

文章编号: 1671-6612 (2024) 05-629-07

地铁站台公共区弥散送风系统结构参数研究

邓保顺¹ 何磊¹ 余涛² 邱澄²

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司 西安 710043;

2. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 地铁站台公共区弥散送风系统(DASS)可以提供舒适的热环境,其结构设计参数会影响DASS送风效果。采用数值模拟方法,研究不同弥散送风板开口率、送风口数量、静压室高度以及下部空间高度等结构参数对站台公共区DASS送风效果的影响。结果表明:站台公共区气流分布均匀性和人员热舒适性随弥散送风板开口率和送风口数量的增加而增加;静压室高度在1.1m左右时的送风效果最好;下部空间高度越高,气流分布越均匀,但冷风感越强,综合初投资和系统送风效果,下部空间最优高度为3m。

【关键词】 地铁站台公共区; 弥散送风系统; 结构参数; 送风效果; 数值模拟
中图分类号 TU831.1 文献标志码 A

Research on Structural Parameters of Diffuse Air Supply System in Public Areas of Subway Platforms

Deng Baoshun¹ He Lei¹ Yu Tao² Qiu Cheng²

(1.China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd, Xi'an, 710043;

2.School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 The diffuse air supply system (DASS) in the subway platform public area can provide a comfortable thermal environment, and the structural parameters influence the ventilation effect of DASS. This paper adopts the method of numerical simulation to study the effects of different factors such as the opening ratio of diffuse air supply panel, the number of air supply outlet, the height of plenum and the height of lower space on the ventilation effect of DASS in the platform public areas. The results show that both the uniformity of airflow distribution and the thermal comfort in the platform public area increase with the opening ratio of diffuse air supply panel and the number of air supply outlet. The case with the plenum height of 1.1 m has the best ventilation effect. The higher height of the lower space makes more uniform airflow distribution, while the draught increases. Considering the initial investment and system ventilation effect, the optimal height of the lower space is 3m.

【Keywords】 Subway platform public areas; Diffuse air supply system; Structural parameter; Ventilation effect; Numerical simulation

0 引言

截止到2022年底,中国内地城市轨道交通运营里程达到10291.96km^[1],其中地铁与市域快轨长度为9236.21km,占比89.7%。地铁是城市轨道交通最具代表性的一种方式,地铁通风空调系统主要

对车站公共区热环境进行控制,为乘客提供舒适的乘车环境。地铁车站通风空调常采用全空气系统,风管面积大、输送距离远、末端风口风速高,造成通风空调系统能耗高,其运行能耗占地铁总能耗的1/3~1/2,仅次于列车牵引能耗^[2-4]。此外,地铁车

作者简介:邓保顺(1970-),男,教授级高级工程师,E-mail: dbsxjy@126.com

通讯作者:何磊(1987-),男,博士,高级工程师,E-mail: swjtuhl822@126.com

收稿日期:2024-03-16

站不当的运行管理导致夏季地铁站内温度偏低^[5,6]，站内热舒适性差。

为了在高动量送风条件下提高室内热舒适和空气品质并且降低能耗，一种新型的送风系统—弥散送风系统（Diffuse Air Supply System，简称 DASS）在丹麦等欧洲国家逐渐兴起，其能处理较大负荷以及在大温差送风条件下能够提供良好的室内热舒适和空气品质^[7]。DASS 由下部房间、弥散送风板和静压室（楼板与弥散送风板之间的空间）三部分组成，如图 1 所示。DASS 使用多孔弥散送风板和两板之间的间隙作为送风口，弥散送风板和楼板间的空间作为均压均流的静压室。新鲜空气进入静压室内充分混合，由于静压室和下部房间存在压差，新鲜空气就会穿过弥散送风板进入室内，与室内空气进行热湿交换。弥散送风板面积大，送风进入室内后速度较低，室内气流由热源主导，人员不会有强烈的冷吹风感。目前，DASS 已被应用在学校和办公室等人员集中、通风要求高的场合^[8]。

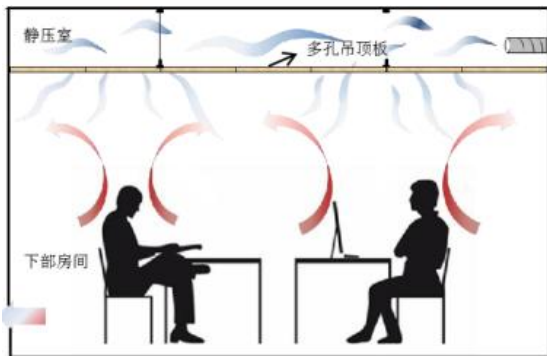


图 1 弥散送风系统示意图^[9]

Fig.1 Schematic diagram of diffuse air supply system^[9]

地铁客流量大，站台公共区客流集中，送风末端适合采用 DASS。本文基于成都某地铁站台公共区 DASS 结构布置，采用 CFD 数值模拟计算方法，分析了 DASS 不同结构参数对站台公共区通风效果的影响，得出站台公共区 DASS 最优结构设计参数。论文结果可为地铁站台公共区 DASS 工程设计提供技术参考，有助于地铁车站节能与舒适环境的营造。

1 数值计算模型及参数设定

为了研究站台公共区 DASS 不同结构参数对送风效果的影响，分别建立了不同结构参数下的三维数值计算模型。

1.1 站台公共区 DASS 数值计算模型

本文以成都某地铁站台公共区为例，建立三维数值计算模型，该站台公共区长 180m、宽 12m、高 4.65m。实际站台结构较为复杂，对物理模型作如下简化：

(1) 站台公共区沿长度方向对称，取一半公共区进行建模，并规定 x 轴、 y 轴、 z 轴分别为沿行车、宽度和高度方向，模型具体尺寸为 90m (x) \times 12m (y) \times 4.65m (z)；

(2) 因乘客候车位置的不确定性、高峰时段乘客等待时的间距小，对人员模型进行简化，将屏蔽门附近的乘客合并为一个长方体且均匀分布在距屏蔽门 0.5m 的位置^[10]；

(3) 忽略静压室中管线对送风的影响，以及挡烟垂壁对气流流动的影响；

(4) 简化送、回风口，将方形散流器简化为相同面积的平面，送风口 18 个、尺寸为 0.8m \times 0.5m，回风口 9 个、尺寸为 0.8m \times 0.8m；

(5) 设备管理用房与站台公共区的温差小，忽略它们之间的传热。

简化后的站台公共区 DASS 模型如图 2 所示。

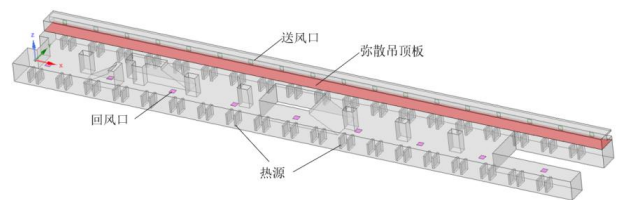


图 2 站台公共区 DASS 布置示意图

Fig.2 Layout of DASS in the platform public area

对数值模型做如下假设：（1）站台公共区空气为不可压缩、常物性气体；（2）考虑重力因素，采用 Boussinesq 密度假设，在该假设下，温度为密度差的唯一影响因素；（3）忽略由流体黏性力做功引起的耗散热；（4）忽略人体与各壁面之间的辐射换热；（5）不考虑屏蔽门漏风以及扶梯漏风的影响，以及站厅与站台间的传热。

1.2 边界条件设置

远期晚高峰时站台公共区各部分负荷如表 1 所示。总冷负荷为 147.5kW，面积指标为 149.8W/m²。乘客散热量按热流密度平均分配到人体模型表面，照明和广告灯箱负荷平均到吊顶上，通信、导向设备负荷平均到柱子上，屏蔽门负荷平均到屏蔽门上^[10]。考虑稳态模拟，站台设计温度为

28℃, 送风温度为 19℃, 计算得到总送风量为 48289m³/h, 送风口和回风口分别为速度入口和压力出口边界条件。

表 1 一半站台公共区的负荷

负荷类型	负荷 (kW)
人员	46.2
照明	19.7
广告灯箱	10.2
自动扶梯	3.4
垂直电梯	1.6
通信、导向设备	9.0
屏蔽门	57.5
总冷负荷	147.5

1.3 网格划分

采用六面体结构化网格, 在确定最优网格数量前, 开展了网格无关性分析, 分别对比了 1275 万、1728 万和 2691 万网格数量下的室内温度和风速分布结果。在满足计算精度的基础上, 为提高计算速度, 选择 1728 万网格系统作为后续数值模拟的网格模型。此时, x 方向和 y 方向上靠近墙壁处网格尺寸均为 0.015m、热源附近为 0.01m, z 方向上靠近墙壁处网格尺寸为 0.05m、热源附近为 0.002m。

1.4 评价指标

为了评价 DASS 送风效果, 在乘客附近不同高度平面 (0.5m、1.0m、1.7m、2m) 均匀布置测点, 记录各点的温度和风速, 如图 3 所示。

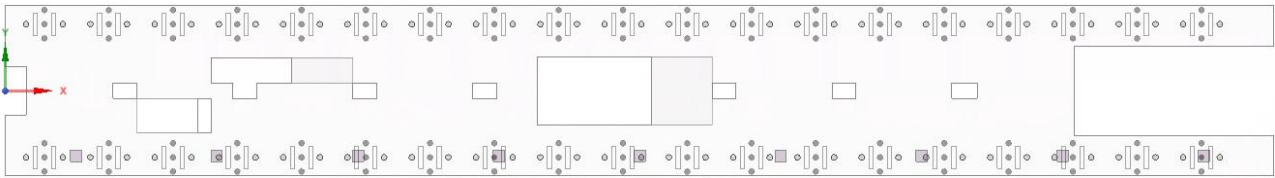


图 3 人员热舒适性测点布置图

Fig.3 Layout of measurement points for personnel thermal comfort

采用人员活动区温度、风速、通风效率、局部吹风不满意率和相对热指标等对不同结构参数下 DASS 送风效果进行评价。

(1) 温度与风速分布

站台公共区的热舒适性应满足如下条件^[11-13]:

- 1) 人员活动区内温差 $\Delta t \leq 3^\circ\text{C}$;
- 2) 人员活动区内最低设计温度 $t_{min} \geq 20^\circ\text{C}$;
- 3) 人员呼吸区最高温度 $\leq 29^\circ\text{C}$;
- 4) 人员活动区允许流速 $\leq 0.5\text{m/s}$ 。

(2) 通风效率

通风效率是指通风系统排除室内余热的能力, 采用式 (1) 计算^[14]:

$$E_T = \frac{t_p - t_s}{t_n - t_s} \quad (1)$$

式中: t_p 、 t_n 、 t_s 分别为室内排风温度、工作区空气平均温度和通风系统送风温度, $^\circ\text{C}$ 。

(3) 局部吹风不满意率

局部吹风不满意率 DR 是评价局部热舒适的重要指标, 体现了热舒适环境中局部吹风感对人体产

生的不舒适感, 该值应小于 20%^[15], 采用式 (2) 计算:

$$DR = (34 - t_i)(v_i - 0.05)^{0.62} (3.14 + 0.37v_i Tu_i) \quad (2)$$

式中: t_i 为人员活动区某点的空气温度, $^\circ\text{C}$; v_i 为该点的空气流速, m/s ; Tu_i 为该点的湍流强度, %。

(4) 相对热指标

美国运输部在地铁中提出采用相对热舒适指标 (Relative Warmth Index, RWI) 评价站台公共区短暂停留的候车环境^[16,17]。 RWI 值表达了人员处于较温暖环境下的热感觉状况, 其值为 0、0.08、0.15 和 0.25, 分别代表热感觉为微凉、舒适、微暖和暖。 RWI 由式 (3) 和 (4) 计算。

$$RWI = \frac{M(\tau)[I_{cw}(\tau) + I_a] + 6.42(t - 35) + RI_a}{234} \quad (3)$$

$$P_a \leq 2269 \text{ Pa} \quad (3)$$

$$RWI = \frac{M(\tau)[I_{cw} + I_a] + 6.42(t - 35) + RI_a}{65.2(5858.44 - P_a)/1000}$$

$$P_a > 2269 \text{ Pa} \quad (4)$$

式中: $M(\tau)$ 为新陈代谢率, 取 123W/m^2 ;

$I_{cw}(\tau)$ 为服装热阻, 取 0.4clo; I_a 为空气边界层热阻, 取 0.35clo; t 为干球温度, $^{\circ}\text{C}$; R 为人体接受的平均辐射, W/m^2 ; P_a 为水蒸气分压力, Pa。

因站台公共区的面积大, 布置的测点数量多, 分析站台公共区温度、速度时采用平面平均值, 评价人员热舒适时采用所有测点的平均值。

2 结果分析

分析送风系统相关影响因素时, 结构参数是必需考虑的。本节将在基准工况的基础上, 讨论不同弥散送风板开口率、送风口数量、静压室高度、下部空间高度等因素对站台公共区送风效果的影响, 影响因素取值如表 2 所示。

表 2 影响因素取值表

Table 2 Values of influencing factors

影响因素	基准工况参数					取值范围
弥散送风板开口率/%	100	20	40	60	80	80
送风口数量/个	18	6	10	15	24	24
静压室高度/m	1.1	0.6	1.6	2.1	2.6	2.6
下部空间高度/m	3	2.5	3.5	4.0	4.5	4.5

2.1 弥散送风板开口率对 DASS 送风效果的影响
送风板开口率是指有开孔的板 (弥散吊顶板) 占吊顶板的比例, 图 2 中给出了吊顶板所布置区域, 并且此处开口率为 100%。开口率影响送风气

流的均匀性, 从而影响 DASS 送风效果。以吊顶板全开孔为基准工况 (开口率 100%), 开口率分别取 20%、40%、60%、80% 和 100%, 不同开口率的模型示意如图 4 所示。

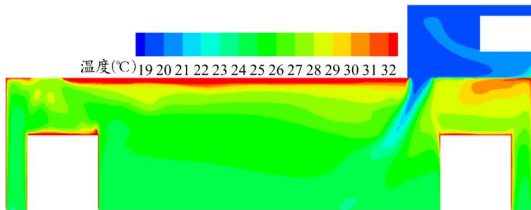


图 4 不同弥散送风板开口率的模型示意图

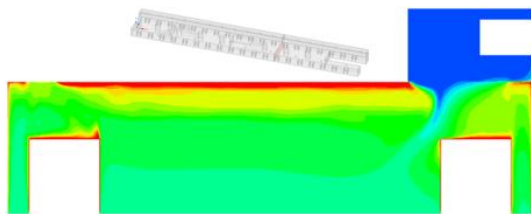
Fig.4 Schematic diagram of different opening ratios of the diffuse air supply panel

由图 5 可见, 送风板开口率 20% 时, 未开孔的送风板下方聚集较多热量, 空气温度更高。送风射

流与热羽流形成的混合气流在站台内横向流动至回风口一侧, 在有扶梯或楼梯阻挡时, 20%开口率下的混合气流会沿扶梯或楼梯壁面向下, 在地面附近形成较大的局部速度, 如图 6、图 7 所示。而送风板开口率较大时, 气流混合更均匀, 在地面附近引起的空气速度小。



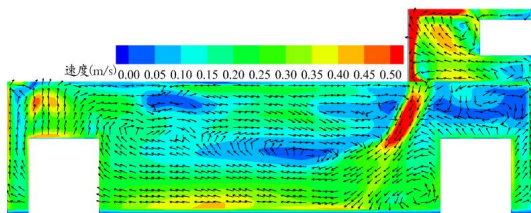
(a) 20%弥散送风板开口率



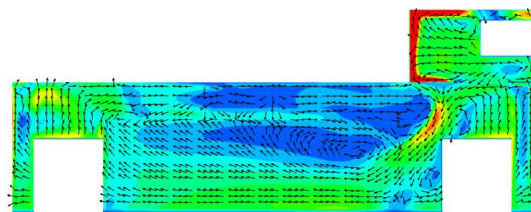
(b) 80%弥散送风板开口率

图 5 $x=56.7\text{m}$ 平面温度分布图

Fig.5 Temperature distribution at the section of $x=56.7\text{m}$



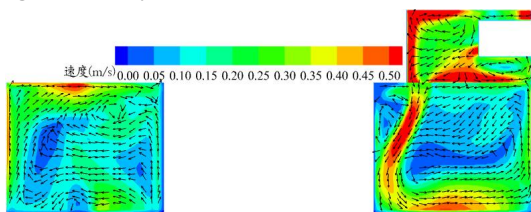
(a) 20%弥散送风板开口率



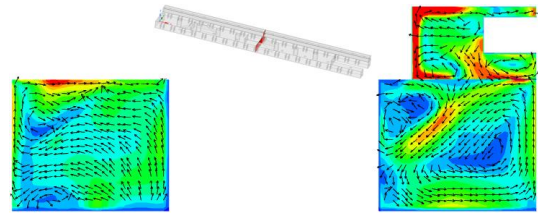
(b) 80%弥散送风板开口率

图 6 $x=56.7\text{m}$ 平面速度分布图

Fig.6 Velocity distribution at the section of $x=56.7\text{m}$



(a) 20%弥散送风板开口率



(b) 80%弥散送风板开口率

图 7 $x=44\text{m}$ 平面速度分布图

Fig.7 Velocity distribution at the section of $x=44\text{m}$

图 8 为不同送风板开口率下人员头部和脚踝平面 DR 大于 20% 的测点占比。头部平面 DR 大于 20% 的测点数占比小, 说明头部平面的局部热舒适性好。脚踝平面的测点占比随送风板开口率的增加逐渐降低, 通风效果逐渐变好, 主要是由于送风板开口率增加后, 送风更均匀, 冷热气流均匀混合使冷风感降低。

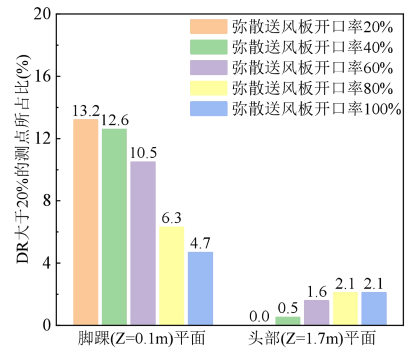


图 8 不同开口率下人员头部和脚踝平面内 DR 大于 20% 的测点占比

Fig.8 Proportion of measurement points with DR greater than 20% in the plane of the head and ankle under different opening ratios

由表 3 可知, 不同开口率下, 通风效率均在 1.6 左右, 说明 DASS 的通风排热效果较好。因送风侧温度低, 送风侧 RWI 值比回风口稍低。整体来看, 各评价指标变化不明显。

表 3 不同开口率下的评价指标值

Table 3 Evaluation index values under different opening ratios

送风板开口率/ (%)	20	40	60	80	100
E_T	1.55	1.62	1.62	1.60	1.56
送风侧 RWI	0.11	0.11	0.10	0.11	0.11
回风侧 RWI	0.13	0.12	0.12	0.12	0.13

综上所述, 从 DASS 的气流流动、局部热舒适和通风效率来看, 送风板开口率越大, 其效果越好。

2.2 送风口数量对 DASS 送风效果的影响

送风口数量越多，静压室内的气流越均匀，但对系统能耗和初投资影响越大。保持每个送风口的面积不变，送风口数量再分别取 6 个、10 个、15 个以及 24 个，送风板开口率为 100%，分析送风口数量对 DASS 送风效果的影响。

图 9 中人员脚踝和头部平面的 DR 大于 20% 测点占比均随送风口数量增加而逐渐降低，说明风口数量越多，送风气流与热羽流混合越均匀，冷风感越低，通风效果越好。

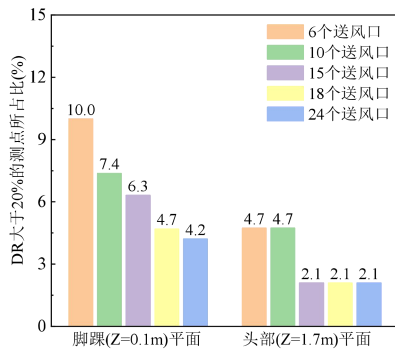


图 9 不同送风口数量下人员头部和脚踝平面内 DR 大于 20% 的测点占比

Fig.9 Proportion of measurement points with DR greater than 20% in the plane of the head and ankle under different air supply number

由表 4 可知，5 个工况的通风效率均大于 1，但随送风口数量的增加，通风效率略有降低。在风口增加到 10 个后，送风侧和回风侧 RWI 基本保持不变。

表 4 不同送风口数量的评价指标值

Table 4 Evaluation index values under different air supply number

送风口数量/(个)	6	10	15	18	24
E_T	1.60	1.58	1.56	1.56	1.55
送风侧 RWI	0.09	0.11	0.11	0.11	0.11
回风侧 RWI	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13

综上所述，站台公共区 DASS 可以适当减小送风口数量，将送风口数量控制在 10~18 个范围内。

2.3 静压室高度对 DASS 送风效果的影响

静压室高度分别取 0.6m、1.1m、1.6m、2.1m 和 2.6m，送风板开口率为 100%，送风口数量为 18 个，研究静压室高度对 DASS 送风效果的影响。

图 10 中，静压室高度为 0.6m 时，人员头部和脚踝平面 DR 大于 20% 的测点占比为 13.7%，高于其他静压室高度的值，静压室高度在 1.1m~2.6m 范围内时，测点占比变化不明显。

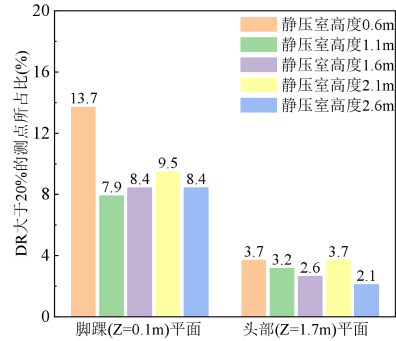


图 10 不同静压室高度下人员头部和脚踝平面内 DR 大于 20% 的测点占比

Fig.10 Proportion of measurement points with DR greater than 20% in the plane of the head and ankle under different air plenum heights

由表 5 可知，静压室高度在 1.1~2.6m 范围内时，各评价指标变化较小，静压室高度 1.1m 时，通风效率、送风侧和回风侧 RWI 分别为 1.60、0.10 和 0.12，通风效率高，能保证送风在静压室内充分混合，人员热舒适性较好。采用 1.1m 的静压室高度较优，在保证人员热舒适性的同时，又降低了静压室的高度。

表 5 不同静压室高度的评价指标值

Table 5 Evaluation index values under different air plenum heights

静压室高度/(m)	0.6	1.1	1.6	2.1	2.6
E_T	1.62	1.60	1.59	1.57	1.58
送风侧 RWI	0.08	0.10	0.10	0.11	0.10
回风侧 RWI	0.10	0.12	0.12	0.12	0.12

2.4 下部空间高度对 DASS 送风效果的影响

选取下部空间（地板至吊顶板）高度分别为 2.5m、3m、3.5m、4m 和 4.5m，送风板开口率为 100%，送风口数量为 18 个，静压室高度为 1.1m，分析下部空间高度对 DASS 送风效果的影响。

由图 11 可见，下部空间高度增加，垂直温度梯度逐渐减小。高度为 2.5m 时，送风侧人员头部和脚踝温差达到 2.4℃，热舒适性较差；高度为 3m 时，人员头部和脚踝温差达到 1.6℃；高度为 4.5m 时，温差仅为 0.8℃。混合气流向下运动过程中与

热羽流混合, 下部空间高度越高, 混合作用越均匀, 换热更充分, 到达地面附近的空气温度越高, 且温度分层现象减弱。

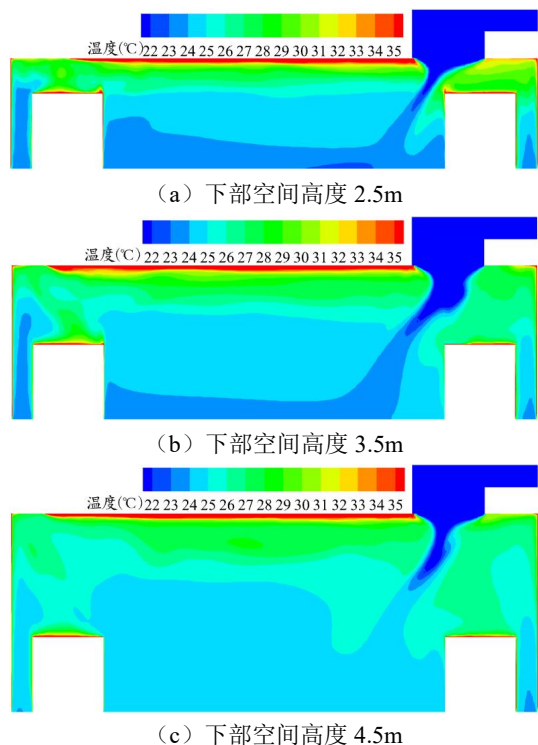


图 11 $x=56.7\text{m}$ 平面温度值

Fig.11 Temperature distribution at the section of $x=56.7\text{m}$

图 12 中脚踝平面 DR 大于 20% 的测点占比随下部空间高度的增加而增加, 头部平面的测点占比随下部空间高度的增加而减小。

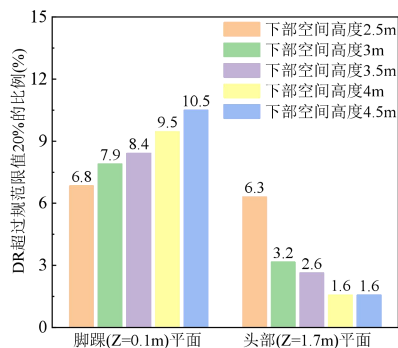


图 12 不同下部空间高度下人员头部和脚踝平面内 DR 大于 20% 的测点占比

Fig.12 Proportion of measurement points with DR greater than 20% in the plane of the head and ankle under different lower space heights

由表 6 可知, 不同下部空间高度的通风效率几乎为常值 1.6。下部空间高度在 3m~4.5m 范围内

变化时, 相对热指标 RWI 保持不变。综合初投资和系统通风效果, 下部空间最优高度为 3m。

表 6 不同下部空间高度的评价指标值

Table 6 Evaluation index values under different lower space heights

下部空间高度/(m)	2.5	3	3.5	4	4.5
E_T	1.60	1.59	1.60	1.61	1.59
送风侧 RWI	0.12	0.10	0.10	0.10	0.10
回风侧 RWI	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12

3 结论

本文采用数值模拟的方法, 对站台公共区 DASS 不同结构参数对送风效果的影响进行研究分析, 得到如下结论:

(1) 弥散送风板开口率会影响送风射流进入站台公共区的均匀性, 进而影响站台公共区送风效果, 开口率越大, 送风效果越好。

(2) 送风口数量会影响站台公共区内的气流均匀性, 热舒适性随送风口数量的增加而增加。

(3) 静压室高 0.6m 时, 冷吹风感最强; 静压室高度在 1.1~2.6m 时, 站台公共区热舒适性评价指标变化不明显; 静压室高度控制在 1.1m 左右时的送风效果最好。

(4) 下部空间高度越高, 气流分布越均匀, 冷风感越强烈, 综合初投资和系统通风效果, 下部空间最优高度为 3m。

参考文献:

- [1] 韩宝明,李亚为,鲁放,等.2021 年世界城市轨道交通运营统计与分析综述[J].都市轨道交通,2022,35(1):5-11.
- [2] 高波,李先庭,韩宗伟,等.地铁通风空调系统节能的新进展[J].暖通空调,2011,41(8):21-26.
- [3] 黄莉,苏子怡,李晓锋.地铁车站公共区域空调能耗影响因素的敏感性分析[J].都市轨道交通,2021,34(6):125-130.
- [4] 曾逸婷,赵蕾.地铁车站环境热舒适与通风空调系统节能策略研究进展[J].铁道标准设计,2019,63(3):178-183.
- [5] 焦焕炎,冯浩东,魏东,等.基于强化学习的地铁站空调系统节能控制[J].控制与决策,2022,37(12):10.
- [6] 仇运.合肥地铁通风空调系统运行研究[D].合肥:合肥工业大学,2018.

- [11] Hu L H, Liu S, Peng W, et al. Experimental study on burning rates of square/rectangular gasoline and methanol pool fires under longitudinal air flow in a wind tunnel[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 169(1-3):972-979.
- [12] Thomas P H. The Movement of Smoke in Horizontal Passages against Air Flow[J]. *Fire Research Technical Paper*, 1968,7(1):1-8.
- [13] Oka Y, Atkinson G T. Control of smoke flow in tunnel fires[J]. *Fire Safety Journal*, 1995,25(4):305-322.
- [14] Wu Y, Bakar M Z A. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems – a study of the critical velocity[J]. *Fire Safety Journal*, 2000,35(4), 363-390.
- [15] Li Y Z, Lei B, Ingason H. Study of critical velocity and back layering length in longitudinally ventilated tunnel fires[J]. *Fire Safety Journal*, 2010(45),361-370.
- [16] Kurioka H, Oka Y, Satoh H, et al. Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels[J]. *Fire Safety Journal*, 2003,38(4):319-340.
- [17] Li Y Z, Lei B, Ingason H. The maximum temperature of buoyancy-driven smoke flow beneath the ceiling in tunnel fires[J]. *Fire Safety Journal*, 2011,46(4):204-210.
- [18] 易亮,杨洋,徐志胜,等.纵向通风公路隧道火灾拱顶烟气最高温度试验研究[J].*燃烧科学与技术*,2011,17(2): 109-114.
- [19] Zhao S, Liu F, Wang F, et al. Experimental studies on fire-induced temperature distribution below ceiling in a longitudinal ventilated metro tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018,72:281-293.
- [20] 单位招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路隧道通风设计细则[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.

(上接第 635 页)

- [7] Tao Y, Per H, BO L, et al. A novel system solution for cooling and ventilation in office buildings: A review of applied technologies and a case study[J]. *Energy & Buildings*, 2015,90.
- [8] Wentao W, Nari Y, Zheming T, et al. Diffuse ceiling ventilation for buildings: A review of fundamental theories and research methodologies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,211(20):1666-1619.
- [9] Rahnama S, Sadeghian P, Peter N, et al. Cooling capacity of diffuse ceiling ventilation system and the impact of heat load and diffuse panel distribution[J]. *Building and Environment*, 2020,185:107290.
- [10] 姜涛.武汉某地铁站台环控系统 CFD 模拟研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
- [11] 曾惜,朱淮东,龙伟月.下送上回气流组织形式在地铁车站站台公共区应用的初步探讨[J].*暖通空调*,2022, 52(S2):72-78.
- [12] 刘卓妹.新型气流组织在地铁车站通风空调系统中的应用分析[J].*暖通空调*,2018,48(9):40-44,62.
- [13] 石盼弟.弥散吊顶通风系统气流相互作用特性研究[D].成都:西南交通大学,2021.
- [14] 赵荣义,范存养,薛殿华,等.空气调节(第三版)[M].北京:中国建筑工业出版社, 1994.
- [15] 陆平.西北严寒地区住宅室内热舒适性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2019.
- [16] US Department of Transportation, Urban Mass Transportation Administration Office of Research and Development. *Subway Environmental Design Handbook*, vol. I: Principles and Applications[M]. 1976.
- [17] 王春,冯炼,刘应清.用相对热指标确定成都地铁环控设计中的温度设计标准[J].*中国铁道科学*,2002,(5): 128-132.