文章编号：1008－8857(2026)02－0086－07 **DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2026.02.004

地铁车站拟通过端头门单向风阀引入室外新风量研究

朱佳良，王丽慧
（上海理工大学 环境与建筑学院，上海 200093）

摘 要：活塞风效应是影响地铁车站环控系统的重要因素之一，在过渡季节利用活塞风效应可有效降低地铁车站环控设备的能耗。提出了在车站站台端门安装单向风阀的假设，利用活塞风的抽吸效应，通过站台端门的单向风阀形成区域负压，从车站出入口引入室外新风。首先推导得到基于端门承压的引入新风量计算模型，再通过实测获得不同行车密度下各端门的承压特性，最后基于该模型计算得到引入新风量。结果表明：在列车运行过程中，进站端端门主要受正压影响，离站端端门主要受负压影响；单次列车通过离站端端门引入的新风量最高可达 1 300 m^3。研究可为在过渡季节利用活塞风效应实现地铁车站环控系统节能提供理论基础。

关键词：地铁车站；端头门；压力；活塞风；单向风阀；室外新风
中图分类号：TU96$^+$2 **文献标志码**：A

Study on fresh air volume introduced by one-way dampers installed at end screen doors in subway stations

ZHU Jialiang，WANG Lihui
(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The piston wind effect is a key factor influencing the environmental control system of subway stations. Leveraging this effect during transitional seasons can effectively reduce the energy consumption of such systems. This study proposes the installation of one-way dampers at the platform end doors, utilizing the suction effect of piston wind to create a negative pressure zone, thereby drawing outdoor fresh air through station entrances and exits. A theoretical model for calculating the induced fresh air volume based on the pressure at the end doors is first derived. Subsequently, the pressure characteristics at each end door under varying train operation densities

收稿日期：2024－03－25
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51878408)；中华人民共和国交通运输部“卫生防疫技术交通运输行业研发中心”资助项目
第一作者：朱佳良(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：地铁通风空调系统。E-mail：749859024@qq.com
通信作者：王丽慧(1978—)，女，教授。研究方向：地铁通风空调系统。E-mail：66amy99@126.com

are obtained through field measurements. Finally, the fresh air volume introduced by this method is determined using the proposed model. The results indicate that during train operation, the end door at the train entry side is predominantly subjected to positive pressure, while the door at the exit side experiences negative pressure. The maximum fresh air volume induced through the exit-side end door after a single train passage can reach up to 1 300 m^3. This study provides a theoretical basis for energy-saving operation of subway station environmental control systems during transitional seasons by exploiting the piston wind effect.

Keywords: subway station；end screen door；pressure；piston air；one-way damper；outdoor fresh air

随着我国经济建设的快速发展，城市规模的迅速扩大，以地铁为代表的城市轨道交通得到了大力发展。伴随列车运行而产生的活塞风效应是影响地铁车站环控系统的重要因素之一，在过渡季节若能对其加以利用则可有效降低地铁车站环控设备的能耗[1−3]。因此，在“双碳”目标背景下，如何在过渡季节利用活塞风实现地铁环控系统节能具有重要研究意义。

目前已有较多学者针对地铁运行过程中产生的活塞风效应进行了研究。齐江浩等[4]通过监测活塞风道中的风速和温度发现，活塞风速度及温度随列车运行呈周期性变化。严乐[5]结合数值计算和现场实测论证了通过优化区间隧道内活塞风井的设置模式可在一个发车间隔内通过活塞风井引入室外空气 5 126 m^3。可见，活塞风具有巨大的节能潜力。陈瑶[6]提出可在过渡季节开启风口通风的复合式屏蔽门方案，并通过数值计算发现在初期、近期、远期正常工况下，各车站公共区的换气量、平均温度以及楼梯出入口的平均风速均基本满足设计要求。吴嘉钰[7]提出采用可换气式结构的端门，并通过数值模拟发现，在列车进站过程中端门口风速最大可达 10 m/s。但以上方式在利用活塞风引入新风的同时也会将隧道内颗粒污染物带入站台。对此，周伟[8]提出利用出入口引入新风取代机械新风系统，并采用模拟和现场实测相结合的方式论证了该方案的可行性。陈超等[9]提出利用活塞风效应将室外新鲜空气通过地铁车站地面出入口引入地铁站厅和站台。结果表明，通过地铁车站 2 个地面出入口可从室外引入约 71 400 m^3/h 新鲜空气。但以上通过出入口引入新风的研究对象大多为非屏蔽门地铁车站，针对屏蔽门系统的地铁车站通过出入口引入新风的研究较少。对此，王丽慧[10]提出在停站列车离站阶段以延迟关闭车站两端屏蔽门的方式引入新风。结果表明，利用该方法可增加地铁车站新风量约 33 653 m^3/h。

以上针对屏蔽门系统地铁车站增加新风量方法的研究大多聚焦于活塞风的直接引入，存在将区间隧道污染物扩散至站台的可能；而利用出入口引入新风的研究对象又大多为非屏蔽门地铁车站。故本文提出在现有屏蔽门地铁车站站台端门处安装单向风阀，从而在列车离站时站台区域形成负压，由出入口引入室外新风的假设。以上海地铁 5 号线某站台为例，首先通过理论分析得到引入新风量与端门承压计算模型；再通过现场实测获得不同行车密度下各端门承压特性；最后将端门承压数据代入计算模型，得到列车运行过程中站台引入新风量的动态变化特性。

1　研究方法

1.1　基于端门承压的引入新风量计算模型

本文提出的在过渡季节通过站台端门单向风阀引入室外新风的假设为：对于屏蔽门系统的地铁车站，在现有地铁站台上下行方向离站端端门处安装单向风阀，并在过渡季节且室外空气质量良好时开启该风阀。利用列车离站时活塞风负压抽吸作用将站台空气通过该风阀抽到区间隧道中，使站台区域形成负压，从而诱导室外新风依

次从出入口进入站厅和站台，以平衡这部分负压，达到减少机械送风量、降低过渡季节环控系统能耗的目的。为了简化研究过程，在建立车站引入新风量计算模型时假设：①流体流速在流动过程中恒定；②流体为不可压缩流体，即流体密度在流动过程中保持不变；③忽略其他车站设备或建筑结构的局部阻力。

气流流动阻力是流动过程中气流所受沿程阻力和局部阻力之和[11]。列车离站时端门承受的负压会转变为单向风阀的吸风作用。此过程中需考虑室外空气通过出入口、站厅、楼梯、站台，再由单向风阀进入区间隧道过程中的沿程阻力和局部阻力。本文将这些阻力合并为单向风阀、站厅站台间的楼梯口和出入口的综合局部阻力P[11]，即

$$P=\frac{\xi_1\rho v_1^2}{2}+n_2\times\frac{\xi_2\rho v_2^2}{2}+n_3\times\frac{\xi_3\rho v_3^2}{2}+\frac{\rho v_1^2}{2} \tag{1}$$

式中：ξ_1、ξ_2、ξ_3分别为单向风阀、楼梯口、出入口的综合局部阻力系数；v_1、v_2、v_3分别单向风阀、楼梯口、出入口的风速，m/s；n_2、n_3分别楼梯口、出入口个数；ρ为空气密度，kg/m^3，取 1.205 kg/m^3。

本文所研究的车站共有 3 个楼梯口和 4 个出入口，故n_2取 3，n_3取 4。在流体力学中一般将马赫数小于 0.3 的气体视为不可压缩流体。地铁站内气流速度较小，马赫数最大仅为 0.03，故可将地铁站内空气视为不可压缩流体。基于该假设，从出入口进入站厅、经过楼梯口进入站台、由端门单向风阀进入区间隧道的风量满足风量平衡理论，即

$$G_1=G_2=G_3 \tag{2}$$

式中：G_1为单个单向风阀的吸风量，m^3/h；G_2为 3 个楼梯口的总吸风量，m^3/h；G_3为 4 个出入口的总吸风量，m^3/h。

式(2)可进一步表示为

$$v_1S_1=3v_2S_2=4v_3S_3 \tag{3}$$

式中：S_1、S_2和S_3分别为单向风阀、楼梯口和出入口的面积，m^2。

将式(3)代入式(1)，可得到考虑各阻力损失时单向风阀的风速v_1，有

$$P=\left(\frac{\xi_1\rho}{2}+\frac{S_1^2\rho\xi_2}{6S_2^2}+\frac{S_1^2\rho\xi_3}{8S_3^2}+\frac{\rho}{2}\right)v_1^2 \tag{4}$$

车站相关位置的综合局部阻力系数可参考文献 [10]，如表 1 所示。

表 1 车站相关位置的综合局部阻力系数与面积

Tab. 1 Combined local resistance coefficients and flow areas at relevant station locations

位置	局部阻力系数	面积/m^2
单向风阀	0.52	1.50
楼梯口	2.00	15.00
出入口	4.59	11.80

式(4)可简化为

$$P=0.931v_1^2 \tag{5}$$

则 1 h 内通过该单向风阀引入新风量Q为

$$Q=\gamma\int_0^t v_1S_1\mathrm{d}t \tag{6}$$

式中：γ为列车行车密度，对/h；t为一辆列车从进站至离站这一过程所用时间，s。

1.2 端门承压实测

本文针对站台端门承压进行了现场实测。

(1)测点选取与工况设置

车站为地下二层岛式车站，地下一层为站厅层，地下二层为站台层。车站总长度约为 200 m，车站标准段宽度约为 20.7 m，高度约为 4 m。区间长度约为 1 100 m，列车类型为 6 节编组 C 型列车。测点选择在地铁站台 4 扇端门处，端门承压测点位置如图 1 所示。测点 1、2、3、4 分别位于上行线列车进站端端门、上行线列车离站端端门、下行线列车离站端端门、下行线列车进站端端门。

上海地铁 5 号线在早、晚高峰期间发车间隔为 5 min/辆，设为工况 1；在非高峰期间发车间隔为 10 min/辆，设为工况 2。车站上、下排热系统及空调系统皆开启，且在测试过程中对向无车，故基本可忽略对向来车对实测数据的影响。

(2)测试仪器选取

端门承压测量仪器参数如表 2 所示。测试前在实验室中对所有仪器完成标定，以最大限度地避免仪器误差。

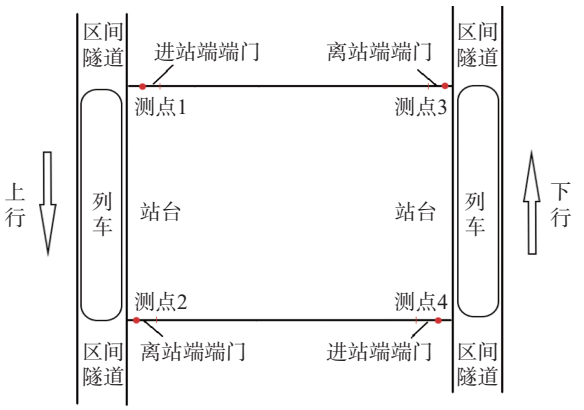


图 1　端门承压测点位置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of pressure measurement point locations at the end door

表 2　端门承压测量仪器参数

Tab. 2　Parameters of the end door pressure measurement instrument

仪器名称	量程	测量精度
TESTO 512差压测量仪	0 ～ 20 hPa	±1 Pa
KIMO MP100手持式差压测试仪	−1 000 ～ 1 000 Pa	±1 Pa

(3)实测方法

首先，测试前用胶布封好站台全部 4 扇端门的缝隙。通过该方法可大幅减小由于端门缝隙渗透产生的测试误差。但差压测量仪测压管不能保证完全水平，故端门承压实测数据仍可能存在一定误差。

在用胶布封好的端门缝隙处开一小口，将差压测量仪的一根测压管伸入区间隧道侧。测压管方向平行于列车行进方向，插入深度约为 30 cm。另一根测压管放置在端门站台侧，监测端门承压全程动态变化。测试原理如图 2 所示。测压管平行于流体流动方向，故实测得到的承压为作用在端门上的全压。实测过程中同步动态监测同侧进站端与离站端端门承压，并从差压测量仪读数由零发生变化起，跟踪至差压测量仪读数重新稳定至零的全动态过程。首先同时测试测点 1、2 处的端门承压，在同一工况下分别进行 5 组测试。测试结束后，用胶布将测点 1、2 处端门缝隙重新封好。然后在测点 3、4 处重复上述步骤，完成另一工况下的 5 组测试。

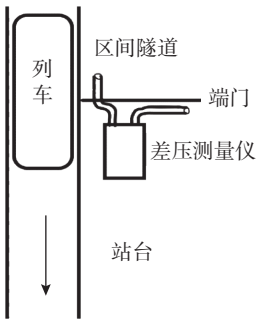


图 2　端门承压测试原理

Fig. 2　Schematic diagram of the end door pressure test

1.3　引入新风量的模拟计算

采用 Simulink 软件对通过单向风阀引入新风量 Q 进行模拟计算。模拟计算框图如图 3 所示。将实测得到的 4 个端门承压数据分别作为 A、B、C、D 四个输入量，在命名为“引入新风量”的示波器中动态输出每辆列车通过时引入地铁车站的逐时新风量，在命名为“每 h 引入新风量”的示波器中输出 1 h 内引入地铁车站的新风总量。同时，单向风阀面积、风阀局部阻力系数、行车密度等参数皆可在对应位置进行更改，以匹配不同的地铁车站。

2　结果分析

2.1　端门承压实测结果分析

在工况 1 下，测点 1、2 的端门承压现场实测结果分别如图 4(a)、4(b) 所示。在工况 2 下，测点 3、4 的端门承压现场实测结果分别如图 4(c)、4(d) 所示。同时，将课题组前期实测得到的一次完整的列车进站至离站过程中车速的变化一并绘制在图中，以便于分析。

由图 4(a) 可知，当列车匀速运行且距站台还有一定距离时，进站端端门已受到列车运行产生的活塞风的影响，此时端门承压为 10 ～ 30 Pa；在列车进站瞬间，由于受到隧道截面积突缩产生的压力波的影响，端门承压骤降至 0 Pa 附近，后又迅速回升；在列车匀减速进站直至停站过程中，进站端端门承压为 10 ～ 20 Pa；在列车停站后，由于活塞风对端门承压的影响逐渐减弱，端门承压逐渐下降至 0 Pa 附近；当列车开始加速

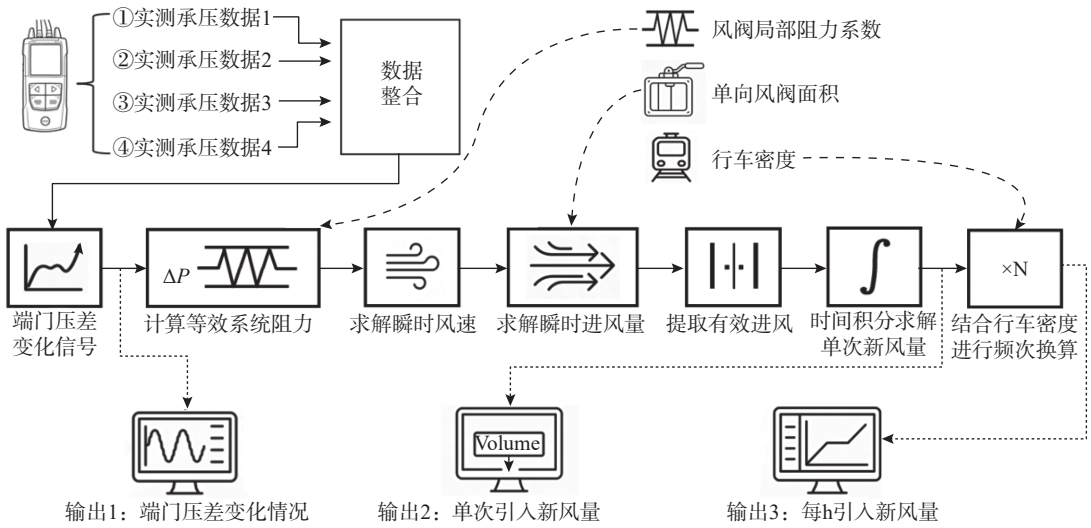
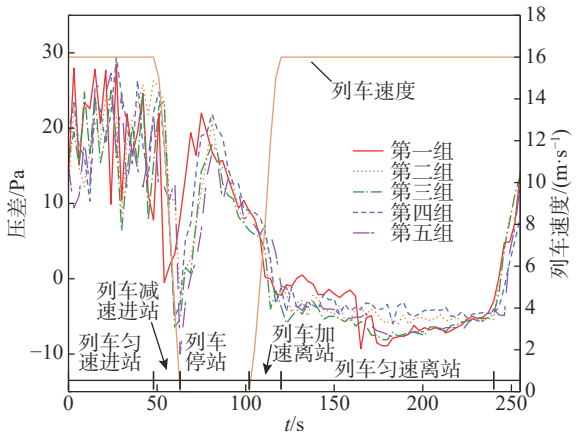


图 3 模拟计算框图

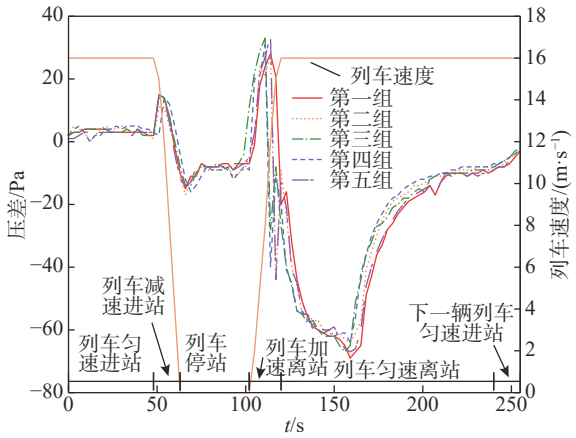
Fig. 3 Block diagram of the simulation

离站时，由于活塞风的抽吸作用，进站端端门处形成约为−5 Pa 的负压，持续时长约为 120 s。对比图 4(a)、4(d) 可见，在不同列车行车密度下，进站端端门承压变化规律基本一致，但在更长的行车间隔下，端门承压变化幅度更大，最大可达 60 Pa，负压平均值约为−10 Pa。在工况 1 下，由于行车间隔较短，在 250 s 后进站端端门承压已受到下一辆列车的影响。

由图 4(b) 可知，在列车还未进站时，离站端端门承压特性几乎没有变化；在列车进站瞬间，受到隧道截面积突缩产生的压力波的影响，离站端端门承压小幅激增，随后在列车匀减速进站过程中逐渐减小至−10 Pa 左右；在列车停站的 40 s 内，离站端端门承压受到活塞风产生的涡流与上一辆列车离站形成的气流的共同作用，始终保持负压；列车开始加速离站会带动原本停留在区间隧道与站台之间的气流涌入区间隧道，故离站端端门承压在较短时间内为正压；之后列车离站时，活塞风抽吸作用占主导，承压由正压迅速变为负压并逐渐下降至−60 Pa，最大负压的作用时长约为 40 s；之后随着活塞风抽吸作用的减弱，承压逐渐增大直至 0 Pa。在整个过程中负压持续时长为 125 s。在负压作用期间，测压管几乎不受平行来流的影响，故此时实测得到的负压可近似认为是作用在端门上的静压。对比图 4(b)、4(c) 可得，在不同列车行车密度下，离



(a) 测点1



(b) 测点2

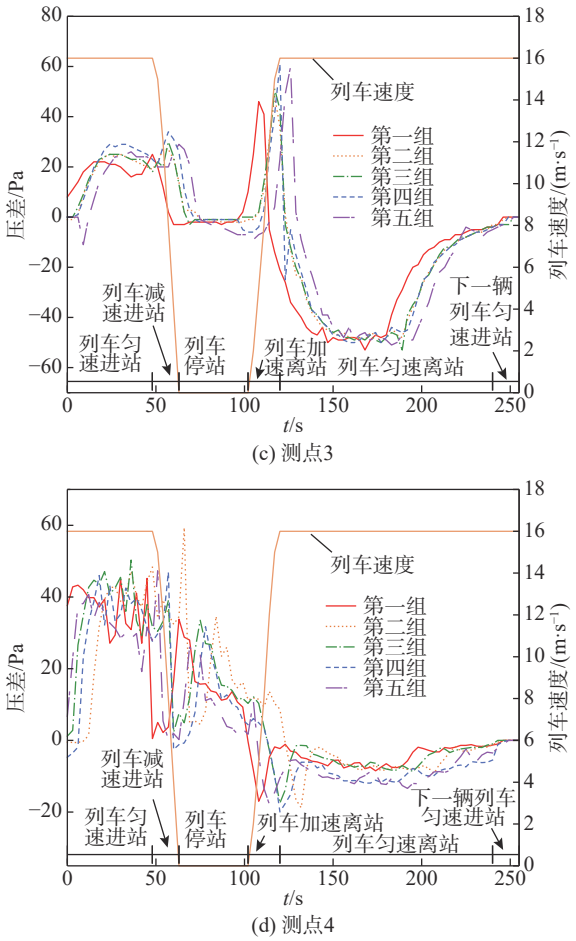


图 4　端门承压现场实测结果

Fig. 4　Field measurement results of end door pressure

站端端门承压变化规律基本一致。但在更大的行车间隔下，端门承受的正压更大，可达 60 Pa；当列车离站后端门承受的负压较小，仅为−40 Pa，端门承压约增加 20 Pa。其原因是在更大的行车间隔下，离站端端门未受到上次离站列车所产生的负压的叠加影响。

2.2　引入新风量的模拟结果分析

在模拟计算前先对实测得到的端门承压数据进行处理，步骤为：①对每个测点测到的 5 组数据取平均值；②利用三次样条插值方法扩充数据集，时间间隔精确到 s；③保留数据中的负值，将数据中的正值改为 0。

经处理后的端门承压数据如图 5 所示。将该数据作为模拟时的输入量。设定单向风阀面积为 1.5 m^2，单向风阀局部阻力系数为 0.52。模拟计算得到的每辆列车通过时引入新风量如图 6 所示。

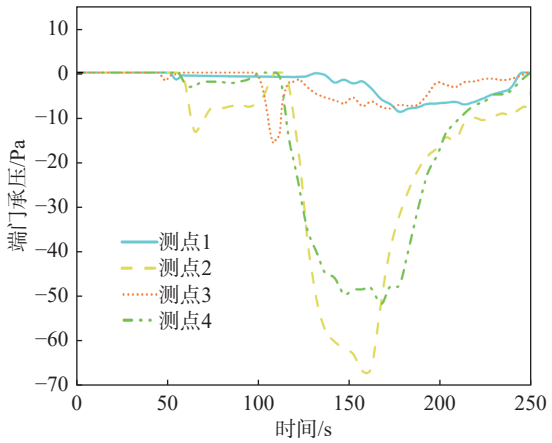


图 5　经处理后的端门承压数据

Fig. 5　Processed pressure data

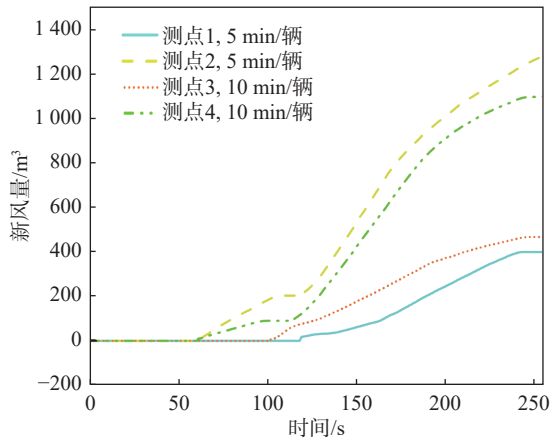


图 6　单次列车通过时引入新风量

Fig. 6　Fresh air volume introduced by a single train

由图 6 可得，离站端端门单向风阀引入新风量约为进站端端门单向风阀引入新风量的 3 倍，故在车站离站端端门处安装单向风阀更具性价比。对比图 6 中测点 1、2 引入新风量可以发现：行车间隔越小，单次列车通过时引入新风量越大；当行车间隔为 5 min/辆、单次列车通过时引入新风量最高可达 1 300 m^3。这是由于在更大的行车密度下，离站端端门处的负压会受到上次离站列车和该次离站列车的叠加影响。同时，由图 6 可知，离站端端门新风量的引入过程大致分为三个阶段，分别为：65 ～ 100 s 列车停站阶段；100 ～ 120 s列车加速离站阶段和 120 ～ 240 s 列车匀速离站阶段。在列车停站阶段，离

站端端门引入新风量缓慢增加；在列车加速离站阶段，由于列车带动原本停留在区间隧道与站台之间的气流涌入区间隧道，使端门承压在较短时间内变为正压，故在此阶段没有新风量引入；在列车匀速离站阶段，离站端端门引入新风量迅速增加且持续时间较长，在此阶段引入的新风量占整个过程的 80%，持续时长为 140 s。由此可推测，在 12 辆/h 的行车密度下，车站两个离站端端门单向风阀在 1 h 内可从室外引入的新风量约为 31 200 m^3，而该车站设计最大新风量为 35 800 m^3/h。可见，在过渡季节通过端门单向风阀引入的新风量已达设计值的 87%。相较于现有环控方案，在过渡季节可利用该方法替代原有的机械送风系统来引入新风，从而有效降低地铁车站环控设备的能耗。

3 结论

本文通过现场实测与模拟相结合的方式对在站台端门处安装单向风阀引入室外新风的假设进行了研究。主要结论为：

(1)进站端端门在列车运行的大部分时间内受正压影响，承压随着列车进站逐渐增大，并在列车停站后逐渐减小至 0 Pa，在列车离站后承压保持一段时间负值后，受到下一辆进站列车的影响再次增大为正值。在更大的行车间隔下，进站端端门承压变化幅度更大，最大可达 60 Pa，负压平均值约为−10 Pa，且不会受到下一辆进站列车的影响。

(2)离站端端门在列车进站阶段承压为正值，在列车停站后逐渐减小至 0 Pa，在列车离站后承压迅速下降，直至为−60 Pa，持续时长达 125 s。在更大的行车间隔下，离站端端门承压整体约增加了 20 Pa，且不会受到上一辆离站列车的影响。

(3)在一次完整的列车进站至离站过程中，通过离站端端门单向风阀引入新风量会依次经历在列车进站时缓慢增长、在列车停站时保持不变和在列车离站后一段时间内迅速增长三个阶段。且离站端端门单向风阀引入新风量约为进站端端门单向风阀引入新风量的 3 倍。行车间隔为 5 min/辆时，单次列车通过引入的新风量最高可达 1 300 m^3，1 h 内可从室外引入的新风量约为 31 200 m^3。

参考文献：

[1] 王丽慧, 马长江, 黄淑敏, 等. 活塞风效应下地铁站厅公共区域压力分布特性与出入口渗透风量研究 [J]. 能源研究与信息, 2025, 41(2)：98 − 106.

[2] 王丽慧, 马嘉楠, 尹立元. 基于迭代模型的地铁车站空气温度逐年演化特性研究 [J]. 能源研究与信息, 2025, 41(3)：144 − 151.

[3] 王丽慧, 熊文睿, 王博. 基于调研统计的地铁车站空调分区研究 [J]. 能源研究与信息, 2026, 42(1)：6 − 15.

[4] 齐江浩, 赵蕾, 王君, 等. 地铁隧道活塞风实测及特征分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(4)：740 − 747.

[5] 严乐. 活塞风对地铁车站环境的影响及其节能特性分析 [D]. 北京: 北京工业大学, 2015.

[6] 陈瑶. 复合式屏蔽门地铁车站自然通风特性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.

[7] 吴嘉钰. 利用活塞风降低地铁站通风空调系统能耗的潜力研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.

[8] 周伟. 广州全封闭式屏蔽门地铁车站自然通风潜力研究 [D]. 广州: 广州大学, 2020.

[9] 陈超, 潘嵩, 李真真, 等. 地铁活塞效应对地面出入口引入新风流动特性的影响 [J]. 重庆大学学报, 2011, 34(S1)：100 − 105.

[10] 王丽慧. 疫情防控期间有效增大地铁车站新风量的预测研究 [J]. 暖通空调, 2020, 50(6)：70 − 74.

[11] 蔡增基, 龙天渝. 流体力学泵与风机 [M]. 5 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.