

文章编号: 1671-6612 (2025) 04-537-04

基于蚁群算法的隧道网络风机群优化

胡清海¹ 潘国峰² 袁中原¹

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 广东迦南通用设备有限公司 佛山 528225)

【摘要】 隧道通风系统的能耗在隧道建设与运营成本中占据重要比例, 如何有效降低隧道风机系统的能耗成为关键问题。采用了蚁群优化算法 (Ant Colony Optimization, ACO) 对复杂隧道网络中的风机群进行并行优化。通过调整蚂蚁探索策略, 并结合目标函数中各个待优化变量的权重分布, 完成了对隧道网络中风机能耗的多维非线性约束优化, 实现了对射流风机数量与轴流风机风压的并行优化。并结合 MATLAB 进行工程仿真, 对特征交通流及进行优化, 结果表明: 改进的优化算法在处理多维非线性约束问题上表现出优越的性能, 能够在污染物浓度限值以及风速限制的约束下, 满足隧道内的通风需求, 并提供节能、合理的风机开启策略。

【关键词】 隧道通风; 隧道网络; 蚁群算法; 多维非线性约束

中图分类号 TP273 文献标志码 A

Energy-saving Optimization of Fan Groups in Tunnel Network Based on Ant Colony Algorithm

Hu Qinghai¹ Pan Guofeng² Yuan Zhongyuan¹

(1. Southwest Jiaotong University, School of Mechanical Engineering, Chengdu, 610031;

2. Guangdong Jianan General Equipment Co., Ltd, Foshan, 528225)

【Abstract】 The energy consumption of tunnel ventilation systems constitutes a significant proportion of the construction and operational expenditures associated with tunnels, rendering the effective reduction of energy consumption in tunnel fan systems a critical concern. This study employs the Ant Colony Optimization (ACO) algorithm to facilitate the parallel optimization of fan groups within complex tunnel networks. By refining the ant exploration strategy and integrating the weight distribution of various optimization variables within the objective function, the research attains multidimensional nonlinear constraint optimization of fan energy consumption in the tunnel network. This approach encompasses the concurrent optimization of the number of jet fans and the pressure of axial fans. Utilizing MATLAB for engineering simulations, the study conducts optimization for characteristic traffic flows. The findings reveal that the enhanced optimization algorithm exhibits superior performance in addressing multidimensional nonlinear constraint problems, satisfying ventilation requirements within the tunnel while conforming to pollutant concentration limits and wind speed constraints, thereby providing an energy-efficient and judicious fan operation strategy.

【Keywords】 Tunnel ventilation; Tunnel network; Ant colony algorithm; Multidimensional nonlinear constraints

0 引言

隧道网络是由复杂结构的互联隧道和通风系统组成, 各隧道段之间的气流关系复杂且相互耦合, 难以直接得出单一变量对隧道污染物的影响规

律。因此, 众多学者将流体网络分析^[1]与隧道网络结合, 对隧道网络进行计算分析, 并且取得了良好的效果。例如, 张光鹏^[2]通过建立隧道网络模型并解算, 成功实现了隧道双向互补式通风控制研究。

作者简介: 胡清海 (2000.10-), 男, 硕士研究生, E-mail: 17612823589@163.com

通讯作者: 袁中原 (1983.08-), 男, 博士, 副教授, E-mail: zhongyuan.yuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2025-01-17

近年来,许多学者尝试将机器学习应用于隧道风机的优化控制研究^[3,4]。蚁群优化算法(Ant Colony Optimization, ACO)是一种基于模拟蚂蚁觅食行为的启发式优化算法,最早由Dorigo等人^[5]提出,并在1997年,Dorigo M等^[6]发表文章对ACO的原理及应用做出了进一步的探讨,在组合优化、函数优化等领域取得了良好效果。本文通过改进蚁群算法,解决了隧道网络中风机群的多维非线性约束优化问题。蚁群算法最初用于路径规划问题,如旅行商问题,随着研究的深入,应用领域逐步扩展到其他优化问题。ZHOU Y等人^[7]将Dijkstra算法与蚁群算法结合,解决了机场自动引导车(AGV)的路径规划问题。如今,蚁群算法已广泛应用于组合优化、函数优化、系统辨识、机器人路径规划和数据挖掘等领域^[8]。相比传统的群智能算法,蚁群算法在组合优化问题中表现出独特优势^[9]。原思聪^[10]通过罚因子将多维有约束优化问题转化为统一的目标函数形式,并结合遗传算法提升精搜索过程,结果表明,蚁群与遗传算法结合在多维非线性约束问题中表现出优异的精度与全局解能力。

1 蚁群算法

1.1 传统蚁群算法

蚁群算法是一种基于群体的启发式随机搜索算法,模拟蚂蚁觅食行为。蚂蚁在觅食过程中会留下信息素,后续蚂蚁根据信息素强度选择路径。信息素浓度更新公式为:

$$P_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in allowed_k} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta} \quad (1)$$

式中: $P_{ij}^k(t)$ 为蚂蚁 k 从节点 i 到节点 j 的概

率; $\tau_{ij}(t)$ 为路径 ij 上的信息素浓度; η_{ij} 为启发式信息; α 、 β 为表示调节信息素和启发信息重要程度。

1.2 改进蚁群算法

本文通过调整信息素与启发信息的权重,提升启发信息的作用,从而优化隧道网络中风机群的蚂蚁算法。多维非线性约束问题目标是最小化优化函数 W , 在满足约束条件 C 下, 通过非线性变换函数判断解的可行性, 并引导蚂蚁向优解探索。

蚂蚁搜索分为两步:

(1) 判断移动过程

每只蚂蚁随机生成一个解, 并通过非线性变换进行约束判断。如果无解, 则蚂蚁在邻域内探索, 确保能找到满足约束条件的解。初始化参数为蚂蚁数、 α 、 β 、 ρ 、最大迭代次数、信息素矩阵等。若所有蚂蚁的解都不满足约束条件, 则跳转至下一步, 蚂蚁向自己或邻域移动并计算信息素增量, 进入下一次迭代。

(2) 启发搜索过程

当蚂蚁无解时, 通过与满足条件的解之间的启发量来引导蚂蚁向可行解移动, 并利用贪心算法选取最优路径; 出现可行解时, 根据启发量和信息素矩阵计算蚂蚁的移动概率, 使用贪心算法确定下一目标位置。计算蚂蚁的信息素增量, 并移动至目标位置及邻域。在所有满足约束条件的蚂蚁中, 选取目标优化函数最优的解作为本次迭代的最优解。通过多次迭代更新信息素矩阵, 引导蚂蚁朝更优解移动, 直到达到最大迭代次数或收敛。

最终, 保存目标函数最小的解作为优化结果。

2 模型建立及仿真

2.1 模型建立

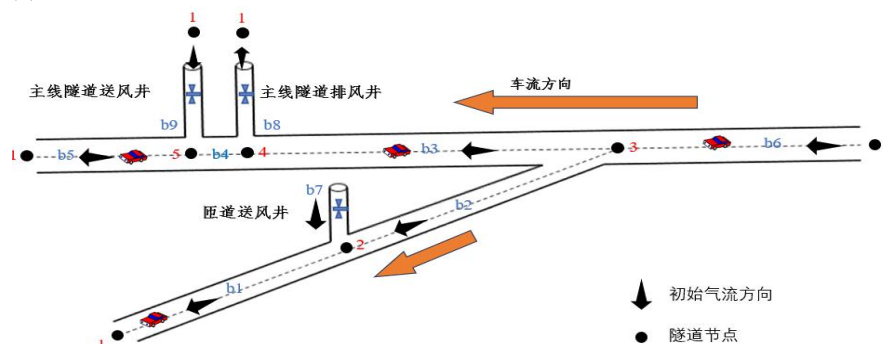


图1 隧道通风网络图

Fig.1 Tunnel ventilation network diagram

本文旨在对隧道网络中射流风机以及轴流风

机能耗进行优化。其中, 隧道网络属于分流式隧

道, 具体如图 1 所示 (箭头表示初始设计气流方向), 包含主线隧道以及匝道。主线隧道长 4650m, 断面积 115m², 当量直径 9.58m, 匝道隧道长 4500m, 断面积 62m², 当量直径 8m, 且都包含有通风竖井, 总体通风方式采用竖井送排式纵向通风。首先, 根据文献[2], 建立隧道网络通风数值计算模型, 包括空气动力学模型, 交通流模型

表 1 各个隧道段风机数量/风压优化范围

隧道编号	b1/台	b2/台	b3/台	b4/台	b5/台	b6/台	b7/Pa	b8/Pa	b9/Pa
风机数量/风压	0-34	0-12	0-8	0	0-12	0-32	100-1500	100-1500	100-1500

根据已有的数据建立隧道网络污染物扩散模型以及蚁群算法优化模型, 建立优化目标函数, 主要以风机能耗为优化对象, 其函数如式 (2) 所示。

$$W = \sum_{i=1}^n k_i \cdot m_i \cdot P_i + \sum_{j=1}^l k_j P_j$$

(2)

式中: W 为隧道网络风机总能耗, kW; m 为隧道段开启风机数量; n 为安装射流风机隧道段数量; l 为安装轴流风机竖井数量; k 为各个隧道段内的风机能耗权值, 表征隧道段风机变化对整体的影响大小, 根据具体情况设定, 一般根据隧道风机数量变化时对隧道内最大污染物浓度影响大小因子确定, $k \in (0,1)$; P 为单台风机能耗。

2.2 约束条件

约束条件是寻求最优解的必要条件, 其指引蚂蚁的移动方向, 使得蚂蚁向着满足约束的方向进行探索, 本次研究根据《公路隧道通风设计细则》JTG/TD70/2-02-2014 以及《地下空间设计标准》SJG 95-2021, 主要包含以下方面约束。其中, 考虑到车流量大, 可能经常发生阻滞, 应按日常阻滞标准进行设计, 即 CO 浓度小于 70ppm, VI 浓度小于 0.007/m; 隧道内风速计算应大于 0m/s, 确保隧道内污染物顺利排出。

表 2 优化约束限制条件

约束问题	约束条件
隧道内通风风速	(0,8] (m/s)
通风井风速	≥13 (m/s)
主线隧道出口处最大 CO 浓度	≤70 (ppm)
主线隧道出口处最大 VI 浓度	≤0.007 (/m)
匝道隧道出口处最大 CO 浓度	≤70 (ppm)
匝道隧道出口处最大 VI 浓度	≤0.007 (/m)

以及污染物计算模型, 通过模型整合得到隧道网络中风速以及污染物计算模型, 用以判断约束条件判断。

将当前隧道网络进行节点划分, 分为 5 个节点以及 9 个隧道段, 其中节点 1 为大气节点, 给定 0Pa, 对各个隧道段进行编号 b1-b9, 各个隧道段具体风机数量或者风压可优化范围如表 1 所示。

3 结果与讨论

现有拟定连续交通流 TF1, 使用当前蚁群算法优化策略对交通流 TF1 进行优化。首先对匝道车流量不变时的特征交通流 TF1 进行优化, TF1 交通流随时间分布如图 2 所示。

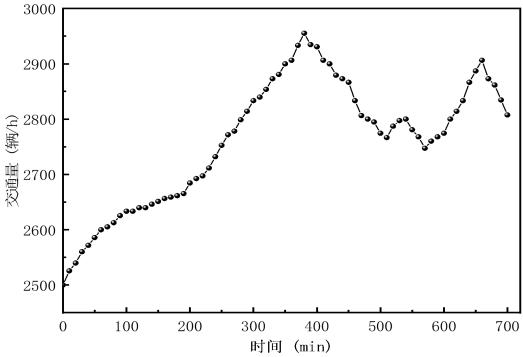


图 2 TF1 交通流

Fig.2 TF1 traffic flow

优化结果如图 3 所示, 包含隧道内最大污染物浓度、隧道网络整体风机能耗、隧道内最大污染物浓度。

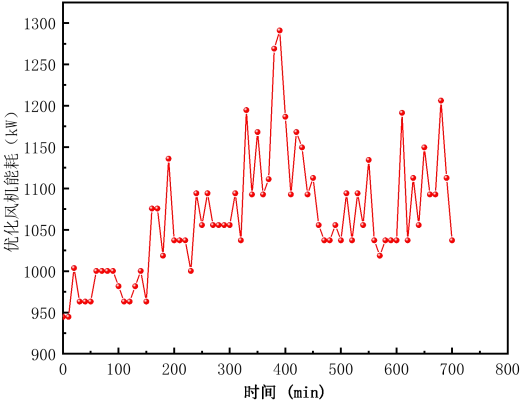


图 3 优化后总风机能耗

Fig.3 Total fan energy consumption after optimization

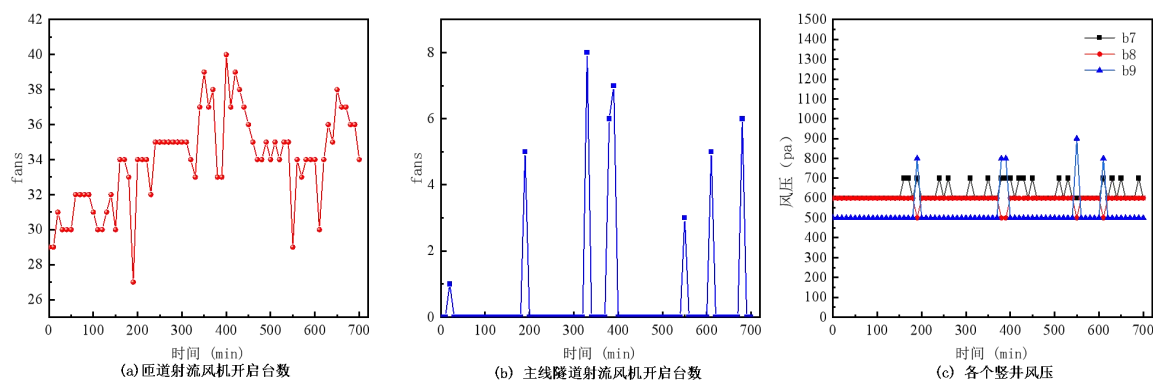


图4 射流风机、轴流风机开启状态

Fig.4 Operating status of jet fans and axial fans

由图4可见,优化后隧道内风机能耗虽有小范围波动,但整体趋势与交通流量变化一致,呈现“大小峰”特征。这是由于隧道网络风机开启的“收益”不同,算法根据能耗权重 k 选择最优策略所致。图

5显示,主线隧道射流风机基本关闭,仅在交通流高峰时短暂开启;匝道风机开启台数随交通流呈双峰变化;竖井风压保持在500~700Pa,偶尔波动以满足风速限值。

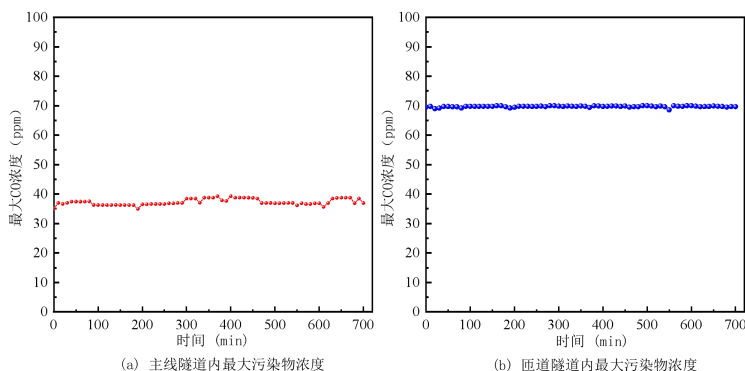


图5 优化结束时隧道网络内最大污染物浓度

Fig.5 Maximum pollutant concentration in the tunnel network at the end of optimization

图5表明,主线隧道污染物浓度维持在30~40ppm,匝道浓度不超过70ppm。主线因车速快,主要依靠交通风力通风,匝道车速低、污染敏感,需更多风机干预。整体而言,优化算法确保污染物浓度与能耗分布符合交通通风规律,在隧道网络风机能耗优化中表现良好。

4 结论

本研究在传统蚁群算法基础上改进了蚂蚁搜索策略,降低信息素浓度权重,提高启发信息权重,实现多维变量并行优化。在MATLAB上对隧道网络射流风机台数和轴流风机风压进行优化仿真,结果表明:

(1) 连续变量优化时,目标函数值与交通量呈现相同趋势,表明算法具备良好收敛性和鲁棒性,支持隧道风机控制与污染物管理优化。

(2) 对于复杂隧道,既包含射流风机也包含轴流风机,由于轴流风机风压改变所需要的能耗远大于开启一台射流风机的能耗需求,根据优化函数根据能耗最小原则以及引入的能耗权值“ k ”分布,在对进行单个特征连续优化时,优化结果趋向于优先改变射流风机的开启台数,保持轴流风机的风压于某个稳定值。结果表明,“ k ”值的引入可以帮助算法快速得向稳定结果进行搜索,且优先改变射流风机开启策略。

(下转第612页)