

基于和声搜索的环控通风调控策略优化

孙良

(西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 西安 710055)

摘要: 针对地铁车站环控通风系统风机定频运行, 导致风机无法跟随站台 PM2.5 的浓度的变化而改变频率, 造成能源浪费; 根据环控通风系统的运行现状, 可将其划分为只送不排模式、不送只排模式和即送又排模式, 并考虑到环控通风系统应适应多扰动的影响, 选取最小二乘法系统辨识一阶惯性时滞模型, 用于描述变量动态变化响应传递函数, 采用自抗扰控制器建立环控通风系统控制模型, 利用和声搜索算法对环控通风模型 PM2.5 浓度设定值寻优, 结果显示经过策略优化之后, 只送不排模式、不送只排模式和即送又排模式站台 PM2.5 平均浓度分别降低了 7%、8% 和 10%, 风机能耗分别降低了 19%、19% 和 30%。

关键词: 站台空气品质; 环控通风系统; 一阶惯性时滞模型; 和声搜索算法; 自抗扰控制器

Optimization of Loop-controlled Ventilation Regulation Strategy Based on Harmony Search

SUN Liang

(School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The fixed frequency operation of fans in the loop-controlled ventilation system of subway stations leads to the inability of fans to follow the change of PM2.5 concentration on the station platform and change the frequency, resulting in energy waste. According to the operation status of the loop-controlled ventilation system, it can be divided into the three modes of sending only without exhausting, not sending only exhausting, sending and exhausting. Considering that the loop-controlled ventilation system should adapt to the influence of multiple disturbances, the least squares system is selected to identify the first-order inertia time delay model for describing the transfer function of dynamic response in variables. The active disturbance rejection controller is used to establish the control model of the loop-controlled ventilation system, and the harmony search algorithm is used to optimize the PM2.5 concentration setting value of the loop-controlled ventilation system. The results show that after the optimization, the average PM2.5 concentrations on the platform are reduced by 7%, 8% and 10% in the sending-only mode, the non-sending-only mode and the sending-and-exhausting mode, respectively, and the energy consumption of the fan is reduced by 19%, 19% and 30%, respectively.

Keywords: station air quality; loop-controlled ventilation system; the first-order inertia time delay model; harmony search algorithm; active disturbance rejection controller

0 引言

随着城市化进程的快速发展, 城市轨道交通越来越受到关注, 凭借便捷、舒适、安全、守时和经济等诸多优势在国内得到迅速发展, 已经成为人们出行方式最主要的交通工具。地铁车站是城市轨道交通的重要组成部分, 因其多为地下空间, 密封性强且客流量大, 导致地铁车站台 PM2.5 浓度高, 空气品质差, 易引发人体疾病。世界卫生组织 (WHO) 在 2005 年版的《空气质量准则》中指出: 当 PM2.5 年均浓度达到 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时, 人的死亡风险比 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的情形约增加 15%^[1]。

通过调查选取北京、上海、武汉、深圳、成都和西安这 6 个城市^[2-8], 每个城市选取了 6 个地铁车站站台, 如表 1 所示。通过获得站台日平均 PM2.5 的数据, 并根据 GB3095-2012《环境空气质量标准》^[9] 和 GB50157-2013《地

铁设计规范》^[10] 绘制表 2, 如下所示。

各城市地铁车站台 PM2.5 浓度 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

城市序号	北京	上海	武汉	深圳	成都	西安
A	西直门站 (69)	常熟路站 (66)	常青花园站 (59)	大剧院站 (57)	金周路站 (67)	北大街站 (89)
B	宋家庄站 (174)	陕西南路站 (195)	青年路站 (166)	科学馆站 (114)	九里堤站 (98)	安远门站 (105)
C	呼家楼站 (176)	上海南站 (123)	江汉路站 (181)	华强路站 (166)	锦城广场站 (98)	龙首门站 (138)
D	安定门站 (51)	中山北路站 (56)	积玉桥站 (69)	桃园站 (52)	双桥路站 (45)	大明宫西站 (46)
E	青年路站 (52)	延长路站 (46)	螃蟹岬站 (54)	宝安中心站 (48)	天府广场站 (66)	市图书馆站 (68)
F	永安里站 (103)	马戏城站 (105)	宝通寺站 (107)	萍洲站 (97)	省体育馆站 (86)	凤城五路站 (132)

收稿日期: 2023-04-06; 修回日期: 2023-04-11。

作者简介: 孙良 (1996-), 男, 硕士研究生。

引用格式: 孙良. 基于和声搜索的环控通风调控策略优化[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(1): 85-91, 98.

表 2 评价标准 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

参照标准	GB3095-2012 《环境空气质量标准》	GB50157-2013 《地铁设计规范》
PM2.5 (24h 均值, $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	一级:35	250
	二级:75	

从表 1 和表 2 可知, 36 个地铁车站台内的日平均 PM2.5 浓度都在《地铁设计规范》规定限值以下, 但它们都超过《环境空气质量标准》所规定的一级标准限值, 且有 19 个地铁车站超过了二级标准限值。因此, 地铁车站台的环控通风系统对站台 PM2.5 浓度的调控显得尤为重要, 但环控通风系统在调控站台 PM2.5 浓度的过程中能源消耗大, 图 1 是地铁车站各项能耗占比情况^[11], 其中地铁车站风机的总能耗占 17%, 是除冷水机组和照明设备之外最大耗能设备。所以如何通过环控通风系统的优化调控实现降低站台 PM2.5 的浓度值以及环控通风系统能耗, 是一个值得研究的问题。

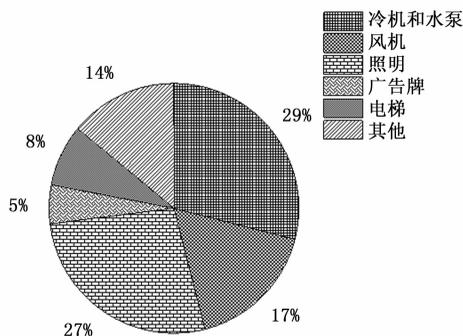


图 1 地铁车站设备能耗占比图

国内外针对地铁车站环控通风系统的调控开展了大量的研究。Kim 等人通过 PI 控制器调节环控通风系统风机频率, 控制站外颗粒物流入的浓度, 实现降低能耗和提高空气品质的目标^[12]。Lee 等人提出增益调度方法控制站台空气品质, PID 控制器控制风机频率, 划分不同的时间段进行调节, 可将站台颗粒物浓度保持在 $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下, 并节约 4% 的能耗^[13]。李勇通过研究拟合风机频率与站台温度, 在构建 PID 控制模型的同时, 采用 Fluent 对运行状况进行模拟, 提出的智能控制方法能改善站台空气环境^[14]。贾栋提出使用模糊 PID 控制算法控制风机频率, 改变送风量, 并对公共区环境参数综合控制。结果表明采用模糊 PID 控制具有调节时间短、超调量小和抑制干扰的效果^[15]。

Heo 等人提出基于深度强化学习算法的数据驱动智能通风控制系统方法。可降低 14.4% 的能耗, 提高站台空气品质^[16]。Nam 等人采用模式分解和移动窗口的门控循环单元模型对站外空气品质和客流量预测, 并提出迭代动态规划的环控通风系统, 提高空气品质和 15.65% 的能源效率^[17]。杨福通过分析风水系统换热过程、变风量模式和定风量模式, 提出变风量和定风量联合的节能调控运行模式。此模式比变风量节能 4%, 比定风量节能 17%^[18]。

温情通过神经网络预测客流量, 调整环控通风系统的控制策略, 动态调节新风量的大小, 实现新风系统的变风量控制^[19]。

Liu 等人利用预测误差法辨识方变量过程模型, 用模型预测控制器控制颗粒物浓度, 遗传算法确定最优集合点。此策略降低颗粒物浓度和节约 24% 的能耗^[20]。Li 等人通过 PID 控制站台颗粒物浓度, 遗传算法在不同时间间隔确定站台颗粒物浓度的最佳设定值, 降低能耗 10.3%, 颗粒物浓度峰值降低 $14\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[21]。

环控通风空调系统的控制方法, 除了能实现健康的站内空气品质和降低通风能耗的目标外, 还应适应多扰动的影响。PID 控制精度低, 有一定滞后性, 无法实现动态输入调整; 各个 PID 单点控制之间没有交互, PID 控制方法不适用于有节能要求与精细控制需求的地铁车站。模型预测控制需要适当的、较为精确的模型; 且因其在线优化而要求控制器具有较为强大的计算能力, 故对于不确定的多扰动的系统控制能力有限。神经网络控制在线优化计算量大、算法复杂; 需要精确的系统模型, 对于复杂的多扰动的系统适用性不强。因此, 鉴于自抗扰控制器不依赖于精确的对象模型, 对系统的不确定性具有较强的适应性, 并具有抗干扰能力强、精度高、响应速度快等特点, 选取自抗扰控制器建立通风控制模型。

1 PM2.5 动态变化情况

1.1 运行现状

本文以西安某地铁车站为研究对象, 地铁车站环控通风系统相关设备的控制是按照由地铁运营相关部门根据实际情况制定的时间表确定相应的模式运行, 具体运行模式如表 3 所示。

表 3 环控通风系统运行时间表^[22]

季节	时间	区域	运行模式	每天运行时间/h
采暖季	11/15—次年 3/15	公共区	在高峰期间歇运行, 并执行全新风模式, 在非高峰期只进行排风不送风。可根据实际情况灵活调整。	3
过渡季	10/1—10/15 4/16—4/30	公共区	冷机启动执行最小新风模式, 冷机关闭执行全新风模式。	17
通风季	10/16—11/14 3/16—4/14	公共区	在正常情况下执行全新风模式, 若站台温度过低时, 大系统在高峰期间歇运行。	17
空调季	5/1—9/30	公共区	在冷机未运行时, 执行全新风模式。在冷机开启后, 执行最小新风模式。	17

由表 3 可知, 每个季度占据时间短则 1 个月, 长可达 5 个月, 但地铁车站空气品质是一个实时变化的过程, 环控通风系统不能满足跟随空气品质动态变化的控制要求, 且环控通风系统能源利用率低。因此, 考虑到现环控通风系

统无论运行何种模式,其都将有组合空调风机或回排风机的参与,可将环控通风系统运行模式划分为只送不排模式、不送只排模式、即送又排模式。

1.2 数据采集

选取站台 PM_{2.5} 浓度反映地铁车站的空气品质,引用文献^[13,16,23-24]中西安市某地铁车站测得 10 天的客流量、地铁时刻表、站台 PM_{2.5} 浓度、站外 PM_{2.5} 浓度、组合式空调机和回排风机相应的频率数据,采样间隔为 0.5 h,如图 2 所示。

图 2 (a) 显示了上午 7 点至 10 点和下午 5 点至 8 点有大量的地铁通过市图书馆站。图 2 (b) 显示了一个完整的星期内客流量的变化情况,在工作日,高峰期时间分别为上午 7 点至 10 点和晚上 5 点至 8 点,而周末相对比较平均。图 2 (c) 显示了显示站台 PM_{2.5} 浓度的日变化有两个高峰期,分别为上午 7 点至 10 点和晚上 5 点至 8 点,其变化规律和客流量相类似,站外 PM_{2.5} 浓度小于站台 PM_{2.5} 浓度。图 2 (d) 显示了组合空调风机的频率回排风机的频率的数值基本是在 43 Hz 上下浮动,属于定频控制。

1.3 一阶惯性时滞模型

在对控制地铁车站台内 PM_{2.5} 浓度的过程中,首先是要对站台 PM_{2.5} 浓度进行动态识别。因此,需要一个能描述平台 PM_{2.5} 浓度变化的动态模型。本研究使用最小二乘法辨识一阶惯性时滞模型 (FOPTD, first-order plus time delay model) 从而获得 PM_{2.5} 动态变化模型,其传递函数如下所示^[25-26]:

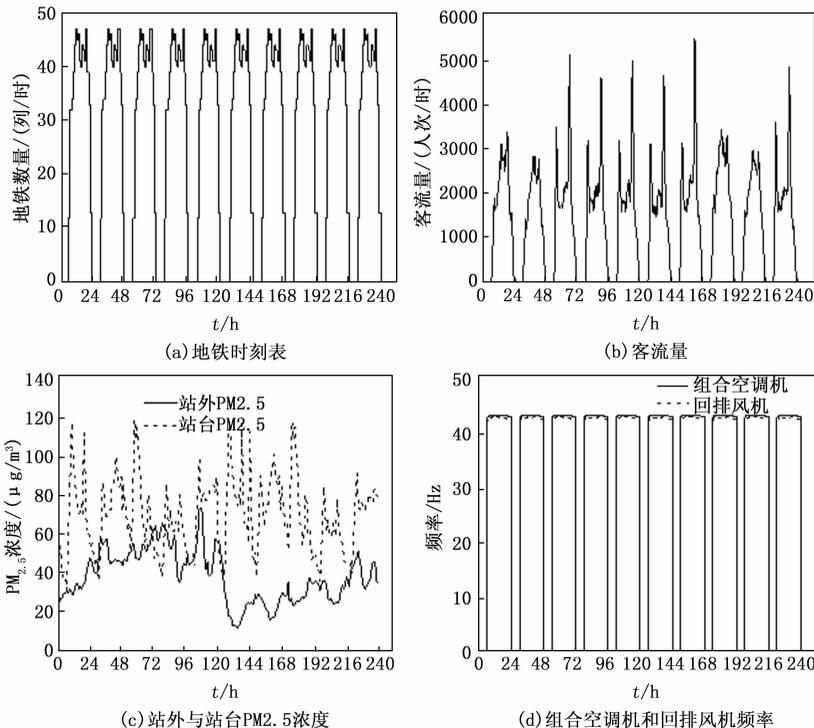


图 2 地铁车站空气品质相关数据

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1} \quad (1)$$

$u(s)$ 和 $y(s)$ 是系统的输出和输入变量, K, T, τ 分别是系统的静态增益、时间常数和滞后时间。地铁站台的 PM_{2.5} 浓度主要受到地铁运行时刻表、客流量以及站外 PM_{2.5} 浓度的影响,这 3 个视为环控通风系统的干扰变量。此外,在控制站台 PM_{2.5} 浓度的过程中,是通过改变组合空调风机和回排风机的频率实现的,因此,需要建立每个变量与站台 PM_{2.5} 浓度动态变化的 FOPTD。

1) 干扰变量: 地铁时刻表。

G_{d1} 为站台 PM_{2.5} 浓度对地铁数量变化响应的过程模型。其输入是地铁数量,输出为站台 PM_{2.5} 浓度,其传递函数如下所示:

$$G_{d1}(s) = \frac{0.2767e^{-0.0309s}}{0.0565s + 1} \quad (2)$$

由式可知,每单位时间内因地铁运行会增加站台上 0.2767 倍的 PM_{2.5},站台上因地铁运行导致的 PM_{2.5} 变化需要 0.0309 天 (44 分钟),站台上 PM_{2.5} 变化达到总变化量的 63.3% 需要 0.0565 天 (81 分钟)。

2) 干扰变量: 客流量。

G_{d2} 为站台 PM_{2.5} 浓度对客流量变化响应的过程模型。其输入客流量,输出为站台 PM_{2.5} 浓度,其传递函数如下所示:

$$G_{d2}(s) = \frac{0.0991e^{-0.0419s}}{0.0565s + 1} \quad (3)$$

由式可知,每单位时间因客流量会增加站台上 0.0991 倍的 PM_{2.5},站台上因客流量导致的 PM_{2.5} 变化需要 0.0419 (60 分钟) 天,站台上 PM_{2.5} 变化达到总变化量的 63.3% 需要 0.0565 天 (81 分钟)。

3) 干扰变量: 站外 PM_{2.5} 浓度。

G_{d3} 为站台 PM_{2.5} 浓度对客流量变化响应的过程模型。其输入是站外 PM_{2.5} 浓度,输出为站台 PM_{2.5} 浓度,其传递函数如下所示:

$$G_{d3}(s) = \frac{1.0906e^{-0.0502s}}{0.0565s + 1} \quad (4)$$

由式可知,每单位时间因站外 PM_{2.5} 浓度变化会增加站台上 1.0906 倍的 PM_{2.5},站台上因站外 PM_{2.5} 导致的 PM_{2.5} 变化需要 0.0502 天 (72 分钟),站台上 PM_{2.5} 变化达到总变化量的 63.3% 需要 0.0565 天 (81 分钟)。

4) 操纵变量: 组合空调风机。

G_{p1} 为站台 PM_{2.5} 浓度对组合空调风机频率变化响应的过程模型。其输入是风机频率,输出为站台 PM_{2.5} 浓度,其传递函数如下所示:

$$G_{p1}(s) = \frac{-1.2026e^{-0.0224s}}{0.0126s + 1} \quad (5)$$

由式可知，每增加一个风机，站台上的 PM2.5 浓度会减少 1.202 6 倍，站台上因风机导致的 PM2.5 变化需要 0.022 4 天（32 分钟），站台上 PM2.5 变化达到总变化量的 63.3% 需要 0.012 6 天（18 分钟）。

5) 操纵变量：回排风机。

G_{p2} 为站台 PM2.5 浓度对回排风机频率变化响应的过程模型。其输入是风机频率，输出为站台 PM2.5 浓度，其传递函数如下所示：

$$G_{p2}(s) = \frac{-1.827 e^{-0.0226s}}{0.0022s + 1} \quad (6)$$

由式可知，每增加一个风机，站台上的 PM2.5 减少 1.827 倍，站台上因风机导致的 PM2.5 变化需要 0.022 6 天（33 分钟），站台上 PM2.5 变化达到总变化量的 63.3% 需要 0.002 2 天（3 分钟）。

选取均方根误差（RMSE, root mean square error）作为评价指标，其中 \tilde{y}_i 为 FOPTD 的输出， y_i 实际测量值， n 为训练数据个数，式如下所示：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2} \quad (7)$$

通过计算结果如下表 4 所示。

表 4 评价指标

模型	G_{d1}	G_{d2}	G_{d3}	G_{p1}	G_{p2}
RMSE	0.638 9	0.267 7	0.611 6	0.367 3	0.371 6

从表中的评价指标可以知道，客流量、组合空调风机和回排风机的模型输出值和测量值能够很好的拟合，但是地铁时刻表和站外 PM2.5 浓度的变化模型输出值和测量值吻合度较差。

2 环控通风系统调控策略优化

地铁车站环控通风系统采取的控制原理如图 3 所示，控制系统中将自抗扰控制器（ADRC, active disturbances rejection control）作为反馈控制器（FB, feedback control），只送不排模式下控制组合空调风机，不送只排模式下控制回排风机，即送又排模式下控制组合空调风机和回排风机，反馈控制器通过调节风机频率控制站台上 PM2.5 浓度，达到 PM2.5 浓度的设定值，通风系统由 5 个 FOPTD 构成，将控制系统与通风系统集成，实现环控通风的目的。

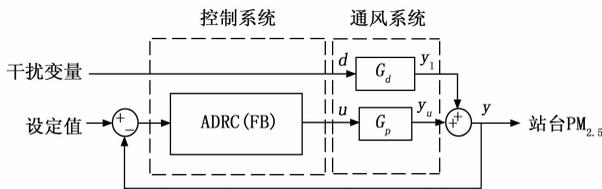


图 3 环控通风系统控制原理图

2.1 自抗扰控制器

自抗扰控制器中的跟踪微分器可以避免因为期望值的

突变导致控制变量对控制系统发生较大的冲击，跟踪微分器能让突变的信号变成连续渐变的信号，对控制系统起到缓冲作用，并且采用非线性组合的方式来降低系统的稳态误差，并且避免系统发生超调现象；非线性状态误差反馈控制律则是通过取代线性加权的组合，以达到更优的控制效果；扩张状态观测器可以进行实时估计和补偿，消除控制系统内部不确定模型和外部的总干扰变量。

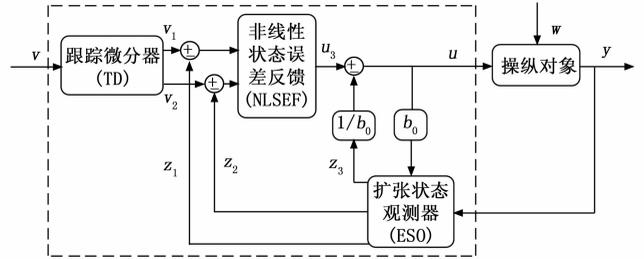


图 4 自抗扰控制器结构图

跟踪微分器的设计：

$$\begin{cases} v_1(t+1) = v_1(t) + T v_2(t) \\ v_2(t+1) = v_2(t) + T \cdot fh \\ fh = -r(r(r(v_1 - v) + 3v_2)) \end{cases} \quad (8)$$

其中： T 为采样周期； r 为速度因子； fh 为最速下降函数。

扩张状态观测器的设计：

$$\begin{cases} \epsilon = z_1(t) - y(t) \\ z_1(t+1) = z_1(t) + T(z_2(t) - \beta_{01}\epsilon) \\ z_2(t+1) = z_2(t) + T(z_3(t) - \beta_{02}fal(\epsilon, \alpha_1, \delta) + b_0 u(t)) \\ z_3(t+1) = z_3(t) - T\beta_{03}fal(\epsilon, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (9)$$

$$fal(\epsilon, \alpha_i, \delta) = \begin{cases} |\epsilon|^\alpha \text{sgn}(\epsilon), & |\epsilon| > \delta, \\ \epsilon/\delta^{1-\alpha}, & |\epsilon| \leq \delta, \end{cases} \quad \delta > 0 \quad (10)$$

其中： δ 为区间长度； α_1, α_2, b_0 为设计参数； $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 为整定参数，

非线性状态误差反馈控制率的设计：

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = v_3 - z_2 \\ u_0 = \beta_1 fal(e_1, \alpha_3, \delta) + \beta_2 fal(e_1, \alpha_4, \delta) \end{cases} \quad (11)$$

其中： α_3, α_4 为设计参数； β_1, β_2 为整定参数。

扰动补偿控制量设计：

$$u = u_0 - \frac{z_3}{b_0} \quad (12)$$

通过遗传算法（GA, genetic algorithm）对自抗扰控制器的参数进行寻优整定，从而获得良好的控制效果，考虑目标函数的建立应综合考虑控制精度、响应速度和稳定性问题，采用目标函数如下所示：

$$J_{\min} = \int_0^t \omega_1 t |e(t)| dt + \omega_2 |\sigma| \quad (13)$$

其中： $e(t)$ 为输入值与输出值之间的误差， t 为时间， σ 为超调量， ω_1 和 ω_2 为权重系数，设定 $\omega_1 = 3, \omega_2 = 1$ 。

遗传算法对参数寻优步骤如下：

- 1) 初始化整定参数的种群为 100；
- 2) 设置遗传算法参数：进化代数 300，选择概率为 0.08，交叉概率为 0.6，变异概率为 0.05，计算目标函数；
- 3) 对整定参数种群进行选择、交叉和变异，若满足终止条件，进行步骤 4)，反之，继续进行步骤 3)；
- 4) 符合终止条件，输出整定参数值。

2.2 控制策略优化

环控通风系统能耗可以通过风机频率和能耗的数据，采用拟合的方法取得三阶多项式来进行估计^[20]，组合空调风机和回排风机结论大致相同^[27]。

$$E_n = 0.000742286(f)^3 - 0.00357(f)^2 + 0.21005(f) - 0.5386 \quad (14)$$

其中： f 为风机频率。考虑到风机不工作会导致站台空间突然恶化和保证向站台提供最小新风量的要求，变频器的最小频率限制在 20 Hz。

在设计地铁环控通风系统的过程中，对所提出的环控通风系统策略进行优化，在控制站台 PM2.5 浓度，且环控通风系统能耗最小的情况下，采用和声搜索算法（HS, harmony search algorithm）对 PM2.5 浓度设定值进行寻优，目标函数如下所示。

模式一：只送不排模式下，运行策略优化的目标函数。

$$\left\{ \begin{aligned} J_1 &= \sum_t F_{\min}(\omega_1 \times L_{p1}(t) + \omega_2 \times E_{n1}(t)) \\ \omega_1 &= 7.5, \omega_2 = 1, (75 \mu\text{g}/\text{m}^3 \leq L_{p1}(t)) \\ \omega_1 &= 3.5, \omega_2 = 1, (35 \mu\text{g}/\text{m}^3 \leq L_{p1}(t) < 75 \mu\text{g}/\text{m}^3) \\ \omega_1 &= 1, \omega_2 = 1, (L_{p1}(t) < 35 \mu\text{g}/\text{m}^3) \\ L_{p1,\min} &\leq L_{p1} \leq L_{p1,\max} \\ E_{n1,\min} &\leq E_{n1} \leq E_{n1,\max} \\ f_{1,\min} &\leq f_1 \leq f_{1,\max} \end{aligned} \right. \quad (15)$$

其中： n 表示更新设定点的时间间隔 24 h。 $L_{p1}(t)$ 和 $E_{n1}(t)$ 分别为 t 时刻站台 PM2.5 浓度和环控通风系统的能量消耗。 ω_1 和 ω_2 分别是确定站台 PM2.5 浓度和通风能耗相对重要性的权重。

模式二：不送只排模式下，运行策略优化的目标函数。

$$\left\{ \begin{aligned} J_2 &= \sum_t F_{\min}(\omega_1 \times L_{p2}(t) + \omega_2 \times E_{n2}(t)) \\ \omega_1 &= 7.5, \omega_2 = 1, (75 \mu\text{g}/\text{m}^3 \leq L_{p2}(t)) \\ \omega_1 &= 3.5, \omega_2 = 1, (35 \mu\text{g}/\text{m}^3 \leq L_{p2}(t) < 75 \mu\text{g}/\text{m}^3) \\ \omega_1 &= 1, \omega_2 = 1, (35 \mu\text{g}/\text{m}^3 < L_{p2}(t)) \\ L_{p2,\min} &\leq L_{p2} \leq L_{p2,\max} \\ E_{n2,\min} &\leq E_{n2} \leq E_{n2,\max} \\ f_{2,\min} &\leq f_2 \leq f_{2,\max} \end{aligned} \right. \quad (16)$$

模式三：即送又排模式下，运行策略优化的目标函数。

$$\left\{ \begin{aligned} J_3 &= \sum_t F_{\min}(\omega_1 \times (L_{p1}(t) + L_{p2}(t)) + \omega_2 \times (E_{n1}(t) + E_{n2}(t))) \\ \omega_1 &= 7.5, \omega_2 = 1, (75 \mu\text{g}/\text{m}^3 \leq L_{p1}(t) + L_{p2}(t)) \\ \omega_1 &= 3.5, \omega_2 = 1, (35 \mu\text{g}/\text{m}^3 \leq L_{p1}(t) + L_{p2}(t) < 75 \mu\text{g}/\text{m}^3) \\ \omega_1 &= 1, \omega_2 = 1, (35 \mu\text{g}/\text{m}^3 < L_{p1}(t) + L_{p2}(t)) \\ L_{p1,\min} &\leq L_{p1} \leq L_{p1,\max} \\ L_{p2,\min} &\leq L_{p2} \leq L_{p2,\max} \\ E_{n1,\min} &\leq E_{n1} \leq E_{n1,\max} \\ E_{n2,\min} &\leq E_{n2} \leq E_{n2,\max} \\ 0 &\leq L_{p1} + L_{p2} \leq 250 \\ 8 &\leq E_{n1} + E_{n2} \leq 94 \\ f_{12,\min} &\leq f \leq f_{12,\max} \end{aligned} \right. \quad (17)$$

和声搜索算法对 PM2.5 浓度设定值寻优步骤如下：

- 1) 建立目标函数，明确约束条件；
- 2) 设置和声搜索算法参数：记忆库大小为 500，搜索概率为 0.9，微调概率为 0.1，创作次数为 300，频宽为 1，初始化和声记忆库；
- 3) 产生新解，更新和声记忆库，若满足终止条件，进行步骤 4)，反之，继续进行步骤 3)；
- 4) 满足终止条件，寻得最优解。

3 实验结果与分析

自抗扰控制器的设计参数为： $T = 0.01, r = 10, \delta = 0.01, \alpha_1 = 0.5, \alpha_2 = 0.25, b_0 = 10, \alpha_3 = 0.75, \alpha_4 = 1$ ；只送不排模式的整定参数为： $\beta_{01} = 105.64, \beta_{02} = 66.07, \beta_{03} = 98.81, \beta_1 = 0.61, \beta_2 = 0.6$ ；不送只排模式整定参数为： $\beta_{01} = 142.71, \beta_{02} = 141.33, \beta_{03} = 188.27, \beta_1 = 0.71, \beta_2 = 0.75$ ；即送又排模式整定参数为： $\beta_{01} = 198.81, \beta_{02} = 187.94, \beta_{03} = 384.68, \beta_1 = 0.92, \beta_2 = 0.97$ 。

3.1 只送不排模式

图 5 (a) 中 T-PM2.5 是站台 PM2.5 浓度变化现状，FB-PM2.5 是只送不排模式环控通风系统 PM2.5 浓度变化情况。图中 FB-PM2.5 浓度变化基本是处于二级标准限值范围左右。在组合空调风机未开启时，FB-PM2.5 变化浓度与 T-PM2.5 浓度变化情况相同，在组合空调风机开启之后，在高峰期，FB-PM2.5 浓度降低，在非高峰期，只送不排模式环控通风系统因节约能耗，导致组合空调风机频率降低，FB-PM2.5 浓度上升。

图 5 (b) 中 T-f 是组合空调风机频率变化现状，FB-f 是只送不排模式环控通风系统组合空调风机频率变化情况。由图 2 (d) 可知 T-f 采用定频方式运行，而 FB-f 频率主要是根据 FB-PM2.5 浓度的变化而变化。在夜间组合空调风机未运行，FB-f 频率为零，在高峰期 FB-f 频率随着 FB-PM2.5 浓度增加而增加，在非高峰期 FB-f 频率随着 FB-PM2.5 浓度降低而降低。

图 5 (c) 中 $T-E_n$ 是环控通风系统能耗变化现状, $FB-E_n$ 是只送不排模式环控通风系统能耗变化情况, $FB-E_n$ 能耗变化规律和 $FB-f$ 频率变化相似。在夜间 $FB-E_n$ 能耗为零, 在高峰期 $FB-E_n$ 能耗随着 $FB-f$ 频率的增加而增加, 在非高峰期 $FB-E_n$ 能耗随着 $FB-f$ 频率的降低而降低。

3.2 不送只排模式

图 6 (a) 中 $T-PM_{2.5}$ 是站台 $PM_{2.5}$ 浓度变化现状, $FB-PM_{2.5}$ 是不送只排模式环控通风系统 $PM_{2.5}$ 浓度变化情况, $FB-PM_{2.5}$ 浓度变化基本是处于二级标准之内, 在回排风机未开启时, $FB-PM_{2.5}$ 浓度变化与 $T-PM_{2.5}$ 浓度变化情况相同, 在回排风机开启之后, 在高峰期, $FB-PM_{2.5}$ 浓度降低, 在非高峰期, 不送只排模式环控通风系统因节约能耗, 导致回排风机频率降低, $FB-PM_{2.5}$ 浓度上升。

图 6 (b) 中 $T-f$ 是回排风机频率变化现状, $FB-f$ 是不送只排模式环控通风系统回排风机频率变化情况。 $T-f$ 原采用定频方式运行, 由图 3 (d) 可知, 回排风机频率小于组合空调风机频率, 回排风机 FOPTD 的增益绝对值大于组合空调风机 FOPTD 的增益绝对值, 导致在不送只排模式环控通风系统能耗与只送不排模式环控通风系统能耗相同的情况下, 不送只排模式环控通风系统 $PM_{2.5}$ 浓度均值低于只送不排模式环控通风系统 $PM_{2.5}$ 浓度均值, 此

外, 还有可能只送不排模式环控通风系统组合空调风机运行时携带站外 $PM_{2.5}$ 进入站台造成这种情况的发生。 $FB-f$ 频率主要是根据 $FB-PM_{2.5}$ 浓度的变化而变化。回排风机频率具备组合空调风机频率高峰期、非高峰期和夜间的变化特性。

图 6 (c) 中 $T-E_n$ 是环控通风系统能耗变化现状, $FB-E_n$ 是不送只排模式环控通风系统能耗变化情况, $FB-E_n$ 能耗变化规律和 $FB-f$ 频率变化相似。在夜间 $FB-E_n$ 能耗为零, 在高峰期 $FB-E_n$ 能耗增加, 在非高峰期 $FB-E_n$ 能耗降低。

3.3 即送又排模式

图 7 (a) 中 $T-PM_{2.5}$ 是站台 $PM_{2.5}$ 浓度变化现状, $FB-PM_{2.5}$ 是只送不排模式环控通风系统 $PM_{2.5}$ 浓度变化情况。图中 $FB-PM_{2.5}$ 浓度变化基本是处于二级标准限值。 $FB-PM_{2.5}$ 浓度均值是低于前两种模式环控通风系统 $PM_{2.5}$ 浓度均值, 因为模式三是组合空调风机和回排风机同时运行, 在两种风机未开启时, $FB-PM_{2.5}$ 变化浓度与 $T-PM_{2.5}$ 浓度变化情况相同, 在两种风机同时开启后, 在高峰期, $FB-PM_{2.5}$ 浓度降低, 在非高峰期, 虽然组合空调风机和回排风机频率降低, 但是在两种风机同时运行的情况下, $FB-PM_{2.5}$ 浓度也会发生下降。

图 7 (b) 中 $T-f$ 组合空调风机和 $T-f$ 回排风机分别是

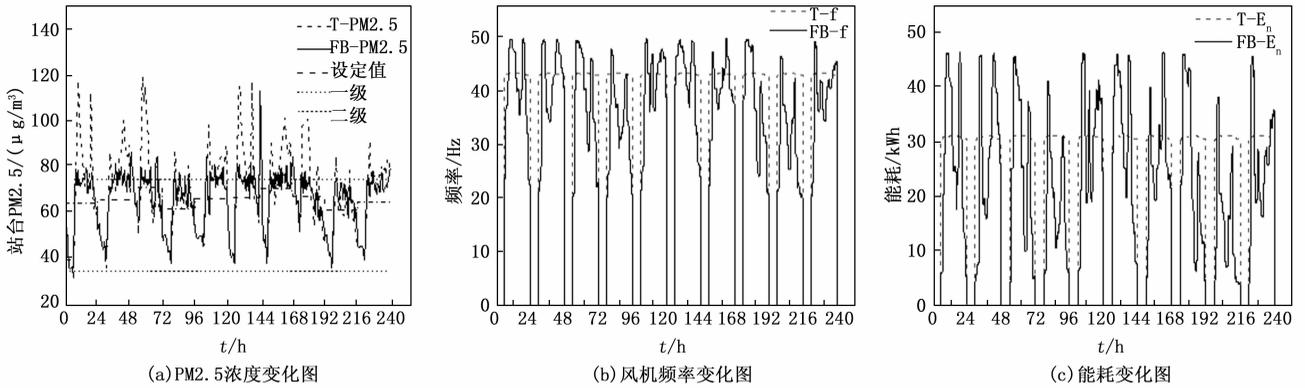


图 5 只送不排模式环控通风系统性能图

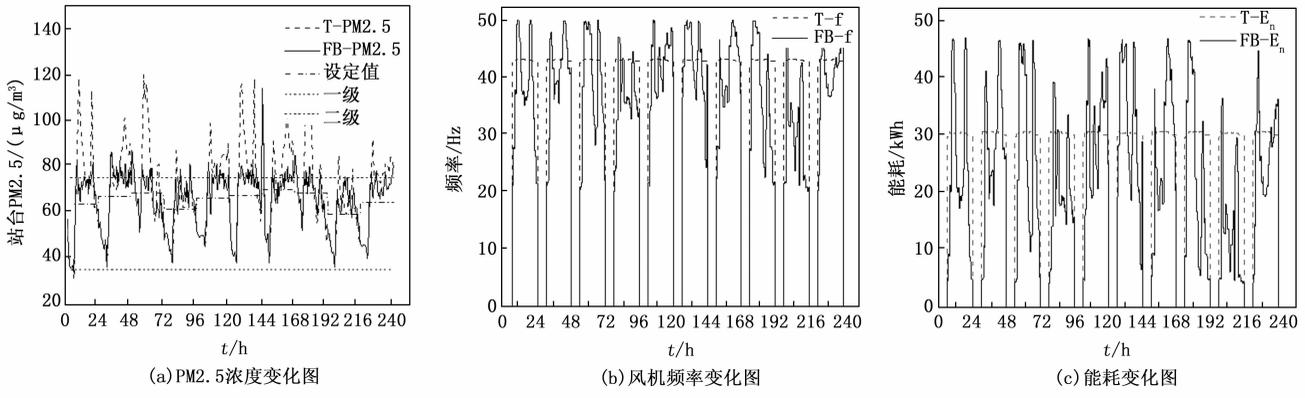


图 6 不送只排模式环控通风系统性能图

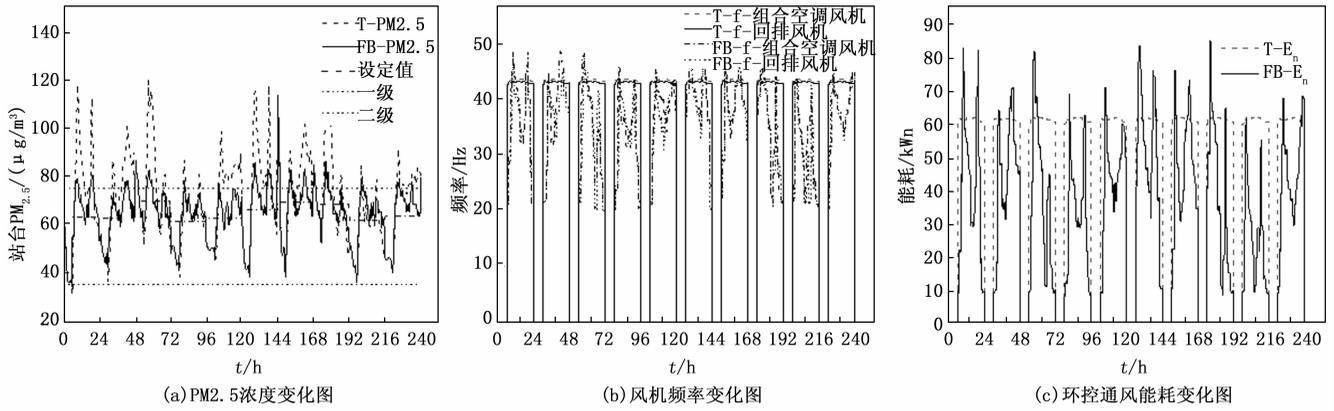


图 7 即送又排模式环控通风系统性能图

组合空调风机频率变化现状和回排风机频率变化现状，FB-f-组合空调风机和 FB-f-回排风机是即送又排模式环控通风系统频率变化情况，两种风机频率是根据 FB-PM2.5 浓度的变化而变化，在夜间两种风机未运行，FB-f-组合空调风机和 FB-f-回排风机频率为零，在高峰期 FB-f-组合空调风机和 FB-f-回排风机频率随着 FB-PM2.5 浓度增加而增加，在非高峰期 FB-f-组合空调风机和 FB-f-回排风机频率随着 FB-PM2.5 浓度降低而降低。

图 7 (c) 中 T-E_n 是环控通风系统能耗变化现状，FB-E_n 是即送又排模式环控通风系统能耗变化情况，FB-E_n 能耗是由组合空调风机和回排风机共同运行产生，在夜间 FB-E_n 能耗为零，在高峰期 FB-E_n 能耗随着两种风机频率的增加而增加，在非高峰期 FB-E_n 能耗随着两种风机频率的降低而降低。

表 5 为只送不排模式、不送只排模式和即送又排模式环控通风系统性能参数，由表可知在采样时间内 PM2.5 浓度均值和能耗降幅的具体情况。

表 5 性能参数

模式性能	运行现状	只送不排 (降幅)	不送只排 (降幅)	即送又排 (降幅)
PM2.5 均值/ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	71	66.3(7%)	65.6(8%)	64.2(10%)
能耗/kWh	11 252	9 135(19%)	8 861(19%)	15 523(30%)

4 结束语

本文针对地铁站台 PM2.5 浓度高，空气品质差，风机运行频率固定，能源利用效率低，且环控通风系统运行过程中受到多扰动影响等问题，提出一种基于和声搜索算法对环控通风系统调控策略优化方法。首先根据环控通风系统运行现状，分为只送不排模式、不送只排模式和即送又排模式，其次通过最小二乘辨识方法识别变量响应传递函数，并采用自抗扰控制器作为反馈控制器，建立环控通风模型，最后利用和声搜索算法对环控通风模型的 PM2.5 浓度设定值寻优。结果表明，在采样时间内 PM2.5 浓度均值的降幅分别为 7%、8% 和 10%，能耗降幅分别为 19%、19%

和 30%，因此，本文提出的环控通风系统调控策略优化方法不仅保证站台空气品质，且降低了环控通风系统能耗。

参考文献：

- [1] ZHANG Q, QUAN J, TIE X, et al. Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China [J]. Science of the Total Environment, 2015, 502: 578-584.
- [2] LIN C, WU L, XIA H, et al. Characteristics of the thermal environment, air quality, and passenger comfort in the underground transfer space of metro stations in Beijing [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 59: 105093.
- [3] 李 博. 多类型地铁站环境数据相关性分析及趋势预测 [D]. 北京：北方工业大学，2021.
- [4] 叶晓江，连之伟，蒋淳潇，等. 上海地铁站台环境质量分析 [J]. 建筑热能通风空调，2009, 28 (5): 61-63.
- [5] 陈 飞，叶晓江，周军莉，等. 武汉地铁 2 号线空气质量调查分析 [J]. 建筑热能通风空调，2016, 35 (3): 89-91.
- [6] 殷 展. 地铁车厢及站场的可吸入颗粒分布规律研究 [D]. 深圳：深圳大学，2019.
- [7] 程江浩. 成都地铁典型车站空气品质及污染物分布规律研究 [D]. 成都：西南交通大学，2021.
- [8] 樊越胜，胡泽源，刘 亮，等. 西安地铁环境中 PM10、PM2.5、CO₂ 污染水平分析 [J]. 环境工程，2014, 32 (5): 120-124.
- [9] GB3095-2012. 《环境空气质量标准》[S]. 北京：中国环境科学出版社，2013.
- [10] GB50157-2013. 《地铁设计规范》[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2013.
- [11] GUAN B, LIU X, ZHANG T, et al. Energy consumption of subway stations in China: Data and influencing factors [J]. Sustainable cities and society, 2018, 43: 451-461.
- [12] KIM M J, BRAATZ R D, KIM J T, et al. Indoor air quality control for improving passenger health in subway platforms using an outdoor air quality dependent ventilation system [J]. Building and Environment, 2015, 92: 407-417.

(下转第 98 页)