

# 基于改进和声搜索的地铁通风策略优化

李政普

(西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 西安 710055)

**摘要:** 中国城市轨道交通正处于快速建设中, 进一步改善车站内环境并降低车站运行能耗成为实现轨道交通高质量发展的关键途径; 其中, 通风系统在地铁环控系统总能耗中占比 17%; 为了在兼顾站内空气品质与舒适性的同时, 减小系统末端风机能耗, 模拟分析了西安某地铁站的空调负荷, 建立了负荷预测模型并计算目标送风量, 采用改进多目标和声搜索算法优化逐时送风量; 通过与传统运行策略对比分析发现, 优化后站内温度有明显提升, 并且与室外保持约 4 °C 的温差, 满足车站内乘客暂时的舒适需求, 在维持站内 CO<sub>2</sub> 浓度低于健康浓度限值的前提下, 通风系统节能率达 22.7%。

**关键词:** 变风量; 通风系统能耗; 舒适性; 空气品质; 和声搜索算法

## Optimization on Subway Ventilation Strategy Based on Improved Harmonic Search

LI Zhengpu

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

**Abstract:** Urban rail transit is currently in a rapid construction in china, in order to further improve the station environment and reduce the station operation energy consumption, it has become a key way to achieve the high quality development of rail transit. Among them, the ventilation system accounts for 17% of the total energy consumption in the metro environmental control system. In order to balance air quality and comfort of stations, reduce the energy consumption of the system end fan, and simulate and analyze the air conditioning load of a subway station in Xi'an. The load prediction model was established, and the target air supply volume was calculated. The improved multi-objective sound search algorithm was used to optimize the hourly air supply volume. Through comparison and analysis with the traditional operation strategy, the temperature inside the station is significantly increased after the optimization, and the temperature difference between the station and the outdoor is about 4 °C, which meets the temporary thermal comfort needs of passengers in the station. It is a prerequisite to maintain CO<sub>2</sub> concentration in the station below healthy concentration limits, the energy saving rate of the ventilation system reaches 22.7%.

**Keywords:** variable air volume (VAV); ventilation system energy consumption; thermal comfort; air quality; harmony search algorithm

## 0 引言

近年来我国城市轨道交通不断发展, 截至 2022 年, 全国已有 9 584 公里通车运营, 根据年度统计和分析报告<sup>[1]</sup>, 2022 年全国城轨交通运营能耗 114.77 亿千瓦时, 大多数城市地铁运营入不敷出。伴随地铁高速建设, 运营管理水平的提升没有达到完全同步。目前地铁普遍采用编制时间表运行策略, 空调机无法根据实际空调负荷和站内空气品质情况动态调节通风空调系统运行参数, 因此夏季地铁运行期间存在通风空调系统能耗巨大, 空气品质调控不当, 站内环境不舒适的问题。

针对上述问题, 文献 [2] 通过统计分析发现, 地铁车站风机能耗占非牵引年度总耗电量 17%, 是除冷水机组和照明设备之外最大耗能设备。在兼顾通风能耗和站内舒适

性两个目标方面, 文献 [3] 根据送风温度、回风温度及地铁站大系统空调负荷计算送风量, 调节通风系统末端风机频率。该运行策略下系统的负荷匹配性较好, 夏季运行节能率达 34.6%。文献 [4] 提出根据回风温度反馈值调节组合式空调机组末端风量, 使回风温度保持稳定, 同时根据送风温度调节组合式空调机组冷却盘管动态平衡电动调节阀, 维持送风温度恒定的通风系统变频控制策略。虽然该策略通过反馈调节实现了稳定的站内温度和系统节能, 但无法根据不同时刻乘客进站的舒适感觉动态调节站内目标温度, 并且反馈控制因为温度的大延迟特性而无法及时调节通风系统末端设备。在同时考虑通风能耗和站内空气品质两个冲突的目标方面, 文献 [5] 提出一种增益调度通风控制系统, 该系统由 PM (Particulate Matter) 反馈控制器和抑制其他干扰因素的前馈控制器组成, 其中反馈控制器

收稿日期: 2023-11-28; 修回日期: 2023-12-24。

作者简介: 李政普 (1999-), 男, 硕士生。

引用格式: 李政普. 基于改进和声搜索的地铁通风策略优化[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 256-261, 325.

针对早高峰、晚高峰和其他时间 3 个不同时区进行整定，与手动通风系统相比节省了 4% 的能耗。文献 [6] 在地铁通风系统中利用多目标遗传算法实现了模型预测控制器并每日更新最佳 PM 浓度设定值，该系统节省了 24% 的能耗。文献 [7] 设计了带有时滞补偿器的通风控制系统，通过多目标优化算法更新 PM 浓度设定值，比较了不同时间间隔下通风系统的节能率。文献 [8] 提出一种基于深度强化学习算法的智能通风控制系统，实现了降低通风控制系统能耗和提高室内空气品质的目标。该智能控制系统基于大量可用数据集建立，随着新数据增加需要不断更新系统模型，因此实际应用难度大。

本文利用瞬态过程模拟软件，模拟分析夏季地铁通风空调系统采用传统运行策略时公共区负荷特征及通风空调系统节能潜力，建立空调负荷预测模型，兼顾站内 CO<sub>2</sub> 浓度和舒适度，通过改进多目标和声搜索算法优化逐时站厅、站台通风系统末端送风量，实现对末端风机的前馈控制，降低通风系统能耗。最后分别对通风空调系统传统运行策略与优化策略进行仿真，对比分析优化运行策略的节能率。

## 1 通风空调系统仿真与负荷分析

### 1.1 通风空调系统现状

西安 90% 的地铁站为非换乘车站，本文以西安地铁 2 号线某两层岛式非换乘车站为例。该站全长 208 m，标准段宽度 18.5 m，有效站台长 120 m，站台宽 10 m，站厅公共区 1 188 m<sup>2</sup>，站台公共区 1 050 m<sup>2</sup> [9]。通风空调系统包括组合式空调机组、新风机和回排风机，地铁公共区配置两套风系统，分别承担公共区一半的负荷。通风系统冷源由两台冷水机组组成，由冷却塔降温，输配系统采用两台冷冻水泵，两台冷却水泵。

车站通风空调系统传统运行策略中采用编制时间表运行组合式空调机组，冷冻水泵满负荷运行，组合式空调箱冷冻水管电动二通阀开度为 12.1% [9]。

### 1.2 仿真平台建立

利用 3D 软件建立地铁结构模型，将模型导入 TRNSYS 瞬态仿真平台，建立简易地铁通风空调系统，构建的仿真模型如图 1 所示。气象文件来自 Meteonorm 专业气象软件 [10]，利用时间强制控制器实现设备周期运行。

## 2 车站空调负荷及 CO<sub>2</sub> 浓度仿真分析

输入西安市 2016 年气象资料及系统运行参数，在夏季某一周对地铁通风空调系统进行模拟运行，逐时空调负荷如图 2 所示。

### 2.1 空调负荷

空调负荷主要由人员负荷，设备、照明负荷，新风负荷、出入口渗透风负荷及屏蔽门传热和漏风负荷组成。其中 90% 空调负荷由人员负荷、屏蔽门漏风负荷、设备及照明负荷和新风负荷组成。屏蔽门漏风负荷平均占比 25%，由于屏蔽门内外侧焓差小，渗透风量为固定列车运行活塞风量，因此该负荷基本稳定。新风负荷受室外空气与站内回风温差影响大，减小室内外温差将有效减少该部分负荷。人员负荷伴随客流量变化呈现出明显的峰谷变化。出入口渗透风负荷波动较大，当室外温度和站厅温差较小时几乎不产生冷负荷。

空调负荷整体随着室外温度的升高而表现出一定的上升趋势，这是因为室外温度升高时，室内温度也会随之升高，系统需要提供更多的冷量来保持室内温度的稳定，当空调提供冷量不足，室内温度就会上升。

仿真结果显示，客流量对空调负荷变化产生主要影响，

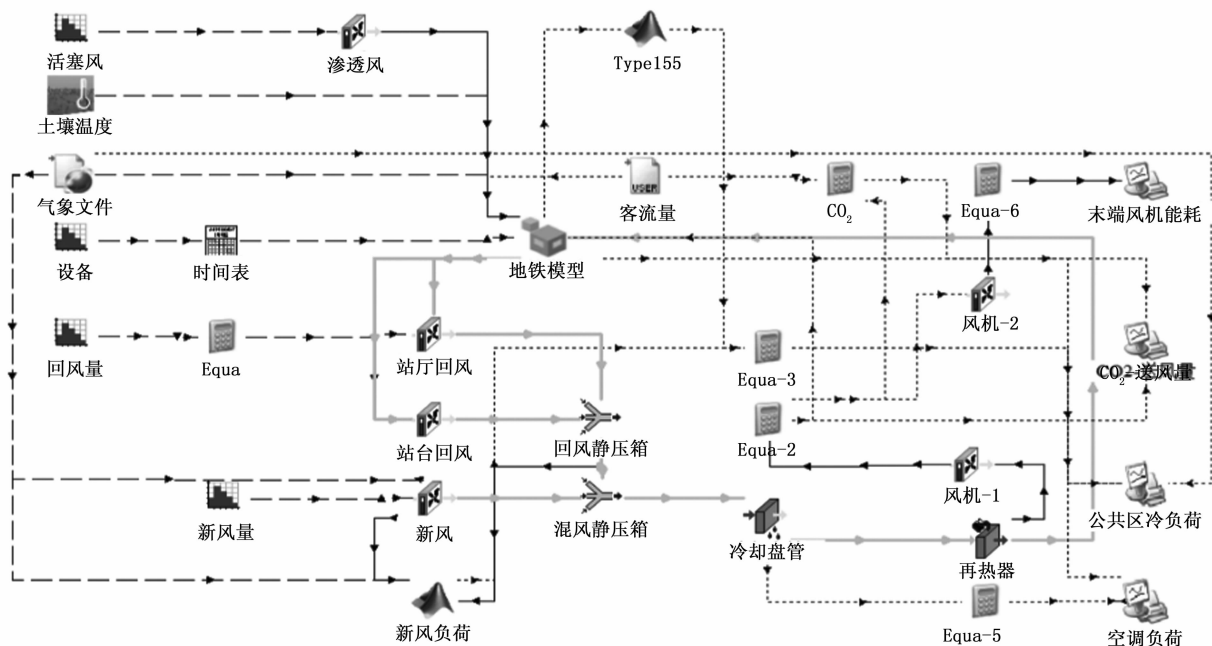


图 1 地铁通风空调系统

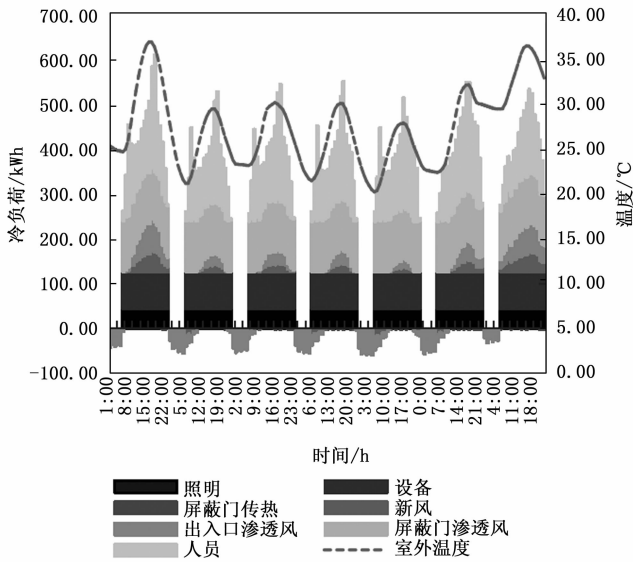


图 2 逐时空调负荷

屏蔽门漏风负荷及照明、设备负荷相对稳定；其他负荷占比小，受室外气象条件影响存在一定波动性。由于地铁设计送风量主要考虑远期高峰时站内人员舒适性，因此在近、中期客流情况下站内实际温度较低，与室外温差大<sup>[11]</sup>，容易引起不适感。因此，站内控制温度应根据室外气象条件的变化而进行相应的调整，以满足不同时刻人员的舒适性需求。

### 2.2 站内 CO<sub>2</sub> 浓度与送风量

通风系统采用编制时间表方式运行时末端送风量与站内 CO<sub>2</sub> 浓度变化情况如图 3 所示。传统送风量下，站厅 CO<sub>2</sub> 浓度和站台在客流量非高峰时段 CO<sub>2</sub> 浓度均远低于《地铁设计规范》<sup>[12]</sup> 规定健康浓度限值 1 000 ppm，这主要与客流量时间分布特征有关，并且乘客在站台停留时间更长，在站厅短暂过渡，因此站厅大部分时间都处于低 CO<sub>2</sub> 浓度的情况。

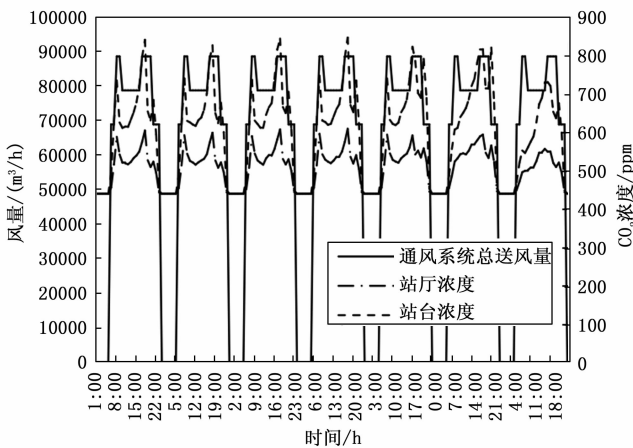


图 3 总送风量与 CO<sub>2</sub> 浓度变化情况

因此，在满足舒适性条件的前提下减少部分时段送风量，可以实现通风系统有效节能。

## 3 通风空调系统优化运行策略

结合上述分析结果，对通风系统目标送风温度和送风量进行优化。

### 3.1 公共区目标控制温度优化

公共区目标控制温度是负荷预测模型中的关键参数。站厅、站台温度随室外温度变化而逐级递减并保持一定温差，能满足乘客进站过程中以及在站内的暂时热舒适。首先根据相对热指标 RWI<sup>[13]</sup> 公式 (1) 计算室外 RWI 值：

$$RWI = \begin{cases} \frac{M(I_{cw} + I_a) + 6.42(t_a - 35) + RI_a}{234} \\ \frac{M(I_{cw} + I_a) + 6.42(t_a - 35) + RI_a}{65.2(5858.44 - P_v)/1000} \end{cases} \quad (1)$$

式中， $P_v$  为水蒸气分压力 (Pa)； $M$  为人体新陈代谢率 ( $W/m^2$ )； $t_a$  为环境干球温度 ( $^{\circ}C$ )； $I_{cw}$  为汗浸后的服装热阻 (clo)； $I_a$  为服装外部空气边界层热阻 (clo)； $R$  为单位皮肤面积平均辐射的热能 ( $W/m^2$ )。

室外 RWI 与地铁站厅 RWI 根据不同舒适情况取不同差值，取地铁站厅与站台之间的 RWI 差值为 0.04，分别得到地铁站厅、站台的逐时目标 RWI 值。根据预设 RWI 值，设定站厅和站台相对湿度为 65%<sup>[13]</sup>，得到站厅、站台的逐时目标温度。

### 3.2 客流量预测

通过 2.1 节仿真结果分析，空调负荷变化主要受客流量的影响，因此首先通过建立客流量预测模型实现对人员负荷的预测。因为实地测量地铁客流量的不易性，本文以其他规模相近车站的进出站客流量数据为基础<sup>[14]</sup>。根据乘客进出站过程中在站厅、站台停留时间计算出 6:00~23:00 站厅、站台逐时客流量，具体计算公式如下：

$$N_a = \frac{A_1}{60}a_1 + \frac{A_2}{60}b_1 \quad (2)$$

$$N_b = \frac{A_1}{60}a_2 + \frac{A_2}{60}b_2 \quad (3)$$

式中， $N_a$ ， $N_b$  表示单位时间内站厅、站台层在站人数 ( $人/h^{-1}$ )； $A_1$ ， $A_2$  表示单位时间内车站上、下车人数 ( $人/h^{-1}$ )； $a_1$ ， $a_2$  代表乘客进站后在站厅、站台停留时间 (min)； $b_1$ ， $b_2$  代表乘客出站时在站厅、站台停留时间 (min)。

以 6 月站厅、站台逐时客流数据为输出，以天气、周末、节假日、重大事件影响因素为输入，分别建立训练集与测试集，利用支持向量机<sup>[15]</sup> 进行数据训练，得到客流量预测模型。通过所得模型预测 6 月 30 日客流量，预测值与实际值对比结果如图 4 所示，不同时刻预测准确度均较高，平均相对误差为 9.7%，因此该模型可作为地铁客流预测模型进行地铁客流量预测。

### 3.3 负荷预测模型

基于客流量预测结果，按式 (4) (5) 计算人员负荷：

$$Q_{n,p} = N_{n'} \cdot \frac{q_{n,p}}{1000} n' \quad (4)$$

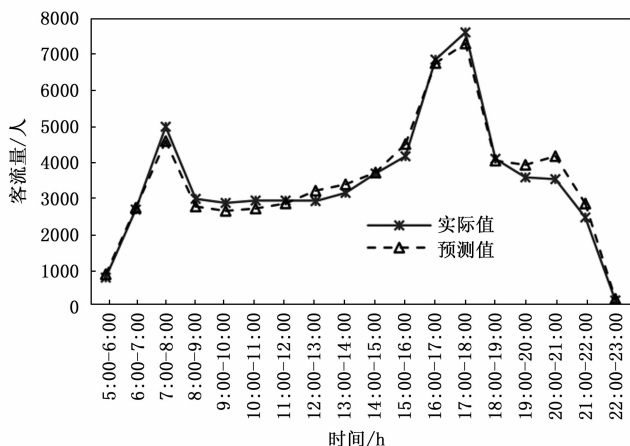


图 4 客流量预测结果

$$Q_{b\_p} = N_b \cdot \frac{q_{b\_p}}{1000} n' \quad (5)$$

式中,  $Q_{a\_p}$ ,  $Q_{b\_p}$  分别为站厅和站台的人员负荷 (kW),  $N_a$ ,  $N_b$  分别为站厅和站台逐时客流量 (人),  $q_{ap}$ ,  $q_{bp}$  分别为站厅和站台人员散热量 (W/人),  $n'$  为群集系数, 取 0.89。

出入口渗透风量取文献 [16 - 17] 结果的平均值  $6.25 \text{ m}^3/\text{s}$ , 结合 3.1 节目标温度优化结果, 出入口渗透风负荷按式 (6) 计算:

$$Q_{a\_o} = \rho (i_o - i_a) \cdot 6.25 \quad (6)$$

式中,  $Q_{a\_o}$  为进出站口空气渗流在站厅形成的冷负荷 (kW),  $i_o$ ,  $i_a$  分别为室外和站厅空气焓值。

根据文献 [18], 新风量主要考虑人员卫生要求和不低于送风量 10% 两方面要求, 新风负荷用式 (7) ~ (8) 表示:

$$Q_{f\_a} = \rho V_{f\_a} (i_o - i_a) \quad (7)$$

$$Q_{f\_b} = \rho V_{f\_b} (i_o - i_b) \quad (8)$$

式中,  $Q_f$  为新风负荷 (kW),  $V_{f\_a}$ ,  $V_{f\_b}$  为站厅、站台所需新风量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $i_b$  为站台空气焓值 (kJ/kg)。

屏蔽门传热负荷简化为稳态传热过程, 用式 (9) 表示:

$$Q_c = K_{\text{PSD}} F_{\text{PSD}} (t_t - t_b) \quad (9)$$

式中,  $Q_c$  为屏蔽门传热负荷 (kW),  $K_{\text{PSD}}$  为屏蔽门传热系数 ( $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ),  $F_{\text{PSD}}$  为屏蔽门面积 ( $\text{m}^2$ ),  $t_t$  为隧道温度, 取  $26 \text{ C}$ ,  $t_b$  为站台温度。

站台与隧道之间的对流和渗透换热主要表现为由隧道渗入站台的空气转化为站台冷负荷, 根据式 (10) [19-20] 对屏蔽门漏风量进行估算, 然后通过式 (11) 计算屏蔽门渗透风负荷:

$$G_i = 2 \cdot G_o n_o \mu_o \quad (10)$$

$$Q_d = \rho G_i (i_t - i_b) / 3600 \quad (11)$$

式中,  $G_i$  为渗透风量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ ),  $G_o$  为每列地铁引入的活塞风量 ( $\text{m}^3/\text{列}$ ),  $n_o$  为发车对数 (对/h),  $\mu_o$  为活塞风影响率, 取 0.15。

照明、设备负荷可依据公式 (12) 计算:

$$Q_w = q_w \cdot m \quad (12)$$

式中,  $q_w$  为设备功率 (kW);  $m$  为设备数量。

### 3.4 改进和声搜索算法

#### 3.4.1 基本和声搜索算法

利用多目标优化算法更新通风系统逐时送风量, 其目的是平衡空气品质与通风系统能耗两个方面的冲突。本文选择多目标和声搜索算法是因为它已经成功应用于解决工程问题 [21-22], 该算法模仿了对完美的协调音调的搜索过程, 具体的优化流程如下:

- 1) 设置算法参数;
- 2) 初始化和声记忆库 HMS;
- 3) 创建新解 HM;
- 4) 更新和声记忆库;
- 5) 判断是否达到停止条件, 否则, 重复步骤 3) ~ 4)。

首先定义包含 200 个向量的和声记忆库, 根据解空间随机生成 HMS 中的初始解, 和声记忆库保留率 (HMCR) 设置为 0.95, 音调调整率 (PAR) 设置为 0.7, 微量量 (BW) 设置为 0.1, 最大迭代次数 ( $T_{\text{max}}$ ) 设置为 2 000。

多目标和声搜索优化算法目标函数如公式 (13) 所示:

$$\begin{cases} J = \sum_i^n F_{\text{min}} \omega_1 \cdot C(t) + \omega_2 \cdot E(t) \\ \omega_1 = 1, \omega_2 = 10, (1000 < C(t)) \\ \omega_1 = 0.1, \omega_2 = 10, (800 < C(t) \leq 1000) \\ \omega_1 = 0.1, \omega_2 = 100, (C(t) \leq 800) \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $n$  为通风系统运行时间,  $C(t)$  和  $E(t)$  分别是逐时稳态  $\text{CO}_2$  浓度和逐时通风能耗。

地下建筑内乘客是唯一不变的  $\text{CO}_2$  产生源, 室内  $\text{CO}_2$  通过通风稀释, 渗出气流和相邻区域之间的气流可以忽略不计, 因此本文依据公式 (14) [23] 计算逐时稳态  $\text{CO}_2$  浓度:

$$C(t) = C_o + \frac{G(t)}{Q(t)} (1 - e^{-Q(t)/V}) \quad (14)$$

式中,  $C(t)$  为稳态  $\text{CO}_2$  浓度 (ppm),  $C_o$  为站外  $\text{CO}_2$  浓度 (ppm),  $Q(t)$  为站内  $\text{CO}_2$  生成率 (g/s),  $G(t)$  为送风量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $V$  为空间体积 ( $\text{m}^3$ )。

风机能耗函数采用拟合的方法得到三阶多项式 (15) 来估算:

$$E(t) = 4.998 + 0.29232G(t) + 1.233 \times 10^{-2} \times G(t)^2 - 4.0306 \times 10^{-4} \times G(t)^3 \quad (15)$$

#### 3.4.2 改进和声搜索算法

基本和声搜索算法的局部寻优能力较强, 而全局搜索能力较弱, 搜索结果容易陷入局部最优, 在算法运行前期, 较小的 PAR 帮助算法快速找到局部最优解, 在算法运行后期, 较大的 PAR 有助于算法跳出局部最优, 提高解的多样性。根据 PAR 变化趋势采用以下变化方法:

$$PAR(t) = \frac{PAR_{\text{max}} - PAR_{\text{min}}}{\frac{\pi}{2}} \arctan t + PAR_{\text{min}} \quad (16)$$

在和声搜索算法运行初期, 较大的 BW 有助于算法在

更大的范围内搜索，而在后期采用较小的  $BW$  有助于算法在小范围内进行精细搜索。根据确定的  $BW$  变化趋势采用以下变化方法：

$$BW(t) = (BW_{\max} - BW_{\min}) \times e^t + BW_{\min} \quad (17)$$

在算法运行期间改进  $PAR$  和  $BW$  成为很多学者的改进方向，本文基于文献 [24] 的研究基础，进一步改进每次迭代新解的生成过程。改进后和声搜索算法具体步骤如下：

1) 设定基本参数：(1) 和声记忆库大小  $N$ ；(2) 变量数；(3) 和声记忆库保留率  $HMCR$ ；(4)  $PAR_{\min}$ 、 $PAR_{\max}$ ；(5)  $BW_{\min}$ 、 $BW_{\max}$ ；(6) 最大迭代次数  $T_{\max}$ ；(7) 创建新解数  $HM$ 。

2) 初始化和声记忆库  $HMS$ ；

3) 创建新解矩阵；

4) 更新和声记忆库；

5) 判断是否达到停止条件，否则，重复步骤 3) ~ 4)。

改进和声搜索算法主要在创建新解部分随机产生包含 100 个解向量的新解矩阵，并通过自适应参数调整对这些新解进行概率微调，然后与和声记忆库初始解组成新和声记忆库，选择适应度值最优的部分解，组成下一次迭代的和声记忆库。改进后的和声搜索算法在一定程度上扩大了寻优空间。

### 3.5 通风空调系统末端送风量优化

首先结合室外气象数据和  $RWI$  动态分析方法计算车站空调逐时目标控制温度，建立负荷预测模型，基于 3.2 节负荷计算结果，根据式 (18) ~ (19) 得到站厅、站台总冷负荷：

$$Q_a = Q_{a,p} + Q_{a,o} + Q_w \quad (18)$$

$$Q_b = Q_{b,p} + Q_c + Q_d + Q_w \quad (19)$$

式中， $Q_a$ 、 $Q_b$  为站厅、站台总冷负荷 (kW)。

拟定站厅、站台送风温差分别为  $10\text{ }^\circ\text{C}$  和  $9\text{ }^\circ\text{C}$ ，送风状态点相对湿度为  $70\%$ ，建立热平衡方程求的通风空调系统末端送风量：

$$G_a = \frac{Q_a}{\rho \cdot (i_a - i_{s_a})} \quad (20)$$

$$G_b = \frac{Q_b}{\rho \cdot (i_b - i_{s_b})} \quad (21)$$

式中， $G_a$ 、 $G_b$  分别为站厅和站台送风量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )； $i_{s_a}$ 、 $i_{s_b}$  为站厅、站台送风状态点焓值 ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )。

最后通过改进多目标和声搜索算法优化逐时送风量，兼顾站内  $\text{CO}_2$  浓度和舒适度的同时最大限度地降低风机能耗。

## 4 优化运行策略验证

### 4.1 优化策略仿真结果

分别将 1.1 节传统运行策略和优化运行策略导入系统仿真平台模拟运行，得到站厅和站台逐时温度、 $\text{CO}_2$  浓度和风机能耗对比结果。

表 1 列出 6 月 15 日优化后站厅、站台逐时目标温度和  $RWI$  指标，站内目标温度随着室外温度变化逐时调整，站

厅逐时  $RWI$  值在一天中大部分时间段均低于室外  $RWI$  值，最大相差 0.15，站厅  $RWI$  和站台  $RWI$  取固定差值 0.04。当站厅、站台计算目标温度低于最低设计温度或高于最高设计温度<sup>[12]</sup>，采用设计温度代替当前区域目标温度。

表 1 6 月 15 日站内外温度和  $RWI$  指标

时刻	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00
室外温度/ $^\circ\text{C}$	21.4	21.6	22.2	22.9	23.8	24.8	26	27.3	28.5
室外 $RWI$	0.06	0.06	0.08	0.12	0.15	0.20	0.26	0.28	0.28
站厅目标温度/ $^\circ\text{C}$	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0
站厅 $RWI$	0.06	0.06	0.05	0.09	0.07	0.12	0.11	0.13	0.13
站台目标温度/ $^\circ\text{C}$	25.0	25.0	25.0	25.00	25.00	25.0	25.00	25.2	25.3
站台 $RWI$	0.04	0.04	0.03	0.07	0.05	0.10	0.09	0.11	0.11
时刻	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
室外温度/ $^\circ\text{C}$	29.4	29.8	30.0	29.9	29.4	28.5	27.4	26.2	25.1
室外 $RWI$	0.31	0.37	0.40	0.37	0.33	0.29	0.24	0.20	0.16
站厅目标温度/ $^\circ\text{C}$	26.4	28.3	29.3	28.4	27.1	26.0	26.5	26.0	26.0
站厅 $RWI$	0.16	0.22	0.25	0.22	0.18	0.14	0.16	0.12	0.08
站台目标温度/ $^\circ\text{C}$	26.2	28.2	29.0	28.2	26.9	25.4	26.3	25.0	25.0
站台 $RWI$	0.14	0.20	0.23	0.20	0.16	0.12	0.14	0.10	0.06

图 5 (a) 展示了优化前后站厅、站台逐时温度模拟结果。在传统运行策略下，白天站厅温度与室外温差在  $6\sim 10\text{ }^\circ\text{C}$  之间，乘客从室外进入站厅，会产生偏冷的感觉，调整逐时目标温度、优化送风量后，站厅与室外温差降低至  $2\sim 4\text{ }^\circ\text{C}$ ，并且优化送风量后站厅模拟温度与目标温度平均差  $1.58\text{ }^\circ\text{C}$ ，站台模拟温度与目标温度平均差  $1.24\text{ }^\circ\text{C}$ 。工作时段站内温度变化与室外温度变化整体一致，因此优化运行策略下站内温度可以随着室外温度变化而变化，满足不同时刻乘客的暂时热舒适需求。

图 5 (b) 中优化后站厅、站台送风量均明显低于传统运行策略中站厅、站台的送风量。在工作日非高峰时段，优化后站厅送风量减少约  $46\%$ ，站台减少约  $23\%$ ，高峰时段系统总送风量平均减少  $31.1\%$ 。由于乘客在站台停留时间更长，因此优化后站台送风量降低率总体小于站厅，这种现象在非高峰时段表现更明显。

图 5 (c) 中优化后站厅、站台全天  $\text{CO}_2$  浓度均低于  $1\ 000\text{ ppm}$ 。优化运行策略改善了传统运行策略下站内  $\text{CO}_2$  浓度远低于健康浓度限值的情况，有助于在保证站内乘客健康的同时减少非高峰时段送风量，降低风机能耗。

### 4.2 节能分析

在仿真平台上分别对两种策略进行一周的模拟运行，夏季典型日优化前后风机总能耗如图 6 所示。

通过对通风系统优化前后总能耗的对比发现，能耗整体与客流量变化趋势一致。周末  $6:00\sim 13:00$  和  $19:00\sim 23:00$  节能率较高，平均为  $20.8\%$ ，工作日非高峰时段平均

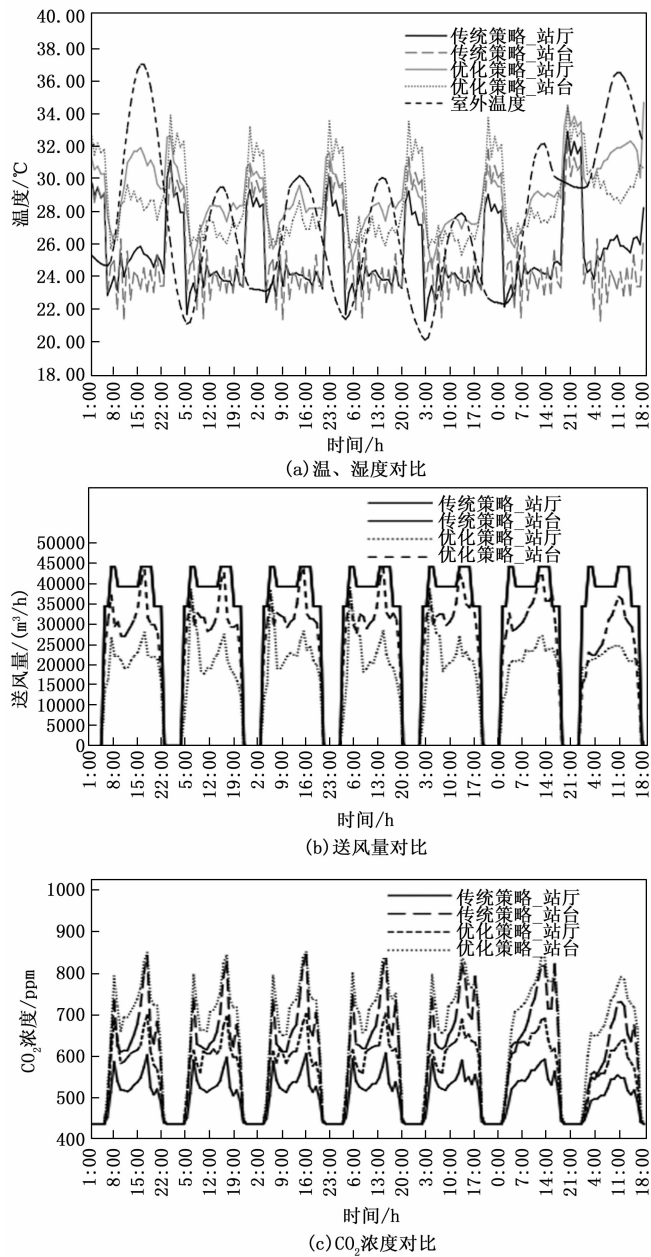


图 5 传统策略与优化策略运行结果

节能率为 17.1%，工作日高峰时段平均节能率为 16.2%，一天中早晚节能率最高达 22.7%，因为早晚时刻客流量最少，室外温度较低，因此此时节能潜力较大。

### 5 结束语

首先建立了地铁通风空调系统仿真模型，对传统运行策略下的空调负荷和 CO<sub>2</sub> 浓度变化及影响因素做出模拟分析；同时对站内舒适度作出评价。针对传统运行策略体现出的空气品质过优，站内温度偏冷且不能随负荷变化动态调整目标控制温度以及通风系统能耗大的问题，提出利用 RWI 指标优化站内目标温度并建立负荷预测模型，根据优化目标温度和负荷预测结果计算目标送风量；然后以站内 CO<sub>2</sub> 浓度与风机能耗为目标函数利用多目标和声搜索算法

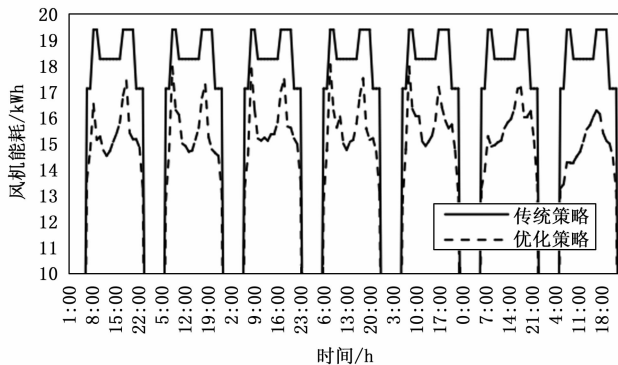


图 6 风机能耗对比

优化逐时送风量。最后借助仿真软件对优化运行策略进行模拟，与传统运行策略模拟结果对比分析优化运行策略的节能性。

结果表明，优化送风量、动态调整目标控制温度后，站内与室外温差明显减小，乘客进站过程中和进站后感觉更舒适，站内 CO<sub>2</sub> 浓度始终低于 1 000 ppm，同时实现了通风系统 13.5%~22.7% 的节能率。提出的优化运行策略为非换乘地铁站通风空调系统优化研究提供了参考。

### 参考文献：

[1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2022 年度统计和分析报告 [J]. 城市轨道交通, 2023 (4): 13-15.

[2] 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, 13 (9): 451-461.

[3] 罗佳. 地铁通风空调系统节能运行策略研究 [D]. 广州: 广州大学, 2015.

[4] 赵建伟. 某地铁车站空调水系统节能控制系统设计及节能测试数据分析 [J]. 暖通空调, 2017, 47 (5): 9-14.

[5] LEE S, HWANGBO S, KIM J T, et al. Gain scheduling based ventilation control with varying periodic indoor air quality (IAQ) dynamics for healthy IAQ and energy savings [J]. Energy and Buildings, 2017, 153 (15): 275-286.

[6] LIU H, LEE S C, KIM M J, et al. Multi-objective optimization of indoor air quality control and energy consumption minimization in a subway ventilation system [J]. Energy and Buildings, 2013, 190 (66): 553-561.

[7] LOYB J, LI Q, NAM K J, et al. Multi-objective optimization of a time-delay compensated ventilation control system in a subway facility—a harmony search strategy [J]. Building and Environment, 2020, 190; 107543.

[8] HEO S K, NAM K J, LOYB J, et al. A deep reinforcement learning-based autonomous ventilation control system for smart indoor air quality management in a subway station [J]. Energy and Buildings, 2019, 202 (1): 109440.

[9] 曾逸婷. 地铁车站公共区通风空调系统运行方法优化方法研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.

(下转第 325 页)