

# 引入风量波动因子动态解算矿井热流耦合通风网络

贾 瞳<sup>1,2</sup>, 马 恒<sup>1,2</sup>, 高 科<sup>1,2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 葫芦岛 125100; 2. 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 辽宁 葫芦岛 125100)

**摘要:** 为解决非定常风流介质在通风系统管道域中热流动, 导致矿井风量产生连续状态下的多尺度波动, 使得利用静态热压湿变风网解算模型映射的系统状态精准度不高问题, 在风流流动实质为空气动力过程与热力过程耦合形成的多变过程的框架下, 将系统运行状态实时精准映射等效为动态解算时间序列下矿井热流耦合波动通风网络。溯源热流耦合风量多尺度波动原理, 明确风量波动致因主体为风流密度, 以此为表征变量, 以非稳态环境场和梯度流动场为边界条件, 利用微元法研究风流的热流耦合属性随时间变化规律, 提出了以时间为根变量的风流瞬态流动特征模型。定义风量波动因子以表示波动风量瞬态位置, 代入风网静态解算模型中, 构建连续空间特征下波动风网解算模型, 提出波动因子与风流瞬态流动特征模型的转换方程, 将瞬态流动函数作为波动传递变量代入波动风网解算模型中, 形成了时间序列下波动风网动态解算模型, 达到了实时精准映射风网运行状态的目的。为验证模型生产可行性, 以双马一矿为工程对象, 将时间序列下矿井跨岩层热环境信息作为初始值代入动态解算模型中, 完成了全局风网实时解算, 实现了将初始固定风量值拓展为时间序列下风量波动区间, 实时反映了在风流热流耦合作用下的生产矿井通风系统运行特征。波动风网动态解算通过实时分析矿内环境-通风变量耦合效应, 实现了风网状态精准定量映射, 为后续定量决策提供数据基础和优化路径以提高智能控风的动态适应性和本质精度。

**关键词:** 智能通风; 风网解算; 状态重构; 热流耦合; 风量波动

**中图分类号:** TD724    **文献标志码:** A    **文章编号:** 0253-9993(2025)05-2527-13

## Dynamic calculation of heat-flow coupled mine ventilation network with introduction of air volume fluctuation factor

JIA Tong<sup>1,2</sup>, MA Heng<sup>1,2</sup>, GAO Ke<sup>1,2</sup>

(1. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125100, China;  
2. Key Laboratory of Mine Thermal Disasters and Prevention, Ministry of Education, Huludao 125100, China)

**Abstract:** To address the issue of continuous multi-scale fluctuations in air volume due to the thermal flow within the unsteady airflow medium in the ventilation system pipe domain, which limits the accuracy of system state mapping when using a static thermal-pressure-humidity ventilation calculation model. Under the framework that the air flow is a polytropic process involving coupled aerodynamic and thermodynamic processes, the real-time and accurate mapping of the system operation state is equivalent to dynamically calculating the heat-flow coupling fluctuation mine ventilation network under time series. The underlying multiscale fluctuation principles of heat-flow coupled air volume were examined, identifying airflow density as the primary cause of volume fluctuation. Using this as a characterization variable, with unsteady envir-

收稿日期: 2024-06-06    策划编辑: 王晓珍    责任编辑: 刘雅清    DOI: [10.13225/j.cnki.jecs.2024.0638](https://doi.org/10.13225/j.cnki.jecs.2024.0638)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074148)

作者简介: 贾 瞳(1999—), 女, 安徽马鞍山人, 博士研究生。E-mail: [fsblcq1119@163.com](mailto:fsblcq1119@163.com)

通讯作者: 马 恒(1972—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 教授, 博士。E-mail: [mahenglqd@163.com](mailto:mahenglqd@163.com)

引用格式: 贾瞳, 马恒, 高科. 引入风量波动因子动态解算矿井热流耦合通风网络[J]. 煤炭学报, 2025, 50(5): 2527-2539.

JIA Tong, MA Heng, GAO Ke. Dynamic calculation of heat-flow coupled mine ventilation network with introduction of air volume fluctuation factor[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2527-2539.



移动阅读

onmental and gradient flow fields as boundary conditions, an infinitesimal approach was used to analyze the time-variant law of heat-flow coupled property of airflow. A transient airflow feature model was developed with time as the root variable. An air volume fluctuation factor was defined to capture the transient position of fluctuating air volume, which was then incorporated into a static ventilation network model, yielding a fluctuating ventilation network calculation model with continuous spatial characteristics. Additionally, a transformation equation linking the fluctuation factor with the transient airflow feature model was established to integrate the transient flow function as a fluctuation transfer variable in the fluctuating ventilation network model, thereby forming a time-series-based dynamic calculation model for the fluctuating ventilation network to achieve real-time, precise mapping of the network state. To validate the production feasibility of the dynamic calculation model for the fluctuating ventilation network, Shuangma I Mine was taken as the engineering case, with cross-strata thermal environment data in time series applied as the initial condition. This enabled real-time global ventilation network calculation, expanding the fixed initial air volume value into a time-series fluctuation range and accurately reflecting the real-time operational characteristics of the production ventilation system under the heat-flow coupled airflow condition. The dynamic calculation for the fluctuating ventilation network facilitates precise quantitative mapping of the ventilation network state through real-time analysis of the coupling effect between the mine environment and ventilation variables, establishing a data foundation and optimized pathway for subsequent intelligent quantitative decision-making to enhance the adaptive adaptability and intrinsic precision of intelligent ventilation control.

**Key words:** intelligent ventilation; ventilation network calculation; state reconfiguration; heat-flow coupling; airflow fluctuation

## 0 引言

在依托人工智能技术发展安全经济的时代背景下,利用智能开采高新技术保障煤炭企业安全生产已成为行业发展关键趋势,智慧矿山思想成为主流,针对核心矿井通风系统进行智能化建设的理念被提出<sup>[1-4]</sup>。智能通风建设即通过参数智能感知系统获取系统运行信息作为决策数据源,经风网解算实时映射拓扑网络运行状态,结合灾变风流波动信号代入定量决策系统,生成设施调控决策作用于智能调控系统,从而实现常态优化供风和灾变应急控风<sup>[5-9]</sup>。由此可知,风网状态实时映射是实现多系统智能联动核心基础。

目前,常态化深部开采已成为现代矿井的基本特征,随着采深增加,井下非定常风流与非稳态环境场、梯度流动场间的传热作用将导致风流内能和动能梯度损失转换,形成非等温流动状态,使得风流的热力参数和动力参数联动变化,热力过程对风网解算的影响程度显著增加。因此风网状态实时映射的精准性不仅与动力监测数据可靠性及解算法收敛容差有关,还涉及到非定常风流介质和多离散热源通风系统介质域等热力因素。

为实现风网状态精准映射,学者们将上述热力因素引入风网解算过程中,构建了成体系的热流耦合风网解算模型<sup>[10-12]</sup>。1997年,杨胜强<sup>[13]</sup>首次提出矿井风流是热力、动力耦合作用下的非定常流,并提出了非

定常风流热流动方程组,最先将风流热力参数引入风网解算领域。随后这一理论被广泛应用于矿井热害与降温技术研究,而针对风流热力参数对风网解算的定量影响的研究较少。2010年,马恒等<sup>[14]</sup>为进行复杂风网全局风温预测,结合风网解算提出了仅以单巷道温度和风量为变量的多点风流混合温度计算模型;在此基础上,马恒等<sup>[15-16]</sup>系统地研究了非等温流动风流的能量转换过程,将风流与井巷热源间的热力过程转化为自然风压动力函数,提出含自然风压的风网解算模型;2017年,DZIURZYŃSKI等<sup>[17]</sup>基于非定常风流的热力参数和动力参数联动变化特征,数字化风量对井巷风阻和风流密度变化的敏感性,提出了主通风线路风量灵敏度式;2021年,陈开岩等<sup>[18]</sup>引入风流与热源间不稳定对流换热理论,提出多点风流混合热湿平衡模型和关键地点空气状态参数与风量耦合迭代的风网解算法。上述研究聚焦于分析风流介质与系统介质域间数理关系,构建热流耦合风网静态解算模型,完成风网状态映射。

然而,风流与环境场、流动场间存在非稳态传热可等效为矿井风流流动过程的实质为空气动力过程与热力过程动态耦合形成的多变过程,则风流状态属性(密度、压力、温度等)为动态变化,这将导致以热流耦合状态属性值为主计算参数的矿井风量产生连续状态下的连锁多尺度波动,拓扑节点存在瞬态风量不平衡集。即在实际生产中,同一空间坐标下的风量时间序列为非恒定随机序列,则将单一稳态时刻的风

流数据作为数据源进行热流耦合风网静态解算,无法实时反映在风流热流耦合作用下的通风系统的运行特征。因此,精准映射风网状态的关键在于动态解算时间序列下矿井热流耦合波动通风网络。

为实时定量映射风网状态,结合生产矿井通风系统实际运行特征,明确可应用于实际生产的时间序列下波动风网动态解算的研究主变量为常态非定常系统管道流在多物理场耦合作用下的瞬态流动特征,研究主目标为引入流体瞬态流动特征至风网解算模型中,形成时间序列下风网动态解算模型。通过追溯热流耦合风量多尺度波动机制,构建以波动根元素为表征变量、时间为核心变量的风流瞬态流动特征模型。同时,定义风量波动因子以表示波动风量瞬态位置,构建适用于连续空间特征的波动风网解算模型。再提出波动因子与风流瞬态流动特征模型的转换方程,将瞬态流动函数作为波动传递变量代入波动风网解算模型中,形成时间序列下波动风网动态解算模型。

## 1 风流瞬态流动特征模型

溯源矿井风量在连续状态下存在连锁多尺度波动,反演提出风流瞬态流动特征模型以定量表征时空特征下热流耦合作用下风流的流动状态。

### 1.1 通风系统计算域划分

时间序列下矿井热流耦合波动风网的形成涉及到在时间演变过程中非稳态环境场和梯度流动场耦合作用下风流的过程,即风网状态的本质特征为瞬态非线性。为进行尺度分离以处理非线性,将非定常风流视作流体介质,划定介质域为时空特征下动态运行的矿井通风系统管道流体域,按是否满足 Navier-Stokes 方程的临界时间点将计算时间域分为介质呈现连续守恒力学特征的常态生产阶段和呈现非连续耗散特征的灾变控风阶段。

灾变时间域下,流体域内产生的冲击波将使介质散度动态变化,形成导致通风系统失效的致灾因子,此时,追求精准的风网状态映射无应急意义,应进行致灾因子传播推演和信息残缺灾变风流调控<sup>[9]</sup>。因此,划分通风系统计算域为常态非定常系统管道流。

### 1.2 连续状态下风量多尺度波动原理

从动力角度分析,矿井风量是分区风机在工况点处对控制采区的供风分配值,设风机工作曲线特性系数集合为  $[a_0, a_1, a_2]$ ,根据工况定义推导出动力控制区域风量分配式(1)。从网络角度分析,采用极限微元法将单个井巷作为独立个体,沿流动方向划分为无限个具有无穷小宽度  $dx$  的微元,定义每个微元上风流的风量为  $dq$ ,  $m^3/s$ ; 流速为  $V(x)$ ,  $m/s$ ; 微元截面积为  $S(x)$ ,

$m^2$ 。根据质量守恒定律<sup>[19]</sup>,列出井巷风量  $q$  的微元积分求解式(2)(风量统一指代体积风量,因质量流量在热流耦合风流密度和体积风量作用下,在时间序列中一定保持瞬态平衡,已知热流耦合风流密度动态变化,求解出时间序列下体积风量的系统分布后可直接推算出质量流量分布)。

$$Q = \left( -a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_0a_2 - 4ra_0} \right) / 2(a_2 - r) \quad (1)$$

$$q = \int_L dq = \int_L (1/\rho) dM = \int_L S(x) V(x) dx \quad (2)$$

式中:  $Q$  为风机工作风量,  $m^3/s$ ;  $r$  为风机控制网络等效风阻,  $(N \cdot s^2)/m^8$ ;  $q$  为井巷风量,  $m^3/s$ ;  $M$  为风流质量流量,  $kg/s$ ;  $L$  为巷道长度,  $m$ ;  $\rho$  为风流平均密度,  $kg/m^3$ 。

由连分数理论可知,  $Q$  与  $q$  间存在繁分数关系:  $Q = [q_1, q_2, q_3, \dots]$ 。将风量波动动力、网络影响因素融合,引入紊流摩擦阻力定律<sup>[19]</sup>,形成时空特征下风量计算式(3)。

$$q = M/\rho = \sqrt{8S^3\rho(t)h_r/(\lambda LU)} / \rho(t) = \sqrt{h_r/R(t)} \quad (3)$$

式中:  $S$  为巷道面积,  $m^2$ ;  $t$  为瞬态时刻,  $h_r$  为流动压降,  $Pa$ ;  $\lambda$  为巷道的试验比例系数, 完全紊流状态下仅与壁面相对光滑度有关, 已定型井巷的  $\lambda$  值为常数;  $U$  为巷道断面周长,  $m$ ;  $R$  为巷道的摩擦风阻,  $(N \cdot s^2)/m^8$ 。

根据流动压降  $h_r$  与  $q$  间关系,明确以式(3)为相互制约关系的风量波动致因主体:巷道面积  $S$ (或周长  $U$ )、巷道瞬态风流密度场  $\rho(x, y, z, t)$ 、风阻场  $R(x, y, z, t)$ 。

1)  $S$  变化对风量波动影响。随着生产接续,风网结构梯度延深,受反向地应力集中、冲击地压等影响,围岩稳定性降低将导致巷道变形,使得巷道面积  $S$  变化。根据 Darcy-Weisbach 定律及连续性定律<sup>[19]</sup>,  $S$  变化将导致巷道周长  $U$ 、风速  $V$ 、风阻  $R$  变化,引起巷道结构阻力单比例变化,变化的结构阻力作为伯努利方程的能量项,将导致动压和静压转换幅度变化,引起巷道压强再分布,导致动力控制网络风量分配的权重变化,形成具有趋势性的长期风量序列波动。

2)  $\rho$  变化对风量波动影响。随着风网结构梯度延深,在地热梯度作用下,井巷壁面与入井的大气风流间存在能引起热对流、热膨胀的温度梯度;同时空气柱质量增加将形成能引起压缩、膨胀的压力梯度。在压力梯度和温度梯度耦合作用下,风流的动能和内能发生转换,风流压力  $P$ 、温度  $T$  和密度  $\rho$  交互变化,  $\rho$  在不同区域和时间段内呈现瞬态非均匀性。类比于  $S$  变化,  $\rho$  变化将导致巷道结构阻力单比例变化,引起巷道压强再分布,导致动力控制网络风量分配的权重

变化,但因  $\rho$  具有瞬态非均匀性,将形成风量序列瞬态波动。

3)  $R$  变化对风量波动影响。除却  $S$  和  $\rho$  变化导致风阻  $R$  变化形成的风量序列波动,在井下常态生产过程中,存在启闭风门、矿车运行等情况,这都将导致  $R$  值短期增减和自动恢复,形成风量的随机平稳波动。

在无开采区转移、掘进钻爆等活动的生产稳定期间,  $S$  变化导致的长期风量波动在风量波动随机序列中占比较小,而针对非生产稳定期的布局决策,需要重新进行通风动力和网络核算,完成风量的整体预分配,风量序列将产生整体性更新变化,原有的风量序列分布特征不再适用。因此,可按生产稳定步长进行时间序列间断分割取样,将矿井的生产时间划分为有限个存在风量短期瞬态波动分布族的稳定期,在稳定期内风量序列无长趋势性和季节性。此时,风量波动的主致因因素为  $\rho$  和  $R$ 。

$R$  变化对风量波动的主要影响是通过时空特征下动态变化的计算因子  $\rho$  使得巷道压强再分布,导致风量序列瞬态波动,而  $R$  对风量波动的剩余影响(启闭风门等)为增减差值序列,是类似布朗运动的随机过程,风量产生随机平稳的残差波动,可自动增减恢复。由此可知,风量波动主要根元素为  $\rho$ ,在  $\rho$  作用下,矿井风量将产生连续状态下的多尺度波动。

### 1.3 风流瞬态流动特征模型

基于 Charles 定律<sup>[19]</sup>, 非稳态大气环境场中风流的密度、温度和压力将以三元非单调函数形式耦合变化,风流状态属性变化规律如式(4)所示:

$$P_0(x, y, z, t) = \rho_0(x, y, z, t) R_k T_0(x, y, z, t) \quad (4)$$

式中:  $P_0$  为大气压力, Pa;  $\rho_0$  为大气平均密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $R_k$  为气体常数,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T_0$  为大气温度, K。

当大气风流进入井下后,因与井下非稳态环境场间存在温湿梯度,两者间将发生传热传质,使得风流温、湿度在时间序列中逐渐趋向动态平衡。同时受温、湿度变化影响,风流中可容纳水汽含量限值非恒定,饱和蒸汽分压  $P_{\text{sa}}$  随之瞬态变化,这一过程又将反向作用于井下湿度  $\varphi$  分布。

此外,在梯度流动场作用下,风流在流动过程中因重力势能变化产生自压缩热量导致内能改变,同时,自压缩效应致使风流体积力和沿程阻力损失变化,使得风流温度  $T$  和压力  $P$  始终处于动态耦合变化的状态,而  $T$  和  $P$  变化将导致密度  $\rho$  联动变化,从而形成压力变化负反馈机制进一步影响体积力和沿程阻力。

因此,在非稳态环境场和梯度流动场作用下,井下风流的  $T$ 、 $P$ 、 $\rho$ 、 $\varphi$  及  $P_{\text{sa}}$  等状态参数,在时间序列

中均表现出相互耦合和动态变化的特征。基于 Dalton 分压定律<sup>[19]</sup>,列出井下环境场中风流的热流耦合状态参数变化式(5):

$$\rho(x, y, z, t) = \frac{3.48 [P(x, y, z, t) - 0.38\varphi P_{\text{sa}}(x, y, z, t)] \times 10^{-3}}{T(x, y, z, t)} \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{sa}}$  为饱和蒸汽分压, Pa;  $\varphi$  为井下湿度, %;  $T$  为温度, K。

针对复杂风网,因各井巷边界条件存在差异,为提高模型精度,将各分支拆解为始末 2 个节点,通过分析在不同边界条件下的节点处风流变化趋势,分析节点风流热流耦合属性值变化规律,在此基础上,结合积分法对节点间的属性值进行积分,进而推导出井巷风流热流耦合属性变化规律。

1) 非稳态大气环境场作用下的矿外节点状态参数。以矿区大气环境参数作数据源,基于最小二乘判别准则进行数据拟合形成时间序列下大气环境非稳态温度场  $T_0(t)$  和大气压场  $P_0(t)$ ,代入式(4)中计算大气节点密度参数  $\rho_0(t)$ 。 $T_0(t)$ 、 $P_0(t)$  和  $\rho_0(t)$  即为进风井口节点风流热流耦合状态。

2) 非稳态井下环境场和梯度流动场作用下的矿内节点状态参数。设井下环境场中影响风流热流耦合性质的主要因素有井筒围岩放热、梯度风流压缩生热、热湿交换。考虑到部分井巷存在高度差,而风流位能梯度叠加将产生自压缩热量,同时不同岩层的热物性差异使得经过不同原岩的井巷的初始温度不相等。因此,为精确分析风流热流耦合特性,采用逐级差分法对井巷进行长度  $dL$  的有限井段微元划分,将第  $i$  个井段末端环境参数,作为  $i+1$  个井段开端环境参数,逐段进行风流热流耦合状态参数的推算。用干燥加热系数  $\varepsilon$  代表潜热热量与显热热量相对比,根据热力学第一定律<sup>[20]</sup>,每个井段中的风流吸热量等于围岩散热与风流压缩热之和(除水蒸发吸热外)<sup>[21]</sup>。

为适应时间域下复杂流场中介质热流动特征,基于风流在微元内的热流效应(图 1),对每个微元风流状态进行能量守恒分析,推导节点温度算式(7)和节点压强算式(8)。结合热湿交换理论<sup>[20]</sup>,推导节点水蒸气分压算式(9)。

$$\varepsilon(Q_{i-\text{gu}} + Q_{i-\text{z}}) = cM\Delta T_i \Rightarrow \int \varepsilon [K_i U_i (T_{i-\text{gu}} - T_i) + q_i \rho_i g \sin \theta \times 10^{-3}] dL = \int c q_i \rho_i dT \quad (6)$$

$$T_{i-\text{out}} = \left\{ K_i U_i T_{i-\text{gu}} + q_i \rho_i g \sin \theta \times 10^{-3} - (K_i U_i T_{i-\text{gu}} + q_i \rho_i g \sin \theta \times 10^{-3} - K_i U_i T_{i-\text{in}}) \right. \\ \left. \exp [-K_i U_i \varepsilon L_i / (c q_i \rho_i)] \right\} / K_i U_i \quad (7)$$

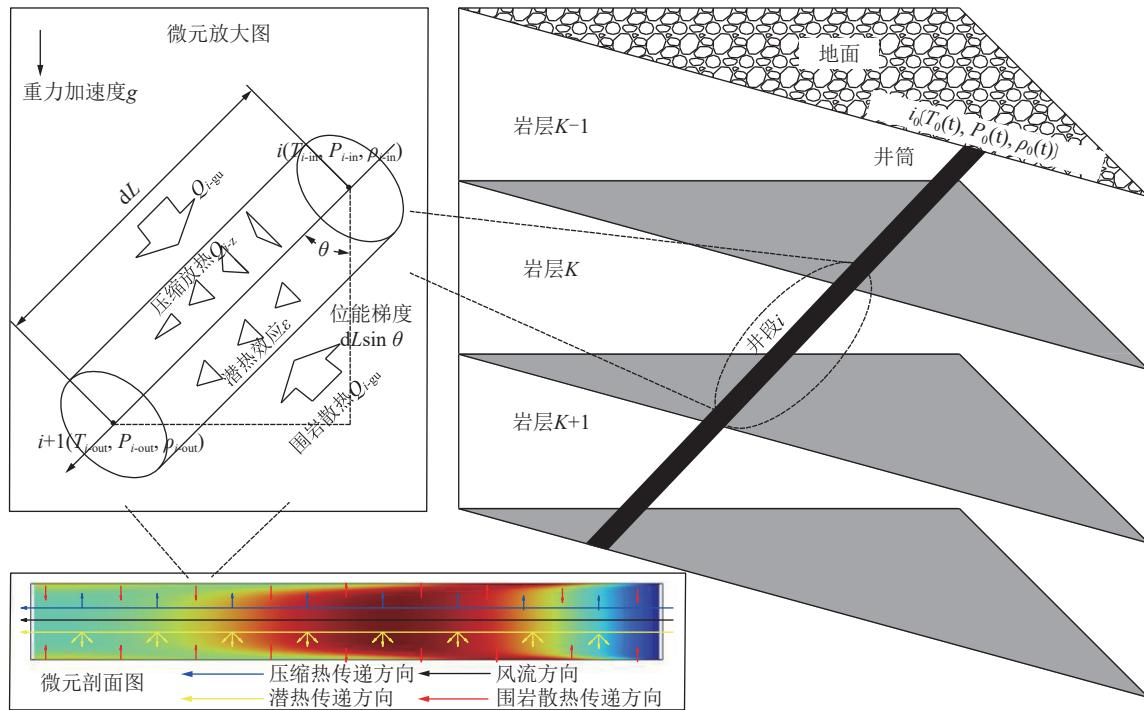


图1 井段微元内风流的热流动特征

Fig.1 Heat-flow characteristics of air flow in an infinitesimal of roadways

$$P_{i-out} = P_{i-in} + \rho_i g L_i \sin \theta - R_i q_i^2 \quad (8)$$

$$(\varphi P_{sa})_{i-out} = \\ P_{i-out} (q_i \rho_i d_{i-in} + f_i W_i) / (622 q_i \rho_i + q_i \rho_i d_{i-in} + f_i W_i) \quad (9)$$

式中: 在井段  $i$  中,  $Q_{i-gu}$  为围岩放热量,  $\text{kW}$ ;  $Q_{i-z}$  为风流自压缩放热量,  $\text{kW}$ ;  $c$  为风流比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $\Delta T_i$  为井段  $i$  中温度变化量,  $\text{K}$ ;  $K_i$  为风流与围岩间不稳定换热系数,  $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $U_i$  为井段  $i$  周长,  $\text{m}$ ;  $T_{i-gu}$  为围岩初始温度,  $\text{K}$ ;  $T_i$  为风流平均温度,  $\text{K}$ ;  $q_i$  为风量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\rho_i$  为风流平均密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $\theta$  为井巷与水平面夹角,  $(^\circ)$ ;  $T_{i-out}$  为井段  $i$  末端风流温度,  $\text{K}$ ;  $T_{i-in}$  为井段  $i$  开端风流温度,  $\text{K}$ ;  $L_i$  为井段  $i$  长度,  $\text{m}$ ;  $P_{i-out}$  为井段  $i$  末端点压强,  $\text{Pa}$ ;  $P_{i-in}$  为井段  $i$  开端点压

$$\rho_{i-out} = \left[ 3.48 K_i U_i (P_{i-in} + \rho_i g L_i \sin \theta - R_i q_i^2 - 0.38 \varphi P_{sa}) \times 10^{-3} \right] / \\ \left\{ K_i U_i T_{i-gu} + q_i \rho_i g \sin \theta \times 10^{-3} - (K_i U_i T_{i-gu} + q_i \rho_i g \sin \theta \times 10^{-3} - K_i U_i T_{i-in}) \exp \left[ -K_i U_i \varepsilon L_i / (c q_i \rho_i) \right] \right\} \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{i-out} = \left\{ K_i U_i T_{i-gu} + q_i \rho_i g \sin \theta \times 10^{-3} - (K_i U_i T_{i-gu} + q_i \rho_i g \sin \theta \times 10^{-3} - K_i U_i T_{i-in}) \right. \\ \left. \exp \left[ -K_i U_i \varepsilon L_i / (c q_i \rho_i) \right] \right\} / K_i U_i \\ P_{i-out} = P_{i-in} + \rho_i g L_i \sin \theta - R_i q_i^2 \\ \rho_{i-out} = \left[ 3.48 K_i U_i (P_{i-in} + \rho_i g L_i \sin \theta - R_i q_i^2 - 0.38 \varphi P_{sa}) \times 10^{-3} \right] / \\ \left\{ K_i U_i T_{i-gu} + q_i \rho_i g \sin \theta \times 10^{-3} - (K_i U_i T_{i-gu} + q_i \rho_i g \sin \theta \times 10^{-3} - K_i U_i T_{i-in}) \exp \left[ -K_i U_i \varepsilon L_i / (c q_i \rho_i) \right] \right\} \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\rho_i = \int_{\rho_{i-in}}^{\rho_{i-out}} d\rho_i = (\rho_{i-in} + \rho_{i-out}) / 2 = [1.74 (T_{i-in} P_{i-out} + T_{i-out} P_{i-in}) - 0.38 \varphi P_{sa} (T_{i-in} + T_{i-out})] / (T_{i-in} T_{i-out}) \quad (12)$$

强,  $\text{Pa}$ ;  $R_i$  为摩擦风阻,  $(\text{N} \cdot \text{s}^2)/\text{m}^8$ ;  $(\varphi P_{sa})_{i-out}$  为井段  $i$  末端水蒸气分压,  $\text{Pa}$ ;  $d_{i-in}$  为井段  $i$  开端含湿量,  $\text{g}/\text{kg}$ ;  $f_i$  为壁面湿度系数;  $W_i$  为风流与壁面水分交换量,  $\text{kg}$ 。

将式(7)、式(8)、式(9)联立代入式(5)中,推导出节点密度计算式(10),据此建立节点风流状态方程组式(11),完成非定常风流热流动的状态特征描述。

鉴于风量波动主要根元素为  $\rho$ ,选取  $\rho$  作为热流耦合状态特征变量,采用有限体积法对井段微元内风流热流耦合状态进行积分计算,构建常态非定常系统管道流在多物理场耦合作用下的瞬态流动特征模型式(12),以反映风流状态参数在非稳态环境场和梯度流动场中的时空演化过程。

## 2 时空特征下风网状态实时映射

定义波动因子表示风量瞬态分布位置,加入风网静态解算模型中,形成连续空间特征下波动风网解算模型。利用波动传递变量,将时变因素加入波动风网解算模型中,形成时间序列下波动风网动态解算模型,以在时空尺度下重新定义动态热流耦合通风系统运行状态。

### 2.1 波动因子

设分支  $j$  的初始风量  $q_{j0}$  在风流热流耦合作用下存在动态波动,波动行为限定在区间  $[q_{\min}, q_{\max}]$  内,某一瞬态时刻风量  $q_j$ 。为量化风量波动行为,定义  $q_j$  的剩余可波动区间为波动位置余量,  $q_j$  与  $q_{j0}$  的相对位置为波动因子  $\delta_j$ , 满足  $\delta_j q_{j0} \in [q_{\min}, q_{\max}]$ , 如式(13)所示:

$$\delta_j = q_j / q_{j0} = (M_j \rho_{j0}) / (M_{j0} \rho_j) = \sqrt{R_{j0} h_{rj} / (R_j h_{rj0})} \quad (13)$$

式中:  $q_j$  为瞬态风量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $q_{j0}$  为初始风量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $M_j$  为瞬态质量流量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $M_{j0}$  为初始质量流量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $\rho_j$  为瞬态风流密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 根据瞬态流动特征模型式(12)计算;  $\rho_{j0}$  为初始风流密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $R_j$  为瞬态摩擦风阻,  $(\text{N} \cdot \text{s}^2)/\text{m}^8$ ;  $R_{j0}$  为初始摩擦风阻,  $(\text{N} \cdot \text{s}^2)/\text{m}^8$ ;  $h_{rj}$  为瞬态通风阻力,  $\text{Pa}$ ;  $h_{rj0}$  为初始通风阻力,  $\text{Pa}$ 。

根据式(13), 波动因子可转换为以风流瞬态流动特征为主变量的多元函数式(14):

$$\delta_j = F(R_j, h_{rj}) = f_1(f_2(\rho_j), h_{rj}) \quad (14)$$

式中:  $F, f_1, f_2$  为非线性响应函数。

### 2.2 连续空间特征下波动风网解算模型

任意矿井通风网络数学表达式为

$$G_r = (V_r, E_r) \quad (15)$$

式中:  $V_r$  为图  $G_r$  节点集合,  $V_r = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_m\}$ ;  $E_r$  为图  $G_r$  边集合,  $E_r = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_n\}$ <sup>[22]</sup>;  $m$  为节点数,  $m = 1, 2, 3, \dots$ ;  $n$  为分支数,  $n = 1, 2, 3, \dots$ 。

无论风量波动与否,一定在以计算波动因子  $\delta$  的范围内遵循通风阻力定律、风量平衡定律及回路风压平衡定律,据此构建波动风网解算模型式(16),以反映各回路中风量和风压的波动情况。为简化模型求解,将一组余树风量  $(q_{y1}, q_{y2}, \dots, q_{yb})$  作回路风量,以  $q_{yb}$  为核心将多类变量波动风网解算模型转换为如式(17)所示单变量方程组形式。

$$\sum_{j=1}^n C_{ij} R_j \left| \sum_{s=1}^b C_{sj} \delta_j q_{ys} \left| \left( \sum_{s=1}^b C_{sj} \delta_j q_{ys} \right) \right. \right. \right. = \sum_{j=1}^n C_{ij} (h_{fj} + h_{Nj}) \quad (16)$$

$$f(q_{y1}, q_{y2}, \dots, q_{yb}) = \sum_{j=1}^n \left[ C_{ij} R_j \left| \sum_{s=1}^b C_{sj} \delta_j q_{ys} \left| \left( \sum_{s=1}^b C_{sj} \delta_j q_{ys} \right) \right. \right. \right. - C_{ij} (h_{fj} + h_{Nj}) \right] = 0 \quad (17)$$

式中:  $(C_{ij})_{b \times n}$  为风网基本回路矩阵;  $b$  为风网独立回路数,  $b = n - m + 1$ ;  $q_y$  为余树枝风量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $q_y = (q_{y1}, q_{y2}, q_{y3}, \dots, q_{yb}, \dots, q_{yb})$ ,  $s = 1, 2, 3, \dots, b$ ;  $h_{fj}$  为风机风压,  $\text{Pa}$ ;  $h_{Nj}$  为自然风压,  $\text{Pa}$ 。

利用割集矩阵算法推广方程式(17)得全局风量波动非线性方程  $f(q_j, R_j) = 0$ , 由此可推断, 风量波动特征表现为非线性、连续的瞬态随机过程。引入 Scott-Hinsley 风量校正原理<sup>[23]</sup>, 将波动因子  $\delta$  与瞬态的风阻  $R$  变化关联, 以简化非线性波动。具体措施为: 利用  $k$  次迭代实根近似值  $f^{(k)}(q_j^{(k)}, R_j^{(k)})$ , 将原方程用泰勒级数展开, 增加  $R$  修正项, 求解出忽略多元偏导、高阶微量及截断余项的风量波动迭代式(18)。

$$f^{(k+1)}(q_j^{(k+1)}, R_j^{(k+1)}) = f^{(k)}(q_j^{(k)}, R_j^{(k)}) + \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial q_j} \Delta q_j^{(k)} + \frac{\partial f}{\partial R_j} \Delta R_j^{(k)} \right) = 0 \quad (18)$$

为处理风量波动非线性特征, 对式(18)进行隐函数求导, 得到一系列反映  $q$  与  $R$  关系的偏导数, 代入非线性方程  $f(q_j, R_j) = 0$  中, 实现了方程局部线性化, 得到波动风网解算模型式(19)。这一过程涉及在每次迭代中, 近似用线性方程描述风量波动行为, 从而实现对全局风量波动的逐次线性化建模。

$$[\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_n] = \begin{bmatrix} \frac{\partial q_1}{\partial R_1} & \dots & \frac{\partial q_n}{\partial R_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial q_1}{\partial R_n} & \dots & \frac{\partial q_n}{\partial R_n} \end{bmatrix} [\Delta R_1, \Delta R_2, \dots, \Delta R_n] \quad (19)$$

### 2.3 连续时间特征下波动风网解算模型

根据风量波动溯源结果, 风量波动根元素为  $\rho$ , 且风量波动为连续状态下的多尺度波动。因此, 在波动风网解算模型的基础上, 引入连续时间特征指标对解算模型进行修正, 形成时间序列下波动风网动态解算模型。

利用时空特征下的瞬态流动特征模型量化时变因素对风阻  $R$  影响, 将波动风网解算模型中的静态风阻常数  $R_j$  扩展为时变函数  $R_j(t)$ , 再将瞬态流动特征模型  $\rho(x, y, z, t)$  作为波动传递变量代入波动风网解算模型中以实现波动因子与时间变量的转换。形成如式(21)所示的时间序列下波动风网动态解算模型。

$$\Delta q_j = \frac{\partial q_j}{\partial R_j} \Delta R_j = \frac{\partial q_j}{\partial [\lambda \rho_j L_j U_j / (8S_j^3)]} \Delta [\lambda \rho_j L_j U_j / (8S_j^3)] = \frac{\partial q_j}{\partial \rho_j} \Delta \rho_j \quad (20)$$

$$[\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_n] = \begin{bmatrix} \frac{\partial q_1}{\partial \rho_1} & \dots & \frac{\partial q_n}{\partial \rho_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial q_1}{\partial \rho_n} & \dots & \frac{\partial q_n}{\partial \rho_n} \end{bmatrix} [\Delta \rho_1, \Delta \rho_2, \dots, \Delta \rho_n] \quad (21)$$

时间序列下风网动态解算模型因将时变因素作为参数底层变量,更好地表征了时空特征下风量的波动规律,精准描述了矿井风网运行状态,而精准的风网状态映射是提高后续诊断控风精度最根本的手段。同时,模型因将瞬态流动特征模型作为波动传递变量,具备根据非稳态环境变化动态调整的能力,这一自适应机制使其能根据实时环境变化动态解算风网状态。

#### 2.4 时间序列下动态风网解算模型求解方法

步骤一:构建通风网络模型。

1) 网络拓扑结构搭建:根据通风网络分支关联始末节点数据结构,构建分支集和节点集,完成风网无向图创建;构建零矩阵,以分支风阻作权值,结合分支集和节点集进行矩阵赋值;根据风机特性方程构建风机列向量。

2) 最小树解算:初始化参数,利用 Kruskal 算法进行网络最小权值边搜索,完成最小生成树和余树求解。

3) 基本回路矩阵  $C$  求解:根据节点与分支间关联关系,计算网络基本关联矩阵  $B$ ,根据  $BC^T=0$ ,解算网络基本回路矩阵  $C$ 。

步骤二:构建时间序列下波动风网动态解算模型主函数。

1) 设置风网初始风量集;设置最大迭代次数  $T_{iter}$ ;设置最大回路风量修正值小于迭代精度  $\sigma$  为迭代终止条件,主函数模型处于默认状态;

2) 根据式 (21),构建风网解算函数,其中分支密度数据通过 model1 获取,风网模型解算通过 model3 进行。

3) 完成全局风网解算,输出网络解算数据。

步骤三:定义瞬态流动特征模型 model1。

1) 设置时间变量  $t$  以 1 h 为间隔,在最大值 23,最小值 0 的区间变化;

2) 矿外节点状态参数:输入大气环境场参数,构建温度、压力、密度向量,利用 polyfit 函数完成以  $t$  为变量的多项式拟合  $T_0(t)$ 、 $P_0(t)$  和  $\rho_0(t)$ ;

3) 矿内节点状态参数:根据岩层属性进行密度、放热系数、热导率矩阵赋值,完成不稳定换热系数计算;根据节点风流状态方程组构建嵌套风流瞬态流动特征模型;

4) 设大气节点状态参数为始节点值,分段递推完成风流瞬态流动特征模型解算。

步骤四:完成全局风网迭代解算 model3

1) 根据  $R_{t+1}=R_t \rho_{t+1}/\rho_t$  关系,完成全局风网风阻权值再分配;

2) 迭代计算:分别计算各回路风量修正值,同时,设置单回路修正值解算后立即累加前赋初值,对回路所有分支风量进行修正,以提高收敛速度;完成全回路风量修正后,进行迭代结束条件验证,若已满足,终止迭代计算;否则  $T_{iter}=T_{iter}+1$ ,修正风量作为迭代初始风量再次进行迭代计算。

### 3 工程实用性验证

为验证所提出的风流瞬态流动特征模型、波动风网动态解算模型可应用于实际生产矿井,以宁夏双马一矿作为工程对象,在一段生产稳定期内 (2024-03-10—2024-04-10, 3月9日进行新风井投运改变了井下风流分布) 进行多次信息测试活动以获取通风初始数据、梯度流动场及非稳态环境场数据,分步代入风流瞬态流动特征模型和风网解算模型中,迭代计算出时间序列下波动风网全局风量分布,实现风网状态精准映射。

#### 3.1 通风系统运行现状分析

##### 3.1.1 风网特征分析

双马一矿采用以主、副斜井进风,回风斜井、回风立井回风的“两进两回”全负压通风系统。目前主采煤层为一煤组 4-1 煤层、4-2 煤层、4-3 煤层。因矿井范围较广,且在开采 4-1 煤层的同时进行了 4-2 煤层开拓开采布置,为便于行人通车,巷道间设置多条联络巷,则共有 415 条分支的双马一矿的风网特征为多风井回风、多角联共存复杂风网。简化绘制双马一矿风网如图 2 所示。

由图 2 可知, I01 和 I02 采区以并联形式共同受主、副斜井供风(分别开采 4-1、4-2 煤层)。I01 区的乏风由回风斜井排出, I02 区乏风由回风立井排出。为直观显示系统结构,将通风系统简化为 8 条等效分支:主斜井、副斜井、主斜进风等效分支、副斜进风等效分支、I01 区用回风等效分支、I02 区用回风等效分支、回风斜井和回风立井。

##### 3.1.2 通风特征初始数据

基于本段生产稳定期的计划,选择矿井生产关键

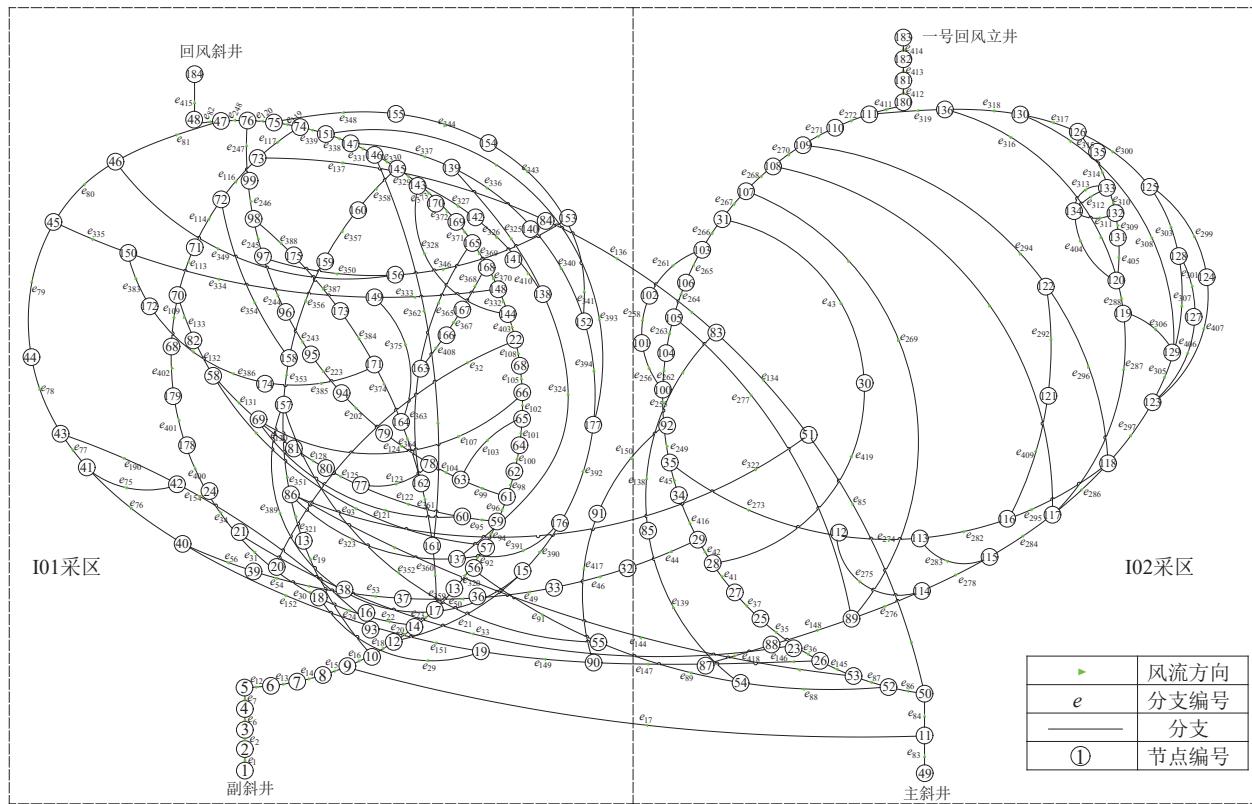


图 2 双马一矿通风网络

Fig.2 Shuangma I Mine ventilation network

阶段的 3 月 25 日上午实地采集到的通风参数进行初始静态风网解算,解算结果见表 1,其中串联通风分支仅列出通路中 1 条。

### 3.2 风流瞬态流动特征模型解算

### 3.2.1 矿外节点状态参数

以非稳态大气环境场为边界条件,研究风量序列多尺度波动权重,以灵武市(双马一矿所属市区)2024年3月25日当天24 h的环境参数为非稳态大气环境场数据源。依据大气风流状态属性变化规律式(4),结合最小二乘判别准则进行数据计算、拟合以构建时间序列下的大气环境温度场  $T_0(t)$ 、大气压场  $P_0(t)$  和大气密度场  $\rho_0(t)$ 。非稳态大气环境场中风流流动特征如图3所示。

$$T_0(t) = -\left(3.30 \times 10^{-6}\right)t^6 + \left(3.34 \times 10^{-4}\right)t^5 - 0.012t^4 + 0.16t^3 - 0.68t^2 - 0.49t + 283.11 \quad (22)$$

$$P_0(t) = \left(1.11 \times 10^{-7}\right)t^6 - \left(6.06 \times 10^{-7}\right)t^5 - \left(2.19 \times 10^{-4}\right)t^4 + 0.0063t^3 - 0.060t^2 + 0.16t + 88.56 \quad (23)$$

$$\rho_0(t) = \left(1.69 \times 10^{-8}\right)t^6 - \left(1.47 \times 10^{-6}\right)t^5 + \\ \left(4.57 \times 10^{-5}\right)t^4 - \left(5.75 \times 10^{-4}\right)t^3 + \\ 0.0020t^2 + 0.0039t + 1.09 \quad (24)$$

### 3.2.2 矿内节点状态参数

结合矿井实际地质情况对井巷进行区段划分,因矿井进、回风井长度均超千米,并横跨多个地质层位,岩性涵盖黄土、夹砾石层、粉砂岩、细砂岩等多种类型。根据实地勘测结果,确定矿井开采开拓巷道中有高差巷道横跨多地质层位,无高差巷道根据采煤区域不同,具体分布在以粉砂岩为围岩的 4-1 和 4-2 顶板区域,及以不黏煤为围岩的 4-1 和 4-2 煤层区域。因此,以围岩岩(煤)性作为井段划分标准,针对存在高度梯度的井巷采用逐级差分法进行区段划分,无高度梯度巷道以独立区段的形式直接划分。

利用傅里叶准数和毕渥准数,根据煤岩性质,确定各井段不稳定换热系数  $K_i$ 、原岩温度  $T_i$  等热物性参数。同时,从宏观角度看,井段始末节点处的风流水蒸气分压力  $\varphi P_{sa}$  对流动特征影响不大,而风流与壁面水分交换量计算涉及到区段的平均湿球温度,在实际生产中实测难度较大。因此采用分区段范围值计算井巷相对湿度,将矿井分为进风段、用风段、回风段,各部分风流流动长度与相对湿度呈线性增加关系,取中间值为区段分界点<sup>[24]</sup>,设置相对湿度分别为 75%、85% 和 95%。因全矿井分支数过多,仅根据等效通风系统列出等效分支中具有显著梯度的特征分支的区段划分、热物性计算结果见表 2。

表1 初始静态风网解算

Table 1 Initial static ventilation network calculation

分支	风量 $q_j$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	分支	风量 $q_j$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	分支	风量 $q_j$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	分支	风量 $q_j$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	分支	风量 $q_j$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	分支	风量 $q_j$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
$e_1$	170.87	$e_{87}$	52.85	$e_{137}$	2.98	$e_{275}$	1.71	$e_{320}$	41.44	$e_{361}$	39.24
$e_{16}$	187.75	$e_{88}$	0.70	$e_{139}$	2.79	$e_{276}$	27.98	$e_{321}$	11.49	$e_{362}$	7.52
$e_{17}$	16.88	$e_{89}$	3.48	$e_{144}$	0.57	$e_{277}$	3.58	$e_{322}$	5.07	$e_{363}$	19.46
$e_{18}$	150.23	$e_{91}$	12.36	$e_{145}$	52.29	$e_{278}$	26.26	$e_{323}$	0.44	$e_{364}$	19.79
$e_{19}$	37.52	$e_{92}$	53.80	$e_{146}$	51.35	$e_{282}$	38.63	$e_{324}$	9.75	$e_{365}$	12.46
$e_{20}$	104.12	$e_{93}$	1.75	$e_{147}$	18.24	$e_{283}$	0.59	$e_{325}$	0.75	$e_{369}$	7.29
$e_{21}$	46.11	$e_{94}$	52.05	$e_{148}$	33.11	$e_{284}$	25.68	$e_{328}$	1.31	$e_{370}$	0.29
$e_{22}$	41.95	$e_{95}$	23.72	$e_{149}$	16.64	$e_{285}$	1.12	$e_{329}$	30.05	$e_{371}$	19.74
$e_{23}$	62.17	$e_{96}$	28.34	$e_{150}$	1.59	$e_{286}$	4.61	$e_{330}$	48.80	$e_{374}$	12.99
$e_{29}$	7.58	$e_{98}$	7.30	$e_{151}$	9.07	$e_{287}$	19.95	$e_{331}$	56.32	$e_{375}$	6.80
$e_{30}$	49.52	$e_{99}$	21.04	$e_{152}$	3.40	$e_{288}$	24.54	$e_{332}$	3.93	$e_{385}$	10.60
$e_{31}$	48.67	$e_{102}$	12.96	$e_{154}$	5.67	$e_{294}$	15.13	$e_{333}$	3.64	$e_{388}$	2.39
$e_{32}$	0.86	$e_{103}$	5.67	$e_{190}$	3.32	$e_{295}$	32.33	$e_{334}$	10.45	$e_{389}$	23.38
$e_{33}$	47.60	$e_{104}$	15.37	$e_{223}$	8.43	$e_{296}$	8.83	$e_{335}$	21.04	$e_{390}$	22.73
$e_{35}$	48.53	$e_{105}$	7.45	$e_{245}$	13.06	$e_{297}$	28.11	$e_{336}$	0.67	$e_{391}$	10.20
$e_{36}$	0.94	$e_{107}$	5.51	$e_{246}$	15.45	$e_{300}$	19.98	$e_{337}$	1.43	$e_{392}$	12.53
$e_{42}$	46.95	$e_{108}$	4.39	$e_{248}$	127.27	$e_{303}$	12.98	$e_{338}$	57.75	$e_{393}$	2.61
$e_{43}$	1.59	$e_{109}$	4.13	$e_{249}$	4.14	$e_{305}$	13.91	$e_{339}$	60.36	$e_{394}$	9.91
$e_{45}$	40.47	$e_{113}$	42.05	$e_{255}$	5.74	$e_{306}$	4.59	$e_{341}$	9.24	$e_{400}$	1.07
$e_{56}$	6.47	$e_{116}$	45.23	$e_{258}$	2.44	$e_{307}$	5.78	$e_{343}$	3.25	$e_{403}$	1.07
$e_{75}$	2.35	$e_{117}$	48.22	$e_{263}$	3.30	$e_{308}$	3.53	$e_{346}$	5.99	$e_{404}$	6.10
$e_{76}$	9.87	$e_{119}$	108.58	$e_{265}$	6.87	$e_{310}$	2.22	$e_{349}$	1.37	$e_{405}$	6.40
$e_{77}$	12.22	$e_{120}$	111.83	$e_{266}$	9.31	$e_{311}$	4.18	$e_{350}$	4.62	$e_{406}$	7.20
$e_{78}$	15.54	$e_{121}$	2.47	$e_{267}$	10.90	$e_{312}$	5.92	$e_{351}$	7.42	$e_{407}$	7.00
$e_{80}$	36.58	$e_{122}$	21.25	$e_{268}$	12.46	$e_{313}$	4.36	$e_{352}$	8.88	$e_{408}$	7.00
$e_{81}$	37.95	$e_{123}$	6.94	$e_{269}$	1.56	$e_{314}$	12.50	$e_{353}$	21.93	$e_{409}$	6.30
$e_{83}$	71.13	$e_{128}$	28.19	$e_{270}$	13.58	$e_{316}$	12.04	$e_{354}$	3.18	$e_{410}$	9.00
$e_{84}$	54.25	$e_{131}$	36.17	$e_{272}$	28.71	$e_{317}$	32.48	$e_{356}$	18.74	$e_{414}$	76.77
$e_{85}$	0.70	$e_{133}$	37.92	$e_{273}$	36.33	$e_{318}$	36.02	$e_{359}$	15.40	$e_{415}$	165.22
$e_{86}$	53.55	$e_{134}$	5.77	$e_{274}$	38.05	$e_{319}$	48.06	$e_{360}$	46.76		

以大气风流瞬态流动特征为始节点值,分段递推完成风流瞬态流动特征模型解算。

### 3.3 时间序列下动态风网解算模型求解

基于有限体积法完成时空维度离散,设置最大迭代次数为500,收敛精度 $\gamma=0.001$ ,实时解算矿井全局风网运行状态,在时间序列的极值边界点0、5、16、23 h对数据进行取样,得到时间序列下风网解算结果列见表3。为进一步直观展现风网在不同时空维度上

的风量变化情况,将各时间步求解状态值整合形成连续时间序列,因全矿井存在分支风量差值过大情况,选择特征等效分支为元素,绘制时间序列下特征等效分支风量波动示意图和更能体现出风量瞬态波动情况的波动因子运动轨迹如图4所示。

以利用实测数据进行初始风网静态解算结果为基准,与时间序列下波动全局风网动态解算结果对比,静态解算结果落在模型计算出的波动范围内,且符合

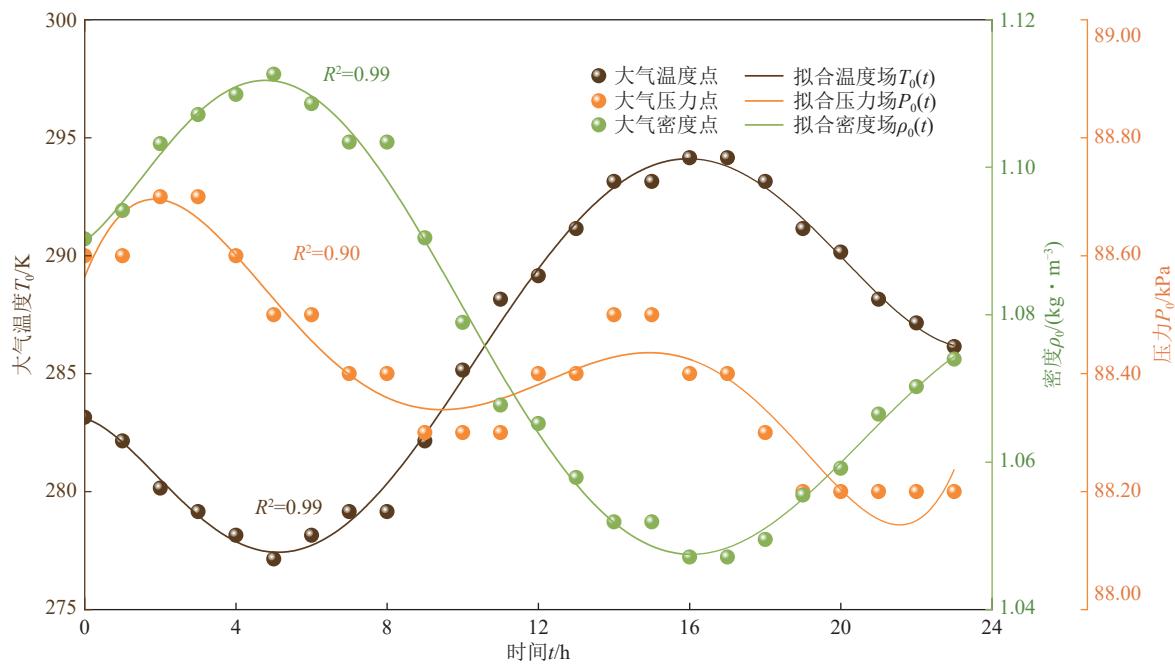


图3 矿外节点风流流动特征  
Fig.3 Flow characteristics of air at external node of the mine

表2 特征等效分支热流耦合性质

Table 2 Heat-flow coupling properties of characteristic equivalent branches

分支		区段划分		热物性参数	
编号	属性	地质层位	高差/m	不稳定换热系数 $K_i$ / $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	原岩温度 $T_i$ / K
$e_{44}$	副斜井	灰白砂岩	12.09	0.980	291.92
		4-1顶板	1.82	0.980	291.98
		4-1煤层	0.99	0.180	292.01
$e_{79}$	回风斜井	灰白砂岩	10.04	0.990	291.47
		3-2底板	1.32	0.990	291.43
		3-2煤层	1.55	0.189	291.38
		3-2顶板	1.38	0.990	291.34
$e_{104}$	主斜进风等效分支	中粗粒砂岩	13.71	0.990	290.91
		4-1煤层	57.30	0.190	292.20
		4-1顶板	9.80	1.000	292.11
$e_{119}$	副斜进风等效分支	4-1顶板	9.00	1.000	292.11
$e_{120}$	I01区用回风等效分支	4-1顶板	5.05	0.100	292.05
$e_{149}$	主斜井	4-1顶板	1.82	0.100	292.11
		4-1煤层	2.99	0.180	292.20
		4-1底板	1.67	0.100	292.25
$e_{272}$	I02区用回风等效分支	灰白砂岩	3.18	0.100	292.35
		4-2顶板	-7.70	1.040	292.65
		4-2顶板	0.15	0.990	292.64
$e_{412}$	回风立井	4-2顶板	1.55	0.990	292.65

计算波动幅度趋势。即在稳态条件下的动态模型与静态模型的解算结果保持一致,验证了模型生产可行性。

在实际矿井生产过程中,在非稳态环境场和梯度流动场作用下,井下全局分支风流状态满足瞬态流动

表3 时间序列下全局风网解算结果

Table 3 Global ventilation network calculation results under time series

分支	风量 $q_j/(m^3 \cdot s^{-1})$				分支	风量 $q_j/(m^3 \cdot s^{-1})$			
	0 h	5 h	16 h	23 h		0 h	5 h	16 h	23 h
$e_1$	172.00	170.79	175.67	172.80	$e_{274}$	38.45	38.10	39.48	38.71
$e_{16}$	189.04	187.77	192.95	189.87	$e_{275}$	1.72	1.73	1.70	1.72
$e_{17}$	17.04	16.97	17.29	17.07	$e_{276}$	28.28	28.05	28.97	28.45
$e_{18}$	151.29	150.22	154.55	152.00	$e_{277}$	3.61	3.58	3.70	3.63
$e_{19}$	37.74	37.54	38.40	37.88	$e_{278}$	26.56	26.32	27.27	26.74
$e_{20}$	104.92	104.09	107.39	105.47	$e_{282}$	39.04	38.69	40.07	39.30
$e_{21}$	46.37	46.13	47.16	46.53	$e_{283}$	0.59	0.59	0.59	0.59
$e_{22}$	42.43	41.92	43.86	42.77	$e_{284}$	25.97	25.74	26.68	26.15
$e_{23}$	62.49	62.18	63.54	62.70	$e_{285}$	1.13	1.12	1.16	1.14
$e_{29}$	7.58	7.64	7.50	7.57	$e_{286}$	4.67	4.62	4.79	4.70
$e_{30}$	50.01	49.56	51.35	50.34	$e_{287}$	20.17	19.99	20.73	20.31
$e_{31}$	49.15	48.70	50.48	49.48	$e_{288}$	24.80	24.58	25.47	24.97
$e_{32}$	0.86	0.85	0.87	0.86	$e_{294}$	15.30	15.16	15.71	15.40
$e_{33}$	48.08	47.64	49.39	48.40	$e_{295}$	32.74	32.39	33.77	33.00
$e_{35}$	49.02	48.57	50.35	49.35	$e_{296}$	9.00	8.86	9.41	9.10
$e_{36}$	0.94	0.94	0.96	0.95	$e_{297}$	28.40	28.16	29.16	28.60
$e_{42}$	47.42	46.98	48.70	47.73	$e_{300}$	20.20	20.02	20.74	20.34
$e_{43}$	1.60	1.59	1.65	1.62	$e_{303}$	13.20	13.02	13.74	13.34
$e_{45}$	40.92	40.52	42.09	41.22	$e_{305}$	14.20	13.96	14.96	14.40
$e_{56}$	6.50	6.46	6.61	6.51	$e_{306}$	4.63	4.59	4.74	4.66
$e_{75}$	2.36	2.34	2.40	2.36	$e_{307}$	6.00	5.82	6.54	6.14
$e_{76}$	9.91	9.86	10.08	9.93	$e_{308}$	3.57	3.54	3.67	3.60
$e_{77}$	12.27	12.20	12.47	12.30	$e_{310}$	2.22	2.22	2.22	2.22
$e_{78}$	15.60	15.52	15.86	15.64	$e_{311}$	4.18	4.18	4.18	4.18
$e_{80}$	36.74	36.54	37.35	36.83	$e_{312}$	5.92	5.92	5.92	5.92
$e_{81}$	38.11	37.91	38.75	38.20	$e_{313}$	4.36	4.36	4.36	4.36
$e_{83}$	71.73	71.38	72.95	71.99	$e_{314}$	12.50	12.50	12.50	12.50
$e_{84}$	54.69	54.41	55.67	54.91	$e_{316}$	12.30	12.08	12.97	12.47
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
$e_{272}$	29.02	28.76	29.80	29.22	$e_{414}$	77.60	76.91	79.69	78.13
$e_{273}$	36.73	36.37	37.78	36.99	$e_{415}$	166.12	165.26	168.93	166.66

特征规律,矿井风量将产生连续状态下的多尺度波动。若仅将多尺度波动的风量视作静态常数进行风网解算建模,无法精准映射风网运行状态,只能表征某一稳态时刻的风网状态。引入时空特征修正指标后,利用风网动态解算模型可完成时空特征下的矿井通风网络全局动态解算,映射出通风系统运行的瞬态非线

性本质,实现实时动态重构矿井通风系统状态。

结合时空特性下的风流的热流耦合效应构建的时间序列下的波动风网动态解算模型,将时空特征作为变量来处理,准确地体现了网风量不同时空条件下的分布和流动特性,实现了对矿井风网运行状态的精确映射。

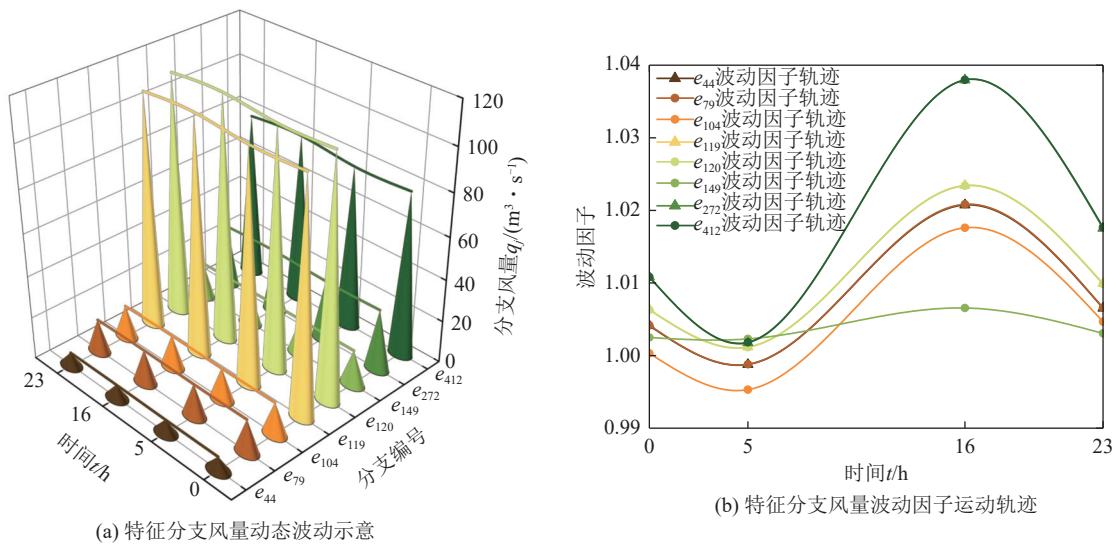


图4 特征等效分支风量连续波动示意

Fig.4 Continuous fluctuation of air volume of characteristic equivalent branches

## 4 结 论

1) 为实时定量映射风网状态,构建了风流瞬态流动特征模型以反映非定常风流热流动的时空演化状态特征描述。定义风量波动因子表示波动风量的瞬态位置,构建了连续空间特征下波动风网解算模型,将风流瞬态流动函数作为波动传递变量代入波动风网解算模型中,形成了时间序列下波动风网动态解算模型。

2) 利用模型进行生产矿井波动风网动态解算模型实现了将稳态风量固定值拓展为时间序列下风量波动区间,实时反映了在风流热流耦合作用下的生产矿井通风系统运行特征。

3) 时间序列下矿井热流耦合波动风网动态解算实现了风网状态精准定量映射,为后续智能调控决策提供数据支持,避免因多尺度风量波动识别异常引发风网故障误调。

## 参考文献(References):

- LIU H, MAO S J, LI M, et al. A GIS based unsteady network model and system applications for intelligent mine ventilation[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2020, 2020: 1041927.
- 鲍久圣, 张可琨, 王茂森, 等. 矿山数字孪生 MiDT: 模型架构、关键技术及研究展望[J]. 绿色矿山, 2023, 1(1): 166–177.
- BAO Jiusheng, ZHANG Kekun, WANG Maosen, et al. Mine Digital Twin: Model architecture, key technologies and research prospects[J]. *Journal of Green Mine*, 2023, 1(1): 166–177.
- JIA P, JIA J Z, SONG L, et al. Theory of RPOD adjustment of air volume for mine intelligent ventilation[J]. *International Journal of Ventilation*, 2022, 21(4): 316–329.
- 张浪, 刘彦青. 矿井智能通风与关键技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(1): 178–195.
- ZHANG Lang, LIU Yanqing. Research on technology of key steps of intelligent ventilation in mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(1): 178–195.
- HUANG X, LIU Y L. Research and design of intelligent mine ventilation construction architecture[J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2022, 17: 1232–1238.
- 周福宝, 辛海会, 魏连江, 等. 矿井智能通风理论与技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 313–328.
- ZHOU Fubao, XIN Haihui, WEI Lianjiang, et al. Research progress of mine intelligent ventilation theory and technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 313–328.
- 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.
- 张智韬, 李雨成, 李俊桥, 等. 智能通风精准调控系统架构及实现[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1596–1605.
- ZHANG Zhitao, LI Yucheng, LI Junqiao, et al. Architecture and implementation of intelligent ventilation precise control system[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(4): 1596–1605.
- 刘剑. 矿井智能通风关键科学技术问题综述[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 108–111, 117.
- LIU Jian. Overview on key scientific and technical issues of mine intelligent ventilation[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(10): 108–111, 117.
- LI J Q, LI Y C, ZHANG J, et al. Accurate and real-time network calculation for mine ventilation without wind resistance measurement[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2022, 230: 105183.
- WANG K, ZHOU A T, LI S. Computer simulation of dynamic influence of outburst gas flow on mine ventilation network[J]. *Disaster Advances*, 2013, 6(9): 31–38.

- [12] LEVIN L Y, SEMIN M A. Influence of shock losses on air distribution in underground mines[J]. *Journal of Mining Science*, 2019, 55(2): 287–296.
- [13] 杨胜强. 高温、高湿矿井中风流热力动力变化规律及热阻力的研究[J]. 煤炭学报, 1997, 22(6): 69–73.  
YANG Shengqiang. Study on change law of thermal dynamic of air flow and thermal resistance in high temperature and high humidity mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 1997, 22(6): 69–73.
- [14] 马恒, 尹彬, 刘剑. 矿井风流温度预测分析研究[J]. *中国安全科学学报*, 2010, 20(11): 91–95.  
MA Heng, YIN Bin, LIU Jian. Research on prediction of airflow temperature in mine[J]. *China Safety Science Journal*, 2010, 20(11): 91–95.
- [15] 马恒, 张跃, 周西华. 含自然风压通风网络的自动解算及应用[J]. *金属矿山*, 2016(1): 157–161.  
MA Heng, ZHANG Yue, ZHOU Xihua. Automatic calculation and application of ventilation network with natural wind pressure[J]. *Metal Mine*, 2016(1): 157–161.
- [16] 马恒, 高巍, 周西华. 矿井气候多参数预测与通风网络自动解算算法研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2017, 13(11): 110–116.  
MA Heng, GAO Wei, ZHOU Xihua. Study on multi-parameter prediction of mine climate and automatic solution algorithm of ventilation network[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2017, 13(11): 110–116.
- [17] DZIURZYŃSKI W, KRACH A, PAŁKA T. Airflow sensitivity assessment based on underground mine ventilation systems modeling [J]. *Energies*, 2017, 10(10): 1451.
- [18] 陈开岩, 周福宝, 夏同强, 等. 基于空气状态参数与风量耦合迭代的风网解算方法[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(4): 613–623.  
CHEN Kaiyan, ZHOU Fubao, XIA Tongqiang, et al. Ventilation network solution method based on coupling iteration of air state parameters and air quantity[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(4): 613–623.
- [19] 王德明. 矿井通风与安全[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [20] PRANDTL L, OSWATITSCH K, WIEGHARDT K. *Führer durch die Strömungslehre*[M]. Berlin: Springer Vieweg, 1981: 312–360.
- [21] 赵丹. 矿井降温与空气调节[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2018.
- [22] 陈开岩. 通风网络分析[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2018.
- [23] 邢玉忠, 陈开岩. 矿井通风网络解算[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2015.
- [24] 高巍. 含自然风压通风网络自动解算算法研究及实现[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2018.  
GAO Wei. Research and realization of algorithm of ventilation network automatic calculation with natural ventilation pressure[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2018.