矿井百叶式风窗智能调控方法及应用研究

王　凯[1,2,3,4],卢　锋[1,2,3,4],陈瑞鼎[1,2,3,4],师嘉毅[1,2,3,4],陈　猛[1,2,3,4],马　砺[5],张嘉勇[6],
郝海清[7],李雨成[7]

(1. 中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室,江苏 徐州　221116;2. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室,江苏 徐州　221116;3. 江苏省概念验证中心(中国矿业大学),江苏 徐州　221116;4. 中国矿业大学 煤矿瓦斯治理国家工程研究中心,江苏 徐州　221116;5. 西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安　710054;6. 华北理工大学 应急管理与安全工程学院,河北 唐山　063210;7. 太原理工大学 安全与应急管理工程学院,山西 太原　030024)

摘要: 为了解决矿井下用风地点风量调控繁琐、调节不及时和调节精度低等问题,探究通风网络中按需供风的智能矿井百叶式风窗调控方法,构建自动风窗调控系统,开展试验研究,数据经卡尔曼滤波处理,建立系统数学模型与模型辨识,设计契合风窗特点的风窗自动调节改进PID控制器,对比PID控制、模糊PID控制与分段PID控制的风窗调节效果,开发了具有需风量预测和分支优选功能调节风窗远程监控的软件模块,并将改进PID的矿井百叶式风窗调控系统结合通风网络实时解算平台进行运用. 结果表明:确定了百叶式风窗开度[0,35)为高灵敏区,[35,60)为中灵敏区,[60,90]为低灵敏区,利用系统辨识获取风窗自动控制调风时的数学模型,得到了自动风窗调控系统的传递函数模型;提出了模糊PID和分段PID控制算法,对比PID、模糊PID、分段PID算法风窗调控能力,超调量分别为10.12%,13.36%,7.44%,调节时间分别为56.69,38.17,53.19 s,分段PID算法超调量更小,可以达到风量稳定控制的要求;结合改进PID的矿井百叶式风窗调控系统和通风网络实时解算平台,在23204回采工作面运用中风窗开度由40°调至45°,工作面增加了4.354 m^3/s 风量,实现了对工作面及其相关分支的风量控制.

关键词: 自动风窗;卡尔曼滤波;PID控制器;分段PID;通风网络
中图分类号: TD 724　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)02-0391-15

Research on intelligent control method and application of mine louver

WANG Kai[1,2,3,4], LU Feng[1,2,3,4], CHEN Ruiding[1,2,3,4], SHI Jiayi[1,2,3,4], CHEN Meng[1,2,3,4], MA Li[5], ZHANG Jiayong[6], HAO Haiqing[7], LI Yucheng[7]

(1. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. Jiangsu Province Concept Verification Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116 China; 4. National Engineering Research Center for Coal Gas Control, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 5. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 6. School of Emergency Management and Safety Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan,

收稿日期: 2025-10-05　　**修回日期:** 2025-12-28　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250416
基金项目: 国家自然科学基金项目(52374242);国家重点研发计划项目(2022YFC3004800)
第一作者: 王　凯(1985年—),男,山东省聊城市人,教授,博士生导师. E-mail: wangkai850321@163.com
通信作者: 卢　锋(1998年—),男,云南省文山市人,博士研究生. E-mail: db24120054p41mz@cumt.edu.cn
引用格式: 王　凯,卢　锋,陈瑞鼎,等.矿井百叶式风窗智能调控方法及应用研究[J].中国矿业大学学报,2026,55(2):391-405.
WANG Kai, LU Feng, CHEN Ruiding, et al. Research on intelligent control method and application of mine louver[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(2): 391-405.

Hebei 063210, China; 7. School of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: In order to address the challenges posed by the unwieldy regulation of air volume, the untimeliness of regulation, and the deficiency in regulation accuracy in the wind location beneath the mine, this study proposes an intelligent mine louver regulation and control method within the ventilation network for on-demand wind supply. The proposed method involves the construction of an automatic louver regulation and control system, the execution of experimental research, the processing of data through Kalman filtering, the establishment of a system mathematical model, and the development of a model. The subsequent step involves identifying, designing, and improving a PID controller for the automatic regulation of the louver, considering its characteristics. The regulation effects of PID control, fuzzy PID control, and segmented PID control are then compared. The next stage involves developing a remote monitoring software module for louver regulation, which is equipped with wind demand prediction and branch prioritization functions. Finally, the improved PID-based remote monitoring software module for louver regulation is applied in practice. PID control, fuzzy PID control and segmented PID control of the regulation of the louver, the development of air demand prediction and branch preference function of the regulation of the remote monitoring software module of the louver, and improve the PID of the mine louver regulation and control system combined with the ventilation network real-time solving platform for use. The results show that: This paper has determined that the opening degree of the louver [0, 35) is the high-sensitivity zone, [35, 60) is the medium-sensitivity zone, and [60, 90] is the low-sensitivity zone. The mathematical model of the louver automatic control and air regulation is obtained by system identification, and the transfer function model of the automatic louver control system is obtained. The fuzzy PID and segmented PID control algorithms are proposed. The control capabilities of the louver are compared among PID, fuzzy PID, and segmented PID algorithms. The overshoots are 10.12%, 13.36%, and 7.44% respectively, and the regulation times are 56.69, 38.17, and 53.19 s respectively. The segmented PID algorithm has a smaller overshoot and can meet the requirements of stable air volume control. Combined with the improved PID mine louver control system and the real-time ventilation network solution platform, the louver opening degree is adjusted from 40° to 45° in the 23204 mining face. The air volume of the working face increases by 4.354 m^3/s, and the air volume control of the working face and its related branches is achieved.

Key words: automatic louver; Kalman filter; PID controller; segmented PID; ventilation network

随着智能化矿山建设取得新的进展和突破[1-4],矿井通风系统也得到了全面提升[5-7]. 然而矿井通风系统的调控具有时变性、非线性和滞后性等特点,目前对通风网络的调控大部分仍停留在半人工阶段,无法满足动态按需供风以应对非常规气体不均衡涌出与采掘生产接续[8]. 此外,通风系统的局部风量、风阻自动调节也缺乏相关技术和理论支撑,由此导致通风系统供需失衡、局部失效、级联崩溃等灾害事故时有发生[9]. 因此,开展智能矿井通风局部调控技术研究以改进矿井通风供需匹配具有重要意义.

在矿井通风风量供需匹配和局部调控中,风窗的安装与调控是重要的措施. 众多学者对风窗开展了广泛的研究,文献[10]在搭建的矿井智能调风软硬件平台中开展了矿井通风正常运作时的风窗调控,以及灾变时期风窗调节的风烟流调控试验. 文献[11]介绍了其团队研究开发的风窗设计,并以图示例说明其原理、优势及部件情况. 文献[12]分析了风窗调节的智能决策与控制面临的自主调控与精确调控等问题及解决方向. 文献[13]对矿井的采煤、掘进以及全系统的风窗等调控设施进行了智能通风应用场景的方案实现架构分析. 文献[14-15]

建立分支风阻、风机变频及两者结合的自动化调节模型，基于元胞自动机调控风窗等设施实现调风，并设计了关于风门和风窗的灾变风烟流调控方式．文献[16]通过计算风窗和调节风门的风阻，为矿井通风网络的二次规划提供依据．文献[17]利用调节风窗设计矿井通风系统故障分支诊断影响试验，为通风系统的智能故障诊断提供支持．文献[18]为实现在通风中完全捕获灰尘，提出了在管道末端安装轴向百叶窗的方式．文献[19]通过远程监控传送通风及风机参数，计算实时风量，设理想风量阈值，超范围联动调整，依差值计算和调控风窗移动方向与距离，达到矿井通风管网防排烟流联动控制目的．文献[20]研究了不同通风条件下空间中氢气通过百叶风窗扩散的速率．文献[21]研究了双层幕墙利用百叶风窗通风的太阳辐射和自然通风耦合的通风性能．上述研究从多方面探讨风窗，涵盖矿井调风试验、设计原理、应用场景、自动化模型等，但对百叶式风窗智能精确调控方面研究还存在不足，且对百叶式风窗风量特性与智能精确调控机制关注较少．

对风窗进行智能精确调控，需要使用智能化控制器．目前，对于智能化控制器主要使用PID控制器，对PID控制器的研究已经日趋全面和系统．文献[22]基于改进的PID控制方法对采煤机器人位姿进行精细化智能控制，并取得良好成果．文献[23]提出一种无人驾驶测量的PID修正滑模控制的控制策略，通过对复杂路况的协同仿真和试验验证了该策略的有效性．文献[24]提出一套风机-风道PID设计方法控制通风系统的分层空气平衡，为避免机械误差还提出一种两步角度调整的动作方式，试验表明该方法实现了控制目标的能力，响应迅速准确，实现了可变风量控制．基于PID控制器进行智能化调控的研究被应用于多个领域，但是如何对矿井通风系统分支中风窗的PID智能调控实现井下通风动态供需匹配的技术还需进行研究．

鉴于此，笔者搭建了局部阻力自动调节装置及试验系统平台，能够实现局部阻力设施风阻、风量的快速自动调节，在PID控制的基础上，使用模糊PID、分段PID控制模型对自动风窗调控系统进行研究，并对控制器进行验证对比，获取最佳的PID调控模型，搭建了自动风窗调控试验平台，并结合转龙湾煤矿井下百叶式风窗调节设施，进行了现场调风控制与应用．

1　自动风窗调控系统及数学模型建立

1.1　自动风窗调控试验平台构建

1.1.1　试验平台设备

本试验平台控制方法基于可编程逻辑控制器(PLC)控制技术，使用组态王开发上位机软件，实现监控功能，并编写控制程序实现控制．试验系统由风机、变频器、方形管道、自动风窗、整流器、温湿度传感器、压差变送器、热式气体质量流量计等组成．自动风窗调控试验平台可通过PLC实时采集在不同风机频率下管道内的温湿度、风窗两侧压差、气体流量参数，以及对风窗调节角度进行读取和控制．试验平台如图1所示．

本试验装置中可以直接通过调节风窗开度来改变风阻，自动风窗电路连接和调控平台系统框架如图2所示．平台搭载的上位机监控系统设计选用了组态王6.60软件，其功能包括显示风硐通风参数、风机运行状态及其频率控制、风洞流量监测实时曲线及历史记录、风窗两侧压差监测实时曲线及历史记录、风窗开启角度(开度)变化曲线、风窗当前开度显示及设定值、风量和压差设定值等信息；此外，还具备数据报表功能，方便用户查询并保存历史数据，如图3所示．同时，使用用于过程控制的对象链接与嵌入(OPC)数据传输标准，实现实时数据共享与分析．

1.1.2　风窗流量特性分析

风窗角度的变化一方面改变了通流截面的面积，另一方面造成流动方向的变化，引起流速分布的迅速改变，从而改变通过风窗的流量．

为了对关键用风地点进行精确风量调节，需要在其敏感巷道构筑通风设施．由于在风网解算软件中对风门、风窗等通风设施常采用等效风阻$R=H/Q^2$(H为通风分支局部阻力，Pa；Q为通风分支风量，m^3/s)作为分支的附加风阻进行等效计算，而且在使用通风网络解算系统进行通风风网优化、应急调风时，得出的方案中也是对分支的风阻进行调节，故本文风窗局部风阻以等效风阻R表示．

在局部阻力调节设施前后风流稳定处安装风压、风量传感器，其中设风流来向侧为测点i，去向侧为测点j，根据伯努利方程有

$$h_{i\text{-}j}=(p_i-p_j)+(z_i-z_j)\rho_{ij}g+\frac{1}{2}(\rho_i v_i^2-\rho_j v_j^2),\tag{1}$$

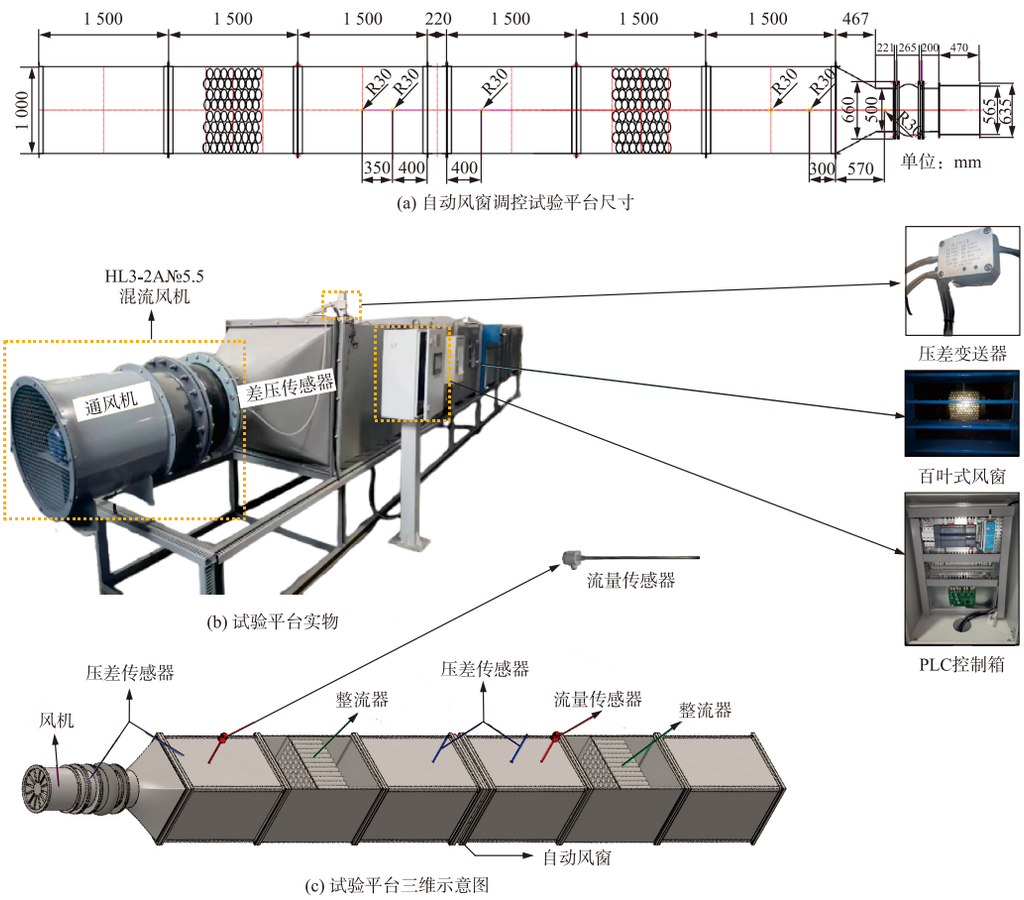
式中：$h_{i\text{-}j}$为两测点间的通风阻力，Pa；p_i，p_j分别为

两测点的静压测量值，Pa；z_i，z_j为两测点的标高，m；ρ_i，ρ_j为两测点的湿空气密度，kg/m^3；ρ_{ij}为两测点井巷间的空气密度均值，kg/m^3；v_i，v_j为两测点的风流速度，m/s.

利用试验平台开展风窗不同开度风量测试试验，保持平台风机频率为35 Hz，风窗开度增加5°依次调节，可直接得到风窗两侧压差与流过风窗风量. 可由压差求断面风速：

$$v=\sqrt{\frac{2H}{\xi\rho}}, \tag{2}$$

式中：ξ为局部通风阻力系数，试验平台有针对风流的整流器，故取值为0.3；ρ为空气密度，取值为1.2 kg/m^3，可由风量/风速(Q/v)求过风面积. 得到风窗开度与多参数的关系，如图4所示.



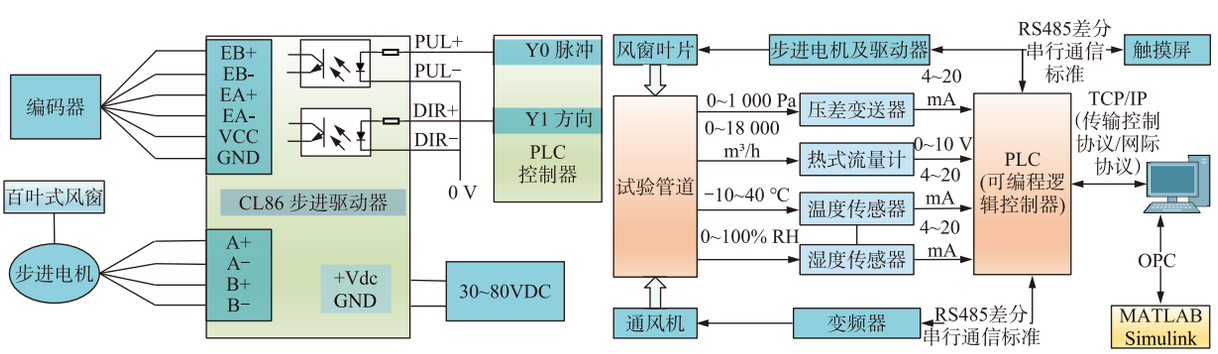
(a) 自动风窗调控试验平台尺寸

(b) 试验平台实物

(c) 试验平台三维示意图

图1 试验平台

Fig. 1 Experimental platform



(a) 自动风窗电路连接

(b) 自动风窗调控平台系统

注：EB+，EB−为B相编码器差分信号(+为正信号，−为负信号)；EA+，EA−为A相编码器差分信号(+为正信号，−为负信号)；VCC为编码器供电正电压；GND为供电接地；PUL+，PUL−为脉冲信号(+为正信号，−为负信号)；DIR+，DIR−为方向信号(+为正信号，−为负信号)；+Vdc为直流电源正极；VDC为直流电源.

图2 自动风窗电路连接和调控系统框架

Fig. 2 Automatic louver circuit connection and control system framework

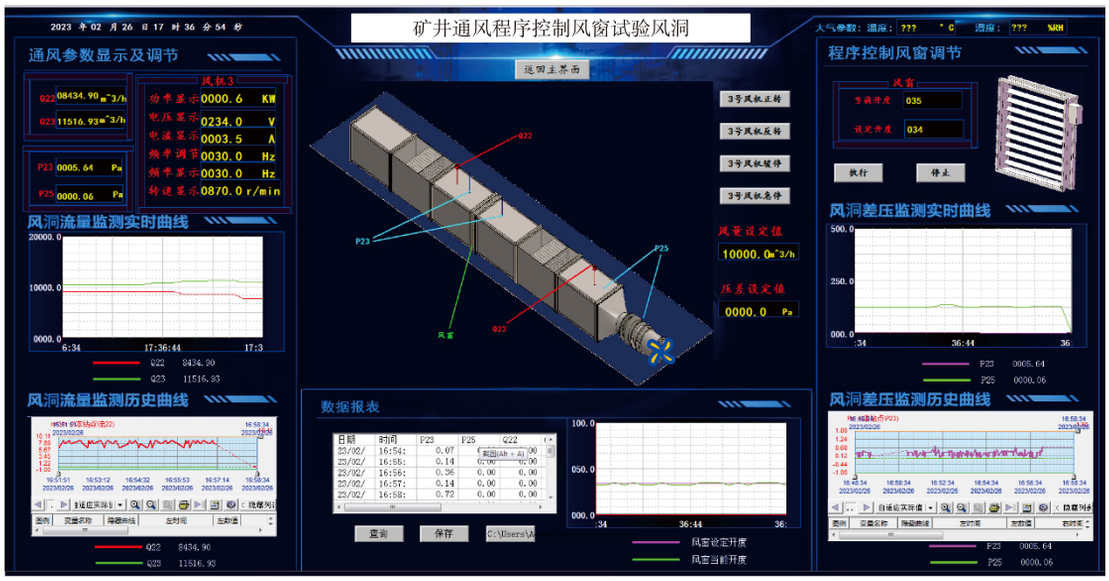


图 3　矿井通风程序控制风窗试验平台

Fig. 3　The experimental platform serves to control the ventilation programme for louver

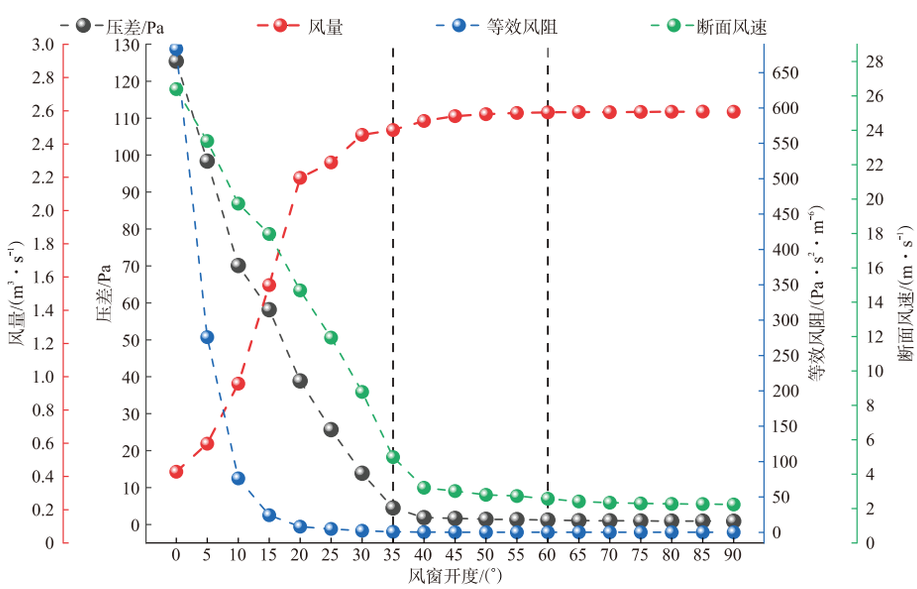


图 4　风窗开度与多参数关系

Fig. 4　The relationship between the windscreen opening degree and multiple parameters

同时进行风窗开环阶跃试验，保持平台风机频率为 35 Hz，使风窗开度从 0°逐渐增加到 90°，得到风窗开度与风量关系如图 5 所示．由图可知随着开度的增加，风量增加逐渐变缓．

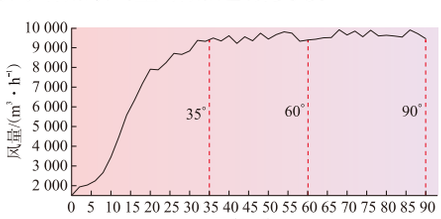


图 5　风窗开度与风量关系

Fig. 5　The relationship between the wind window opening and the wind volume

根据图 4 和图 5 可知，风窗开度在 0°～35°之间时，等效风阻变小迅速，巷道风量增加迅速，风窗开度在 35°～60°之间时，等效风阻变小较为缓慢，巷道风量增加较为缓慢，风窗开度在 60°～90°之间时，等效风阻变小和风量增加都很缓慢．故在关键用风地点的敏感可调巷道中可将风窗调节角度灵敏度范围进行以下划分：[0,35)为高灵敏区，[35,60)为中灵敏区，[60,90]为低灵敏区，为关键用风地点的精确风量调节提供支持．

1.1.3　监测数据实时滤波处理

PLC 对风窗的自动调控的数据处理分析能力较弱，利用复杂运算能力出众的 MATLAB 和 PLC

相结合实现监测和自动化控制，实时状态用组态王进行画面监控，并通过 OPC 进行实时数据交换.

在自动风窗调控试验平台调试的过程中，风速、风压的实时数据由于传感器的测量误差、风机波动、空气扰动等影响，监测到的风速数据有较大的波动，会使风窗在调控过程中反馈的风速不断振荡，降低了控制的稳定性，为了减少测量噪声对风速控制的影响，采用卡尔曼滤波技术对风速数据进行实时处理，去除噪声的影响，提高监测数据的准确度[25].

平台中获取的实时风速为离散的时间数据，卡尔曼滤波方法可以很好模拟该类型数据，卡尔曼滤波原理方程式表述如下：

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}(n+1)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(n)+\boldsymbol{D}_1(n), \\ \boldsymbol{y}(n)=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(n)+\boldsymbol{D}_2(n), \end{cases} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{x}(n+1)$为 $n+1$ 时刻的系统状态向量；$\boldsymbol{x}(n)$为系统瞬时状态向量；$\boldsymbol{A}$ 为状态转换矩阵，初值为同构单位阵 $\boldsymbol{E}$；$\boldsymbol{C}$为测量系统参数矩阵；$y(n)$为 n 时刻的预测值；$\boldsymbol{D}_1(n)$为系统噪声矩阵；$\boldsymbol{D}_2(n)$为测量噪声矩阵.

卡尔曼滤波可根据先前系统状态观测值推测当前系统状态估计值. 设定当前系统状态为 n，卡尔曼滤波流程如下：

首先，以 $n-1$ 时刻测得管道通风速率为依据，推算出当前时点的通风预估值，其计算方式为

$$v(n,n-1)=\boldsymbol{A}v(n-1,n-1), \tag{4}$$

式中：$v(n,n-1)$为预测的当前状态管道风速值；$v(n-1,n-1)$为 $n-1$ 时刻的管道风速值.

随后，运用之前某一时刻的风速协方差，推算当前时刻的相应预测协方差，即

$$P(n,n-1)=\boldsymbol{A}P(n-1,n-1)\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}+B_1(n), \tag{5}$$

式中：$P(n,n-1)$为 $v(n,n-1)$对应的协方差；$P(n-1,n-1)$为 $v(n-1,n-1)$对应的协方差；B_1为系统噪声对应的协方差.

通过当前时刻的协方差计算当前时刻的卡尔曼增益为

$$G(n)=\frac{P(n,n-1)\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}}{\boldsymbol{C}P(n,n-1)\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}+B_2(n)}, \tag{6}$$

式中 B_2为测量噪声对应的协方差.

根据卡尔曼增益计算出管内风速在当前时刻的卡尔曼滤波风速值，即经过滤波处理的管道内实时风速：

$$v(n,n)=v(n,n-1)+G(n)-[F(n)-\boldsymbol{C}v(n,n-1)], \tag{7}$$

式中：$v(n,n)$为处理后的风速，记为 v_g；$F(n)$为输入风速值. 获取风速卡尔曼滤波值后，要继续更新当前状态下 $v(n,n)$的协方差 $P(n,n)$，使滤波持续进行，表达式为

$$P(n,n)=[1-G(n)\boldsymbol{C}]-P(n,n-1). \tag{8}$$

在达到 $n+1$ 状态后，提交当时管道风速卡尔曼滤波值参考及其相关联的协方差进行运算. 并以之为基础，进行反复迭代计算，得到管道风速卡尔曼滤波值. 利用卡尔曼滤波技术，不仅能有效防止气体流动特性引发的测量误差，同时还能降低系统及测量噪声对结果的干扰，使得处理后的风速序列更为贴近真实情况下的风速序列，从而实现更优秀且稳定的控制效果，如图 6 所示.

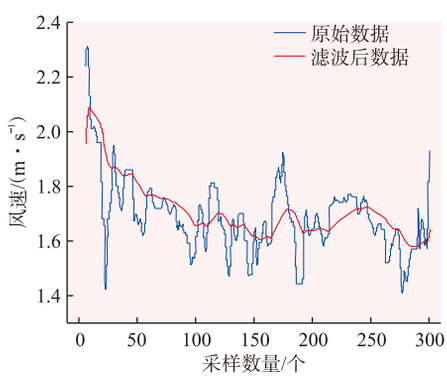


图 6 滤波图像

Fig. 6 Filtered image

1.2 自动风窗调控系统数学模型建立与辨识

在自动风窗调控系统构建完毕之后，需要运用系统辨识法得到数学模型以实现控制算法的仿真模拟. 该方法主要涉及三方面：先收集试验所得的系统输入输出作为原始数据，然后选择拟合效果最佳的系统结构模型，最后运用参数计算算法确定系统模型中的未知参数.

鉴于自动风窗的运作机制及其复杂的构成，仅靠机理特性构建模型可能遭遇困难. 基于流体力学理论及井下实测，通常将整个系统模型简化成二阶惯性加纯滞后环节来描述. 借助 MATLAB 辨识工具箱(System Identification Toolbox)，能对风窗调风控制系统进行模型辨识.

为了获得风窗调风控制系统的辨识数据，需利用自动风窗调控试验平台进行开环阶跃试验. 先建 MATLAB-Simulink 与组态王通信，调风窗开度，用组态王采存数据，共采集样本 5 880 个，妥善保存待分析.

风窗调风控制的输入和输出数据被传输至MATLAB进行处理，并导入系统辨识工具箱.

在构建传递函数模型时经过对风窗调风系统特性的深入分析以及多次模拟测试，发现二阶模型能够较好地反映该系统的动态特性，平衡模型的复杂度与对实际系统的拟合程度，故将其极数设定为2，基于系统的物理特性，风窗调风过程中特定的气流作用机制发现零点取1时能使模型更贴合实际运行情况. 经数据处理与参数优化后，辨识工具箱所输出的风窗控制系统模型与实际数据对比，辨识结果匹配度达82.53%. 该匹配度通过严格的误差分析方法得出，将模型输出数据与实际采集数据逐点对比，计算均方根误差等指标，综合评估得出此匹配度数值，表明该模型可以有效地模拟实际系统. 将2个高精度风速仪分别安装于传感器旁与风窗口处，同步采集阶跃风速响应数据，测算得传感器平均滞后时间仅28 ms，仅占系统响应时间(1.2～1.5 s)的1.9%～2.3%，滞后效应在可接受范围内，故模型中可忽略，故而可得出最终传递函数：

$$G(s)=(7.174s+0.000\,038\,17)/(s^2+0.007\,983s+0.000\,027\,27), \tag{9}$$

式中　s为拉普拉斯算子.

2　风窗自动调节改进PID控制器设计

在远距离的自动风窗调整风力控制系统中，井巷拓建及控制点的变更导致了多种不确定因素和复杂的非线性特性. 传统的PID控制已不能完全满足需求，为了提升风窗调风的精准性与性能，提出采用模糊PID及分段PID控制策略，依据风窗开度与风量误差大小，在不同阶段配置相应的PID参数，以提高调整速度，降低过冲. 通过MATLAB-Simulink软件及试验平台，对PID、模糊PID和分段PID这3种控制方式进行模拟仿真分析及试验验证，评估控制效果的优劣.

2.1　风窗自动调节的模糊PID与分段PID控制设计

2.1.1　模糊PID控制器设计

依据模糊PID控制器架构，明确输入与输出变量[26-27]. 在自动风窗控制功能内，其可通过调节风窗叶片角度，从而实现对目标位置风量或两侧压差的精准掌控. 以调控风量为例，模糊控制器的输入为目标地点风量偏差V_e及偏差变化率V_{ec}；而在压差调控方面，则需关注压差偏差P_e与偏差变化率P_{ec}. 在整个调整过程中，模糊控制器的输出变量即为PID控制参数，分别为比例系数ΔK_P、积分系数ΔK_I、微分系数ΔK_D.

模糊控制器的性能会受论域、隶属度、量化因子和比例因子等因素影响，故确定控制器的输入输出后，需设定各个变量的论域、隶属度、量化因子以及比例因子. 以自动风窗调控试验平台风机运行频率为35 Hz时为例，管道内风量变化范围为2 000～10 000 m^3/s，风量偏差V_e和偏差变化率V_{ec}的基本论域均为[－8 000，8 000]，模糊论域则为[－9，9]，量化因子皆为1.125×10^{-3}. 控制器的3个输出变量的模糊论域均定为[－6，6]，基本论域分别为$\Delta K_P\in[-10,10]$，$\Delta K_I\in[-3,3]$，$\Delta K_D\in[-5,5]$，其比例因子依次为1.67，0.50.0.83. 输入、输出变量的模糊子集均设为{NB，NM，NS，ZO，PS，PM，PB}；其中，NB，NM，NS，ZO，PS，PM，PB分别为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大. 三角形和梯形隶属函数是常见模糊建模隶属函数选择，三角形隶属函数不仅满足对均匀激发码本的要求，还满足为输出接口制定的零误差重建标准，故输出变量的隶属度函数均选用三角形隶属函数[28].

依照风窗调控功能，目标地点风量值或风窗两侧压差值皆在调控范围内. 依据自动风窗调控经验以及风速偏差、偏差变化率与PID控制参数ΔK_P，ΔK_I，ΔK_D等因素，得出以下调整原则：控制误差过大，应首先减小误差；反之，控制误差过小应当减小超调，确保系统稳定运行.

1)若风量偏差和变化速率均呈负值且较大，则误差很可能继续快速扩大. 因此，需要通过模糊控制器的正大输出来加大调整力度，负大输出以避免超调，同时负小输出可以提升响应速度. 具体表述方法可用IF-THEN式：If V_e＝NB and V_{ec}＝NB，then ΔK_P＝PB，ΔK_I＝NB，ΔK_D＝NS；

2)如果风量偏差为负且较小，但变化速率升高至正大的情况下，意味着误差虽不严重，却存在超调并导致正向误差的风险. 在此情形下，可使用模糊控制器的负中输出来防止超调，再通过正小输出有效地减少误差，同时增加负小的输出以加速响应. 这一情况即：If V_e＝NB，and V_{ec}＝PB，then ΔK_P＝NM，ΔK_I＝NS，ΔK_D＝PS.

根据上述规律，设计L_{18}正交试验，采集多组

多工况(风机频率、风窗开度、设定风量、静压)数据,确定每组最优PID参数,挖掘关联规则,剔除冲突规则,新增高置信度规则,共得到49条针对每个输出变量的模糊规则.这些规则被整理成了3个表格,分别是表1、表2和表3.

表1 ΔK_p模糊控制规则表

Table 1 ΔK_p fuzzy control rule table

V_e \ V_{ec}	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	ZO	NS	NS
NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PS	PS	ZO	NS	NM
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PM	PM	ZO	NS	NS	NS	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NS	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NS	NM	NM	NB

表2 ΔK_I模糊控制规则表

Table 2 ΔK_I fuzzy control rule table

V_e \ V_{ec}	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NS	NS	ZO	ZO	PS	PM	PM
PM	NS	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB
PB	ZO	ZO	PS	PS	PM	PM	PB

表3 ΔK_D模糊控制规则表

Table 3 ΔK_D fuzzy control rule table

V_e \ V_{ec}	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	ZO	NS	NB	NB	NB	NM	NS
NM	PS	ZO	NS	NM	NB	NS	ZO
NS	PM	PS	NS	NS	NM	NM	NS
ZO	PS	PS	PS	ZO	NM	NS	NS
PS	PS	PS	PS	PS	ZO	PS	PS
PM	PS	PS	PS	PM	NS	ZO	PB
PB	PM	NS	ZO	PS	NS	ZO	PS

输出通过解模糊化过程,将控制规则得出的参数值转换至PID参数基础域内.解模糊化技术包含最大隶属度及重心2种方法.基于重心法在平滑精度上具备显著优势,本模糊控制器选择运用重心法开展解模糊化工作,具体表达式为

$$z_0 = df(z) = \frac{\int z\mu_N(z)\mathrm{d}z}{\int \mu_N(z)\mathrm{d}z}, \tag{10}$$

式中:z_0为解模糊化后的值;$df(z)$为解模糊化函数;z为输出变量的精确论域取值;$\mu_N(z)$为输出值的隶属度值.

2.1.2 分段PID控制器设计

鉴于百叶式风窗在不同调整区间内对应不同的阻力变化规律,基于风窗开度及其风量偏移程度,设定各阶段不同的PID调节参数.这一方式能提升在敏感区域中的调整准确性,降低超调量并增强稳定性;而在低灵敏区,可提高响应速率,消除超调现象.因此,应用分段PID控制策略是适宜的手段.

PID控制由试凑法确定ΔK_P为0.03,ΔK_I为1.3×10^{-3},ΔK_D为5×10^{-4}.分段PID控制使用不同的系统偏差V_e与风窗开度w作为调节输入变量.风窗最大有效开度为90°,此时过流面积最大,超过90°后过流面积会随开度增大而减小,故开度区间上限设定为90°.为更精准地调控,将风窗开度分别设为[0,10),[10,35),[35,60)和[60,90]4个区间.

1)风窗开度$w\in[0,10)$时,风量偏差$V_e\in[-8\,000,5\,000)$时,风窗调节开度处于高灵敏的范围,即微小变化带来明显风量变动.为保障稳定调节,必须减少系统调节幅度,降低超调风险.ΔK_P取负值可减少系统调节幅度,并且随着$|V_e|$值的减小$|\Delta K_P|$的值逐渐增大;ΔK_I取负值,随$|V_e|$值减小$|\Delta K_I|$增大;ΔK_I取负值以消除静态误差,同时降低超调量;ΔK_D取正值以增强抗干扰能力,随$|V_e|$值减小ΔK_D适度增大.

2)风窗开度$w\in[60,90]$时,风量偏差$V_e\in[-8\,000,5\,000)$时,风窗调节开度处于低灵敏的范围,即风窗开度变化对风量影响较小.为提升系统响应速度,需加大系统调节幅度,缩短调节时间.ΔK_P取正值增加系统调节幅度,并且随着$|V_e|$值的减小$|\Delta K_P|$的值逐渐减小;ΔK_I取正值,随$|V_e|$值减小$|\Delta K_I|$减小,防止产生较大的超调量;ΔK_D取负值,减少在此开度范围的调节时间,随$|V_e|$值减小ΔK_D适度减小.

根据上述规律,得到了表4~6中的ΔK_P,ΔK_I,ΔK_D参数分段表.这些表格根据系统风窗开度w和风量偏差V_e划分为多个区间,给出了相应的参数参考值.

表 4　$\triangle K_P$参数分段表

Table 4　$\triangle K_P$ parameter segmentation table

V_e /(m³·h⁻¹)	w			
	[0,10)	[10,35)	[35,60)	[60,90]
[−8 000,−5 000)	−9.72	−4.05	8.46	20.97
[−5 000,−3 000)	−10.53	−4.77	4.86	14.22
[−3 000,−1 500)	−11.34	−5.40	4.32	13.23
[−1 500,−500)	−12.15	−6.12	3.78	12.33
[−500,500)	−20.25	−12.87	3.24	11.34
[500,1 500)	−12.15	−6.12	3.78	12.33
[1 500,3 000)	−11.34	−5.40	4.32	13.23
[3 000,5 000)	−10.53	−4.77	4.86	14.22
[5 000,8 000]	−9.72	−4.05	8.46	20.97

表 5　$\triangle K_I$参数分段表

Table 5　$\triangle K_I$ parameter segmentation table

V_e /(m³·h⁻¹)	w			
	[0,10)	[10,35)	[35,60)	[60,90]
[−8 000,−5 000)	−0.56	−0.28	0.37	1.07
[−5 000,−3 000)	−0.61	−0.33	0.43	1.16
[−3 000,−1 500)	−0.65	−0.38	0.49	1.24
[−1 500,−500)	−0.70	−0.42	0.55	1.34
[−500,500)	−1.17	−0.89	1.16	2.22
[500,1 500)	−0.70	−0.42	0.55	1.34
[1 500,3 000)	−0.65	−0.38	0.49	1.24
[3 000,5 000)	−0.61	−0.33	0.43	1.16
[5 000,8 000]	−0.56	−0.28	0.37	1.07

表 6　$\triangle K_D$ 参数分段表

Table 6　$\triangle K_D$ parameter segmentation table

V_e /(m³·h⁻¹)	w			
	[0,10)	[10,35)	[35,60)	[60,90]
[−8 000,−5 000)	0.072	0.042	−0.078	−0.123
[−5 000,−3 000)	0.078	0.048	−0.087	−0.132
[−3 000,−1 500)	0.084	0.051	−0.093	−0.144
[−1 500,−500)	0.090	0.054	−0.099	−0.153
[-500,500)	0.150	0.090	−0.165	−0.255
[500,1 500)	0.090	0.054	−0.099	−0.153
[1 500,3 000)	0.084	0.051	−0.093	−0.144
[3 000,5 000)	0.078	0.048	−0.087	−0.132
[5 000,8 000]	0.072	0.042	−0.078	−0.123

2.2　MATLAB-Simulink的仿真研究及试验验证

针对算法有效性研究所采用的方法将基于系统等效模型，借助 Simulink 构建风窗风量控制系统的仿真模型．借助该模型，可以从仿真性能指标出发，对 3 种控制算法进行深入比对与评估．

2.2.1　仿真模型的搭建与分析

利用 MATLAB-Simulink 构建 PID 控制、模糊 PID 控制以及分段 PID 控制 3 种仿真模型，具体可见图 7.

此仿真研究了 3 种算法对风量变化的控制效果．通过设立 5 000 m³/h 的阶跃变化及 150 s 的阶跃持续时间，以及 1 s 的采样频率进行模拟，模拟性能指标结果见表 7.

表 7　不同控制方法的仿真性能指标对比

Table 7　Comparison of simulation performance metrics for different control methods

控制方法	超调量/%	上升时间/s	调节时间/s
PID	10.12	8.44	56.69
模糊 PID	增加 3.24	减少 0.83	减少 18.52
分段 PID	减少 2.68	减少 2.36	减少 3.50

由表 7 可知，在 PID 控制模式中，系统调整用时约 56.69 s，上升时间约 8.44 s，超调量达到了 10.12%，表现相对不佳．相较而言，模糊 PID 控制模式下，虽然上升时间减少了 0.83 s，提升了系统反应速度，但超调量却略微增加，存在一定程度的过冲现象．然而，采用分段 PID 控制后，系统超调量减少了 2.68%，调节时间减少了 3.50 s，超调量显著降低．尽管因算法复杂性增加，调整时间较模糊 PID 控制稍长，但仍优于传统 PID 控制，整体性能得到明显改善．

2.2.2　自动风窗调控试验验证及分析

利用自动风窗调控试验平台，对分段 PID 控制算法应用于风窗自动调节的控制效果进行研究．此平台利用 Simulink 软件构建分段 PID 控制程序，采用 OPC 通讯协议实现 Simulink 与组态王间的数据交互，以获取风量数据及计算出的风窗开度，并将其写入控制器进行闭环控制，同时记录并保存实时数据．在此过程中，分段 PID 控制器运用卡尔曼滤波器对实时风量数据进行处理，并与设定风量值进行对比．若风量差值低于 150 m³/h，则认为已满足风量调节需求，风窗开度不再调整，进入稳定状态，避免因微小波动引发高频震荡，形成改进 PID 的矿井百叶式风窗调控系统．连接 OPC 通讯模块的分段 PID 控制器结构详见图 8.

针对不同风量区间内采用分段 PID 控制器的细节特征，选用了以下试验参数设置：需求风量范围为 3 000—6 000—9 000—10 000—8 000—5 000—4 000 m³/h，设定每个阶段的阶跃信号持续时间为 300 s，采样频率为 1 Hz，总计采集 2 100 个数据

点,风机频率固定为 35 Hz. 得出的风窗风量控制阶跃响应曲线如图 9 所示.

由图 9 分析可知,多段风量调节中,分段 PID 控制器能准确跟踪设定风量,具备良好的动态适应能力及响应速度. 此外,考虑到风窗开度过高对流量提升有限,在静态区域调整风量需更快的响应速度. 采用基于开度反馈和偏差的动态 PID 参数调整方式,分段 PID 表现出更为优异的动态性能与控制质量,包括更少的超调、更快的响应以及更强的适应性,能够满足风量控制需求.

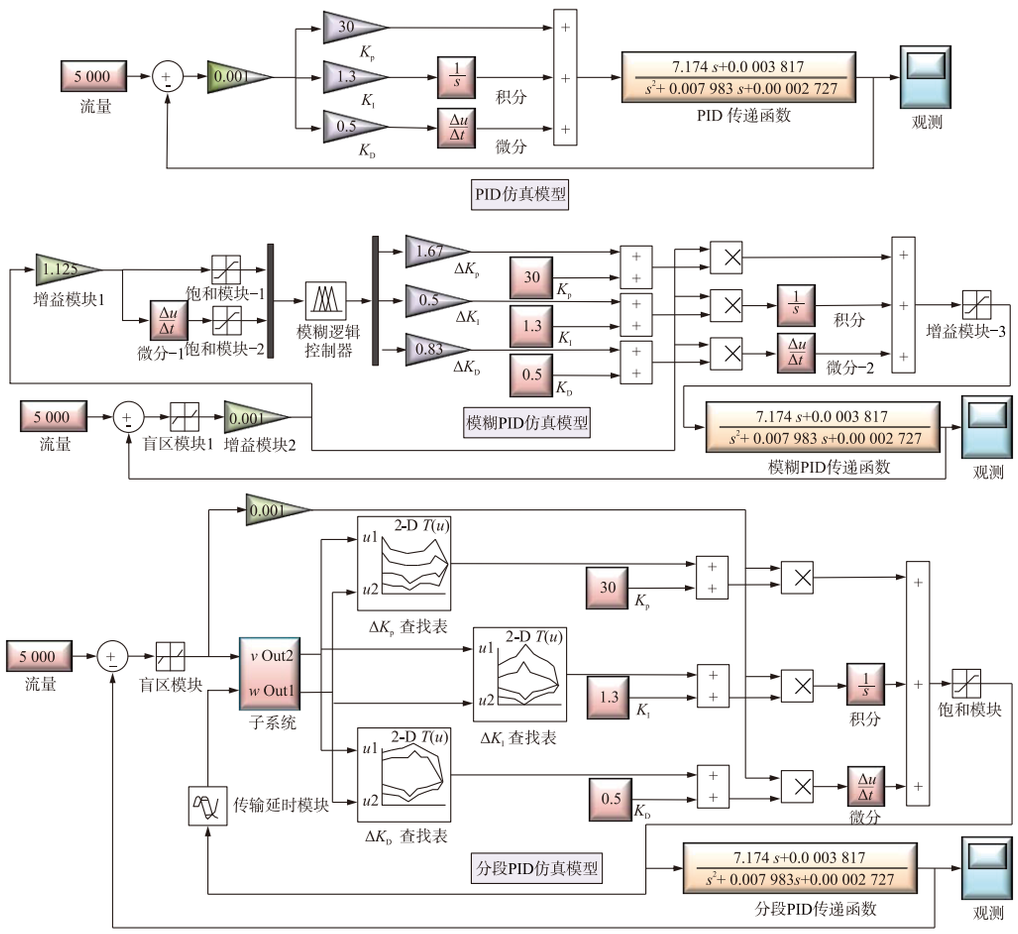


图 7 3 种 PID 仿真模型

Fig. 7 3 PID simulation models

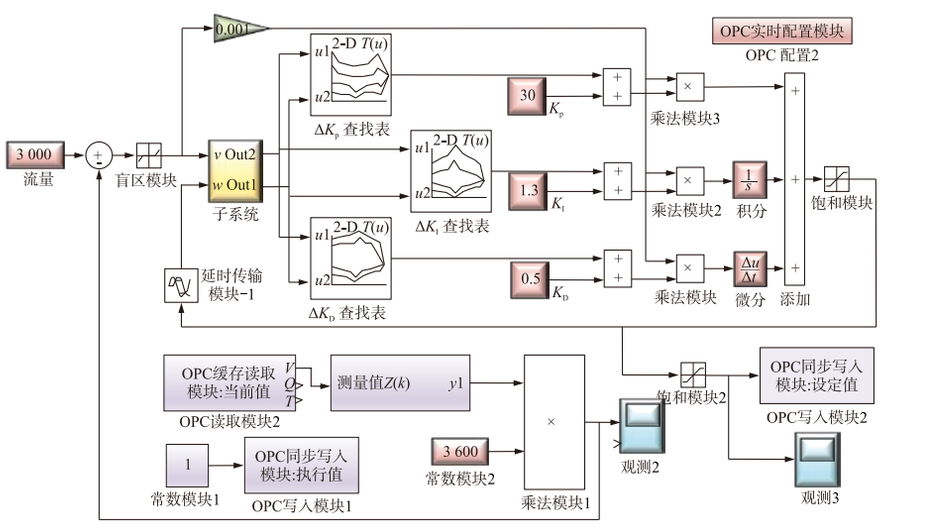


图 8 连接 OPC 通讯模块的分段 PID 控制器

Fig. 8 Segmented PID controllers connected to OPC communication modules

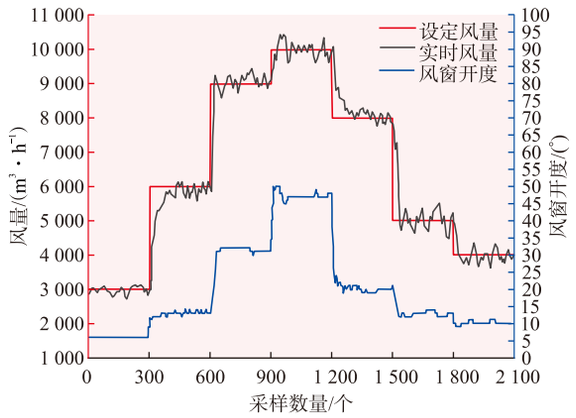


图 9　风窗风量控制试验阶跃响应曲线

Fig. 9　Experimental step response curve of louver volume control

3　基于风网解算平台的风窗调风应用

以转龙湾煤矿智能化通风系统实施项目为例，基于通风网络实时解算平台，实现改进 PID 的矿井百叶式风窗调控系统的现场测试与实际应用.

3.1　转龙湾矿井通风实时解算平台搭建

转龙湾煤矿现行的通风系统包括 821 条巷道和 591 个节点. 借助于该煤矿的智能化通防系统，对矿井通风系统进行了精确测量，部分原始数据参见表 8.

表 8　倾斜压差计读数记录

Table 8　Tilt differential pressure gauge reading record

序号	巷道名称	测点编号	压差计读数/Pa	长度/m	测段风量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	百米风阻/($N \cdot s^2 \cdot m^{-8}$)
1	主井	A1	37.0	100	67.56	0.008 11
2	副井	A2	23.6	100	271.85	0.000 32
3	23109 进风巷	B3	1.2	100	27.84	0.001 55
130	23109综采工作面	B10	7.6	100	25.20	0.011 97

通过风网实时解算及灾变智能决策平台应用程序建立全矿井通风三维仿真模型，仿真矿井通风系统现状. 结合矿井原有传感器，增设通风阻力在线监测与通风供需动态计算的相关设备，再通过动态监测数据进行实时自动解算，风网实时解算结果如图 10 所示.

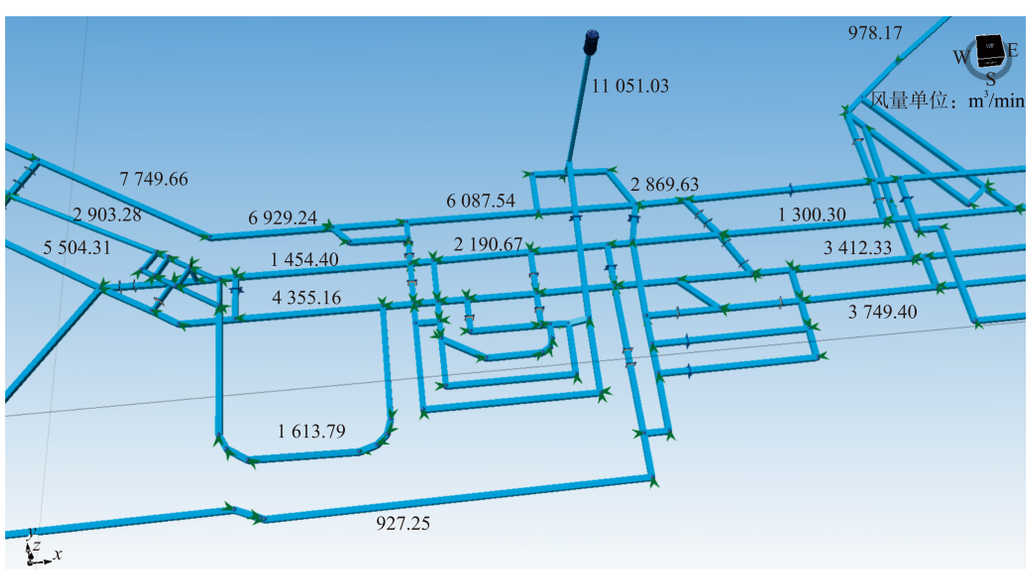


图 10　风网实时解算结果

Fig. 10　Real-time wind network solution results

3.2　调节风窗远程监控模块功能

借助通风网络实时解算平台与改进 PID 的矿井百叶式风窗调控系统构建远程监控调节风窗模块，兼具需求风量实时预测与调节支路选择等多项功能.

在选择调节支路的过程中，根据各调节支路对巷道的风阻敏感性及稳定性(即影响度)进行排序，其中需求风量敏感性越高者，其对需求风量的调节效果越好. 因此，在选择调节支路时，应优先考虑那些既能有效调节需求风量，同时对整个通风网络影响较小者.

在确定最优调节分支后，在调节风窗远程监控模块中可以对分支中风窗调节的各项参数进行设置，包括风窗的角度调节范围，所对应调节地点的甲烷传感器、风速传感器、压差传感器进行位置关联，并可自定义设置最高甲烷上限，所需风量范

围以及风窗两侧压差范围，如图 11 所示．参数设定以及各传感器绑定完成后，开启智能调节开关，即可进行风窗自动调节．

在选定最优调节分支后，远程监控模块将为巷道中的各个风窗调节参数提供设置方案，包括风窗角度、对应调节点的甲烷传感器、风速传感器及压差传感器的定位，还能自设甲烷最大值、所需风量和风窗两侧压差等参数．所有参数设定与传感器绑定完毕后，启动智能调节开关，便可实现风窗自动化调节．



(a) 风窗调控平台界面



(b) 风窗调控参数设置界面

风量风阻	
风阻/(N·s²·m⁻⁸)	0.000 698 263
固定风量/(m³·s⁻¹)	0
摩擦阻力系数/(N·s²·m⁻⁴)	0.001 094 7
实测风量/(m³·s⁻¹)	25.35
最大允许风速/(m·s⁻¹)	4
最小允许风速/(m·s⁻¹)	0.15
风网解算	
当量氧化热系数类型	煤巷
调节类型	不可调节分支
调节压力/Pa	0
截面形状	矩形
井巷长度/m	240.91
井巷周长/m	18.12
空气密度/(kg·m⁻³)	1.041 7
气温/℃	18
气压/Pa	87 500
人员散热	轻度劳动

(c) 巷道属性编辑窗口

图 11 风窗调控界面

Fig. 11 Louver control interface

3.3 转龙湾煤矿 23204 工作面自动调风运用

在综采工作面回采期间，进风巷和回风巷的长度持续缩短，导致工作面风阻降低．为了维持稳定的风量，必须对局部阻力调节设备进行调整．然而，传统的人工调节方法存在诸多问题，例如需要具备丰富现场调风经验的技术人员来确定调节面积，且无法实时监测调风效果，只能通过人工测量风量并反复调节，调节周期长，效率低下．

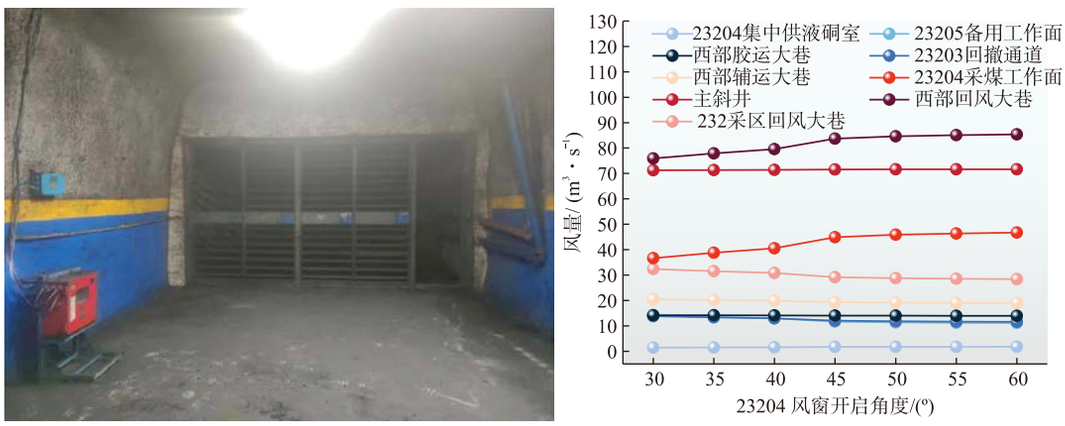
针对这一问题，选择在 23204 工作面安装一套远程自动调控风窗(图 12a)，并利用平台中的调节风窗远程监控模块进行操作．考虑到工作面需风量的限制，将风窗的调节角度设置在 30°～60°之间．进行调风试验得到主要用风地点风量变化数据如图 12 b 所示，风窗开度由 40°调至 45°，23204 采煤工作面增加了 4.354 m^3/s 风量，232 采区回风大巷风量减少，西部回风大巷风量增加，其他分支风量变化不大，证明了改进 PID 的矿井百叶式风窗调控系统的调节优势，可实现对工作面及其相关分支的风量控制．

结合该工作面 6 个月现场应用统计，与传统人工调节相比，本系统调控效率高，相比人工调节需 2～3 人耗时 3～4 h，系统远程调控达到分钟级，优势明显；显著降低人工成本，年节约费用约 2.88 万元；风量控制误差小于 5%，降低生产能耗．

3.4 现有智能调风技术对比分析

为明确本研究技术方案的核心优势，选取当前矿井智能调风领域应用较广的元胞自动机调控技术[14]、风机变频调控技术[19,29]作为对比对象，从调控原理、适用场景、核心优势等维度进行对比，结果见表 10．

结合改进 PID 的矿井百叶式风窗调控系统与通风网络实时解算平台，构建了“局部精准调节＋系统全局协同”的技术体系．与元胞自动机调控侧重“网络级全局调控”、风机变频调控侧重“系统级总量调节”不同，本研究聚焦“局部支路按需供风”，在转龙湾煤矿 23204 工作面应用中，仅通过风窗开度由 40°调至 45°的微小调整，即可实现工作面风量 4.354 m^3/s 的精准提升，且对非目标分支风量影响极小(误差≤5%)，解决了现有技术在动态采掘场景下“局部供需匹配度低”的问题，为矿井局部智能调风提供了新的技术路径．



(a) 远程自动调控风窗　　(b) 主要用风地点风量变化

图 12　远程自动调控风窗和主要用风地点风量变化

Fig. 12　Remote automatic regulation of the air volume of the louver and the main air supply points

表 10　本研究与现有智能调风技术的核心差异对比

Table10　Comparison of core differences between this study and existing intelligent air regulation technologies

对比维度	本研究	元胞自动机调控	风机变频调控
调控原理	基于风窗开度灵敏度分区，动态匹配分段 PID 参数；结合卡尔曼滤波降噪与通风网络实时解算，聚焦矿井局部支路精准按需供风.	基于元胞自动机模型，通过分支风阻协同调整实现网络级调风.	通过调节风机频率改变系统总风量，实现风量平衡.
适用场景	矿井局部支路精准按需供风，尤其适配动态采掘接续、气体不均衡涌出场景.	全矿井复杂风网整体调风、灾变时期风烟流全局调控.	矿井全系统风量总量调节、主干巷道大范围风量优化.
核心优势	1. 适配风窗特性，实现局部调控超调小、精度高； 2. 结合风网实时解算，兼顾局部调控与系统稳定.	1. 擅长复杂风网多分支协同调控； 2. 灾变场景下鲁棒性强.	1. 系统级风量调节效率高； 2. 无需额外增加局部阻力设施.

4　结　论

1)构建了自动风窗调控试验平台，并开发矿井通风程序控制风窗上位机监控系统，确定百叶式风窗开度[0,35)为高灵敏区，[35,60)为中灵敏区，[60,90)为低灵敏区. 基于卡尔曼滤波技术提高监测数据准确度，使用传递函数模型对风窗调风控制系统进行模型辨识，得出风窗的传递函数模型.

2)针对风窗的流量特性，提出了模糊 PID 和分段 PID 控制算法，在 MATLAB-Simulink 平台和自动风窗调控试验平台中对 3 种 PID 算法进行对比验证，结果表明，分段 PID 控制相比 PID 控制，超调量减少了 2.68%，上升时间减少了 2.36%，调节时间减少了 3.50 s，且超调量与上升时间都小于模糊 PID 调节，证明分段 PID 在自动风窗调控方面具有超调较小、响应更及时、适应性更强等优点，可以达到风量稳定控制的要求.

3)结合改进 PID 的矿井百叶式风窗调控系统和通风网络实时解算平台，构建转龙湾矿井远程监控调节风窗模块，实现对矿井内多元因素信息智能感知，在 23204 回采工作面运用中，风窗开度由 40°调至 45°，23204 采煤工作面增加了 4.354 m^3/s 风量，实现了对工作面及其相关分支的风量控制.

研究确定的灵敏度分区是基于试验平台单一巷道、固定测试条件的划分，未充分考虑矿井实际工况中的巷道网络结构、风窗两侧压差大小、风窗面积与巷道断面面积占比等关键影响因素，这些因素会通过改变风流分配、调节灵敏度及有效通流面积，影响灵敏区的实际边界与调控效果，因此该划分可作为基准模板，现场应用时需结合上述因素进行针对性修正以提升精准性.

参考文献：

[1]　袁世冲，张改玲，孙帮涛，等. 基于光纤与微震监测系统的注浆帷幕“浆-岩”组合体采动效应研究：以滇东北毛坪铅锌矿为例 [J]. 中国矿业大学学报，2024，53(5)：1022-1036.
YUAN Shichong，ZHANG Gailing，SUN Bangtao，et al. Mining effects of grouted-rock composite of grout curtains based on optical fiber and microseismic moni-

toring systems: A case study of the Maoping lead-zinc mine in Northeast Yunnan, China [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(5): 1022-1036.

[2] 黄军朋,张紫昭.基于机器学习的高寒山区矿山地质灾害易发性研究[J].中国矿业大学学报,2024,53(5):960-976.
HUANG Junpeng, ZHANG Zizhao. Study on the mining geological hazard susceptibility assessment in alpine areas using machine learning models[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(5): 960-976.

[3] 孙健东,张瑞新,白润才,等.智能化露天矿的核心概念与建设战略[J].中国矿业大学学报,2024,53(1):23-33.
SUN Jiandong, ZHANG Ruixin, BAI Runcai, et al. The key concepts and construction strategy of intelligent surface mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(1): 23-33.

[4] 王 岩,寇浩楠,张旭辉,等.数字孪生驱动的智能掘进设备虚实交互控制方法[J].中国矿业大学学报,2025,54(2):330-342.
WANG Yan, KOU Haonan, ZHANG Xuhui, et al. Virtual-physical interaction control method for intelligent cantilever roadheader driven by digital twin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(2): 330-342.

[5] RRN C, CAO S J. Implementation and visualization of artificial intelligent ventilation control system using fast prediction models and limited monitoring data[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 52: 101860.

[6] 张鹏宇,马 砺,石新慧,等.基于时序优化长短期记忆网络的采空区环境多参数预测[J].中国矿业大学学报,2025,54(3):653-666.
ZHANG Pengyu, MA Li, SHI Xinhui, et al. Multi-parameter prediction of goaf environment based on time-series optimized long short-term memory network[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(3): 653-666.

[7] HATI A S. A comprehensive review of energy-efficiency of ventilation system using artificial intelligence [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 146: 111153.

[8] KARAKURT I, AYDIN G, AYDINER K. Mine ventilation air methane as a sustainable energy source [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(2): 1042-1049.

[9] PALUCHAMY B, MISHRA D P, PANIGRAHI D C. Airborne respirable dust in fully mechanised underground metalliferous mines: Generation, health impacts and control measures for cleaner production[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 296: 126524.

[10] 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.

[11] 卢新明,尹 红. 矿井通风智能化理论与技术[J].煤炭学报,2020,45(6): 2236-2247.
LU Xinming, YIN Hong, The intelligent theory and technology of mine ventilation[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6) : 2236-2247.

[12] 张庆华,姚亚虎,赵吉玉.我国矿井通风技术现状及智能化发展展望[J].煤炭科学技术,2020,48(2):97-103.
ZHANG Qinghua, YAO Yahu, ZHAO Jiyu. Status of mine ventilation technology in China and prospects for intelligent development [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2):97-103.

[13] 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.

[14] 裴晓东,王 凯,李晓伟,等.基于元胞自动机的集约化矿井调风模型分析与仿真[J].中国矿业大学学报,2017,46(4):755-761.
PEI Xiaodong, WANG Kai, LI Xiaowei, et al. Analysis and simulation of intensive mine air regulation model based on the cellular automaton[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017,46(4):755-761.

[15] 裴晓东,郝海清,王 凯,等.矿井复杂风网火灾风烟流应急调控技术及应用[J].煤炭科学技术,2023, 51(5):124-132.
PEI Xiaodong, HAO Haiqing, WANG Kai, et al. Research and application of fire air and smoke flow emergency control technology for mine complex ventilation network[J]. Coal Science and Technology, 2023,51(5):124-132.

[16] 吴奉亮,王 桐.有限实测风量下矿井风网校准的二次规划模型[J].煤炭科学技术,2024,52(12) :154-164.
WU Fengliang, WANG Tong. Quadratic programming model for calibration of mine ventilation network under limited measured air quantities[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12) :154-164.

[17] 赵　丹，沈志远，宋子豪．面向不平衡数据集的矿井通风系统智能故障诊断[J]．煤炭学报，2023，48(11)：4112-4123.
ZHAO Dan，SHEN Zhiyuan，SONG Zihao. Intelligent fault diagnosis of mine ventilation system for imbalanced data sets [J]. Coal Science and Technology，2023，48(11)：4112-4123.

[18] KEGENHOFF J. Technical aspects of auxiliary ventilation at dust-intensive workplaces [J]. Mining Report，2022，158(6)：598-605.

[19] WANG K，HAO H Q，JIANG S G，et al. Study on fire smoke flow characteristics in the ventilation network and linkage control system in coal mines [J]. Fire and Materials，2020，44(7)：989-1003.

[20] ZHAO Q S，LI Y，CAO W H，et al. Risk analysis of high-pressure hydrogen leakage in confined space with tube skid container for cylinder[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2024，60：581-592.

[21] YAO T，XIANG F，SUJEEVA S，et al. Naturally ventilated double-skin façade with adjustable louvers [J].Solar Energy，2021，22：533-543.

[22] 马宏伟，赵英杰，薛旭升，等．智能采煤机器人关键技术[J]．煤炭学报，2024，49(2)：1174-1182.
MA Hongwei，ZHAO Yingjie，XUE Xusheng，et al. Key technologies of intelligent mining robot[J]. Journal of China Coal Society，2024，49(2)：1174-1182.

[23] XU X J，LU S Y，JIANG Y，et al. Driving strategy of unmanned ground vehicle under split-docking road conditions based on improved EKF and PID-modified SMC [J]. Advanced Engineering Informatics，2024，62：102830.

[24] CAI H，CUI C，ZHANG X，et al. Research on a hierarchical air balancing control method of variable air volume ventilation system [J]. Building and Environment，2020，175：106710.

[25] 刘　峰，王宏伟，刘　宇．基于多传感融合的巷道三维空间映射[J]．煤炭学报，2024，49(9)：4019-4026.
LIU Feng，WANG Hongwei，LIU Yu. 3D spatial mapping of roadways based on multi-sensor fusion [J]. Journal of China Coal Society，2024，49(9)：4019-4026.

[26] YUAN Y，LI J L，LUO X. A fuzzy PID-incorporated stochastic gradient descent algorithm for fast and accurate latent factor analysis [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems，2024，32(7)：4049-4061.

[27] WANG Y Z，WANG Z D，ZOU L，et al. Observer-based fuzzy PID tracking control under try-once-discard communication protocol：An affine fuzzy model approach [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems，2024，32(4)：2352-2365.

[28] PEDRYCZ W. Why triangular membership functions?[J]. Fuzzy Sets and Systems，1994，64(1)：21-30.

[29] 李团结，黄维明，潘伟华，等．煤矿局部通风机风量智能控制系统研究及应用[J]．煤炭科学技术，2023，51(4)：166-174.
LI Tuanjie，HUANG Weiming，PAN Weihua，et al. Research on local ventilation constant air volumeintelligent switching technology and its application [J]. Coal Science and Technology，2023，51(4)：166-174.

（责任编辑　沈　菊　仝　腾）