

文章编号: 1671-251X(2022)10-0088-10

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2022060087

# 基于模糊理论的局部通风机变频控制系统设计

贾天毅<sup>1</sup>, 徐立军<sup>2</sup>, 陈志峰<sup>3</sup>, 唐佳<sup>4</sup>

- (1. 新疆农业大学 机电工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;  
2. 新疆工程学院 新疆煤矿机电工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830023;  
3. 新疆工程学院 安全科学与工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023;  
4. 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083)

**摘要:**现有局部通风机变频控制方法缺少对瓦斯突变量的预判,当大量瓦斯异常涌出时,调节存在一定滞后性,易导致瓦斯积聚。针对该问题,设计了基于模糊理论的局部通风机变频控制系统。采用瓦斯模糊控制器和风量模糊控制器实现模糊控制,对2个模糊控制器输出的控制量进行比较,根据较大值确定通风机变频情况,当两者相等时以瓦斯模糊控制为主。采用基于瓦斯涌出量的等级划分方法,以最远工况点对应风量为辅助,将通风机频率划分为4个等级。将掘进工作面瓦斯体积分数达到0.8%设置为升频条件,将瓦斯体积分数不大于0.6%或0.5%设置为降频条件,同时设定通风机降频后的供风量为达到降频条件时将回风流瓦斯体积分数控制在0.7%或0.6%所需的供风量。当大量瓦斯异常涌出时,通风机升频以降低瓦斯浓度,同时,通风机供风量可满足更大的瓦斯排放需求,为调整提供一定缓冲,克服变频控制滞后的缺点。试验结果表明:降频条件下瓦斯体积分数为0.5%,降频后供风量为达到降频条件时将回风流瓦斯体积分数控制在0.6%所需供风量,该条件下控制效果较好,但I级供风量略小于最远掘进距离处所需的最小供风量,可新设一个介于I级和II级之间的频率等级I\*级,通过提高通风机频率来增加供风量,满足最远掘进距离处最小风量需求。

**关键词:**矿井通风;局部通风机;智能通风;模糊控制;变频等级;瓦斯涌出;供风量

中图分类号: TD635

文献标志码: A

Design of variable frequency control system for local ventilator based on fuzzy theory

JIA Tianyi<sup>1</sup>, XU Lijun<sup>2</sup>, CHEN Zhifeng<sup>3</sup>, TANG Jia<sup>4</sup>

- (1. School of Electrical and Mechanical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;  
2. Xinjiang Coal Mine Electromechanical Engineering Technology Research Center, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China; 3. College of Safety Science and Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China; 4. School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The existing variable frequency control method for local ventilator lacks prediction of gas outburst variable. When a large amount of gas emission abnormally, there is a certain lag in regulation, which is easy to lead to gas accumulation. To solve this problem, a variable frequency control system for local ventilator based on fuzzy theory is designed. Fuzzy control is realized by using gas fuzzy controller and air volume fuzzy controller. The control quantity output by two fuzzy controllers is compared. The frequency conversion situation of ventilator is determined according to the larger value. When the two are equal, the fuzzy control of gas is dominant. The

收稿日期: 2022-06-22; 修回日期: 2022-09-26; 责任编辑: 胡娟。

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(52064046); 新疆维吾尔自治区高校科研计划项目(XJEDU2019I026); 新疆维吾尔自治区科技厅科技支疆项目(2020E0258)。

作者简介: 贾天毅(1997—), 男, 甘肃张掖人, 硕士研究生, 主要研究方向为煤矿自动化, E-mail: 1539598695@qq.com。通信作者: 徐立军(1978—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为煤矿机电智能化技术、氢能技术及其应用, E-mail: xulijun612@163.com。

引用格式: 贾天毅, 徐立军, 陈志峰, 等. 基于模糊理论的局部通风机变频控制系统设计[J]. 工矿自动化, 2022, 48(10): 88-96, 106.

JIA Tianyi, XU Lijun, CHEN Zhifeng, et al. Design of variable frequency control system for local ventilator based on fuzzy theory[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(10): 88-96, 106.



扫码移动阅读

classification method based on gas emission is adopted. With the air volume corresponding to the farthest working point as the auxiliary, the ventilator frequency is divided into 4 levels. The gas volume fraction of the heading working face reaching 0.8% is set as the frequency-increasing condition. The gas volume fraction not more than 0.6% or 0.5% is set as the frequency-reducing condition. Moreover, the air supply quantity of the ventilator after frequency reduction is set as the air supply volume required to control the gas volume fraction of return airflow at 0.7% or 0.6% when the frequency reduction condition is achieved. When a large amount of abnormal gas emission, the ventilator is increased in frequency to reduce the gas concentration. At the same time, the air supply volume of the ventilator can meet the greater gas discharge demand. The ventilator can provide a certain buffer for adjustment, and overcome the shortcomings of frequency conversion control lag. The test results show that the gas volume fraction is 0.5% under the condition of frequency reduction. The air supply volume after frequency reduction is the air supply volume required to control the gas volume fraction of return air at 0.6% when the frequency reduction condition is achieved. The control effect is good under this condition. But the air supply volume of level I is slightly less than the minimum air supply volume required at the farthest heading distance. The new frequency level  $I^*$  between level I and level II can be set. The air supply volume can be increased by increasing the frequency of the ventilator to meet the minimum air supply volume requirement at the farthest heading distance.

**Key words:** mine ventilation; local ventilator; intelligent ventilation; fuzzy control; frequency conversion level; gas emission; air supply volume

## 0 引言

据统计,我国煤矿瓦斯事故发生次数占煤矿事故总次数的40%以上,约80%的瓦斯爆炸事故与矿井通风系统不完善有关<sup>[1-3]</sup>。局部通风机是矿井通风的重要装置,其使用的灵活性和效能将直接影响井下瓦斯浓度<sup>[4-6]</sup>。在进行局部通风机选型时,通风机功率选择通常是按照最远掘进距离必须保证井下人员正常呼吸和瓦斯不超限的原则进行的。在煤矿开采过程中,若局部通风机长期处于满载运行状态,将导致风量浪费和电能损失<sup>[7-9]</sup>。局部通风机主要用于煤矿巷道内外空气交换,为巷道提供充足的新鲜空气,将巷道内瓦斯浓度维持在安全范围内<sup>[10-12]</sup>。因此,需要在保证局部通风机工作效率的同时对其频率进行控制。

通风机变频控制技术通过巷道内传感器检测信息改变通风机运行频率,实现风量调节,同时有效保护通风设备,延长其使用寿命<sup>[13-14]</sup>。近年来,专家们针对煤矿通风机变频控制进行了许多研究。刘丹<sup>[15]</sup>、Zhang Hongkui 等<sup>[16]</sup>基于PLC对矿井通风机变频调速系统进行改造,实现了对通风机转速的合理调节,但PLC控制系统成本较高。模糊控制方法<sup>[17-18]</sup>、基于瓦斯浓度的频率等级划分方法<sup>[19]</sup>、基于粒子群优化的PID控制算法<sup>[20]</sup>也被应用到通风机智能控制中,这些方法可在一定程度上对巷道通风状况进行调节,但缺少对瓦斯突变量的预判,当大量瓦斯异常涌出时,调节存在一定滞后性,易导致瓦斯积聚<sup>[21]</sup>。

针对该问题,设计了基于模糊理论的局部通风机变频控制系统,结合局部通风机特性,以最远工况点对应风量为辅助进行频率等级划分,确定最优变频条件及每一级的最优风量,以此来预判瓦斯涌出,解决变频控制滞后性问题。

## 1 局部通风概况

### 1.1 局部通风机布置

在掘进巷道内,局部通风机及传感器布置如图1所示。局部通风机及控制装置安装在进风巷道中,瓦斯传感器T<sub>1</sub>—T<sub>3</sub>分别设置在掘进工作面、回风流、回风巷处,风量传感器F设置在巷道中10 m内没有分支分流、拐弯和障碍且断面无变化的位置。

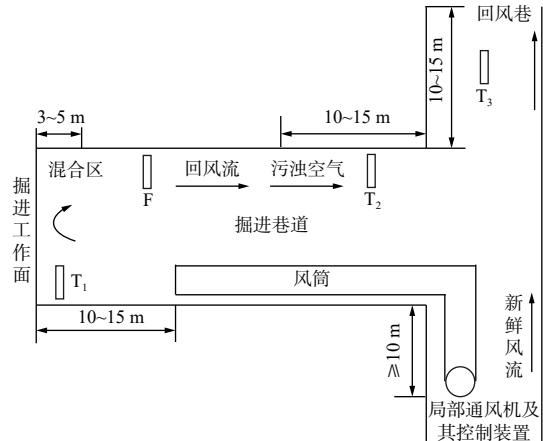


图1 局部通风机及传感器布置

Fig. 1 Layout of local ventilator and sensor

根据《煤矿安全规程》第一百七十二条至一百七

十六条规定,当掘进工作面处瓦斯传感器  $T_1$  监测到瓦斯体积分数  $\geq 1.0\%$  时必须停止工作,撤出人员,并采取相应措施,当瓦斯体积分数  $\geq 1.5\%$  时应进行瓦斯电闭锁,当瓦斯体积分数  $\geq 3\%$  时应停止通风机运转;第一百三十六条规定,采煤工作面和掘进中的煤巷内的允许风速为  $0.25\sim 4 \text{ m/s}$ ;第一百三十八条规定,井下供风标准为人均  $4 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

## 1.2 局部通风机通风特性

局部通风机采用变频控制时的风压-风量 ( $H-Q$ ) 特性曲线如图 2 所示,  $n_1, n_2$  为通风机不同转速,  $R_1, R_2$  为不同风阻,  $H_1-H_3$  和  $Q_1-Q_3$  分别为 3 个工况点的风压和风量。由图 2 可知,在局部通风机实际工作过程中,通过降低转速,可减小风量与风压,从而减小输出功率,实现变频节能。

在实际工作过程中,局部通风机供风量  $Q_f$ 、风压  $H$ 、功率  $P$  和转速  $n$  之间有以下关系:  $Q_f \propto n$ ,  $H \propto n^2$ ,  $P \propto n^3$ 。风量  $Q$  与频率  $f$  成正比:  $Q \propto f$ 。

## 2 局部通风机变频控制系统设计

### 2.1 系统原理

基于模糊理论的局部通风机变频控制系统采用瓦斯模糊控制器和风量模糊控制器实现模糊控制,

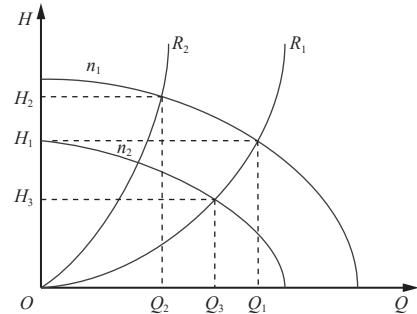


图 2 通风机  $H-Q$  特性曲线

Fig. 2  $H-Q$  characteristic curve of ventilator

如图 3 所示。瓦斯模糊控制闭环中,模糊控制器输入为掘进工作面瓦斯浓度偏差  $e_1$  和偏差变化率  $e_{c1}$ ,将  $e_1$  和  $e_{c1}$  按比例放大后得到  $e'_1$  和  $e'_{c1}$ ,输出为变频器输出控制量  $U_1$ 。风量模糊控制器的输出为变频器输出控制量  $U_2$ 。对  $U_1$  和  $U_2$  进行比较,根据较大值确定通风机变频情况。当两者相等时以瓦斯模糊控制为主。与传统控制模式相比,模糊控制器输出的不是直接控制变频器输出的信号,而是一个控制量。为改变变频器随瓦斯不规则涌出一直变频的状况,将局部通风机频率预设为 I—IV 四个等级进行供风,每一等级下通风机供风量能够将一定范围内的瓦斯浓度控制在安全范围内。

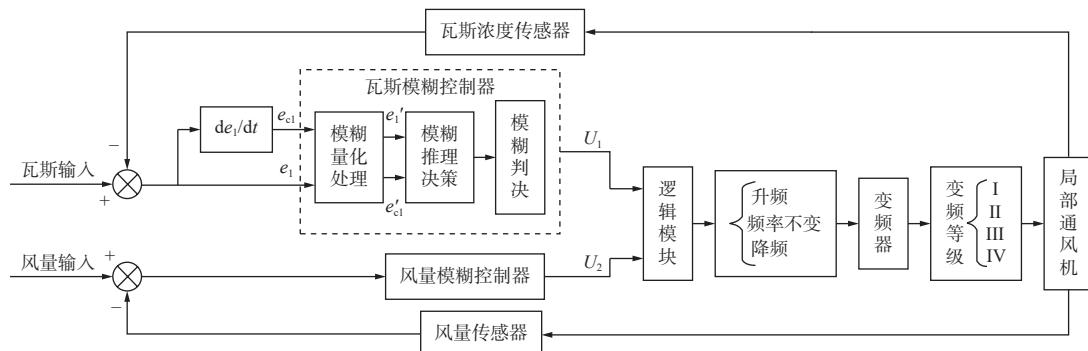


图 3 局部通风机变频控制系统原理

Fig. 3 Principle of frequency conversion control system of local ventilator

### 2.2 系统流程

基于模糊理论的局部通风机变频控制系统流程如图 4 所示。通风机启动,达到掘进工作面需风量后进入自动控制状态,对掘进工作面的瓦斯浓度及巷道风量进行监测,将信息输入模糊控制器进行处理,比较不同模糊控制器输出的控制量,确定主要控制方式。根据 Matlab 仿真结果,设置通风机变频条件,通过对控制量进行判决,确定通风机升频或降频。达到最高频率等级后不再升频,达到最低频率等级后不再降频,且频率不能跨等级调节。控制器调整输出控制频率,变频器按照接收到的控制频率控制通风机变频运行,以此满足系统实时控制要求。

### 2.3 硬件设计

通过煤矿巷道内布置的瓦斯传感器、风量传感器等进行信号采集,将掘进工作面瓦斯浓度作为主要被控制量。传感器输出信号经频率电压转换后输入模糊控制器,通过模糊控制算法进行信息处理。模糊控制器输出的数字信号经数模转换和电压电流转换后,驱动变频器对通风机供风量进行调整。通过放大器 MCP2551 和 CAN 模块实现远距离通信。LCD 触摸屏能够就地显示巷道内各个位置瓦斯浓度和风量的变化情况,同时通过无纸记录仪对数据变化进行记录。局部通风机变频控制系统硬件结构如图 5 所示。

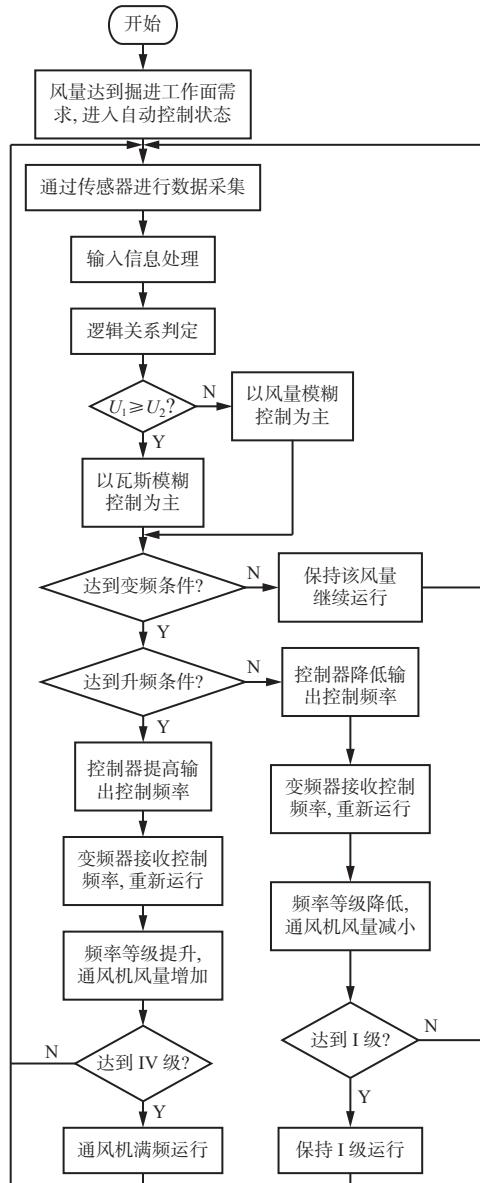


图4 局部通风机变频控制系统控制流程

Fig. 4 Control flow of frequency conversion control system of local ventilator

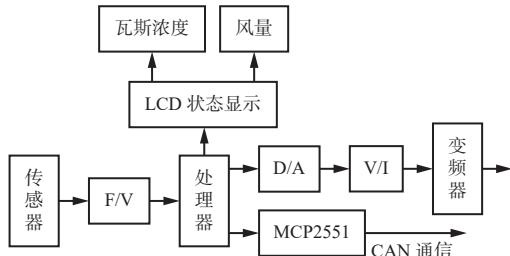
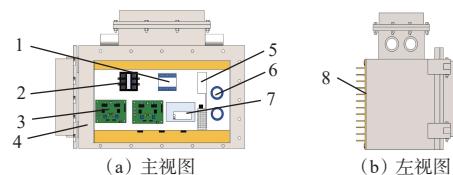


图5 局部通风机变频控制系统硬件结构

Fig. 5 Hardware structure of frequency conversion control system of local ventilator

系统采用可用于煤矿井下的嵌入式风冷变频器，外部为防爆钢制外壳，内部主要包括变压器模块、接触器、接线板、开关电源模块、电容器模块、变频器控制模块和散热片模块等，如图6所示。



1—变压器模块；2—接触器；3—接线板；4—防爆钢制外壳；  
5—开关电源模块；6—电容器模块；7—变频器控制模块；8—散热片模块。

图6 嵌入式风冷变频器结构

Fig. 6 Structure of embedded air-cooled frequency converter

变频器发热功率器件通过散热铜板与钢制防爆外壳和散热片紧密连接，并嵌入到局部通风机的风道中。通风机工作过程中，变频器电力器件内部芯片有源区温度上升，散热片引出热源发出的热量，利用通风机风流对散热片进行强制冷却，能够有效降低变频器发热功率器件的温度。嵌入式风冷变频器与对旋式局部通风机安装位置如图7所示。

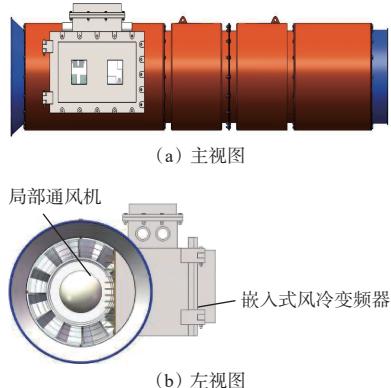


图7 嵌入式风冷变频器安装位置

Fig. 7 Installation position of embedded air-cooled frequency converter

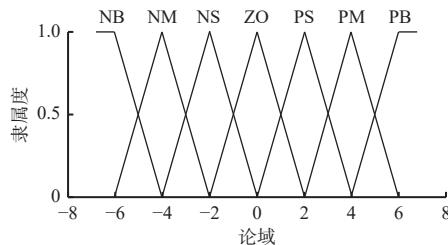
变频器嵌入式结构能够大大减小变频器散热器的体积，简化变频器散热系统，减小矿用变频器在煤矿巷道中占用的空间，提高设备的安全性和可靠性。变频器与通风机紧密连接，能够缩短两者之间的电力线，从而有效减少高频谐波对变频器和信号采集装置的干扰，提高矿井通风系统稳定性。

### 3 模糊控制方法

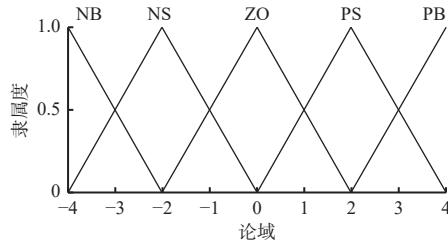
#### 3.1 模糊量化处理

将模糊控制器输入量瓦斯体积分数的期望值定为0.8%，根据掘进工作面通风要求，瓦斯体积分数应控制在0~1.5%。设定瓦斯浓度偏差 $e_1$ 的基本论域为[-0.7, 0.7]，按比例放大为[-7, 7]，将其划分为7个等级，模糊语言集为{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}，含义为{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}。放大后偏差 $e'_1$ 的隶属函数如图8所示。

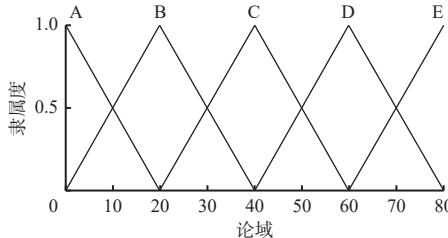
设定瓦斯浓度偏差变化率 $e_{c1}$ 的基本论域为

图 8 偏差 $e'_1$ 的隶属函数Fig. 8 Membership function of deviation  $e'_1$ 

$[-0.4, 0.4]$ , 按比例放大为  $[-4, 4]$ , 并将其划分为 5 个等级, 模糊语言集为 {NB, NS, ZO, PS, PB}, 含义为 {负大, 负小, 零, 正小, 正大}。放大后偏差变化率  $e'_{c1}$  的隶属函数如图 9 所示。

图 9 偏差变化率 $e'_{c1}$ 的隶属函数Fig. 9 Membership function of deviation change rate of  $e'_{c1}$ 

设定输出量  $U_1$  的基本论域为  $[0, 80]$ , 将其划分为 5 个等级, 模糊语言集为 {A, B, C, D, E}, 含义为 {小, 较小, 中, 较大, 最大}。输出量  $U_1$  的隶属函数如图 10 所示。

图 10 输出量  $U_1$  的隶属函数Fig. 10 Membership function of output quantity  $U_1$ 

### 3.2 模糊推理决策

根据频率等级划分条件及瓦斯浓度偏差  $e'_1$  和偏差变化率  $e'_{c1}$  对输出特性的影响, 结合现场技术人员的知识及操作经验设计瓦斯浓度模糊控制规则: 控制量输出值的大小与瓦斯浓度和浓度偏差变化率成正比。瓦斯浓度模糊控制规则见表 1。

### 3.3 模糊判决

运用 Matlab 模糊工具箱的模糊控制规则将输出模糊量清晰化, 输出量曲面如图 11 所示。

风量模糊控制中, 设通风机供风量的期望值为最远掘进距离处瓦斯排放的风量需求, 则一定满足巷道掘进过程中瓦斯排放的风量需求, 但若通风机一直满频运行, 则会造成风量损失和电能浪费。以局部通风机运转特性为理论依据, 选取通风机满频运行时的  $H-Q$  特性曲线与最大风阻特性曲线的交点为最远工况点。以最远工况点对应风量为辅助进行频率等级划分, 即将电网频率 50 Hz 作为最高等级的频率。将通风机频率分为 4 个等级, 通过频率等级转换, 使不同频率等级下的供风量满足巷道掘进过程中的需风量, 同时不会造成能量浪费。

表 1 瓦斯浓度模糊控制规则  
Table 1 Fuzzy control rule for gas concentration

$e'_1$	$e'_{c1}$				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	A	A	B	B	C
NM	B	B	B	C	C
NS	B	C	C	C	D
ZO	C	C	D	D	D
PS	C	D	D	D	E
PM	D	D	E	E	E
PB	D	E	E	E	E

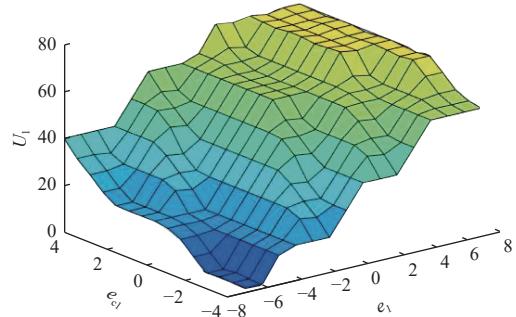


图 11 输出量曲面

Fig. 11 Output surface

本论域为  $[0, 80]$ 。风量模糊控制规则: 若风量小于巷道所需最小供风量, 则风量越小, 偏差变化率越小, 输出值越小, 需增大风量; 若风量等于所需最小供风量, 可保持风量不变, 继续监测瓦斯浓度变化; 若风量大于所需最小供风量, 则风量越大, 偏差变化率越大, 输出值越大, 可降低风量。

### 4 通风机频率等级划分

若通风机满频运行时的最大供风量满足最远掘进距离处瓦斯排放的风量需求, 则一定满足巷道掘进过程中瓦斯排放的风量需求, 但若通风机一直满频运行, 则会造成风量损失和电能浪费。以局部通风机运转特性为理论依据, 选取通风机满频运行时的  $H-Q$  特性曲线与最大风阻特性曲线的交点为最远工况点。以最远工况点对应风量为辅助进行频率等级划分, 即将电网频率 50 Hz 作为最高等级的频率。将通风机频率分为 4 个等级, 通过频率等级转换, 使不同频率等级下的供风量满足巷道掘进过程中的需风量, 同时不会造成能量浪费。

文献 [19] 将瓦斯体积分数  $c$  划分为 5 个等级进行通风机变频控制, 5 个等级分别为  $c < 0.2\%$ ,  $0.2\% < c < 0.4\%$ ,  $0.4\% < c < 0.6\%$ ,  $0.6\% < c < 0.8\%$ ,  $c > 0.8\%$ 。每一等级的风量不同, 根据风量与频率之间的正比

关系,可以将每一等级的通风机供风量转换为频率。该方法可在一定程度上对巷道通风状况进行调整,但面对大量瓦斯异常涌出时,若等检测到瓦斯浓度变大再进行调节,很容易导致瓦斯超限。

本文采用基于瓦斯涌出量的等级划分方法,将通风机频率划分为4个等级。根据《煤矿安全规程》规定,当掘进工作面瓦斯体积分数达到1%时,必须停止工作,撤出人员,因此给予20%的安全裕量,将瓦斯体积分数达到0.8%设置为升频条件,即每一等级的风量要能够将掘进工作面瓦斯体积分数控制在0.8%以下。考虑系统控制的稳定性及节能减排,将降频条件设置为掘进工作面瓦斯体积分数 $c_1$ 不大于0.6%或0.5%,同时设定通风机降频后的供风量为达到降频条件时将回风流瓦斯体积分数 $c_2$ 控制在0.7%或0.6%所需的供风量。

采用本文所提方法时,虽然每一等级所控制的瓦斯涌出量范围不同,但始终能够将瓦斯体积分数控制在安全范围内(0.6%~0.8%或0.5%~0.8%)。当大量瓦斯异常涌出时,可通过分析瓦斯涌出量变化导致的瓦斯浓度波动,判断是否达到升频条件。通风机升频后可降低瓦斯浓度,同时,通风机供风量可满足更大的瓦斯排放需求,为调整提供一定缓冲,克服变频控制滞后的缺点,使系统更加安全。

## 5 试验分析

设置降频条件为 $c_1 \leq 0.6\%$ 或 $c_1 \leq 0.5\%$ ,降频后通风机供风量为达到降频条件时控制 $c_2=0.7\%$ 或 $c_2=0.6\%$ 所需的供风量,进行对比试验,寻找每一级的最优风量,从而确定最优变频等级。

### 5.1 试验平台

以新疆焦煤(集团)有限责任公司某矿井掘进工作面为研究对象,结合煤矿巷道概况及通风装置布置情况,依据《煤矿安全规程》的相关规定对巷道内瓦斯浓度、风速、风量进行试验。试验基于以煤矿掘进工作面瓦斯浓度为主要被控制量的模糊控制方法,主要设备及仪器见表2。低浓度瓦斯传感器测量范围为0~4%,风量传感器的风速测量范围为0.3~15 m/s。

### 5.2 最小供风量计算

在试验掘进工作面,瓦斯涌出量主要包括暴露煤壁产生的瓦斯涌出量和落煤产生的瓦斯涌出量,预测绝对瓦斯涌出量为 $1.23 \text{ m}^3/\text{min}$ 。将掘进巷道回风流瓦斯体积分数控制在1%以内时的需风量为

$$Q_{hg} = 100KW_g \quad (1)$$

式中: $K$ 为瓦斯涌出不均匀系数,取1.6; $W_g$ 为绝对瓦

表2 试验设备及仪器

Table 2 The equipments and instruments used in the test

名称	规格型号
对旋轴流局部通风机	FBDNo_5.0/2×7.5
变频器	BPJ-75/690SF
低浓度瓦斯传感器	GJC4
风量传感器	KGF2
无纸记录仪	MIK-R5000C

斯涌出量, $\text{m}^3/\text{min}$ 。

将相关数值代入式(1)可得 $Q_{hg} \approx 197 \text{ m}^3/\text{min}$ 。为保证巷道内瓦斯体积分数不超限,风筒出风量 $Q_h$ 应大于等于需风量 $Q_{hg}$ 。最远掘进距离处局部通风机的供风量为

$$Q_f = \phi Q_h \geq \phi Q_{hg} \quad (2)$$

式中 $\phi$ 为风筒漏风备用系数,取1.2。

局部通风机全压为

$$H_f = (R'_1 + R'_2)Q_f Q_h \quad (3)$$

式中: $R'_1$ 为平直段风筒风阻,N·s<sup>2</sup>/m<sup>8</sup>; $R'_2$ 为局部风阻,N·s<sup>2</sup>/m<sup>8</sup>。

结合巷道概况及通风装置布置得 $R'_1=47 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$ , $R'_2 \approx 3.6 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$ 。根据式(2)和式(3),可计算出局部通风机设计工况点风量为 $236 \text{ m}^3/\text{min}$ ,风压为654 Pa。

局部通风机工作风阻为

$$R_f = \frac{H_f}{(Q_f/60)^2} \quad (4)$$

结合局部通风机FBDNo\_5.0/2×7.5的H-Q特性曲线及风阻特性曲线,可得局部通风机工况点,如图12所示,可看出通风机在最大工作风阻条件下的实际工况点风量为 $255 \text{ m}^3/\text{min}$ ,风压为783 Pa。

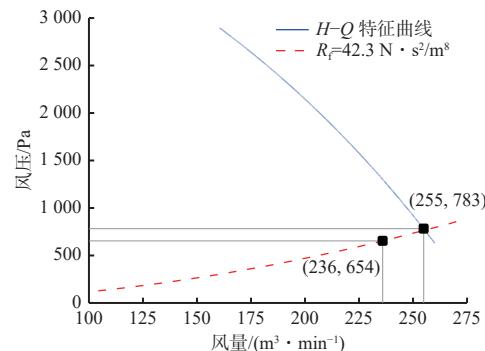


图12 局部通风机工况点

Fig. 12 Working point of local ventilator

绝对瓦斯涌出量为

$$W_g = Q_h c_0 \quad (5)$$

式中 $c_0$ 为风流中的平均瓦斯体积分数,‰。

根据实际工况点参数及式(2)可得,当通风机供

风量为  $255 \text{ m}^3/\text{min}$  时, 风筒出风量为  $212.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 。在此条件下, 由式(5)可得, 将瓦斯体积分数控制在 0.8% 时, 最远掘进距离处最大绝对瓦斯涌出量为  $1.7 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

根据煤矿井下工作条件, 按照工作人数及巷道内风速要求, 巷道最小需风量为  $132 \text{ m}^3/\text{min}$ 。随着巷道推进, 风筒产生漏风, 由式(2)可得, 巷道贯穿时通风机供风量为  $158 \text{ m}^3/\text{min}$ 。因此, 巷道掘进所需最小供风量范围为  $132\sim158 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

### 5.3 试验结果

#### 5.3.1 第 1 种降频条件下( $c_1 \leq 0.6\%$ )的试验结果

第 1 种降频条件下, 当通风机降频运行后, 所提供的风量要能够将瓦斯体积分数控制在  $0.6\%\sim0.8\%$ 。瓦斯体积分数接近  $0.6\%$  时, 以较大风量控制较低浓度瓦斯, 存在能量浪费; 瓦斯体积分数接近  $0.8\%$  时, 易超出安全范围, 使系统安全性下降。因此, 设置降频后通风机供风量为达到降频条件时控制  $c_2=0.7\%$  所需的供风量  $Q'_1$ 。计算可得通风机 IV—I 级的供风量分别为  $255.0, 219.5, 188.5, 161.2 \text{ m}^3/\text{min}$ , 具体见表 3。IV 级的频率为满频工作时的频率( $50 \text{ Hz}$ ), 根据风量与频率之间的正比关系可得出 III—I 级对应的频率为  $43.1, 36.9, 31.6 \text{ Hz}$ 。

表 3 达到第 1 种降频条件时控制  $c_2=0.7\%$  所需的供风量

Table 3 The air supply required to control  $c_2=0.7\%$  when the first frequency reduction condition is achieved

频率等级	供风量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	$Q_b/$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	$c_1/\%$	$W_g/$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	$Q'_1/$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )
IV	255.0	212.5	0.8	1.70	—
			0.6	1.28	219.5
III	219.5	182.9	0.8	1.46	—
			0.6	1.10	188.5
II	188.5	157.1	0.8	1.26	—
			0.6	0.94	161.2
I	161.2	134.3	0.8	1.07	—
			0.6	0.81	—

根据 Matlab 仿真结果, 结合相关试验要求, 通过设置相应的偏差和偏差变化率, 得到控制量  $U_1, U_2$  的范围, 见表 4。

#### 5.3.2 第 2 种降频条件下( $c_1 \leq 0.5\%$ )的试验结果

第 2 种降频条件下, 当通风机降频运行后, 所提供的风量要能够将瓦斯体积分数控制在  $0.5\%\sim0.8\%$ 。进行 2 组试验, 分别设置降频后通风机供风量为达到降频条件时控制  $c_2=0.7\%$  和  $c_2=0.6\%$  所需的供风量。

表 4 第 1 种降频条件下控制量范围

Table 4 The range of control quantity under the first frequency reduction condition

频率变化	控制量 $U_1$	控制量 $U_2$
升频	$U_1 \geq 60$	$U_2 < 20$
频率不变	$40 < U_1 < 60$	$20 \leq U_2 \leq 60$
降频	$U_1 \leq 40$	$U_2 > 60$

(1) 设置降频后通风机供风量为达到降频条件时控制  $c_2=0.7\%$  所需的供风量  $Q'_2$ (表 5)。计算可得通风机 IV—I 级的供风量分别为  $255.0, 181.7, 130.3, 92.5 \text{ m}^3/\text{min}$ , 对应的频率分别为  $50, 35.6, 25.5, 18.1 \text{ Hz}$ 。

表 5 达到第 2 种降频条件时控制  $c_2=0.7\%$  所需的供风量

Table 5 The air supply required to control  $c_2=0.7\%$  when the second frequency reduction condition is achieved

频率等级	供风量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	$Q_b/$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	$c_1/\%$	$W_g/$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	$Q'_2/$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )
IV	255.0	212.5	0.8	1.70	—
			0.5	1.06	181.7
III	181.7	151.4	0.8	1.21	—
			0.5	0.76	130.3
II	130.3	108.6	0.8	0.87	—
			0.5	0.54	92.5
I	92.5	77.1	0.8	0.62	—
			0.5	0.39	—

(2) 设置降频后通风机供风量为达到降频条件时控制  $c_2=0.6\%$  所需的供风量  $Q'_3$ (表 6), 计算可得通风机 IV—I 级的供风量分别为  $255.0, 212.0, 176.0, 146.0 \text{ m}^3/\text{min}$ , 对应的频率分别为  $50, 41.6, 34.5, 28.6 \text{ Hz}$ 。

表 6 达到第 2 种降频条件时控制  $c_2=0.6\%$  所需的供风量

Table 6 The air supply required to control  $c_2=0.6\%$  when the second frequency reduction condition is achieved

频率等级	供风量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	$Q_b/$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	$c_1/\%$	$W_g/$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	$Q'_3/$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )
IV	255.0	212.5	0.8	1.70	—
			0.5	1.06	212.0
III	212.0	176.7	0.8	1.41	—
			0.5	0.88	176.0
II	176.0	146.7	0.8	1.17	—
			0.5	0.73	146.0
I	146.0	121.7	0.8	0.97	—
			0.5	0.61	—

第 2 种降频条件下, 2 种情况采用相同升降频条件, 控制量范围见表 7。

表7 第2种降频条件下控制量范围

Table 7 The range of control quantity under the second frequency reduction condition

频率变化	控制量 $U_1$	控制量 $U_2$
升频	$U_1 \geq 60$	$U_2 < 20$
频率不变	$30 < U_1 < 60$	$20 \leq U_2 \leq 60$
降频	$U_1 \leq 30$	$U_2 > 60$

### 5.3.3 结果分析

瓦斯体积分数一定时,瓦斯涌出量不同,所对应的需风量不同。在上述3组试验中,将电网频率50 Hz作为IV级的频率,通风机IV级运行时,若瓦斯体积分数分别降至0.6%, 0.5%, 0.5%, 则通风机降频至III级,同时设定III级供风量为达到降频条件时控制  $c_2$  为0.7%, 0.7%, 0.6% 所需的供风量。根据式(5)可得3种情况下的实际需风量分别为182.9, 151.4, 176.7 m<sup>3</sup>/min。根据式(2)可得III级供风量分别为219.5, 181.7, 212.0 m<sup>3</sup>/min。根据IV级至III的变频方法,得出3种情况下的II级供风量分别为188.5, 130.3, 176.0 m<sup>3</sup>/min, I级供风量分别为161.2, 92.5, 146.0 m<sup>3</sup>/min。当瓦斯体积分数达到0.8%并升频后,3种情况下的通风机供风量能够将瓦斯体积分数分别控制在0.69%, 0.57%, 0.66%。

不同降频条件所对应的试验数据如图13所示,图中阴影部分为缓冲区域,可避免瓦斯体积分数处于升降频节点时频繁变频。缓冲区域的存在使通风机变频后能够将瓦斯体积分数控制在较低位置,减少变频次数,保护电路设备,使通风系统安全平稳运行。由图13(a)可知,在该变频条件及供风量下,I级供风量大于最远掘进距离处所需最小供风量158 m<sup>3</sup>/min,能够满足巷道通风要求。由图13(b)可知,在该变频条件及供风量下,II级和I级供风量分别为130.3, 92.5 m<sup>3</sup>/min, 小于最远掘进距离处所需最小供风量158 m<sup>3</sup>/min,且差值较大,无法满足巷道通风需求,因此理论上不可行。掘进巷道所需最小供风量范围为132~158 m<sup>3</sup>/min,由于I级、II级风量小于132 m<sup>3</sup>/min,因此,在漏风量少的短距离巷道中也无法应用。若最低等级供风量无法满足最远掘进距离处所需最小供风量,但仍在最小供风量范围内,则可在漏风量少的短距离巷道中使用。由图13(c)可知,在该变频条件及供风量下,I级供风量为146.0 m<sup>3</sup>/min,略小于最远掘进距离处所需的最小供风量158 m<sup>3</sup>/min。可新设一个介于I级和II级之间的频率等级I\*级,通过提高通风机频率来增加供风量。将I\*级频率提升为31.0 Hz,则供风量为158.1 m<sup>3</sup>/min,满足最远掘进距离处最小风量需求。

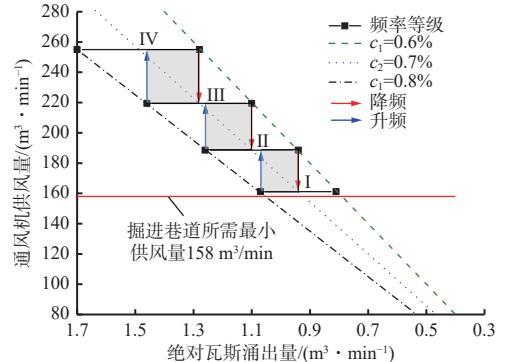
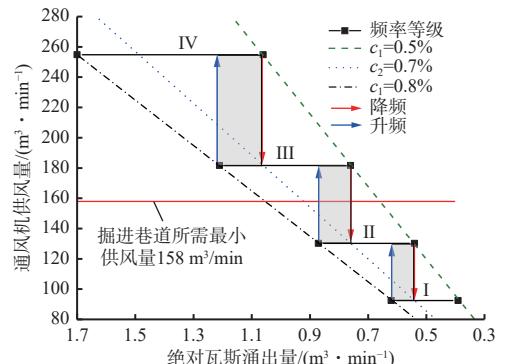
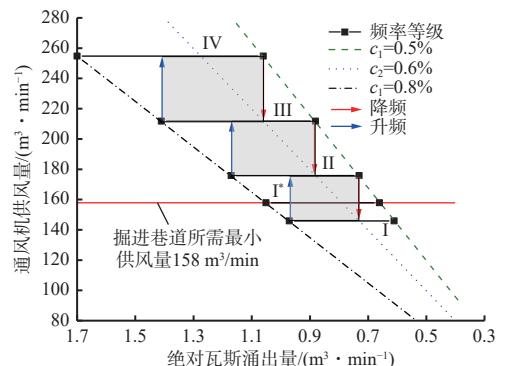
(a) 降频条件为  $c_1 \leq 0.6\%$ , 供风量为控制  $c_2 = 0.7\%$  所需(b) 降频条件为  $c_1 \leq 0.5\%$ , 供风量为控制  $c_2 = 0.7\%$  所需(c) 降频条件为  $c_1 \leq 0.5\%$ , 供风量为控制  $c_2 = 0.6\%$  所需

图13 不同降频条件及供风量所对应的试验数据

Fig. 13 Test data corresponding to different frequency reduction conditions and air supply volume

## 6 结论

(1) 在不考虑偏差变化率的情况下,将掘进工作面瓦斯体积分数达到0.8%设置为升频条件,瓦斯体积分数不大于0.6%设置为降频条件,进行频率等级划分,能够满足系统通风要求,但是每一等级瓦斯体积分数控制范围较窄,导致系统运行时稳定性不足。

(2) 将掘进工作面瓦斯体积分数达到0.8%设置为升频条件,瓦斯体积分数不大于0.5%设置为降频条件,该情况下每一等级瓦斯体积分数控制范围较宽,系统运行更加安全平稳。

(3) 将掘进工作面瓦斯体积分数不大于0.5%设置为降频条件,降频后供风量为达到降频条件时将

回风流瓦斯体积分数控制在 0.7% 所需的供风量, 该情况下无法满足巷道通风需求。

(4) 将掘进工作面瓦斯体积分数不大于 0.5% 设置为降频条件, 降频后供风量为达到降频条件时将回风流瓦斯体积分数控制在 0.6% 所需的供风量, 该情况下, I 级供风量可将瓦斯体积分数控制在安全范围内, 但不能满足最远掘进距离处最小风量需求。可以单独定义一个新的等级 I\*, 但是需要避免因 I\* 级与 I 级距离较近引起系统不稳定。

#### 参考文献(References):

- [1] 杨杰, 赵连刚, 全芳. 煤矿通风系统现状及智能通风系统设计[J]. 工矿自动化, 2015, 41(11): 74-77.  
YANG Jie, ZHAO Liangang, QUAN Fang. Current situation of coal mine ventilation system and design of intelligent ventilation system[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(11): 74-77.
- [2] 周福宝, 魏连江, 夏同强, 等. 矿井智能通风原理、关键技术及其初步实现 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2225-2235.  
ZHOU Fubao, WEI Lianjiang, XIA Tongqiang, et al. Principle, key technology and preliminary realization of mine intelligent ventilation[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2225-2235.
- [3] 吴新忠, 张芝超, 许嘉琳, 等. 矿井智能风量调节研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(4): 44-50.  
WU Xinzhong, ZHANG Zhichao, XU Jialin, et al. Research on intelligent air volume regulation in mines[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(4): 44-50.
- [4] 景国勋, 刘孟霞. 2015—2019年我国煤矿瓦斯事故统计与规律分析 [J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1680-1686.  
JING Guoxun, LIU Mengxia. Statistics and analysis of coal mine gas accidents in China from 2015 to 2019[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(3): 1680-1686.
- [5] BI Qiuping, LI Yucheng, SHEN Cheng. Screening of evaluation index and construction of evaluation index system for mine ventilation system[J]. Sustainability, 2021, 13(21): 1-15.
- [6] 尹智伟. 煤矿通风系统稳定性分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(2): 163-164.  
YIN Zhiwei. Stability analysis of coal mine ventilation system[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019, 39(2): 163-164.
- [7] 尹伊君, 尹丽娜. 变频技术和模糊控制在矿井局部通风机中的应用 [J]. 煤矿机械, 2007, 28(1): 139-141.  
YIN Yijun, YIN Lina. Frequency-variable technology and fuzzy control used in mine local ventilator[J]. Coal Mine Machinery, 2007, 28(1): 139-141.
- [8] 张燕峰. 矿井主节能通风系统的配置及其功能的实现 [J]. 机械管理开发, 2020, 35(11): 237-238, 271.  
ZHANG Yanfeng. Configuration and function realization of main energy-saving ventilation system in mine[J]. Mechanical Management and Development, 2020, 35(11): 237-238, 271.
- [9] BABU V R, MAITY T, PRASAD H. Energy saving techniques for ventilation ventilators used in underground coal mines: a survey[J]. Journal of Mining Science, 2015, 51(5): 1001-1008.
- [10] MALEKI S, SOTOUDEH F, SERESHKI F. Application of VENTSIM 3D and mathematical programming to optimize underground mine ventilation network: a case study[J]. Journal of Mining and Environment, 2018, 9(3): 741-752.
- [11] 常新明, 陈国栋, 李相, 等. 矿井局部通风机变频控制系统的应用研究 [J]. 能源与环保, 2021, 43(5): 227-232.  
CHANG Xinming, CHEN Guodong, LI Xiang, et al. Research on design of frequency conversion control system of mine local fan[J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, 43(5): 227-232.
- [12] 张兴兵. 矿井通风在矿井安全生产中的重要性 [J]. 能源与节能, 2022(1): 159-160.  
ZHANG Xingbing. Importance of mine ventilation in mine safety production[J]. Energy and Energy Conservation, 2022(1): 159-160.
- [13] 郝文科. 变频调速技术在煤矿通风机节能的应用研究 [J]. 煤炭与化工, 2017, 40(9): 141-142, 145.  
HAO Wenke. Application research of frequency conversion technology in energy saving of mine fan[J]. Coal and Chemical Industry, 2017, 40(9): 141-142, 145.
- [14] 谭晓峰. 变频技术在煤矿节能中的应用探讨 [J]. 中国设备工程, 2021(4): 194-196.  
TAN Xiaofeng. Discussion on application of frequency conversion technology in coal mine energy saving[J]. China Plant Engineering, 2021(4): 194-196.
- [15] 刘丹. 基于PLC的矿井通风机变频调速系统设计 [J]. 煤矿机械, 2020, 41(3): 181-183.  
LIU Dan. Design of mine ventilator variable frequency speed regulation system based on PLC[J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41(3): 181-183.
- [16] ZHANG Hongkui, ZHANG Qiulin, ZHE Wang, et al. Design of control and frequency conversion speed regulation system for mine fan[C]. The 2020 International Conference on Advanced Materials and Intelligent Manufacturing & Advanced Steel for Automotive Seminar, Guilin, 2020.

(下转第 106 页)