

集中回风模式下单跨拱形地下车站 公共区气流组织模拟分析

冯 绕 罗燕萍 李苾嘉 胡自林

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州)

摘 要 [目的] 单跨拱形地下车站因层高较高, 并采用拱形顶板的特殊结构形式, 对装修提出了较高要求。因此, 在合理的气流组织前提下, 有必要研究如何减少单跨拱形地下车站公共区的通风空调管线, 为装修提供更大创新空间。[方法] 以深圳某单跨拱形地下车站为例, 提出了公共区采用集中回风模式, 以及送风管兼排烟功能的设计思路; 通过CFD(计算流体动力学)软件模拟分析在相同制冷量和相同送风温差条件下, 单送单回和集中回风两类送回风模式在单跨拱形地下车站公共区内的气流温度和速度分布规律, 研究调整集中回风口位置对公共区气流组织的影响, 并利用不均匀系数作为效果评价。[结果及结论] 地下车站公共区采用集中回风模式, 以及送风管兼排烟功能的设计可有效减少公共区的站厅风管数量约50%, 截面积约40%, 有效减少站台风管截面积约50%; 采用公共区集中回风模式, 集中回风口单独设置在站台, 以及送风管兼排烟功能的布置方式, 气流温度和速度分布均达到较优水平, 能满足乘客的舒适度要求, 可适用于单跨拱形地下车站公共区的气流组织。

关键词 城市轨道交通; 单跨拱形地下车站; 公共区; 气流组织; 集中回风模式

中图分类号 U231.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.032

Simulation Analysis of Air Distribution in the Public Area of Single-Span Arch-Shaped Underground Station under the Centralized Air Return Mode

FENG Rao, LUO Yanping, LI Bijia, HU Zilin

(Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China)

Abstract [Objective] Due to the relatively high floor height and the special structural form of arched top plates, the single-span arch-shaped underground station poses higher requirements for decoration. Therefore, it is necessary to study how to reduce the ventilation and air conditioning pipelines in the public areas of such underground stations on the premise of reasonable air distribution so as to provide more innovative space for decoration. [Method] In the case study of a single-

span arch-shaped underground station in Shenzhen, ideas of adopting the centralized air return mode in the public area and the air supply duct design with smoke exhaust function are put forward. Under the conditions of the same cooling capacity and air supply temperature difference in the public area of the single-span arch-shaped underground station, the CFD (computational fluid dynamics) software is used to simulate and analyze the airflow temperature and speed distribution laws for the two air supply/return modes of single air supply/return and centralized air return. The impact of adjusting the position of the centralized air return inlet on the air distribution in the public area is also studied, and the non-uniformity coefficient is used for effect evaluation. [Result & Conclusion] Adopting the centralized air return mode in the public area of the underground station and designing the air supply duct with smoke exhaust function can effectively reduce about 50% of the hall air ducts, 40% of the cross-sectional area in the public area, and about 50% of the cross-sectional area of the platform air ducts. While adopting the centralized air return mode in the public area, the centralized air return inlets are separately arranged on the platform, together with the layout of air supply duct with smoke exhaust function, enabling the airflow temperature and speed distributions to reach a relatively excellent level. This centralized air return mode meets the comfort requirements of passengers, and is applicable to the air distribution in the public area of the single-span arched underground station.

Key words urban rail transit; single-span arched underground metro station; public area; air distribution; centralized air return mode

本文基于CFD(计算流体动力学)在地铁车站热环境中的应用研究^[1-3], 以深圳市某单跨拱形地下车站为例, 深入探讨了公共区气流组织的优化策略。该车站的结构特点决定了其公共区将采用大面积裸露的装修风格, 这一设计对通风空调系统中管线的数量及布局构成了特定限制。在设计初期, 车站选择了站厅及站台公共区单侧送回风的方案,

该方案有效缩减了风管数量,但其实际的气流组织效果尚需进一步验证。合理的送回风方式对于车站公共区的气流流动特性、湍流场及温度分布规律具有直接影响^[4],因此,对上述方案进行优化研究显得尤为重要。本文将集中回风模式引入地铁车站的应用中,旨在进一步减少风管数量及占用面积,并促进送风口布置的均匀性。

为验证单侧送回风和集中回风两种方案的有效性 with 合理性,本文构建了三维 CFD 模型,并采用标准 $k-\varepsilon$ (湍动能-湍动能耗散率) 湍流模型作为物理基础开展数值模拟分析。值得注意的是,本研究聚焦于单跨拱形地下车站公共区采用集中回风模式下的 CFD 数值模拟,不涉及火灾工况下的气流组织分析。

1 工程概况

该单跨拱形地下车站拱形最低和最高处净高分别为 3.90 m 和 6.45 m,站厅尺寸为 91.2 m × 18.3 m (长 × 宽),站台尺寸为 114.0 m × 11.0 m × 4.6 m (长 × 宽 × 高),站厅层有效面积为 1 779 m²,站台层有效面积为 1 166 m²。站台设有 2 台自动扶梯 + 1 个楼梯通往站厅,自动扶梯宽 3.70 m,楼梯宽 4.95 m。本文车站采用站台门系统,可使车站公共区空调系统的气流组织基本不受区间隧道气流的影响。

2 车站公共区气流组织优化方案

2.1 室内外设计计算参数

该车站位于广东省深圳市,选取夏季空调室外空气干球温度和湿球温度分别为 32.5 °C 和 27.5 °C,站厅和站台公共区设计温度分别为 30.0 °C 和 28.0 °C。

根据客流等的发热量计算得出车站公共区所需风量与冷量,见表 1。

2.2 气流组织分析及优化

本文车站采用裸装风格,采用传统双送双回布置方式易导致管线压低公共区装修层高,不利于展现高大空间效果。如何在保证良好气流组织前提下减少管线数量及尺寸等问题成为本站设计重点。原方案设计中将站厅、站台公共区的送回风管线统一布置为单送单回模式,可减少管线数量,但需验证其通风效果。

集中回风模式已大量运用在大型展馆及商场

表 1 车站公共区通风空调系统风量与冷量

Tab.1 Air volume and cooling capacity of the ventilation and air conditioning system in the station public area

项目	取值
站厅层风量/(m ³ /h)	53 720
站台层风量/(m ³ /h)	66 300
公共区总风量/(m ³ /h)	120 020
新风量/(m ³ /h)	18 000
组合式空调机组冷量/kW	325

中^[5-6],但在地铁车站的应用少之甚少。将集中回风模式应用到地铁车站,利用送风管兼作排烟管,设置耐高温电动风阀进行正常和火灾两种工况切换:正常工况下公共区双端双侧送风提高了空调送风舒适性;火灾工况下双端双侧排烟加强了排烟效果,可有效减少地下车站公共区的站厅风管数量约 50%,截面积约 40%,有效减少站台风管截面积约 50%。为验证原方案的合理性以及集中回风能否成功应用于地铁车站,本文将讨论在相同供冷量及送风温差的前提下,两类方案中车站公共区的气流组织分布。以往研究表明,集中回风口的位置对整个空间的气流组织影响较大,故将集中回风口位置分别布置在站台两端及站厅两端,得到方案一、二及三,加上原方案共四种方案。四种方案下车站公共区通风空调系统原理图及标准断面图,如图 1 所示。

2.3 气流组织方案优化前后设备参数对比

本车站公共区采用全空气空调系统,两端各设 1 台空气处理机组,分别承担公共区一半的空调通风负荷。四种方案存在风管路由设置以及风口数量和尺寸等差异,导致四种方案在系统设备选型存在差异。各方案设备参数设置表见表 2。

3 车站公共区气流组织模型验证及分析

3.1 模型建立

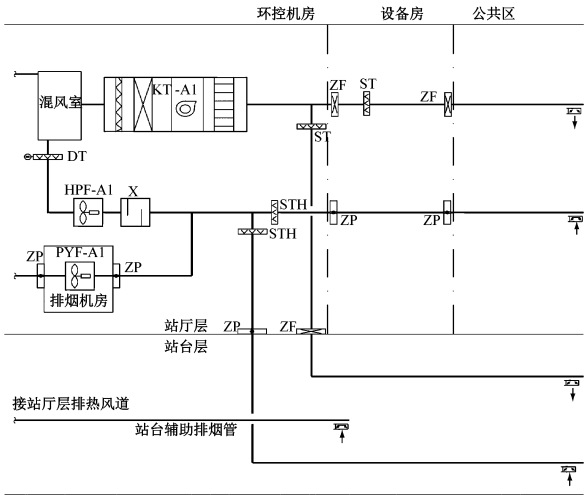
3.1.1 模型简化

根据车站的实际结构,建立了三维物理模型。在保证模拟结果可靠性的前提下,对模型进行适当简化:

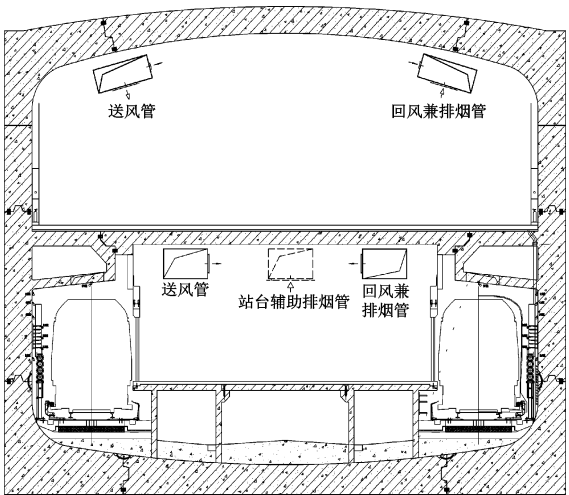
1) 忽略设备区与公共区之间的传热。

2) 假定空气流动为黏性不可压缩湍流稳态流动。

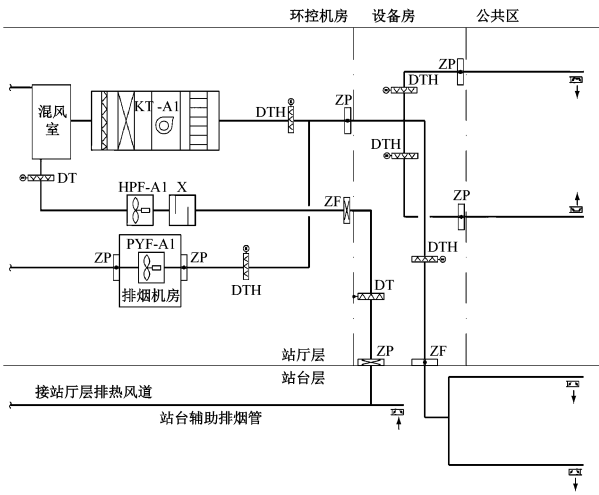
3) 本文研究重点是对不同送回风方案进行分析检验,忽略活塞风对车站带来的影响。



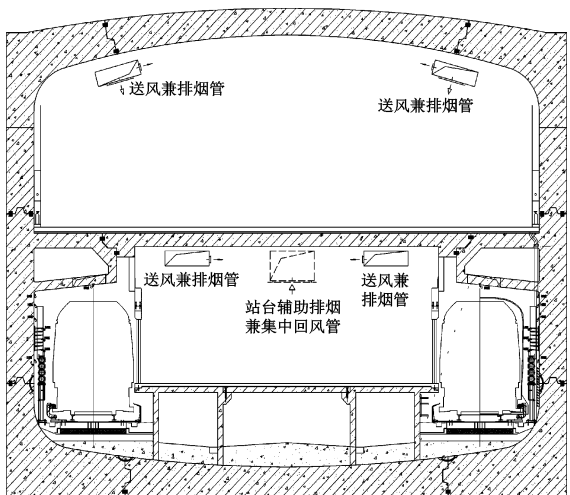
a) 原方案通风空调系统原理图



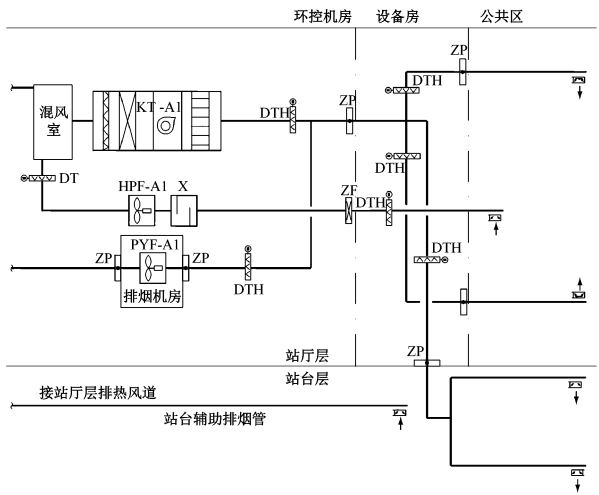
b) 原方案车站标准断面图



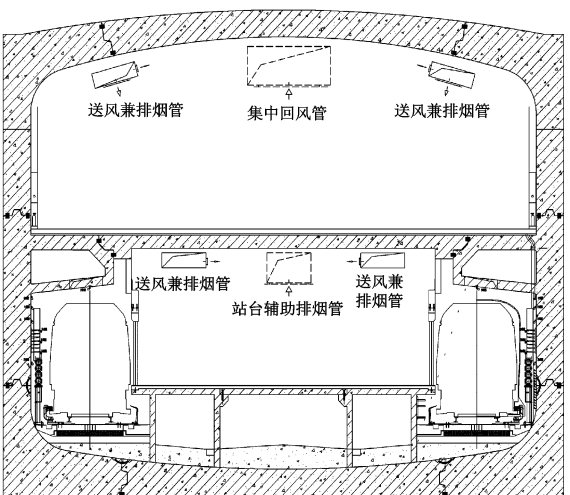
c) 方案一(风口单独设置在站台)通风空调系统原理图



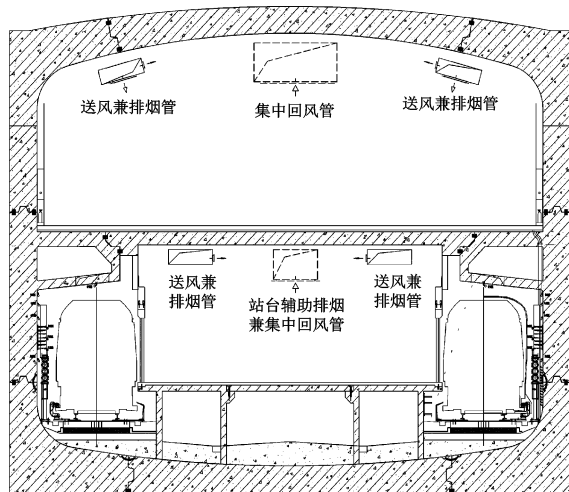
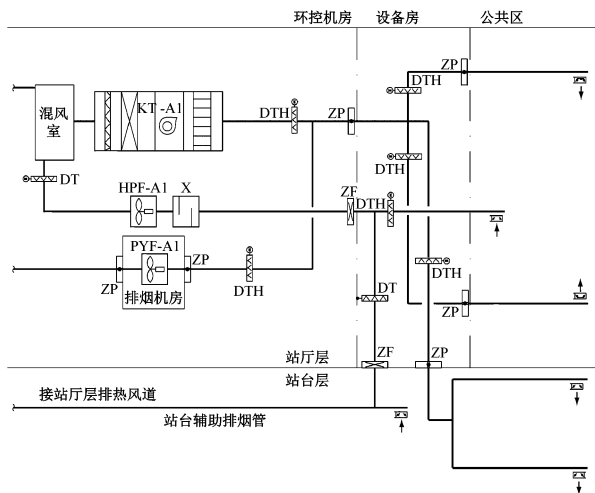
d) 方案一(风口单独设置在站台)车站标准断面图



e) 方案二(风口单独设置在站厅)通风空调系统原理图



f) 方案二(风口单独设置在站厅)车站标准断面图



g) 方案三(风口设置在站厅和站台)通风空调系统原理图

h) 方案三(风口设置在站厅和站台)车站标准断面图

注:KT-A1—组合式空调机组;HPF-A1—回排风机;PYF-A1—排烟风机;ZP—280℃防火阀;ST—手动风阀;STH—耐高温手动风阀;ZF—70℃防火阀;DT—电动风阀;X为消声器;DTH—耐高温电动风阀。

图 1 不同方案下车站公共区通风空调系统原理图及标准断面图

Fig. 1 Schematic diagrams and standard section drawings of the ventilation and air conditioning system in the station public area under different schemes

表 2 各方案设备参数设置表

Tab. 2 Equipment parameter settings of each scheme

设备名称	数量/台	原方案	集中回风方案(方案一—方案三)
组合式空调机组	2	$C_L = 325 \text{ kW}$, $Q = 63\,000 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_{k,1} = 430 \text{ Pa}$, $H_{k,2} = 360 \text{ Pa}$	$C_L = 325 \text{ kW}$, $Q = 63\,000 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_{k,1} = 480 \text{ Pa}$, $H_{k,2} = 410 \text{ Pa}$
回风机	2	$Q = 53\,600 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_{h,1} = 370 \text{ Pa}$, $H_{h,2} = 350 \text{ Pa}$	$Q = 53\,600 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_{h,1} = 410 \text{ Pa}$, $H_{h,2} = 300 \text{ Pa}$
排烟风机	2	$Q = 66\,000 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_{p,1} = 730 \text{ Pa}$, $H_{p,2} = 710 \text{ Pa}$	$Q = 66\,000 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_{p,1} = 800 \text{ Pa}$, $H_{p,2} = 770 \text{ Pa}$

注: C_L 为冷量; Q 为风量; H 为不同设备的全压。

3.1.2 负荷边界条件

车站公共区空调负荷主要由人员负荷、设备负荷、照明负荷及广告牌负荷、站台门传热负荷等组成。根据实际工程中车站公共区各项热源的空间分布情况,其空调负荷及其简化方式如表 3 所示。

表 3 车站公共区空调负荷及其简化方式

Tab. 3 Air conditioning load in the station public area and its simplification method

负荷类型	负荷/kW	简化方式
人员	92.03	按实际位置布置
设备	19.80	按实际位置布置
照明	58.80	均匀布置
广告牌	16.92	按实际位置布置
站台门传热	40.00(站厅), 80.00(站台)	均匀布置

将车站四周的壁温简化为第一类边界条件,设定侧墙及顶板的温度均为 26.3℃。

3.1.3 风口边界条件

将送风温度设置为 20℃,即站厅和站台送风温

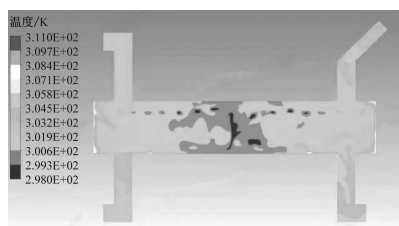
差分别为 10℃和 8℃,风口均采用单层百叶风口。

为兼顾计算精确性及计算负荷,将送、回风口网格尺寸确定为 0.03 m,其他计算域网格尺寸 0.25 m,采用多面体网格,最终确定全计算域网格数量为 817 115 个。

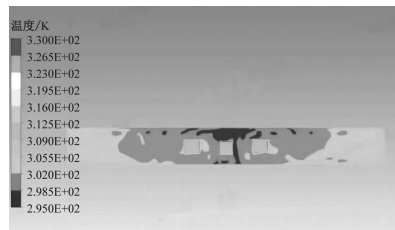
3.2 模拟分析

通过 CFD 技术,对四种方案下车站公共区的温度场和速度场进行模拟研究和气流组织评价。不同方案下站厅与站台气流温度场分布云图如图 2 所示。不同方案下站厅与站台气流速度场分布云图如图 3 所示。

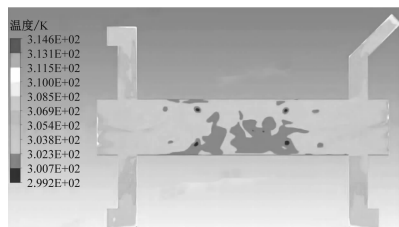
如图 2 所述,原方案站厅与站台通过楼梯口进行气流交换,气流充分混合,未出现明显的温度梯度;站厅与站台温度呈现出两端高、中间低的趋势,究其原因因为站厅两端连接出入口,受热扰动影响较大,站台两端为低速风或无风区域,极不利于对流换热;站厅风口的布置不均,导致送、回风两侧温度不均,乘客从不同的出入口进入站厅时,会产



a) 原方案站厅气流温度场分布云图(距离中板 1.65 m)



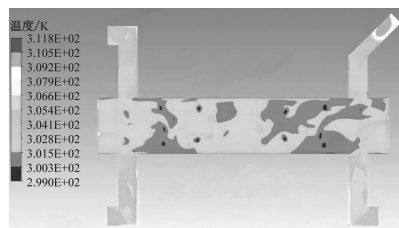
b) 原方案站台气流温度场分布云图(距离中板 1.65 m)



c) 方案一站厅气流温度场分布云图(距离中板 1.65 m)



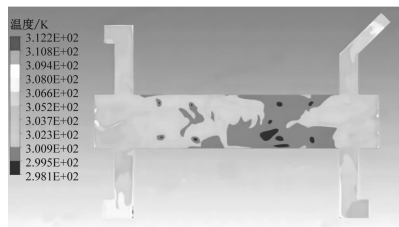
d) 方案一站台气流温度场分布云图(距离中板 1.65 m)



e) 方案二站厅气流温度场分布云图(距离中板 1.65 m)



f) 方案二站台气流温度场分布云图(距离底板 1.65 m)



g) 方案三站厅气流温度场分布云图(距离中板 1.65 m)



h) 方案三站台气流温度场分布云图(距离中板 1.65 m)

图 2 不同方案下站厅与站台气流温度场分布云图

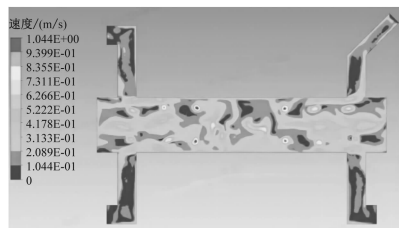
Fig. 2 Cloud diagram of airflow temperature field distribution in the station hall and on the platform under different schemes



a) 原方案站厅气流速度场分布云图(距离中板 1.65 m)



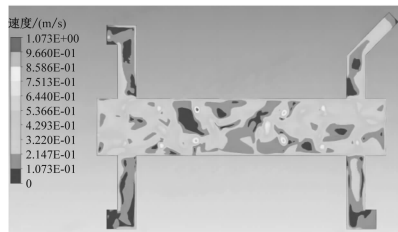
b) 原方案站台气流速度场分布云图(距离中板 1.65 m)



c) 方案一站厅气流速度场分布云图(距离中板 1.65 m)



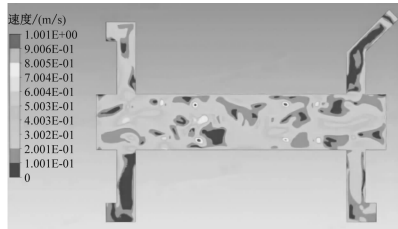
d) 方案一站台气流速度场分布云图(距离中板 1.65 m)



e) 方案二站厅气流速度场分布云图(距离中板 1.65 m)



f) 方案二站台气流速度场分布云图(距离中板 1.65 m)



g) 方案三站厅气流速度场分布云图(距离中板 1.65 m)



h) 方案三站台气流速度场分布云图(距离中板 1.65 m)

图3 不同方案下站厅与站台气流速度场分布云图

Fig. 3 Cloud diagram of velocity field distribution in the station hall and on the platform under different schemes

生较为显著的冷热不均感,站台也出现了类似的情况。如图3所述,原方案下车站公共区部分区域风速高达 2 m/s,吹风感强烈。根据 GB/T 18883—2022《室内空气质量标准》,该方案设计风速超标。

方案一中站厅的送风通过楼梯口到达站台集中回风口,部分冷量未充分在站厅利用就被带至站台,导致温度上升,但由于该模拟考虑的是夏季最不利工况,故整体而言,公共区温度仍满足设计要求;站台设集中回风口,站台空气充分换热,保证了气流均匀性,大部分区域空气流速均在 0.5 m/s 以下,满足设计要求。

方案二中集中回风口设置在站厅,站厅区域对流旺盛;站台温度场呈现极度不均的现象,送风未覆盖站台两端就已通过楼梯口进入站厅的集中回风口,站台两端空气温度过高,在实际工程应用中,需优先选择将集中回风口设置在其他区域。

方案三中送风口布置均匀,整个车站流场均匀性好,未出现温度过低或过高的区域;风速均处在 0.5 m/s 以下,吹风感较弱,乘客会有较好的舒适感。整体而言,该方案下气流的温度场及速度场均均匀,各项参数也均满足设计要求。

3.3 气流组织评价

温度不均匀系数和速度不均匀系数都是评价气流组织的重要指标。利用上述方案中工作区的测点,测得各测点的温度或速度(采用 t 表示),求其不均匀系数 k_t :

$$k_t = \frac{\delta_t}{\bar{t}} \quad (1)$$

式中:

δ_t ——测点的温度或速度均方根偏差;

\bar{t} ——测点的温度或速度算术平均值。

图4为不同方案下站台高 1.65 m 时人员活动区典型测点气流温度和速度分布图。经过计算得出:各方案下站厅气流温度不均匀系数分别为 0.078、0.034、0.024、0.031,站厅气流速度不均匀系数分别为 0.549、0.437、0.432、0.428,站台气流温度不均匀系数分别为 0.105、0.074、0.113、0.081,站台气流速度不均匀系数分别为 0.901、0.526、0.640、0.536。

从上述模拟分析可知,方案一与方案三均能达到较好的气流组织分布。通过不均匀系数的分析对比得知:在气流组织方面,方案一—方案三优于原方案,且方案一>方案三>方案二>原方案。其中:方案一中站台的气流组织效果优于方案三,站厅的气流组织效果劣于方案三。深圳市各条地铁线路的初近期规划中,行车间隔均 ≥ 2 min;仅在远期规划中,会考虑将行车间隔增大到 30 对/h 以上。在实际运行过程中,受折返能力等的限制,目前深圳市所有地铁线路的工作日高峰行车间隔均大于 2 min,表明乘客在站台停留时间远大于站厅停留时间,因此站台气流组织优劣的权重大于站厅。综合以上因素,考虑选择方案一,将集中回风口单独设置在站台,适当加强站台空气对流换热,也有助于实现从室外到列车的温度梯度变化。

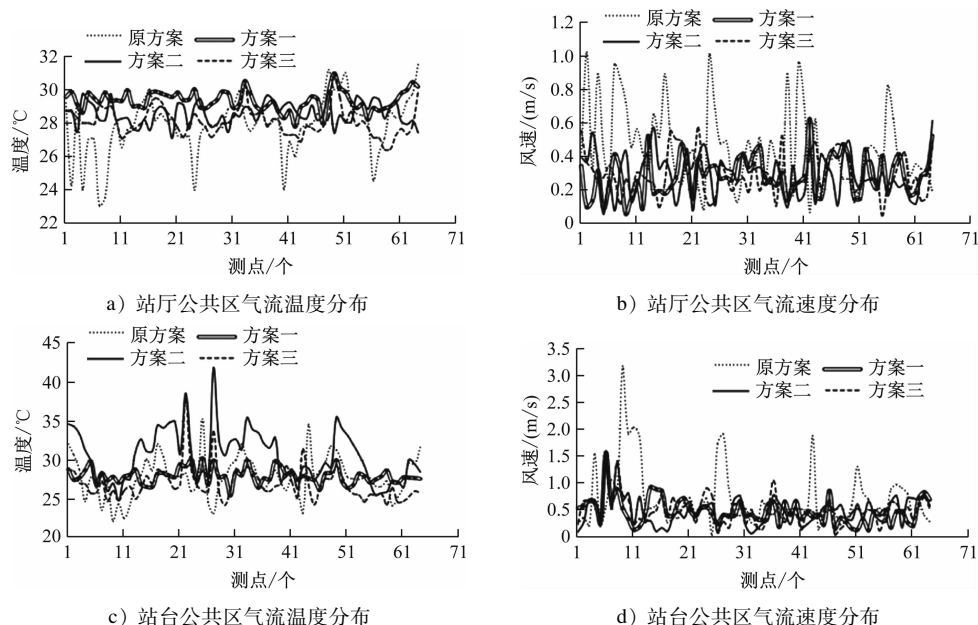


图4 不同方案下站厅和站台公共区气流速度和温度分布图

Fig. 4 Airflow speed and temperature distribution diagram in the public area of the station hall and platform under different schemes

3.4 方案优化后通风空调系统要求

由本文可知,优化后方案为集中回风,集中回风口单独设置在站台上,公共区空调系统送风兼作排烟功能,该设置对系统设计、调试,以及管材选择等方面有更高的要求,主要体现在:

1) 空调管道采用复合风管材质,防排烟管道采用耐火风管材质,根据位置的不同有不同的耐火极限要求。送风与排烟兼用时,管材选择上需兼顾耐火性能和保温性能。

2) 风口在不同工况下需进行送风排烟切换,可将风口设置为单层百叶风口,将风口间隔分设在管道侧部和下部,应具备良好的调节性能。

3) 送风与排烟兼用时,导致排烟风机与组合式空调机组串联,组合式空调机组与大系统回风机相比,价格更为昂贵,在火灾工况下需对其进行保护;此方案切换阀门增多,为满足系统切换要求,需对切换阀门的切换时间及密闭性提高要求。耐高温电动风量调节阀对密闭性要求较低,可在系统切换阀处加设自动排烟防火阀,此类阀门在一定时间内能满足漏烟量和耐火完整性要求,既能保护空调机组,也能提高密闭性要求。

4) 选择将集中回风口单独设置在站台时,会出现部分冷量从站厅带到站台的现象,在设计时需将这部分冷量考虑入内,对站厅、站台的送风配比进

行适当调整,以更好地满足设计要求。

4 方案优化结果及经济性比选

目前深圳地铁线路车站站台公共区辅助排烟采用TEF(排热风机)辅助排烟的方式,具体表现为站台两端设置辅助排烟管接入轨顶风道。为进一步优化上述管线排布方案,本文将集中回风管并入TEF辅助排烟管,利用耐高温电动风阀进行平常和火灾工况切换,平常工况下为集中回风模式,火灾工况下切换为TEF辅助排烟模式。根据上述描述,方案优化前后公共区管线尺寸及系统切换模式,见表4。

方案优化前后经济性对比,见表5。由表5可见:与原方案相比,优化方案可以节省复合风管工程量约1580 m²,增加耐火风管工程量约495 m²,在经济性方面有较大的提升。

5 结论

1) 集中回风模式可有效应用于地铁车站工程中,它能为同类型建筑结构的地铁车站,无论是拟建还是改扩建项目,在公共区气流组织的设计和环控系统方面提供有益的指导和借鉴。

2) 将集中回风模式应用在地铁车站工程时,应避免将集中回风口单独设置在站厅。对于该类布

表 4 方案优化前后车站公共区管线尺寸及系统切换模式

Tab. 4 Pipeline size and system switching mode in the station public area before and after scheme optimization

方案	公共区管线 数量/段	公共区管线尺寸/ (mm × mm)	公共区空调系统 切换阀门数量/个	切换模式
原方案	2	2 000 × 800	8	送风系统需单独设置, 回风与排烟共用路由
优化方案	2	1 600 × 500	10	回风系统需单独设置, 送风与排烟共用路由

注:公共区管线尺寸为长度 × 宽度。

表 5 方案优化前后经济性对比

Tab. 5 Economic comparison before and after scheme optimization

方案	复合风管工程量/m ²	耐火风管工程量/m ²
原方案	2 540	2 065
优化方案	960	2 560

置形式而言,站台公共区的气流组织分布性较差。

3) 将集中回风口单独设置在站台两端可有效优化气流组织,并减少公共区风管数量及尺寸。由于其方案的特殊性,在实际工程应用中,站台的空气需经站厅的回风以及站台的送风进行二次混合,故需将站厅、站台的送风配比进行适当调整,同时也需在系统调试、阀件材料及管材选型等方面提出更高要求。

参考文献

- [1] 赵红英,徐洪涛,胡观兴. 地铁站台公共区空调系统气流组织与热舒适性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(8): 98.
ZHAO Hongying, XU Hongtao, HU Guanxing. Airflow pattern and thermal comfort in the public area of subway platform[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(8): 98.
- [2] 唐易达,韩书琪,杨银灿. 基于低温送风的地铁站厅气流组织特性[J]. 西南科技大学学报, 2022, 37(4): 28.
TANG Yida, HAN Shuqi, YANG Yincan. Air distribution performance based on cold air distribution in subway station hall[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2022, 37(4): 28.

- [3] 刘凯凯. 地铁地下车站公共区卫生间通风气流组织优化研究[J]. 暖通空调, 2023, 53(12): 149.
LIU Kaikai. Optimization of ventilation air distribution of toilets in public areas of subway underground stations[J]. Heating Ventilation & Air Conditioning, 2023, 53(12): 149.
- [4] 沈凯,吴喜平,宋洁,等. 某地铁站厅不同送回风方式的气流组织数值模拟和分析[J]. 制冷技术, 2010, 30(1): 28.
SHEN Kai, WU Xiping, SONG Jie, et al. Numerical simulation and analysis of air distribution in subway station AC systems[J]. Refrigeration Technology, 2010, 30(1): 28.
- [5] 伍钊,余超,徐任泽,等. 基于病毒传播风险的地铁车厢通风系统优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(6): 2241.
WU Fan, YU Chao, XU Renze, et al. Optimization study of subway carriage ventilation systems based on virus transmission risk[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(6): 2241.
- [6] 苏志,李芄. 常州某会展中心空调系统方案模拟分析[J]. 洁净与空调技术, 2013(3): 1.
SU Zhi, LI Peng. CFD simulation of air conditioning system for an exhibition center at Changzhou[J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2013(3): 1.

· 收稿日期:2022-07-29 修回日期:2022-12-05 出版日期:2025-01-10
Received:2022-07-29 Revised:2022-12-05 Published:2025-01-10
· 第一作者:冯绕,工程师,fengrao@dtsjy.com
通信作者:罗燕萍,正高级工程师,luoyanping@dtsjy.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 174 页)

- LI Gang, LI Jianping, SUN Xiaolei, et al. Research on a combined method of subjective-objective weighing and the its rationality[J]. Management Review, 2017, 29(12): 17.
- [8] 王永菲,王成国. 响应面法的理论与应用[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2005, 14(3): 236.
WANG Yongfei, WANG Chengguo. The application of response surface methodology[J]. Journal of the Central University for Na-

tionalities (Natural Science Edition), 2005, 14(3): 236.

· 收稿日期:2022-08-18 修回日期:2022-09-14 出版日期:2025-01-10
Received:2022-08-18 Revised:2022-09-14 Published:2025-01-10
· 通信作者:吕嘉杰,助理工程师,jiajielyu@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license