D]. 大连: 大连理工大学, 2003.(LI Hongkun. Based on information fusion technology for marine diesel engine fault diagnosis method research and application[Ph. D. Thesis][D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.(in Chinese))
- [14] 朱春龙. 城市水环境系统控制决策支持技术研究[博士学位论文][D]. 南京: 河海大学, 2005.(ZHU Chunlong. Urban water environmental system control decision support technology research[Ph. D. Thesis][D]. Nanjing: Hohai University, 2005.(in Chinese))
- [15] 田景文. 地下油藏的仿真与预测[博士学位论文][D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2001.(TIAN Jingwen. Underground reservoir simulation and prediction[Ph. D. Thesis][D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2001.(in Chinese))
- [16] 龚本刚. 基于证据理论的不完全信息对属性决策方法研究[博士学位论文][D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.(GONG Bengang. Based on evidence theory with incomplete information on attribute decision making method[Ph. D. Thesis][D]. Hefei: China University of Science and Technology, 2007.(in Chinese))
- [17] 王 健. 大坝安全监控集成智能专家系统关键技术研究[博士学位论文][D]. 南京: 河海大学, 2002.(WANG Jian. Dam safety monitoring expert system for integrated intelligent key technology research[Ph. D. Thesis][D]. Nanjing: Hohai University, 2002.(in Chinese))
- [18] 何金灿. 信息融合技术在矿井通风系统安全评价中的应用研究[硕士学位论文][D]. 南京: 河海大学, 2005.(HE Jincan. Information fusion technology in the mine ventilation system safety assessment of the applied research[M. S. Thesis][D]. Nanjing: Hohai University, 2005.(in Chinese))
- [19] 李小春. 多源遥感影像融合技术及应用研究[博士学位论文][D]. 郑州: 信息工程大学, 2005.(LI Xiaochun. Multi-source remote sensing image fusion technique and application[Ph. D. Thesis][D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2005.(in Chinese))
- [20] HU X Z, XIE C X. Security operation center design based on D-S evidence theory[C]// Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Luoyang: [s.n.], 2006: 25 - 28.
- [21] JIA Y Q, WANG P X, LI Y. Study of manufacturing system based on neural network multi-sensor data fusion and its application[C]// International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing Changsha, China-October. [S.l.]: [s.n.], 2003: 1 022 - 1 026.
- [22] XU W, QIN Y, HUANGHOUUAN. A new method of railway passenger flow forecasting based on spatio-temporal data mining[C]// 2004 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. Washington, D. C., USA: [s.n.], 2004: 402 - 405.
- [23] LIU H, DONALD E B. A new point process transition density model for space-time event prediction[C]// IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part: Applications and Reviews. [S.l.]: [s.n.], 2004: 310 - 324.
- [24] SAM Y S, ZHAO L, CHEW L T, et al. Forecasting association rules using existing data sets[C]// IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. [S.l.]: [s.n.], 2003: 1 448 - 1 459.