

智能通风技术在太行山高速公路隧道中的应用研究

郭超^{1,2} 韩冬卿³ 刘剑³ 闫治国^{1,2}

(1 同济大学土木工程防灾国家重点实验室,上海 200092;

2 同济大学地下建筑与工程系,上海 200092;

3 中电建冀交高速公路投资发展有限公司,石家庄 050091)

摘要 文章从高速公路隧道通风节能降耗入手,依托河北太行山高速公路邢台段牛峪南坪隧道,介绍了隧道智能通风技术。通风系统要保证正常运营工况下的空气质量,同时要满足紧急工况下的应急通风排烟需求。文章分别采用 Fluent 数值模拟方法和模糊控制理论验证和优化牛峪南坪隧道既有通风系统。结果显示,牛峪南坪隧道通风系统满足运营阶段通风需求;采用模糊控制通风方法后,提高了抵抗噪音干扰的能力,缓解了传统分档控制法风机频繁启停问题,节约 11% 的运营能耗,同时极大地改善了行车环境。

关键词 智能通风 射流通风 节能降耗 安全运营

中图分类号:U458.1

文献标识码:A

1 引言

随着我国经济的高速发展,基建领域持续投资,同时“一带一路”战略的推动,使得公路隧道在规模上和长度上取得巨大的发展。根据《2018 年交通运输行业发展统计公报》^[1],我国共有 17 738 条公路隧道投入运营,总里程达到 17 236 100 m。在隧道运营维护阶段,长大公路隧道通风系统扮演了重要的保障角色。隧道通风不仅要满足正常运营工况下的空气质量在安全标准内,同时要满足紧急火灾工况下的应急通风排烟,保证司乘人员逃生疏散的要求^[2]。对公路隧道通风进行有效控制,是为了解决机动车在行驶时产生各种废气和卷起的尘埃会妨碍行车安全和对人体造成危害,保证车辆在隧道内快速安全行驶和良好的行车环境,同时最大限度地节约通风系统高昂的建设及运营费用。

太行山高速公路是一条穿越太行山区的国家高速公路,在河北省境内依次穿越张家口、保定、石家庄、邢台、邯郸五个市。建设太行山高速公路是贯彻京津冀协同发展重大国家战略,推进京津冀交通一体化的重要措施^[3]。太行山高速公路中大量山岭隧道,多采用纵向式通风技术,同时考虑自然风和活塞风作用,满足隧道内的 CO/VI、通风换气的要求。隧道内通风换气对于隧道安全运营至关重要,但通风能耗大的问题又使得运营管理方不堪重负,主要表现在通风设备闲置率高、浪费严重。目前国内的隧道在通风控制上实际采用的仍然是传统控制方法。然而由于公路隧道通风系统是典型的分布式参数系统和大滞后系统,具有很强的非线性特征,如果用传统的线性控制理论,获得便于设计、控制的数学模型,势必在模型简化过程中引入很大的误差,所以对隧道通风控制应用智能控制

修改稿返回日期:2020-09-01

基金项目:河北省交通运输厅科技项目-太行山高速隧道(KT11)科研项目

作者简介:郭超(1994-),男,博士研究生,主要从事隧道地下空间通风节能和智慧防灾研究工作,E-mail:chaoguosuper@tongji.edu.cn.

通讯作者:闫治国(1977-),男,教授,主要从事隧道及地下空间防灾研究工作,E-mail:yanzguo@tongji.edu.cn.

技术是一个必然趋势^[4~7]。因此发展隧道通风智能控制系统、完善其理论模型,考虑实际工程的应用需要,更有效的节能与更安全的改善隧道内的运营环境,是目前需要大力发展的事情。同时,考虑到标准、规范相对于新技术的滞后性,根据相关规范中的一些环境控制变量进行隧道防灾减灾设计时,其成果已很难体现当前的节能、环保、安全,因而对监测的运营环境变量的种类及安全标准应进行新的探索。此外,由于各座隧道自身所处自然环境特点及实际气象天气状况千差万别,特别是通过隧道的交通量及交通组成是实时、动态的,与设计时的状况可能差别较大,导致隧道内的通风控制出现过度通风或通风不足的问题,既降低了公路隧道的安全运营环境,同时造成电能浪费,极大地增加

了公路隧道的运营维护成本。基于此,非常有必要在既有规范、标准的框架下,基于公路隧道的实际运营环境条件和实时的环境信息,建立综合的隧道通风控制体系,以便在确保隧道安全运营的条件下,大幅降低隧道运营能耗。

2 牛峪南坪隧道工程简介

本文以太行山高速公路邢台段牛峪南坪隧道为例,开展隧道智能通风控制技术的应用研究。太行山高速公路邢台段牛峪南坪隧道位于沙河市朱庄村东北,为分离式长隧道,隧道左幅全长为2 912 m,隧道右幅全长为2 818 m,隧道最大埋深为166.3 m。隧道断面面积为70.8 5 m²,行车限界宽为10.25 m,高为5.5 m,坡度为1.97%(图1)。

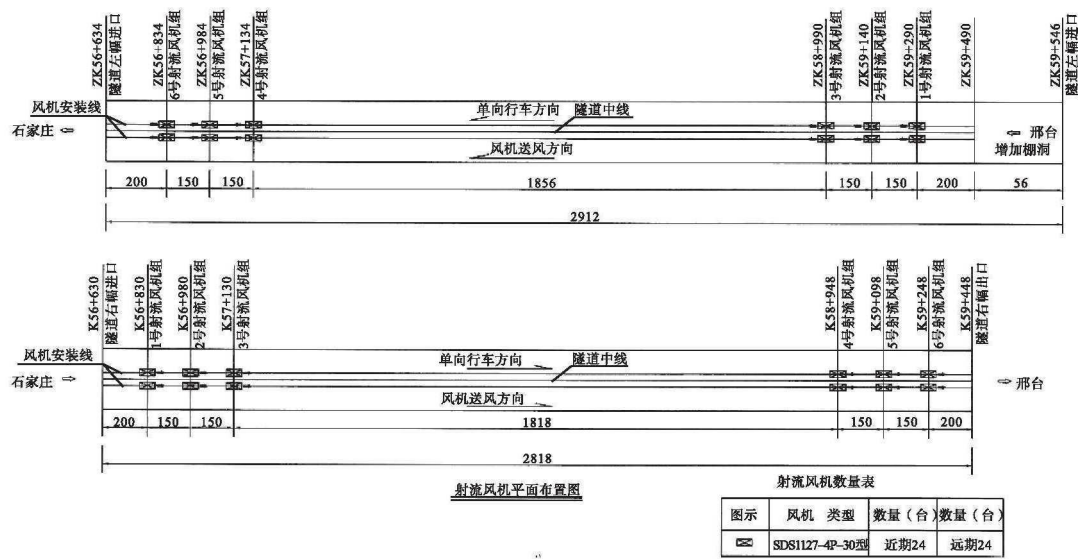


图1 牛峪南坪隧道通风设备布设
Fig.1 Ventilation equipment layout of Niuyunanping tunnel

通过前期河北太行山高速车型比例调研和交通量预测,牛峪南坪隧道近远期需风量(2025年至2038年)和配置风机等参数见表1,其中火灾规模按20 MW考虑。根据牛峪南坪隧道尺寸,选用1120型号射流风机,风机功率为30 kW。

牛峪南坪隧道运营通风控制方式分为运营通风状态和火灾通风状态。运营通风状态下,采用“实时控制+人工干预方式”及“前馈时序控制+人工干预方式”。采用前馈时序控制+人工干预方式时应根据通风试运营阶段测试及交通量量的日分布

表1 牛峪南坪隧道需风量和配置风机情况
Table 1 Air demand and fan configuration of Niuyunanping Tunnel

隧道	运营需风量/(m ³ /s)	火灾需风量/(m ³ /s)	设计风速/(m/s)	射流风机台数/台	装机功率/kW
隧道左洞	371.75	177.13	5.2	12	360
隧道右洞	177.13	177.13	2.5	12	360

规律,将日交通量分为几个档次,再确定风机运转组合方式,洞内环境监测数据,CO 浓度和烟雾作为参考是为人工干预作依据,不作为实时控制依据。火灾通风状态下,合理开启风机进行紧急通风排烟,在人员疏散到安全区域前,确保隧道环境安全,同时为外部救援力量的进入和协助疏散提供合适环境。火灾时利用通风设备产生不小于临界风速的纵向气流,方向为行车方向。

牛峪南坪隧道采用基于多传感多源数据的“前端获取-后台处理-设施控制-后期反馈”一体化长大公路隧道运营环境监测及控制技术。通过多传感器布置获得包括温度、CO 浓度、可吸入颗粒物浓度等多源数据,数据传输至主机数据库。后台人员对相关数据进行分项处理并实现数据可视化,以实时数据为依据对长大公路隧道内运营环境进行判断。根据隧道内运营环境状况实时调整隧道通风设施,多传感器对隧道内环境变化进行反馈,当隧道内环境分项指标满足要求后恢复原态。

3 牛峪南坪隧道运营通风数值模拟研究

从1990年起,计算流体力学 CFD 开始被广泛运用,它可以方便地模拟空间和时间的边界特征,提供速度场、压力场、温度场等准确分析。CFD 可以看作是对流体流动的数值模拟,遵循流动的质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。本数值模拟湍流模型采用标准的 (k-epsilon) 模型,求解器采用 SIMPLE 算法,离散方法采用二阶迎风格式。

根据牛峪南坪隧道左洞参数,建立如图 2 所示的几何模型,模型长度均为 2 912 m,根据隧道 1120 型射流风机实际位置建立相应数值模型,共计 12 台。射流风机距离隧道底面的高度为 7.0 m,横向净距为 3 m,风机壁面采用长为 2 m,直径为 1 m 的空心圆筒模拟,中间添加直径为 1 m 的圆面模拟风机转子。

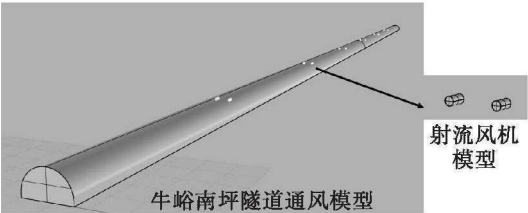


图 2 牛峪南坪隧道通风模型
Fig. 2 Ventilation model of Niuyunanping Tunnel

为了改善数值离散稳定性,采用混合网格划分,网格划分尺寸为 0.6 m,射流风机网格划分尺寸为 0.2 m,考虑局部细节网格连接,设置 0.1 m 的过渡网格,边界条件设置如表 2 所示。

表 2 数值模拟边界条件
Table 2 Simulation of boundary conditions

项目	边界条件
隧道壁面,通风道	无滑移壁面边界(wall) 粗糙度厚度 0.02
射流风机壁面	无滑移壁面边界(wall)
隧道入口	压力出口
隧道出口	压力出口
射流风机出口	速度边界(30 m/s)
射流风机入口	速度边界(-30 m/s)
隧道内计算域	空气(Fluid)

图 3 是牛峪南坪隧道模型第一组射流风机速度场云图。隧道内射流通风是一种有限空间内的附壁射流问题,诱导效应和增压效应是射流的两种通风效应,且这两种效应是并存的^[8]。从图 3 中可以很明显地观察到射流风机出口处高速射流卷吸扩散特性的表现。

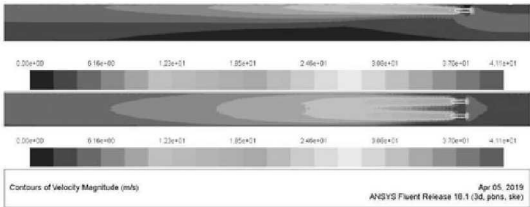


图 3 通风数值模拟结果
Fig. 3 Results of numerical simulation of ventilation

牛峪南坪隧道左洞为上坡隧道,设计需风量较大。数值模拟计算结果显示牛峪南坪隧道左洞风速达到 6.1 m/s,与理论计算的设计风速有一定的偏差,但满足左洞隧道运营阶段通风需求,亦可以满足火灾工况下紧急通风排烟的需求。

4 牛峪南坪隧道智能通风控制系统

考虑到模糊通风控制方法和近些年兴起的基于深度学习预测交通车流量等技术,牛峪南坪隧道将预测车流量和隧道内实测 VI 浓度作为模糊控制

器的输入,射流风机开启方案作为输出,从而实现
对隧道风机系统的精细化控制。模糊控制理论作
为智能控制系统在家电等领域成为最流行的控制
方法,主要优点如下:简化系统设计的复杂性,特别
适用于非线性、时变、滞后、模型不完全系统的控
制;不依赖于被控对象的精确数学模型;不用数值
而用语言式的模糊变量来描述系统,模糊控制器不
必对被控制对象建立完整的数学模式;模糊控制器
是一种容易控制、掌握的较理想的非线性控制器,
具有较佳的鲁棒性。

由于模糊控制能够利用模糊逻辑建立特殊的
非线性控制算法,它在系统参数难以确定的、高阶
的或者大时变、非线性复杂的被控对象中能够表现
出显著地效果。牛峪南坪隧道模糊逻辑控制系统
的基本结构见图4。模糊控制是以模糊集理论、模
糊语言变量和模糊逻辑推理为基础的一种非线性
控制方法,它是从行为上模仿人的模糊推理和决策
过程的一种智能控制方法,可以利用模糊逻辑的人
工智能特性对系统进行控制。

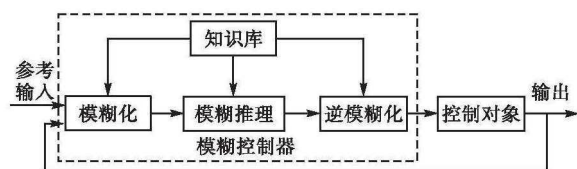


图4 模糊逻辑控制系统的基本结构

Fig.4 The basic structure of fuzzy logic control system

根据《公路隧道通风设计细则》^[2]和世界道路
学会 PIARC 报告^[9],CO 浓度和 VI 浓度是隧道内环
境控制的主要指标。对于长大公路隧道而言,决定
风机启停的污染物是烟尘(VI)而非 CO,即以 VI 为
控制对象时,隧道内 CO 浓度远远低于控制目
标^[10]。因此,牛峪南坪隧道在采用进行长大隧道
通风模糊控制时,选取实时检测的 VI 浓度和交通
流量预测值作为模糊控制器的输入变量。将经过
模糊化后的 VI 浓度和预测下一阶段的交通流量数
据输入到模糊控制器中,选择通风系统中要启动的
风机台数作为输出变量(图5)。

解决模糊控制问题的关键是正确地设定隶属
度函数。在进行模糊化时,隶属度函数的形状对控
制系统性能有很大影响。隶属度函数的曲线形状
越“尖锐”,其分辨率越高,控制器的灵敏性越好。
控制器的分辨率并不是越高越好,因为在系统输出
达到稳定时,控制器越灵敏,越容易引起系统震荡。

因此,隶属度函数的曲线形状越平稳,控制器的稳
定性能越好。

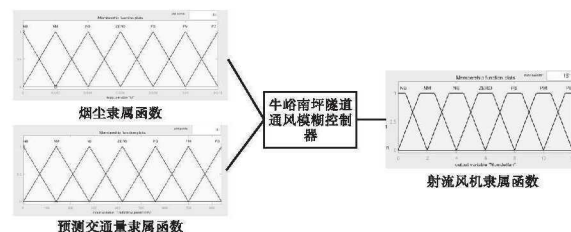


图5 牛峪南坪隧道模糊控制系统

Fig.5 Fuzzy control system of Niuyunpanping tunnel

选取三角形函数作为模糊控制器的输入量隶
属度函数,选取梯形函数作为风机输出量的隶属度
函数。当三角形作为隶属度函数曲线,其数学表达
和运输简单,计算量少,同时当输入值发生变化时,
三角形要比正态分布或高斯钟形分布隶属度函数
有更高的灵敏度。常规隧道分档通风方式,存在射
流风机开启频繁等问题。为解决这一问题,选取较
为稳定的梯形函数作为射流风机的隶属函数,有效
防止系统振荡。

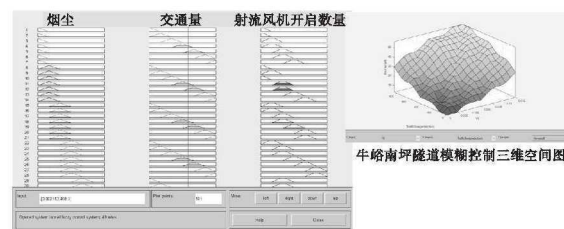


图6 实时通风推理系统三维空间

Fig.6 Three-dimensional real-time ventilation reasoning system

模糊运算后的三维空间的也可以直观的可视
化出来(图6),烟尘浓度,预测交通流量和射流风机
的真实论域与模糊论域相对应地表示在图中。此
方法将长大隧道中短时间预测交通车流量与前馈
式模糊控制结合在一起,从而实现对隧道通风系统
的智能化控制。

将牛峪南坪隧道前期交通量预测数据作为测
试数据,对比通风模糊控制方法和常规分档控制方
法,结果显示:引入模糊推理方法,在一定程度上提
高了抵抗噪音干扰的能力,缓解了传统分档控制法
风机频繁启停问题,显著节约能耗,相比传统分档
控制方法节能约 11%,同时极大地改善了行车环
境。

5 结 语

本文针对太行山高速隧道运营期的安全保障难题开展研究,可为隧道工程的安全和节能降耗提供科学的依据和技术保障。以河北太行山高速公路中牛峪南坪隧道为依托,介绍了智能通风技术的

应用。采用数值模拟方法和模糊控制理论分别验证和优化了隧道通风系统。在既有规范、标准的框架下,基于公路隧道的实际运营环境条件和实时的环境信息,建立综合的隧道通风控制体系,以便在确保隧道安全运营的条件下,大幅降低隧道运营能耗,同时可为相似隧道通风系统优化提供指导。

参考文献

References

- [1] 交通运输部. 2018 年交通运输行业发展统计公报[R]. 2019.
Ministry of Transport. Statistical Bulletin on the Development of the Transport Industry in 2018[R]. 2019.
- [2] 中华人民共和国行业标准. 公路隧道通风设计细则:JTG/T D70/2-02—2014[S]. 北京:人民交通出版社,2014.
Industry Standard of the People's Republic of China. Guidelines for Design of Ventilation of Highway Tunnel:JTG/T D70/2-02-2014[S]. Beijing:China Communication Press,2014.
- [3] 从一条“汽车专用道”到四通八达高速公路网——河北省高速公路建设成长记[J]. 共产党员(河北),2018(20):14-16.
From a“Special Road for Cars” to an Extensive Expressway Network—A Record of Hebei Expressway Construction[J]. CPC Member(Hebei),2018(20):14-16.
- [4] 黄惠斌. 基于 PSO 优化的模糊控制在隧道通风中的应用[D]. 长沙:湖南大学,硕士论文,2009.
HUANG Huibin. Application of Fuzzy Control Based on PSO Optimization in Tunnel Ventilation[D]. Changsha:Hunan University, Master Thesis,2009.
- [5] 马永杰. 公路隧道纵向通风神经模糊控制系统应用研究[D]. 成都:西南交通大学,硕士论文,2003.
MA Yongjie. Study on the Application of Neural Fuzzy Control System for Longitudinal Ventilation of Highway Tunnel[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, Master Thesis,2003.
- [6] 赵样杨. 基于模糊控制的隧道通风节能系统的设计与研究[D]. 西安:长安大学,2013.
ZHAO Yangyang. Research and Design of Tunnel Ventilation Energy Saving System Based on Fuzzy Control[D]. Xi'an:Chang'an University,2013.
- [7] 钟 路,袁 杰,龚贻华,等. 模糊控制在城市公路隧道通风系统中的应用[J]. 计算机与数字工程,2008,36(3):134-135+147.
ZHONG Lu,YUAN Jie,GONG Yihua,et al. Fuzzy Control Technology in the Ventilation of City Road Tunnel Control[J]. Computer and Digital Engineering,2008,36(3):134-135+147.
- [8] 王 峰. 曲线公路隧道营运通风关键参数研究[D]. 成都:西南交通大学,博士论文,2010.
WANG Feng. Study on Key Parameters of Operation Ventilation in Curved Highway Tunnel[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, Doctoral thesis,2010.
- [9] PIARC. Road Tunnels; Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation[R]. World Road Association,2012.
- [10] 何 川,李祖伟,方 勇,等. 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.
HE Chuan,LI Zuwei,FANG Yong,et al. Feed-Forward Intelligent Fuzzy Logic Control of Highway Tunnel Ventilation System[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2005,40(5):575-579.

Application of Intelligent Ventilation System in Taihang Mountain Expressway Tunnel

GUO Chao^{1,2} HAN Dongqing³ LIU Jian³ YAN Zhiguo^{1,2}

(1 State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092;

2 Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092;

3 Zhong Dian Jian Ji Jiao Expressway Investment Development Co., Ltd., Shijiazhuang 050091)

Abstract The construction of Taihang Mountain expressway is an important measure to carry out the major national strategy of coordinated development of Beijing-Tianjin-Hebei and promote the integration of Beijing-Tianjin-Hebei transportation. Starting from energy saving and consumption reduction of highway tunnel ventilation, this paper introduces the tunnel intelligent ventilation system based on Niuyunanping tunnel in Xingtai section of Taihang expressway in Hebei province. The ventilation system shall ensure the air quality under normal operating conditions and meet the requirements of emergency ventilation and smoke extraction under emergency conditions. In this paper, fluent numerical simulation method and fuzzy control theory are used to verify and optimize the existing ventilation system of Niuyunanping tunnel. The results show that the ventilation system of Niuyunanping tunnel meets the requirements of ventilation in the operation stage. By adopting the fuzzy control ventilation method, it improves the ability to resist noise interference, alleviates the frequent start and stop problem of fans with the traditional split control method, saves 11% of the operation energy consumption, and greatly improves the driving environment.

Keywords Intelligent ventilation; Jet ventilation; Energy conservation and consumption reduction; Safe operation