

矿井巷道风速智能感知技术研究进展

陈炫中¹, 王孝东¹, 杨懿杰¹, 吕玉琪¹, 刘唱¹, 杜青文², 谢博²

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

2. 昆明理工大学 应急管理与公共安全学院, 云南 昆明 650093

中图分类号: TD72 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)04-0124-11

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.04.014

摘要 矿井通风系统智能化是推进智能矿山建设、保障矿井安全生产的关键环节, 通风参数作为基础数据来源, 是矿井通风系统智能化建设的重要保障。而矿井巷道风速智能感知技术发展过程中存在传感器精度及可靠性优化、传感器测风误差修正、平均风速智能快速预测、传感器布设优化等关键科学技术问题有待改善。综述了传感器技术、高精度智能风速预测等研究成果, 总结了各项技术的优劣及适用范围, 提出了基于 PSO-GRU 神经网络构建的巷道断面平均风速智能预测模型, 该模型能够有效提高矿井巷道平均风速测算的精度, 可为通风参数智能感知技术的发展提供理论参考。

关键词 矿井通风; 巷道风流特性; 风速传感器; 巷道平均风速; PSO-GRU 神经网络

引言

推进矿山自动化、智能化建设是“十四五”期间国家明确提出的金属矿山发展方向^[1]。近年来, 随着我国矿产资源开发逐渐转向深部开采及开采技术与设备不断发展, 自动化、数字化、智能化技术在矿业行业得到了越来越多的重视, 国家出台了多个相关指导文件, 如 2020 年多部委联合印发了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》, 指出了矿山智能化建设需要实现的目标^[2], 传统的人工、半自动通风系统管控方式难以满足精细化管控和安全、绿色生产的需求, 矿井通风迫切需要技术升级及智能化建设以满足深部开采生产需求。

矿井智能通风系统是通风系统与智能工业技术的深度结合, 旨在运用通风参数智能感知、数据传输、智能决策等智能技术实现无人化、智能化矿井通风。为此, 需将多个通风子系统进行数据互通互联, 实现全局智能化、减人提效、通风安全、灾变时期应急管控等矿井通风智能管控及安保系统的目标, 系统架构如图 1 所示, 矿井智能通风管控系统划分为通风信息智能感知、信息传输、数据分析及决策、智能调控四个模块^[3-4]。

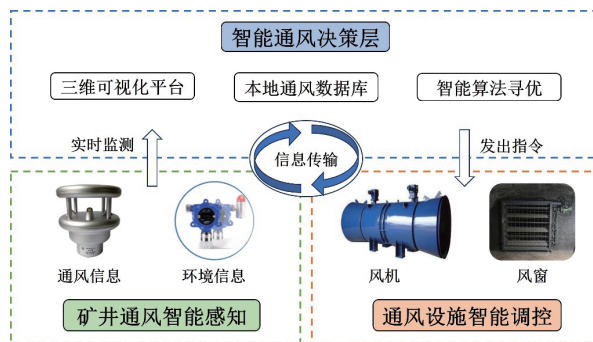


图1 矿井智能通风管控系统框架结构

Fig. 1 Framework structure of intelligent ventilation control system for mines

近年来, 科研工作者针对矿井智能通风系统开展了大量研究。刘剑^[5]提出矿井智能通风系统的本质特征是通过矿井实测数据进行机器学习实现自主决策, 快速精确获取通风参数是系统正常运行的重要基础; 卢新明等人^[6]从算法收敛性的角度总结了风网解算、智能调控等方面的核心技术问题, 结合先进算法及软件, 对关键位置通风参数进行预测是提高通风系统效率的有效手段; 张浪等人^[7]将矿井智能通风系统细分为六个模块, 研究了每个模块的关键技术和联动关系, 指出了风量监测是关键技术问题。

矿井通风相关领域学者在不同矿山进行了智能

收稿日期: 2024-06-13

基金项目: 昆明理工大学引进人才科研启动基金项目(KKSY201721032)

作者简介: 陈炫中(1998—), 男, 广西北海人, 硕士研究生, 主要从事矿井通风与安全等方面的研究工作, E-mail: 1210626072@qq.com。

通信作者: 王孝东(1977—), 男, 云南玉溪人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事矿井通风与安全、数字化矿山等方面研究工作, E-mail: angiaoongwxd@163.com。

通风系统建设实践。郭炜舟等人^[8]针对矿山通风监测实时性差、无法远程调控等问题,开展了包括风量精准测定、自主调控的智能化建设研究;陈重新等人^[9]研制了具备基于通风参数感知自动调控功能的局部智能通风系统;栾玉鹏^[10]以马兰矿为研究对象,介绍了基于物联网技术的智能通风系统的核心是将通风参数监测系统与调控设施相匹配以实现远程管控;马恒等人^[11]提出了一种通风监测与通风仿真一体化的算法,实现了对矿山通风系统的实时在线解算;杨杰等人^[12]依据工业4.0理念提出了一种基于现场总线传输技术的智能通风系统设计方案,包括了数据采集、分析处理和自主决策等模块。

综上所述,通风系统自动化、智能化决策及调控,需以实时、准确的矿井通风数据为依据,风速是监控系统状态的最重要数据,智能风速感知是智能通风系统高效运行的基础。矿井巷道风速智能感知技术主要包括高精度传感器技术、风速数据智能化处理、传感器布设优化等,技术框架如图2所示。本文将围绕矿井巷道风速智能监测各项关键技术的研究现状展开论述,并对现有技术中存在的问题及发展前景进行探讨。

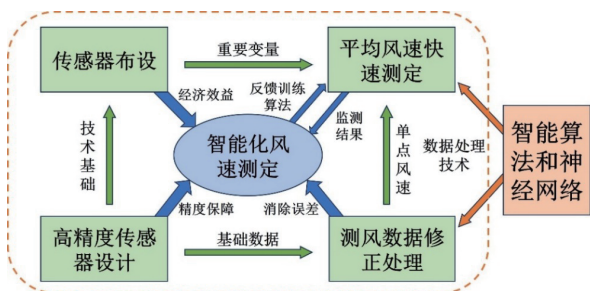


图2 矿井巷道风速智能感知技术

Fig. 2 Intelligent airflow velocity perception technology for mine tunnels

1 矿井巷道风速分布特征

在矿井通风日常安全监管及定期风量测定过程中,需对主要巷道风速进行精准测定。而空气流经巷道时,存在空气黏性和壁面摩擦力的共同作用,同一断面上的风速呈现出不均匀分布,靠近壁面处的层流边层中空气流速较低,断面其余位置的紊流风流速较高,巷道断面风速整体呈现“中间高、四周低”的分布特点,严重影响测风精度。

由于矿井巷道断面存在几何结构及支护方式的多样性特征,影响风速测定的准确性^[13],其中壁面粗糙度的影响最为显著,相关研究结果发现巷道壁面粗糙度增大时断面上低风速区域会随之增大,同时风速最大值增大^[14-15],胡建华等人^[16-17]利用Fluent软件模拟得出当巷道壁面粗糙度小于0.1 m时能够减少其对断面风速分布的影响,若改变巷道断面尺寸也会改变巷道断面风速分布特性。

根据巷道断面风速分布特性,平直巷道断面上存在某一等风速线处的风速与平均风速相等,研究等风速线位置特性能够为风速传感器位置设定提供参考。宋莹等人^[18]利用激光多普勒测速仪测试研究了多种类型巷道的断面分布特性,结果表明受风流脉动影响断面平均风速分布环为不规则波浪曲线;丁翠等人^[19]将巷道断面平均风速分布环定义为“关键环”,其分布特征仅受巷道断面特征影响;吴洁葵等人^[20]通过研究发现不同形状巷道断面上的均速圈受影响程度不同,并推导了均速圈位置的计算方法,而当巷道测风断面前后出现突扩、不同形式的拐角入风时,巷道断面风速会呈现出更为复杂的不规则分布^[21-23],针对此类井下实际存在的情况还需要单独进行研究。

结合巷道断面风速分布特点,测量巷道风量时为保证精度需以断面平均风速为基础数据,研究影响断面风速分布的因素及等风速线位置和平均风速之间的关系,可为断面平均风速测算提供理论基础。

2 矿井巷道智能风速测定技术实现路径

2.1 高精度风速传感器

由于巷道同一断面上的风速呈现出不均匀分布,传统测风方法多采用“走线法”“九点法”等,其原理是测风人员使用便携式风表测得断面多点风速后取平均值,该方法费时费力,测风精度受测风人员操作熟练度和风表精度影响较大,无法满足智能通风系统实时监测的需求^[24]。

为实时监控井下风速,目前大量矿山安装了可传输数据的风速仪,但受限于井下空间狭小、工作环境恶劣等因素,易出现传感器精度不足、布设方式不合理等问题,对通风系统管控造成负面影响。随着行业对监测精度需求的增长和电子技术、材料技术的发展,大量学者针对井下环境特点对矿井风速传感器展开了研究,机械法、压差法、超声波检测法等风速测量方式得到了快速发展,下面对主流的矿山风速传感器设计及研究进展进行介绍。

2.1.1 机械式风表

矿用机械式风表是矿山最常见的测风仪器之一,其工作时风流流经叶轮带动风杯旋转,即可将风杯旋转速度转换为风速,具有结构简单、维护方便等特点。但受结构特点限制,机械式风表测风存在适用风速范围窄、低风速下精度低、响应速度慢等缺点,空气性质发生变化时,风流对叶片的推力改变造成测风不准,需进行相应的参数修正^[25]。同时,风表机械结构长时间暴露在巷道环境中,高湿高温空气及粉尘会加速测风机构的磨损、腐蚀过程,降低测风准确性,为保证测风精度,机械式风表应仅用于空气杂质少、风速平稳的直平巷道。

2.1.2 压差式风速传感器

为解决机械式风表低风速段测量精度低、启动速度慢等问题,压差式风速传感器得到大量使用^[26]。其原理与风压计相似,主体由皮托管构成,风流从全压口进入后将风流动能转换为电能,处理器将电信号转换为风压值和风速值,其测风部分没有机械结构,压差式风速传感器具有不易磨损的优点,适用于更广的风速范围。但由于皮托管入口需要暴露在空气中使风流正常进入,在粉尘浓度大的巷道中容易被堵塞,需要定期进行清理维护。

2.1.3 超声波风速传感器

超声波测风是一种新型测风方式,目前主要应用于气象、军事、民航等领域,具有受环境影响小、测量范围广等特点,是矿山高精度风速传感器的主要发展方向。

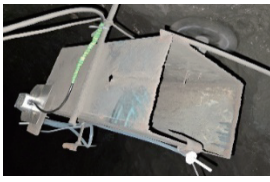
矿用超声波风速传感器分为涡街式风速传感器和时差法风速传感器两类。目前已有成熟的矿用涡街式风速传感器产品^[27],如图3所示,当风流经过传感器阻流体时产生涡流改变超声波频率,根据超声波频率变化即可计算出相应的风速值。涡街式超声波风速传感器无暴露在外的机械部件,具有不易磨损、测量精度高的优点,但该测风方法对涡流敏感度高,当粉尘在涡流发生器内大量沉积时会阻碍超声波传递,影响测风精度,且无法测量风向,不符合矿井智能化测风的发展趋势,在实际生产中已被逐渐淘汰。

相较于涡街式风速传感器,时差法风速传感器具有不破坏风流流场、抗干扰能力强等优点,能够测量风向状况,是矿井风速监测技术的主要发展方向之一^[28]。如图4所示,其工作原理是超声波在空气中传播时,空气流速与超声波速度叠加,超声波顺向传播时间 t_1 和逆向传播时间 t_2 之差为空气流经两个换能器之间距离 d 所需时间的两倍,根据该原理即可计算得到风速 v ^[29],如公式(1)所示:

$$v = \frac{\frac{d}{t_2} - \frac{d}{t_1}}{2} \quad (1)$$

表 1 各类型风速传感器对比

Table 1 Comparison of various types of wind speed sensors

机械式风速传感器	压差式风速传感器	超声波风速传感器	
		涡街式传感器	时差法传感器
			
优点: 结构简单, 成本低, 易于维护; 缺点: 恶劣环境中损耗快, 响应速度慢	优点: 结构简单, 低速响应速度快; 缺点: 皮托管易受粉尘影响	优点: 精度高, 量程广, 不易损耗; 缺点: 影响风流流场, 易受粉尘影响	优点: 测量范围广, 精度高, 无易损耗部件

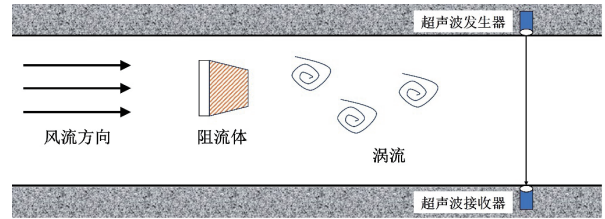


图 3 涡街式超声波风速传感器测风示意图

Fig. 3 Illustration of a vortex street ultrasonic wind speed sensor

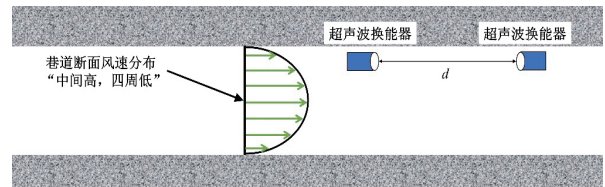


图 4 超声波时差法风速传感器测风示意图

Fig. 4 Illustration of an ultrasonic time difference method wind speed sensor

式中, v 为所测巷道风速, d 为两个超声波换能器之间的距离, t_1 为超声波顺向传播时间, t_2 为超声波逆向传播时间。

超声波传感器自身测风精度较高,但仍需针对性改进以克服恶劣环境影响。改进设计分为结构优化和数据处理优化两个方面:首先,改变超声波发射器与接收器的安装方式能够提高测风精度,李秉芮等人^[27]研究了超声波发射器与接收器探头方向对测风精度的影响,为提高精度需尽可能降低超声波发射器与接收器之间的错位;其次,在传感器内部加入数据处理模块能够提高输出风速的稳定性,周川云^[30]提出了一种基于临界点加权插值细分算法的超声波时差获取方法,有效提高了风速监测的精度。改进时差法超声波风速传感器可实现全量程误差小于0.1 m/s的巷道风速测定及风网解算^[31-33],能够在恶劣环境条件中长时间稳定运行,有效减少维护时间成本,是最能满足矿井智能通风系统自动化测风需求的风速传感器类型。

各类型传感器特点对比如表1所示。

2.2 矿井巷道测风数据修正处理方法研究

目前先进的风速传感器能够实现高精度测风,但因造成的测风误差使单一传感器的瞬时数据无法正确表征巷道平均风速,用于风量测定、风网解算等通风系统分析工作时会造成较大误差,需要设计数据处理方法消除传感器误差并进行平均风速测算。

2.2.1 测风误差处理技术

受井下风流、环境特性等因素影响,测风误差来源大致可分为两类:第一类是由巷道壁面粗糙度、巷道走向等固定因素引发的风流波动及涡旋等引发的干扰;另一类是由风门开关、人员车辆运动等井下活动引起的动态干扰。

针对第一类干扰,井下普遍存在的是由湍流引发的风流扰动。巷道风流多为湍流状态,湍流脉动使风流运动特性在时间和空间上呈现出剧烈的随机变化^[34],学者研究发现,在实验中排除了风门、风机等外部因素干扰后,均匀长直光滑巷道模型内风速仍会产生波动,波动幅度可达到平均风速的50%以上^[35-36],且波动现象随风速增大愈发明显。而湍流具有规则的统计平均结果,可在测风过程中取短时间多次测量平均值以减小误差影响^[37-38],此类时均风速测量方法能够提高巷道单点测风的稳定性。

第二类干扰的发生通常并不规律,难以定量表示干扰强度且无法通过常规的数值计算方法修正异常数据。但该类干扰持续时间短,干扰发生前后巷道风流参数处于正常状态,若将受干扰时的数据视为异常值,可采用智能算法识别并修复此类异常数据。有学者将井下特定作业、仪器故障及各类干扰源引起的异常信号定义为“脏”数据^[39],赵丹等人^[40]提出了一种基于堆叠降噪自编码器的矿井风速传感器数据清洗模型对测风数据样本中的“脏”数据进行识别并修复,以东山煤矿通风系统监测数据为例,该模型能够精确修复94.48%的样本数据,修复结果与真实值接近,模型运行稳定,适用于井下复杂环境;倪景峰等人^[41]采用随机森林-链式方程多重插补法修复填补测风过程中缺失的数据,通过矿井实测数据验证,该故障诊断模型准确率能够达到84.5%;邓立军等人^[42]提出了一种基于SSA-LSTM的风速异常波动检测方法用于识别风门开闭造成的风速波动。人工智能算法和神经网络的发展为矿井通风参数测定误差处理问题提供了更为高效、精准的解决方法,更符合智能通风系统建设的需求。

2.2.2 平均风速转换方法研究

针对单一传感器所得风速无法正确反映风量情况的问题,现有的解决方法及研究方向有两种:一是

通过现场测量或模拟实验确定巷道断面“平均风速环”的分布特性,将风速传感器安装在相应位置;二是利用数值计算方法或人工智能算法研究单点风速与平均风速之间的数学关系。

第一种方法主要原理是建立矿井巷道数值模型进行数值模拟实验,利用数值模拟实验的可重复性,改变巷道壁面粗糙度、障碍物类型、风流参数等变量,分析不同条件下“平均风速环”分布特性,得到最佳的风速传感器布设位置。目前不同学者得出了多种传感器最佳布设位置及计算方式,王翰锋^[17]将平均风速位置定位于巷道断面中轴线,半圆拱巷道和矩形巷道中轴线上的平均风速位置至顶板距离分别为巷道高的11.5%和15.5%;张京兆等人^[43]将巷道内障碍物作为影响因素,研究了巷道中存在障碍物时传感器测风精度最佳的安装位置;张浪^[24]、吴洁葵等人^[20]分别通过数值模拟实验和相似实验得出了不同因素影响下断面平均风速位置及传感器最佳安装位置,并给出了“平均风速环”的定位计算模型:

圆形断面:

$$c = \begin{cases} 0.085d_e & (\text{砌碛}) \\ 0.102d_e & (\text{锚喷}) \\ 0.120d_e & (\text{裸岩}) \end{cases} \quad (2)$$

非圆形断面:

$$c = \begin{cases} 0.097d_e & (\text{砌碛}) \\ 0.1d_e & (\text{锚喷}) \\ 0.103d_e & (\text{裸岩}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, c 为“平均风速环”与巷道壁面之间的距离, m ; d_e 为断面当量直径, m 。

该计算模型利用实测数据进行修正,能够准确计算该矿山内部分巷道“平均风速环”的分布位置,对于平均风速快速测定具有一定实际意义。

此类研究方法能够为某些类型巷道内的传感器安装位置提供参考,但在开展实验时受限于时间成本通常只以少量的巷道为研究对象,所得断面风速分布特性及数据仅代表具有相似特征的巷道。当巷道特征发生变化或存在多种类型巷道时,需重新进行建模、实验、计算,前期工作量较大,不利于矿井通风系统智能化建设的发展。

第二种方法是利用数学方法计算单点风速与平均风速之间的转换方式。巷道断面平均风速与单点风速呈正比关系^[44],通过数学方法将各类巷道单点风速和对应平均风速进行拟合,实现使用一个数学模型计算不同巷道断面的平均风速,如潘竞涛^[45]使用最小二乘法拟合测点风速和平均风速,得到了两者之间的转换关系式;WEI等人^[46-47]通过实验得到单点风速与平均风速的无因次转换系数。

同时,智能回归预测算法的发展使其计算性能得

到了提升,能够代替传统计算方法处理数据,为计算巷道断面平均风速提供更为高效的方法,如邵良杉等人^[48]通过数值模拟实验获取拱形巷道及矩形巷道的断面风速数据,基于门控循环单元神经网络(gated recurrent unit, GRU)构建了巷道平均风速预测模型;卞欢等人^[49]将巷道断面尺寸、壁面粗糙度、单点风速及位置等作为输入参数,构建了基于遗传算法(genetic algorithm, GA)-反向传播神经网络(back propagation, BP)的平均风速预测模型。以上学者构建的预测模型计算时间仅需要几秒钟,实现了误差低于2%的巷道平均风速快速预测。现有研究中的预测模型在智能化及计算效率方面实现了突破,但存在数据模型单一、神经网络结构较简单、容易陷入局部最优解、精度不足等问题^[50]。

针对现有研究成果中的不足,笔者利用粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)优化 GRU 神经网络对平均风速预测开展了研究,得到一种基于 PSO-GRU 的巷道断面平均风速快速预测模型,模型构建过程如下:

第一步,获取巷道断面风速数据样本:

以拱形巷道为例,在 ANSYS Fluent 软件建立巷道模型并按实际情况设置边界条件,进行风速场模拟实验,获取断面多点风速数据及平均风速,断面风速场及测点设置如图 5 所示,将粗糙度常数、壁面粗糙度、测点位置、单点风速、平均风速等整合为巷道断面风速数据集并随机排序,如表 2 所示,再对数据集进行归一化处理,使其适用于机器学习算法。

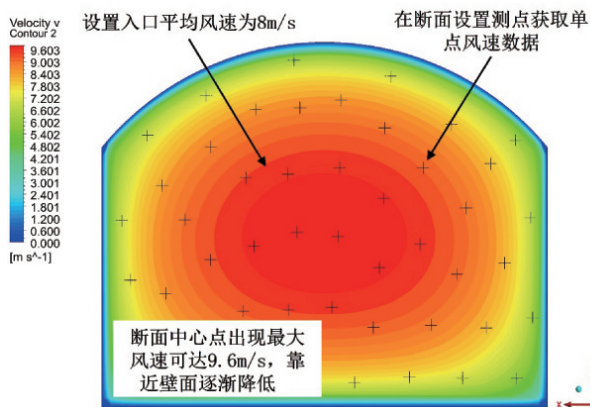


图 5 巷道断面风速场及测点分布
Fig. 5 Wind speed field and measurement point distribution map of tunnel cross-section

第二步,构建 PSO-GRU 预测模型:

GRU 神经网络是一种机器学习方法,由长短时记忆神经网络(long short memory network, LSTM)改进而来,其结构由重置门和更新门构成^[48]。PSO 算法来源于对鸟类寻找食物的模拟,在寻优的过程中,粒子群中个体通过相互传递和共享位置信息寻求全局最

表 2 部分巷道断面风速数据集

Table 2 Partial wind speed dataset of tunnel cross-sections

数据编号	输入数据					输出数据:
	粗糙度常数	壁面粗糙度/m	测点高度/m	测点横坐标/m	测点风速/(m·s ⁻¹)	平均风速/(m·s ⁻¹)
1	0.5	0.01	0.3	2.37	0.99	1
2	0.6	0.05	2.11	2.57	7.31	5
3	0.8	0.02	2.96	2.55	3.49	3
4	1	0.03	2.46	1.00	4.47	4
5	1	0.04	1.01	1.43	2.17	2
...	...	...	...	...	...	...
120	0.5	0.03	2.88	3.18	11.80	10

优解^[51]。使用 PSO 算法对 GRU 神经网络的超参数进行调整优化得到 PSO-GRU 预测模型,算法流程如图 6 所示。

在训练过程中,首先初始化粒子群的位置及速度,根据每个粒子特性计算出相应 GRU 神经网络的学习率、隐藏层神经元个数,使用均方误差作为损失函数衡量模型迭代训练结果。在粒子群寻优过程中加入自适应调整惯性权重因子,根据每个粒子的适应度评估其表现,并更新位置及速度参数,能够指导 PSO 算法寻找一组最优超参数,使 GRU 神经网络预测精度达到最优,避免模型陷入局部最优解。

利用粒子群算法优化之后的 PSO-GRU 神经网络相较于 GRU 神经网络和 BP 神经网络具有更好的预测性能,更适用于回归预测^[50]。

第三步,训练巷道断面平均风速预测模型并验证:

按 8:2 比例将巷道断面风速数据集划分为训练集和验证集,分别输入 PSO-GRU 模型训练得到巷道断面平均风速预测模型。为了验证该模型的预测性能,同时将数据集输入 GRU 神经网络预测模型和 GA-BP 神经网络预测模型进行实验,利用均方根误差 RMSE、绝对误差 MAE、相关系数 R^2 对比分析预测结果,三种模型的评价指标和预测结果如表 3 和图 7 所示。

由表 3 可知,PSO-GRU 模型用于预测巷道断面平均风速时三个评价指标均优于 GRU 模型和 GA-BP 模型,相关系数 R^2 达到 0.9309,模型精度较好。如图 7 所示,PSO-GRU 模型所预测的平均风速与真实值最接近,整体趋势保持一致,优于另外两个模型。同时,PSO-GRU 模型相较于 GRU 模型能够有效减少神经网络调参工作量。因此,PSO-GRU 模型在预测巷道断面平均风速时具有一定的优势。

此类经过训练后的算法预测模型能够利用单一风速传感器数据快速精确地预测巷道平均风速,测算效率远高于人工测风法和数值模拟分析法,当训练集数据覆盖矿井内所有类型巷道时,该预测模型可用于

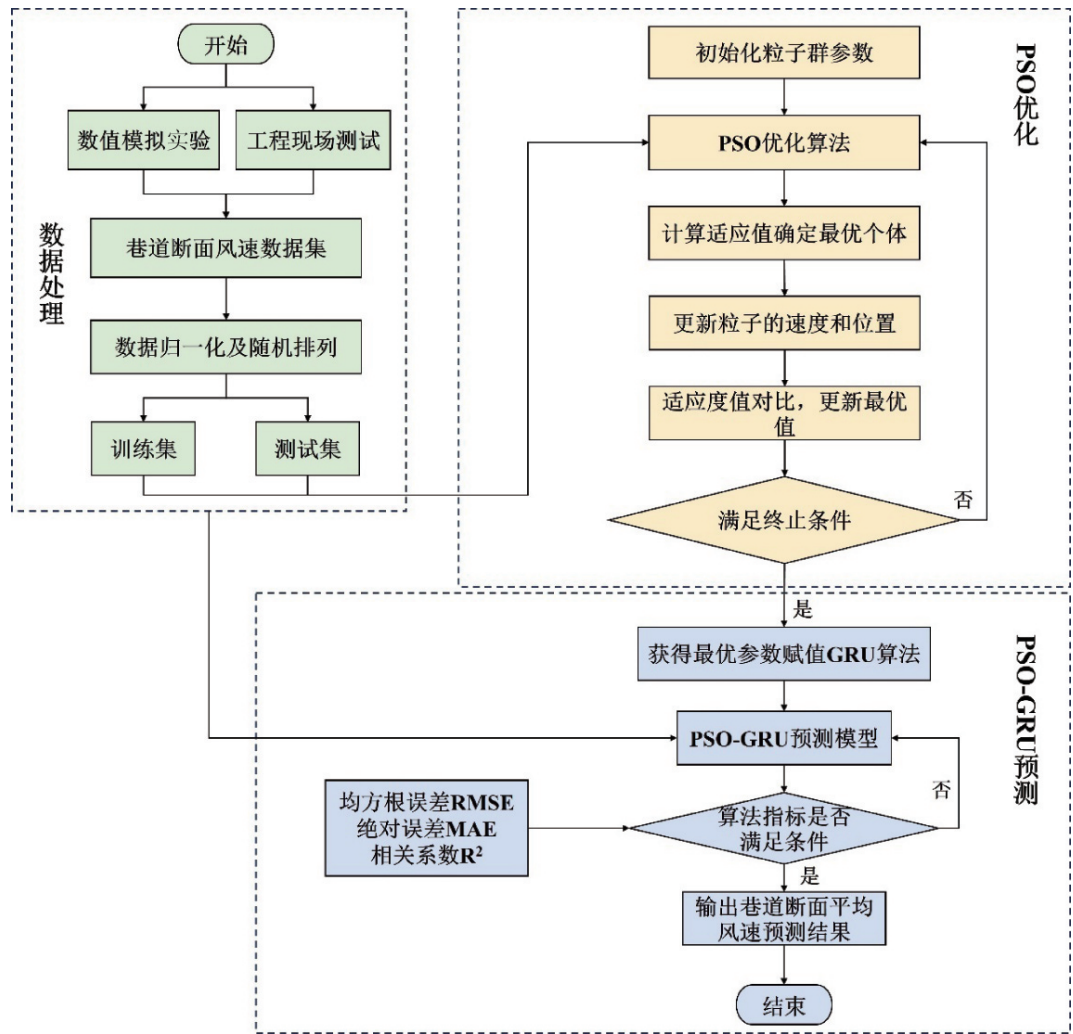


图 6 PSO-GRU 预测模型算法流程
Fig. 6 PSO-GRU prediction model algorithm flow

表 3 三种模型对比结果
Table 3 Comparison results of three models

模型	RMSE	MAE	R^2
PSO-GRU	0.989 9	0.790 1	0.930 9
GRU	1.528 2	0.969 1	0.812 9
GA-BP	1.055 1	0.601 0	0.870 7

矿井内多种巷道的平均风速测算,且不受风速传感器布设位置限制,可以同时满足生产和安全的需求。

综上所述,基于人工智能算法的矿井巷道平均风速预测方法具有计算效率高、适用性强等特点,能够有效提高通风系统参数监测的效率和精确性,为矿井智能通风系统的高效运行提供数据基础。

2.3 矿井巷道风速传感器最优布设方法研究

风速传感器布设选址是将测风技术投入生产的重要环节。受矿井环境、生产运输、经济效益等因素限制,无法在巷道内布设过多数量的风速传感器,当传感器布设与测风需求不匹配时,引起存在监测盲区、

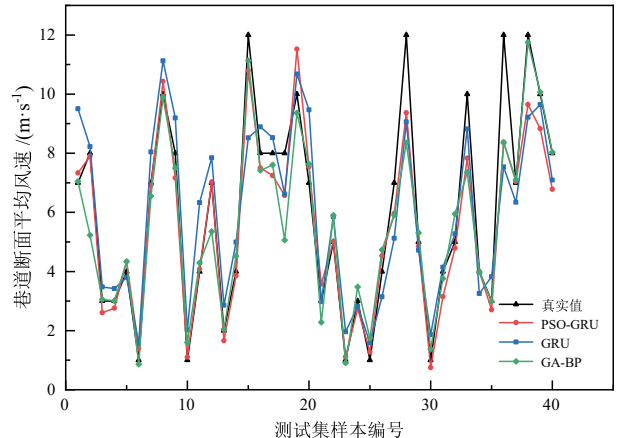


图 7 三种模型预测值与真实值的对比
Fig. 7 Comparison of predicted values and actual values from three models

传感器测量范围及精度不合适等问题降低测风精度,需对风速传感器布设选址优化开展相关研究。

目前,智能通风领域内学者多采用决策树分析法优化风速传感器选址, Si、李亚俊等人^[52-55]分析计算通风网络各分支权重,求解通风网络最小生成树,确定

最优传感器安装网络回路分支以减少传感器数量;刘剑、倪景峰等人^[56-57]针对通风故障检测,利用人工智能算法提高故障识别准确率并基于决策树分析和扫帚模型得到风速传感器的最优布设方案;此外,还有学者采用矩阵分析法研究通风网络各支路传感器所能反映的巷道风量变化范围^[58-59],覆盖范围最大的分支为最优传感器布设位置,减少矿井通风监测盲区。以上研究在实现有效减少矿井风速传感器布设数量的同时,运用数学分析方法、人工智能算法提高了矿井通风监测中的故障分析、风量监测等环节的精度,提高了矿井智能通风系统的运行效率,将此类风速传感器选址优化方法与单点传感器测风优化技术相结合,是未来矿井通风信息一体化智能感知的重要研究方向。

3 结论

(1) 通过总结巷道风流特性研究现状,得出巷道断面风速具有“中间高、四周低”的不均匀分布特点,且巷道断面风速分布特性与巷道壁面粗糙度、断面大小、风速等因素密切相关,是矿井通风参数智能监测技术的重要理论依据。

(2) 对比分析了用于矿井巷道风速测定的机械式风表、压差式风速传感器、超声波风速传感器各自的优缺点及适用范围,揭示了目前矿山常用测风方法存在的弊端,得出了时差法超声波测风技术是矿井风速测定的更优解决方案,能够实现全量程误差小于 0.1 m/s 的实时风速获取,同时提高测风精确度。

(3) 总结了目前传感器数据处理及传感器布设的前沿技术,发现使用人工智能算法能够有效提高计算效率、改善优化效果。针对现有巷道断面平均风速预测模型存在的不足,提出了基于 PSO-GRU 的巷道断面平均风速预测模型,解决了现有模型易陷入局部最优解、调参工作量大的问题,在利用单点风速预测巷道断面平均风速时具有更高的精度,更适用于实时监测巷道风量,为矿山智能通风系统实时获取通风参数提供新的技术参考。

参考文献:

- [1] 郭奇峰,蔡美峰,吴星辉,等.面向 2035 年的金属矿深部多场智能开采发展战略[J].工程科学学报,2022,44(4): 476-486.
GUO Q F, CAI M F, WU X H, et al. Development strategy for deep multi site intelligent mining of metal mines towards 2035[J]. Journal of Engineering Science, 2022, 44(4): 476-486.
- [2] 国家发展改革委,能源局,应急部,等.关于加快煤矿智能化发展的指导意见[EB/OL]. 2020-02-25.
Development and Reform Commission, Energy Bureau, Emergency Department, et al. Guiding opinions on accelerating the development of intelligent coal mines[EB/OL]. 2020-02-25.
- [3] 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 F B, WEI L J, XIA T Q, et al. Principles, key technologies, and preliminary implementation of intelligent ventilation in mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2225-2235.
- [4] 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 F B, XIN H H, WEI L J, et al. Research progress in theory and technology of intelligent ventilation in mines[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 313-328.
- [5] 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 J. Summary of key scientific and technological issues in intelligent ventilation of mines[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(10): 108-111+117.
- [6] 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 X M, YIN H. Theory and technology of intelligent mine ventilation[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2236-2247.
- [7] 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 L, LIU Y Q. Research on intelligent ventilation and key technologies in mines[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 178-195.
- [8] 郭炜舟,沈斌,汪洋,等.葫芦素煤矿智能通风系统建设与应用[J].煤矿安全,2022,53(9): 233-238.
GUO W Z, SHEN B, WANG Y, et al. Construction and application of intelligent ventilation system in hulusu coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(9): 233-238.
- [9] 陈重新,肖务里,胡新明.智能局部通风风系统介绍[J].江西煤炭科技,2009(3): 109-112.
CHEN C X, XIAO W L, HU X M. Introduction to intelligent local ventilation system[J]. Jiangxi Coal Technology, 2009(3): 109-112.
- [10] 栾王鹏.矿井智能通风与实时监测控制系统[J].山东煤炭科技,2019(5): 183-185+191.
LUAN W P. Intelligent ventilation and real-time monitoring control system for mines[J]. Shandong Coal Technology, 2019(5): 183-185+191.
- [11] 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. Dynamic calculation and application of mine ventilation network using monitoring data[J]. Journal of Liaoning University of Engineering and Technology (Natural Science Edition), 2016, 35(12): 1439-1442.
- [12] 杨杰,赵连刚,全芳.煤矿通风系统现状及智能通风系统设计[J].工矿自动化,2015,41(11): 74-77.
YANG J, ZHAO L G, QUAN F. The current situation of coal mine ventilation system and the design of intelligent ventilation system[J]. Industrial and Mining Automation, 2015, 41(11): 74-77.
- [13] 孙亮,孙珍平.矿井大断面巷道风速分布规律及风量监测研究[J].煤炭技术,2022,41(4): 97-100.

- SUN L, SUN Z P. Research on the distribution law of wind speed and wind volume monitoring in large section tunnels of mines[J]. Coal technology, 2022, 41(4): 97–100.
- [14] 王恒, 邱黎明, 何学秋, 等. 不同因素下煤矿巷道断面风速分布规律研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(7): 125–132.
- WANG H, QIU L M, HE X Q, et al. Research on the distribution law of wind speed at the cross-section of coal mine tunnels under different factors[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(7): 125–132.
- [15] 武宇鹏. 井下巷道不同支护形式断面风速的分析研究[J]. 机械管理开发, 2020, 35(10): 116–118.
- WU Y P. Analysis and research on cross-sectional wind speed of different support forms in underground tunnels[J]. Mechanical Management Development, 2020, 35(10): 116–118.
- [16] 胡建华, 赵阳, 周坦, 等. 顶板不平整巷道断面风速分布的多因素影响(英文)[J]. 中南大学学报, 2021, 28(7): 2067–2078.
- HU J H, ZHAO Y, ZHOU T, et al. Multiple factors affecting the distribution of wind speed on the cross-section of uneven roof tunnels[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(7): 2067–2078.
- [17] 王翰锋. 基于 Fluent 巷道断面平均风速点定位监测模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(8): 92–96.
- WANG H F. Simulation study on positioning and monitoring of average wind speed points in tunnel sections based on fluent[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(8): 92–96.
- [18] 宋莹, 刘剑, 李雪冰, 等. 矿井巷道风流平均风速分布规律的试验与模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(6): 146–151.
- SONG Y, LIU J, LI X B, et al. Experimental and simulation research on the distribution law of average wind speed in mine tunnels[J]. Chinese Journal of Safety Sciences, 2016, 26(6): 146–151.
- [19] 丁翠, 何学秋, 聂百胜. 矿井通风巷道风流分布“关键环”数值与实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015, 34(10): 1131–1136.
- DING C, HE X Q, NIE B S. Numerical and experimental research on the key loop of airflow distribution in mine ventilation tunnels[J]. Journal of Liaoning University of Engineering and Technology (Natural Science Edition), 2015, 34(10): 1131–1136.
- [20] 吴洁葵, 李印洪, 李亚俊, 等. 巷道均速圈定位模型试验与修正[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(12): 112–116.
- WU J K, LI Y H, LI Y J, et al. Test and correction of the positioning model for the uniform velocity circle in tunnels[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(12): 112–116.
- [21] 宋莹, 王东, 郭欣, 等. 突扩巷道流场风流分布特征的 PIV 实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(6): 86–91.
- SONG Y, WANG D, GUO X, et al. PIV experimental study on the distribution characteristics of airflow in the sudden expansion tunnel flow field[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(6): 86–91.
- [22] 张京兆, 王艳, 魏引尚, 等. 入口形式对矩形巷道定点测风位置影响研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(6): 154–157.
- ZHANG J Z, WANG Y, WEI Y S, et al. Research on the influence of entrance form on the fixed point wind measurement position of rectangular tunnels[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(6): 154–157.
- [23] 鹿广利, 武赞龙, 赵剑锋. 不同拐弯角度下巷道内风流变化规律的数值模拟[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(12): 116–121.
- LU G L, WU Z L, ZHAO J F. Numerical simulation of airflow variation in tunnels at different turning angles[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(12): 116–121.
- [24] 张浪. 巷道测风站风速传感器平均风速测定位置优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(3): 96–102.
- ZHANG L. Optimization study on the average wind speed measurement position of the wind speed sensor at the tunnel wind measurement station[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(3): 96–102.
- [25] 徐新坤. 煤矿用机械叶片式风速表测量准确度的影响因素[J]. 煤炭与化工, 2016, 39(5): 136–137+140.
- XU X K. Factors affecting the measurement accuracy of mechanical blade anemometers used in coal mines[J]. Coal and Chemical Industry, 2016, 39(5): 136–137+140.
- [26] 蒋泽, 郝叶军, 刘炎. 一种矿用皮托管式风速传感器设计[J]. 工矿自动化, 2012, 38(11): 61–63.
- JIANG Z, HAO Y J, LIU Y. Design of a pitot tube wind speed sensor for mining[J]. Industry and Mine Automation, 2012, 38(11): 61–63.
- [27] 李秉芮, 刘娜, 井上雅弘. 高精度矿用超声波风速测量仪设计[J]. 工矿自动化, 2022, 48(2): 119–124.
- LI B R, LIU N, YASUHIRO I. Design of high-precision ultrasonic wind speed measuring instrument for mining[J]. Industry and Mine Automation, 2022, 48(2): 119–124.
- [28] 刘华欣. 基于超声波传感器的风速风向测量研究[J]. 仪表技术与传感器, 2018(12): 101–104+110.
- LIU H X. Research on wind speed and direction measurement based on ultrasonic sensors[J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(12): 101–104+110.
- [29] 冉霞, 游青山. 基于时差法的矿用超声波风速传感器[J]. 煤矿安全, 2015, 46(7): 116–119.
- RAN X, YOU Q S. Mining ultrasonic wind speed sensor based on time difference method[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(7): 116–119.
- [30] 周川云. 高精度下限超声波风速风向传感器关键技术研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2018.
- ZHOU C Y. Research on key technologies of high precision low lower limit ultrasonic wind speed and direction sensor[D]. Beijing: Coal Science Research Institute, 2018.
- [31] 宋涛, 王建文, 吴奉亮, 等. 基于超声波全断面测风的矿井风网实时解算方法[J]. 工矿自动化, 2022, 48(4): 114–120+141.
- SONG T, WANG J W, WU F L, et al. Real time calculation method for mine air network based on ultrasonic full section wind measurement[J]. Industry and Mine Automation, 2022, 48(4): 114–120+141.
- [32] 游青山. 一种矿用超声波风速传感器的设计[J]. 煤矿安全, 2017, 48(1): 88–91.

- YOU Q S. Design of a mining ultrasonic wind speed sensor[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(1): 88–91.
- [33] 鲁胜麟. 基于阵列式超声波传感器的风速风向测量方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
- LU S L. Research on wind speed and direction measurement method based on array ultrasonic sensors[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022.
- [34] LIU Z J, ZHAO Y T, CHEN S S, et al. Predicting distributed roughness induced transition with a four-equation laminar kinetic energy transition model[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 99: 105736.
- [35] 刘剑, 李雪冰, 宋莹, 等. 无外部扰动的均直巷道风速和风压测不准机理实验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1447–1453.
- LIU J, LI X B, SONG Y, et al. Experimental study on the uncertainty mechanism of wind speed and pressure measurement in uniform straight tunnels without external disturbances[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(6): 1447–1453.
- [36] 张士岭. 煤矿通风巷道断面风速测定与变化规律研究[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(4): 17–20.
- ZHANG S L. Measurement and variation law of cross-sectional wind speed in coal mine ventilation tunnels[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2019, 46(4): 17–20.
- [37] 李雪冰, 刘剑, 秦洪岩, 等. 湍流脉动影响下巷道平均风速单点统计测量方法[J]. 华北科技学院学报, 2018, 15(2): 1–9.
- LI X B, LIU J, QIN H Y, et al. Single point statistical measurement method for average wind speed in tunnels under the influence of turbulent pulsation[J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2018, 15(2): 1–9.
- [38] 刘剑, 李雪冰, 陈廷凯, 等. 矿井定常湍流脉动对通风阻力测试影响的理论分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(5): 22–25.
- LIU J, LI X B, CHEN T K, et al. Theoretical analysis of the influence of steady turbulent pulsation in mines on ventilation resistance testing[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(5): 22–25.
- [39] LALATENDU M, DEVI P M, PRASANTA K. J. Application of wireless sensor network for environmental monitoring in underground coal mines: A systematic review[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2018, 106: 48–67.
- [40] 赵丹, 沈志远, 宋子豪, 等. 智能通风矿井风速传感器数据清洗模型[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(9): 56–62.
- ZHAO D, SHEN Z Y, SONG Z H, et al. Intelligent ventilation mine wind speed sensor data cleaning model[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(9): 56–62.
- [41] 倪景峰, 刘雪峰, 邓立军. 矿井通风参数缺失数据填补方法[J/OL]. 煤炭学报, 1–10[2024-05-21]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0481>.
- NI J F, LIU X F, DENG L J. Method for filling in missing data of mine ventilation parameters[J/OL]. *Journal of China Coal Society*, 1–10[2024-05-21]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0481>.
- [42] 邓立军, 袁金波, 刘剑, 等. 基于 SSA-LSTM 的风速异常波动检测方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 139–147.
- DENG L J, YUAN J B, LIU J, et al. Detection method for abnormal wind speed fluctuations based on SSA-LSTM[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(3): 139–147.
- [43] 张京兆, 熊帅, 范京道, 等. 巷道障碍物对风速监测位置的影响研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(9): 64–72.
- ZHANG J Z, XIONG S, FAN J D, et al. Research on the influence of obstacles in tunnels on the location of wind speed monitoring[J]. *Industry and Mine Automation*, 2023, 49(9): 64–72.
- [44] 李雪冰, 刘剑, 宋莹, 等. 井巷断面内单点风速与平均风速转换机制[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1): 123–128.
- LI X B, LIU J, SONG Y, et al. The conversion mechanism between single point wind speed and average wind speed within the cross-section of the mine roadway[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(1): 123–128.
- [45] 潘竞涛. 基于最小二乘法的风速传感器测量值推导巷道平均风速[J]. 煤炭技术, 2018, 37(1): 213–215.
- PAN J T. Derivation of average wind speed in tunnels based on the measurement values of wind speed sensors using the least squares method[J]. *Coal Technology*, 2018, 37(1): 213–215.
- [46] WEI L J, WANG M W, LI S, et al. Line wind speed distribution model of rectangular tunnel cross-section[J]. *Thermal Science*, 2019, 23: 1513–1519.
- [47] ZHOU L H, YUAN L M, RICK T, et al. Determination of velocity correction factors for real-time air velocity monitoring in underground mines[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2017, 4: 322–332.
- [48] 邵良杉, 闻爽爽. 基于 GRU 神经网络的巷道平均风速获取研究[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(5): 709–718.
- SHAO L S, WEN S S. Research on obtaining average wind speed in tunnels based on GRU neural network[J]. *Gold Science and Technology*, 2021, 29(5): 709–718.
- [49] 卞欢, 刘剑, 刘学, 等. 基于 GA-BP 神经网络的巷道平均风速单点测试研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(5): 57–64.
- BIAN H, LIU J, LIU X, et al. Research on single point testing of average wind speed in tunnels based on GA-BP neural network[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(5): 57–64.
- [50] 文必龙, 李小东. 基于 PSO 算法优化 GRU 神经网络的孔隙度预测[J]. 计算机与数字工程, 2023, 51(11): 2597–2601.
- WEN B L, LI X D. Optimization of GRU neural network for porosity prediction based on PSO algorithm[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2023, 51(11): 2597–2601.
- [51] 刘洋, 张鸿, 徐娟, 等. 改进 PSO 的 SVM 回归模型及在气温预测中的应用[J]. 计算机系统应用, 2023, 32(9): 203–210.
- LIU Y, ZHANG H, XU J, et al. Improved SVM regression model for PSO and its application in temperature prediction[J]. *Computer Systems & Applications*, 2023, 32(9): 203–210.
- [52] 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 minimum spanning tree principle[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(7): 172–175.
- [53] 刘尹霞, 马恒, 杨皓然. 矿井风速传感器可变模糊优选方案[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(10): 1031–1035.
- LIU Y X, MA H, YANG H R. Variable fuzzy optimal selection scheme for mine wind speed sensor[J]. Journal of Liaoning University of Engineering and Technology (Natural Science Edition), 2017, 36(10): 1031–1035.
- [54] 董学林, 陈帅, 赵丹, 等. 最小树原理在矿井风速传感器布置方式上的应用研究[J]. 世界科技研究与发展, 2015, 37(6): 680–683.
- DONG X L, CHEN S, ZHAO D, et al. Research on the application of minimum tree principle in the layout of mine wind speed sensors[J]. World Sci-tech R&D, 2015, 37(6): 680–683.
- [55] SI J H, WANG X R, WANG Y Q, et al. Dynamic monitoring technology of air quantity in mine ventilation system based on optimum location of wind speed sensors[J]. [Iop Conference Series: Earth and Environmental Science](#), 2021, 692: 042036.
- [56] 刘剑, 蒋清华, 刘丽, 等. 矿井通风系统阻变型故障诊断及风速传感器位置优化[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1907–1914.
- LIU J, JIANG Q H, LIU L, et al. Diagnosis of resistance type faults in mine ventilation systems and optimization of wind speed sensor positions[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1907–1914.
- [57] 倪景峰, 乐晓瑞, 常立峰, 等. 基于决策树的矿井通风阻变型故障诊断及传感器优化布置[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(2): 34–39.
- NI J F, LE X R, CHANG L F, et al. Diagnosis of mine ventilation resistance type faults and optimized sensor layout based on decision tree[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(2): 34–39.
- [58] 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 cut set matrix algorithm[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2024, 60(1): 98–105.
- [59] 李秉芮, 王伟, 陈凤梅, 等. 基于有向通路矩阵法的风速传感器最优布置[J]. 工矿自动化, 2021, 47(5): 52–57.
- LI B R, WANG W, CHEN F M, et al. Optimal arrangement of wind speed sensors based on directed path matrix method[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(5): 52–57.

Research Progress on Intelligent Perception Technology for Wind Speed in Mine Tunnels

CHEN Xuanzhong¹, WANG Xiaodong¹, YANG Yijie¹, LYU Yuqi¹, LIU Chang¹, DU Qingwen², XIE Bo²

1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

2. Kunming University of Science and Technology, Faculty of Public Security and Emergency Management, Kunming 650093, Yunnan, China

Abstract: The intelligent mine ventilation systems is a key link of advancing intelligent mine construction and ensuring safe mine production. As the fundamental data source, ventilation parameters are essential for the intelligent construction of mine ventilation systems. However, during the development of intelligent wind speed sensing technology for mine tunnels, there are key scientific and technological issues that need to be addressed, such as optimizing sensor accuracy and reliability, correcting sensor wind measurement errors, intelligent and rapid prediction of average wind speed, and optimizing sensor layout. This paper studies the cutting-edge achievements in the field from aspects such as sensor technology and high-precision intelligent wind speed prediction, summarizes the advantages, disadvantages, and applicable scopes of various technologies, and proposes an intelligent prediction model for the average wind speed in tunnel sections based on the PSO-GRU neural network. This model can effectively improve the accuracy of calculating the average wind speed in mine tunnels and provide a theoretical reference for the development of intelligent sensing technology for ventilation parameters.

Keywords: mine ventilation; tunnel airflow characteristics; wind speed sensor; average wind speed in tunnels; PSO-GRU neural network

引用格式: 陈炫中, 王孝东, 杨懿杰, 吕玉琪, 刘唱, 杜青文, 谢博. 矿井巷道风速智能感知技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(4): 124-134.

CHEN Xuanzhong, WANG Xiaodong, YANG Yijie, LYU Yuqi, LIU Chang, DU Qingwen, XIE Bo. Research progress on intelligent perception technology for wind speed in mine tunnels[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(4): 124-134.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn



通信作者简介:

王孝东, 副教授, 毕业于北京科技大学土木与环境工程学院, 于 2015 年获得采矿工程工学博士学位。主要研究方向是矿井通风与安全、矿山数字化等。先后主持或参与省部级项目及校企合作项目 10 余项; 在国内外学术期刊发表论文 40 余篇, 其中 SCI、EI 论文 20 余篇, 获授权发明专利 10 余项、实用新型专利 10 余项。