

风机变频稀释超限瓦斯的变频 查找法理论构建及实验

王媛媛^{1,2}, 蒋曙光², 韩靖³, 胡利明²

(1.四川理工学院 化学与环境工程学院,四川 自贡 643000;2.中国矿业大学(徐州)安全工程学院,江苏 徐州 221116;
3.安徽理工大学 能源与安全学院,安徽 淮南 232001)

摘要:提出了以风机变频增风稀释工作面超限瓦斯为核心的变频查找法.由稀释公式可计算出稀释瓦斯的所需风量,通过查找方法不断地从风机特性曲线库中选择曲线并带入风网解算程序,解算的风量不断地与稀释瓦斯的需风量作比较,最终选择出一条最接近且大于稀释风量的风机特性曲线.通过变频器调频将风机调至此特性曲线下运行,进而稀释瓦斯.搭建了实验模型,模拟瓦斯浓度超限时风机变频稀释瓦斯.实验表明风机所处的常态频率越小其稀释能力越大,在稀释能力范围内,可快速将超限瓦斯稀释到安全值,且调风比趋近于1.证明了变频查找法具有快速性、精准性、随动性、稳定性以及较好的稀释效果且风量利用效率较高.

关键词: 瓦斯;风量;风网解算;变频;风机特性曲线

中图分类号:TD77⁺.1 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2017)04-0001-08

Theory construction and experimental study of frequency-search method for diluting excess gas by increasing fan frequency

Wang Yuanyuan^{1,2}, Jiang Shuguang², Han Jing³, Hu Liming²

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China;
2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
3. School of Energy Resource and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Frequency-search method was presented bases that diluting excess gas by increasing fan frequency. The required airflow was calculated to dilute gas by the dilution formula, then from fan performance curve database, the curve was selected to take in ventilation networks calculating program by search method continually. By comparing the calculated volume with required volume, one curve was chosen whose air volume was a bit lager but proximate than required volume at last. By using frequency converter to adjust fan performance curve to the one selected to dilute gas, the experimental model was set up to simulate the fan changing of frequencies to dilute gas, while gas concentration gauge. Experimental results show that the smaller the fan normal frequency, and the lager its dilution ability. Within dilution ability, gas reduce to safe value, and its volume-regulation ratio is close to 1. It proved that frequency-search method is a fast, accurate, steady and servo method, which produce good dilution result and utilize efficiency of air volume.

Keywords: gas; air volume; ventilation networks calculating program; frequency conversion; fan performance curve

收稿日期:2014-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51134023)

通信作者:蒋曙光(1963-),男,四川遂宁人,博士,教授,主要从事安全监测监控研究.E-mail:1375116797@qq.com

随着采煤作业的进行可能会出现工作面采掘空间局部瓦斯超限^[1-2]的情况.解决矿井通风巷道瓦斯浓度超限的问题,通常采用增加风量的方法^[3],风速高的地方,瓦斯浓度低^[4].手动调节风量虽然简单易行,但是无法实现实时调节^[5].随着变频技术的引入,将变频器与风机相连,通过 PLC 控制技术即可实现风量的实时调节,也可应用于井下超限瓦斯的实时稀释.基于此,提出了变频风机的变频查找法理论.当瓦斯超限时,通过程序不断改变风机的特性曲线,带入风网解算软件进行解算,所得风量与稀释风量比较,直至瓦斯涌出点分支的风量达到恰好能够稀释瓦斯的风量为止,进而将瓦斯稀释到安全值以下.此法与风机在最大频率下稀释瓦斯相比,节能效果较好.

曲线随动查找法主要运用了风网解算理论,矿井通风网络解算在煤矿安全生产中具有重要的作用^[6].李汇明等^[7]基于 VB 语言建立了通用的矿井通风网络解算数学模型,实现了计算和数据管理的一体化,魏连江等^[8]从通风网络拓扑理论方面解释了风网解算后出现反向分支的原因.总之,风网解算正朝着精确性和智能型发展,未来风网解算的精度将会越来越高.风网解算结果的精确性对于准确查找最佳稀释频率具有十分重要的作用.虽然部分分支存在一定的误差,但工作面分支的网络解算结果较精准,故变频风机曲线随动查找法在煤矿井下具有可行性及准确性.

1 变频风机变频查找法理论与方法基础

当井下瓦斯浓度超限时,通过瓦斯稀释理论可计算出稀释该瓦斯的需风量,通过查找理论不断地从风机特性曲线库中选择曲线,将其带入风网解算程序,解算的风量不断地与稀释瓦斯的需风量作比较,最终选择出一条最接近且大于稀释风量的风网特性曲线.通过变频器调频将风机调至此特性曲线下运行,进而可稀释瓦斯.变频风机变频查找法的建立需要依靠风网解算理论、瓦斯稀释理论以及查找方法的支持,其协同工作最终实现变频风机曲线随动查找,如图 1 所示.

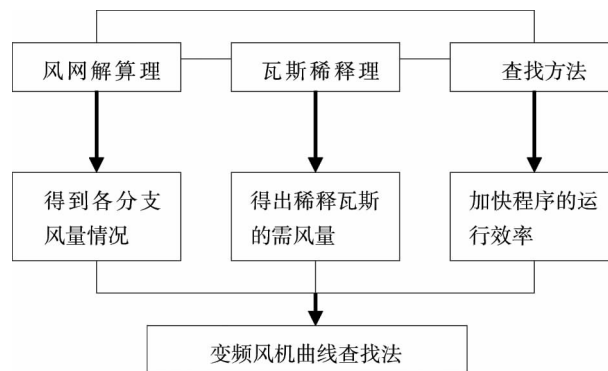


图 1 变频查找法理论构成

1.1 风网解算理论

本文采用 Scott 风量迭代法进行风网解算并修正风量,依据风量平衡定理和风压平衡定理^[9-10]为基础,构成 1 个 N 阶的以风量为未知数的非线性大型方程组并通过非线性方程的线性化来求解,见式(1).对风机性能曲线采用二段曲线拟合法,对正常工作段采用拉格朗日插值法拟合,对风机性能曲线的不稳定工作段,则采用直线拟合,见式(2).具体参数意义及原理参照参考文献[7,11].

$$\Delta Q_i = \frac{\sum_{j=1}^N b_{ij} R_j |Q_j| Q_j - P_i - F_i}{2 \sum_{j=1}^N b_{ij} R_j |Q_j| - \frac{dF_i}{dQ_i}}, i = 1, 2, \dots, M; \quad (1)$$

$$H_{f_i} = C_1 + C_2 Q_i + C_3 Q_i^2, \quad Q_i \geq Q_1;$$

$$H_{f_i} = H_i, \quad Q_i < Q_1. \quad (2)$$

1.2 瓦斯稀释理论

当某条分支瓦斯浓度超限时,按式(3)可计算出该分支的稀释瓦斯所需的最小风量.

$$Q_1 = \frac{C_1}{C_0} Q_0. \quad (3)$$

式中: Q_1 为瓦斯浓度超限分支稀释瓦斯所需的最小风量; C_1 为超限分支的瓦斯浓度值; C_0 为规定的瓦斯浓度上限; Q_0 为分支实际供风量.

若采用风机变频调节稀释超限瓦斯,由于频率调节上限为 50 Hz,风量的调节上限为 Q_{50} ,所以存在一个最大稀释瓦斯浓度 C_{\max} ,由式(3)可推出其计算式为

$$C_{\max} = \frac{Q_{50}}{Q_0} C_0. \quad (4)$$

若瓦斯浓度 $C > C_{\max}$,则超过了变频系统的瓦斯稀释能力,此时可联合采用其他方法治理瓦斯超限.

1.3 查找方法

本文采用跳步法和二分法的查找方法,2种方法的结合可快速的筛选出恰好满足最小稀释风量的风机特性曲线.

1.3.1 跳步法

跳步法查找时根据已有条件,跳过一部分记录,再用较小的步长在小范围内查找.由于该方法的步长不确定,所需要花费的时间不能确定.

1.3.2 二分法

二分法查找也称为对分法查找,这种方法要求数据存储按大小顺序排序.它的基本思想是将 N 个元素分成大致相同的两半,取 $[N/2]$ 与查找的数据对比,如果符合,则是算法终止.如果小于,则从数据的右半部分继续查找(假设数据按升序排列),如果大于,则从数据的左半部分继续查找.如果找到所求的数据则查找成功;如果直到最后一个记录也不能满足要求,则查找失败.若文件中记录数为 N ,则查到一个记录的最多比较次数为 $\log_2 N$.该方法逻辑简单,花费时间较少.

2 变频风机变频查找法原理

变频查找法的原理是通过改变频率的方式视瓦斯浓度的大小随动的改变风机的特性曲线,进而使各分支的风量发生改变,其目的是根据瓦斯稀释理论随动的改变瓦斯涌出点分支的风量,使其达到最小稀释风量,保证瓦斯被稀释到安全值以下.

在瓦斯易异常涌出的分支布置瓦斯浓度传感器,若瓦斯浓度传感器监测的数值 C 大于所设定的阈值 C_0 而小于最大稀释瓦斯浓度 C_{\max} 时,此时瓦斯浓度超限,将超限浓度 C , C_0 值和涌出点分支的原始风量值 Q_0 带入瓦斯稀释公式,即可算出最小稀释风量 Q_1 ,为了使风机调频至 Q_1 所对应的风机特性曲线,先将频率最大时的风机特性曲线带入风网解算程序,解算出的风量 Q_{\max} 与最小稀释风量 Q_1 作对比,若 $Q_{\max} > Q_1$,则利用查找方法,选择该分支原始风量 Q_0 对应的频率 f_0 的风机特性曲线和最大风量 Q_{\max} 对应的频率 f_{\max} 的风机特性曲线的中间值 f_{mid} 的风机特性曲线,将其再次带入风网解算程序,算解算出的该分支的风量 Q_2 再与最小稀释风量 Q_1 作对比,重复上述过程,采用二分法不断缩小查找范围,直到所调风量与稀释风量最接近并略大时为止,最终输出的风机特性曲线所对应的频率 $F(C)$ 即为目标频率下的风机特性曲线.

当瓦斯超限时的具体调风流程图如图 2 所示,变频风机变频查找法需要不同频率下风机曲线库的建立,风机曲线库中的各个风机曲线根据不同频率由小到大的顺序存储在数据库中,频率按照间隔为 1 Hz 的单位递增,在用二分法查找时为了避免频率不为整数的情况,采取奇数频率加一的方式,再进行二分查找.

除此之外,当瓦斯浓度值 C 小于阈值 C_0 ,瓦斯浓度未超限,风机维持常态频率运行;若瓦斯浓度 $C > C_{\max}$,风机调至最大频率 50 Hz,但仍不能将瓦斯稀释,应采用其他方法对其进行治理.

综上所述,风量按式(5)进行调节:

$$\begin{aligned}
 C < C_0, \quad f = f_0; \\
 C_0 \leq C \leq C_{\max}, \quad f = F(C); \\
 C < C_0, \quad f = f_{\max}.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

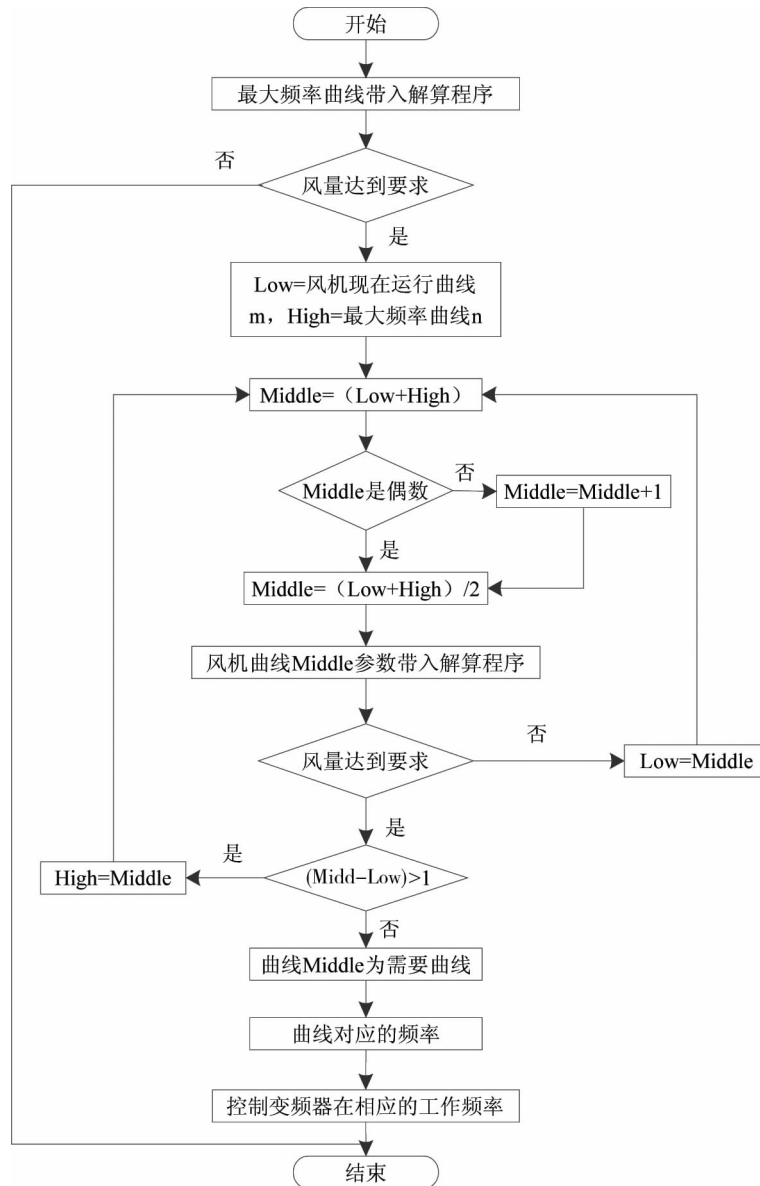


图2 瓦斯超限时的具体调风流程

3 查找次数及运行时间分析

风机曲线参数根据不同频率由小到大的顺序存储在数据库中,因此可以使用跳步法与对分法结合的方式查找.变频器一般输出频率是 25~50 Hz,因此风机曲线共有 26 条,需查找次数最多需要 5 次.如果一次网络解算需要的最长时间为 t ,则查找适合的风机曲线需要时间则为 $5t$.在风机的实际运行中,并不是在变频器频率的最大值或最小值上运行,一般会选择变频器的中间的某个频率,这样可以为风机留有向上或向下调节的空间.因此实际的风机曲线查找所需要的时间也和风机常态运行所在的频率有关.在查找的时候,先根据风机现在运行的变频器的频率,跳过小于该频率的所有记录(假设需要增大风量调节),然后使用二分法对余下分支查找分析.假设风机在常态运行时变频器的输出频率为 H ,当需增向高频调节时,需要查找次数为 $\log_2(50 - H)$.

判断该曲线风机曲线是否合适,需要将风机曲线参数带入网络解算程序.因此程序运行的时间为风机

曲线查找所花费的时间加上每次网络解算的时间.风网解算时间较短,程序运行时间主要受查找时间影响,而该模型查找次数较少,最多为5次,因此程序运行时间较短,运行效率较高.

4 调风比

当瓦斯浓度超限时,输出的调节风量 Q_2 与按照瓦斯浓度所计算的需风量 Q_1 并不一定完全相同,定义其比值 t 为

$$t = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (6)$$

在瓦斯稀释范围内,由于调节风量大于瓦斯稀释的需风量,所以, $t \geq 1$, 根据变频查找法的原理, t 值越趋近于1,说明风量调节的越准确,风量的利用效率越高.若瓦斯浓度超过了变频系统的瓦斯稀释能力,调节风量小于瓦斯稀释的需风量, $t < 1$.因此, t 值可以表征瓦斯稀释能力是否满足要求, $t \geq 1$, 则满足要求,否则不满足要求,无法将瓦斯稀释安全值以下.

5 通风管道模型实验及实验数据分析

5.1 实验准备

5.1.1 实验模型

为验证上述理论的实用性和正确性,以神华集团大柳塔煤矿的通风系统为原型设计了该实验模型,模型布置如图3所示,模型网络图如图4所示,工作面分支为17号分支.



图3 模型布置

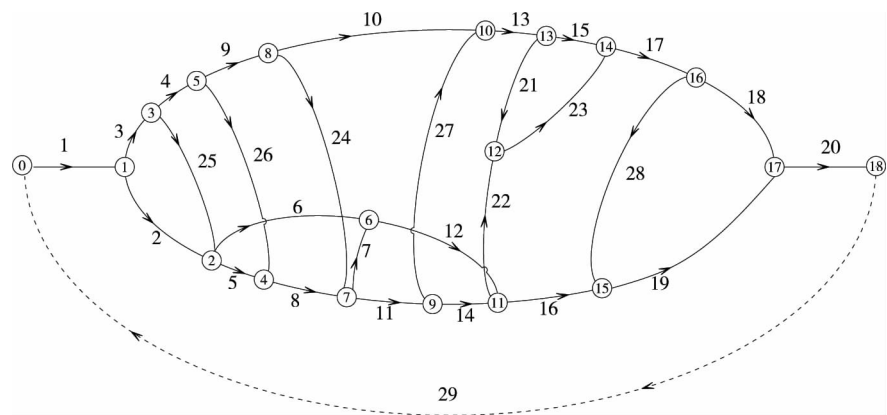


图4 实验管道模型网络

本文并未写到有关于敏感分支的内容,在后续文章中会证明每条分支风量对风机变频的灵敏度不同,因此风机变频时各分支风量变化幅度不同,敏感分支风量变化大,非敏感分支风量变化小.通过理论推导和计算也将证明瓦斯涌出点分支即是敏感分支.工作面分支是瓦斯涌出点分支,且是敏感分支,其分支风量对风机变频的灵敏度高,分支风量较其他分支变化明显,易实现增风稀释超限瓦斯.故实验过程中选取工作面分支(17号分支),并通过 CO_2 气罐向该分支释放 CO_2 气体(因瓦斯具有一定的危险性,为了实验的可操作性和安全性,在该模型试验中用 CO_2 模拟瓦斯),并在该分支上布置 CO_2 浓度传感器,通过 PLC 编程和控制将 CO_2 浓度值实时传输至上位机中.

5.1.2 模型参数与风网解算

通过测风求阻法,经过多次测定,最终得到分支号1~分支号29的风阻分别为3.9,27.1,32.3,10.5,10.7,23.7,8.9,10.8,10.4,10.5,10.9,23.5,10.6,10.3,8.4,16.5,9.5,25.4,27,5.6,12.8,6,25.7,17.1,17,17.2,17.1,17.5, $0.0 \text{ N} \cdot \text{S}^2/\text{m}^8$.

实验测得26个频率下的风机型性能曲线,以该26条风机性能曲线建立曲线库,如表1所示,并通过程序可快速查找出每条曲线,用于风网解算.

表1 26条风机性能曲线

| 频率/ Hz | 风机特性曲线 | 频率/ Hz | 风机特性曲线 |
|--------|------------------------------------|--------|------------------------------------|
| 25 | $H = 55.647Q^2 - 134.01Q + 113.42$ | 38 | $H = 58.604Q^2 - 226.14Q + 291.53$ |
| 26 | $H = 59.931Q^2 - 146.14Q + 125.73$ | 39 | $H = 56.433Q^2 - 228.32Q + 306.41$ |
| 27 | $H = 57.008Q^2 - 149.02Q + 135.7$ | 40 | $H = 56.201Q^2 - 233.84Q + 322.2$ |
| 28 | $H = 60.148Q^2 - 160.43Q + 148.97$ | 41 | $H = 56.737Q^2 - 241.94Q + 340.68$ |
| 29 | $H = 60.551Q^2 - 168.76Q + 162.36$ | 42 | $H = 59.456Q^2 - 254.93Q + 361.66$ |
| 30 | $H = 58.956Q^2 - 172.71Q + 174.09$ | 43 | $H = 59.247Q^2 - 261.84Q + 380.68$ |
| 31 | $H = 59.339Q^2 - 180.01Q + 187.31$ | 44 | $H = 61.094Q^2 - 272.87Q + 401.36$ |
| 32 | $H = 60.033Q^2 - 188.91Q + 202.47$ | 45 | $H = 61.509Q^2 - 280.37Q + 419.85$ |
| 33 | $H = 56.735Q^2 - 188.68Q + 213.19$ | 46 | $H = 59.922Q^2 - 283.66Q + 438.14$ |
| 34 | $H = 59.817Q^2 - 202.15Q + 231.05$ | 47 | $H = 60.814Q^2 - 292.57Q + 458.96$ |
| 35 | $H = 57.593Q^2 - 204.59Q + 244.19$ | 48 | $H = 60.693Q^2 - 299.46Q + 479.48$ |
| 36 | $H = 56.274Q^2 - 207.92Q + 257.62$ | 49 | $H = 63.942Q^2 - 315.56Q + 506.55$ |
| 37 | $H = 56.675Q^2 - 214.86Q + 273.19$ | 50 | $H = 58.215Q^2 - 302.36Q + 508.18$ |

将各分支风阻和26条风机曲线带入风网解算软件中,分别进行解算,得到不同频率下各分支的风量,并分别与对应频率下各分支的实测风量作对比.经计算对比分析得知,不同频率下解算得到的各分支风量和对应频率的各分支实测风量的误差较小.本文只列出了50 Hz下风网解算所得风量与实测风量的数据对比,见表2.

表2 风网解算所得风量与实测风量对比

m³/s

| 分支号 | 解算风量 | 实测风量 | 分支号 | 解算风量 | 实测风量 | 分支号 | 解算风量 | 实测风量 | 分支号 | 解算风量 | 实测风量 |
|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|
| 1 | 1.91 | 2.00 | 8 | 0.65 | 0.66 | 15 | 0.64 | 0.70 | 22 | 0.33 | 0.34 |
| 2 | 1.01 | 1.03 | 9 | 0.66 | 0.65 | 16 | 0.91 | 0.88 | 23 | 0.36 | 0.40 |
| 3 | 0.91 | 0.89 | 10 | 0.66 | 0.63 | 17 | 1.00 | 1.02 | 24 | 0.02 | 0.02 |
| 4 | 0.69 | 0.71 | 11 | 0.65 | 0.66 | 18 | 0.97 | 1.00 | 25 | 0.23 | 0.22 |
| 5 | 0.62 | 0.70 | 12 | 0.61 | 0.54 | 19 | 0.94 | 0.90 | 26 | 0.03 | 0.02 |
| 6 | 0.60 | 0.50 | 13 | 0.67 | 0.65 | 20 | 1.91 | 2.00 | 27 | 0.01 | 0.01 |
| 7 | 0.02 | 0.02 | 14 | 0.63 | 0.65 | 21 | 0.03 | 0.03 | 28 | 0.03 | 0.04 |

5.2 最大“瓦斯”稀释浓度的确定

考虑到安全富裕系数,在该实验模型中CO₂浓度上限值取0.8%,即阈值C₀为0.8%.测得50 Hz的风量Q₅₀为1.0 m³/s,将该值作为Q₁,不同的常态频率(风机正常工作时所对应的频率)对应不同的Q₀值,将其分别带入式(4),可得不同常态频率下的最大瓦斯稀释浓度,见表3.

表3 不同常态频率下的最大稀释浓度

| 常态频率/ Hz | 17号分支风量/(m ³ /s) | 最大稀释能力/% | 常态频率/ Hz | 17号分支风量/(m ³ /s) | 最大稀释能力/% |
|----------|-----------------------------|----------|----------|-----------------------------|----------|
| 28 | 0.58 | 1.54 | 38 | 0.77 | 1.03 |
| 30 | 0.62 | 1.30 | 40 | 0.80 | 1.00 |
| 32 | 0.65 | 1.23 | 42 | 0.84 | 0.95 |
| 34 | 0.69 | 1.16 | 44 | 0.88 | 0.91 |
| 36 | 0.73 | 1.10 | 46 | 0.92 | 0.87 |

分析表3可知风机所处的常态频率越小其稀释能力越大,即最大瓦斯稀释浓度越高;风机所处的常态频率越大其稀释瓦斯能力越小,对应的最大瓦斯稀释浓度也越小.

5.3 瓦斯稀释实验

本文取Q₀为30 Hz时对应的风量为常态频率风量,其所对应的最大瓦斯稀释浓度C_{max}为1.3%.按照

变频查找法原理,当检测得到工作面分支的 CO_2 浓度在 0.8% 以下,系统默认正常,不作调风响应风机维持常态频率;当 CO_2 浓度在 0.8%~1.3% 之间,则根据稀释公式计算出最小需风量,结合上述查找模型,自动调整风机频率进而改变风量,最终确定出既能满足最小需风量又能将 CO_2 浓度稀释到安全值以下的调节风量;当 CO_2 浓度高于 1.3% 时,超过了其稀释能力,此时风机频率调至最大,即 50 Hz. 分别进行了上述 3 种情况下的瓦斯稀释实验,第 1 组实验为 CO_2 浓度低于 0.8%,第 2 组实验为 CO_2 浓度在 0.8%~1.3% 之间,第 3 组实验为 CO_2 浓度高于 1.3%. 每次实验时间皆持续 90 s,且实验过程中按照 3 种不同的情况持续向管道内以对应的释放速率释放 CO_2 ,具体实验数据见表 4.

表 4 变频调节前后各参数数据

| 项目 | 风机频率/Hz | | 风量/(m^3/s) | | | CO_2 浓度/% | | 响应时间/s | 调节风量与需风量比值 |
|----|---------|-------|------------------------------|------|-------|--------------------|-------|--------|------------|
| | 原风机频率 | 调节后频率 | 原风量 | 所需风量 | 调节后风量 | 原浓度 | 调节后浓度 | | |
| 1 | 30 | 30 | 0.62 | | 0.62 | 0.35 | 0.35 | 0.0 | |
| | 2 | 30 | 0.62 | | 0.62 | 0.49 | 0.49 | 0.0 | |
| | 3 | 30 | 0.62 | | 0.62 | 0.67 | 0.67 | 0.0 | |
| 2 | 30 | 35 | 0.62 | 0.71 | 0.71 | 0.91 | 0.79 | 1.8 | 1.000 |
| | 30 | 41 | 0.62 | 0.81 | 0.82 | 1.04 | 0.80 | 1.7 | 1.010 |
| | 30 | 46 | 0.62 | 0.87 | 0.89 | 1.12 | 0.79 | 1.5 | 1.020 |
| | 30 | 49 | 0.62 | 0.97 | 0.98 | 1.25 | 0.78 | 1.6 | 1.010 |
| | 30 | 50 | 0.62 | 1.00 | 1.00 | 1.3 | 0.8 | 1.4 | 1.000 |
| 3 | 30 | 50 | 0.62 | 1.05 | 1.00 | 1.36 | 0.84 | | 0.952 |
| | 30 | 50 | 0.62 | 1.12 | 1.00 | 1.48 | 0.92 | | 0.892 |
| | 30 | 50 | 0.62 | 1.20 | 1.00 | 1.55 | 0.96 | | 0.830 |

注:响应时间表示 CO_2 浓度由监测到浓度超限并报警时到第 1 次降至 0.8% 以下的时间

由实验数据表可以得出以下结论:

- 1) 多次的瓦斯稀释实验验证了变频查找法的可行性和理论的正确性.
- 2) 当 CO_2 浓度小于 0.8% 时,上位机并未响应,变频器频率不变.当 CO_2 浓度在 0.8%~1.3% 时,上位机在极短的时间内做出响应,并找到合适的风机特性曲线所对应的频率,从而改变风量,很快将超限瓦斯稀释到安全值,具有较好的瓦斯稀释效果.
- 3) 当 CO_2 浓度在 0.8%~1.3% 时,调风比几乎趋近于 1,表明了变频查找法稀释瓦斯过程中风量调节的精准性及较高的风量利用效率.同时体现了变频查找法程序的准确性和稳定性.
- 4) 当 CO_2 浓度大于 1.3% 时,调风比小于 1,说明风量不足以稀释瓦斯,风机在维持最大 50 Hz 运转的情况下,虽然将 CO_2 浓度稀释到更小,但仍不能将其稀释到安全值以下,稀释失败.
- 5) 每次实验持续 90 s,且实验过程中按照 3 种不同的情况持续向管道内以对应的释放速率释放 CO_2 . 第 1 组实验中未出现增风稀释情况,风机维持原频率运转;第 2 组实验出现了多次增风稀释情况,每次响应时间均较短,且由于稀释作用,其浓度峰值在浓度阈值附近,且浓度变化曲线呈波浪形,并呈衰减趋势;第 3 组实验中,风机一直以最大频率运转.

6 结论

- 1) 变频风机变频查找法模型最多可查找 5 次,程序运行具有高效性.
- 2) 变频查找法稀释瓦斯过程中风量调节具有精准性及较高的风量利用效率.在瓦斯稀释能力范围内,调风比几乎趋近于 1.
- 3) 风机所处的常态频率越小其稀释能力越大.

参考文献:

- [1] 刘书波. 矿井瓦斯鉴定和风量计算方法的探讨[J]. 东北煤炭技术, 1996(6): 13-15.
- [2] 赵生山, 赵洪宝. 风速对工作面瓦斯稀释影响规律的数值模拟[J]. 金属矿山, 2011(2): 25-27.
- [3] 张进. 矿井瓦斯涌出及瓦斯流动预测的统计研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2005.
- [4] 吴维权, 魏国山, 吕明飞. 基于风量调节的高瓦斯易自燃矿井火灾与瓦斯治理[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 109-111.
- [5] 吴奉亮. 矿井复杂风网灵敏度求解及其稳定性分析[J]. 科技导报, 2011, 29(19): 62-65.
- [6] 程磊, 党海波, 吴磊. 矿井通风网络分析方法研究现状与发展趋势[J]. 煤, 2010, 19(8): 61-63.
- [7] 李汇明, 蒋曙光, 吴征艳, 等. 基于 VB 语言的矿井风网解算系统的设计[J]. 煤矿安全, 2011, 42(3): 59-62.
- [8] 魏连江, 周福宝, 朱华新. 通风网络拓扑理论及通路算法研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(8): 926-930.
- [9] 黄光球, 陆秋琴, 郑彦全. 基于回路阻力闭合差最优分配的通风网络解算方法[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(10): 125-129.
- [10] 陆秋琴, 黄光球, 马亮. 节点风压解算通风网络的改进方法[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2007, 22(3): 85-89.
- [11] 王德明. 矿井通风与安全[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.