

# 四面山特长隧道风机智能控制系统的开发与设计

李阿蒙, 陈小锐

(中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610066)

**摘要:** 通常的隧道施工通风基本是“一风吹”状态, 无论隧道施工处于何种状态, 其风机均以额定的运行频率运行而造成大量的电能消耗。阐述了一种能够根据隧道中的大气环境以及隧道进尺计算风量的风机控制系统的设计过程以及其在四面山特长隧道中的应用, 取得了较好的效果, 解决了特长隧道的通风稳定及能耗问题。

**关键词:** 四面山; 特长隧道; 智能控制系统; 通风; 开发与设计

**中图分类号:** U45; U455; U455.3; U455.7; U455.1 **文献标识码:** B

**文章编号:** 1001-2184(2022)03-0115-04

## Development and Design of Intelligent Ventilation Fan Control System in Simianshan Extra-long Tunnel

LI Ameng, CHEN Xiaorui

(Sinohydro Bureau 5 Co., LTD, Chengdu, Sichuan, 610066)

**Abstract:** Normally, ventilation required during tunnel construction is realized through keeping the fans operating all the time with no variation of the rated frequency which causes large consumption of electricity. This paper expounds the design process of a kind of control system for ventilation fan through which the air volume can be calculated according to the air quality in the tunnel and the excavation progress, as well as the application of this system in Simianshan Tunnel. This system brings good results and the problems of ventilation stability and energy consumption during construction of extra-long tunnels have been solved.

**Key words:** Simianshan; extra-long tunnel; intelligent control system; ventilation; development and design

## 1 概述

重庆江习高速公路起于重庆江津, 止于贵州习水, 支线为四面山旅游景区专线, 其中支线所属的四面山特长隧道全长 4 880 m, 为双向四车道分离式隧道, 设计时速为 80 km/h。因地形限制, 四面山特长隧道采用双向开挖掘进方式, 最大单向掘进深度达 2 880 m。施工过程中, 其通风是极大的难题, 随着隧道的不断掘进, “一风吹”的通风方式导致隧道内的通风效果越来越差; 且随着通风时间的增加, 通风能耗增大。为解决这一问题, 项目部技术人员对四面山特长隧道风机智能控制系统进行了开发与设计并予以应用。实践证明: 采用隧道风机智能控制系统, 极大地提高了隧道的通风效果。

## 2 隧道风机智能控制系统的设计

### 2.1 基于 RBF 神经网络隧道通风的基本思路

隧道施工通风的作用主要有三个: (1) 为隧道内的工作人员供给足够的新鲜空气; (2) 置换有毒

有害气体及爆破粉尘; (3) 提供适宜的洞内施工环境。故隧道施工通风的风量应与隧道中的大气环境、通风阻力等因素存在一定的内部联系。例如, 当隧道中大气环境较好、有毒有害气体均处于安全范围时, 隧道施工的风量仅需根据施工时最多的人数计算即可; 而根据隧道通风难度最大时选择的大功率风机, 其前期提供的风量大大超出了隧道需求, 浪费亦在此时产生; 当有毒有害气体不在规范要求的范围内 (如瓦斯浓度达到 0.3%) 时, 此时的风量除了满足施工人员需要外, 还需要满足稀释瓦斯的需求, 因此, 此时的风量往往大于没有瓦斯出现的情况, 但其仍然达不到通风难度最大时的需风量, 浪费仍然存在。然而, 风机是否可以提供不同时段的需求风量? 是否可以动态调整隧道轴流风机转速, 从而降低能耗? 风量与有毒有害气体浓度之间又存在什么样的关系? 而这些复杂的非线性关系无法采用传统的数学方法建立连接。因此, 借助神经网络寻求它们之间的关系就成为了一种选择。

收稿日期: 2022-04-04

神经网络是一种较为新型的数学建模方法,利用原记录的数据可以找到输入与输出之间的各种关系<sup>[1]</sup>。而其隐射关系宛如一个“黑匣子”将输入层与输出层连接起来。经过优化的网络,任何满足输入层范围的数据都可以通过“黑匣子”中的隐射关系计算出输出值。影响其计算精确度的因素主要有两点:(1)数据是否足够多并具有代表性;(2)网络的结构特点亦影响精度。因此,在选取网络时必需十分注意。

RBF网络可以逼近任意非线性函数,可以处理难以解析的规律并具有良好的泛化能力,学习收敛速度比较快。基于其具有的这些特点,可以采用RBF神经网络模拟隧道施工通风运行频率与隧道大气环境以及隧道进尺之间的关系。

## 2.2 RBF神经网络

1985年,Power提出了一种多变量插值的径向基函数(Radial Basis Function, RBF)方法,该方法为多层次前向型网络的学习提供了一种有效而新颖的手段<sup>[2]</sup>。RBF神经网络的结构与多层次前向型网络类似,是一种三层前向型神经网络。

根据隐含层神经元数目上的不同,RBF神经网络的学习算法在总体上可以分为两大类:(1)隐含层神经元数目逐渐增加,经过其不断的循环和迭代,调整与修正其权值和阈值;(2)隐含层神经元数目的确定,权值和阈值由线性方程组接触<sup>[3]</sup>。

## 2.3 RBF神经网络的设计

神经网络系由输入、隐含和输出层三部分组成,而确定相应层的数目对于网络的构建较为重要。根据所进行的研究得知:在四面山特长隧道内部共布置有监控传感器四类,即甲烷浓度传感器、硫化氢浓度传感器、一氧化碳传感器和风速传感器,因此,输入层的节点数为4。对于输出层来说,由于输出层输出的结果是风机的运行频率,因此,

输出层的节点数为1。由于RBF神经网络为非线性,故其初始值的选取很重要。初始值太大,加权后的输入容易处于激活函数饱和区以内而导致网络调节停顿。因此,最好使神经元的输出值接近零,故权值的初始值常取-1与1之间的随机数。

## 2.4 RBF神经网络的训练与仿真

在RBF神经网络的结构已经确定的前提下,利用已获得的数据对其进行训练并待训练结束后对剩余的样本进行仿真,将剩余样本的数据与仿真数据进行对比后,选取对比结果最好的一组作为最终训练结果。

### 2.4.1 基础频率的确定

根据对隧道风流结构的研究以及对隧道中有毒有害气体扩散特征的探究,在现场试验时确定了当时隧道施工的大气环境下所需要的最低频率。初期,首先需要确定风机运行的基础频率。所谓基础频率是指隧道在施工环境良好的情况下仍需满足的最小风量时对应的频率。工程中一般根据轴流风机运行的曲线进行相关的参数运算,称为风机的相似论。

隧道中的基本风量根据同时工作的最多人数计算:

$$Q=4N$$

式中  $Q$  为隧道的基本风量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $N$  为隧道施工时同时工作的人数,个。

首先计算所需的风量。当风机在不同的隧道进尺中提供相同的风量时,风机运行频率的平方与隧道进尺成正比,因此,风机在不同隧道进尺时的基础频率可以计算。根据以上公式,记录风机正常运转的最小频率,在该运行频率下,其风量为满足工作人员所需的最小风量。现场记录的基础频率见表1,该记录结果基本符合计算规律。由此可以计算出不同隧道进尺对应的基础频率。

表1 基础频率表

隧道进尺 /m	基础频率 /Hz	隧道进尺 /m	基础频率 /Hz	隧道进尺 /m	基础频率 /Hz
886	24	1 013	26	1 199	28
856	24	973	26	1 225	29
823	24	1 071	27	1 251	29
942	25	1 109	27	1 280	29
903	25	1 065	27	1 298	30
958	25	1 131	28	1 309	30
1 038	26	1 172	28	1 328	30

### 2.4.2 运行频率的确定

在基础频率确定后,还需要确定变频器在不同环境下的输出频率。智能控制系统未使用时其通过模拟量 VI 值进行控制以改变变频器的输出频率。模拟量 VI 值由输出的电压信号控制其变频器的运行频率,电压的输入信号 0~10 V 与变频器的输出频率 0~50 Hz 对应,频率可连续变化,电压亦可连续变化。因此,试验期间,变频器运行频率的改变均采用该方法。

在确定不同有毒有害气体中的浓度情况下风机需要运行的最小频率时,此次研究采用了以下方法:《铁路瓦斯隧道技术规范》TB10120-2019 要求:当隧道中的浓度在 0.3% 以下时,可以停止隧道通风且瓦斯最高允许浓度为 0.5%。因此,所制定的甲烷浓度与运行频率对应情况见表 2。

表 2 甲烷浓度与运行频率对应表

甲烷浓度 / %	运行频率 / Hz
(CH <sub>4</sub> )	基础频率
(CH <sub>4</sub> )~0.3	1 h 降低至基础频率
0.3~0.4	1.5 h 降低至基础频率
0.4~0.5	2 h 降低至基础频率
大于 0.5	50

《煤矿安全规程》2002 年新版规定:隧道内硫化氢的最大浓度不能大于 0.000 66%,即 6.6 ppm。因此,所制定的硫化氢浓度与运行频率的对应情况见表 3。

表 3 硫化氢浓度与运行频率对应表

硫化氢浓度 / ppm	运行频率 / Hz
e (H <sub>2</sub> S)	基础频率
e (H <sub>2</sub> S)~1	1 h 降低至基础频率
1~3	1.5 h 降低至基础频率
3~6.6	2 h 降低至基础频率
大于 6.6	50

通常,在非高原地区,一氧化碳短时间接触的最高浓度为 30 mg/m<sup>3</sup>,即 24 ppm。同样,在《煤矿安全规程》2002 年新版中要求的一氧化碳的最大浓度为 24 ppm<sup>[4]</sup>。所制定的一氧化碳浓度与运行频率的对应情况见表 4。

综上所述,采用上述方法测得最小运行频率并选取同一时刻所计算的最大值。例如,在同一时刻计算得到的甲烷频率为 32 Hz,一氧化碳频率为 35 Hz,硫化氢频率为 34 Hz,则选取最大值

35 Hz 作为此刻的频率。

表 4 一氧化碳浓度与运行频率对应表

一氧化碳浓度 / ppm	运行频率 / Hz
e (CO)	基础频率
e (CO)~10	1 h 降低至基础频率
10~16	1.5 h 降低至基础频率
16~24	2 h 降低至基础频率
大于 24	50

试验期间,四面山特长隧道(进口)向前掘进了 178 m,历时近 2 个月,隧道穿过高瓦斯段和低瓦斯段两种瓦斯地质条件洞段,期间,硫化氢均未出现超限的情况。但是,由于隧道内作业机车尾气排放的原因,一氧化碳出现过超限的情况。为保证结果的合理性并遵循所选取的数据尽可能地分布在较广泛范围内的原则,以及所选数据的量应尽可能的大原则,从记录的所有数据中选取了 70 个具有代表性的监测数据作为样本,同时,在样本中人为加入了超限情况。超限数据录入情况见表 5。

表 5 超限数据录入表

CH <sub>4</sub> 浓度	H <sub>2</sub> S 浓度	CO 浓度	运行频率
>0.5	—	—	50
—	>6.6	—	50
—	—	>24	50

### 2.4.3 神经网络训练结果

利用上述 70 组数据和 6 组超限数据,先后训练数据用于 BP 神经网络和 RBF 神经网络。

首先构建 BP 神经网络,随机选取上述 76 组数据中的 68 组对神经网络进行训练,训练采用梯度下降动量法和自适应的梯度下降法。训练结束后,将利用网络计算的剩余 8 组数据的值与真实情况进行比对,BP 网络计算的预测值与真实值的对比情况见表 6。

其次,从表 6 可以看出:拟合度达到了 0.965 51,其最大误差为 11.28%,不符合预测要求。鉴于风机的运行频率是由甲烷浓度、一氧化碳浓度、硫化氢浓度和风速 4 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 4 和 1。隐含层传递函数选择高斯核函数,输出层传递函数选择线性函数,所用的样本仍然是上述 76 个样本、从中随机选取 68 组进行训练。训练结束后,将剩余的 8 组数据用网络计算的值

与真实的值进行对比,RBF网络计算预测值与真实值的对比情况见表7。

表6 BP网络计算的预测值与真实值对比表

序号	真实值 /Hz	预测值 /Hz	误差	拟合度
1	31	27.5024	0.112 8	0.965 51
2	30	30.692 8	0.023 1	
3	38	37.469 9	0.013 9	
4	33	33.106	0.003 2	
5	32	31.603 6	0.012 4	
6	31	31.138 1	0.004 5	
7	50	49.195 3	0.016 1	
8	31	30.329 1	0.021 6	

表7 RBF网络计算预测值与真实值对比表

序号	真实值 /Hz	预测值 /Hz	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	
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	

从表7可以看出:拟合度已经达到0.9913,同时其最大的误差也仅为6.41%,符合预测要求。值得注意的是:误差的最大值是在50 Hz时出现,也就是说其是在有气体超限的情况下产生的。

#### 2.4.4 分析与讨论

根据以上训练结果可以得出以下结论:

(1)相较于BP神经网络计算结果,利用RBF神经网络计算出的结果更加实际,误差更小、拟合度更高,因此,将最终的控制方法选用了RBF神经网络的训练结果;

(2)通过随机对比结果可以看出:RBF神经网络具有较高的拟合度,从而证明利用RBF神经网络寻找隧道大气环境与风机运行参数之间的关系是可行的<sup>[5]</sup>,且其效果良好;

(3)从现场统计结果看,瓦斯、硫化氢的浓度始终处于相对较低的水平,而一氧化碳的浓度波

动范围较大,因此可以认为:瓦斯与硫化氢选取的关键点不够,控制系统在计算分析瓦斯与硫化氢与运行频率之间的关系时其准确率可能会有所降低;

(4)选取每个参数的极限值作为训练参数是正确的选择。因此,在最终设计控制程序时设计了一条高于所有计算法则的法则:一旦有任何一种气体超限,可以不经过神经网络的计算,直接控制变频器以最高频率运行;

(5)基础频率是隧道环境的最低保障,因此,对其进行设定时一定要慎重;

(6)如果风机的运行频率频繁改变,可能会降低风机的使用寿命,增加风机运行的故障率。因此,必须控制程序设计,将风机频率的改变值控制在±3 Hz范围内,以降低对风机的损害。

### 3 结 语

在数值模拟结果和现场试验结果的指导下,通过利用RBF神经网络的学习功能,设计出了一种能够兼顾安全与节能的隧道施工通风自适应变频控制系统,为隧道施工的通风提供了一种新的思路和方法。自适应变频控制系统使风机的运行频率可以根据隧道需求给予,从而克服了隧道风机在通电状态下始终以一个状态运行而造成电量浪费的问题,也解决了风机自适应能力低、无法根据隧道安全需求改变的不足。

#### 参考文献:

- [1] 何双双. RBF神经网络在矿井通风系统可靠性评价中的应用[J]. 煤矿机械, 2015, 36(2): 248-250.
- [2] 刘天明. 矿井通风计算机模拟系统的应用[J]. 煤矿机械, 2012, 33(12): 252-254.
- [3] 黄从智, 杨国田, 朱红路. 一种汽包水位监控方法、装置及系统[P]. 华北电力大学, 发明专利, 2017.
- [4] 程磊, 杨运良, 熊亚选. 基于人工神经网络的矿井通风系统评价研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(5): 88-91.
- [5] 蔡卫. 矿井通风系统安全性评价及其应用[J]. 煤炭学报, 2004, 41(2): 195-198.

#### 作者简介:

李阿蒙(1988-),男,安徽合肥人,副总经理,高级工程师,硕士,从事企业管理工作;  
陈小锐(1988-),男,四川遂宁人,工程师,学士,从事建设工程项目管理管理工作。

(责任编辑:李燕辉)