DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)02-0167-05.

基于自调整模糊分析的煤矿通风量调节方法

白水全[1]，王 磊[2]

（1.国电建投内蒙古能源有限公司察哈素煤矿，内蒙古 鄂尔多斯 017209；
2.煤炭科学技术研究院有限公司矿山智能通风事业部，北京 100028）

摘 要：在煤矿通风量的调节工作中，面对复杂的工况，调节方法适应性比较差，存在一定的调节延迟和风量误差。提出基于自调整模糊分析的煤矿通风量调节方法。计算风机的各项工作参数，确定风量初值，利用自调整模糊分析技术建立模糊控制器，将风机各项参数作为输入量，经过模糊处理、模糊决策等流程，计算需风量，同时建立煤矿通风系统能耗方程，以能耗最低为目的，结合需风量计算结果，调节煤矿通风量。实验结果表明：面对不同的工况，提出的调节方法在风量调节上相对误差小，调节延迟低速度快，在实际应用上具有良好的适应性。

关键词：自调整；模糊分析；煤矿通风网络；通风量调节
中图分类号：TP273 文献标识码：A 文章编号：1003-7241(2025)02-0167-05

Coal Mine Ventilation Volume Adjustment Method Based on Self-adjusting Fuzzy Analysis

BAI Shui-quan[1], WANG Lei[2]

(1. Cec Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Chahasu Coal Mine, Erdos, Ordos 017209 China;
2. Mine Intelligent Ventilation Department, Coal Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028 China)

Abstract: In the regulation of coal mine ventilation, in the face of complex working conditions, the adaptability of the regulation method is poor, and there are certain adjustment delays and air volume errors. A method of coal mine ventilation regulation based on self-adjusting fuzzy analysis is proposed. It calculates the working parameters of the fan, determines the initial value of the air volume, establishes a fuzzy controller using the self-adjusting fuzzy analysis technology, takes the parameters of the fan as the input, calculates the air demand through fuzzy processing, fuzzy decision-making and other processes, and establishes the energy consumption program of the coal mine ventilation system, so as to adjust the coal mine ventilation volume with the lowest energy consumption as the purpose, combined with the calculation results of the air demand. The experimental results show that the proposed regulation method has small relative error in air volume regulation, low regulation delay and fast regulation speed under different working conditions, and has good adaptability in practical application.

Keywords: self-adjustment; fuzzy analysis; coal mine ventilation network; ventilation volume regulation

0 引言

通风量调节是煤矿安全生产的重要组成部分，合理使用通风量可以有效地防止事故发生。由于矿井通风系统所造成的破坏和不正常涌出现象是煤矿安全事故高发最主要原因[1-3]。因此需要对井下采掘工作面进行动态监测，在矿井合理控制总进风量、有效控制总进风额、确保通风正常工作、保证巷道回采率提高的基础上，严格控制采掘工作面总进风量(以下简称通风量)，做到在出现事故时先控制掘进工作面总进风额，使其降低或不降低而能安全生产；当出现事故后迅速将采掘工作面总进风额降低或停止增加通风量，减少和避免由突发性灾害造成生产秩序紊乱[4-6]。

在煤矿通风量的调节上，国外煤矿采用的调节方法多数是与通风机相结合，在调节上具有比较好的自动化，避免手动操作的能源浪费和人力成本的增加[7]。在国内研究中，传统的调节方法采用手动控制启动，经过不断发展和技术更新后，逐渐研发出自动变频调节的方法，但是面对比较复杂的工况，一些方法在风量调节上无法达到良好的调节效果[8]。如文献[9]中提到的基于改进粒子群的方法，该方法以风量平衡定律和风压平衡定律作为依据，建立约束条件，改进粒子群算法，利用改进计算出最佳通风量并完成风量的调节，该方法在风量的计算上具有一定优势，但是在复杂的工况下，存在轻微的调节延

*基金项目：国家能源投资集团科研项目(GJNY-21-7)“察哈素煤矿全矿井智能通风系统开发研究项目”
收稿日期：2023-11-29

迟，需要改进。文献[10]中提到的基于粗糙集的调节方法存在类似的问题，该方法利用粗糙集降低了计算数据的冗余性，但是依然存在调节延迟问题。因此，提出基于自调整模糊分析的煤矿通风量调节方法，利用自调整模糊分析技术解决常见的调节方法中存在的问题。

1 煤矿通风量调节方法设计

1.1 确定风机参数

以《煤矿安全规程》作为依据，计算出巷道条件下，风筒出口到射流方向的最远距离[11]。计算公式如下：

$$d_s=(4\sim5)\sqrt{S} \tag{1}$$

式中，S表示巷道断面。为达到理想的风量调节效果，默认风筒出口到工作面距离小于d_s。

根据流体力学原理可知，确定风机各项参数之间的关系。

$$\frac{W_1}{W_2}=\frac{n_1}{n_2} \tag{2}$$

$$\frac{H_1}{H_2}=\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \tag{3}$$

$$\frac{P_1}{P_2}=\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \tag{4}$$

式中，n_1和n_2表示不同工况下的转速，W_1和W_2分别表示n_1和n_2两种情况下的风量，H_1和H_2表示n_1和n_2两种情况下的风压，P_1和P_2表示n_1和n_2两种情况下的轴功率[12]。根据以上参数即可确定任意转速时的风量：

$$W_2=W_1\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \tag{5}$$

式中，W_2表示风机转速为n_2时的输出风量，n_1表示风机额定风速。

由上述公式即可确定风机的各项参数以及实时的输出风量，在调节煤矿通风机风量时，根据风机输出风量和实际环境的需风量确定调节风量。

1.2 基于自调整模糊分析的需风量计算

煤矿通风的需风量一般使用下面的公式计算：

需风量=掘进工作面风量+空气泄漏量+道路风量+其他风量

其中，掘进工作面风量是指需要通过通风系统为工作面供氧、排放有害气体和热量的空气量；空气泄漏量包括采区支架和巷道的漏风量；道路风量是指供应井下所有用电设备所需要的风量；其他风量包括采矿工艺用风、空调通风等。

具体的计算方法需要结合实际情况，例如工作面的长度、采煤机数量、采煤速度、采煤工艺、巷道的长度和截面积、风路阻力等因素进行综合考虑。因此，在实际应用中，需要根据煤矿的具体情况进行细致的计算和分析才能得到合理的需风量。

利用自调整模糊分析技术建立模糊控制器，利用模糊控制器处理各项参数数据，将精确的需风量计算转化为不同的模糊等级，经过离散化处理，得到精确量。建立的模糊控制器如图1所示。

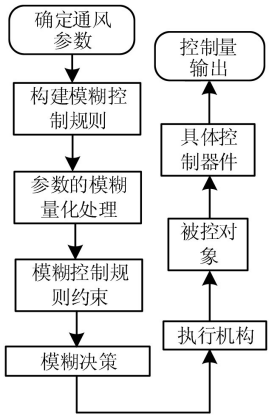


图1 模糊控制器结构

在获得目标精确量后，将精确量的基本论域转化为模糊子集论域，计算公式为：

$$y=\frac{2m}{b-a}\left[x-\frac{a+b}{2}\right] \tag{6}$$

式中，$[a,b]$表示输入量的实际范围，也就是输入量的基本论域，m表示输入量离散后对应的等级，也是与基本论域对应的模糊集论域$(-m,m)$。

利用式(6)完成输入量从基本论域到模糊集论域的映射，在确定输入量的基本论域和模糊集论域后，在得到经过模糊处理后的精确值后，将精确值的模糊论域转换为基本论域。计算公式为：

$$u=\frac{a+b}{2}+\frac{b-1}{2m}U \tag{7}$$

式中，U表示输入量的基本论域。对基本论域中的任意一个元素在模糊集中都有对应的一个元素$A(x)\in[0,1]$，利用取值区间$(0,1)$的隶属度函数表征元素的模糊等级。模糊分布的隶属度函数如下：

$$\mu_A=\begin{cases}\dfrac{x-a}{b-a},a\le x\le b\\ 1,b\le x\le c\\ -\dfrac{d-x}{d-c},c\le x\le d\\ 0,x<a,x>d\end{cases} \tag{8}$$

经过隶属度函数计算后，完成模糊决策，确定输出值。考虑到环境温度对风量的影响，将环境温度输入到模糊控制器中，计算出最终的需风量。计算公式为：

$$W=W_0+\Delta W \tag{9}$$

$$\Delta W=\mu_1*|T_e|+\mu_2*|T_{ec}| \tag{10}$$

式中，W表示在某一控制周期内的需求风量，T_e表示温度偏差，W_0表示风量初值，T_{ec}表示温度偏差的变化量，△W表示控制周期内的风量增量，μ_1和μ_2表示温度偏差和温度变化率对应的调节系数。经过模糊控制器的计算和反馈，确定最终的需风量。

1.3 调节通风机风量

煤矿环境中，通风动力主要来自主通风机，在调节通风机风量前，建立煤矿通风系统能耗方程。表示如下：

$$\min f\left(fh,fw\right)=\sum_{j\in L}fh_j fw_j \tag{11}$$

式中，L表示风机总数，$fh_i fw_i$表示通风系统中支路j上的所有风机风压和风量。

约束通风网络中的风阻、风压、风量：

$$\sum_{j=1}^{N_i}a_{ij}W_j=0 \tag{12}$$

$$a_{ij}=\begin{cases}-1,j\text{支路风量流出}i\text{节点}\\1,j\text{支路风量流入}i\text{节点}\\0,j\text{支路与}i\text{节点无关}\end{cases} \tag{13}$$

式中，N_i表示节点i的所有支路总数。

上述为风量约束公式，风压约束公式如下：

$$\sum_{j=1}^{M_i}b_{ij}\left(H_j+\Delta H_j-P_j-fh_j\right)=0 \tag{14}$$

$$b_{ij}=\begin{cases}1,\text{回路}i\text{同向包含支路}j\\-1,\text{回路}i\text{异向包含支路}j\\0,\text{回路}i\text{不包含支路}j\end{cases} \tag{15}$$

式中，M_i表示回路i中包含的所有支路总数。根据以上公式确定风量风压的上下限，进而计算出通风网络中任意一个支路的风量。计算公式为：

$$W_j=\sum_{s=1}^{k}Z_{sj}W_s+\sum_{s=k+1}^{b}Z_{sj}W_s \tag{16}$$

式中，Z_{sj}表示独立回路矩阵。利用以上公式建立风量调节模型，表示为：

$$\min f\left(fh,fw\right)=\sum_{j\in L}fh_j\left(\sum_{s=1}^{k}Z_{sj}W_s+\sum_{s=k+1}^{b}Z_{sj}W_s\right) \tag{17}$$

利用调节模型，以计算的需风量为依据，完成最低能耗的煤矿通风量调节。至此，基于自调整模糊分析的煤矿通风量调节方法设计完成。

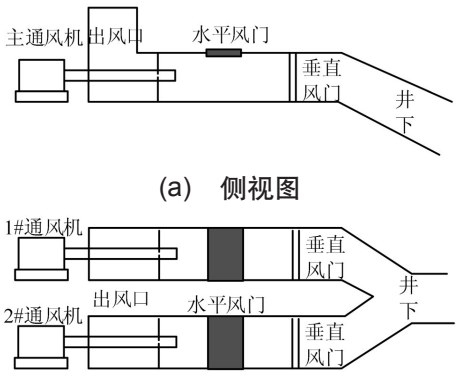
2 实验研究

针对设计的煤矿通风量调节方法，为验证该方法对于不同工况下的适应性，设计两组对比实验，并以文献[9]风量调节方法和文献[10]风量调节方法作为比较对象，通过实验结果说明各个调节方法的性能。

2.1 实验准备

在实验中，以某矿区的实际工况作为参考，参考其中的通风结构，利用计算机软件搭建实验环境，煤矿通风系统结构如图2所示。

根据煤矿通风系统的基本结构，采用MATLAB软件仿真实验环境。在MATLAB工作空间中，点击[文件]/[新建]/[模型]，创建并保存模型文件，添加控件，将控件拖动到Simulink左侧资源栏的模型文件中，设置连接线；利用函数将通风网络生成模块化描述，在Simulink中调用，进而生成煤矿通风系统结构，查看系统仿真输出。具体程序如下：



(a) 侧视图

(b) 俯视图

图2 煤矿通风系统结构

MATLAB仿真程序如下：

```
%设置模糊集合和规则库
speed=[0 120 170];%风机转速
airflow=[0 100 150 200];%通风量
speedMF={'Slow','Medium','Fast'};%转速模糊集
airflowMF={'Low','Medium','High'};%通风量模糊集
ruleList=[1,1,1,2,2,2,3,3,3;1,2,3,1,2,3,1,2,3;1,1,1,2,2,2,3,3,3];%规则库
%生成输入随时间变化的数据
t=0:0.1:10;%时间序列
%绘制输入随时间变化的曲线
figure;
subplot(2,1,1);
plot(t,sp,'b','LineWidth',2);
xlabel('Time(s)');
ylabel('Fan Speed(rpm)');
title('Fan Speed Variation with Time');
% 基于自调整模糊分析进行通风量调节
for i=2:n
%获取当前实际转速和通风量
currentSpeed=sp(i);
currentAirflow=af(i-1);
%设置输入变量的隶属度函数
speedDegree=trapmf(currentSpeed,speed);
airflowDegree=trimf(currentAirflow,airflow);
%对规则库进行模糊推理
```

```
ruleDegree=zeros(1,9);%规则凭证度初始化为0
for j=1:size(ruleList,2)
ruleDegree(j)=min(speedDegree(ruleList(1,j)),airflowDegree(ruleList(2,j)));
end
```

该程序采用MATLAB软件，基于自调整模糊分析方法，实现了煤矿通风量的智能调节。在程序中，广泛使用了MATLAB的数学计算和绘图函数，以及模糊逻辑工具箱中的模糊集合、模糊推理、输出去模糊化等函数。程序中的输入包括时间序列和风机转速等数据，通过设定转速模糊集、通风量模糊集和规则库等参数，进行自调整模糊分析，得到相应的输出通风量。最后，程序绘制了输入随时间变化和输出随时间变化的曲线，直观地展示了煤矿通风量的调节结果。

在此基础上，以真实的井下巷道风量要求作为依据，设计实验方案。井下巷道风量要求如表1所示。

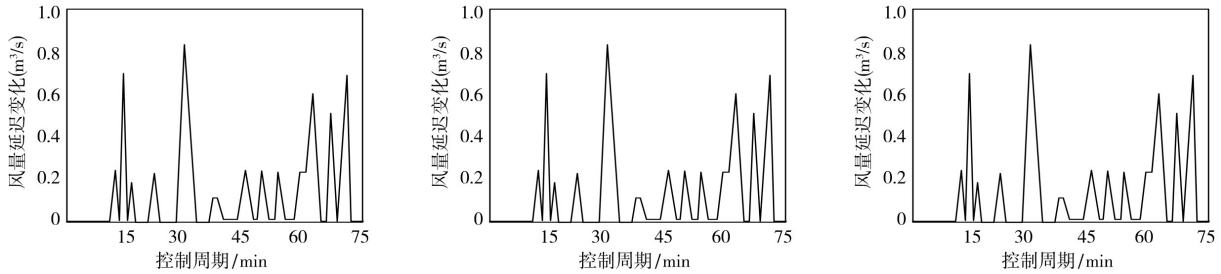
以表1中的风量控制要求作为后续实验中煤矿通风量调节的依据，分别使用提出的风量调节方法、文献[10]提出的基于粗糙集的风量调节方法以及文献[9]提出的基于改进粒子群的风量调节方法在上述实验环境中调节通风量，在调节完成后利用计算机输出风量调节延迟实验结果和风量调节误差，综合两组实验结果共同分析各个调节方法的性能。

表1 井下巷道风量控制要求

编号	巷道	风速区间/m·s^{-1}
1	风桥	[0,10]
2	掘进岩巷	[0.15,4]
3	架线电机车巷道	[1.0,8]
4	进、回风巷	[0,8]
5	通风人行巷道	[0.15,0]
6	上下料专用井	[1,12]
7	人物上下井	[0,8]
8	专用通风井和风硐	[0,15]
9	运输机巷,作业面风巷	[0.25,6]
10	采面、掘进煤巷	[0.25,4]

2.2 风量调节延迟实验结果与分析

考虑到调节煤矿通风量过程中，不同风门调节量相差比较大，有些调节过程中存在风门维持不动的情况，在实际调节过程中可能会存在一些时间延迟，影响调节效果。因此，在实验中，设计相同的控制周期，利用不同调节方法调节通风量并记录风量调节变化曲线，输出变化曲线与实际调节的通风量的延迟差曲线，分析各个调节方法的延迟情况。实验结果如图3所示。



(a) 基于粗糙集的通风量调节方法实验结果　(b) 基于改进粒子群的通风量调节方法实验结果　(c) 提出的通风量调节方法实验结果

图3 不同调节方法风量调节延迟实验结果

观察图3中结果可知，基于粗糙集的风量调节方法在有效的实验周期内，风量调节延迟波动在0～0.8 m^3/s左右，整体波动比较大；基于改进粒子群的调节方法存在同样的情况，风量调节延迟波动在0～0.6 m^3/s左右；提出的通风量调节方法风量调节延迟波动在0.1 m^3/s以内，并且在实验周期内多数时间延迟为0，说明风量调节及时有效延迟小。总的来说，提出的基于自调整模糊分析的调节方法响应及时、调节效果更好。

2.3 风量调节误差实验结果及分析

在风量调节误差实验中，以煤矿通风机的标准工况作为实验条件，模拟不同的风机开启情况，均以达到标准通风为目的，采用不同的调节方法调节通风量，在此过程中，利用计算机计算出各个风量调节方法的相对误差和调整步数。实验中煤矿通风机的工况曲线如图4所示。

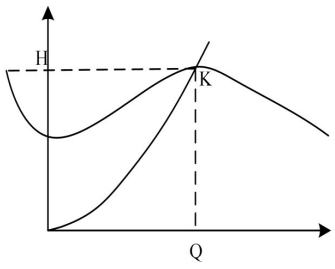


图4 煤矿通风机工况曲线

图4中，H表示风机风压，Q表示风机风量，K点表示驼峰顶点，其左侧表示风机工作不稳定区域，右侧表示风机工作稳定区。各个风量调节方法的实验结果表2所示。

通过表2中数据可以看出，在不同的风机开启情况

下，各个调节方法的风量调整步数各不相同，对比观察可知，提出的通风量调节方法的风量调整步数远远少于另外两种方法，并且风量调节相对误差也很小，在工况允许范围内，而其他两种风量调节方法风量调节相对误差比较大，在实际操作上很难满足调节需求。结合风量调节延迟实验结果可知，提出的自调整模糊分析的煤矿通风量调节方法调节速度快、相对误差小，面对不同的工况适应性良好。

表2 风量调节方法调节数据误差

方法名称	风机开启情况		相对误差/m^3/s	调整步数
	周期	台数		
基于粗糙集的通风量调节方法	4.00	1	1.787 5	183
	4.50	3	0.692 4	138
	9.50	4	0.709 3	179
	11.00	0	0.604 8	108
	20.50	2	1.471 8	122
基于改进粒子群的通风量调节方法	4.00	1	0.624 8	141
	4.50	3	0.602 8	169
	9.50	4	1.545 8	113
	11.00	0	0.933 3	191
	20.50	2	0.856 7	121
提出的通风量调节方法	4.00	1	0.033 4	26
	4.50	3	0.062 3	50
	9.50	4	0.073 8	60
	11.00	0	0.055 1	83
	20.50	2	0.036 9	91

3 结束语

本文从煤矿通风的实际需求出发，设计基于自调整模糊分析的煤矿通风量调节方法，利用自调整模糊分析技术，结合煤矿内实际的通风网络，计算出合适的通风量，并完成调节方法的设计。在方法设计完成后，基于煤矿内通风系统，设计多组实验，通过大量实验证明提出的通风量调节方法具有良好的适应性和有效性，能够满足不同的工况需求，具有一定应用价值。但是，在矿井生产中，通风量的确定与很多因素有关，本文研究的内容多为常见因素，在一些特殊地质条件、特殊支护、特殊作业方式、特别设计方案上，还需要根据实际情况确定合适风量以及相应的调节方案。在后续研究中，将从这一方面展开探究。

参考文献：

[1] 姚尚辉，张国梁，杨向东，等.高海拔矿井局部增压通风系统设计与效果分析[J].矿业研究与开发，2022，42(9)：158-164.

[2] 李金蓉，杨玉中.DS理论-贝叶斯网络下的煤矿通风系统风险评估[J].中国安全科学学报，2022，32(8)：146-153.

[3] 冉均均，袁磊.基于模糊PID的矿井不停风倒机通风系统设计[J].煤炭技术，2022，41(7)：188-190.

[4] 李秉芮，王伟，陈凤梅，等.基于矿井通风网路解算的优化计算方法[J].安全与环境学报，2022，22(3)：1240-1246.

[5] 宋佳林.IPSO-TS算法在矿井通风网络风量优化中的应用研究[J].矿业安全与环保，2022，49(2)：78-82.

[6] 张建根.改进PID算法在矿井局部通风机控制系统中的应用[J].机械设计，2021，38(10)：154.

[7] 石银斌.五虎山矿井通风量数值模拟优化研究[J].工矿自动化，2021，47(S1)：75-77.

[8] 李亚，陈民铀，黎博，等.基于模糊综合评判的分布式储能系统调节能力分析[J].重庆大学学报，2020，43(5)：1-10.

[9] 邵良杉，王振，李昌明.基于模拟退火与改进粒子群的矿井通风优化算法[J].系统仿真学报，2021，33(9)：2085-2094.

[10] 苏淑娴，欧阳名三.基于粗糙集和改进胶囊网络的煤矿智能通风管理方法[J].煤炭科学技术，2021，49(7)：124-132.

[11] 卢辉，袁树杰，马瑞峰，等.基于Vent sim的南山煤矿孤岛工作面均压通风方案研究[J].中国安全生产科学技术，2020，16(8)：125-130.

[12] 梁学良.基于机会约束规划的供电网负荷均衡调度方法[J].自动化技术与应用，2024，43(8)：172-175.

作者简介：白水全(1990-)，男，本科，工程师，研究方向：采矿工程。

(上接第158页)

参考文献：

[1] 陆慧.智能用电下抄核收全过程自动化流水线式分析[J].微型电脑应用，2020，36(11)：171-173.

[2] 朱淑媛，罗军.基于本体的领域自动问答系统研究[J].计算机应用与软件，2019，36(8)：98-105，154.

[3] 臧苏莹，孔良栋.基于三层C/S模式的嵌入式系统交互设计[J].现代电子技术，2021，44(1)：10-13.

[4] 林谢昭，沈梦安.基于Isight的液压机下横梁筋板布置位置优化设计[J].机械制造与自动化，2019，48(4)：106-109.

[5] 杨利，江浩，井新经，等.基于不确定度理论的稳态检测方法及其应用[J].热力发电，2019，48(5)：139-144.

[6] 许浩文，郭观凯，余玲玲，等.基于非负定自适应卡尔曼滤波的电力系统虚假数据攻击检测[J].科学技术与工程，2020，20(9)：3611-3616.

[7] 黎其浩，岳杨，蒋京辰，等.基于贪心流量调度的智能变电站过程层网络拓扑高可用无缝冗余配置方法[J].电力系统保护与控制，2020，48(3)：106-112.

[8] 刘云翔，陈斌，周子宜.一种基于随机森林的改进特征筛选算法[J].现代电子技术，2019，42(12)：117-121.

作者简介：黄祖源(1989-)，男，本科，高级工程师，研究方向：网络工程。