

基于实时监测的智能隧道风机调控方法 研究与应用

江超文¹, 赵世龙², 赵宇¹, 杨皖凝³, 赵天怡^{1*}

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 大连湾海底隧道有限公司,
辽宁 大连 116038; 3. 清华大学建筑学院, 北京 100084)

摘要: 在城市交通隧道通风管理中, 为提升通风系统效率、改善环境质量, 文中提出了一种基于实时监测的智能隧道风机调控方法。该方法可通过内置半经验物理模型预测污染物浓度变化趋势, 并对隧道风机的启闭或频率进行模糊控制, 同时通过机器学习不断迭代内置模型的相关参数, 优化控制策略, 可以为风机调控提供更精确的数据支持和智能化的控制策略。首先详细阐述了智能隧道风机调控方法的内容和工作过程, 然后结合大连市典型公路隧道内的 PM_{2.5} 实测数据, 以大连湾海底隧道为案例, 对该调控方法进行了经济性分析。结果显示, 该方法能够降低通风系统的运行费用, 具有很大的节能潜力。

关键词: 隧道通风; 实时监测; 智能; 风机调控

中图分类号: U655.11; U455.46

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2024)04-0029-04

doi: 10.7640/zggwjs202404007

Research and application of intelligent tunnel fan regulation method based on real time monitoring

JIANG Chao-wen¹, ZHAO Shi-long², ZHAO Yu¹, YANG Wan-ning³, ZHAO Tian-yi^{1*}

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. Dalian Bay Undersea Tunnel Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116038, China;

3. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In the ventilation management of urban traffic tunnels, to improve the efficiency of ventilation system and environmental quality, an intelligent tunnel fan control method based on real-time monitoring was proposed in this paper. This method can predict pollutant concentration trends using an embedded semi-empirical physical model and carry out fuzzy control over tunnel fan operations, including opening, closing, and frequency adjustments. Additionally, by continuously refining the embedded model's parameters through machine learning, the control strategies can be optimized, providing more accurate data support and intelligent control strategies for fan regulation. Firstly, the content and working process of the intelligent tunnel fan control method were described in detail. Subsequently, combined with the measured PM_{2.5} data from representative highway tunnels in Dalian, the economic analysis of this control method was conducted using the Dalian Bay Immersed Tunnel Project as a case study. The results show that this method can reduce the ventilation system operational costs and has great energy-saving potential.

Key words: tunnel ventilation; real-time monitoring; intelligent; fan regulation

0 引言

随着城市化进程的不断推进, 道路交通系统得到了极大的发展。城市隧道作为交通路网的重

要组成部分, 在疏散交通流方面发挥着重要的作用, 但是隧道内环境较为封闭, 污染物扩散受阻, 容易造成空气污染物聚集, 对道路使用者的身体

收稿日期: 2023-08-30 修回日期: 2023-11-07

作者简介: 江超文 (1997—), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 土木水利专业。

* 通讯作者: 赵天怡, E-mail: zhaotianyi@dlut.edu.cn

健康造成威胁^[1-3]。大连位于丘陵地带交通不便,为了缓解交通压力修建了许多隧道,而复杂的地形和不完整的交通信号导致早晚高峰堵车现象比较严重,因此大连市的隧道污染问题与其他城市相比更加突出。如何有效控制隧道内的环境污染,成为城市交通管理面临的重要挑战之一^[4-8]。

传统的隧道通风系统通常采用简单的定时启停或基于污染物监测进行直接控制,然而,由于隧道内部环境污染物浓度的时空变化规律复杂,容易受到交通流量、隧道行车种类以及气候条件等诸多因素的影响,传统的控制方法往往难以满足实际需求,导致能源的浪费和环境的恶化^[9]。随着智能控制技术和大数据的机器学习技术的不断发展,结合这些技术引入更智能、高效的调控方式,实现隧道通风系统的自动化智能调控。

1 智能风机调控方法

1.1 主要内容

针对大连湾隧道通风的实际需求,提出一种基于实时监测的自动化智能风机调控方法,包括污染物检测模块、模数(A/D)转换模块、PLC控制器、数模(D/A)转换模块、机器学习模块、执行模块,如图1所示。

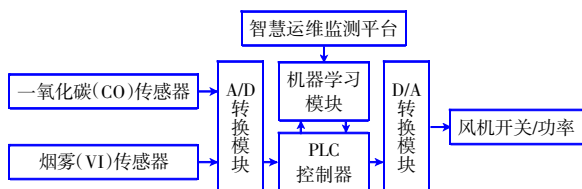


图1 基于实时监测的自动化智能风机调控方法

Fig. 1 Intelligent fan control method based on real time monitoring

污染物检测模块主要包括一氧化碳(CO)传感器和烟雾(VI)传感器,用于监测隧道中的汽车排放污染物浓度和能见度。PLC控制器获取来自污染物检测模块的污染物浓度信息,根据所得污染物数据的大小及数据变化的趋势进行分级,基于内置程序中的可自整定的半经验物理模型预测污染物浓度变化趋势,并使用模糊控制的方法选择相应的运行策略。机器学习模块与PLC控制器相连,可以获取污染物实时监测数据,同时与智慧运维监测平台相连,可以读取智慧运维监测平台中的隧道温湿度、风速与车流量等数据。机器学习模块可基于BP神经网络、大数据手段,统计污染物浓度随隧道内各种环境参数的时间变化规

律,并对污染物预测程序中可自整定的半经验物理模型以及运行策略进行参数优化。

1.2 工作过程

步骤1:由污染物监测模块对隧道内的污染物(CO、VI)进行检测;

步骤2:污染物监测数据模拟量由A/D转换模块转换成数字量,传输到PLC控制器,并经由PLC控制器传送至机器学习模块;

步骤3:PLC控制器根据所得污染物数据的大小及数据变化的趋势进行分级,基于内置程序中的可自整定的半经验物理模型预测污染物浓度变化,并使用模糊控制的方法选择相应的运行策略。同时,机器学习模块读取污染物数据和智慧运维监测平台中的隧道温湿度、风速及车流量等数据,基于BP神经网络、大数据手段,统计污染物浓度随隧道内各种环境参数的时间变化规律,并对污染物预测程序中可自整定的半经验物理模型以及运行策略进行参数优化;

步骤4:PLC控制器发出的数字量指令经由D/A转换器转换为模拟量;

步骤5:执行模块根据PLC控制器发出的指令,对隧道风机的开关或功率大小进行调节。

2 测试

2.1 测试设置

为探究大连市内隧道污染情况,并为大连湾海底隧道的经济性分析提供参考,在大连市选择了2条典型公路隧道进行污染物实地测量,如图2所示。以季度为单位,分为夏季、冬季和过渡季(春季)分别进行测试。测试地点为石门山隧道和椒金山隧道,测试时间为6:30—18:30。

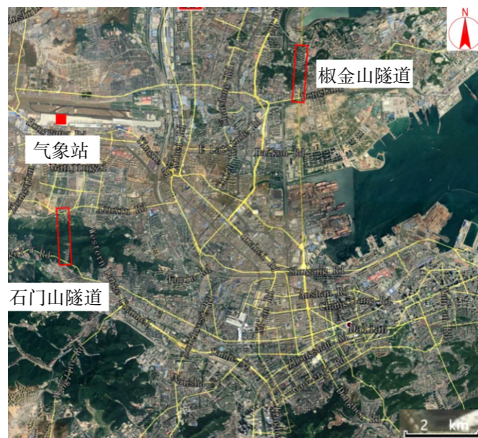


图2 测试地点

Fig. 2 Location of field measurement

在实测过程中采用移动测试的方法,将传感器固定在汽车外侧,驾驶汽车经过隧道并测得数据。采样点设置在汽车空调进风格栅处,测量的污染物参数包括:CO浓度、PM_{2.5}浓度、车流量、温度和相对湿度。同时在周水子气象站收集风速、风向和天气等气象参数。

2.2 测试结果

测试完成后,首先采用3σ原则对数据进行筛选,剔除不合格数据。然后将测试车辆每次通过隧道所测得的污染物浓度数据取均值,作为反映隧道整体污染情况的平均浓度。并对1d内多次测量所得的多个平均浓度进行统计分析,绘制箱形图如图3所示。

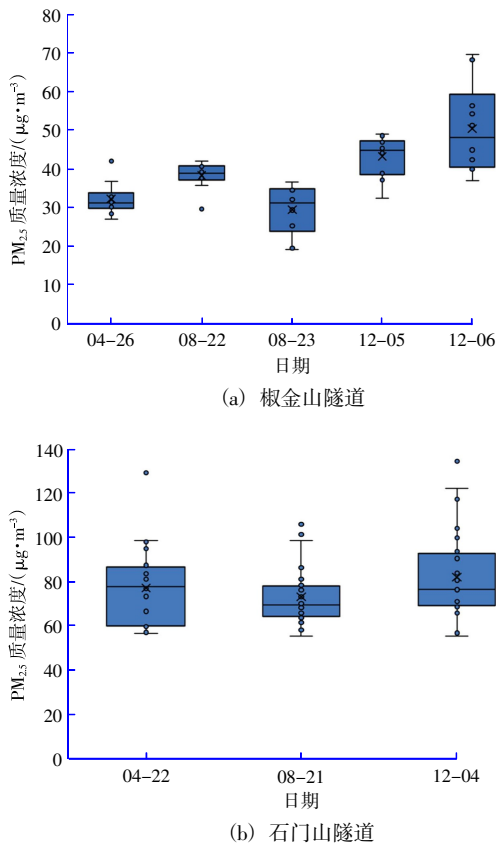


图3 PM_{2.5}质量浓度
Fig. 3 Mass concentration of PM_{2.5}

从图3可以看出,椒金山隧道和石门山隧道冬季PM_{2.5}质量浓度普遍高于其他季节,分别比其他季节的平均值高36%和10%,具有明显的季节特征,这与冬季交通流量大的现象一致,也印证了许多学者的研究成果^[10-11]。椒金山隧道的PM_{2.5}质量浓度春季为 $(32.3\pm 4.3)\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、夏季为 $(33.8\pm 6.5)\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、冬季为 $(46.8\pm 9.3)\mu\text{g}/\text{m}^3$,均

不超过WHO规定的 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的标准。石门山隧道PM_{2.5}浓度冬夏两季较高,春季为 $(77.0\pm 17.2)\mu\text{g}/\text{m}^3$,夏季为 $(72.9\pm 12.9)\mu\text{g}/\text{m}^3$,冬季为 $(81.8\pm 20.2)\mu\text{g}/\text{m}^3$,均超过WHO标准。

分析PM_{2.5}质量浓度在1d内随时间的变化规律,发现隧道内污染物的浓度与车流量之间存在较强的相关性,在11:00—13:00时间段内,车流量较少,PM_{2.5}浓度也几乎不存在超标现象。对PM_{2.5}在2个隧道中不同季节的平均超标时长进行统计,结果如表1所示。

表1 大连市隧道四季污染物超标率及超标时长
Table 1 Excess rate and duration of pollutants in tunnels in Dalian during four seasons

季节	超标率/%	超标时长/(h·d ⁻¹)
春季	31.11	3.737
夏季	25.13	3.016
秋季	31.11	3.737
冬季	38.73	4.647

3 运维阶段节能潜力与经济性分析

3.1 项目概况

大连湾海底隧道是双向六车道城市快速路越海隧道。通风系统采用射流风机诱导型纵向通风+高风塔集中排放+机械式分散排放的组合方式排放废气。根据设计施工图纸,大连湾海底隧道设置126台功率为30kW的射流风机。

3.2 节能潜力分析

1) 确定电价

根据JTG D70/2—2014《公路隧道设计规范第二册 交通工程与附属设施》中的规定,隧道电压应选择满足最高10kV的要求,并根据国家电网发布的辽宁省电网趸售电价表进行参考。在该电价表中,工商业及其他用电的1~10kV分时电价如表2所示。

表2 大连工商业及其他用电1~10kV分时电价
Table 2 Electricity price by time of 1~10 kV for industrial, commercial and other electricity consumption in Dalian

时段	时间	电价/(元·(kW·h) ⁻¹)
高峰时段	07:30—11:30; 17:00—21:00	0.762 5
平段时段	05:00—07:30; 11:30—17:00; 21:00—22:00	0.519 6
低谷时段	22:00—05:00	0.276 7

根据本文的数据测量时间6:30—11:00; 13:00—

18:30, 计算可知所计算时间段内的加权平均电价为 0.641 1 元/kWh。

2) 不同通风系统方案运行时长

方案 1: 射流风机白天运行

首先, 在春夏冬 3 个季节, 针对大连石门山隧道和椒金山隧道, 采集了某典型天 6:30—18:30 共计 12 h 内的 $PM_{2.5}$ 及 CO 浓度数据。通过实测数据分析, 发现在 11:00—13:00 时间段内, 车流量较少且污染物浓度几乎不存在超标。基于此分析, 假设每天隧道内风机运行时长为 10 h。

方案 2: 射流风机早晚高峰时段运行

在大连市内的隧道中, 早晚高峰时段车流量较为集中, 导致汽车尾气产生的污染物在这段时间内积累较多。由于大连市为旅游城市, 在旅游旺季车流量较高, 早晚高峰持续时间长, 根据测试取早晚高峰共计为 6 h。因此在方案 2 中, 假设仅在早晚高峰时段开启风机。

方案 3: 射流风机仅在超标时段运行

根据实测数据的分析结果, CO 浓度在测量时间段内均未超过标准值。 $PM_{2.5}$ 浓度的超标比例以及每日超标时长可参考表 1。因此在方案 3 中, 假设仅在超标时开启风机, 与本文提出的控制方法下风机的运行时间一致。

3) 运营费用对比分析

以大连湾海底隧道为例, 经计算本文提出的控制方法(方案 3)相比于全天运行(方案 1)年运行费用可节省 548.73 万元。当早晚高峰时长取 6 h 时, 方案 3 相比于早晚高峰运行(方案 2)年运行费用可节省 194.92 万元。详细计算结果见表 3。

表 3 大连湾海底隧道 3 种方案下经济性分析计算

Table 3 Economic analysis and calculation of Dalian Bay immersed tunnel under three schemes

参数	方案 1	方案 2	方案 3			
			春季	夏季	秋季	冬季
运行时间/h	10	6	3.737	3.016	3.737	4.647
功率/kW	3 780	3 780	3 780	3 780	3 780	3 780
电量/kWh	37 800	22 680	14 126	11 400	14 126	17 566
日费用/万元	2.42	1.45	0.91	0.73	0.91	1.13
年费用/万元	884.53	530.72	335.80			

3.3 投资回收期

估算投资回收期首先需要确定项目改造费用。根据设计施工图纸估算, 本方案需增加设备型号、价格和施工安装等费用见表 4。

表 4 大连湾海底隧道改造费用计算表

Table 4 Calculation of renovation costs for Dalian Bay immersed tunnel

设备名称	数量/台套	单价/万元	总价/万元
ABB 变频器	5	70.0	350.00
COVI 分析仪	44	4.3	189.20
PLC 控制器	13	0.4	5.20
控制器柜子	13	0.6	7.80
其他设备施工安装费用			110.44
总费用			662.64

增加投资的回收期采用静态回收期计算, 计算公式如下:

$$Y=W_z/(W_j-W_g)$$

式中: Y 为投资回收期; W_z 为改造费用, 约 662.64 万元; W_j 为年节能费用, 约 194.92 万元; W_g 为由于增添设备导致的设备维护与更换费用, 按照每年更换 20%估算。经计算, 大连湾海底隧道投资回收期约为 10.6 a, 即智能管控系统约 10.6 a 即可收回增加的投资。在全生命周期(20 a)内总节能费用约为 585.2 万元。

4 结语

本研究通过实时监测技术和大数据的机器学习技术的有机结合, 提出了一种创新的自动化智能风机调控方法, 旨在优化隧道通风系统的运行策略, 提高污染物控制效果和能源利用效率。该方法结合污染物实时监测和大数据的机器学习技术, 通过内置半经验物理模型预测污染物浓度变化趋势, 并对隧道风机的启闭或频率进行模糊控制, 同时通过机器学习不断迭代内置模型的相关参数, 优化控制策略。以大连湾海底隧道为例, 经济性分析结果显示, 该方法能够降低通风系统的运行费用, 经计算投资回收期约为 10.6 a, 在全生命周期(20 a)内总节能费用约为 585.2 万元, 具有一定的节能潜力。因此, 本研究提出的智能调控方法在实际应用中具有广泛的应用前景, 为城市交通隧道的可持续发展和智能化管理提供了有力支持。

参考文献:

- [1] BROUSSE B, VIDAL B, PONTICQ X, et al. Pollution dispersion at an urban motorway tunnel portal: comparison of the small-scale predictive study with the actual conditions measured on the site[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(13): 2459–2473.
- [2] HE L Y, HU M, ZHANG Y H, et al. Fine particle emissions from

(下转第 53 页)