

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.053

基于平衡二叉树的井下通风量变频调控技术

陈梦乔,张乐,丁宏磊

(国能新疆宽沟矿业有限责任公司,新疆维吾尔自治区 昌吉 831215)

摘要:针对在井下通风量控制过程中,存在“死区时间”而导致传感器数据匹配节点错误,分配风量与节点实际需风量不一致,存在风量供需比不够理想的问题,提出基于平衡二叉树的井下通风量变频调控技术。构建平衡二叉树并通过确定传感器数据所在的左右子树搜索出传感器数据所属的目标节点,计算出节点的需风量。将平衡二叉树节点映射到井下通风网络矩阵中,计算出各个节点所需分配的风量。结合通风机变频参数与风量调控之间的非线性关系,根据需风量,分析得出通风量变频调控参数策略。实验结果表明:该项技术调控下的风量供需比较理想,在1.00~1.15的区间内,这既满足了井下通风需求,又不会造成风量资源的过度浪费,其应用前景良好。

关键词:通风量;井下通风;平衡二叉树;风量控制;变频调控;矿井通风

中图分类号:TD72 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)03-0271-04

Balanced Binary Tree-Based Frequency Conversion Regulation Technology for Underground Ventilation Air Volume

CHEN Mengqiao,ZHANG Le,DING Honglei

(Guoneng Xinjiang Kuangou Mining Co., Ltd., Changji 831215, China)

Abstract:In the control process of underground ventilation air volume, the presence of "dead time" can lead to mismatched sensor data nodes, resulting in a discrepancy between the allocated air volume and the actual demand at the nodes, and thus a less-than-ideal air supply-demand ratio. To address this issue, a frequency conversion regulation technology for underground ventilation air volume based on a balanced binary tree is proposed. A balanced binary tree is constructed, and by determining whether sensor data belongs to the left or right subtree, the target node to which the sensor data corresponds is identified, and the required air volume for that node is calculated. The balanced binary tree nodes are then mapped onto the underground ventilation network matrix to compute the air volume to be allocated to each node. Considering the nonlinear relationship between fan frequency conversion parameters and air volume regulation, a strategy for frequency conversion regulation parameters is derived based on the required air volume. Experimental results show that the air supply-demand ratio achieved under this technology is close to ideal, ranging between 1.00 and 1.15. This not only meets underground ventilation requirements but also avoids excessive waste of air volume resources, demonstrating promising application prospects.

Keywords:ventilation rate; underground ventilation; balanced binary tree; air volume control; variable frequency regulation; mine ventilation

0 引言

矿井的通风需求受多种因素影响,包括井下人员的数量、瓦斯情况、劳动生产率、采煤方法、产量变化以及巷道阻力等。这些因素存在较大的变化,导致通风需求也随之变化。如何通过改变通风机的转速来调节井下通风量,成为目前研究的热点

邓博知等^[1]采用数值模拟的方式分析矿井内通风运移规律,计算最佳的风量配比,控制矿井内的通风量。但该方法无法适应通风环境的变化,

导致调控后的风量供需比偏离理想区间。任子晖等^[2]引入天牛须算法寻优得到最佳调控参数,满足预期通风量需求。但该方法的参数若设置不当,会导致实际调控的风量供需比过大。WANG等^[3]通过模拟分析计算全风机压力以及射流角度风参数,推导出矿井环境的漏风量和阻风率,得到最佳风量调控参数组合。但该方法的风量在分配过程中不够均衡,导致风量的供需比存在偏离理想区间的情况。于保才等^[4]引入实数编码的方法改进淘汰机制以及收敛方向,求解最优的调控策略。但该方法未能充分考虑井下的复杂因素,导

第一作者简介:陈梦乔(1987—),男,新疆维吾尔自治区乌鲁木齐人,工程师,本科,研究方向为一通三防管理,fetunba02@163.com。

致风量供需比过小。

为了缓解这些问题,本研究提出了一种基于平衡二叉树的井下通风量变频调控技术,通过平衡二叉树实现井下传感器数据的快速查找并计算出所需风量,实现效果较优的变频调控。

1 基于平衡二叉树的井下通风量变频调控技术

1.1 基于井下目标点位传感器数据查找的总需风量计算

为了精准且实时地了解井下的环境状态,在井下设置多个传感器。针对所采集的传感器数据,构建平衡二叉树结构,查找出井下目标点位的传感器数据,从而计算各个点位的需风量。

根据井下传感器的布置情况,构建平衡二叉树的传感网络结构。通过递归计算,确定平衡二叉树的形状,如式(1)所示^[5]

$$F(n) = F(n-1) + F(n-2) + 1 \quad (1)$$

式中: $F(n)$ 表示平衡二叉树包含的节点总数; n 表示传感器所属的井下点位数量; $F(n-1)$ 表示平衡二叉树的左子树节点数量; $F(n-2)$ 表示右子树的节点数量。

利用所构建的平衡二叉树,对井下传感器数据进行目标数据的查找,这一过程如式(2)所示

$$\lambda(a) = F(n) \otimes H(a|b)^n \quad (2)$$

式中: a 表示目标查找的平衡二叉树节点; b 表示平衡二叉树的根节点; λ 表示节点关系; H 表示子树类别。

结合井下瓦斯、CO₂以及作业人员数量等多因素,综合计算井下需风量,如式(3)所示^[6-8]

$$Q(a) = \frac{q_a \delta W_a K}{N_a} \quad (3)$$

式中: $Q(a)$ 表示在平衡二叉树节点 a 所对应传感器点位的需风量; q_a 表示该点位的瓦斯涌出量传感数据; W_a 表示CO₂涌出量传感数据; N_a 表示该点位测量范围内存在的工作人员数量; δ 表示瓦斯涌出量的不均匀系数; K 表示CO₂涌出量的极值与均值的比值。

平衡二叉树所包含的节点数量,计算出井下的总需风量,如式(4)所示

$$Q = S \sum_{a=1}^{F(n)} Q(a) \quad (4)$$

式中: Q 表示井下总需风量; S 表示井下环境的总面积。

1.2 基于井下总需风量的节点风量分配

考虑到井下环境往往较为复杂,因此,为了确保能够满足各个点位的需风量供给,本研究基于井下总需风量,构建通风网络矩阵,将矩阵中的节点与平衡二叉树中的节点进行映射关联,为每个节点分配风量。

构建井下传感器节点的通风网络矩阵,如式(5)所示^[9]

$$D = [d_{ij}], d = \begin{cases} 1 & i \text{ 与 } j \text{ 关联, 且 } i \text{ 为始节点} \\ -1 & i \text{ 与 } j \text{ 关联, 且 } i \text{ 为末节点} \\ 0 & i \text{ 与 } j \text{ 不关联} \end{cases} \quad (5)$$

式中: D 表示通风网络矩阵; d 表示矩阵元素,表达了节点的关联关系; i 表示传感器节点; j 表示井下的巷道路径。

将该矩阵中的元素节点与平衡二叉树的节点进行映射关联,如式(6)所示

$$f = \exists ! d_{ij} \rightarrow a \quad (6)$$

式中: f 表示节点映射关联关系; $\exists !$ 表示存在且唯一。

构建节点风量的平衡关系,如式(7)所示

$$\sum_{d=1}^n f(d_{ij}, a) Q(a) = 0 \quad (7)$$

式中: $f(d_{ij}, a)$ 表示映射关联的一组节点。

根据这一平衡关系,结合风量的流动,计算井下的风压参数,如式(8)所示^[10]

$$g_j = \sum_{d=1}^n f(d_{ij}, a) R_j | Q(a) | - P_j - E_j \quad (8)$$

式中: g_j 表示井下风压; R_j 表示风阻; P_j 表示巷道路径内所布设的通风机的风压; E_j 表示自然风压。

由此解算出所需分配的节点通风量,如式(9)所示

$$U(d_{ij}, a) = \frac{g_j}{\sum_{d=1}^n B^2 R_j | Q(a) | - g_j} \quad (9)$$

式中: U 表示节点的分配通风量; B 表示通风机特性。

1.3 节点风量分配下的通风量变频调控

基于井下每个节点所需的分配量,结合通风机的性能参数,对通风机的电机转速参数进行计算,从而实现井下通风量的变频调控。

构建通风机电机的机械运动方程,如式(10)所示

$$\begin{cases} T_e = \frac{3}{2} p_0 \Psi_c \\ \frac{J}{p_0} \frac{d\omega}{dt} = T_e - \frac{\zeta}{p_0} \omega - T_L \end{cases} \quad (10)$$

式中: T_e 表示电磁转矩; ω 表示通风机电机运行的转速; p_0 表示通风机电机的极对数; Ψ_c 表示永磁体磁链; J 表示转动惯量; ζ 表示黏滞摩擦因数; T_L 表示负载转矩。

根据式(10),对通风机的实际输出风量进行计算,如式(11)所示

$$Q_\omega = \frac{3p_0^2 \Psi_c}{2J} - \frac{T_e \zeta \omega}{J} - \frac{p_0 T_L}{J} \quad (11)$$

式中 Q_ω 表示通风机的实际输出风量。

基于通风机的实际输出风量,定义变频调控系数,如式(12)所示

$$k = \varepsilon \left(\frac{\hat{Q}_\omega}{U(d_{ij}, a)} \right)^z \quad (12)$$

式中: ε 表示通风机电机的功率损耗; z 表示变频指数; $\hat{Q}_\omega$ 表示修正的实际输出风量。

通过在平衡二叉树中实时查找各个节点的传感器数据,实时计算出调控参数,从而实现通风量的变频调控。

2 实验

以某矿井的井下作业环境为依托,对本研究所设计的调控技术进行实践测试。依据相关设计规范,该矿井的自然风压约为 335.5 Pa,包括主斜井、副立井以及回风立井 3 种类型的井筒,每种井筒的净断面分别设计为 14.9 m²、69.9 m² 以及 38.0 m²。

该矿井的井下包含 10 条巷道,每条巷道的环境参数如表 1 所示。

表 1 井下巷道环境参数

巷道	长度/m	百米风阻/ (N · s ⁻² · m ⁻⁸)	空气密度/ (kg · m ⁻³)
1#	1 652	0.003 562	1.056 6
2#	291	0.004 996	1.031 8
3#	349	0.000 488	1.055 1
4#	618	0.004 156	1.014 5
5#	345	0.007 857	1.055 7
6#	398	0.000 469	1.016 8
7#	155	0.003 456	1.023 9

续表 1

巷道	长度/m	百米风阻/ (N · s ⁻² · m ⁻⁸)	空气密度/ (kg · m ⁻³)
8#	846	0.007 851	1.028 3
9#	485	0.001 561	1.010 5
10#	715	0.002 696	1.028 5

在该环境下,设置有两台通风机以及多个不同类型的传感器设备,包含瓦斯浓度传感器、CO₂ 浓度传感器以及风速传感器等多个类型,如表 2 所示。

表 2 井下传感器性能参数

传感器类型	参数	数值
瓦斯 CH ₄ 浓度传感器	响应时间/ms	<20
	测量范围/%CH ₄	0~4
	复电点/%CH ₄	0.3~4.0
CO ₂ 浓度传感器	测量范围/mbarpCO ₂	10~1 000
	准确度/mbar	±0.1+10
	响应时间/s	≤60
	电极长度/mm	120
	液接膜体材料	聚四氟乙烯
风速传感器	测量范围/(m/s)	0~60
	风向量程/(°)	0~359
	风速风向响应时间/s	1
	大气压力量程/kPa	0~120
	风速精度/(60%RH,25℃)	±3

将矿井环境内所设置的传感器设备连接至 PC 机,并在该 PC 机中构建平衡二叉树进行传感器数据的存储与查找,存储与查找结果如图 1 所示。

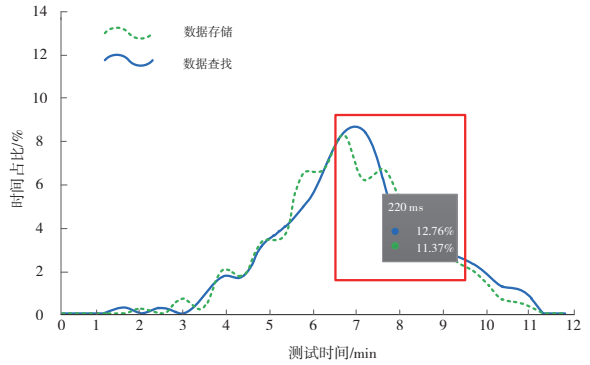


图 1 井下目标点传感器数据的存储与查找结果

如图1所示,在平衡二叉树的构建下,对于传感器数据的存储与查找均较为高效,在整体数据传输时间的占比较小,为6.5~9.5 min。

基于传感器数据的查找结果,采用式(4)计算井下的总需风量,并依据总需风量构建通风网络矩阵,将井下传感器节点映射到二叉树节点上,进行节点通风量分配,如图2所示。(本刊为黑白印刷,疑问之处请咨询作者)

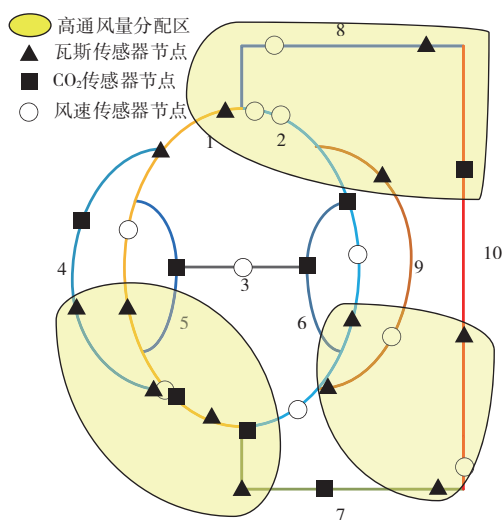


图2 井下目标传感器节点通风量分配结果

如图2所示,本文技术将平衡二叉树所描述的传感器节点信息及数据,在通风网络矩阵中进行了映射。并在瓦斯传感器节点密集的区域,分配了高通风量,以确保能及时、准确地监测瓦斯浓度。

结合节点通风量分配结果,对每个节点的需风量进行计算,并计算出通风机参数,从而实现通风量的变频调控。在调控时段内,本文技术的应用结果如图3所示。

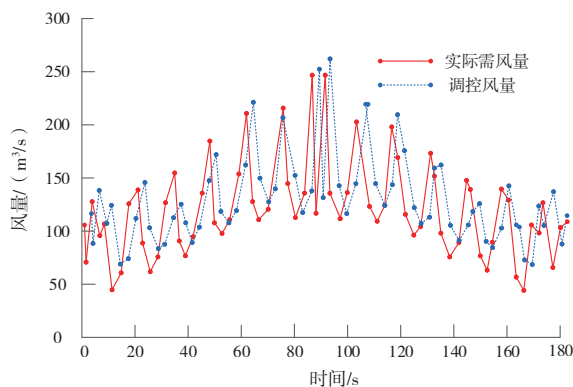


图3 通风量变频调控结果

从图3可以看出,在本文技术的调控下,井下环境内的输出风量与其实际的需风量十分接近,它能够确保通风机所输出的风量满足井下环境的安全作业需求,且不会过多的输出风量,避免了资源浪费问题。

结合基于天牛须搜索算法以及基于改进鸽群算法两种矿井风量调控方法作为对照组,在较长的时间段内,以风量供需比为指标,对不同方法调控下的风量需求满足情况以及通风资源浪费情况进行评价,结果如图4所示。

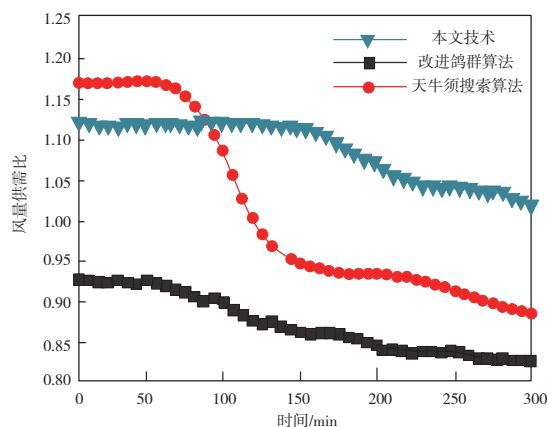


图4 风量调控效果对比

从图4可以明显看出,相较于对比方法,在本文技术的调控下,风量供需比值始终稳定在1.00~1.15的区间内,显示出更好的调控效果。这一优势主要得益于本文方法通过构建平衡二叉树实现了传感器数据的精准查找,从而能够计算出更加准确的需风量,实现供需比更为理想的风量变频调控。

3 结语

本研究通过构建平衡二叉树,实现了高效的传感器数据的存储与查找,通过平衡二叉树节点与矩阵节点之间的映射,计算出了每个井下点位所需分配的风量,进而对通风机的频率参数进行了计算,得到风量调控的参数策略,成功将风量供需比保持在理想的区间内,为井下通风量的控制提供了新的研究思路。

参考文献:

- [1] 邓博知,夏晓峰,聂百胜,等. 沿空留巷Y型通风瓦斯运移规律及风量调控研究[J]. 矿业安全与环保, 2024,51(3):16-27,35.

(下转第286页)

- 收稿日期:2025-03-04

能控制系统研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 166-174.

- 收稿日期:2025-02-10