

文章编号: 1000-582X(2011)09-090-05

# 粗糙集-神经网络理论在矿井通风系统评价中的应用

王宏图<sup>a,b</sup>, 黄振华<sup>a,b</sup>, 范晓刚<sup>b</sup>, 袁志刚<sup>a,b</sup>, 江记记<sup>a,b</sup>

(重庆大学 a. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室;

b. 复杂煤气层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 针对矿井通风系统神经网络评价法中建立样本的不稳定性问题, 开展了基于粗糙集和 BP 神经网络理论的通风系统综合评价研究。以某矿井通风系统为研究对象, 应用粗糙集数据分析系统对矿井通风系统评价指标的原始数据样本的分类质量进行了检验; 在此基础上, 基于人工神经网络理论, 建立了矿井通风系统的粗糙集-神经网络评价模型, 从而形成了一种新的基于粗糙集-神经网络理论的矿井通风系统评价方法。研究表明, 经过模型的数据检验和应用性验证, 其理论评价结果与实际情况相符, 且网络总误差小于 0.004; 这说明基于粗糙集-神经网络的综合评价方法在矿井通风系统评价中有很好的实际应用效果。

**关键词:** 煤矿; 粗糙集; BP 神经网络; 矿井通风系统

**中图分类号:** TD712

**文献标志码:** A

## The application of rough sets-neural network theory to mine ventilation system evaluation

WANG Hong-tu<sup>a,b</sup>, HUANG Zhen-hua<sup>a,b</sup>, FAN Xiao-gang<sup>b</sup>, YUAN Zhi-gang<sup>a,b</sup>, JIANG Ji-ji<sup>a,b</sup>

(a. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control; b. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** To solve the instability problem of established sample in the neural network evaluation method for mine ventilation system, a comprehensive evaluation of the ventilation system is carried out based on rough sets and BP neural networks. Taking the ventilation system of a mine as an example, the classification quality of raw data samples are tested by using rough set data analysis system. Then, based on artificial neural network theory, a rough sets-neural network evaluation model of a mine ventilation system is established and a new rough sets-neural network evaluation method of mine ventilation system is formed. The results show that, after the model validation of data and application, its theoretical evaluation results are in line with the actual situation, and the network total error is less than 0.004. It shows that the comprehensive evaluation method based on rough sets-neural networks has a good effect in evaluating mine ventilation system in practical application.

**Key words:** mine; rough set; BP neural networks; mine ventilation system

**收稿日期:** 2011-04-05

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50774106); 国家重点研究发展规划资助项目(2005CB221502); 国家自然科学基金创新群体基金资助项目(50921063); 川煤集团科技项目(2009-08)

**作者简介:** 王宏图(1959-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事矿山安全和煤气层理论及其工程应用领域的研究, (E-mail)htwang@cqu.edu.cn。

随着煤矿开采技术的不断完善,中国煤矿安全水平得到了很大的提高;但是,相对于发达国家,中国的煤矿安全状况仍处于较低水平。通风系统的稳定与否关系到整个矿井的安危,对通风系统进行安全评价是完善、优化通风系统的有效方法。因此,做好矿井通风系统评价工作就显得尤为重要。

目前,应用于通风系统的评价方法很多,如人工神经网络(ANN)评价法<sup>[1]</sup>、模糊(FUZZY)综合评价法<sup>[2]</sup>、灰色关联度分析法<sup>[3]</sup>等,各有自己的特点。但是,通风系统是一个多环节、动态性和模糊性的复杂大系统,单一的评价方法难以客观、全面的进行评价,于是,具有非线性、复杂性的交叉学科和理论成为研究的方向。近年来不少学者提出了综合集成的评价方法,所谓综合集成<sup>[4]</sup>的评价方法是将两种或两种以上的方法加以改造并结合,以便在评价方法中能考虑到更多的评价因素,综合利用各种方法所提供的信息,从而尽可能地提高评价水平和精度,使评价结果更客观。常用的综合集成方法如灰色关联度模糊综合评价<sup>[5]</sup>、层次分析法模糊综合评价<sup>[6]</sup>等。综合集成评价方法的提出为通风系统的安全评价提供了新的思路,提高了评价的准确度。粗糙集理论与方法是一种处理不精确或不确定数据和信息系统的有效方法。笔者基于粗糙集理论与方法和神经网络评价法,通过粗糙集数据分析系统(RSDA)实现对影响通风系统的众多因素的粗糙集数据分析,进行数据检验和约简,然后代入 MATLAB 编制的 BP 神经网络中训练、学习,最后得到矿井的评价等级。通过对实例的结果分析,得出粗糙集神经网络综合分析法的在实际中的有好的应用效果。

## 1 粗糙集理论

### 1.1 粗糙集简介

粗糙集理论<sup>[7,8]</sup>是波兰数学家 Z. Pawlak 于 1982 年提出的一种数据分析理论,它是一种新的处理模糊和不确定性知识的数学工具,其主要思想就是在保持分类能力不变的前提下,通过知识约简,导出问题的决策或分类规则。

粗糙集的约简是通过考察所研究的对象中的属性集合的独立与相关性来完成的。设  $U$  是一个论域,令  $R$  为定义在  $U$  上的一个等价关系簇,  $P \in R$ 。如果每个关系  $P \in R$  在  $R$  中都是不可省略的知识,则称关系簇  $R$  是独立的;否则  $R$  是相关的。如果  $R$  相关,则其中包含冗余关系,可以约简;如果  $R$  独立,则不可以约简。

### 1.2 粗糙集数据分析系统

粗糙集数据分析<sup>[9]</sup>(rough set data analysis, RSDA)是一种分析数据之间相关性和依赖性的一种数据挖掘工具方法。RSDA 利用各种算法,如 MLEM2<sup>[10]</sup>、QuickReduct 算法<sup>[11]</sup>、蚁群算法<sup>[12]</sup>等,进行属性约简并从数据中提取规则、寻找关键属性和属性值,从而进行预测和决策。它的优点是不需

要做人为的假设,规则的产生完全是由数据驱动<sup>[13,14]</sup>。

近年来,研究者在粗糙集与其他方法的结合应用方面做了积极的尝试,如 Alonge 等<sup>[15]</sup>利用粗糙集和模糊理论对向量函数的识别进行了研究;李仁璞等<sup>[16]</sup>利用粗糙集和神经网络对矿井分类进行了研究。

## 2 BP 神经网络

BP(Back Propagation Network)神经网络是目前应用最为广泛和成功的神经网络之一,它是在 1986 年由 Rumelhart 和 McClelland 提出的。常用的 BP 神经网络由输入层、输出层和中间层组成。结构如图 1 所示。BP 神经网络是利用网络的训练过程来获取权重,尽可能地消除了人为影响,利用训练好的网络进行评价得到的结果会更符合实际情况。BP 网络的学习过程分为两个阶段<sup>[17,18]</sup>:第一个阶段是输入已知学习样本,通过设置的网络结构和前一次迭代的权值和阈值,从网络的第一层向后计算各神经元的输出。第二个阶段是对权和阈值进行修改,从最后一层向前计算各权值和阈值对总误差的影响(梯度),据此对各权值和阈值进行修改。以上两个过程反复交替,直到达到收敛为止。

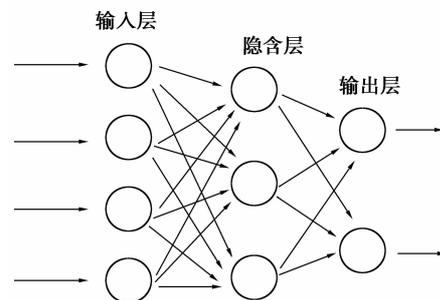


图 1 神经网络结构图

## 3 模型的建立

### 3.1 指标体系的建立

在通风系统评价中指标体系的建立是整个评价的基础,是关系评价准确性和可靠性的重要部分。在“安全可靠、技术可行、经济合理”的前提下,笔者依据矿井通风系统评价的内容并结合矿井通风系统的定义在通风动力、通风网络、通风设施、通风质量、抗灾防灾能力、矿井经济性等方面建立指标体系。

通风动力方面的指标为:通风机运转稳定性、通风机综合效率。其中,通风机运转稳定性可以通过通风机的喘振发生率来表征。两个指标反映了矿井通风动力的稳定性和经济性。

通风网络方面的指标为:通风网络复杂程度、矿井风压合理性。其中,矿井风压合理性可以用回风段阻力百分比来表征。两个指标反映了通风网络的复杂程度和分量分配的合理性。

通风设施方面的指标为:通风设施合格率。通风设施合格率反映了通风系统的稳定性和可靠性。

通风质量方面的指标为:矿井等积孔、矿井风量供需比、用风地点风量供需比、用风地点风质合格率、矿井通风能力比<sup>[19]</sup>(即在同生产时期内矿井的实际产量和核定的矿井的通风能力的比值),采区瓦斯超限频率。这些指标反映了矿井通风的风量、风质,是矿井安全可靠性的表征。

抗灾防灾方面的指标为:通风方式合理性、防灾设施合格率、反风系统合格率。抗灾防灾能力是矿井安全生产的重要保证。

矿用经济性方面的指标为:吨煤电耗比、通风机综合效率、矿井有效风量率。

以上指标紧紧围绕“安全可靠、技术可行、经济合理”的原则建立指标体系,指标之间的关系如图 2 所示。

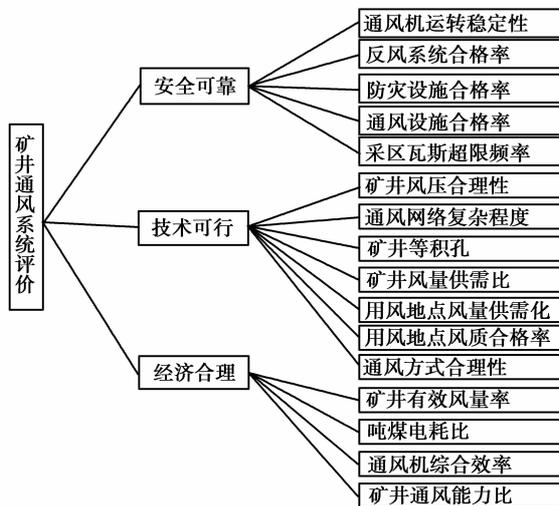


图 2 通风系统评价指标框图

### 3.2 模型的建立

以粗糙集理论和人工神经网络理论为基础建立模型。首先是建立通风系统评价体系的评价指标体系,收集相关的原始数据样本;然后,利用粗糙集数据分析方法对原始数据样本进行质量检验和属性约简,将约简后的数据样本作为人工神经网络的训练样本进行训练、学习,最后得到评价结果,其模型结构如图 3 所示。

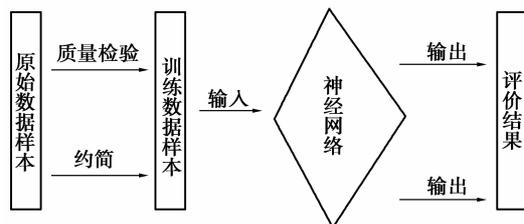


图 3 粗糙集-神经网络模型结构图

## 4 实例分析

### 4.1 样本选择

学习样本选择的数量适当性、数据准确性将直接决定训练网络的稳定性和精确性。因此,选取学习样本是建立神经网络的关键。目前,通风系统评价究竟采用那种评价方法还没有统一的意见,各个方法的评价指标也不相同。表 1<sup>[20]</sup>中选取 16 项指标中 8 项具体指标作为学习指标,采用理想的方法选取样本,为防止网络震荡,又加入了噪声样本。表 1 中  $a_1 \sim a_8$  分别代表  $a_1$  用风地点风量供需比、 $a_2$  矿井回风段阻力百分比、 $a_3$  采掘工作面瓦斯超限频率、 $a_4$  主要通风机喘振发生率、 $a_5$  防灾设施合格度、 $a_6$  井下通风安全状况漏检率、 $a_7$  矿井有效风量率、 $a_8$  用风区风流不稳定角联分支数。 $a_9 \sim a_{11}$  为噪声样本。 $a_{12}$  为矿井评价等级:0 代表待整改、0.5 代表基本合格、1 代表合格。

表 1 学习样本数据

$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$
1.096	29.05	0	0	95	0	96.10	0	0.8	0.1	0.1	1.0
1.038	23.80	0	0	98.8	0	96.40	0	0.8	0.1	0.1	1.0
1.096	19.95	0	0	86.9	0	80.80	0	0.8	0.1	0.1	1.0
1.010	15.75	0	0	96.5	0	71.20	0	0.8	0.1	0.1	1.0
1.040	16.80	0	0	97.3	0	85.30	0	0.8	0.1	0.1	1.0
1.552	36.70	2	1	85.8	1	68.95	2	0.1	0.8	0.1	0.5
0.864	41.20	2	1	81.1	1	68.35	1	0.1	0.8	0.1	0.5
1.472	4.00	2	1	87.4	2	69.92	2	0.1	0.8	0.1	0.5
1.784	38.20	1	1	81.1	2	62.20	1	0.1	0.8	0.1	0.5
1.216	43.20	3	1	82.3	1	68.95	2	0.1	0.8	0.1	0.5
0.170	65.35	8	3	62.4	9	56.55	4	0.1	0.1	0.8	0
2.840	63.70	4	6	70.4	8	27.3	3	0.1	0.1	0.8	0
0.250	56.55	4	2	39.2	7	15.60	3	0.1	0.1	0.8	0
3.260	70.10	5	7	70.4	11	27.30	6	0.1	0.1	0.8	0
0.920	46.65	7	3	74.4	6	50.05	4	0.1	0.1	0.8	0

### 4.2 样本检验和约简

利用 RSDA 系统软件 ROSE2 对表 1 进行分类质量数据分析,分析结果如表 2 所示,所得不可区分约简为  $\{a_{10}, a_{11}\}, \{a_9, a_{10}\}, \{a_5, a_{10}\}, \{a_2, a_{10}\}, \{a_1, a_{10}\}, \{a_8\}, \{a_7\}, \{a_6\}, \{a_4\}, \{a_3\}, \{a_2, a_9\}, \{a_5, a_9\}, \{a_9, a_{11}\}, \{a_1, a_2\}, \{a_1, a_5\}, \{a_1, a_{11}\}$ 。

表 2 分类质量检验结果

	正确率	错误率	遗失率
合计	100.00+- 0.00	0.00+- 0.00	0.00+- 0.00
0	50.00+- 50.00	0.00+- 0.00	0.00+- 0.00
0.5	50.00+- 50.00	0.00+- 0.00	0.00+- 0.00
1	40.00+- 48.99	0.00+- 0.00	0.00+- 0.00

从表 2 可知,样本分类测试平均准确率为 100%,得到样本质量为优秀。

4.3 样本训练与网络检验

采用 MATLAB 编制 BP 神经网络程序,流程框图如图 4 所示。

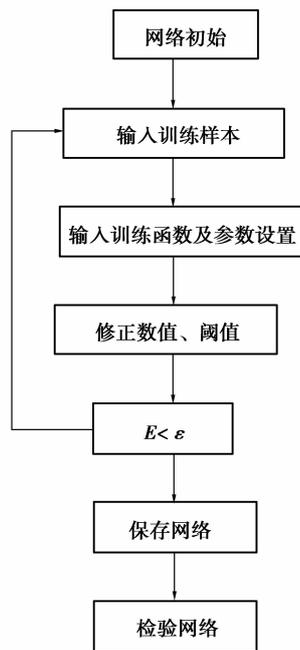


图 4 神经网络流程框图

所构建的 BP 神经网络采用计算速度快、收敛性好的 L-M 算法函数(trainlm)作为训练函数,应用纯线性函数(purelin)模式,设置学习系数为 0.1,最大步长为 300 步,训练目标误差为 0.000 01,学习系数的下降因子为 0.1,上升因子为 7。网络训练性能曲线如图 5 所示,网络只需 8 步即达到误差要求。将表 3 中随机抽取的检验数据代入训练好的网络,检验网络结果如表 4 所示,网络总误差小于 0.000 4,说明网络逼近极佳,准确性高,符合矿井通

风系统安全评价工作的要求。

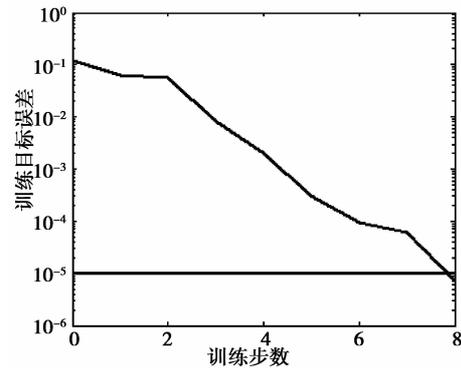


图 5 网络训练性能曲线

表 3 检验数据

样本序号	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$
1	1.096	19.95	0	0	86.9	0
2	1.472	4.00	2	1	87.4	2
3	0.920	46.65	7	3	74.4	6

样本序号	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$
1	80.80	0	0.8	0.1	0.1
2	69.92	2	0.1	0.8	0.1
3	50.05	4	0.1	0.1	0.8

表 4 检验网络结果

样本	序号	期望值	检验结果
检验样本	1	1.0	0.999 8
	2	0.5	0.500 2
	3	0	0.003 7

4.4 网络应用性验证

为检验网络的应用性能,将表 5<sup>[18]</sup>某矿井通风系统的实测数据代入网络,输出结果如表 6 所示,可得最佳逼近为 0.5,即矿井的评价等级为合格,结果与矿井实际情况相符。

表 5 矿井实测数据

$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$
1.65	39.65	3.00	0	94.50	0	85.50	0

表 6 实测检验结果

输出期望值	1	0.5	0
输出结果	0.781 5	0.550 9	0.721 5

5 结 语

1) 提出采用粗糙集数据分析系统对通风系统神

经网络评价法中收集的原始数据样本进行分类质量检验,得到数据样本质量。本文的数据样本检验分类质量平均准确率为100%,样本质量优秀。

2)应用实测数据检验网络,得到结果与实际相符,表明BP神经网络仿真效果良好。证明了粗糙集是神经网络样本分析及处理的有效方法。

3)粗糙集-人工神经网络综合评价法是对矿井通风系统安全评价理论的一个新的探索,未来的通风系统评价方法向智能化、快速化、精确化方向发展,将粗糙集-神经网络评价法从数据收集到得出评价结果做成一整套的系统是今后研究的方向。

#### 参考文献:

- [1] 程磊,杨运良,熊亚选. 基于人工神经网络的矿井通风系统评价研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(5): 88-91.  
CHENG LEI, YANG YUN-LIANG, XIONG YA-XUAN. Study of mine ventilation system assessment based on artificial neural network [J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(5): 88-91.
- [2] 苗磊刚,张国枢,秦汝祥. 矿井通风系统合理性模糊综合评判[J]. 矿业安全与环保, 2008, 35(1):61-63.  
MIAO LEI-GANG, ZHANG GUO-SHU, QIN RU-XIANG. Fuzzy comprehensive evaluation on reasonability of mine ventilation system [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2008, 35(1): 61-63.
- [3] 景国勋,姚嵘,张甫仁. 矿井通风系统合理性的灰色综合评判[J]. 中国安全科学学报, 2001, 11(4): 65-68.  
JING GUO-XUN, YAO RONG, ZHANG FU-REN. Grey comprehensive judgment for the reliability of mining ventilation system [J]. China Safety Science Journal, 2001, 11(4): 65-68.
- [4] 李润求,施式亮,彭新. 矿井通风系统安全评价方法及发展趋势[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(1): 112-118.  
LI RUN-QIU, SHI SHI-LIANG, PENG XIN. Summarization of safety assessment methods for mine ventilation system [J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(1): 112-118.
- [5] 盛玉学,秦书玉. 矿井通风系统方案模糊灰色信息差异理论评价[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(1): 34-36.  
SHENG YU-XUE, QIN SHU-YU. Estimation method of fuzzy gray different information theory in comparative study of mine ventilation system [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(1):34-36.
- [6] 谢贤平,冯长根,赵梓成. 矿井通风系统模糊优化研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(4): 379-382.  
XIE XIAN-PING, FENG CHANG-GEN, ZHAO ZI-CHENG. Research on fuzzy optimization for mine ventilation systems [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(4): 379-382.
- [7] PAWLAK Z. Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [8] 张文修,吴伟志,梁吉夜,等. 粗糙集理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [9] PAWLAK Z. Rough set; theory and its application to data analysis [J]. Cybernetics and Systems, 1998, 29 (7): 661-688.
- [10] GRZYMALA-BUSSE J W. MLEM2-discretization during rule induction [C] // The 2003 International Intelligent Information Processing and Web Mining, June 2-5, 2003, Zakopane, Poland. [S.l.]: Springer, [2003]: 499-508.
- [11] JENSEN R, SHEN Q. Fuzzy-rough sets for descriptive dimensionality reduction [C] // The 11th International Conference on Fuzzy Systems, May 12-17, 2002, Honolulu, USA. [USA]: IEEE, [2002-08-07]: 29-34.
- [12] THANGAVEL K, KARNAN M, JEGANATHAN P, et al. Ant colony algorithms in diverse combinational optimization problems-a survey [J]. International Journal on Automatic Control and System Engineering, 2006, 6(1): 7-26.
- [13] 张雪峰,张庆灵. 粗糙集数据分析系统 MATLAB 仿真工具箱设计[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2007, 28(1): 40-43.  
ZHANG XUE-FENG, ZHANG QING-LING. Design of MATLAB simulation tool box for rough set data analysis system [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2007, 28(1): 40-43.
- [14] 张雪峰,石凡,郝丽娜,等. 粗糙集数据分析系统的程序实现[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2004, 24(3): 66-70.  
ZHANG XUE-FENG, SHI FAN, HAO LI-NA, et al. Program realization of rough set data analysis systems [J]. Journal of Liaoning University of Petroleum and Chemical Technology, 2004, 24(3): 66-70.
- [15] ALONGE F, D' IPPOLITO F, PIXXUTO G, et al. Identification of nonlinear vectorial functions by means of rough set and fuzzy logic theories [C] // the 1998 IEEE International Conference on Control Applications, September 1-4, 1998, Trieste, Italy. [S.l.]: IEEE, [2002-08-06]: 942-947.
- [16] LI R P, WANG Z O. Mining classification rules using rough sets and neural networks [J]. European Journal of Operational Research, 2004, 157(2): 439-448.
- [17] 周开利,康耀红. 神经网络模型及其 MATLAB 仿真程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [18] 朱大奇,史慧. 人工神经网络原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [19] 程磊,杨运良. 矿井通风系统评价指标体系的研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(3): 91-94.  
CHENG LEI, YANG YUN-LIANG. Study on assessment index structure of mine ventilation system [J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(3): 88-91.
- [20] 陈君. 基于人工神经网络的矿井通风系统安全可靠性评价[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(3): 60-63.  
CHEN JUN. Based on artificial neural network security and reliability evaluation of mine ventilation system [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2007, 34(3): 60-63.