

闫振国, 张龙成, 王延平, 等. 矿井通风网络风量智能推演理论与传感器优化布设研究[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(6): 2197–2207.

YAN Z G, ZHANG L C, WANG Y P, et al. Intelligent airflow deduction theory and sensor optimization in mine ventilation networks [J]. Journal of Safety and Environment, 2026, 26(6): 2197–2207.

矿井通风网络风量智能推演理论与传感器优化布设研究*

闫振国, 张龙成, 王延平, 曹豫其, 阮佳宁

(西安科技大学安全科学与工程学院, 西安 710054)

摘要:煤炭作为我国的主体能源,其智能通风系统是安全生产的核心。针对矿井通风网络中风量感知信息冗余、解算初始风量分配不合理等导致网络解算效率低的问题,提出一种融合风量智能推演理论与传感器优化布设的协同框架。首先,基于通风网络拓扑约束与风量平衡定律,结合奇异值分解(Single Value Decomposition, SVD)强化树枝与余树弦风量的数学耦合关系,严格证明大型网络中独立回路数与分支总数之比趋近于 $1/3$ 的规律,揭示仅需布设约33%分支的传感器即可实现全风网风量推演的理论可行性。其次,构建灵敏度双因子加权生成树模型,以分支自身灵敏度与被影响度的乘积定义边权,结合Kruskal算法确定高信息密度的余树弦分支集。再次,以利用平衡方程直接求解风量的分支数量最大化为优化目标,将余树弦分支集作为解空间,建立一种传感器布局优化模型。最后,设计DETMAX-Tabu混合优化算法,引入禁忌表动态存储高价值分支,突破传统算法局部收敛局限。案例验证表明,基于监测的推演风量可显著加速解算迭代收敛,在22分支的试验网络中,将安装8个传感器对应的推演风量作为初始风量,可使网络解算收敛迭代次数从1 062次减少到455次,共减少57.2%。研究成果为矿井通风实时调控提供了一套“传感器优化布置—风量智能推演—解算快速收敛”完整的技术路径,可助力智能通风系统动态响应能力提升。

关键词:安全工程;矿井通风;风速传感器;布局优化;DETMAX-Tabu算法;网络解算

中图分类号:X936 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-6094(2026)06-2197-11

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2025.1116

0 引言

煤炭作为全球主体能源之一,占我国一次能源消费比例超55%,其安全生产关乎国家能源战略稳定。在煤矿生产建设中,“一通三防”系统是遏制重大、特重大事故的核心防线,而矿井智能通风起统领作用,即以风量、风速为主的智能感知技术尤为重要^[1]。随着智能化的不断发展,矿井规模逐渐变大,通风网络结构愈加复杂,而开采年限较长的大型矿井所设定的风量、风压监测点通常只占全部井巷数的10%与20%左右^[2]。受限于井下监测点较少,全网络各分支风量的精确监测尚未实现,而风量感知缺陷会降低实时风网的解算效率,进而影响矿井通风的安全管理与通风系统的优化改造,不仅威胁煤矿安全生产与人员安全,还可能对国家造成重大经济与财产损失^[3-4]。

矿井通风智能化的核心突破在于融合风量、风速监测感知、全风网风量、风压解算等多项关键技

术,实现“感知-解算-决策-管控”的智能化闭环。根据煤矿地质特性开发的三维监测平台,可构建从参数监测到处理的技术流程,实现矿井通风管理信息系统与矿井监测系统一体化^[5-7]。对比Kruskal与Prim算法系统的优劣性^[8],可为最小风阻生成树的选择提供理论依据,进而对通风网络权矩阵数据存储结构的重构以及最小生成树的快速构建提供宝贵经验。这些研究为网络解算的实现、独立风压回路以及生成树的选取奠定了基础。

值得注意的是,为解决传统解算方法的局限性,改进Scott-Hinsley法、节点压能等算法被逐渐提出,这些改进算法在回路结构优化、压能迭代校正以及复杂角联网络的简化具有优势,同时,通风机特性曲线智能识别技术也为解算的输入提供了保障^[9-11]。此外,解算初始风量的合理性直接决定了解算收敛速度,零初始化或随机赋值等不当操作,会导致迭代发散、难以收敛^[12]。初始风量的获取一般来自井下风速风量传感器,因此其布置优化可为初始风量的

* 收稿日期: 2025-07-06

作者简介: 闫振国,教授,博士,从事安全技术及工程、矿井智能通风、矿井“一通三防”等研究, yanzhenguo@xust.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52074214); 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2024QCY-KXJ-190); 陕西省重点研发计划项目(2023-YBSF-190)

合理性提供手段。现阶段,大部分传感器的布置方法是在符合安全规程的前提下,基于网络拓扑结构展开研究。例如,学者相继提出了基于网络灵敏度的最少全覆盖布点法、基于最小生成树的通风在线监测系统,以及利用割集矩阵与分支影响度分析的布置优化方法等,旨在通过适量传感器收集数据,以反映通风系统全局运行状态^[13-15]。此外,针对传感器存在测量误差难以估计的缺点,仅利用监测数据难以分配全风网初始风量。邓立军在2015年创新性地构建了矿井通风网络流模型,通过首次改进传统网络最大、最小流算法,实现了无回路阻力平衡约束下的全风网初始风量分配^[16-17]。此外,将节点进出风量差值作为极小化目标函数,使用相继平均移动算法解算,也可以实现对通风网络全局分支测试风量的整体优化^[18-19]。

监测点获取的监测风量是网络解算初始风量的重要参考,但是在矿井风量监测布局研究中,极少探讨监测数据对解算收敛速度的影响。这种“感知-解算”量化链条的割裂,导致在实际应用中难以发挥“精准监测驱动高效解算”的技术协同,制约了矿井通风智能决策系统的实时性能。针对该问题,本文提出矿井通风网络风量智能推演与传感器布局优化协同框架。首先,通过融合奇异值分解(Single Value Decomposition, SVD)^[20]补充树枝与余树弦风量的耦合关系,并在此基础上严格证明仅需布设约1/3分支的传感器即可实现全风网监测理论的可行性;其次,构建灵敏度双因子加权的生成树模型,采用Kruskal算法快速求解最优余树弦;再次,设计DETMAX^[21]与Tabu^[22]的混合优化算法,在最优余树弦的解空间寻优,实现传感器布局的高效求解;最后,采用案例验证随着布设传感器数量的增加,推演风量越接近实际风量分布,即可以更有效地促进解算迭代收敛。研究旨在为矿井通风实时智能解算提供“传感器优化布置—风量智能推演—解算快速收敛”的完整技术路径,进而为矿井安全通风实现监测智能化、通风异常连续分析与预警等提供数据支撑。

1 通风网络风量全局推演理论

1.1 通风网络拓扑约束与风量平衡方程

矿井通风网络作为一个复杂动态的流体网络,其分支代表通风系统中错综复杂的通风巷道,节点则是连接各个分支风量运转的中转站。任意一个通风网络均可以表示为 $G = (V, E)$,其中 $m = |V|$ 表示节点个数, $n = |E|$ 表示分支个数。矿井通风网

络满足的风量平衡定律为

$$\sum_{j=1}^n b_{ij} q_j = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m-1 \quad (1)$$

式中 $b_{ij} = 1$ 与 -1 分别表示分支 j 的风流流入或流出节点 i ; $b_{ij} = 0$ 表示节点 i 与分支 j 无关; q_j 表示分支 j 的风流体积流量, m^3/min 。

B 是由 b_{ij} 组成的基本关联矩阵,即 $(m-1) \times n$ 阶的行满秩矩阵,代表 $(m-1)$ 个风量平衡方程线性无关,当添加至少 $(n-m+1)$ 个分支的风量时,即可求解所有分支风量。若将分支列风量 Q 与基本关联矩阵 B 均按照余树在前、树枝在后的顺序排列并分块,则

$$(B_{11}, B_{12}) \begin{pmatrix} Q_y \\ Q_s \end{pmatrix} = 0 \quad (2)$$

$$Q_s = -B_{12}^{-1} B_{11} Q_y \quad (3)$$

式中 Q_y 表示余树弦风量; Q_s 表示生成树风量; B_{11} 是 $(m-1) \times (n-m+1)$ 维矩阵; B_{12} 是 $(m-1) \times (m-1)$ 的方阵, $\text{rank}(B_{12}) = m-1$ 。推导可得,当给定一组余树弦风量,即 $(n-m+1)$ 个线性无关的风量时,可精确求解生成树风量,进而得到全风网风量。

当给定一组生成树风量 Q_s ,即 $(m-1)$ 个线性无关的风量时,可对式(3)求逆,实现通过生成树风量求解余树弦风量的操作。由于非方阵 B_{11} 没有逆矩阵,因此采用奇异值分解方法(SVD)对 B_{11} 进行矩阵分解,进而采用 Moore-Penrose 逆矩阵代替 B_{11} 的逆矩阵。Moore-Penrose 逆矩阵是逆矩阵概念的推广,广泛应用于解决各种线性方程组问题。SVD 是线性代数中一种重要的正交矩阵分解方法,通常用于矩阵分解和对特定数据进行降维处理。对于给定的 B_{11} 矩阵,其奇异值分解形式为

$$B_{11} = U \begin{pmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} V^T \quad (4)$$

式中 U 是 $(m-1) \times (m-1)$ 维酉矩阵, V 是 $(n-m+1) \times (n-m+1)$ 维酉矩阵, U 和 V 分别表示左奇异向量和右奇异向量组成的单位正交矩阵,描述 $(m-1)$ 维空间和 $(n-m+1)$ 维空间内的旋转变换; $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{n-m+1})$, 表示由 $(n-m+1)$ 个奇异值, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_{n-m+1} > 0$ 组成的对角矩阵,可描述 $(n-m+1)$ 维空间内的伸缩变化。假设 B_{11} 的 Moore-Penrose 逆为 B_{11}^+ , 则

$$B_{11}^+ = V \begin{pmatrix} \Sigma^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} U^T \quad (5)$$

进而得到采用生成树风量 Q_s 求解余树弦风量

Q_y 的计算公式为

$$Q_y = -B_{11}^+ B_{12} Q_s \quad (6)$$

1.2 大型网络风量可推演性证明

欧拉定理在矿井通风网络中的应用揭示了网络结构的一个基本规律,对于一个连通的网络 G ,若将图的外部区域视为一个特殊的“网孔”,则该连通平面图回路数 f 遵循公式 $f = n - m + 2$ 。针对煤矿通风网络,若不考虑大气虚拟节点及其形成回路,则连通平面图的内部回路数 $C = n - m + 1$,这与通风网络对应生成树的余树弦分支个数相吻合。

矿井通风网络中风流为有向风流,因此通风网络为有向连通图,在有向网络 G 中, m 阶完全图分支最多,假设共含有 P_m^2 个分支,则最大独立回路数 C 可以表示为

$$C = P_m^2 - m + 1 = (m - 1)^2 \quad (7)$$

在一个通风网络中,其最大可能回路个数随节点数的增加呈现超线性增加,设 l 为最大可能独立回路数与最大可能分支数之比,则

$$l = C / P_m^2 = (m - 1) / m \quad (8)$$

随着网络中节点数的增加,通风网络最大可能的独立回路数与网络分支数之比接近于 1,且每一节点都与其他节点通过分支相连接。

但是在矿井通风网络的设计中,为了提高通风效率和管理灵活性,避免循环风的出现,两个节点之间只存在一条单向风路。前人对多个典型通风网络的分支数和节点数进行回归分析,发现节点数 m 与分支在数 n 存在以下线性关系^[23]。

$$m = 0.6587n \quad (9)$$

因此,在对实际通风网络进行分析与计算时,可假设 $3m = 2n$,即每个节点大致对应着 $3/2$ 条分支,则

$$l = C / n = (m + 2) / 3m \quad (10)$$

式(10)表示,通风网络中回路个数与总分支个数之比略大于 $1/3$,且随着网络规模的增大,该比例将逐渐趋近于 $1/3$ 。因此,将风量传感器安装个数增加到分支总数的约 $1/3$ 即可完成全矿井的风量实时监控。

2 传感器优化布设理论与模型

针对矿井风速风量传感器获取数据冗余等缺陷,本文基于通风网络风量全局推演理论,给出一种传感器布局方案。

2.1 基于余树弦的传感器布设理论

基于风量全局化推演的核心流程是,在矿井通

风网络 $G = (V, E)$ 中选择一组余树弦 T_s ,在 T_s 的 $n - m + 1$ 个分支中挑选 a 条安装风速传感器($a < n - m + 1$),形成传感器布设集合 $A = \{e_1, e_2, \dots, e_a\}$,这些分支的实测风量 $q_1^*, q_2^*, \dots, q_a^*$ 视为已知数据,即该余树弦部分分支风量已知,部分分支风量未知。对未知风量的分支,依据巷道类型和邻近实测值进行赋值操作,形成完整的余树弦风量向量。本文通过矩阵运算 $Q_s = -B_{12}^{-1} B_{11} Q_y$ 求解生成树分支风量,并整合为全网风量分布 $Q = \begin{pmatrix} Q_y \\ Q_s \end{pmatrix}$ 。该结果

严格满足节点风量平衡方程 $\sum b_{ij} q_j = 0$,实现了有限传感器条件下全风网风量的大致分布推演。

2.2 基于灵敏度的边加权策略

在矿井通风系统固定工况下,巷道风量变化主要源于风阻扰动,其对系统影响范围广且波动显著^[24]。通风网络分支的灵敏度分析,可以量化分支对风量动态的响应特征,本文以分支自身灵敏度(风阻变化影响其他分支的风量变化的敏感度)与被影响度(受其他分支风阻波动导致的风量敏感度)的乘积作为分支权重进行研究。为避免风量监测数据冗余与系统不平衡问题,在指导传感器布置时,需选取线性无关的余树弦分支进行研究。本文基于灵敏度算法计算边权重,进而构建余树弦优选模型,指导传感器布设,确保监测数据高效捕捉全局风量变化特征。

通风网络风量灵敏度矩阵的计算,目前比较常用的 3 种方法为迭代法、解析法和差分法。其中,差分法的优势在于计算过程容易编制成计算机程序,可以较快地完成灵敏度矩阵的计算。其具体计算步骤如下。

(1)确定矿井通风网络结构,包括 m 个节点和 n 条分支巷道。记录分支巷道的风阻列向量 $R = (r_1, r_2, \dots, r_n)^T$ 和分支位能差列向量 $H^* = (\Delta h_1^*, \Delta h_2^*, \dots, \Delta h_n^*)^T$ 。

(2)利用解算软件进行网络解算,获得各分支风量列向量 $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$ 。

(3)对于每一条分支巷道 j ,通过改变其巷道风阻 r_j 来模拟通风网络的扰动。将 r_j 增加一个较小的变量 Δr_j ,使其变为 $r_j + \Delta r_j$,再次进行通风网络解算,获得扰动后的风量列向量 $Q' = (q'_1, q'_2, \dots, q'_n)^T$ 。

(4)按照式(11)计算第 i 个分支对第 j 个分支的风量灵敏度。

$$d_{ij} = (q'_i - q_i) / (r_j + \Delta r_j) \quad (11)$$

(5)重复上述步骤,对于每一条分支巷道都计

算其风量对风阻的灵敏度。这些灵敏度将组成一个 $n \times n$ 的矩阵,即通风系统的灵敏度矩阵 $\mathbf{D}$ 。

分支 j 的边权 w_j 计算公式为

$$w_j = |d_{jj}| \sum_{i=1, i \neq j}^n |d_{ij}| \quad (12)$$

2.3 传感器布局模型

在矿井通风网络传感器优化布设中,边加权余树弦模型的核心目标是选择一组线性无关的分支安装传感器,使其既能避免数据冗余(图1),又能选择边权值大的分支,最大化监测数据的全局表征能力。求解边权值最大的余树弦问题可以转化为边权值之和最小的生成树的问题,边权值最小的生成树可表述为0-1整数规划模型。

$$f_1 = \max \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n w_{ij} x_{ij} \right\} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n x_i = n - m + 1 \\ \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \in E, |S| \geq 2 \\ x_{ij} \in \{0, 1\} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (14)$$

上述模型由优化目标函数以及约束构成。式(13)中, f 表示优化目标; x_{ij} 表示0-1决策变量,当 $x_{ij} = 1$ 时表示在分支 $\langle v_i, v_j \rangle$ 上安装传感器; S 表示全部分支集合的子集;式(14)表示确保安装的传感器总数为给定的 a 个,即保证选择的传感器分支集不形成环路。

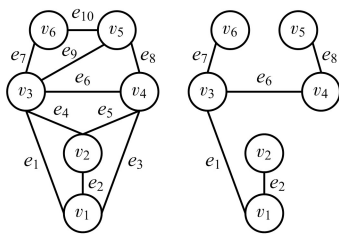


图1 边权最小生成树生成原理

Fig. 1 Generation principle of edge-weighted minimum spanning tree

在求解边权值最小的生成树 T_s^* 后,便可以得到最优的余树弦 T_y^* 。当布设传感器集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_a\}$ 时,余树弦风量被划分为已知风量子集 $K = T_y^* \cap X$ 和未知风量子集 $U = T_y^* \setminus X = \{e \in T_y^* \mid e \notin K\}$ 。通过风量平衡方程 $\mathbf{Q}_s = -\mathbf{B}_{12}^{-1} \mathbf{B}_{11} \mathbf{Q}_y$ 推演生成树分支风量,可得到全风网分支风量,此时定义目标函数 f_2 为全风网分支集 E 中不受 U 中风量变化影响

的分支数量,即满足 $\partial q_e / \partial q_u = 0 \quad (\forall u \in U, e \in E)$ 的分支数为 f_2 。最终优化目标为最大化 f_2 ,确保在有限传感器下获得最多的可靠风量数据。其传感器布局模型为

$$f_2 = \max_X \left| \left\{ e \in E \mid \frac{\partial q_e}{\partial q_u} = 0 \quad \forall u \in U \right\} \right| \quad (15)$$

式中 q_u 表示对应分支 u 的未知风量; q_e 表示所有分支集合 E 中分支 e 对应的风量; f_2 为布局后可通过平衡方程直接计算的分支数。

3 智能混合优化算法求解

3.1 Kruskal 算法

Kruskal 算法是一种基于贪心策略的最小生成树算法,通过逐步连接最小权边构建最优树结构。如图2所示,其核心原理是利用并查集数据结构检测环路,即确保每一步加入的边都扩展连通分量的同时避免形成环路。

采用 Kruskal 算法求解边权最小生成树的流程可分为3个阶段。

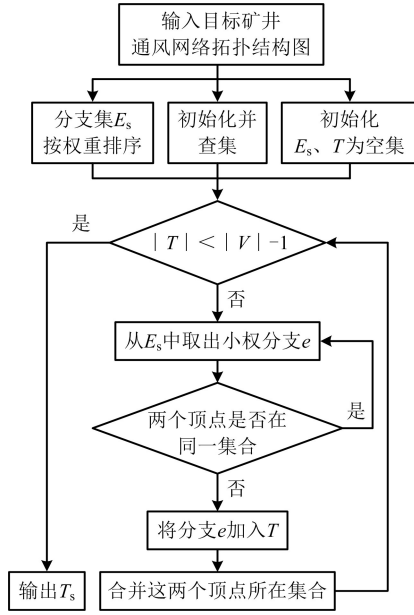
(1)初始化阶段。对所有边按权值进行升序排序,形成有序边集 $E_s = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$,其中 $w(e_1) \leq w(e_2) \leq \dots \leq w(e_n)$ 。同时,创建空集合 T_s 存储最小生成树边,并初始化并查集结构,使每个节点 $v \in V$ 独立构成单元元素连通分量,即 $\text{parent}[v] = v$ 且 $\text{rank}[v] = 0$ 。

(2)核心处理阶段。算法遍历 E_s 中的每条边。对于当前边 $e = (u, v)$,通过并查集操作获取 u 和 v 的根节点, $V_u = \text{find}(u)$, $V_v = \text{find}(v)$ 。当检测到 $V_u \neq V_v$ 时,表明 u, v 属于不同连通分量,此时执行关键操作,即将边 e 加入 T_s 集合,然后通过 $\text{union}(V_u, V_v)$ 操作合并两个连通分量,并更新并查集的 parent 和 rank 数组。若 $V_u = V_v$,则跳过该边以防止形成环路。此过程持续进行,每次成功添加后检测终止条件 $|T_s| = |V| - 1$ 。

(3)结果输出阶段。当算法满足终止条件时,输出最小生成树边集 T_s^* 。在通风网络优化问题中, T_s^* 在全部分支集合中的补集 T_y^* ,即传感器最优布设位置。整个流程通过排序确保局部最优选择,通过并查集保证全局无环连通,最终获得理论最优解。

3.2 DETMAX-Tabu 混合优化算法

针对定义传感器布局模型,本文提出一种基于 DETMAX 算法和禁忌搜索技术的传感器布局优化方法。DETMAX 算法由 Mitchell 提出^[21],是目前应用

图2 Kruskal 算法求解 T_s 流程Fig.2 Flow of Kruskal algorithm for solving T_s

较为广泛的优化算法,核心思想是通过分支交换策略,从大量候选分支中筛选最优传感器布设位置集合。本文定义初始布设位置集合为 X , 则候选分支池 Y 为 X 在最优余树弦 T_y^* 中的补集,而后进行以下两个核心操作。

(1) 添加分支。

依次从候选集 Y 中选择一个候选分支 x_k 并添加到 X 中,最终找到一个具 $a + 1$ 个分支的扩展集 $X_t = \{X, x_k\}$, 该扩展集具有最大的 f_2 。这种操作可以表示为

$$k = \underset{i=1}{\operatorname{argmax}} f_2(X_i) \quad (16)$$

需要注意的是,求解 k 需要通过 $n - m + 1 - a$ 次迭代得到。

(2) 去掉分支。

依次从扩展集 X_t 中去掉一个分支,使得剩余的 a 个分支对应最大的 f_2 。该操作可表示为

$$\begin{cases} k = \underset{i=2}{\operatorname{argmax}} f_2([x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_a, x_k]) \\ X = (x_1, x_2, \dots, x_{k-1}, x_{k+1}, \dots, x_a)^T \end{cases} \quad (17)$$

交替使用这两种操作将不断减小 X 对应的 f_2 , 最终得到全局最优解。

由于 DETMAX 算法受初始数据集的影响较大,容易收敛到局部最优。因此,本文采用 Tabu 搜索算法来引导搜索全局最优解。Tabu 搜索是一种全局

逐步优化算法。该算法的核心是利用禁忌表存储局部最优解,指导下一步的搜索方向,可以防止迂回搜索,避免陷入局部最优。应用 Tabu 搜索算法的过程可以概括为

首先,设置 Tabu 列表的长度为 p ,并在候选分支池 Y 中随机选择 p 条分支进行初始化。然后,进入算法循环,在每次迭代时将“添加分支”操作中最优候选项放入 Tabu 列表,并在“去掉分支”操作中不删除。Tabu 列表将通过删除最旧的元素进行更新。令 $X^* = \{x_1^+, x_2^+, \dots, x_p^+\}$ 为 Tabu 列表的集合。因此,式(17)应修正为

$$\begin{cases} k = \underset{i=1}{\operatorname{argmax}} f_2([x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_{a+1-p}, X^*]) \\ \xi = (x_1, x_2, \dots, x_{k-1}, x_{k+1}, \dots, x_{a+1-p}, X^*)^T \end{cases} \quad (18)$$

DETMAX - Tabu 算法求解传感器布局模型的流程见图 3。

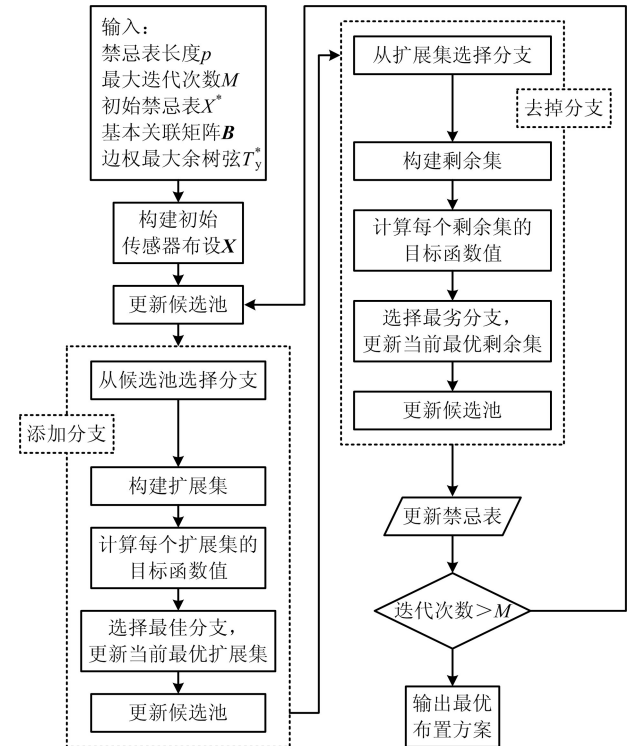


图3 DETMAX - Tabu 混合优化算法流程

Fig.3 Flow of DETMAX - Tabu hybrid optimization algorithm

4 试验分析与验证

4.1 传感器布局优化验证

本文分析对象为一个包含 22 条分支、14 个节

点、6个构筑物、1个进风井和1个回风井的矿井通风网络系统,并采用抽出式通风方法进行研究,其网络结构数据见表1。为便于计算,假设各节点标高相同,即不考虑位压能。

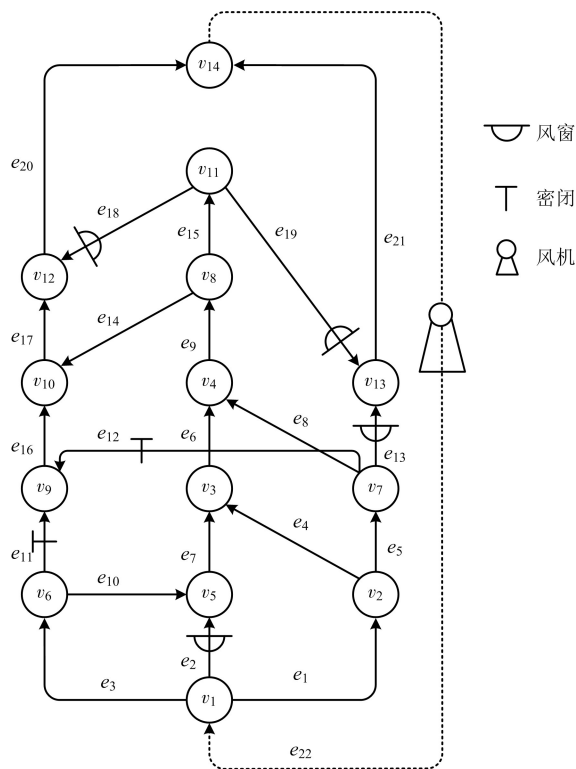


图4 案例通风网络图

Fig. 4 Diagram of case ventilation network

根据图4所示的通风网络拓扑结构,采用 Kruskal 算法进行传感器布局优化验证。首先,采用式(12)计算各分支的边权值,结果见表2。之后,将22条分支按边权值升序排列,并依次选择权值最小的有效边加入生成树集合,同时通过并查集数据结构检测环路。如图5所示,构建生成树的边节点从最左侧的 v_{11} 开始到最右侧的 v_2 结束,相应的还可以看出构建的边从 e_{11} 开始,到 e_1 结束。最终求解的边权最小生成树 $T_s^* = \{e_1, e_2, e_7, e_8, e_{10}, e_{11}, e_{12}, e_{13}, e_{15}, e_{16}, e_{18}, e_{19}\}$, 其中 e_{18} 的权值最小,为 0.01, e_1 的权值最大,为 4 362.848, 占生成树 T_s^* 总权值的 91.3%。与之对应的是边权最大余树弦 $T_y^* = \{e_3, e_4, e_5, e_6, e_9, e_{14}, e_{17}, e_{20}, e_{22}\}$ 。

本文分别采用 DETMAX - Tabu、DETMEX 算法在 T_y^* 求解传感器布局模型,结果显示,DETMEX - Tabu 算法在求解传感器布局优化问题时展现出显著优势。如图6与表3所示,当传感器数量 $a = 5$ 时,该算法成功获得全局最优解 $f_2 = 11$, 而传统

表1 案例通风网络结构数据

Table 1 Data of case ventilation network structure

分支	始节点	末节点	风量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	风阻/ ($\text{N} \cdot \text{S}^2 \cdot \text{m}^{-8}$)
e_1	v_1	v_2	163.17	0.002 4
e_2	v_1	v_5	2.35	33.518 0
e_3	v_1	v_7	34.08	0.149 9
e_4	v_2	v_3	119.71	0.008 1
e_5	v_2	v_7	43.46	0.070 7
e_6	v_3	v_4	144.94	0.002 6
e_7	v_5	v_3	25.23	0.018 5
e_8	v_7	v_4	21.43	0.072 2
e_9	v_4	v_8	166.37	0.003 7
e_{10}	v_6	v_5	22.89	0.047 7
e_{11}	v_7	v_9	11.19	15.941 6
e_{12}	v_7	v_9	13.23	10.818 0
e_{13}	v_7	v_{13}	8.80	30.247 5
e_{14}	v_8	v_{10}	147.07	0.105 9
e_{15}	v_8	v_{11}	19.31	0.067 2
e_{16}	v_9	v_{10}	24.42	0.118 5
e_{17}	v_{10}	v_{12}	171.49	0.011 5
e_{18}	v_{11}	v_{12}	10.84	20.581 2
e_{19}	v_{11}	v_{13}	8.47	30.965 9
e_{20}	v_{12}	v_{14}	182.33	0.001 5
e_{21}	v_{13}	v_{14}	17.26	0.043 3
e_{22}	v_{14}	v_1	199.59	0.003 8

DETMEX 算法仅达到次优解 $f_2 = 10$; 当 $a = 6$ 时, DETMAX - Tabu 算法依然保持最优解 $f_2 = 13$, 较 DETMAX 算法的 $f_2 = 12$ 更优。在 $a = 2 \sim 8$ 的全部测试场景中, DETMAX - Tabu 算法在 10 次独立迭代中均收敛至与穷举法一致的全局最优解, 验证了其求解质量优势。该性能提升主要源于禁忌策略有效避免了关键分支选择的局部收敛问题, 可确保高质量分支优先纳入优化变量集。

不同传感器数量对应的最优布局方案呈现出显著的分支选择规律。如表4所示, 工作面风道 e_9 和总回风大巷 e_{22} 在 $a \geq 4$ 的所有方案中均保持 100% 出现频率, 其中 e_9 为主要用风风道, 而 e_{22} 则代表着全风网的总风量。当传感器数量从 $a = 4$ 增至 $a = 5$

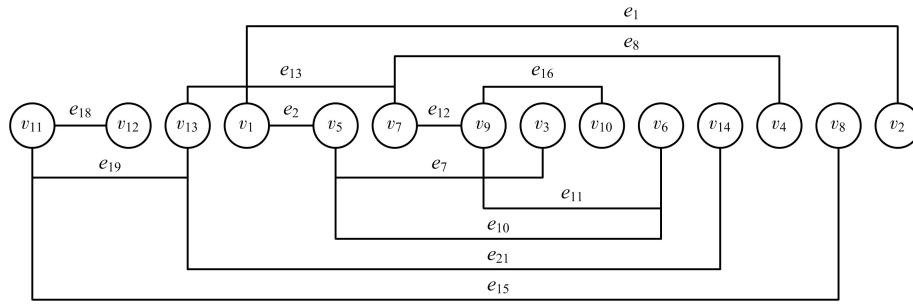


图 5 最小生成树示意图

Fig. 5 Schematic diagram for minimum spanning tree

表 2 分支权重

Table 2 Branches' weight

分支	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6
边权	4 362. 848	0. 025	3 840. 396	256 379. 850	7 499. 589	504 256. 581
分支	e_7	e_8	e_9	e_{10}	e_{11}	e_{12}
边权	0. 665	35. 464	960. 693	300. 586	6. 452	0. 129
分支	e_{13}	e_{14}	e_{15}	e_{16}	e_{17}	e_{18}
边权	2. 121	391. 738	38. 928	3. 769	3 593. 377	0. 010
分支	e_{19}	e_{20}	e_{21}	e_{22}		
边权	0. 012	1 017 657. 525	27. 943	1 656 953. 538		

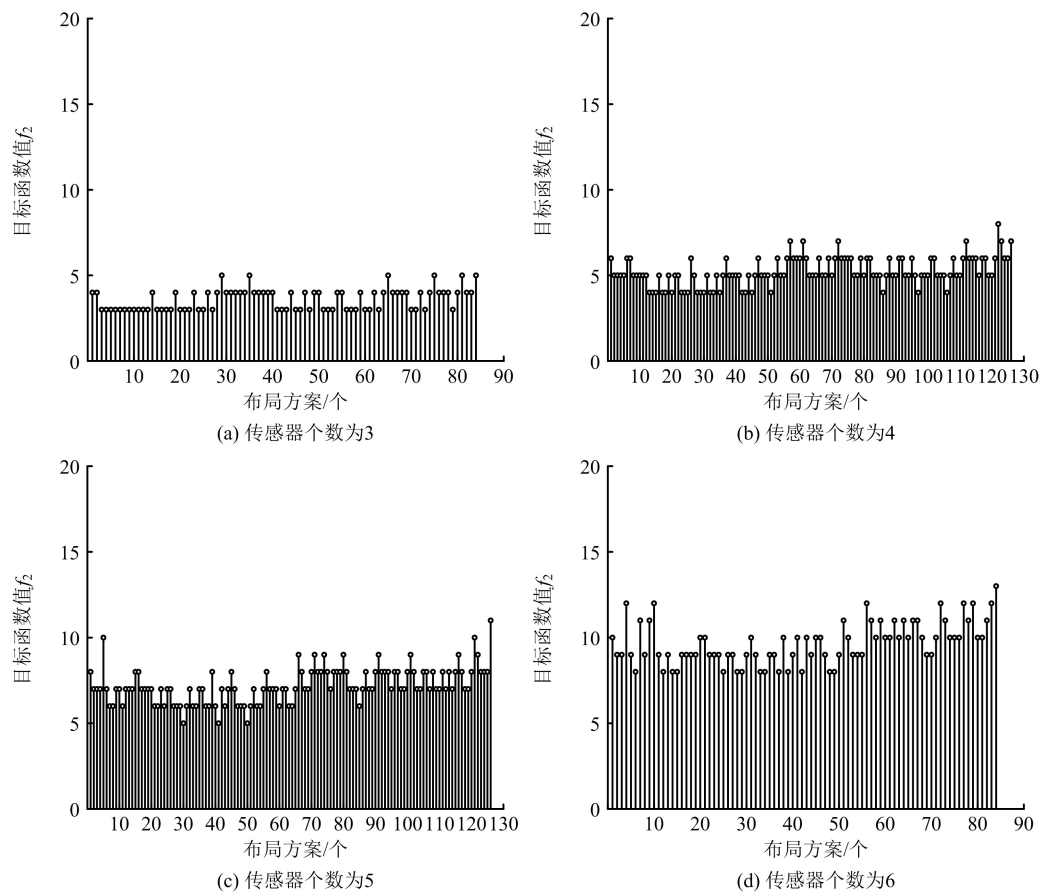


图 6 基于穷举法求解不同传感器数量对应的最优传感器布局

Fig. 6 Optimal sensor layouts for different sensor quantities using exhaustive search method

表3 不同算法求解的最优传感器布局

Table 3 Optimal sensor layouts obtained by different algorithms

传感器数量 α	DETMAX	穷举法	DETMAX - Tabu
2	3	3	3
3	5	5	5
4	8	8	8
5	10	11	11
6	12	13	13
7	16	16	16
8	19	19	19

时,即增加了 e_{22} 的风量之后,使得可直接计算的风量数从8增加到了11,表明了传感器数量对风量推演效果的决定性作用。此外,如图7所示,最大可直接计算风量数与传感器数量呈非线性增长关系。

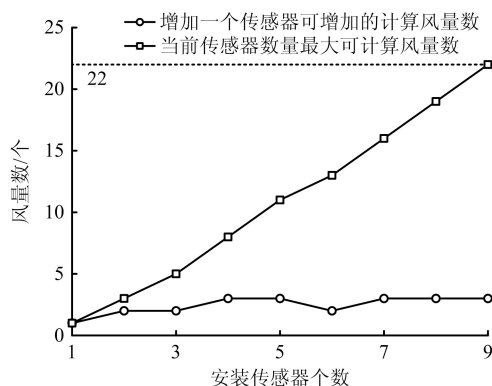


图7 不同传感器数量的最优解

Fig. 7 Optimal solution for different numbers of sensors

表4 不同传感器数量的最优布局方案

Table 4 Optimal layout schemes for different numbers of sensors

传感器数量 a	传感器布设方案
2	e_6 、 e_9
3	e_4 、 e_6 、 e_9
4	e_9 、 e_{14} 、 e_{17} 、 e_{20}
5	e_9 、 e_{14} 、 e_{17} 、 e_{20} 、 e_{22}
6	e_6 、 e_9 、 e_{14} 、 e_{17} 、 e_{20} 、 e_{22}
7	e_5 、 e_6 、 e_9 、 e_{14} 、 e_{17} 、 e_{20} 、 e_{22}
8	e_4 、 e_5 、 e_6 、 e_9 、 e_{14} 、 e_{17} 、 e_{20} 、 e_{22}

4.2 推演风量与网络解算快速收敛分析

采用传感器优化布局方案得到的实测风量与全

2204

局推演风量,可实现对通风网络风量信息的感知。此外,推演风量本质上严格满足风量平衡方程,因此研究将不同传感器个数对应的推演风量作为解算初始风量(表5)进行解算,并采用风压平衡误差作为评估指标,研究推演风量对网络解算迭代效率的影响。在解算时,最大回路风量修正值 $\max dq$ 设置为0.01,风量、风压迭代精度 ε 与 ζ 均设置为0.000 1,最大迭代次数 k 设置为10 000。

图8展示了不同个数的推演风量对通风网络解算收敛过程的影响规律,其中传感器数量 a 与收敛次数呈现显著的负相关。当 $a=0$,即初始风量均为0时,此时的风量平衡误差为0,但是在迭代初期的风压平衡误差较大且误差收敛较慢,最终经过1 062次迭代达到收敛条件;将 $a=5$ 时对应的推演风量作为初始风量,迭代初期的风压平衡误差大幅度缩小,需要迭代629次达到收敛条件,较基础方案提升40.8%;将 $a=8$ 时对应的推演风量作为初始风量,迭代初期的风压平衡误差最小,仅需455次即可收敛,较基础方案提升57.2%。上述研究表明了推演风量可加快网络解算收敛,即可推演的初始风量数越多,迭代初期的风压平衡误差越小,网络解算效率越快,越能有效提升矿井通风网络解算的实时性。

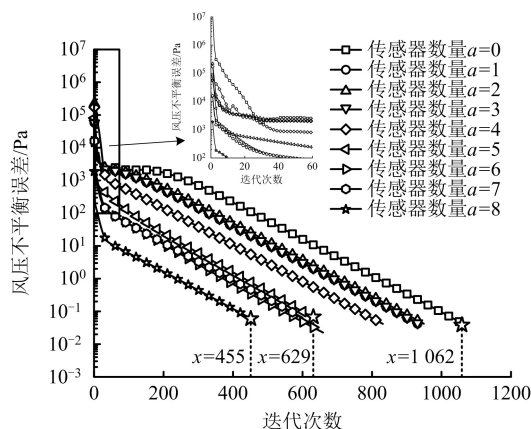


图8 风压平衡误差的迭代图

Fig. 8 Iteration diagram of wind pressure balance error

5 结论

本文提出了矿井通风网络风量智能推演理论与传感器优化布设方法,形成了一整套“感知-推演-解算”的技术闭环,并得到以下结论。

(1) 研究严格证明了大型矿井通风网络中独立回路数与分支总数之比趋近于1/3的规律,揭示了仅需布设约33%分支的传感器即可实现全网风量推演的理论可行性。

表 5 不同最优布局方案对应的推演风量

Table 5 Simulated air volume for different optimal layout schemes

m³/min

分支	Q^1	Q^2	Q^3	Q^4	Q^5	Q^6	Q^7	Q^8
e_1	0.000	0.000	115.293	0.000	0.000	0.000	42.543	157.836
e_2	0.000	0.000	-115.293	0.000	190.713	190.713	148.170	32.877
e_3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
e_4	0.000	0.000	115.293	0.000	0.000	0.000	0.000	115.293
e_5	0.000	0.000	0.000	156.522	0.000	0.000	42.543	42.543
e_6	0.000	136.724	136.724	137.368	0.000	136.724	136.724	136.724
e_7	0.000	136.724	21.431	162.553	0.000	136.724	136.724	21.431
e_8	156.522	19.798	19.798	173.073	156.522	19.798	19.798	19.798
e_9	156.522	156.522	156.522	0.000	156.522	156.522	156.522	156.522
e_{10}	0.000	136.724	136.724	10.520	-190.713	-53.989	-11.446	-11.446
e_{11}	0.000	-136.724	-136.724	8.634	190.713	53.989	11.446	11.446
e_{12}	0.000	136.724	136.724	0.000	-165.528	-28.804	13.739	13.739
e_{13}	-156.522	-156.522	-156.522	25.185	9.006	9.006	9.006	9.006
e_{14}	0.000	0.000	0.000	0.000	137.368	137.368	137.368	137.368
e_{15}	156.522	156.522	156.522	-181.707	19.154	19.154	19.154	19.154
e_{16}	0.000	0.000	0.000	25.185	25.185	25.185	25.185	25.185
e_{17}	0.000	0.000	0.000	0.000	162.553	162.553	162.553	162.553
e_{18}	0.000	0.000	0.000	-173.073	10.520	10.520	10.520	10.520
e_{19}	156.522	156.522	156.523	156.522	8.634	8.634	8.634	8.634
e_{20}	0.000	0.000	0.000	19.154	173.073	173.073	173.073	173.073
e_{21}	0.000	0.000	0.000	0.000	17.640	17.640	17.640	17.640
e_{22}	0.000	0.000	0.000	0.000	190.713	190.713	190.713	190.713

(2) 基于灵敏度双因子加权模型和 Kruskal 算法求解的最小边权生成树,可精准定位高信息密度的余树弦。研究以通过平衡方程直接求解风量的分支数量最大化为优化目标,将余树弦分支集作为解空间,建立了一种传感器布局优化模型。

(3) 采用禁忌表改进 DETMAX 算法,提出的 DETMAX-Tabu 算法通过禁忌表动态存储高价值分支解,有效解决了 DETMAX 算法易陷入局部收敛的问题。

(4) 将优化布局的推演风量作为初始解算值,可大幅加速网络解算收敛。在 22 条分支的网络中,当实测风量数从 0 增至 8 时,解算迭代收敛次数从 1 062 次降至 455 次(降幅为 57.2%)。

未来将深化推演精度、经济效益与提升解算效

率研究,推动矿井通风智能调控的理论突破与工程应用。

参考文献 (References):

- [1] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.
WANG G F. New technological progress of coal mine intelligence and its problems [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1-27.
- [2] 屈世甲. 矿井通风基础数据获取及网络图优化方法的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
QU S J. Research on the acquisition of basic data for mine ventilation and methods for optimizing network diagrams [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010.
- [3] 沈志远, 杨镇隆, 焦莉, 等. 矿井通风系统智能故障

- 诊断 MC-OCSVM 模型[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(8): 3126-3132.
- SHEN Z Y, YANG Z L, JIAO L, et al. Intelligent fault diagnosis model MC-OCSVM for mine ventilation systems [J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(8): 3126-3132.
- [4] 赵丹, 刘剑, 潘竞涛. 基于网络分析的矿井通风智能诊断专家系统[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(4): 206-210.
- ZHAO D, LIU J, PAN J T. Intelligent diagnostic expert system for mine ventilation based on network analysis[J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11(4): 206-210.
- [5] 谈国文. 复杂矿井通风网络可视化动态解算及预警技术[J]. 工矿自动化, 2020, 46(2): 6-11.
- TAN G W. Visualized dynamic solution and early warning technology for ventilation network of complex mine[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(2): 6-11.
- [6] 罗广, 邹银辉, 宁小亮, 等. 矿井通风网络在线监测技术研究与应用[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(5): 47-50, 55.
- LUO G, ZOU Y H, NING X L, et al. Research and application of online monitoring technology for mine ventilation networks[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2019, 46(5): 47-50, 55.
- [7] 方博, 马恒. 运用监控数据的矿井通风网络动态解算及应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(12): 1439-1442.
- FANG B, MA H. Mine ventilation network application monitoring database and application dynamic solver[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2016, 35(12): 1439-1442.
- [8] 张恒, 孙建春, 涂鹏, 等. 利用通风网络数据结构构造最小生成树的方法[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增刊2): 887-892.
- ZHANG H, SUN J C, TU P, et al. Method for constructing a minimum spanning tree using ventilation network data structures [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(Suppl. 2): 887-892.
- [9] 田蕊文, 郭玉森. 基于回路风量法的矿井通风网络解算算法[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(1): 102-108, 113.
- TIAN Z W, GUO Y S. Algorithm of obtaining mine ventilation network based on loop air volume analysis[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(1): 102-108, 113.
- [10] 李博伦, 李雨成, 李俊桥. 基于节点压能的网络分风算法研究[J]. 高技术通讯, 2021, 31(7): 733-737.
- LI B L, LI Y C, LI J Q. Research on network wind distribution algorithm based on node pressure energy [J]. High Technology Communications, 2021, 31(7): 733-737.
- [11] 吴奉亮, 寇露. 用于矿井通风网络解算的通风机风压性能曲线自动识别方法[J]. 工矿自动化, 2024, 50(4): 103-111.
- WU F L, KOU L. Automatic recognition method of ventilator wind pressure performance curve for mine ventilation network calculation [J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(4): 103-111.
- [12] 宫良伟, 田卫东. 通风网络解算初始风量确定方法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2015, 27(6): 838-843.
- GONG L W, TIAN W D. Method for determining the initial airflow rate in ventilation network calculations [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2015, 27(6): 838-843.
- [13] 赵丹, 潘竞涛. 改进灵敏度矩阵的矿井通风故障源诊断及传感器布置研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(2): 78-84.
- ZHAO D, PAN J T. Research on the diagnosis of mine ventilation fault sources and sensor layout by improving the sensitivity matrix [J]. Journal of Chinese Safety Science, 2011, 21(2): 78-84.
- [14] 李亚俊, 吴洁葵, 李印洪, 等. 基于最小生成树原理的矿井通风网络监测布局优化[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(7): 172-175.
- LI Y J, WU J K, LI Y H, et al. Optimization of mine ventilation network monitoring layout based on the principle of minimum spanning tree [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(7): 172-175.
- [15] 贾瞳, 马恒, 高科. 基于割集矩阵算法风速监测智能优化[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2024, 60(1): 98-105.
- JIA T, MA H, GAO K. Intelligent optimization of wind speed monitoring based on the cut-set matrix algorithm [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2024, 60(1): 98-105.
- [16] 尚文天, 邓立军, 刘剑. 基于有上下界风量约束的矿井风量极值流算法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(2): 106-112.
- SHANG W T, DENG L J, LIU J. Research on the extreme flow algorithm for mine ventilation with upper and lower bound constraints [J]. China Safety Science and Technology, 2022, 18(2): 106-112.
- [17] 邓立军, 刘剑. 无回路阻力平衡约束的固定风量平衡算法研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(4): 64-68.
- DENG L J, LIU J. Research on fixed air volume balancing algorithm with no-loop resistance balancing constraints [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(4): 64-68.
- [18] 曹鹏, 刘剑. 矿井传感器风量最小平衡修正量研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(7): 2658-2671.

- CAO P, LIU J. Study on the minimum airflow balance correction value of mine sensors [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024, 24(7): 2658–2671.
- [19] 贾瞳, 马恒, 高科. 基于相继平均移动法通风网络全局风量优化[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(4): 412–419.
- JIA T, MA H, GAO K. Global optimization adjustment of ventilation network based on successive average moving method [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2023, 42(4): 412–419.
- [20] 陈文冰, 王俊青. 广义行(列)西对称矩阵的 Moore-Penrose 逆[J]. *数学的实践与认识*, 2017, 47(18): 239–243.
- CHEN W B, WANG J Q. Moore-Penrose inverse of generalized row (column) Y-symmetric matrices [J]. *Practice and Understanding of Mathematics*, 2017, 47(18): 239–243.
- [21] YAN Z, WANG Y, FAN J, et al. An efficient method for optimizing sensors' layout for accurate measurement of underground ventilation networks [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 72630–72640.
- [22] DANEY D, PAPEGAY Y, MADELINE B. Choosing measurement poses for robot calibration with the local convergence method and Tabu search [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2005, 24(6): 501–518.
- [23] 魏连江, 周福宝, 梁伟, 等. 矿井通风网络特征参数关联性研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(7): 1728–1734.
- WEI L J, ZHOU F B, LIANG W, et al. Study on the correlation of key parameters in mine ventilation networks [J]. *Journal of Coal Science and Engineering*, 2016, 41(7): 1728–1734.
- [24] 姜诗明, 常心坦, 李学文, 等. 风量对输入风压灵敏度矩阵及其应用[J]. *煤矿安全*, 2011, 42(6): 142–145.
- JIANG S M, CHANG X T, LI X W, et al. Sensitivity matrix of airflow to inlet air pressure and its application [J]. *Coal Mine Safety*, 2011, 42(6): 142–145.

Intelligent airflow deduction theory and sensor optimization in mine ventilation networks

YAN Zhenguo, ZHANG Longcheng, WANG Yanping, CAO Yuqi, RUAN Jianing

(College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Coal is considered the primary energy source in China, and an intelligent ventilation system is essential for ensuring safe production in mines. However, low calculation efficiency within ventilation networks often arises from redundant airflow sensing information and unreasonable initial airflow distribution. This paper proposes a collaborative framework that integrates intelligent airflow deduction theory with optimized sensor deployment. First, the mathematical coupling relationship between tree branches and co-tree chords is enhanced using Singular Value Decomposition (SVD), guided by constraints related to ventilation network topology and airflow balance laws. The analysis demonstrates that the ratio of independent loops to total branches approaches 1/3 in large networks, establishing the theoretical feasibility of achieving full network airflow deduction. This can be accomplished by deploying sensors on approximately 33% of the branches. Next, a sensitivity dual-factor weighted spanning tree model is developed, where edge weights are defined as the product of branch self-sensitivity and influence degree. The co-tree chord branch set with high information density is identified using the Kruskal algorithm. Subsequently, a sensor layout optimization model is established. The optimization objective is to maximize the number of branches, allowing for direct calculation of airflow through balance equations. The co-tree chord branch set serves as the solution space. A DETMAX – Tabu hybrid optimization algorithm is designed to address this problem, with high-value branches dynamically stored in a tabu table. This approach overcomes the local convergence limitations typical of traditional algorithms. Case validation demonstrates that deduced airflow based on monitoring data can significantly accelerate the convergence of calculation iterations. In a 22-branch experimental network, the deduced airflow from 8 installed sensors is used as the initial airflow. This approach reduces the number of network calculation convergence iterations from 1 062 to 455, achieving a total reduction of 57.2%. The research findings provide a comprehensive technical pathway for real-time mine ventilation control, following the sequence of “sensor optimization deployment—intelligent airflow deduction—rapid calculation convergence.” This method enhances the dynamic response capability of intelligent ventilation systems.

Key words: safety engineering; mine ventilation; wind speed sensor; layout optimization; DETMAX – Tabu algorithm; network calculation