

基于 RBF 神经网络的隧道施工自适应控制通风系统

任涛¹, 廖勇², 陈结³, 刘戎³, 黄伟宏¹

(1. 重庆市交通工程质量检测有限公司, 重庆 400067; 2. 重庆市交通规划勘察设计院有限公司, 重庆 401121; 3. 重庆大学 资源与安全学院, 重庆 400044)

摘要:隧道施工过程中会产生大量的有毒有害气体,一方面影响着施工人员和作业机械的健康及寿命,一方面也影响着施工质量和进度,然而通风系统高昂的电费也加重了施工单位的经济负担。为了有效的改善该问题,设计了自适应控制通风系统,该系统用人工神经网络的方法获得隧道风机运行频率和隧道环境参数之间的复杂关系,使得风机可根据隧道环境需求供应风量,减少浪费。此外,为了更好的获得隧道中的环境参数,本研究应用 Ansys Fluent 软件模拟了华蓥山隧道在开挖过程中,甲烷和硫化氢在隧道中的分布情况,模拟结果显示两种气体均大多分布在涡流区,且甲烷比硫化氢扩散范围更大,并在此基础上优化了气体监控传感器的布置。最终通过现场获得的 76 组数据训练并验证 RBF 神经网络,将基于 RBF 神经网络的自适应控制通风系统应用到施工现场,通过电量消耗的对比发现该系统具有较好的节能效果。

关键词:隧道;通风;自适应控制系统;神经网络

中图分类号:U453

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2022)增1-0404-08

Self-Adaptive Control Ventilation System for Tunnel Construction Based on RBF Neural Network

Ren Tao¹, Liao Yong², Chen Jie³, Liu Rong³, Huang Weihong¹

(1. Chongqing Traffic Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Chongqing 400067, P. R. China; 2. Chongqing Traffic Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Chongqing 401121, P. R. China; 3. School of Resources and Safety Engineering Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: During tunnel construction, a large amount of toxic and harmful gases will be generated. On the one hand, it affects the health and life of construction personnel and operating machinery, and on the other hand, it also affects the quality and progress of construction. However, the high electricity bills of the ventilation system also increase the economic burden of the construction unit. In order to effectively improve this problem, this research designed an self-adaptive control ventilation system that uses an artificial neural network method to obtain the complex relationship between the operating frequency of the tunnel fan and the tunnel environmental parameters, so that fans supply air volume according to the needs of the tunnel environment to reduce waste. In addition, in order to better obtain the environmental parameters in the tunnel, Ansys Fluent software was used to simulate the distribution of methane and hydrogen sulfide in the tunnel during the excavation of the Huayingshan Tunnel. The simulation results show that the two gases are primarily distributed in the vortex area, and methane has a larger diffusion range than hydrogen sulfide, and on this basis, the arrangement of gas monitoring sensors is optimized. Finally, the RBF neural network was trained and verified through 76 sets of data obtained on the spot, and the adaptive control ventilation system based on the RBF neural network was applied to the construction site.

收稿日期:2021-12-24(修改稿)

作者简介:任涛(1983—),男,河南荥阳人,博士,教授级高级工程师,主要从事岩土工程检测设计方面的研究。

E-mail:57662097@qq.com

通讯作者:陈结(1984—),男,湖南邵阳人,博士,教授、博士生导师,主要从事岩土工程方向研究。

E-mail:jiechen023@cqu.edu.cn

基金项目:重庆市自然科学基金(cstc2020jcyj-msxmX1076);国家自然科学基金(51774057)

The comparison of power consumption found that the system has better energy-saving effects.

Keywords: tunnel; ventilation; self-adaptive control system; RBF neural network

0 引言

通风系统为隧道提供新鲜空气,排除各种有毒有害气体,稀释粉尘浓度,为施工人员和作业机械提供良好舒适的工作环境,在隧道施工安全系统中扮演着重要的角色。但长期以来,其也以高能耗使隧道施工单位承受着沉重的经济负担。目前,隧道施工企业急需一种能够提高通风效率且具有节能效果的通风系统。

目前,长大隧道通风常采用压入式软通风管道的通风方式^[1-4],新鲜风由软管进入掌子面,清洗掌子面后污风从隧道排入大气中。通常风机一旦接入电网便以最大频率运行,不会再做改变。针对运营期隧道通风系统的控制已经有了较多的控制方法,一般选取隧道中的能见度和一氧化碳浓度两个参数作为调控依据,利用前馈式模糊控制、反馈控制法、神经网络控制等方法对风机进行控制^[5-8]。Zhang 等^[9]研究了竖井位置和直径对自然通风的影响,提出了射流风机的控制策略。Bogdan 等^[10]提供了一种公路隧道纵向通风控制方法,包括喷射风扇数量的预测和污染物水平的模糊控制,加快了时间响应并使能耗降低。Chen 等^[11]在给出传感器和控制元件分配的布局基础上,建立了模糊逻辑控制模型。将隶属函数定义、推理和去模糊化的模糊逻辑控制(FLC)应用于通风控制。Karakas 等^[12]引入预测模糊控制,研究了模糊逻辑控制(FLC)隧道通风系统中的应用。并与 PID 控制器得到的结果进行对比,使污染程度保持在允许范围内的同时,大大降低电力消耗。Šulc 等^[13]提出了一种复杂道路隧道运行通风控制的新方法,控制结构是前馈自适应逻辑,该控制方案已通过捷克共和国布拉格布兰卡隧道综合体的长期运行评估得到验证。

针对施工期隧道系统的通风控制,李力等^[14]设计了一种基于模糊控制器的变频通风系统,根据隧道施工作业面的污染程度通过模糊控制器推理运算得到控制电压来控制通风系统的通风量大小。从而实现节能增效的目的。刘石磊等^[15]提出了一种先进的系统结构框架,引入了机器学习算法对风

机频率进行控制。

对于施工隧道的流场和污染物的扩散,在矿山巷道中已有大量的研究。Parra 等^[16]通过数值和试验研究了 3 种通风系统的流场,揭示了死区空间分布和局部空气平均年龄。Chang 等^[17]采用不同的 CFD 模型计算了 CO 浓度分布,推导了隧道施工周期的通风时间估计函数。Hargreaves 等^[18]用 CFD 模型研究了连续采煤机在切割不同阶段的通风流动,并通过全尺寸实验验证了结果。Fang 等^[19]揭示了平行隧道再循环通风系统中交叉通道附近的流场和有害气体浓度分布。Diego 等^[20]研究了竖井通风系统中连续采煤机和铰接式卡车周围的压力损失。Toraño 等^[21]研究了混合通风系统中掘进机周围的气流和粉尘浓度。Sasmito 等^[22]分析了煤矿井下不同通风系统的空气速度场和甲烷浓度。

从以上的文献中可以看出,目前的隧道通风系统还存在较多的问题,智能化的通风系统还未真正出现;且在研究智能通风系统时,往往会忽略传感器的布局,传感器的布局直接影响着隧道环境监测结果的准确性,也直接影响着智能通风系统的通风效果。

本文以华蓥山隧道为研究对象,通过数值模拟的方式探究隧道施工期间关键有害气体的运移和分布规律,并通过分布运移规律优化隧道安全监控系统,合理布置隧道环境有害气体传感器,做到能够更加准确的监测隧道中的环境状况;并通过 RBF 神经网络建立隧道环境中各项环境参数与通风系统变频控制器之间的关系。通过环境状况直接控制隧道风机的供风量,做到隧道环境良好时提供合理的供风量,以降低通风机能耗,当隧道环境恶劣时,提供足够的风量,快速降低有害气体浓度,快速改善隧道环境。

2 隧道智能通风控制系统组成

如图 1 所示,隧道通风自适应控制系统由安全监测系统、自适应分析系统、传输通讯系统和变频风机组成。安全监控系统实时的读取安装在隧道各处的传感器,将所有传感器的数据储存并显示在

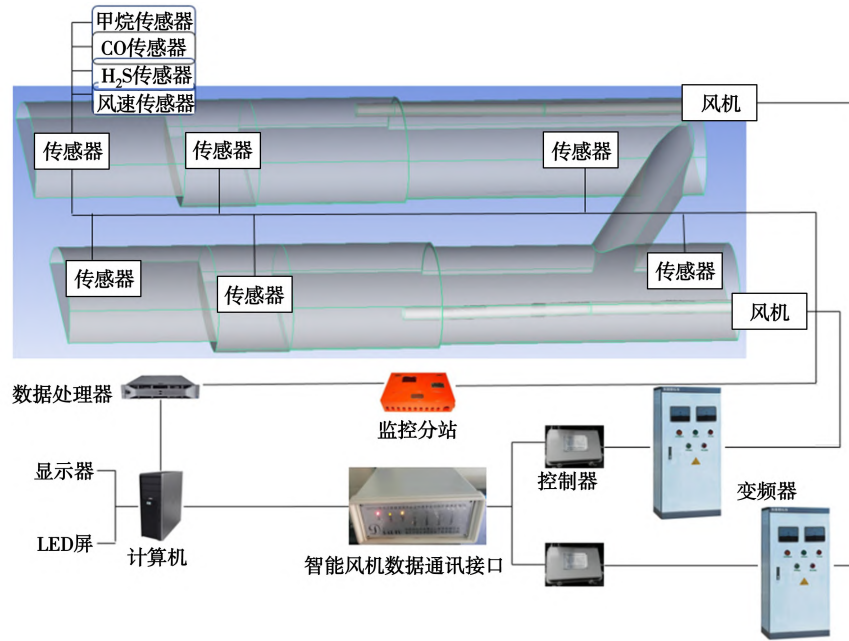


图 1 隧道智能通风结构图

Fig. 1 Structure chart of intelligent ventilation in tunnel

监控室内的显示器上,自适应分析系统实时读取安全监控系统的监控值,分析计算风机运行频率,并将频率信号下发至变频器。变频器通过改变风机运行频率改变风机的风量并降低耗电量。这样既满足了隧道通风的需求,又降低了风机的消耗。系统结构如图 1,工作原理图如图 2。

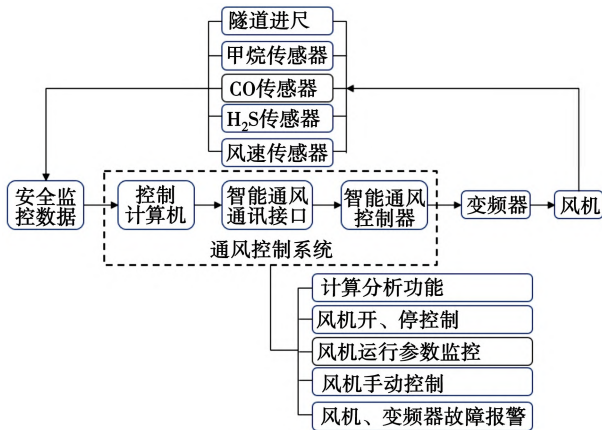


图 2 隧道通风自适应控制系统工作原理

Fig. 2 The principle of the tunnel ventilation self-adaptive control system

安全监测系统负责实时监测隧道大气环境。本系统在渝广高速公路华莹山隧道现场测试并使用。根据地质资料显示,隧道内布置风速传感器、甲烷传感器、一氧化碳传感器和硫化氢传感器。自适应控制系统负责将隧道中的环境参数转化为风机的运行频率。

目前,风机的变频技术及信号传输技术均为成熟的技术,安全监控系统也较为成熟,但是传感器的布置仍旧不能准确的反应隧道中的实际情况。因此后文将根据有毒有害气体的分布规律确定传感器的布置方式。并采用智能算法找到隧道环境参数和风机运行频率之间的关系。

3 有毒有害气体分布规律及传感器布置优化研究

3.1 有毒有害气体分布与扩散规律研究

华莹山隧道在开挖过程中采用台阶法施工,掘进当中隧道断面共有 4 种断面形状同时存在:隧道分为上台阶断面部分、全断面部分、下台阶和仰拱填充完成后形成断面部分以及二衬施工完成后形成的断面 4 个部分。模型根据实际情况进行简化后建立,隧道模型长度 90 m,其中上台阶 20 m,全断面开挖段 10 m,下台阶回填形成断面模型长度 20 m,二衬施工结束后形成断面 40 m,风筒出口在距离掌子面 30 m 处,左右洞相距 30 m。

因此计算湍流模型选择 RNG k- ϵ 模型十分符合。隧道壁面与风筒壁面设置为无滑移固壁,隧道洞口设置为压力出口,风筒进风处设置为质量入口,瓦斯均按照质量流量流入,设置为 0.018 kg/s。

利用 CFD Fluent 计算的隧道单洞风流场如图 3。可以看出,从风筒出口到掌子面这一段区域内,风流形成一个环形,环形外部有新鲜风从风筒射出

后进入环形区域,清洗掌子面后从环形的另外一侧射出,风流结构可以分为射流区、涡流区和回流区,且在出口处风流达到均匀并且风速稳定。由于模型在建立时考虑了隧道施工全断面开挖的情况,此阶段断面突然增加,在这一部分会产生涡流区。从模型中可以判定下台阶断面突然增加的部分风速较小。

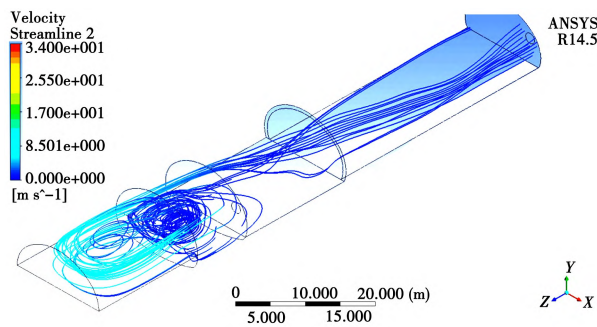


图3 隧道掘进工作面风流流线图

Fig. 3 Airflow diagram of tunnel heading face

对有毒有害气体的研究采用甲烷和硫化氢作为特征气体,利用 CFD Fluent 研究其在隧道中的分布特性,假设瓦斯均是从掌子面均匀涌出,在 FLUENT 中使用组分传输模型 (Species Model) 来模拟有毒有害气体与风流的混合扩散过程。

计算设置为掌子面流出瓦斯,左、右洞瓦斯均按照质量流量流入。图4为瓦斯中甲烷的模拟结果,可以看出,甲烷明显分布在回流区,而且回流区的甲烷浓度明显高于射流区和涡流区,并在回流区中延伸了一段距离。

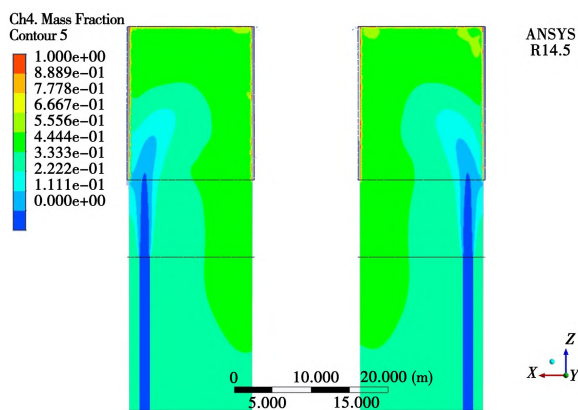


图4 左、右洞瓦斯分布

Fig. 4 CH_4 distribution in left and right holes

截取隧道出口方向上距离掌子面 25 m, 40 m 断面上瓦斯的扩散分布规律,如图5(a)和(b)。从图中可以看出,在距离掌子面 25 m 时,瓦斯仍在

远离风筒的另一侧的上部以及顶部聚集。在 40 m 时,瓦斯才在隧道内分布较为均匀。

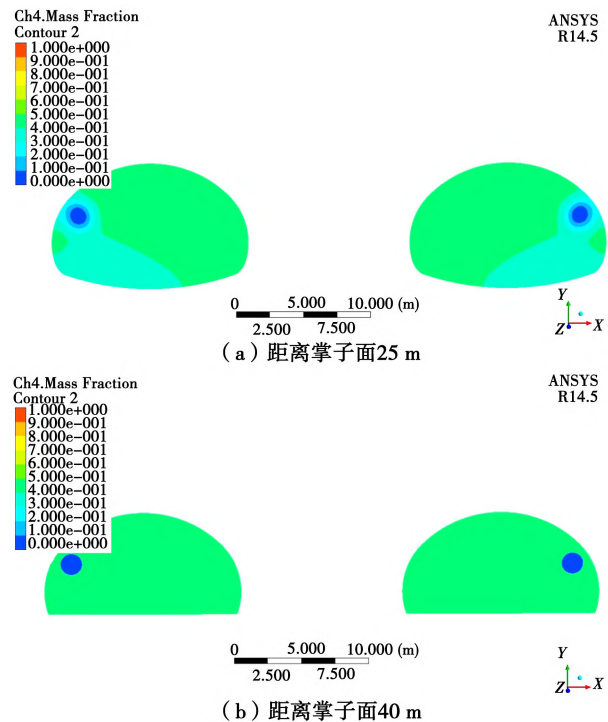


图5 隧道断面甲烷分布

Fig. 5 CH_4 distribution of tunnel section

再将计算设置为掌子面流出硫化氢,硫化氢同样按照质量流量流入,流量为 0.000 2 kg/s。图6为瓦斯中硫化氢的模拟结果,硫化氢主要分布在掌子面附近,其余小部分多分布在涡流区,由于射流区和回流区的冲刷,故远离掌子面的硫化氢气体集中在涡流区,且涡流区中并未向洞口处过多延伸。

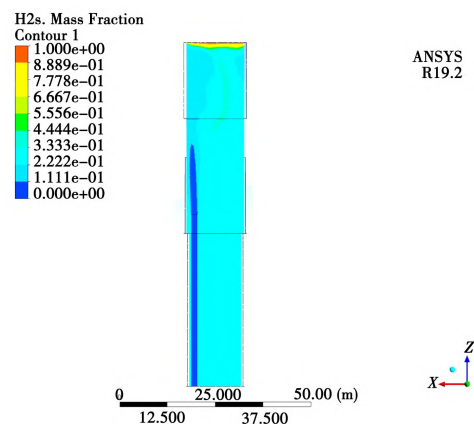


图6 单洞硫化氢分布

Fig. 6 H_2S distribution in single hole

截取隧道出口方向上距离掌子面 25 m、40 m 断面上硫化氢的扩散分布规律,如图7(a)和(b)。

从图中可以看出,硫化氢在两处断面的分布浓度小于甲烷,在距离掌子面 25 m 时,硫化氢在远离风筒的另一侧的顶部聚集,且聚集范围远小于甲烷积聚范围。在 40 m 时,硫化氢同样聚集在远离风筒一侧的上部,且聚集范围更小。

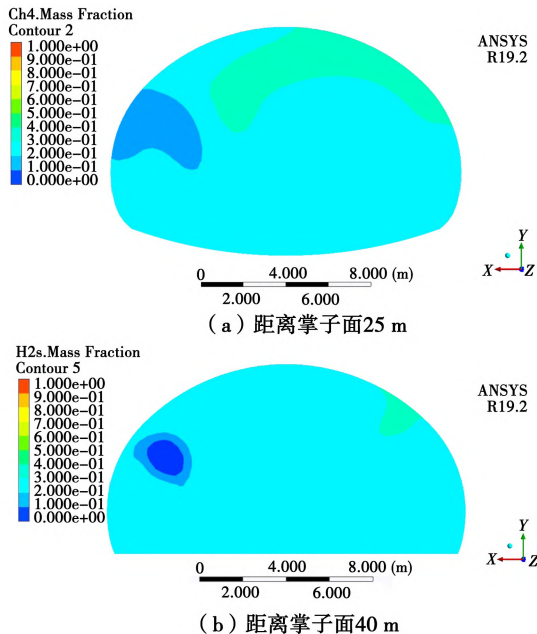


图 7 隧道断面硫化氢分布

Fig. 7 H₂S distribution of tunnel section

3.2 传感器布置优化研究

目前有毒有害气体传感器大多布置在钻爆台车、二衬台车和隧道回风中。台车上的传感器一般布置在台车左、中、右部各一台。从以上模拟结果来看,隧道中有毒有害气体并不会均匀的分布在隧道中,且隧道左、中、右部之间有毒有害气体浓度差较大,会使得同一位置处的三台传感器监测的浓度值也有较大的差别,这样的测试结果将直接影响自适应控制系统的分析结果。

因此现有的布置方式并不合理,合理的传感器布置方式应当根据有毒有害气体的分布确定。从以上的计算结果来看:首先,掌子面台车上的瓦斯传感器无需左、中、右这样分布布置,掌子面台车仅需布置两台即可,第三台传感器应当布置在隧道回流区中;其次,由于瓦斯密度较小,往往会在顶部聚集,计算结果也呈现出这样的分布,因此回流区中瓦斯传感器的位置要具有一定的高度。一氧化碳和硫化氢也应当遵循这样的布置方式,但是需要根据气体的密度确定回流区内传感器的布置高度,例如硫化氢重度大于空气应当布置在下部。

4 自适应控制系统开发

4.1 控制系统功能

自适应控制系统是隧道风机智能变频控制系统的核心部件,承担了隧道风机智能变频控制能系统的数据读取、计算和分析等功能。主要功能有:①计算与分析功能,通过读取隧道安全监控系统的监控值,计算分析当前状态下风机所需要的运行频率;②控制风机的开启与停止;③风机运行监控,监控风机运行的各项参数及故障报警;④人工控制与智能控制的切换,系统需要提供人机交互平台,使操作人员可以人为的输入运行频率;⑤风机、变频器故障报警功能。

4.2 控制系统算法开发

目前,规范和设计计算中均为没有能将隧道环境参数转化为风机运行频率的方法和公式。且每一个隧道中的环境参数也不尽相同,有些隧道有瓦斯,有些隧道没有,因此采用公式化的方法建立环境参数和运行频率的关系是不可能的。本研究中采用神经网络寻找他们之间的关系。神经网络的核心是通过网络学习已有数据,通过已有数据寻找两者之间的关系,并建立相应的网络。这个过程中的已有数据称为样本,因此想要建立网络首先需要获得样本数据集。如前所述,目前规范和设计中都没有环境参数和风机运行频率之间的关系,也没有相应的样本数据,因此首先需要建立样本数据获取方式。

首先查找相关作业规程,合理制定各污染物浓度分级。《铁路瓦斯隧道技术规范》中规定,隧道浓度降到 0.3% 以下时可停止通风且瓦斯的最高允许浓度为 0.5%。《煤矿安全规程》规定,隧道内硫化氢浓度最大不能超过 0.000 66%,即 6.6 ppm。空气中硫化氢浓度达到 1.0 ppm 时,会有臭鸡蛋气味,会对人的嗅觉造成损伤。《工作场所有害因素职业接触限值化学有害因素》中规定,在非高原地区,一氧化碳的短时间接触最高浓度为 30 mg/m³,即 24 ppm。同样在《煤矿安全规程》中也要求一氧化碳的最大浓度是 24 ppm。为了兼顾施工安全、作业人员身心健康和节能,现结合以上有关规范或规程将施工环境中甲烷、H₂S 和 CO 的浓度分为五个级别。然后根据各污染物浓度级别对应的时间,调节风机的运行频率,直到找到符合表 1 中时间的频率值,由此获得样本数据。此外,为了减小频繁的改变频率对风机轴承等造成的损害,程序设置,

当计算频率和当前运行频率差小于 3 Hz 时,风机运行频率不做改变。

表 1 各污染物浓度级别与排解时间

Table 1 Concentration levels of various pollutants and their exclusion schedule			
甲烷浓度/%	H ₂ S 浓度 /ppm	CO 浓度 /ppm	运行频率 /Hz
0.0~0.1	0.0~0.5	0.0~0.1	基础频率
0.1~0.3	0.5~3.0	1.0~10.0	30 min 内降低至基础频率
0.3~0.4	3.0~5.0	10.0~18.0	20 min 内降低至基础频率
0.4~0.5	5.0~6.6	18.0~24.0	15 min 内降低至基础频率
>0.5	>6.6	>24	50

用以上方法试验得到隧道不同大气环境下所需风机运行频率的最小值,筛选可用数据训练人工神经网络。试验历时近 3 个月,隧道向前掘进 178 m,期间瓦斯与硫化氢均未出现超限情况,但由于隧道作业机车工作,一氧化碳出现过超限的情况。在记录的所有数据中选取 70 个具有代表性的监测数据,同时人为加入 6 组超限值作为样本数据集。

随机选取上述 76 组数据中的 68 组对 RBF 神经网络进行训练。本研究中 RBF 神经网络的基本结构如图 8 所示。由于风机运行频率是由甲烷浓度、一氧化碳浓度、硫化氢浓度、风速和隧道进尺 5 个变量共同决定的,因此 RBF 神经网络的输入层和输出层节点数为 5 和 1。

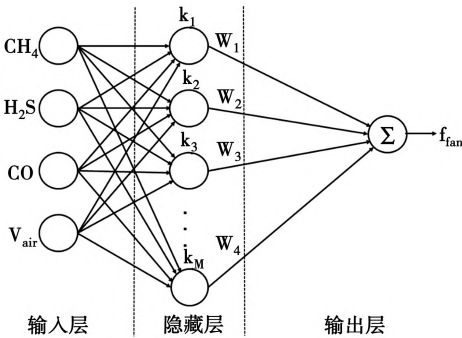


图 8 RBF 神经网络基本结构

Fig. 8 Basic structure of RBF network

隐藏层传递函数为高斯核函数,输出层的传递

函数为线性函数。最常用的径向基函数是高斯核函数,表达形式为:

$$\varphi(\|x - xc\|) = \exp\left\{-\frac{\|x - xc\|^2}{(2\sigma)^2}\right\} \quad (1)$$

式中:xc 为核函数中心;σ 为函数的宽度参数。

训练结束后,网络会将剩余 8 组数据利用已经训练好的网络计算获得预测值,真实值与预测值对比结果见表 2。

表 2 RBF 网络计算预测值与真实值

Table 2 Predicted values by RBF network calculates and actual values				
序号	真实值	预测值	误差	拟合度
1	50	46.793 3	0.064 1	0.991 25
2	31	32.242 8	0.040 1	
3	45	42.389 4	0.058 0	
4	31	30.776 3	0.007 2	
5	31	31.570 9	0.018 7	
6	31	31.504 8	0.016 3	
7	41	40.120 7	0.021 4	
8	32	33.325 7	0.041 4	

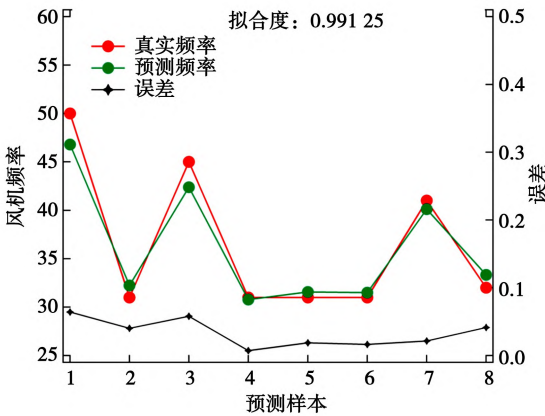


图 9 RBF 网络计算结果对比曲线

Fig. 9 Comparison curves of RBF network calculation results

每次训练都是随机选取,因此每次计算出的拟合度有所不同,选取拟合度最高的作为最终训练结果。该结果即为自适应控制系统的控制算法,通过 RBF 神经网络获得隧道环境参数与风机运行频率之间的关系将被直接应用在自适应控制系统中。

5 现场应用实例

利用上述 RBF 神经网络训练结果控制风机变

频器,实现隧道通风系统自适应控制。将该系统在华蓥山隧道进行试用,调节稳定后对比风机在使用自适应控制前后一个星期的用电量,电表值见表 3。

在自适应变频控制系统试用后的一个星期内,隧道向前推进了 22.5 m,风阻变大,风压变大。但自适应变频通风系统将大部分不需要的风量节省下来,使得通风系统能够在保证隧道施工安全的情况下降低通风机的能耗。相比未使用该系统,使用该系统的相同施工工区节能率达 41.5%。

表 3 试验前后电表统计

Table 3 Statistics of the meter before and after the test

	未使用自适应 变频控制前	使用自适应 变频控制后
测试时间/d	7	7
初始值	009502	009923
结束值	009650	010010
倍率	100	100
用电量	14 870	8 700

6 结论

基于 RBF 神经网络的隧道施工自适应控制通风系统使得风机的运行频率可以根据隧道的需要供给,解决了隧道风机接入电网后始终以一个状态运行造成电量浪费的问题,可以兼顾施工安全、作业人员身心健康和节能,为隧道施工的通风控制提供了一种新的思路和方法,具有重要意义。

本文首先研究了隧道中有毒有害气体的分布规律,通过分布规律优化了隧道中传感器的布置方式,并提出将隧道回流区中布置传感器的方式来提高监控准确性;此外,利用 RBF 神经网络获取隧道环境参数和风机运行频率之间的关系,研究首先制定了样本数据集的获取方式,并利用样本数据来训练神经网络,选取拟合度较高的网络作为最终的训练结果应用到自适应控制系统中,并依托自适应控制系统组建了隧道施工自适应通风控制系统;该系统在华蓥山隧道进行了实际应用,应用效果显示,使用该自适应变频控制系统可使相同施工工区节能率达 41.5%。

参考文献 (References)

- [1] 赖涤泉,朱京国,郭京波. 长梁山双线铁路隧道施工通风系统研究与试[J]. 石家庄铁道学院学报, 2003(02): 28-30,80.
- [2] 赖涤泉,彭道富. 秦岭铁路隧道 II 线出口平导独头掘进 9km 施工通风系统的研究与实现[J]. 铁道标准设计, 2002(9): 53-55.
- [3] Wallis S. Avoiding the NATM downfall[J]. Tunnels and Tunnelling, 1991, 22(9): 46-49.
- [4] Harding P G. Fresh air for Frejus vent shaft excavation in Europe's top tunnel[J]. Tunnels and Tunnelling, 1998, 20(6): 32-37.
- [5] 何川,李祖伟,方勇. 公路隧道通风系统的前馈式智能模糊控制[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(5): 575-579.
- [6] 张光鹏,雷波. 公路隧道纵向通风神经网络在线控制[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(6): 765-768.
- [7] 朱德康. 基于智能控制的隧道通风节能系统的研究[D]. 长沙:湖南大学, 2007.
- [8] 余鹏. 基于前馈式模糊控制的公路隧道通风研究系统[D]. 太原:太原理工大学, 2011.
- [9] Zhang Z Q, Zhang H, Tan Y J, et al. Natural wind utilization in the vertical shaft of a super-long highway tunnel and its energy saving effect[J]. Building and Environment, 2018, 145: 140-152.
- [10] Bogdan S, Birgmajer B, Kovacic Z. Model predictive and fuzzy control of a road tunnel ventilation system[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2008, 16(5): 574-592.
- [11] Chen P H, Lai J H, Lin C T. Application of fuzzy control to a road tunnel ventilation system[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 100(1-3): 9-28.
- [12] Karakas E. The control of highway tunnel ventilation using fuzzy logic[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2003, 16(7-8): 717-721.
- [13] Šulc J, Ferkl L, Cigler J, et al. Optimization-based control of ventilation in a road tunnel complex[J]. Control Engineering Practice, 2017, 69: 141-155.
- [14] 李力,危宁. 隧道施工通风系统模糊控制方法研究[J]. 人民长江, 2008, 39(2): 43-45, 108.
- [15] 刘石磊,耿伟,崔立志,王栋,卜旭辉. 基于工业以太网的隧道施工通风环境参数自动监控系统研究[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(11):

- 1396-1403.
- [16] Parra M T, Villafruela J M, Castro F, et al. 2006. Numerical and experimental analysis of different ventilation systems in deep mines [J]. Building & Environment, 2006, 41: 87-93.
- [17] Chang X K, Chai J R, Luo J P, et al. Tunnel ventilation during construction and diffusion of hazardous gases studied by numerical simulations [J]. Building and Environment, 2020, 177: 106902.
- [18] Hargreaves D M, Lowndes I S. The computational modeling of the ventilation flows within a rapid development drivage [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22 (2): 150-160.
- [19] Fang Y, Fan J G, Kenneally B, et al. Air flow behavior and gas dispersion in the recirculation ventilation system of a twin-tunnel construction [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 58: 30-39.
- [20] Diego I, Torno S, Toraño J, et al. A practical use of CFD for ventilation of underground works [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26: 189-200.
- [21] Toraño J, Torno S, Menendez M, et al. Auxiliary ventilation in mining roadways driven with road headers: validated CFD modelling of dust behavior. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26: 201-210.
- [22] Sasmito A P, Birgersson E, Ly H C, et al. Some approaches to improve ventilation system in underground coal mines environment - a computational fluid dynamic study [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 34: 82-95.

(上接 403 页)

- [13] 侯公羽, 刘宏伟, 李晶晶, 等. 基于开挖卸荷效应的地铁隧道施工过程数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增1): 2915-2924.
- [14] 王金麒, 李林安, 陈茜, 等. 水平分层土质条件下浅埋隧道掌子面支护稳定性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(2): 196-204.
- [15] 汪大海, 贺少辉, 刘夏冰, 等. 地层渐进成拱对浅埋隧道上覆土压力影响研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2311-2322.
- [16] Wang Z, Yao W, Cai Y, et al. Analysis of ground surface settlement induced by the construction of a large-diameter shallow-buried twin-tunnel in soft ground [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 520-532.
- [17] 杨峰, 阳军生, 赵炼恒. 浅埋隧道工作面破坏模式与支护反力研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(02): 279-284.
- [18] Fang Q, Liu X, Zhang D, et al. Shallow tunnel construction with irregular surface topography using cross diaphragm method [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 68: 11-21.
- [19] Abdellah W R, Ali M A, Yang H S. Studying the effect of some parameters on the stability of shallow tunnels [J]. Journal of Sustainable Mining, 2018, 17(1): 20-33.
- [20] 刘攀. 成都地区排桩支护结构土压力研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [21] 吴寰鹏, 张恒. 成都地铁 17 号线卵漂石地层水文地质特征及空间分布规律[J]. 四川建筑, 2020, 40(3): 127-129.
- [22] 吴昌胜, 朱志铎. 不同隧道施工方法引起地层损失率的统计分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(1): 19-30.
- [23] Tu H, Zhou H, Qiao C, et al. Excavation and kinematic analysis of a shallow large-span tunnel in an up-soft/low-hard rock stratum [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 97, 103245. 1-103245. 13.