

地铁地下车站轨顶风道排风口参数的优化^{*}

王迪军¹ 贺利工¹ 罗燕萍¹ 许雄文²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州; 2. 华南理工大学电力学院, 510640, 广州//第一作者, 正高级工程师)

摘要 针对地铁地下车站轨顶风道排热效率较低的情况, 提出了轨顶排热效率评价参数, 并通过数值模拟对轨顶流场、温度场及排热效率评价参数进行计算。模拟计算结果表明: 过多的冷风被吸入轨顶风道是排热效率低的主要原因; 提高轨顶风道中的风口排风量及风口尺寸增加均无法有效增加其排热效率; 轨顶热风分布区域较小。由此推论, 排风口参数的优化策略为减小轨顶排风口分布尺寸, 并适当将排风口位置向车头方向移动, 为此可提高排热效率 20%~50%。基于优化策略, 提出了具体的优化方案, 并通过数值模拟验证了优化方案的效果。

关键词 地铁地下车站; 轨顶排风; 排风口参数优化

中图分类号 U231+.5

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.12.037

Parameter Optimization of Rail Top Air Duct Exhaust Outlet in Metro Underground Station

WANG Dijun, HE Ligong, LUO Yanping, XU Xiongwen

Abstract Targeting the situation of low heat exhaust efficiency of metro underground station rail top air duct, evaluation parameters of heat exhaust efficiency are proposed. Through numerical simulation, flow field, temperature field and heat exhaust efficiency of the rail top area are calculated. Simulation calculation results show that too much cold air being inhaled in the rail top air duct is the major reason of low heat exhaust efficiency; increasing the exhaust air volume and air outlet size cannot effectively increase efficiency; the distribution area of rail top hot wind is relatively small. Conclusion is arrived that the distribution size of the rail top air exhaust outlet should be reduced and the position should be moved towards vehicle front appropriately, so that heat exhaust efficiency is increased by 20%~50%. Based on the optimization strategy, specific optimization scheme is formulated, and the effect is verified through numerical simulation.

Key words metro underground station; tunnel rail top exhaust; outlet parameter optimization

First-author's address Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

地铁列车运行频次高, 运营时间长, 能量消耗巨大。根据热力学第一定律和第二定律, 所有输入列车的能量(占地铁运营总能量的 90%^[1])最终都以不同的方式损耗, 并以热的形式释放在地铁隧道中。地铁隧道一般距离地表几米至几十米, 与外界连通能力较差^[2], 故地铁运营时产生的巨大热量难以自然地排出隧道。随着地铁运营时间的增加, 隧道周边土壤温度逐年提升, 隧道空气温度也随之升高, 使得地铁列车冷凝器运行能耗增加, 对地铁运营造成不利影响^[3]。故在地铁地下车站和隧道中设置通风环控系统及时地下车站及将隧道中高温余热排出是必要的^[4]。目前, 地铁地下车站及隧道通风的研究主要集中在自然冷源的利用, 包括水源^[5]、热管设置^[1]和蓄热材料^[6]对排热的削峰填谷作用。

由地铁运行特点可知, 列车在地下车站停站时的车顶活塞风大大减弱, 且风温较高。故设置轨顶排风系统将高温气流排出不仅可高效排热, 还可有效防止列车停站时车辆空调的高温运行。目前, 虽有很多地铁线路采用了这种排热方案, 但运行数据表明, 轨顶的平均排风温度较低, 且排热效率并不高。目前, 尚无文献对此进行研究。

本文通过数值模拟地铁地下车站站台层轨道区轨顶风道的排热流场及温度场, 分析了目前轨顶排风口设置不合理的原因, 并提出有效的优化策略以进行风口参数优化, 从而提高轨顶排风口的排热效率, 为轨顶排风口的设计提供参考。

1 数值计算

1.1 模型简化

本文以广州地铁某地下车站站台停车区作为研

^{*} 国家自然科学基金项目(51976063); 广东省自然科学基金项目(2019A1515011253); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2018MS11)

究对象,主要研究轨顶风道风口设置对列车停站时排热效率的影响。为简化计算量,并保证进口边界的一致性,本研究只对上部(距离站台层轨道区顶部 2.45 m 以内)区域进行模拟计算。模型长度取 10 m,约为半节车厢的长度。模拟流体域范围经过 1 个冷凝器。简化的模拟流体域三维模型如图 1 所示。

在站台层轨顶布置了 3 个矩形风口模型,覆盖于 2 个列车空调冷凝器的正上方。根据实际轨顶风口尺寸参数生成模型,并确定壁面和进出风口等多个边界。站台层轨道区壁面设置为不滑移边界条件,底部设置为滑移边界。模拟过程为稳态模拟,采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。

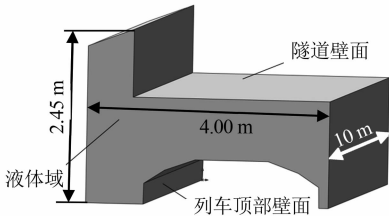


图 1 模拟流体域的三维简化模型

Fig. 1 3D simplified model of simulated fluid domain

1.2 进出口边界条件

为简化计算,将模拟过程的站台层轨道区进口风速和冷凝器出口风的温度均设为定值。由于站台层轨道区进口风速会有所变化,故为考察站台层轨道区进口风速对轨顶排风的影响,本文将不同进风风速定义为 3 组边界条件,如表 1 所示。其他边界条件参数如表 2 所示。此外,为分析轨顶排风口(轨排风口)尺寸、位置以及排风量的影响,本文设置 6 个站台层轨道区轨顶排风口模拟条件,如表 3 所示,其中轨顶排风口前移距离指站台层轨道区进口沿进风流动方向平移设置的距离。

表 1 站台层轨道区进口边界条件

Tab. 1 Boundary conditions of tunnel inlets

边界条件	风速/(m/s)	风量/(m ³ /s)	温度/K
A	2.00	11.01	305
B	3.00	16.60	305
C	4.52	25.00	305

表 2 其他边界条件

Tab. 2 Other boundary conditions

温度/K	冷凝器出风		站台层轨道区 出口压力/ Pa	侧方冷凝器进风	
	风速 /(m/s)	风量 /(m ³ /s)		风速 /(m/s)	风量 /(m ³ /s)
319.5	8.22	4.17	101 325	7.47	4.17

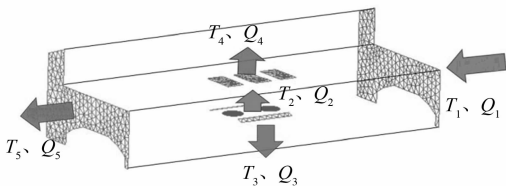
表 3 站台层轨道区轨顶排风口条件

Tab. 3 Tunnel rail top exhaust outlet conditions

排风口条件	排风口尺寸	排风口前移 距离/m	轨顶排风口 风速/(m/s)
1	1.00 m×0.50 m	0	2.00
2	1.00 m×0.50 m	0.250	2.00
3	1.00 m×0.50 m	0	2.40
4	1.00 m×0.75 m	0	1.33
5	1.00 m×0.75 m	0.375	1.33
6	1.00 m×0.75 m	0	1.60

1.3 轨顶排热效率评价参数

为了评估站台层轨道区出风口的平均温度,进而研究站台层轨道区轨顶排风口的排热效率,本文将站台层轨道区排风简化模型各进出口温度和流量的定义如图 2 所示。



注: T_1 ——站台层轨道区进口进风温度, K; Q_1 ——站台层轨道区进口进风量, K; T_2 ——冷凝器出口风温, K; Q_2 ——冷凝器出风量, K; T_3 ——冷凝器进口风温, K; Q_3 ——冷凝器进风量, K; T_4 ——站台层轨道区轨顶排风口出风温度, K; Q_4 ——站台层轨道区轨顶排风口出风量, K; T_5 ——站台层轨道区出口出风温度, K; Q_5 ——站台层轨道区出口出风量, K。

图 2 各进出口的温度、流量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of temperature and flow at each inlet and outlet

为了反映站台层轨道区轨顶排风口抽出热风的有效性,本文将站台层轨道区排风口抽风量看成是由站台层轨道区进风和冷凝器出风组成,定义站台层轨道区进风部分占比为 α_1 ,冷凝器出口风部分占比为 α_2 。根据质量及能量守恒可得:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (1)$$

$$\alpha_1 T_1 + \alpha_2 T_2 = T_4 \quad (2)$$

若已知 T_1 , T_2 和 T_4 ,则根据式(1)及式(2)可计算 α_1 和 α_2 。由于冷凝器出口为最热风,故 α_2 越大,代表该排风口的排热量越大,轨顶风道的设计越合理。因此,本文将 α_2 作为轨顶排风口排热效率的评价参数。

2 轨顶排风口参数优化策略

组合表 1 的进风口边界条件及表 3 的站台层轨道道区轨顶排风口条件,可得到 18 个模拟工况。使用 Fluent 软件对流体域进行模拟计算,可得不同模拟工况下的 T_4 、 α_1 及 α_2 ,如表 4 所示。

表 4 不同模拟工况的排风口参数计算结果

Tab. 4 Calculation results of exhaust outlet parameters under different simulated working conditions

模拟 工况	进风口 边界条件	排风口 条件	T_3/K	T_4/K	α_1	α_2
A1	A	1	305.57	316.15	0.231	0.769
A2	A	2	305.30	316.73	0.191	0.809
A3	A	3	305.54	315.62	0.268	0.732
A4	A	4	306.21	314.58	0.339	0.661
A5	A	5	305.43	315.35	0.287	0.713
A6	A	6	306.29	314.22	0.364	0.636
B1	B	1	305.26	315.04	0.308	0.692
B2	B	2	305.21	315.83	0.253	0.747
B3	B	3	305.23	314.84	0.322	0.678
B4	B	4	305.28	313.57	0.409	0.591
B5	B	5	305.37	314.25	0.362	0.638
B6	B	6	305.24	313.41	0.420	0.580
C1	B	1	305.70	313.70	0.400	0.600
C2	B	2	305.61	313.91	0.385	0.615
C3	B	3	305.64	313.70	0.400	0.600
C4	B	4	305.69	312.59	0.477	0.523
C5	B	5	305.84	313.02	0.447	0.553
C6	B	6	305.63	312.59	0.477	0.523

从表 4 中可以看出:单纯增大轨顶排风口尺寸(排风口条件为 4、5 和 6)反而降低了风口的排热能力;增加站台层轨道区轨顶排风口的排风风量(排风口条件为 3 和 6)对站台层轨道区内温度分布的优化效果也并不明显,其排热效率 α_2 均有所降低;将站台层轨道区轨顶排风口的位置向车头方向移动(排风口条件为 2 和 5),能有效增大 α_2 ,增加站台层轨道区轨顶排风口对热风抽吸量,提高轨顶风道的排风温度。可见,将轨顶排风口前移是其风口参数优化的有效策略。

图 3 为模拟工况 B1 的站台层轨道区轨顶排风口水平剖面的温度分布图。在图 3 的轨顶 3 个并列排风口中,靠近车尾(后方)处 T_4 较低,经分析,后

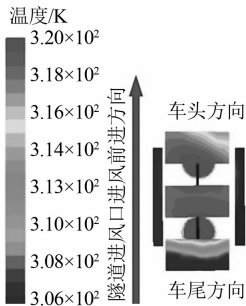


图 3 模拟工况 B1 的 T_4 分布情况

Fig. 3 T_4 distribution under simulation working condition B1

方排风口抽出了大量冷风,使后方排风口的热风占比较少,从而导致其排热效率较低。由此可知,轨顶的 3 个排风口应沿站台层轨道区进口的进风方向前移,对排热较为有利。

3 优化方案及效果仿真验证

3.1 优化方案

随着时间增加,站台层轨道区产生的活塞风速会有所衰减。对此,本文根据列车运行实际工况,取 3 个时间的实际平均速度作为站台层轨道区进口风速的初始条件,来模拟列车停站期间的站台层轨道区流场。站台层轨道区进口的风速及风量的取值如表 5 所示,其余各进出口的边界条件保持不变。

表 5 站台层轨道区进口的平均风速与风量取值

Tab. 5 Average value of air flow volume and velocity at tunnel inlets

位置	风速/(m/s)	风量/(m ³ /s)
近车头	2.64	14.61
中部	3.63	20.11
近车尾	4.25	23.51

在给定的站台层轨道区进口风速条件下,假定关闭轨顶排风,模拟计算轨顶剖面温度场。计算结果表明,从冷凝器排入站台层轨道区的热风温度为 $T_2 = 319.5\text{ K}$,经过与站台层轨道区进口冷风的混合后,站台层轨道区进口风速分别为 2.64 m/s 、 3.63 m/s 、 4.25 m/s 的情况下,在轨顶形成的 319 K 高温区域的范围分别是 $1.354\text{ m} \times 1.791\text{ m}$ 、 $1.596\text{ m} \times 1.092\text{ m}$ 、 $1.547\text{ m} \times 0.936\text{ m}$ 。在站台层轨道区进口风的作用下,高温区域向车头(轨顶风前进)方向偏移,且高温区域能完全覆盖靠近车头方向的冷凝器出口。因此,轨顶排风口位置应向车头(轨顶风前进)方向偏移。根据温度场高温区域模拟结果,站台层轨道区顶部形成的高温区域沿垂直于进风方向(纵向)的平均尺寸为 1.5 m ,而沿平行于进风方向(横向)的尺寸平均值为 1.3 m 。为尽量将轨顶高温区域的热风通过轨顶风道排出站台层轨道区,减少冷风的抽吸量,需将站台层轨道区轨顶排风口大小和位置涵盖各工况下的高温区。由于站台层轨道区结构在纵向上受消防、布线等限制,故不改变其风口的纵向尺寸;考虑到风口优化排风后的轨顶高温区域覆盖面积会有所减小,故将优化风道尺寸设为 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ 。优化前后站台层轨道区轨顶排风口处的排风参数如表 6 所示。图 4 为站台层轨道

区原方案与优化轨顶排风口尺寸位置。

表 6 优化前后站台层轨道区轨顶排风口处的排风参数
Tab.6 Exhaust parameters at tunnel rail top outlet before and after optimization

项目	轨顶风口 (长×宽)	数量/个	风口总 面积/m ²	总风量/ (m ³ /s)	风速/ (m/s)
优化前	0.5 m×1.0 m	3	1.5	3	2
优化后	1.0 m×1.0 m	1	1.0	3	3

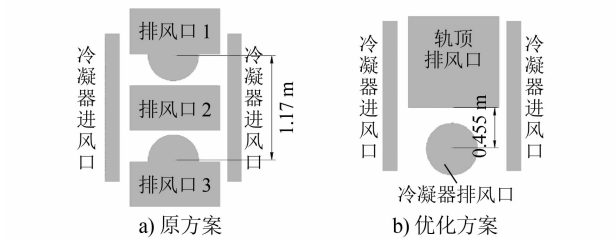


图 4 隧道轨顶排风口方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of tunnel rail top exhaust outlet

根据优化前后的排风口面积变化,保持风口排风量为 3 m³/s 不变,模拟得到优化前后的站台层轨道区轨顶排风口水平剖面温度分布如图 5 所示。

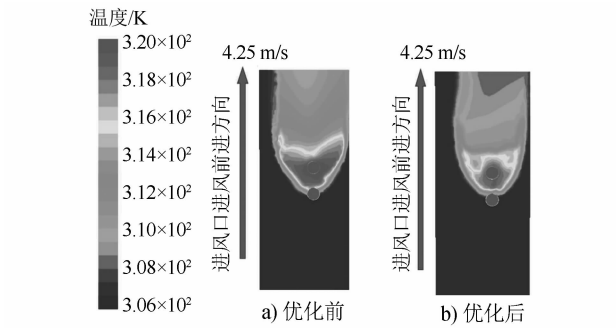


图 5 优化前后轨顶排风口水平剖面温度分布
Fig. 5 Temperature distribution in tunnel rail top outlet horizontal section before and after optimization

从图 5 中可以看出,优化后的高温区域面积明显较小。优化前后的 T_4 及 α_2 如表 7 所示。从表 7 中可以看出,优化后的 α_2 比优化前的 α_2 高 20% ~ 50%,优化效果显著。

4 结语

在地铁车站站台层轨道区轨顶风道排风时,过多的冷风被吸入轨顶风道是造成其排热效率低的主要原因。因此,直接提高轨顶风道中的风口排风量及风口尺寸增加均无法有效增加其排热效率。

表 7 优化前后的风口参数对比

Tab.7 Comparison of air duct parameters before and after optimization

方案	进风风速/(m/s)	T_4 /K	α_1	α_2
原方案	2.64	315.32	0.289	0.711
	3.63	314.25	0.362	0.638
	4.25	313.87	0.389	0.611
优化方案	2.64	317.46	0.141	0.859
	3.63	318.34	0.080	0.920
	4.25	318.25	0.086	0.914

考虑到轨顶各热风分布区域较小,故轨顶风道的优化策略为:适当减小轨顶排风口分布尺寸,并将排风口位置向车头方向移动,从而使轨顶热风区域覆盖排风口,进而有效提高排热效率。

本文仿真研究结果表明,轨顶风道采用本文优化方案后,排热效率可提高 20% ~ 50%。

参考文献

[1] GONZÁLEZ-GIL A,PALACIN R,BATTY P,et al. A systems approach to reduce urban rail energy consumption[J]. Energy Conversion & Management,2014(80) :509-524.

[2] 王治喜. 地铁屏蔽门、闭式及新环控系统的能耗研究及应用[D]. 成都:西南科技大学,2012.

WANG Zhixi. Energy consumption research and application of metro screen door,closed and new environmental control system[D]. Chengdu:Southwest University of Science and Technology,2012.

[3] 那艳玲. 地铁车站通风与火灾的 CFD 仿真模拟与实验研究[D]. 天津:天津大学,2004.

NA Yanling. CFD analog simulation and experiments study on ventilation and fire of subway stations[D]. Tianjin:Tianjin University,2004.

[4] 孟宪霖. 地铁隧道通风与综合节能研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.

MENG Xianlin. Research on ventilation and comprehensive energy conservation of subway tunnel[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2018.

[5] THOMPSON J A,MAIDMENT G G,MISSENDEN J F,et al. Geothermal cooling through enhancement of the natural heat sink effect-proof of concept[J]. Experimental Thermal & Fluid Science,2007,31(6) :551-558.

[6] MAIDMENT G G,MISSENDEN J F. Evaluation of an underground railway carriage operating with a sustainable groundwater cooling system[J]. International Journal of Refrigeration,2002,25(5) :569-574.

(收稿日期:2019-11-01)