doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.05.017

严寒地区地铁活塞风道设置必要性探讨

马 骁[1]，何 维[2]，邢天文[2]，孟 鑫[1]，李国庆[1]
（1. 北京城建设计发展集团股份有限公司，北京 100037；2. 沈阳地铁集团有限公司，沈阳 110014）

摘 要：为研究我国严寒地区地铁活塞风道设置的必要性，本文选取运营中的沈阳地铁 1、9 号线典型车站公共区和区间隧道，对其最热月开式运行、最冷月闭式运行模式下的温度、二氧化碳浓度和可吸入颗粒物浓度进行测试；并将以温度为代表的热环境和以二氧化碳浓度、可吸入颗粒物浓度为代表的空气质量作为评价指标，量化测评沈阳地铁全高非封闭站台门开式通风系统对既有线典型车站公共区和区间隧道的实际环控效果。研究结果表明：沈阳地铁全高非封闭站台门开式通风系统在区间隧道内形成的活塞通风量已大于其温度控制所需，活塞风道对区间隧道热环境的实际调控能力较弱；关闭活塞风道后，车站公共区和区间隧道的空气质量仍可满足设计规范要求；沈阳地铁未来新线可考虑取消活塞风道(井)的活塞通风系统优化设计方案；取消活塞风道(井)对车站公共区和区间隧道的平时、事故工况下的通风模式安全性均无影响。本文的研究成果可为我国严寒地区其他城市地铁的活塞通风系统的优化设计提供参考。

关键词：严寒地区地铁；活塞通风系统；活塞风道；开闭式运行；热环境；空气质量
中图分类号：U231.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1672-6073(2025)05-0136-06

Discussion on the Necessity of Setting up Piston Ventilation Ducts in Subway Stations in Severe Cold Regions

MA Xiao[1], HE Wei[2], XING Tianwen[2], MENG Xin[1], LI Guoqing[1]
(1. Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., Beijing 100037;
2. Shenyang Metro Group Co., Ltd., Shenyang 110014)

Abstract: In order to study the necessity of setting up piston ventilation ducts in metros in China's severe cold regions, this article selects typical station public areas and section tunnels of the operating Shenyang Metro Lines 1 and 9, and tests their temperature, carbon dioxide concentration, and inhalable particulate matter concentration under open ventilation operation in the hottest month and closed ventilation operation in the coldest month; utilizing temperature as an indicator of the thermal environment, carbon dioxide concentration and inhalable particulate matter concentration as a measure of air quality, this research quantitatively analyzes the actual environmental control effect of the open ventilation system of the full-height non-enclosed platform doors in operating Shenyang Metro lines on the typical stations public areas and section tunnels. The findings suggest that the piston ventilation volume formed by the open ventilation system of the full-height non-enclosed platform doors in the Shenyang Metro within the section tunnels has exceeded the amount required for temperature control, indicating that the actual regulating capacity of the piston ventilation ducts on the thermal environment of the section tunnels is relatively weak;

收稿日期：2024-11-28 修回日期：2025-07-04
第一作者：马骁，男，硕士，高级工程师，从事城市轨道交通环控、防灾、节能等领域的设计研究工作，13821859867@163.com
基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFC0705000)
引用格式：马骁，何维，邢天文，等. 严寒地区地铁活塞风道设置必要性探讨[J]. 都市快轨交通，2025，38(5)：136–141.
MA Xiao, HE Wei, XING Tianwen, et al. Discussion on the necessity of setting up piston ventilation ducts in subway stations in severe cold regions[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(5): 136–141.

after closing the piston ventilation duct, the thermal environment and air quality can still meet the design specifications; for future metro lines in Shenyang, it may be advisable to eliminate the piston ventilation ducts (shafts) as an optimization design scheme of the piston ventilation system; the elimination of piston ventilation ducts (shafts) has no impact on the safety of ventilation mode in station public areas and tunnel sections under both normal and emergency operating conditions. The research results in this paper can serve as a reference for the optimal design of piston ventilation systems in metros in other cities located in severe cold regions in China.

Keywords: metros in China's severe cold regions; piston ventilation system; piston ventilation duct; open and closed ventilation modes; thermal environment; air quality

自沈阳地铁 1 号线 2010 年开通运营以来，国内严寒地区已经开通地铁的城市有沈阳、长春、哈尔滨、呼和浩特、乌鲁木齐[1]。严寒地区各城市地铁虽在站台门形式和机械通风系统组成上略有差异，但车站公共区和区间隧道的环控系统制式整体相同，均为开式通风系统[2]，以活塞通风为主，不设置空调，在车站两端设置单活塞风道，地面设置活塞风井，全年开闭式运行。

开式通风系统在车站两端设置的活塞风道(单条宽度约 4～6 m)对车站整体土建规模和工程投资影响巨大；此外，严寒地区开式通风系统进入冬季均需关闭车站活塞风道转入闭式运行，甚至在活塞风道内加设“电动防寒保温门[3]”，如呼和浩特、乌鲁木齐、哈尔滨，或“双层保温型立式风阀”，如长春，以尽可能减少冬季室外低温空气对活塞风道及站端隧道内设备和管线的冻害，为严寒地区地铁冬季防寒增加了极大负担。

随着地铁线网的加密，在用地日益紧张的城市中心区和已建成区，活塞风井向外排风的同时，对室外环境辐射噪声，影响外部声环境质量，近年来活塞风亭噪声超标投诉案例逐年攀升[4-5]；经调研，严寒地区地铁车站单座活塞风井加上周围绿篱整体永久占地往往超过 100 m^2。风井征地投资高、用地协调难等问题也已常态化。

近年来，国内外学者对地铁活塞风道的活塞风速和风量进行了测试和模拟研究，结果表明活塞风道既有排风又有进风，通风状态交替往复，存在空气未排到室外即被吸回区间的情况，弱化了活塞风换气效果[6]；也有研究发现由于活塞风道容积的存在，活塞风道计算风量并不等同于有效通风量，计算风量大的活塞风道有效通风量不一定大[7]；部分研究认为全高安全门地铁站的迂回风道开启面积对出站端活塞风井活塞风量影响较弱[8]；有学者提出地铁活塞风的利用原则：在活塞风满足乘客需求的情况下应当优先利用活塞通风，根据温湿度、二氧化碳浓度以及颗粒物浓度等参数评价活塞风是否满足需求[9]。

总结国内外对地铁活塞风道的研究情况，目前多围绕活塞风道的活塞风特性及影响因素，缺少活塞风道对于地下空气环境的实际环控效果的对标实测分析。在国内“绿色城轨”的行业发展新背景下，为促进地铁与城市协调发展，在工程建设环节应最大限度地降低能耗，减少二氧化碳排放，构建低碳排、高效能、大运量的新时代中国式绿色化城市轨道交通[10]，本文将对沈阳地铁 1、9 号线典型车站公共区和区间隧道最热月开式运行、最冷月闭式运行模式下的温度、二氧化碳浓度和可吸入颗粒物浓度进行测试，与适用于国内各建筑热工分区、各类通风空调系统制式的现行国家标准《地铁设计规范》(GB 50157—2013)[11]中地下车站公共区和区间隧道的冬夏季热环境和空气质量设计参数进行对标，量化分析沈阳地铁全高非封闭站台门开式通风系统的实际环控效果，研究其活塞风道设置的必要性。

1　沈阳地铁热环境和空气质量测试

1.1　测试对象

沈阳地铁 1 号线全长 27.8 km，共设车站 22 座，全部为地下站，于 2010 年开通运营，为我国严寒地区开通运营的首条地铁线路，其客流强度为沈阳乃至整个严寒地区最大；沈阳地铁 9 号线全长 29.0 km，共设车站 23 座，全部为地下站，于 2019 年开通运营。这两条线在沈阳地铁已开通线路中具有代表性。

为保证测试对象的热环境和空气质量数据具有更好的稳定性和代表性，选择线路中部 1/4～3/4 范围内的、出入口数量常规(3 个)、出入口长度 30～120 m 及 90°拐弯数量为 1 个的标准二层岛式车站作为测试对象，同时保证该站客流大于全线平均值；选择线路中部 1/4～3/4 范围内的、断面客流大于全线平均值的区间作为测试对象。测试对象的选择见表 1。

表 1 测试对象的选择

Table 1 Selection of test objects

线路名称	开通年份	行车密度/(列次/d)	线路客流量/(万人次/d)	测试车站	进出站客流量/(万人次/d)	测试区间	断面客流量/(万人次/d)
沈阳地铁 1 号线	2010	378	28.85	启工街站	2.69	云峰北街—沈阳站区间	14.88
沈阳地铁 9 号线	2019	330	13.46	北二路站	1.86	重型文化广场—北二路站区间	5.95

注：数据来源于沈阳地铁运营统计报表。

2013 年至 2022 年，沈阳 1 月至 12 月平均气温的均值分别为–13.0℃、–9.7℃、–2.3℃、10.7℃、16.8℃、21.3℃、24.6℃、23.9℃、17.5℃、9.2℃、0.4℃、–10.8℃，最热月为 7 月，最冷月为 1 月。由于车站公共区和区间隧道与室外时刻进行着高效的活塞通风换气，其热环境实时随室外温度的变化而变化，故在最热月和最冷月的测试数据可覆盖全年的热环境情况。

1.2 测试方案和方法

2023 年 7 月 11—24 日和 2024 年 1 月 11—24 日期间，本文在表 1 中选择的车站公共区和区间隧道内开展了最热月和最冷月地铁热环境和空气质量的测试，包括温度、二氧化碳浓度和可吸入颗粒物浓度。其中：温度和二氧化碳浓度采用相应的自记仪分别进行自动测量和记录；可吸入颗粒物浓度采用 TSI 8534 手持式粉尘检测仪进行手动测试和记录。具体测试方案详见表 2 和表 3。

表 2 最热月热环境和空气质量测试方案

Table 2 Thermal environment and air quality testing plan for the hottest month

测试对象	运行模式	测点位置	测试参数	数据记录间隔/min
室外	—	启工街站室外	温度	5
1 号线启工街站、9 号线北二路站	开式运行	站厅、站台公共区 A 端、B 端和中部的镂空吊顶面	温度	5
1 号线启工街站、9 号线北二路站	开式运行	站台公共区 A 端、B 端和中部的镂空吊顶面	二氧化碳浓度	5
1 号线云峰北街—沈阳站区间、9 号线重型文化广场—北二路区间	开式运行	区间隧道中部联络通道位置上行侧、下行侧	温度、二氧化碳浓度	5

1.3 测试结果分析

图 1 为 2023 年 7 月 11 日—24 日(夏季开式运行，活塞风道开启，迂回风道关闭)沈阳地铁 1 号线启工街站、云峰北街—沈阳站区间(以下简称云沈区间)和 9 号线北二路站、重型文化广场—北二路区间(以下简称重北区间)的日平均温度测试结果。

表 3 最冷月热环境和空气质量测试方案

Table 3 Thermal environment and air quality testing plan for the coldest month

测试对象	运行模式	测点位置	测试参数	数据记录间隔/min
室外	—	启工街站室外	温度、可吸入颗粒物浓度	5
1 号线启工街站、9 号线北二路站	闭式运行	站厅、站台公共区 A 端、B 端和中部的镂空吊顶面	温度	5
1 号线启工街站、9 号线北二路站	闭式运行	站台公共区 A 端、B 端和中部的镂空吊顶面	二氧化碳浓度	5
1 号线启工街站、9 号线北二路站	闭式运行	站厅公共区中部、站台公共区进站端门、出站端门和中部候车区	可吸入颗粒物浓度	1
1 号线云沈区间、9 号线重北区间	闭式运行	区间隧道中部联络通道位置上行侧、下行侧	温度、二氧化碳浓度	5

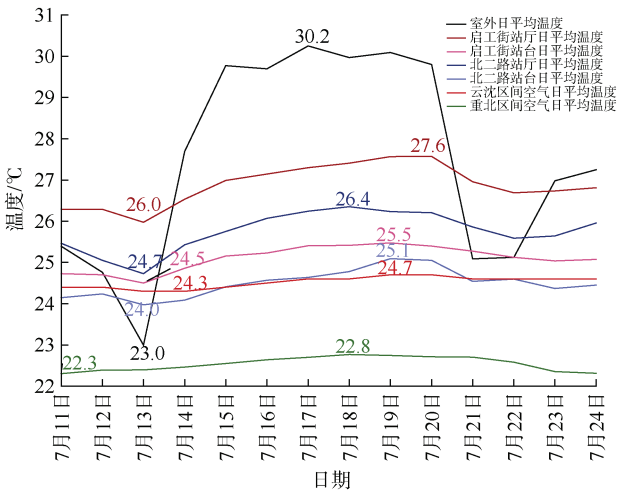


图 1 1、9 号线典型车站公共区和区间隧道日平均温度变化(2023 年 7 月 11 日—24 日)

Figure 1 During July 11th and 24th, 2023, the daily average temperature changes of typical station public areas and section tunnels on Line 1 and Line 9

测试期间遇到两场降雨，使得室外日平均温度的变化幅度较大，室外温度为 23.0℃～30.2℃，存在

7.2℃的温差。受此影响，启工街站和北二路站站厅公共区的日平均温度在测试期间均随之产生了明显波动，范围分别是 26.0℃～27.6℃(波动幅度 1.6℃)、24.7℃～26.4℃(波动幅度 1.7℃)，但均满足规范[11]中不高于 29.7℃的要求。日平均温度在短期内随室外发生明显波动，说明站厅公共区通过活塞通风与室外进行了充分的热交换；相比于站厅公共区，两站站台公共区的日平均温度随室外日平均温度变化而产生的波动幅度较小，范围分别是 24.5℃～25.5℃(波动幅度 1.0℃)、24.0℃～25.1℃(波动幅度 1.1℃)，也可通过活塞通风与室外进行较为充分的热交换，同时满足不高于 29.7℃的规范要求。

相比于车站公共区，1 号线云沈区间和 9 号线重北区间的隧道日平均空气温度在远远满足不高于 35℃规范[11]要求的同时，随室外日平均温度变化而产生的波动幅度极小，范围分别是 24.3℃～24.7℃(波动幅度 0.4℃)、22.3℃～22.8℃(波动幅度 0.5℃)，说明相比于站厅和站台公共区，区间隧道通过活塞通风与室外进行的热交换并不充分。

综上，活塞风道作为区间隧道与室外进行活塞通风的直接路径，却未能与室外充分完成热交换，其对区间隧道热环境的调控能力较弱。即便如此，已运营 13 年的 1 号线典型区间隧道的夏季温度仍较低，说明沈阳地铁全高非封闭站台门开式通风系统在区间隧道内形成的活塞通风量已大于其温度控制所需。

图 2 为 2024 年 1 月 11 日—24 日(冬季闭式运行，活塞风道关闭，迂回风道开启)沈阳地铁 1 号线启工街站、云沈区间和 9 号线北二路站、重北区间的日最低温度测试结果。

最冷月闭式运行模式下，区间隧道的日最低温度均远高于规范[11]不低于 5℃的要求，且较为稳定；车站公共区的日最低温度则受室外温度变化的影响较大，运营仅 4 年的北二路站相对于运营已 13 年的启工街站更为明显，以致其站厅公共区连续出现 7 天最低气温低于 12℃的情况，沈阳新线车站站厅公共区冬季防寒问题依然存在。

但随着运营年限累积，车站公共区的冬季温度会逐渐上升，如 1 号线启工街站公共区日最低温度均高于 12℃。运营初期线路可通过关闭活塞风道减小过渡季与室外的活塞通风量，加快地下围护结构和周围土壤的蓄热速度，缩短冬季极寒天气时站内低温的时长。

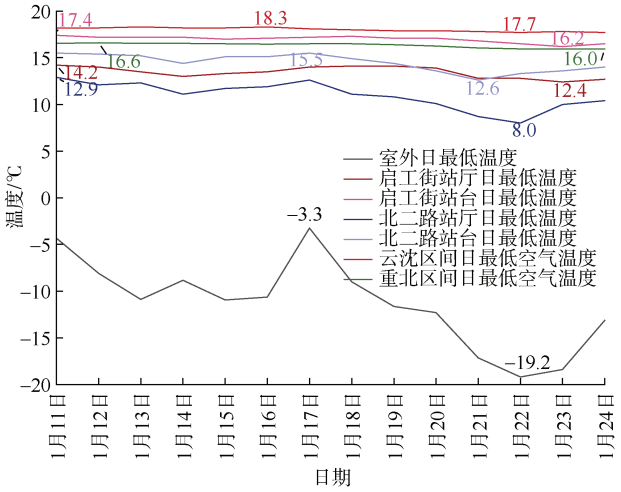


图 2　1、9 号线典型车站公共区和区间隧道日最低温度变化(2024 年 1 月 11 日—24 日)

Figure 2　During January 11th and 24th, 2024, the daily minimum temperature changes of typical station public areas and section tunnels on Line 1 and Line 9

图 3 和图 4 分别为 2023 年 7 月 11 日—24 日(夏季开式运行，活塞风道开启，迂回风道关闭)、2024 年 1 月 11 日—24 日(冬季闭式运行，活塞风道关闭，迂回风道开启)沈阳地铁 1 号线启工街站站台公共区、云沈区间和 9 号线北二路站站台公共区、重北区间的日平均二氧化碳浓度测试结果对比图。

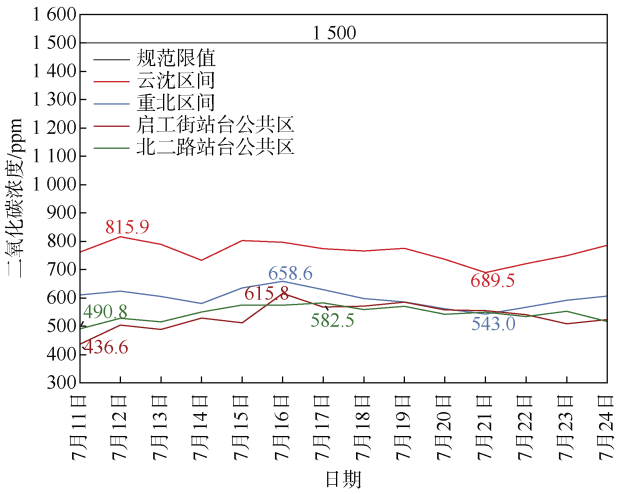


图 3　1、9 号线典型车站站台公共区和区间隧道日平均二氧化碳浓度变化(2023 年 7 月 11 日—24 日)

Figure 3　During July 11th and 24th, 2023, the daily carbon dioxide concentration changes of typical station platform level public areas and section tunnels on Line 1 and Line 9

表 4 为测试期间的车站和区间单日客流平均值。由测试结果可知：在 1 月客流略高于 7 月且闭式运行

模式下，典型车站站台公共区和区间隧道的日平均二氧化碳浓度虽相较于 7 月份开式运行略有升高，但仍满足规范要求。

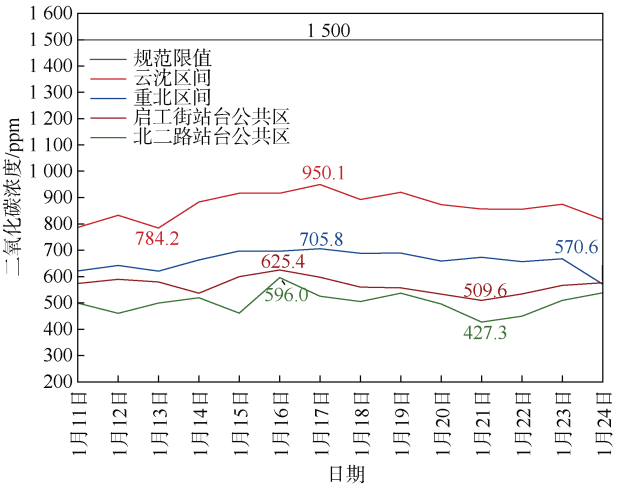


图 4　1、9 号线典型车站站台公共区和区间隧道日平均二氧化碳浓度变化(2024 年 1 月 11 日—24 日)

Figure 4　During January 11th and 24th, 2024, the daily carbon dioxide concentration changes of typical station platform level public areas and section tunnels on Line 1 and Line 9

表 4　测试对象单日客流平均值对比

Table 4　Comparison of daily average passenger flow of test subjects　人次/d

测试日期	启工街站	北二路站	云沈区间	重北区间
2023 年 7 月 11 日—24 日	31 394	21 029	177 758	67 147
2024 年 1 月 11 日—24 日	33 404	22 608	184 755	71 296

注：数据来源于沈阳地铁运营统计报表。

表 5 为 2024 年 1 月 5 日和 1 月 10 日(冬季闭式运行，活塞风道关闭，迂回风道开启)1 号线启工街站和 9 号线北二路站公共区的晚高峰小时平均可吸入颗粒物浓度测试结果。

表 5　1、9 号线典型车站公共区晚高峰小时平均可吸入颗粒物浓度(2024 年 1 月 5 日和 1 月 10 日)

Table 5　January 5th and 10th, 2024, the average inhalable particulate matter concentration during evening rush hour of typical station public areas on Line 1 and Line 9　mg/m^3

测点位置	2024 年 1 月 5 日	2024 年 1 月 10 日
室外	0.053	0.099
启工街站站厅中部	0.182	0.225
启工街站站台中部	0.239	0.247
北二路站站厅中部	0.106	0.134
北二路站站台中部	0.144	0.143

由表 5 可知：在冬季室外空气质量较差且执行闭式运行模式下，两站公共区晚高峰小时平均可吸入颗粒物浓度仍低于规范[11]要求的 0.25 mg/m^3 日平均浓度；启工街站公共区可吸入颗粒物浓度远大于北二路站，说明运行年份是影响车站公共区可吸入颗粒物浓度的主因；站台的浓度大于站厅，且几乎不受室外空气质量变化的影响，说明地铁可吸入颗粒物的主要来源为隧道内的机械摩擦，如列车车轮和轨道间、列车受电弓和接触网间、列车刹车片和轮毂间的摩擦[12]。建议运营定期清洗隧道，可有效降低车站公共区的可吸入颗粒物浓度。

综上，沈阳地铁未来新线可考虑取消活塞风道(井)的活塞通风系统优化设计方案。

2　优化方案安全评估

取消活塞风道(井)后，区间事故风道需与车站排风道共同接入车站排风井。区间事故风道内部设置一台隧道风机(tunnel ventilation fan，TVF)，设计风量 60 m^3/h；车站排风道内并联布置两台车站公共区排风机(station ventilation fan，SVF)，单台设计风量 33 m^3/h。

对于标准二层地下车站，考虑风亭顶面网状格栅 80%的有效面积系数，设备大端排风井面积一般为 20 m^2，设备小端排风井面积一般为 16 m^2。现对方案优化涉及的通风工况进行模式安全性的定量分析。

1) 车站公共区机械排风工况。此时区间事故风道阀、隧道风机 TVF 关闭，车站公共区排风机 SVF 开启，排风井服务于车站公共区和设备区机械排风(大端设备区排风量约为 20 m^3/h，小端设备区排风量约为 3 m^3/h)。该工况下车站两端排风井格栅的设计风速分别为：$V_{大端1}$=(33×2+20)/(20×0.8)=5.38 m/s、$V_{小端1}$=(33×2+3)/(16×0.8)=5.39 m/s，均满足平时工况格栅风速不宜大于 6 m/s 的规范[11]要求。

2) 车站公共区排烟工况。此时区间事故风道阀、隧道风机 TVF 关闭，车站公共区排风机 SVF 开启工频排烟模式，设备区通风系统关闭，排风井仅服务于车站公共区排烟。该工况下车站两端排风井的设计风速分别为：$V_{大端2}$=33×2/20=3.30 m/s、$V_{小端2}$=33×2/16=4.13 m/s，均满足事故工况土建风道风速不大于 15 m/s 的规范[11]要求。

3) 区间平时夜间机械通风工况。此时处于远期的凌晨停运时段，车站公共区排风机关闭，设备区通风系统关闭，区间事故风道阀、隧道风机 TVF 开启，排风井仅服务于区间机械通风。该工况下车站两端排风井

的设计风速分别为：$V_{大端3}$=60/(20×0.8)=3.75 m/s、$V_{小端3}$=60/(16×0.8)=4.69 m/s，均满足平时工况格栅风速不宜大于 6 m/s 的规范要求。

4) 区间事故(阻塞、火灾)通风工况。此时车站公共区排风机开启(区间事故工况下兼做隧道风机)，区间事故风道阀、隧道风机 TVF 开启，设备区通风系统关闭，排风井仅服务于区间事故通风。该工况下车站两端排风井的设计风速分别为：$V_{大端4}$=(33×2+60)/20=7.88 m/s、$V_{小端4}$=(33×2+60)/16=9.84 m/s，均满足事故工况土建风道风速不大于 15 m/s 的规范要求。

综上，取消活塞风道(井)、区间事故风道与车站排风道共同接入车站排风井的系统优化方案，对车站公共区极端情况下机械排风、火灾排烟、区间平时夜间机械通风以及区间事故(阻塞、火灾)通风的模式安全性均无影响。

3 结论

1) 沈阳地铁全高非封闭站台门开式通风系统在区间隧道内形成的活塞通风量已大于其温度控制所需，活塞风道对区间隧道热环境的实际调控能力较弱；关闭活塞风道后，车站公共区和区间隧道的空气质量仍可满足设计规范要求。

2) 沈阳地铁未来新线可考虑取消活塞风道(井)的活塞通风系统优化设计方案；取消活塞风道(井)对车站公共区和区间隧道的平时、事故工况下的通风模式安全性均无影响。

参考文献

[1] 李强. 严寒地区地铁车站余热回收利用方案研究[J]. 现代城市轨道交通, 2023(6): 33-37.
LI Qiang. Research on waste heat recovery and recycle scheme of metro stations in severe cold areas[J]. Modern urban transit, 2023(6): 33-37.

[2] 陈克松. 严寒地区地铁区间和车站冬季新风研究[J]. 工程技术研究, 2020, 5(18): 237-238.

[3] 韩平, 贾萌. 严寒地区地铁环控系统设计方案研究[J]. 暖通空调, 2019, 49(5): 4-9.
HAN Ping, JIA Meng. Design scheme of underground railway environmental control system in severe cold zone[J]. Heating ventilating & air conditioning, 2019, 49(5): 4-9.

[4] 杨芳乙, 李旭巍, 李力克, 等. 住宅小区内部地铁活塞风井噪声控制技术研究[J]. 声学技术, 2023, 42(3): 351-357.
YANG Fangyi, LI Xuwei, LI Like, et al. Research on noise control technology of subway piston-action ventilation shaft in residential area[J]. Technical acoustics, 2023, 42(3): 351-357.

[5] 孙健, 徐灿, 罗涛, 等. 列车噪声衰减特性和活塞风亭降噪必要性探讨[C]//第十八届全国噪声与振动控制工程学术会议论文集. 厦门, 2025: 156-161.
SUN Jian, XU Can, LUO Tao, et al. Study on noise attenuation characteristics of trains and the necessity of noise reduction for piston ventilation shafts[C]//Proceedings of the 18th National Academic Conference on Noise and Vibration Control Engineering. Ximen, 2025: 156-161.

[6] 刘加栋. 城市轨道交通深埋车站(区间)活塞通风模拟计算与现场实测分析[J]. 暖通空调, 2022, 52(增刊 2): 126-129.

[7] 武世强, 那艳玲, 刘云, 等. 活塞风道有效通风数值模拟研究[J]. 暖通空调, 2024, 54(增刊 2): 442-446.

[8] 张欣, 尤占平, 任晓芬, 等. 地铁站活塞风井内周期性活塞风效应影响因素分析[J]. 暖通空调, 2022, 52(增刊 2): 79-84.

[9] 李慧星, 靳佳路, 冯国会. 地铁活塞效应的节能综述研究[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版), 2024, 26(1): 57-63.
LI Huixing, JIN Jialu, FENG Guohui. A review on energy saving of subway piston effect[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Social Science), 2024, 26(1): 57-63.

[10] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通绿色城轨发展行动方案[EB/OL]. (2024-02-22)[2024-04-30]. https://www.camet.org.cn/gzbg/cgfz/14660.shtml.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 121-122.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014: 121-122.

[12] 孟鑫, 毛海和, 孙云祥, 等. 地铁颗粒物分布情况及防治措施[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(4): 32-37.
MENG Xin, MAO Haihe, SUN Yunxiang, et al. Distribution of particulate matter in subways and prevention and control measures[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(4): 32-37.

（编辑：王艳菊）