

基于物联网技术的隧道风机环境自适应节能控制方法

蒋义鑫

(兰州朗青交通科技有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为优化隧道风机环境自适应节能控制效果, 降低能源消耗, 实现节能减排、建设绿色交通的目标, 提出了基于物联网技术的隧道风机环境自适应节能控制方法。首先, 利用物联网技术, 实时监测隧道环境参数的动态变化; 其次, 根据隧道环境的实时工况, 计算隧道运营需风量, 为自适应节能控制提供数据支持; 然后, 建立隧道风机工作特性分析模型, 全面分析风机的工作特性; 在此基础上, 采用风机群分段自适应节能控制策略, 对风机运行状态进行相应的自适应节能控制。实验结果表明, 提出的方法在能源消耗方面表现出了良好的性能优势, 可以有效降低能源消耗, 避免了不必要的能源浪费, 具有较好的节能效果。

关键词: 物联网技术; 隧道风机; 环境自适应; 节能控制; 环境参数; 需风量

中图分类号: TP272

文献标识码: A

文章编号: 2095-1302 (2025) 02-0141-03

0 引言

在交通工程领域, 隧道的建设与运营管理对保障交通安全、提高运输效率具有重要意义。隧道风机作为隧道通风系统的重要组成部分, 其运行状态直接影响到隧道内的空气质量和行车安全^[1]。隧道风机是一种用于隧道等地下工程的大型轴流通风机, 主要负责为隧道内部提供新鲜空气, 排出有害气体, 改善隧道内的空气环境, 保障隧道内人员的正常工作和设备的正常运行^[2]。为保证隧道安全可靠地运营, 良好可靠的风机环境至关重要。

当前, 传统的隧道风机控制方法多依赖于人工设定和定时开关, 缺乏实时的数据支持和智能化的控制策略, 不仅无法实时响应隧道内的环境变化, 还导致风机运行状态与实际需求不匹配, 降低了其运行效率, 并因过度运行而造成能源浪费^[3]。因此, 如何实现隧道风机的智能化、自适应控制, 以提高能效和保障环境质量, 成为了亟待解决的问题。

通过物联网技术, 可以实时获取隧道内的环境参数, 并利用这些数据来调整风机的运行状态^[4]。这种数据驱动的控制方式, 不仅能够实时响应环境变化, 提高隧道的空气质量, 还能有效降低能源消耗, 为隧道的运营管理带来极大的便利^[5]。基于此, 本文提出了一种基于物联网技术的隧道风机环境自适应节能控制方法。

1 隧道风机环境自适应节能控制方法

1.1 基于物联网技术监测隧道环境参数

隧道环境参数监测对后续风机环境自适应节能控制起着

至关重要的作用。首先, 选择高精度的传感器设备, 确保设备性能稳定可靠, 能够准确反映隧道内的环境状况。根据隧道的实际工况及特征, 包括隧道长度、宽度以及车流量等, 合理规划传感器的部署位置, 确保传感器设备能够全面覆盖隧道内的环境参数^[6]。将传感器牢固安装在隧道顶部或侧壁等位置, 为每个传感器配备相应的数据采集设备^[7]。利用物联网技术, 将部署的传感器设备与数据采集设备相连接, 确保传感器数据能够实时、准确地传输至控制中心^[8]。根据传感器监测到的隧道环境参数, 对隧道的 CO 体积分数、烟雾体积分数占比进行计算, 公式分别如下所示:

$$Q_c = (R_l / R_c) \times 100\% \quad (1)$$

$$Q_y = (R_s / R_y) \times 100\% \quad (2)$$

式中: Q_c 表示隧道内 CO 体积分数占比; R_l 表示传感器设备实时监测到的 CO 体积分数值; R_c 表示规范规定的 CO 体积分数安全阈值; Q_y 表示隧道内烟雾体积分数占比; R_s 表示传感器设备实时监测到的烟雾体积分数值; R_y 表示规范规定的烟雾体积分数安全阈值。

1.2 隧道运营需风量计算

采用上述基于物联网技术的方法采集完隧道环境参数后, 根据隧道环境的实时工况, 计算隧道运营需风量, 为后续风机环境自适应节能控制提供数据支持。从广义程度上来说, 需风量指的是通过机械通风的方式, 向隧道内提供能够稀释各类污染物的最大风量^[9]。隧道运营需风量计算公式如下所示:

$$Q_p = \max \left[\frac{\Delta M_p + M_p}{3.6 \times (C_{ad} - C_{am})} \times 10^{-3} \right] \quad (3)$$

收稿日期: 2024-01-26

修回日期: 2024-03-07

式中： Q_p 表示隧道运营需风量； ΔM_p 表示隧道内某类污染物排放预测增量； M_p 表示隧道内某类污染物实测排放量； C_{ad} 表示隧道内气体污染物的容许体积分数； C_{am} 表示隧道内气体的背景体积分数。通过上述公式，取稀释隧道各类污染物的空气体积流率最大值作为隧道运营需风量。

1.3 建立隧道风机工作特性分析模型

隧道运营需风量计算完毕后，建立隧道风机工作特性分析模型^[10]。建立了风机特性与运行参数之间的数学关系模型，模型表达式如下所示：

$$Q = k \times n^2 \quad (4)$$

式中： Q 表示风机的风量； k 表示风机运行比例系数； n 为风机的转速。将收集到的历史运行数据输入数学模型，进行计算和分析，对数据进行拟合处理。通过对比实际运行数据与理论计算结果，得出隧道风机风量与转速之间的关系，进而获取隧道风机的运行特性。

1.4 隧道风机群分段自适应节能控制

隧道风机工作特性分析完毕后，在此基础上，对隧道风机环境进行自适应节能控制。大多数隧道环境相对封闭，且通风分段过长，严重降低了隧道内污染物的排出速度，增加能耗的同时影响了隧道内的行车安全。为了更加合理地控制隧道风机的启闭状态，实现安全节能的隧道通风环境，本文采用风机群分段自适应节能控制策略。隧道纵向风机平面布设，如图 1 所示。

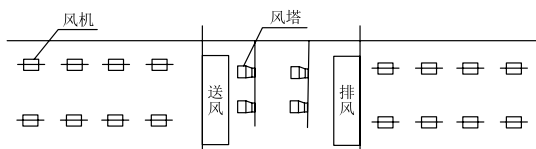


图 1 隧道纵向风机平面布设

如图 1 所示，采用中间风塔和隧道射流风机相组合的方式，构建隧道风机环境。将隧道划分成两个区域：I 段和 II 段。I 段由隧道排风井和排风路段吊设的 l 组射流风机组成，II 段由隧道送风井和送风路段吊设的 m 组射流风机组成。隧道风机群环境由风塔内 i 台轴流排风机、 i' 台轴流送风机、吊设在排风路段的 j 组射流风机、吊设在送风路段的 j' 组射流风机共同组成。计算此时隧道风机环境的送风量，公式如下所示：

$$Q_b = Q_p - Q_{r1} + Q_e \times \left[(Q_{r1} - Q_{req1}) / Q_{r1} \right] \quad (5)$$

式中： Q_{r1} 表示隧道 I 段设计风量； Q_e 表示风机提供风量； Q_{req1} 表示隧道 I 段的需风量。结合上述基于物联网监测到的隧道环境参数变化，按照一定的阈值，将隧道风机环境划分为不同的区间，每个区间对应不同的风机运行状态。根据区间划分的结果与风机环境送风量的实际情况，对风机运行状

态进行相应的自适应节能控制。具体控制方式如下所示：

(1) 当隧道内环境参数处于低体积分数区间时，关闭风机，根据环境参数的动态变化，自适应降低风机的转速或减少风机的运行台数，进而降低能源消耗。同时，保持隧道内的通风效果，确保空气质量良好。若发现关闭风机后隧道环境参数超标，则可能需要适当延迟关闭时间。

(2) 当隧道内环境参数处于中体积分数区间时，保持风机在一定的转速下运行，以满足隧道内的通风需求。同时，根据实际情况，可以适当调整风机的运行台数，以达到节能目的。

(3) 当隧道内环境参数处于高体积分数区间时，启动风机通风，根据隧道通风情况及空气质量，提高风机的转速或增加风机的运行台数，以加强隧道内的通风效果，降低污染物体积分数。同时，注意避免能源浪费，合理控制风机运行状态。

在实施隧道风机群分段自适应节能控制策略的过程中，物联网会实时监测隧道内的环境参数变化。当环境参数跨越体积分数区间边界时，控制中心会自适应控制风机运行状态，以适应新的环境参数区间。通过不断地进行自适应控制，确保风机运行状态始终与隧道环境相匹配，实现节能目的。

2 实验分析

2.1 实验准备

选择某高速公路的隧道通风系统作为实验样本。该隧道全长约 5 km，主要用于连接城市与郊区，车流量较大，特别是在早晚高峰时段，车流量非常密集，因此对通风系统的要求较高。在隧道内，装有 3 台大型轴流通风机，标号为 TFJ-01#、TFJ-02#、TFJ-03#，分别位于隧道的入口、中部和出口处。这些风机的主要技术参数如下所示：

(1) 隧道入口处风机：型号为 T30-11 No.4.5，额定功率为 220 kW，风量为 240 000 m³/h，电机型号为 Y2-315L1-4，转速比为 1 : 1.88。

(2) 隧道中部风机：型号为 T35-11 No.6.3，额定功率为 370 kW，风量为 450 000 m³/h，电机型号为 Y3-450SE-4，转速比为 1 : 1.88。

(3) 隧道出口处风机：型号为 T40-11 No.7.1，额定功率为 550 kW，风量为 660 000 m³/h，电机型号为 Y4-450E-4，转速比为 1 : 1.88。

为了更好地监测和控制隧道内风机环境的状况，选用了表 1 中的传感器设备。

在隧道内共部署了 10 个传感器设备。其中，在每个隧道风机附近位置安装 2 个传感器，主要负责监测该区域内的 CO 体积分数和烟雾体积分数；在隧道中部和出口处各安装

1 个风速传感器，以监测整个隧道内的风速变化状况。

表 1 实验传感器设备

传感器	量 程	测量精度	用 途
CO 体积分数 传感器	0 ~ 10 ⁻³	±5×10 ⁻⁶	监测隧道内的 CO 体积分数
烟雾体积分数 传感器	0 ~ 1	±3×10 ⁻²	监测隧道内的 烟雾体积分数
风速传感器	0 ~ 60 m/s	±0.5 m/s	监测隧道内的风速

2.2 节能控制效果分析

实时采集各传感器数据，并通过物联网技术，将这些数据传输至控制中心。控制中心对接收到的传感器数据进行处理和分析，根据结果自适应调整隧道风机的运行状态。选择能源消耗 EC 作为节能控制效果评价指标，其计算公式如下所示：

$$EC = P \times T \tag{6}$$

式中：*P* 表示风机设备输入功率；*T* 表示风机设备运行时间。分别监测并记录基于本文方法、文献 [3] 方法、文献 [5] 方法下的 EC 值，见表 2。

表 2 隧道风机能源消耗对比结果 kW · h/ 天

风机标号	本文方法	文献 [3] 方法	文献 [5] 方法
TFJ-01#	200.12	315.64	349.02
TFJ-02#	189.64	326.97	350.87
TFJ-03#	195.73	332.48	358.13

通过表 2 得知，本文方法在能源消耗方面表现出良好的性能优势，隧道风机的能源消耗始终低于另外两种节能控制方法。这说明该方法能够根据隧道内的环境参数，调整风机

的运行状态，有效降低能源消耗，避免了不必要的能源浪费，具有较好的节能效果。

3 结 语

基于物联网技术的隧道风机环境自适应节能控制方法是实现节能减排、建设绿色交通这一目标而提出的。该方法通过实时监测和智能控制，能够有效降低隧道风机的能源消耗，为节能减排做出贡献，为交通工程设备的智能化控制提供了新的思路和方法，对于提高能效、保障环境质量和降低运营成本均具有重要的现实意义。

参 考 文 献

[1] 张伟. 基于物联网技术以及对等运算理论的液压泵自适应节能控制系统设计与实现 [J]. 工业技术创新, 2023, 10 (2): 73-83.

[2] 孙思琦, 崔英英, 梁雅博, 等. 自适应传输技术在风机故障监测中的应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (3): 43-48.

[3] 李旭, 陈晓利, 李远哲, 等. 火灾工况下公路隧道通风智能控制模型研究 [J]. 公路交通技术, 2022, 38 (6): 156-162.

[4] 梁雅博, 邱文利, 崔英英, 等. 风机故障监测系统中的自适应传输速率技术研究 [J]. 测控技术, 2022, 41 (8): 85-90.

[5] 任涛, 廖勇, 陈结, 等. 基于 RBF 神经网络的隧道施工自适应控制通风系统 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18 (z1): 404-411.

[6] 武尚将, 孙育英, 王伟, 等. 空气源热泵——风机盘管供暖系统变水温自适应控制方法及应用研究 [J]. 建筑科学, 2022, 38 (6): 169-177.

[7] 李阿蒙, 陈小锐. 四面山特长隧道风机智能控制系统的开发与设计 [J]. 四川水力发电, 2022, 41 (3): 115-118.

[8] 王海英, 毛明磊, 何佳. 基于亮度优化的绿色隧道照明模糊 PID 控制算法 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42 (4): 621-629.

[9] 唐爽权, 朱佳乐, 邱溪远, 等. 基于光电互补的特长隧道新型通风照明智能联动系统设计 [J]. 信息与电脑 (理论版), 2021, 33 (13): 121-123.

[10] 杨清海, 沈恒根, 孙三祥. 并联双风机数值计算模型对隧道通风效果的影响 [J]. 建筑热能通风空调, 2020, 39 (11): 33-39.

作者简介：蒋义鑫（1986—），男，甘肃兰州人，工程师，研究方向为机电工程与维护。

（上接第140页）

[5] 高正中, 龚群英, 宋森森. 基于 STM32 的智能平衡车控制系统设计 [J]. 现代电子技术, 2016, 39 (14): 46-48.

[6] 洪一民, 钱庆丰, 章志飞. 基于 STM32 的智能小车循迹避障测距的设计 [J]. 物联网技术, 2022, 12 (1): 12-13.

[7] 刘汉忠, 俞鹏, 谢秦韬. 基于 CCD 的循迹机器人小车模糊控制方法研究与实现 [J]. 现代电子技术, 2019, 42 (9): 95-97.

[8] 米汤, 尚友良, 符晓玲. 基于 CCD 传感器的智能车路径识别研

究 [J]. 科技与创新, 2023 (11): 50-53.

[9] 韩彩霞, 黄艺, 罗子波. 智能循迹小车设计 [J]. 电子设计工程, 2023, 31 (23): 58-62.

[10] 仇越. 基于 STM32 的智能小车设计 [J]. 工业控制计算机, 2023, 36 (4): 158-159.

[11] 王信乐, 刘祚时. 基于线性 CCD 的智能小车循迹系统设计与研究 [J]. 制造业自动化, 2020, 42 (8): 79-84.

作者简介：胡江瑜（1992—），男，硕士，工程师，研究方向为嵌入式系统。

李光琴（1990—），女，硕士，讲师，研究方向为控制与检测技术。

王 莹（1994—），女，讲师，研究方向为电气工程及其自动化技术。