

基于节点压能的网络分风算法研究^①

李博伦^② * * * * * 李雨成^③ * * * * * 李俊桥 * * * *

(* 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院 阜新 123000)

(** 辽宁工程技术大学安全科学与工程研究院 阜新 123000)

(*** 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室(辽宁工程技术大学) 阜新 123000)

(**** 太原理工大学安全与应急管理工程学院 太原 030024)

摘要 为解决传统 Scott-Hensley 网络解算算法在寻找回路过程中速度过慢从而导致解算时间过长的问题,本文基于节点压能算法进行相应研究,对节点压能算法的迭代原理进行分析,从数学角度确定其在实际应用中的可行性,推导节点压能解算法的数学模型,给出了通风网络中各个节点的压能校正迭代式以及算法流程;并针对节点校正式中存在不收敛和收敛慢的问题,根据通风机特性曲线的不同拟合次数给出相应的解决方法。最终通过示例证明了在同一复杂通风网络中相较于 Scott-Hensley 算法,节点压能算法具有收敛速度快的特点,且收敛误差同 Scott-Hensley 算法相比差别不大。

关键词 矿井智能通风; 节点压能; 算法优化; 网络解算

0 引言

随着智慧矿山理念的不断发展,更全面的科学技术手段已经广泛应用于多数矿井,以网络解算为核心的通风仿真技术,不断指导矿井进行集约化、高效化、安全化的生产^[1-2]。在科技不断发展的背景下对通风网络解算技术也提出了新的要求,需要在更短的时间内解算出网络的结果,实现网络的实时解算。矿井通风系统归结于一个动态的平衡系统,其中物料的运输、风门的开启、采掘计划的调整等诸多因素均可影响到系统风阻的变化,因此以网络风阻权重最小树为解算基础的 Scott-Hensley 算法不能满足人们对网络解算速度的需求,难以应用于通风网络实时解算中,要想实现短时间、高效率的网络解算,必须采用一种新的网络迭代算法^[3]。

目前,矿井通风网络解算算法多以回路法为主,其中应用最广泛的 Scott-Hensley 算法经过不断改

进,已经日趋完善。其原理是以通风网络风阻权重最小树为基础,计算通风网络独立回路,根据各回路不平衡风压值,对回路风量不断校正,直至满足精度^[4-5]。尽管 Scott-Hensley 算法已经成熟且应用广泛,但其弊端也十分明显。不论通过矩阵法、搜索法、剪枝法来计算回路,都会在寻找回路的过程中耗费大量的时间,从而降低网络的解算速度。一种不需要寻找回路,通过节点压能来进行节点迭代的解算方法应运而生^[6-7]。节点法通过阻力定律和节点风量平衡方程来进行节点压能校正,最后达到风量求解的目的,虽然节点法迭代次数较多,但大大缩短了迭代所需时间^[8-10]。

1 算法理论分析

以 n 个节点 m 个分支的网络为例,通过分析算法的定解条件与迭代步骤论证基于节点压能的网络

① 国家自然科学基金(51774168)资助项目。

② 男,1995 年生,硕士;研究方向:矿井通风与粉尘防治;E-mail: 798132030@qq.com

③ 通信作者,E-mail: lyclntu@163.com

(收稿日期:2020-08-09)

分风算法的理论可行性。

(1) 基于节点压能的网络分风算法的基础原理是节点风量平衡定律,根据 $\sum Q_k = 0$ 可获得 n 个节点的通风网络风量平衡方程;对于网络的源点以及汇点通过添加虚拟分支处理后,使其两者满足风量平衡定律,因而经过处理后的网络可组成 $n - 1$ 个关于节点风量的独立平衡方程式。

(2) 在这 n 个节点中,任选一个节点作为压力基准点,并设定其节点压能值为 0,其余 $n - 1$ 个节点的压能 P_i 均为相对基准点的待求压能。

(3) 由步骤(1)中所列的 $n - 1$ 个独立方程求解出步骤(2)中 $n - 1$ 个待求节点的相对压能值 P_i ,根据方程组定解分析可知待求压能具有唯一解。

(4) 进行初始迭代计算时,通过给各个节点赋予初始压能,能够反算得到分支风量初始值。

(5) 在各个节点风量不平衡的条件,对各节点风量进行校正,不断计算各节点压能修正值 ΔP_i ;再根据 $Q_{ij} = \sqrt{|h_i - h_j|} / \sqrt{r_{ij}}$ 可计算风量近似值。因此只要存在节点风量不平衡的条件,就可以不断对节点压能进行校正,最终实现对风量的修正迭代。

(6) 直到节点风量偏差值满足预设迭代精度则可以停止迭代计算。

因此,基于节点压能的网络分风算法在理论上是可行的。

2 算法模型推导

本文将通风网络进风井井口设为网络中节点压能的基准点,基准压能为 0 Pa,固定不变。其他节点压能为该节点与基准节点的压能差,即各节点压能与基准节点的相对压能。以一个不含有串、并联结构的简单负压通风网络为例,任意非基准节点 i 为研究对象,推导节点压能的校正式。

对于通风网络任意非基准节点 i ,有:

$$\sum Q_{ij} + Q_f = 0, (i, j) \in E \quad (1)$$

式中, i, j 为节点编号; (i, j) 为关联节点为 i, j 的分支; Q_{ij} 为分支 (i, j) 的风量(m^3/s); Q_f 为主要通风机风量(m^3/s); E 为通风网络分支集合。

对于通风网络任意分支 (i, j) ,有:

$$|P_i - P_j| = r_{ij} Q_{ij}^2 \quad (2)$$

式中, p_i, p_j 分别为节点 i, j 相对节点的压能(Pa); r_{ij} 为分支 (i, j) 的风阻($N \cdot s^2/m^8$)。

进一步得到分支 (i, j) 风量表达式为

$$Q_{ij} = \sqrt{\frac{|P_i - P_j|}{r_{ij}}} \quad (3)$$

若节点 i 为通风网络汇点,该节点存在主要通风机,是通风系统的动力源。从能量的角度理解,通风系统的压能差全部由主要通风机提供,因此,主要通风机节点压能与节点风量存在如下关系。

$$P_0 - P_i = F(Q_f) \quad (4)$$

$$Q_f = F^{-1}(P_0 - P_i) \quad (5)$$

式中, p_0 为基准压能值, $p_0 = 0$ Pa; F 为通风机特性曲线多项式方程。

以风流流出节点为正、流入节点为负,则节点 i 的风量平衡方程为

$$\begin{aligned} f(P_i) &= \operatorname{sgn}(P_0 - P_i) F^{-1}(P_0 - P_i) \\ &+ \sum_{j, (ij) \in E} \operatorname{sgn}(P_i - P_j) \sqrt{\frac{|P_i - P_j|}{r_{ij}}} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\operatorname{sgn}(x)$ 为符号函数,当 $(p_i - p_j)$ 大于 0 时, $\operatorname{sgn}(p_i - p_j) = 1$; $(p_i - p_j)$ 小于 0 时, $\operatorname{sgn}(p_i - p_j) = -1$ 。将 $f(p_i)$ 在 p_i^0 处进行泰勒级数展开,省略二阶及二阶以上的展开项,得到:

$$\begin{aligned} f(P_i) &= \operatorname{sgn}(P_0 - P_i^0) F^{-1}(P_0 - P_i^0) \\ &+ \sum_{j, (ij) \in E} \operatorname{sgn}(P_i^0 - P_j) \sqrt{\frac{|P_i^0 - P_j|}{r_{ij}}} \\ &+ [\operatorname{sgn}(P_i^0 - P_0) F'(P_0 - P_i^0)^{-1} \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{j, (ij) \in E} (r_{ij} \cdot |P_i^0 - P_j|)^{-\frac{1}{2}}] \\ &(P_i - P_i^0) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

整理得到节点 i 压能校正值:

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= P_i - P_i^0 \\ &= -\frac{\operatorname{sgn}(P_0 - P_i^0) F^{-1}(P_0 - P_i^0) + \sum_{j, (ij) \in E} \operatorname{sgn}(P_i^0 - P_j) \sqrt{\frac{|P_i^0 - P_j|}{r_{ij}}}}{\operatorname{sgn}(P_i^0 - P_0) F'(P_0 - P_i^0)^{-1} + \frac{1}{2} \sum_{j, (ij) \in E} (r_{ij} \cdot |P_i^0 - P_j|)^{-\frac{1}{2}}} \end{aligned} \quad (8)$$

则节点 i 压能校正为

$$P_i - P_i^0 + \Delta P_i \quad (9)$$

针对式(8)中的校正式,在实际解算过程中常

因为其分母和分子的固有缺陷出现求解不收敛或收敛速度慢的情况,通过对式(8)分析发现,通风机中拟合方程的次数是造成该情况的主要原因,对不同的拟合次数,给出了如下不同的解决方法。

(1) 由于分母项 $\sum_{j, (ij) \in E} (r_{ij} \cdot |P_i^0 - P_j|)^{-\frac{1}{2}}$ 恒为正,而分母项 $\text{sgn}(P_i^0 - P_0) F'(P_0 - P_i^0)^{-1}$ 的大小和正负均不稳定,如 $(p_0 - p_i^0)$ 处在 F 驻点的邻域内时,其值是无穷大的。因此将其省略,这样处理对收敛性和收敛速度的影响很小,却能提高收敛性。化简后的节点 i 压能校正值如下。

$$\Delta P_i = P_i - P_i^0$$

$$= -2 \frac{\text{sgn}(P_0 - P_i^0) F^{-1}(P_0 - P_i^0) + \sum_{j, (ij) \in E} \text{sgn}(P_i^0 - P_j) \sqrt{\frac{|P_i^0 - P_j|}{r_{ij}}}}{\sum_{j, (ij) \in E} (r_{ij} \cdot |P_i^0 - P_j|)^{-\frac{1}{2}}} \quad (10)$$

(2) 分子项 $F^{-1}(P_0 - P_i^0)$ 可能存在无解的情况,需要取近似值或根据实际情况对特性曲线方程进行处理。本文以二次拟合曲线为例简单叙述解决方案,当通风机特性曲线拟合此处为二次时,曲线峰值以右能够较好地描述通风机风量风压的变化规律,也不存在高次曲线拟合时可能出现的震荡现象;同时对曲线右侧最大风压值的 90% 处作切线,该点左侧使用该切线代替,此时 $F^{-1}(P_0 - P_i^0)$ 始终有唯一解。

3 算法流程

对于通风网络 $G = (V, E, R)$, 其中 V 为其节点集合, $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$; E 为其分支集合 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$; R 为其分支集合 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ 。根据上述推导的数学模型,给出如下的算法流程,具体如图 1 所示。

(1) 初始化通风网络及所有属性参数,通风网络数据集 G 、各分支风量初值 Q 、人为设置迭代精度 tol 。

(2) 令 $k = 1$, 初始化各节点风压误差,准备进行迭代。

(3) 计算当前节点校正误差,校正值见式(8)。

(4) 遍历同当前节点所关联的所有分支,存在

关联关系的分支风量值。

(5) 判断是否遍历全部节点,若是,则跳转至步骤(7)进行判断;否则跳转至步骤(6)继续迭代。

(6) 令 $k = k + 1$, 开始校正下一个节点风压值。

(7) 判断所有节点中风量未平衡的最大误差是否满足精度,若是,解算完成,程序结束;否则跳转至步骤(2),重新迭代循环,直到最大误差满足迭代精度或超过最大迭代步数。

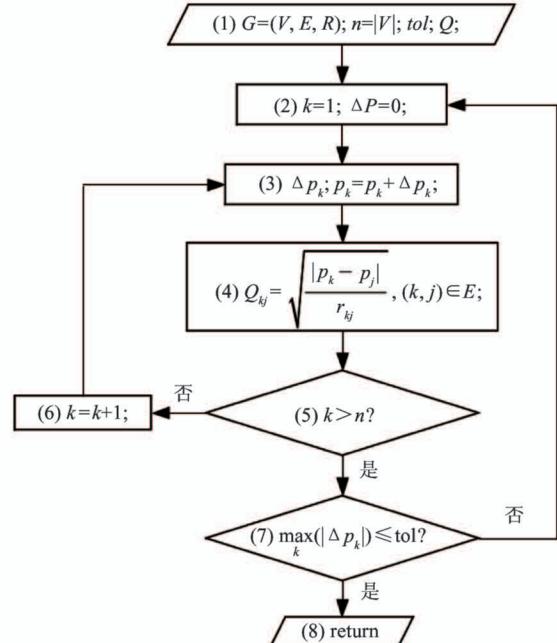


图 1 节点压能算法流程

4 实例分析

图 2 是分支数 109, 节点数 65, 包含 3 个回风井、2 个进风井的通风系统网络示意图,以此作为解算实例,来演示节点法相对传统回路法在解算速度上的优越性。使用 Matlab 软件编写了节点法 nodePreIter.m 与回路法 cyclIter.m 的计算程序,通过 2 种解算算法对该通风网络分别解算 10 次,计算结果参数见表 1。经过解算,节点法和回路法的 20 次解算均未出现不收敛的情况。经统计回路法对该网络的 10 次解算平均收敛时间为 0.714351 s, 平均迭代步数为 58 步;节点法对该网络的 10 次解算平均收敛时间为 0.315719 s, 平均收敛步数为 5374 步。节点法的时空复杂度与网络规模有关,完成一

次节点遍历称作一次迭代, 经过有限步迭代计算后节点法收敛, 因此对于节点数为 n 的通风网络, 其时

空复杂度均为 $O(n)$ 。

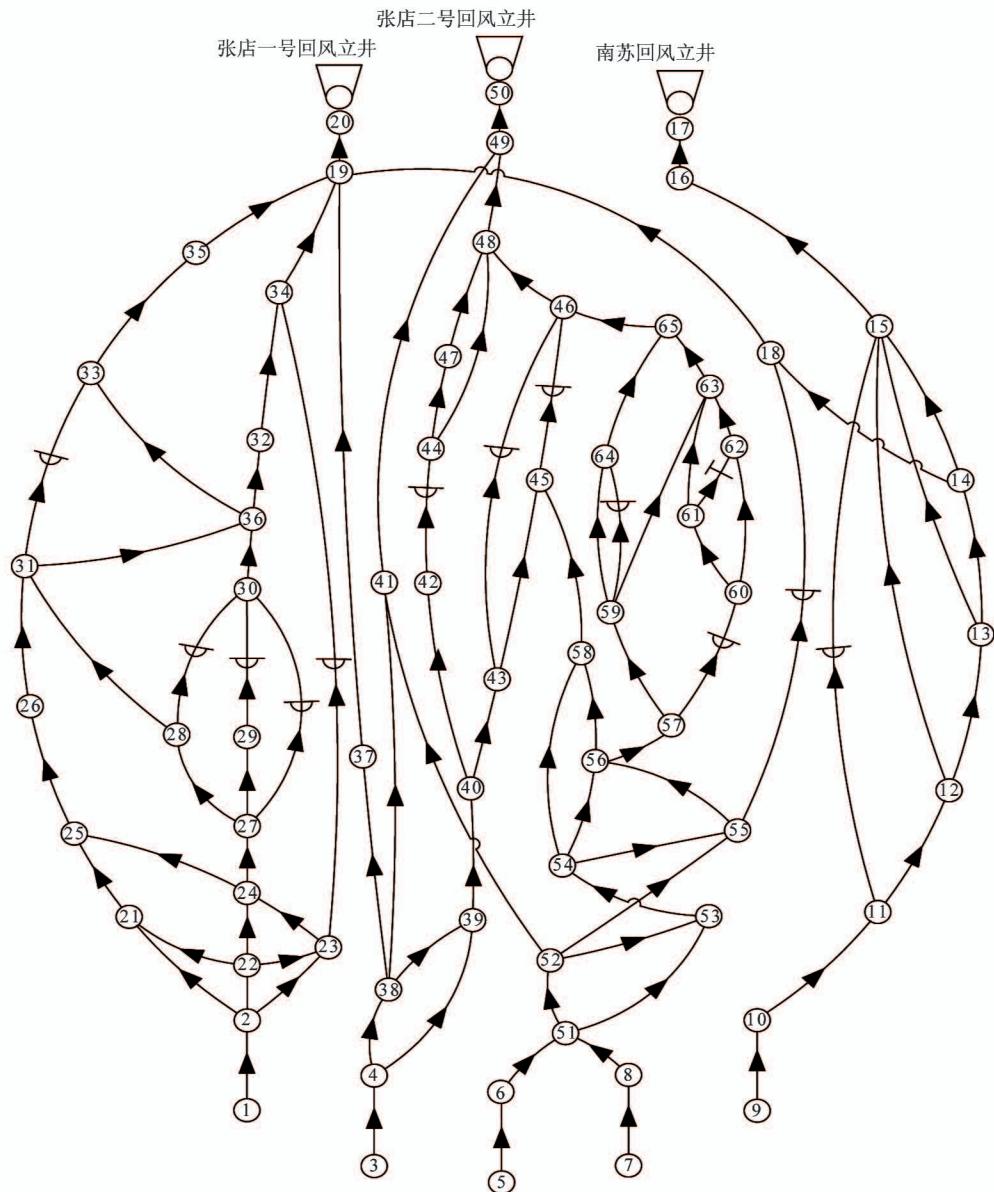


图 2 通风网络图

表 1 节点法与回路法解算对比

解算方法	平均收敛时间/s	迭代步数	收敛误差
回路法	0.714351	58	9.348×10^{-5}
节点法	0.315719	5374	9.979×10^{-5}

首先, 节点法同回路法相比在收敛误差上相差不大, 解算结果中各分支风量的解算结果几乎保持一致。其次, 节点法迭代步数虽然多于回路法, 但收

敛时间远低于回路法, 而通常将收敛速度作为衡量算法优劣性的一个重要指标, 略去对迭代步数的参考。最后, 在应用于其他大型网络时回路法会存在不收敛的情况, 需要重选回路或者添加修正系数的方式使其收敛, 而节点法采用节点压能来修正风量的迭代方式避免了该情况的发生。因此可以认定在同一收敛误差下, 节点法的收敛时间或收敛性大多优于回路法。

5 结论

本文将节点压能的网络分风算法同传统 Scott-Hensley 算法相比较,从根本上解释了节点压能分风算法解算快的原因。并通过数学方程定解分析了节点压能网络分风算法的可行性,推导了节点压能分风算法的数学模型,得到了通风网络节点风压的校正式,绘制了算法流程图。

通过对节点风压校正式进行分析,针对其节点压能校正式中出现迭代收敛慢和不收敛的问题进行探讨,根据风机曲线拟合式次数的不同计算出简化后的节点压能校正式,解决了因校正式而导致网络不收敛和收敛慢的问题。

通过某通风网络为计算实例,对回路法和节点法 2 种网络解算方法进行对比,发现在同水平的迭代误差下节点法在收敛时间和收敛性上相较于回路法有优势,因此在未来的智能通风解算应用中基于节点压能的网络分风算法值得推广。

参考文献

[1] 王国法,杜毅博. 智慧煤矿与智能化开采技术的发展

- 方向 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 1-10
- [2] 谢和平, 吴立新, 郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949-1960
- [3] 钟德云, 王李管, 毕林, 等. 基于回路风量法的复杂矿井通风网络解算算法 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 365-370
- [4] 王海英. 图论算法及其 MATLAB 实现 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2010
- [5] 贾进章. 矿井通风系统可靠性、稳定性、安全性理论 [M]. 北京:科学出版社, 2016
- [6] 黄菊文, 刘朴, 李光明, 等. 城市快速干道综合排水系统现场测试方法 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 85-88
- [7] Krach A. Node method for solving the mine ventilation networks [J]. Archives of Mining Sciences, 2011, 56(4): 601-620
- [8] 黄光球, 陆秋琴, 姚玉霞. 大规模复杂通风网络节点风压解算方法 [J]. 计算机工程, 2008, 34(4): 257-259
- [9] 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
- [10] 李雨成, 周磊, 刘天奇, 等. 局部通风机实际特性的近似处理方法及应用研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(6): 20-24

Research on network wind distribution algorithm based on nodal pressure energy

Li Bolun * *** ***, Li Yucheng * *** ****, Li Junqiao ****

(* College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technology University, Fuxin 123000)

(** Research Institute of Safety Science and Engineering, Liaoning Technology University, Fuxin 123000)

(*** Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education, Liaoning Technology University, Fuxin 123000)

(**** College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

Abstract

According to finding ventilation loops, traditional Scott-Hensley network solution algorithm is so slow to require more solution time. To solve this problem, this paper carries out corresponding research and analyzes the iterative principle of the node pressure energy algorithm. From a mathematical point of view, this paper determines the feasibility of this algorithm in practical application and deduces the mathematical model, which gets pressure energy correction iterative formula and algorithm flow of each node in ventilation network. Aiming at the problems of non convergence and slow convergence in node calibration formal, the corresponding solutions are given according to the different fitting times of fan characteristic curve. An example shows that in the same complex ventilation network, the node pressure energy algorithm can achieve fast convergence and similar convergence error compared with Scott-Hensley algorithm.

Key words: intelligent mine ventilation, node pressure calculation, algorithm optimization, network calculating