

文章编号: 1671-6612 (2025) 02-287-10

地铁车站设备用房内 压力波动特性测试及渗透风计算方法研究

刘墨云

(福州轨道交通设计院有限公司 福州 350000)

【摘要】 地铁列车运行产生的活塞风渗透至设备用房, 将对车站设备用房空调系统产生重要影响, 但目前缺乏相关研究。通过对夏热冬暖地区三个典型地铁车站设备用房的压力变化特性现场测试, 分析了列车运行引起设备用房的渗透风压力变化规律。研究表明: 地铁列车运行导致站台门外设备用房内压力波动明显, 特别是位于轨行区头部的站台门外设备用房压力变化最为显著, 对站台门内设备用房压力影响较小, 仅为外部设备用房的 10% 左右, 站厅层受渗透风的影响则可忽略; 根据设备用房内压力变化特征提出了基于高斯函数的拟合方法来描述列车进站、出站及对向列车对设备用房压力变化的影响; 最后基于拟合函数提出对不同位置设备用房室外渗入风量 (V_+) 和室内渗出风量 (V_-) 的计算方法及推荐取值, 为渗透风引起的空调系统负荷计算提供了基础。

【关键词】 地铁车站; 设备用房; 压力变化特性; 渗透风; 空调系统

中图分类号 U231.4/TU962 文献标志码 A

Field Test on the Fluctuation Characteristics of Infiltration Wind Pressure in Equipment Rooms of Subway Stations

Liu moyun

(Fuzhou Rail Transit Design Institute Co., Ltd, Fuzhou, 350000)

【Abstract】 The issue of air infiltration caused by piston wind in metro stations significantly impacts the air conditioning systems of station equipment rooms. However, specific evaluation methods for this problem have not yet been proposed in current research. This study conducts field tests on the pressure characteristics of equipment rooms in three typical metro stations in regions with hot summers and mild winters, exploring the infiltration wind and its load characteristics. The study reveals that the pressure characteristics of equipment rooms outside the screen doors exhibit significant fluctuations, while the impact inside the screen doors is only about 0.1 times that of the external pressure, with the infiltration effect in the station hall layer being negligible. It is also found that the pressure characteristics of equipment rooms outside the screen doors at the head of the track area are more pronounced. A Gaussian function-based fitting method is proposed to describe the pressure characteristics during train arrivals, departures, and the influence of approaching trains, with the fitting parameters used to evaluate these characteristics. Subsequently, based on the fitting functions and the varying positions of the equipment rooms, a calculation method and recommended values for outdoor infiltration air volume (V_+) and indoor exfiltration air volume (V_-) were proposed. This provides a foundation for calculating the air conditioning load caused by infiltration air.

【Keywords】 Subway station; Equipment room; Fluctuation characteristics; Infiltration wind; Air conditioning system

0 引言

近年来,地铁车站空调系统的能耗问题越来越受到关注。与地面建筑不同的是,地铁列车运行时产生的活塞风渗透到室内,将对车站空调系统运行能耗产生重要影响^[1-6]。众多学者对活塞风引起的渗透风问题进行了研究,包括其渗透特性及推荐取值等^[7-11]。然而,上述研究大多仅关注公共区大系统,忽略了对设备用房小系统的影响。一些研究指出,单层门遮挡时,仍有部分渗透风可以门缝通过^[12],而大多数地铁车站,仍有部分设备用房位于站台层站台门外的轨行区内,从而导致大量高热高湿空气可以通过常闭门的门缝直接渗入房间内部,虽然已有研究关注到此类房间存在渗透风现象,但均未提出具体的测试结果及计算方法^[13,14]。渗透风的产生是由于列车经过时在隧道内产生的空气流动及压力波动^[15,16],当前虽然针对列车运行引起的压力波动开展了大量研究,但未将压力波动特性与设备用房的渗透风关联起来。通过研究设备用房内的压力波动特性并结合房间气密性特征,可以较为准确分析列车运行对设备用房渗透风的影响。

为明确地铁车站设备用房渗透风特性以指导设备用房空调系统负荷设计值,本文对夏热冬暖地区三个典型车站设备用房内的压力变化特性进行现场测试,获得设备用房渗透风引起的压力变化特性,进而提出设备用房渗透风量计算方法。

1 设备用房压力波动现场测试

1.1 测试对象

我国地铁车站根据站台结构分为岛式站台车站、侧式站台车站和岛侧站台车站^[17]。其中,岛式站台车站在较为常见,因此本研究选择了夏热冬暖地区三个典型岛式站台地下地铁站进行测试,分别命名为 A 站、B 站和 C 站。A 站于 2017 年投入运营, B 站于 2019 年建成, C 站则于 2022 年开始运营,三个车站均设有直接面对轨行区的设备用房和通过站台门与轨行区隔离的设备用房。虽然三个站点位于不同线路,但其车型及加减速特性一致:列车从 0 加速至 80km/h 的加速度不小于 0.6m/s^2 ,常用制动减速度为 1.0m/s^2 ,测试时间为 2024 年 1 月-2024 年 6 月。

1.2 测点布置及测试方法

图 1 给出了各测量站点及房间位置示意图。每个测试站点均包含“内部房间”和“外部房间”各 1 间,其中位于站台门内的房间称为“内部房间”,位于站台门外轨行区内的房间为“外部房间”。“内部房间”根据房间主要漏风位置(如门和泄压阀)朝向的轨行区,以该轨行区中运行的列车为基础,将设备用房划分为“头部房间”和“尾部房间”,“尾部房间”位于列车进站侧,“头部房间”位于列车出站侧。

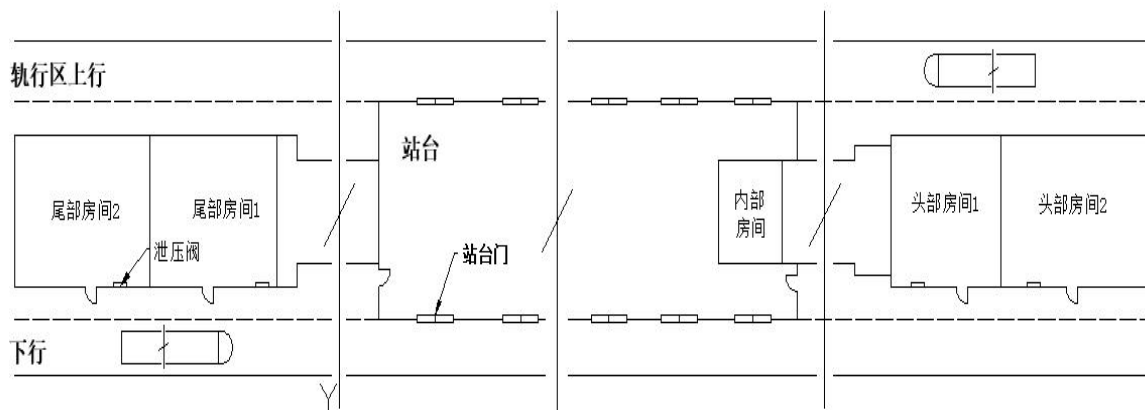


图 1 以车辆下行为例的所测房间位置示意图

Fig.1 A schematic diagram showing the measured room locations for the downward-moving train example

为研究列车运行对各房间内压力波动的影响,各测试车站均选择 2 个“尾部房间”、1 个“头部

房间”、1 个“内部房间”和一个站厅层的房间。测点位置及相应的测点编号如表 1 所示。

表1 设备用房压力测点位置

Table 1 Pressure measurement point locations for the equipment rooms

测试站点	房间名称	房间位置	代号
A	0.4kV 开关柜室	站台门外尾部	AOT-1
	35kV 开关柜室	站台门外尾部	AOT-2
	应急照明电源室	站台门外头部	AOH
	站台门设备室	站台门内	AI
	综合监控设备室	站厅	AH
B	0.4kV 开关柜室	站台门外尾部	BOT-1
	35kV 开关柜室	站台门外尾部	BOT-2
	应急照明电源室	站台门外头部	BOH
	站台门设备室	站台门内	BI
	信号设备室及电源	站厅	BH
C	专用通信设备室	站台门外尾部	COT-1
	信号设备室	站台门外尾部	COT-2
	民用通信设备室	站台门外头部	COH
	站台门控制室	站台门内	CI
	环控电控室	站厅	CH

图2给出了测试采用的微压计及其安装位置。由于房间内设有可直接联通室外的泄压阀，微压计的正压软管通过泄压阀的小缝隙通向室外，负压软管则置于室内，同时确保泄压阀除软管通过处的其余位置保持封闭。

为准确记录微压计的读数，采用摄像机持续拍摄读数视频，并使用 PaddleOCR 程序对视频逐帧处理，提取数据。所选微压计型号为 TSI 5815，精确度为±1%，分辨率为 0.1Pa。鉴于该微压计的最短识别时间为 0.5 秒，视频识别的数据也以 0.5 秒为基准时间单位进行处理。



(a) 微压计设置位置



(b) 泄压阀位置

图2 微压计设置位置与泄压阀位置

Fig.2 Micromanometer setup location and pressure relief valve location

1.3 地铁车站设备用房内压力波动特征表征方法

在无列车运行时，设备用房的理论压差应相对于室外保持无压差或轻微正压。但由于通风系统的不平衡，不同设备用房的实际压差各不相同，需对原始压力数据进行修正，可以使用相对压差变化代替绝对压差进行分析，从而消除各房间与通风系统平衡有关的静态基础压差影响，计算公式如式(1)~(4)。

$$P_R = P - P_0 \quad (1)$$

式中： P_R 、 P 、 P_0 分别代表外部和内部的相对压力差、测量压力差和无行车影响时压力差。

同时，为便于描述不同位置设备用房的压力波动特性并寻找不同位置设备用房压力波动特性的相应规律，需对其进行拟合表征。测试结果表明，列车运行引起的压力数据呈现多峰多谷的特性，符合高斯函数的基本表达，因此可采用多高斯函数进行拟合，其表达式为：

$$P'_R = \sum_{i=1}^N a_i e^{-\frac{(x-b_i)^2}{2c_i^2}} \quad (2)$$

式中： a 是高斯峰的振幅； b 是峰值所处位置，两峰值之间的 b 值差异与列车减速及加速用时有关； c 值为标准差，反映峰值的钟状宽度； N 为高斯峰的数量。拟合效果通过 R^2 指标评估，同时为避免过拟合，采用赤池信息准则 (AIC) 和贝叶斯信息准则 (BIC) 作为辅助评价指标。

得到列车运行引起设备用房内的压差变化表征后，可结合压力和气密性特征计算渗透气流：无行车时，设备用房内外压力平衡。当列车经时渗透

风会进入或流出设备用房,从而引起设备用房内的压力变化。设备用房内的风量守恒方程为:

$$V_{\text{sup}} - V_{\text{re}} + V_{+} - V_{-} = 0 \quad (3)$$

式中: V_{sup} 、 V_{re} 、 V_{+} 、 V_{-} 分别表示送风量、回风量、室外渗入风量、室内渗出风量, m^3/h 。

参数 V_{+} 和 V_{-} 与压力值及房间的气密性特征有关,它们通常通过幂律关系来描述^[18]:

$$V = C|P_R|^n \quad (4)$$

式中: V 为渗透风流量, m^3/h ; C 为流量系数, $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$; n 为流量指数,范围从 0.5 到 1。对于完全发展后的湍流, n 取值为 0.5;而对于层流, n 取值为 1。虽然 n 可能随着压力差的变化而变化,但对于大多数建筑物来说,这一参数可以视为常

数^[19,20]。

2 地铁车站设备用房内压力波动特性与表征

2.1 不同位置设备用房内压力波动特性

对列车运行引起车站各设备用房内的变化特性进行了测试,各车站设备用房内的压力变化规律相同,以 A 站为例,测试结果如图 3 所示。结果表明,位于站台层站台门外的 ATO-1 设备用房内压差波动较大,正峰值可超过 40Pa;位于站台门内的 AI 设备用房虽然与站台门外房间的波动趋势相似,但峰值仅约为后者的 0.1 倍,受影响明显减弱;而位于站厅层 AH 设备用房的压差波动极小,基本不超过 1Pa,测试结果符合预期。

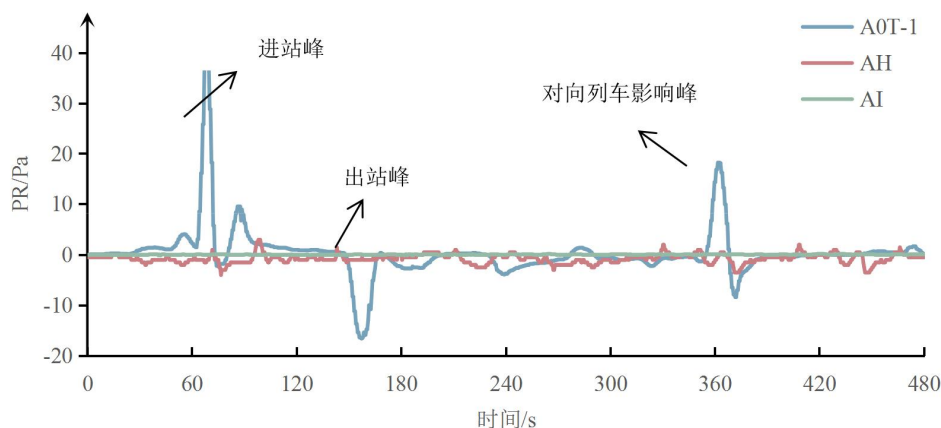


图3 A站各位置单周期压差数据示例

Fig.3 Sample single-cycle pressure difference data for various locations at Station A.

由图 3 还可以看出,车站活塞风对站厅层的影响已显著衰减,渗透风的影响基本可以忽略,因此,渗透风压力波动特性的研究应主要集中在站台层设备用房,尤其是位于站台门外轨行区的设备用房。

2.2 设备房内压力波动的周期性分析

列车在轨道区内的周期性运行会导致设备房内的压力呈现周期性波动,图 4 给出了 C 站 COH-1 房间 8 个周期的测试结果,每个周期均涵盖了列车从进站到出站的设备用房压力变化全过程。

从图 4 中可以看出:不同周期测得的压力变化虽然呈现相似的变化规律,但在进行相似性评价时发现,由于列车发车时段及其他因素的影响,列车进出站及停靠时间会有所差异,导致在全周期相似性评价中容易出现误差累积现象,因此可将设备房内的压力变化按进站阶段、出站阶段以及对向列车影响阶段分别进行分析。

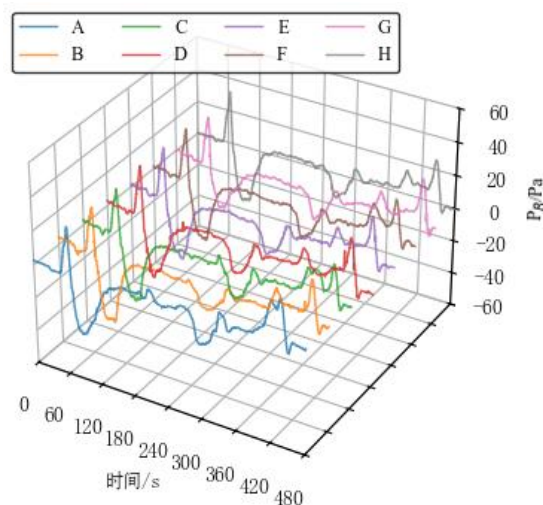


图4 COH-1 房间室外对内压差多周期对比

Fig.4 Multi-cycle comparison of outdoor-to-indoor pressure differences for the COH-1 room

以图 4 中的 8 组数据为例, 针对压力波动较大的进站和出站阶段, 对测得的数据进行了周期性分

析。分阶段的压力波动数据如图 5 所示。

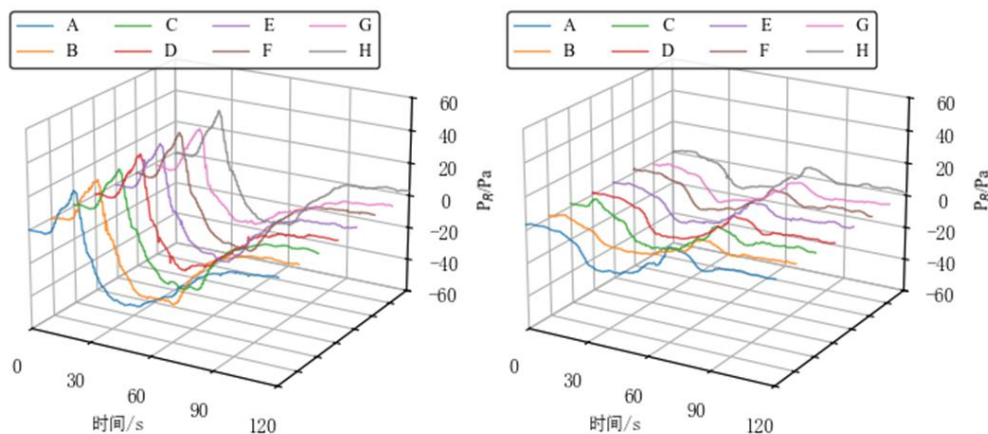


图 5 COH-1 房间室外对内压差进出站时段周期对比

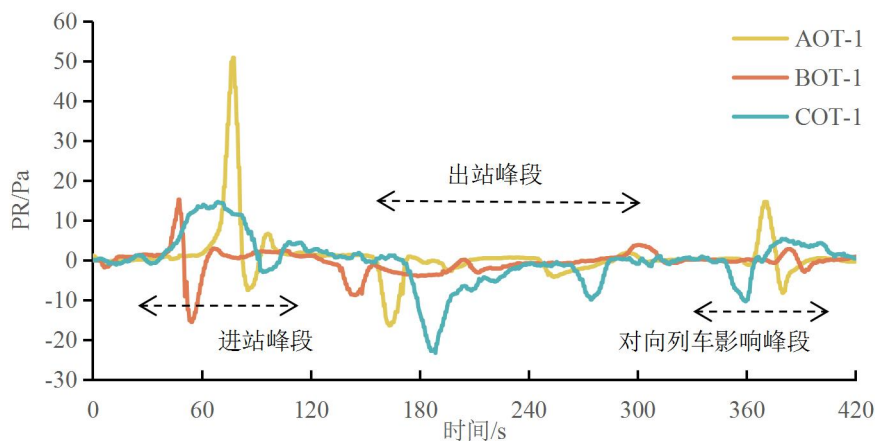
Fig.5 Cycle comparison of outdoor-to-indoor pressure differences for the COH-1 room during train entry and exit phases

分析结果表明, 列车进站阶段的压力波动数据自相似系数可达 0.97, 而出站阶段的自相似系数为 0.94。其余时间的测试结果同样表现出良好的自相似性特征, 自相似系数均保持在 0.9 及以上, 从而表明设备房间内的压力变化具有明确的周期性特征。

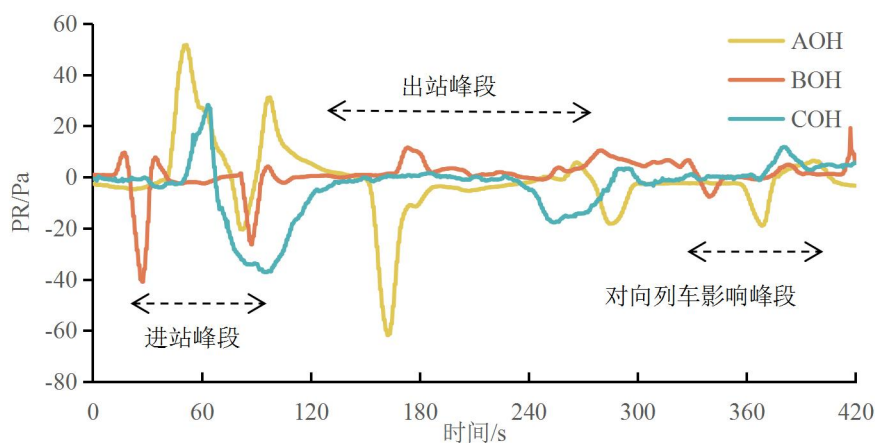
2.3 设备房间内压力波动特性表征

测试结果发现, 站台门外部设备用房内的压力波动特性也与其位置有关。图 6 给出了同一车站“头部房间”和“尾部房间”内压力波动的测试结果, 从图中可以看出, 列车在隧道内运行带动隧道内空气向前运动, 形成活塞风, 并在列车头部产生

正压, 在尾部产生负压。当列车减速并接近设备用房时会产生峰值压力差, 列车停站后, 大量空气进入设备用房和站台, 使头部周围压力降低; 当列车重新加速时, 列车头部通过设备用房但未达到巡航速度, 产生的正压有限, 随着列车进一步加速, 列车头部远离设备用房, 尾部涡流产生一定程度的负压。因此, 在这个阶段, 设备用房主要表现出负压特性。因此, 呈现了“头部房间”的压力波动复制大于“尾部房间”的结果, 尤其负压段的差距明显。这一现象源于列车经过设备用房时的速度特性不同, 进而导致活塞风压力特性存在一定差异。



(a) 尾部设备用房

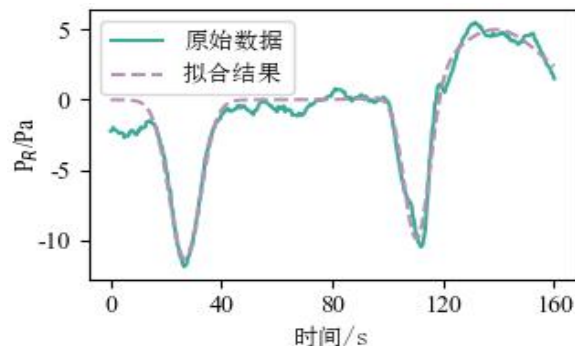


(b) 头部设备用房

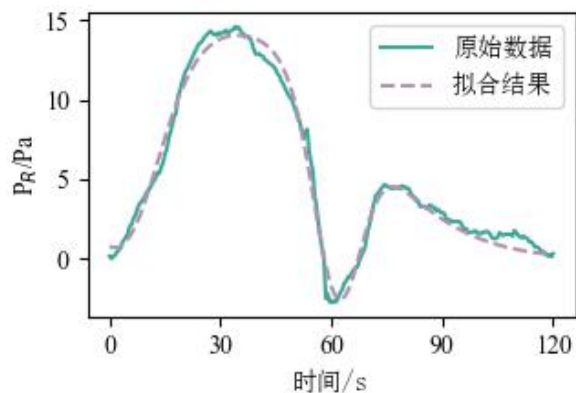
图6 站台层站台门外头部及尾部压力数据对比

Fig.6 Comparison of pressure data at the head and tail sections outside the platform screen doors on the platform level

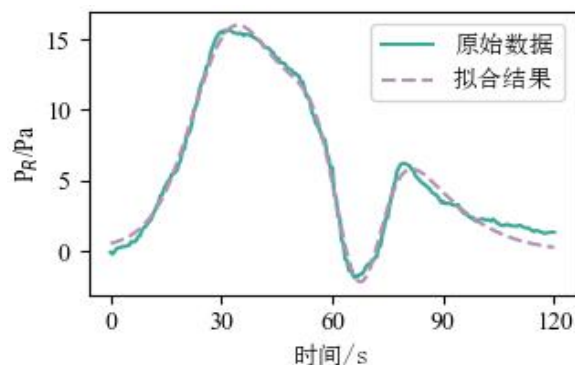
在选择测量点时,由于站台门外侧尾部有多个设备用房,因此在此处设置了多个测量点以进行对比。以压力影响更显著的C站为例,图7给出了C站站台门外侧尾部设备用房内的压力变化测试结果,其中COT-1距端门12米,COT-2距端门22米。两房间的分段拟合结果均较理想,可以通过拟合函数的系数来评估两组数据之间的差异,相应的拟合系数汇总于表2。



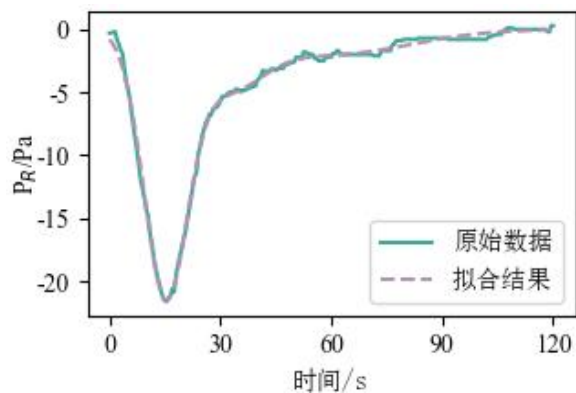
(c) COT-1 对向列车影响时段



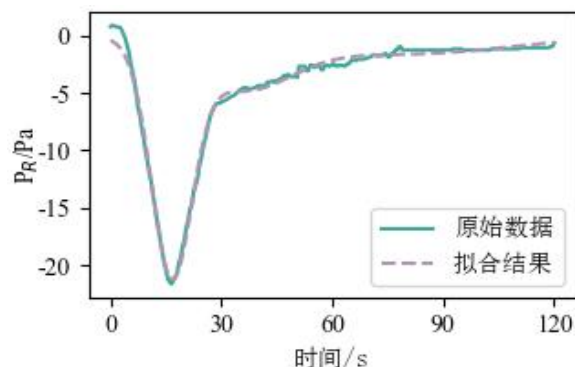
(a) COT-1 进站时段



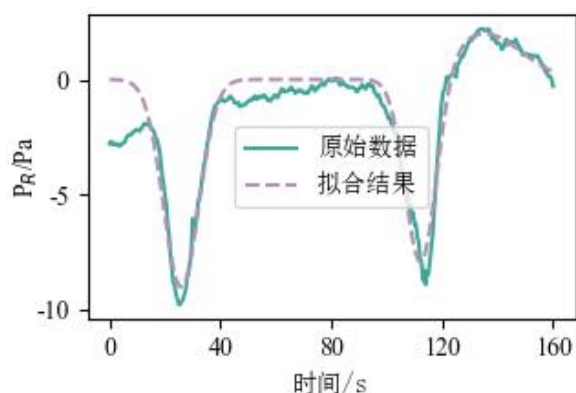
(d) COT-2 进站时段



(b) COT-1 出站时段



(e) COT-2 出站时段



(f) COT-2 对向列车影响时段

图 7 同站点同侧设备用房受压特性拟合图示例

Fig.7 Sample fitting diagram of pressure characteristics for equipment rooms on the same side at the same station

表 2 同站点同侧设备用房受压特性拟合参数示例

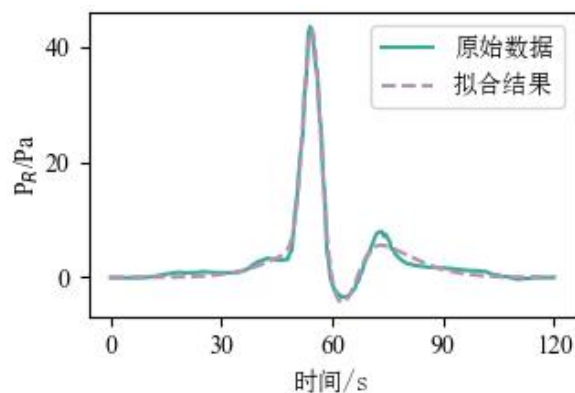
Table 2 Sample fitting parameters of pressure characteristics for equipment rooms on the same side at the same station

拟合指标		COT-1			COT-2		
		1	2	3	1	2	3
进站时段	a	-12.6	8.21	11.03	-12.83	9.49	11.69
	b	62.11	26.73	51.56	66.94	31.25	57.37
	c	6.28	9.76	22.68	6.23	9.57	22.68
出站时段	a	-2.02	-20.18	-4.05	-1.64	-19.26	-4.23
	b	59.37	15.09	31.11	78.31	16.49	34.93
	c	21.56	5.87	9.74	30	5.48	13.73
对向列车 影响时段	a	-11.35	-11.23	5	-9.04	-8.39	2
	b	26.83	110.54	138.82	25.83	112.34	135.22
	c	5.63	4.66	17.36	6.39	5.63	13.21

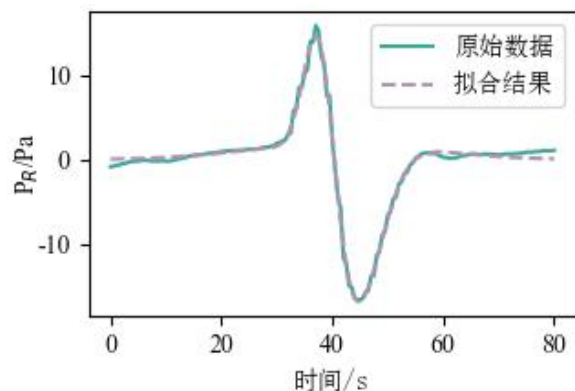
从表 2 中可以看出,相邻房间的拟合系数总体上仅存在较小差异。在尾部阶段,靠近减速列车的 COT-2 的峰值 a 略高于 COT-1。相反,在头部阶段和受对向列车影响的阶段,COT-1 的峰值较高,而代表峰宽的 c 值较小,这主要是因为 COT-1 更靠近再次加速的列车。然而,由于设备用房到端门的距离通常在 30 米左右的有限范围内变化,这一因素不会显著影响设备用房的压力特性。

根据拟合参数分析,同一地点、同一侧但距离端门不同的设备用房内的压力特性差异较小。对于不同车站,列车速度的变化以及与端门的距离会导

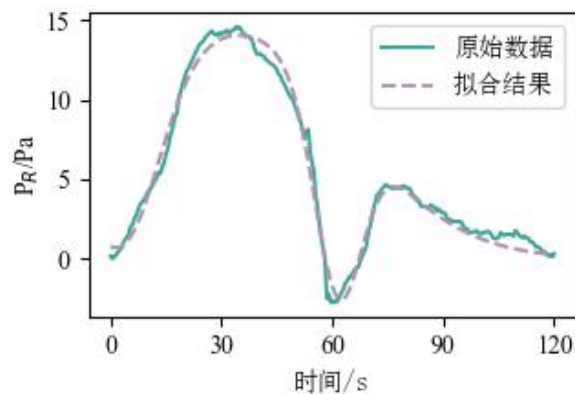
致压力幅值和峰宽的差异。此外,由于车站结构的不同,峰值特性也存在显著差异。这些差异在列车进站阶段的前端设备用房尤为明显,主要源于列车前端的压力释放和稳定化过程的不同。图 8 给出了三个车站各设备用房在进站阶段的压力数据,其中头部设备用房的进站段数据均表现出更明显的震荡现象,并且头部设备用房会经历更加突出的负压阶段。



(a) AOT-1



(b) BOT-1



(c) COT-1

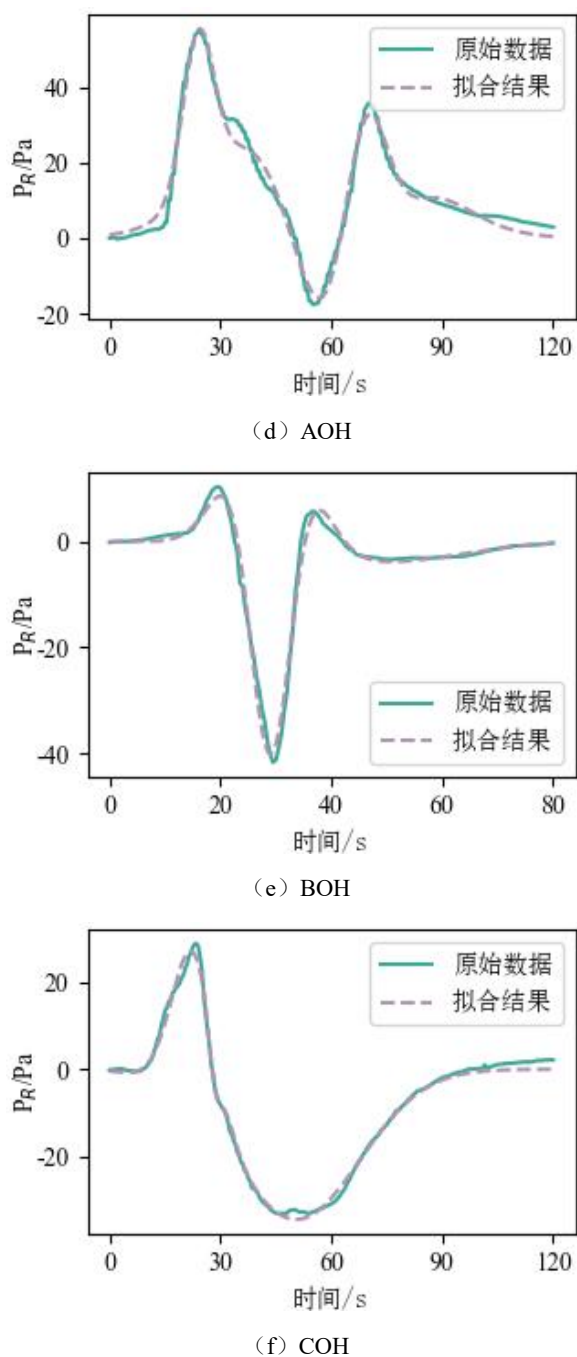


图8 各站点各位置设备用房进站时段受压特性拟合图
Fig.8 Fitting diagrams of pressure characteristics during the entry phase for equipment rooms at various locations across different stations.

2.4 设备用房渗透风量计算方法

根据上述设备用房压差变化特征分析结果,可以进一步提出不同位置设备用房渗透风量变化特征及其计算方法。对于 V_+ 和 V_- 的计算,其中 C 系数和 n 系数都与设备用房的气密性相关。 C 表示与

压力波动特性无关的简单比例关系,而 n 受到压力波动过程的影响。因此,考虑 n 参数不同对计算结果的影响,选择 n 在 0.5 到 1 的范围内分别计算压力积分项。将各站点各位置设备用房受压特性做整合,考虑到同位置设备用房受压特性差异较小,仅取较大值进行统计,计算结果如图 9 所示。

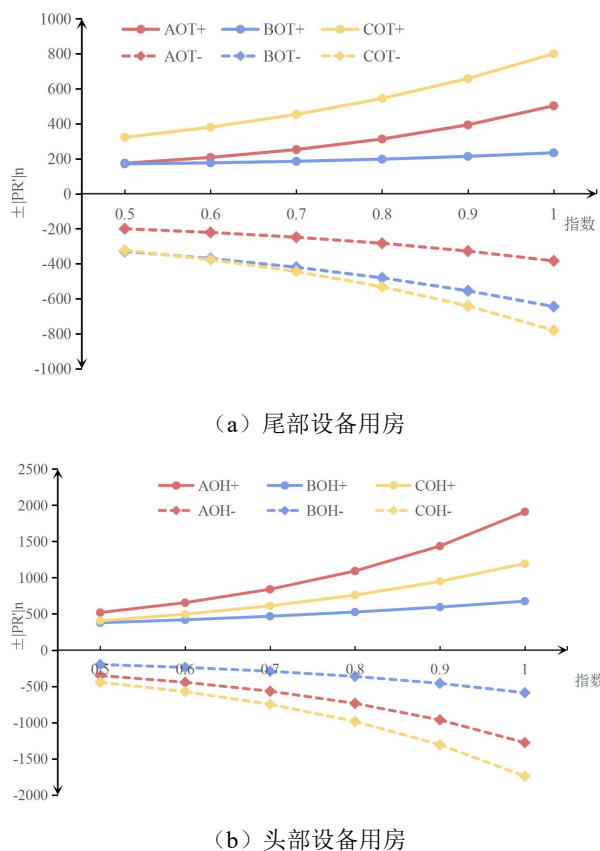


图9 各站点各位置设备用房压力积分项

Fig.9 Pressure integral values for equipment rooms at various locations across different stations

从图 9 中可以看出:头部设备用房的压力积分值较高,表明这些区域的通风现象更为明显;如果气流主要处于湍流阶段,参数 n 应更接近 0.5,从而导致计算得到的积分值差异较小;而若参数 n 取值较高,数据之间的差异会更加显著,其中 C 站的曲线最陡, B 站最缓,这表明这两个车站的设备用房受压时, C 站的高压段数据占比更多, B 站则以低压数据为主。

鉴于列车活塞效应引起的复杂湍流状态以及其他建筑物中得到的拟合系数 n ,建议设计参数 n 选择在 0.5 到 0.7 的范围内^[20,21]。相应推荐数据如表 3 所示,这些数据代表一个列车运行周期下不考

考虑 C 系数的压力项积分数据。 $\min$ 项为流量指数取 0.5 时各设备用房压力积分项数据的平均值（适当取整）， $\max$ 项为流量指数取 0.7 时各设备用房压力积分项数据的最大值（适当取整）。

表 3 设备用房各位置单周期压力积分项数据推荐值

位置与指标	V_+ 部分		V_- 部分	
	$ P' _{\max}^n/(s \cdot Pa^n)$	$ P' _{\min}^n/(s \cdot Pa^n)$	$ P' _{\max}^n/(s \cdot Pa^n)$	$ P' _{\min}^n/(s \cdot Pa^n)$
尾部	480	280	470	310
头部	820	460	760	430

注：站台门内设备用房计算时根据其朝向及位置，按照 $1/\sqrt{10} \approx 0.32$ 的比例选取表中推荐值。

而 C 系数的选择与每个设备用房的气密性相关。目前尚无相关研究提出可行的 C 系数，本研究所选取轨行区设备用房的实测 C 系数如图 10 所示。

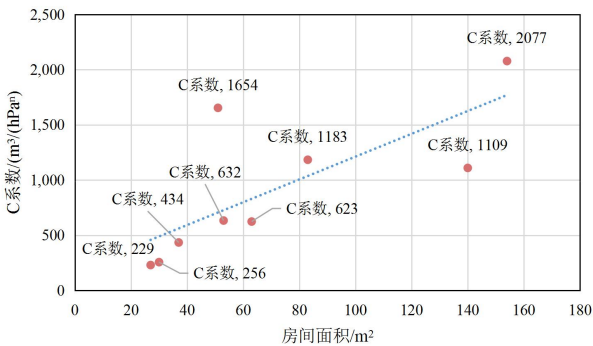


图 10 设备用房换气次数与 C 系数关系
Fig.10 Relationship between air change rates in equipment rooms and the C coefficient

图中所测设备用房 C 系数在 $200\sim 2100\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$ 之间，该系数与设备用房面积具有相关性。其余设备用房设计时 C 系数取值可依据其面积参照该研究。通过以上的参数即可计算得出各位置设备用房的渗透风量推荐取值，可为渗透风负荷的计算提供基础。

3 结论与展望

通过对夏热冬暖地区三个典型地铁车站设备用房受压特性的现场测试与数据分析，本文得出以下主要结论：

（1）对于三个主要位置（站厅层、站台层站台门内及站台门外）的设备用房，站厅层受活塞风影响最小，渗透风影响可忽略，而站台层站台门内房间的压力峰值仅约为站台门外的 0.1 倍。

（2）基于设备用房内压力变化的多峰谷特性，提出的基于高斯函数的拟合方法可用于描述列车进站、出站及对向列车运行对设备用房内压力变化的影响规律。

（3）站台门外设备用房内的压力变化特性与其所在位置有关，通常“头部房间”内的压力波动更为显著。

（4）根据拟合函数和设备用房位置，提出了室外渗入风量 V_+ 和室内渗出风量 V_- 的计算方法，包括压力积分项的推荐取值及与房间气密性相关的 C 系数取值，为渗透风负荷的计算提供了基础。

参考文献：

[1] GILBERT T, BAKER C, QUINN A. Aerodynamic pressures around high-speed trains: the transition from unconfined to enclosed spaces [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F (Journal of Rail and Rapid Transit), 2013,227(6):609-622.

[2] MA J, DENG B, ZHANG X, et al. The Effect of Piston Wind on Subway Station and Multi-factor Analysis(Article) [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020,37(6):85-91.

[3] HE D, TENG X, CHEN Y, et al. Piston wind and energy saving based on the analysis of fresh air in the subway system [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022,50:101805.

[4] LIU J, WANG Z, SHAN P, et al. Investigation and low energy improvement of the thermal environment of work areas in the Qingdao Metro in winter [J]. Building Services Engineering Research & Technology, 2020,41(1):60-72.

- [5] 王春旺,洪迎迎.站台门系统漏风量测试与数值模拟分析[J].建筑热能通风空调,2019,38(1):39-43,38.
- [6] LI X, WANG Y. Simulation study on air leakage of platform screen doors in subway stations[J]. Sustainable Cities and Society, 2018,43:350-356.
- [7] LIN V-J, CHUAH Y K, LIU V-W. A study on underground tunnel ventilation for piston effects influenced by draught relief shaft in subway system [J]. Applied Thermal Engineering, 2008,28(5):372-379.
- [8] 高志宏,刘猛,李子桥,等.地下地铁车站站台门渗入风量计算模型[J].土木与环境工程学报,2023,45(3):126-133.
- [9] 李亮,李晓锋,王春旺,等.地铁站台门渗透风对车站空调负荷影响的数值模拟研究[J].暖通空调,2021,51(11):121-124.
- [10] 隋学敏,王靖宜,郭磊,等.站台门系统地铁车站空调负荷研究现状及展望[J].铁道标准设计,2019,63(12):141-149.
- [11] 朱培根,孔维同,涂江峰,等.迂回风道对安全门地铁环控能耗的影响[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2016,(5):493-498.
- [12] WANG Y, LI X. Unorganized ventilation in subway stations with Platform Screen Doors[J]. Building & Environment, 2017,Vol.125(No.0):556-564.
- [13] 熊璨.基于西安北站的地铁车站设备管理用房热环境及气流组织优化设计[D].西安:西安建筑科技大学,2023.
- [14] 王磊,苏醒.地铁车站设备管理用房设备发热量计算[J].建筑科学,2021,37(2):97-102.
- [15] 龚波,刘伊江.站台门漏风量对空调负荷影响的探讨[J].建筑热能通风空调,2012,(1):86-88.
- [16] 李俊,李晓锋,朱颖心.地铁站台门漏风量的计算方法及其对空调负荷的影响分析[J].建筑科学,2009,(12):67-70,79.
- [17] SHIMOKURA R, SOETA Y. Characteristics of train noise in above-ground and underground stations with side and island platforms [J]. JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION, 2011,330(8):1621-1633.
- [18] GB/T 34010-2017,建筑物气密性测定方法 风扇压力法[S].北京:中国标准出版社,2017:24.
- [19] JI Y, DUANMU L, HU S. Prediction model of air infiltration in single-zone buildings with high airtightness [J]. Energy and Built Environment, 2023,4(6):653-668.
- [20] WALKER I S, WILSON D J, SHERMAN M H. A comparison of the power law to quadratic formulations for air infiltration calculations [J]. Energy and Buildings, 1998,27(3):293-299.
- [21] ZHENG X, WOOD C J. On the power law and quadratic forms for representing the leakage-pressure relationship – Case studies of sheltered chambers [J]. Energy and Buildings, 2020,226:110380.