

文章编号: 1674—8247(2025)02—0070—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2025.02.011

基于 CFD 的某动车所检查库通风降温方案比选研究

张济辞 王胜男 周 璐 李颖谦 邬春木

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:以成都某新建大型动车所检查库为研究对象,采用计算流体力学(CFD)数值模拟方法,对检查库通风降温方案进行研究。通过建立数值模型,运用有限元法进行网格划分、边界条件设置及求解计算,系统分析了检查库内部温度场分布特征。研究结果表明,采用屋顶通风器与多联岗位空调相结合的通风降温方案,可有效改善工作区域热环境,在确保人员热舒适性的同时兼顾操作便捷性。该研究结果可为类似工程项目的通风系统设计提供理论依据和工程参考。

关键词:计算流体力学;数值模拟;热舒适性;通风方案;动车所检查库

中图分类号:U269;TU834 **文献标志码:**A

Comparative Study on Ventilation and Cooling Strategies for an Inspection Shed of EMU Depot Based on CFD

ZHANG Jici WANG Shengnan ZHOU Lu LI Yingqian WU Chunmu

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper took a newly-built large-scale EMU depot inspection shed in Chengdu as a case study and employed computational fluid dynamics (CFD) numerical simulations to explore suitable ventilation and cooling strategies for inspection shed. By establishing a numerical model, the finite element method was utilized for meshing, boundary condition setting and solution calculation to systematically analyze the temperature field distribution characteristics inside the inspection shed. The research results indicate that a ventilation and cooling solution combining roof ventilators with multi-split air conditioning units can effectively improve the thermal environment in the working area, ensuring thermal comfort for personnel while accommodating operational convenience. The findings of this study can provide theoretical support and engineering references for the design of ventilation systems in similar engineering projects.

Key words: computational fluid dynamics; numerical simulation; thermal comfort; ventilation solution; EMU depot inspection shed

动车检查库为高速动车组进行检修的场所。动车组检修工作一般在动车组每日停运的间隔进行,主要依靠车载和地面设备对车组的技术状态进行安全诊断,更换易损易耗部件及故障件,及时排除设备故障,

保证动车设备能够完好地上线运营。动车检查库长度较大^[1],层高较高,属于大空间建筑,且由于列车检查库内作业人员、检修过程及车辆自身通电运行会产生大量的显热和潜热,工人的夏季作业环境严酷,而高温

收稿日期:2024-06-26

作者简介:张济辞(1994-),男,工程师。

引文格式:张济辞,王胜男,周璐,等.基于CFD的某动车所检查库通风降温方案比选研究[J].高速铁路技术,2025,16(2):70-75.

ZHANG Jici, WANG Shengnan, ZHOU Lu, et al. Comparative Study on Ventilation and Cooling Strategies for an Inspection Shed of EMU Depot Based on CFD[J]. High Speed Railway Technology, 2025, 16(2): 70-75.

高湿的车间环境严重影响作业人员的身心健康并在一定程度上降低了整体工作效率,因此选择适宜通风降温方案十分关键。经调研,现有动车所检查库大多使用设置屋面自然通风器,并加设大型工业电扇或屋顶自然通风机的通风方案,部分检查库使用移动式岗位空调^[2]。但根据已实际部署移动岗位空调的检查库检修人员反映,移动式岗位空调在使用时占用检修平台宽度,阻碍检修人员的作业,而采用纯通风方案又存在部分工作区热舒适度不甚理想的情况。从暖通空调专业角度出发,多联岗位空调采用吊装且冷凝器集中布置于室外,是更适宜的通风降温手段。因此,本文从人员热舒适度出发进行方案模拟计算对比,论证动车所检查库部署多联岗位空调的优越性。

1 检查库概况

1.1 平面布置

动车所检查库长466.8 m,宽120 m,总建筑面积61 687 m²,其中主库建筑面积52 197 m²,边跨建筑面积10 390 m²。

1.2 断面布置

检查库内设有12条检查线,3层作业平台(标高分别为-0.95 m、1.25 m和3.80 m),建筑最高点距室外地面16.31 m。检查库内设置12条列车检修线,边跨主要为办公、设备用房及仓库。库内设置有车辆进出大门,两侧外墙设置高低侧窗,库尾设置端墙,屋面设置自然通风器,断面示意如图1所示。

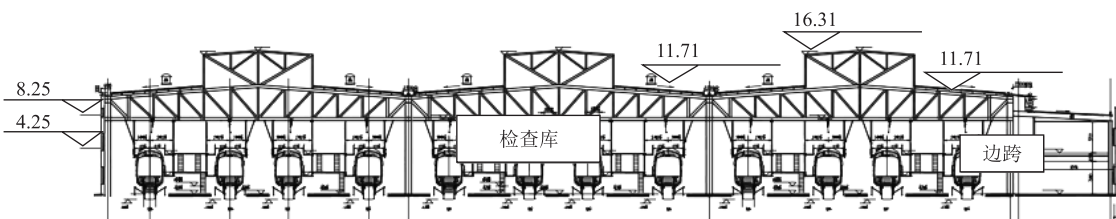


图1 检查库断面示意图(m)

1.3 动车组

检查库检修车型为和谐号高速动车组,8辆编组为一列,库内为一线两列。经调研,库内检修人员长时

间作业地带主要为车顶受电弓、冷凝器、车底转向架位置^[3-4],具体位置如图2所示。

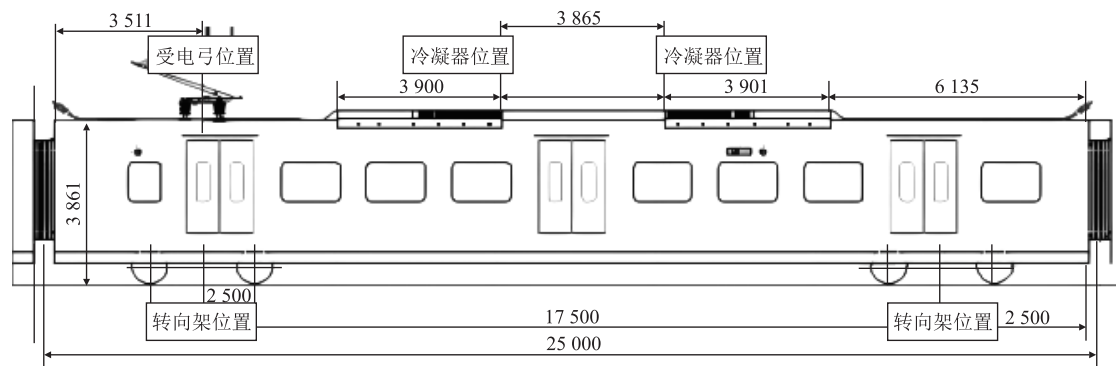


图2 车顶受电弓、冷凝器、车底转向架位置图(mm)

2 方案概况

本次计算使用有限元方法,在检查库几何模型基础上进行网格划分,并结合边界条件进行求解。文中对以下5种方案进行比选,即方案一(仅设置屋顶通风器)、方案二(设置屋顶通风器+大型工业吊扇)、方案三(设置屋顶通风器+屋顶通风机)、方案四(设置屋顶通风器+移动式岗位空调)和方案五(设置屋顶通风器+多联岗位空调)。同时考虑库内主要检修岗位区温度、风速等参数是否满足GB 50019-2015《工

业建筑供暖通风与空气调节设计规范》^[5]第4.1.7条的规定。移动式多联岗位空调断面如图3所示。

3 模拟计算

3.1 建模

根据气象资料,成都室外通风计算温度28.5℃,夏季主导风向为NNE(北北东),风速0.9 m/s,为保障结果的可参考性,本次计算过填充建立室外空气场实体模型,将天空设置为压力出口边界,四周空气面则设为速度出口边界,矢量方向依据夏季主导风向进行还

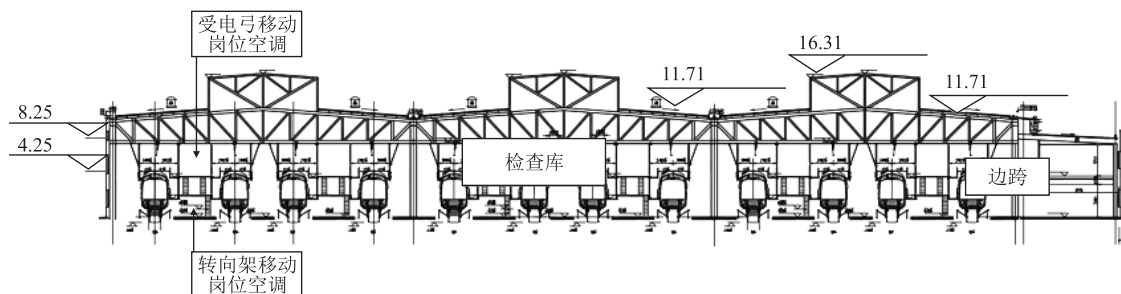


图3 移动式多联岗位空调断面示意图(m)

原,最大程度仿真实际大气环境。具体网格划分如图4所示。

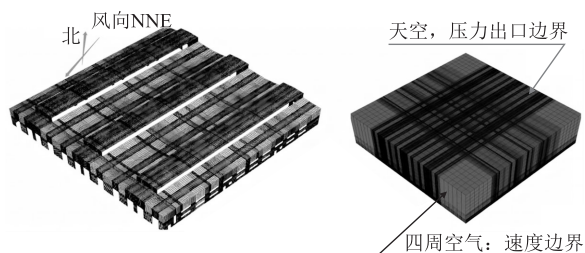


图4 围护结构及外部流体域网格示意图

经天正软件负荷计算,围护结构的峰值得热量为 61 W/m^2 ,峰值出现在 16:00,因此需在围护结构壁面(设置为 WALL)增设对应发热量以模拟太阳辐射的热量。

本次模拟计算建模时缩小了模型的长度,按照检查库 1/4 长度进行建模,宽度则按实际尺寸进行建模,保留两头端墙及两侧端墙门洞,按照房建开放的图纸资料进行侧窗侧门实际尺寸建模,同时对和谐号动车组、通风降温设备进行实体建模,旨在最大程度还原检查库及设备几何特征。

列车每台冷凝器发热量约为 14 kW ,每辆车装备 2 台空调,每台空调按冷凝器净散热量 14 kW 计算。本文按照资料进行了细节还原,建立了冷凝器热源模型。

本次模拟计算采用 Boussinesq 空气密度模型,空气会随冷热变化而发生密度变化。同时本次模拟求解设置重力选项,以模拟热空气上浮,冷空气下沉的自然现象。其模型计算公式为:

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0) \quad (1)$$

式中: ρ ——温度为 T 时的空气密度(kg/m^3);

ρ_0 ——参考温度 T_0 时的空气密度(kg/m^3);

β ——热膨胀系数;

T ——空气的实际温度($^{\circ}\text{C}$);

T_0 ——参考温度($^{\circ}\text{C}$);

g ——重力加速度(m/s^2)。

采用 ANSYS FLUENT 软件进行模拟,其具有复合材料设计、三维组件建立、扩展建模、动力学分析、流体动力学分析、声场分析、结构静力分析等功能。

3.2 控制目标

以通风为主的方案需满足 GB 50019-2015《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》第 4.1.4 条要求。生产厂房夏季工作地点的温度可根据夏季通风室外计算温度及其工作地点的允许最大温差进行设计,但不得超过下表数据。根据资料,本工程室外通风温度 28.5°C ,因此室内工作地点控制温度为 32°C ($28.5^{\circ}\text{C} + 3.5^{\circ}\text{C}$)。岗位空调辅助降温方案则需满足 GB 50019-2015《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》第 4.1.7 条规定。

经对既有动车检查库检修作业的调研可知,检修作业类似中等劳动强度,结合工作地点热辐射强度,工作地点控制目标应设定为:温度 $26^{\circ}\text{C} \sim 31^{\circ}\text{C}$,风速 $1.5 \sim 3.0 \text{ m/s}$ 。

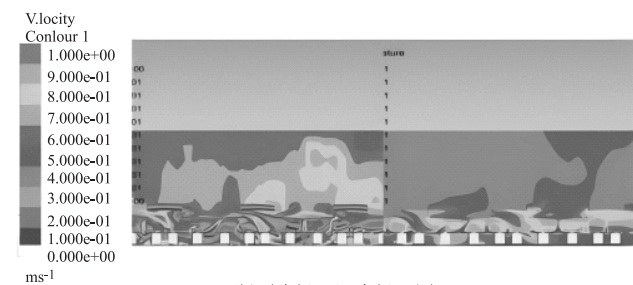
3.3 模拟计算结果分析

本文通过计算流体力学模拟仿真,得到了 5 种方案的最终流场及温度分布情况。

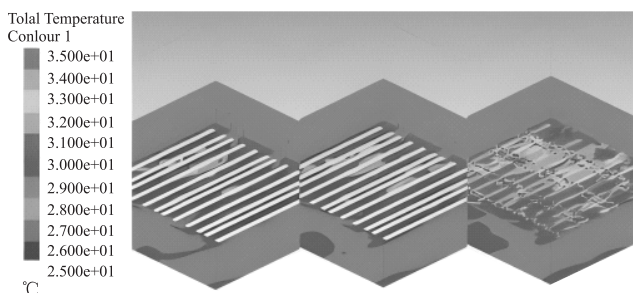
3.3.1 仅设置屋顶通风器方案

设置边界条件时考虑外部环境空气以及真实夏季主导风向,外窗和车库门设置为空气耦合入口边界,自然通风器设置为空气耦合入口边界,如图 5 所示。该车库的底部形成高压区,顶部出口处生成低压,空气在压力梯度的作用下上升,从而形成较明显的烟囱效应^[6-7],又因列车冷凝出风温度较高,进一步加剧了烟囱效应。在自然对流的影响下,内部空气温度分层较为均匀。因此高温区集中分布在二层检修平台和列车顶部区域。该动车所检查库近边跨侧自然通风器有一定回流空气涌入,受到加热后速度提升并从列车库门、窗涌出。

综上所述,列车一层检修平台温度较为符合要求。二层平台部分温度超标,三层平台区域大面积温度超

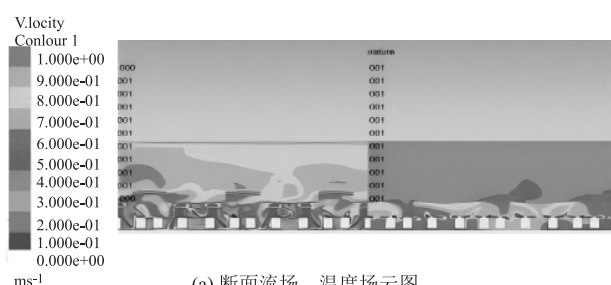


(a) 断面流场、温度场云图

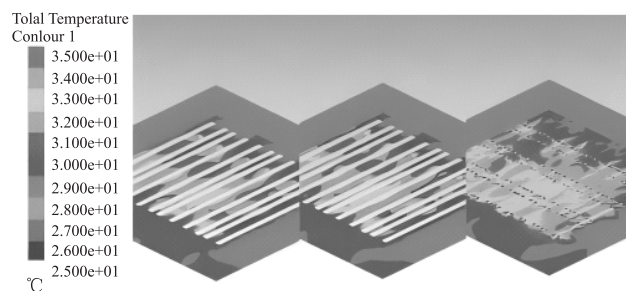


(b) 地面层、中间层、车顶层温度分布切面云图

图5 设置屋顶通风器方案计算结果图



(a) 断面流场、温度场云图



(b) 地面层、中间层、车顶层温度分布切面云图

图6 设置屋顶通风器+大型工业吊扇计算结果组图

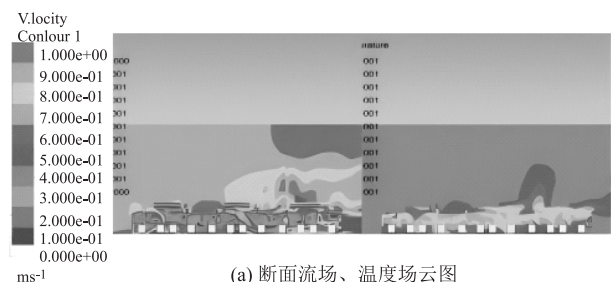
标,通风降温效果相对不理想。

3.3.2 设置屋顶通风器+大型工业吊扇方案

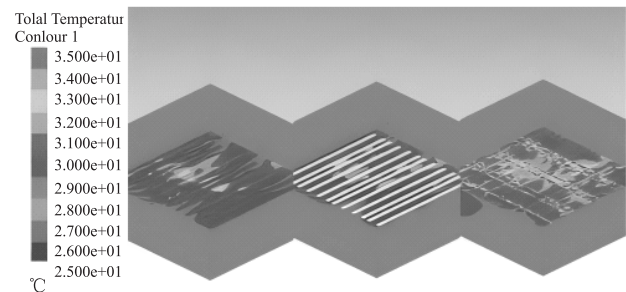
设置边界条件时考虑外部环境空气以及真实夏季主导风向,外窗和车库门设置为空气耦合入口边界,自然通风器设置为空气耦合入口边界,吊扇实体设置为FAN,如图6所示。加入工业吊扇后,高温分布较方案一更加广泛。根据云图分析及插点取值来看,整个检修区风速在0.6~2.0 m/s之间,中部区域风速因受列车阻挡作用,风速在0.3~1.0 m/s。受气流雷诺数影响,列车与墙壁的对流换热现象加剧^[8],并由气流将热量较均匀扩散至全计算区域。根据工业吊扇气流流场特性^[9],冷凝器产生的热量被压于近地面层,一层转向架检修平台温度相较自然通风方案略高并导致车顶层有更大面积的较高温度区域。但整体而言温度较为均匀,除冷凝器区域外未出现明显超过33℃的区域,可视为基本满足标准。

3.3.3 设置屋顶通风器+屋顶通风机方案

设置边界条件时考虑外部环境空气以及真实夏季主导风向,外窗和车库门设置为空气耦合入口边界,自然通风器设置为空气耦合入口边界,屋顶通风机处设置为速度出口,如图7所示。该方案中,屋顶通风机运行造成库内上部局部负压区域,引导气流、冷凝器出风及列车底部高温区被有效引流,但因热空气的诱导聚集加剧了车顶检修平台的温升。但相比于方案一和方案二较为明显地改善了一层、二层平台的作业环境温度。总体来看并未出现明显超过33℃的区域,可视为基本满足标准。



(a) 断面流场、温度场云图



(b) 地面层、中间层、车顶层温度分布切面云图

图7 设置屋顶通风器+屋顶通风机计算结果组图

3.3.4 设置屋顶通风器+移动式岗位空调方案

设置边界条件时考虑外部环境空气以及真实夏季主导风向,外窗和车库门设置为空气耦合入口边界,自然通风器设置空气耦合入口边界,同时对移动式岗位空调进行建模,喷口设置带矢量方向的速度出口,如图8所示。本方案因加入了设定出风温度为22℃的移动式岗位空调^[10],检查库仅中间层、车顶层工作点降温效果较明显。根据云图分析及插点取值可知,中间层、车顶层的温度大面积维持在32℃以下。但因为移动式岗位空调的冷凝器暴露在库内,冷凝器机械做

功产生热耗散,导致库内整体的热量增高,移动式岗位空调冷凝器附近温度突破 33°C ,又因无机械气流引导,近地面层温度情况部分区域较方案一更加不理想。而空调出风速度为 1.1 m/s ,吹风感轻微^[11],基本不影响工作人员的热舒适性。总体而言,该方案的确能改善作业点温度情况,但对近地面层区域的温度控制效果不佳。

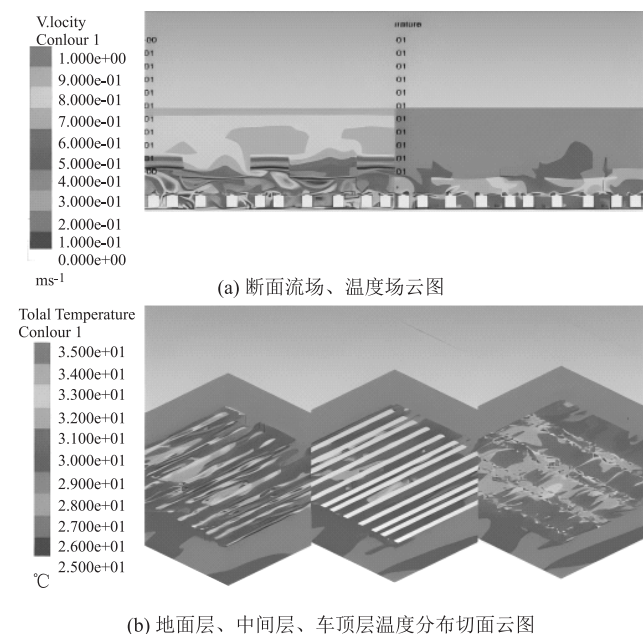


图8 设置屋顶通风器+移动式岗位空调计算结果组图

3.3.5 设置屋顶通风器+多联岗位空调方案

本方案加入了出风温度为 22°C 的多联岗位空调,得益于多联机的技术特点(冷凝器在室外,无冷凝热量排入室内),动车所检修库降温较前3个通风方案

明显,整体温度控制效果优于移动式岗位空调。本方案多联岗位空调出风速度为 2 m/s ,按照实际矢量方向进行出风角度设置,如图9、图10所示。

根据云图分析及插点取值,非工作区域平均维持在 30°C 左右,工作点区域甚至达到了 28°C 以下,满足本方案的控制目标温度 $26^{\circ}\text{C}\sim 31^{\circ}\text{C}$ 。本方案中工作区域温度得到有效控制,因设备吊装形式占用室内空间较小,人员作业更加便捷,同时吹风感可控,工作人员的舒适度相对其他方案更佳。检查库工作区底部空气被有效制冷,室内外空气温差减小,热压作用减弱,进而导致烟囱效应强度有所削弱。

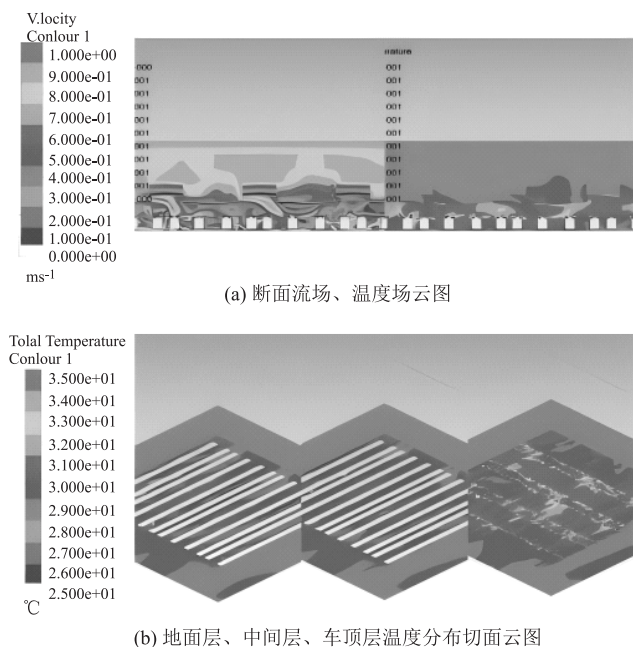
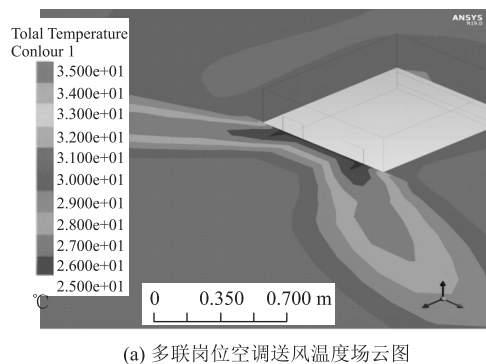
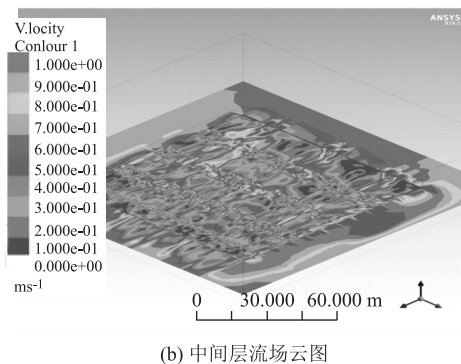


图9 设置屋顶通风器+多联岗位空调计算结果组图



(a) 多联岗位空调送风温度场云图



(b) 中间层流场云图

图10 多联岗位空调出风温度场局部及中间层速度场切面组图

通过以上5种方案的温度分部、风速分布模拟对比,设计人员可为后续设计提供更科学的指导。经过全方案云图分析及插点取值,结果如表1、表2所示。

通过各个方案中温度分布、流场分布数据可知,前3种方案以通风为主要措施的方案均存在部分区域不

能满足人员热舒适性要求的情况,部分区域温度大于规范要求值 32°C ,故不推荐前3种通风方案;后2种增设局部降温空调方案中,移动式岗位空调除工作点外,冷凝器区域温升情况甚至更加明显,故建议对移动式岗位空调的部署进行考量。根据本次模拟仿真结

表 1 温度分布表(℃)

方案	地面层		中间层		车顶层	
	非工作区温度	工作点温度	非工作区温度	工作点温度	非工作区温度	工作点温度
方案一	29.4	28.0~30.8	31.2	30.0~32.8	32.2	32.4~33.8
方案二	32.5	32.5	31.5	32.1	32.1	32.6
方案三	31.6~34.0	32.1~34.2	31.2~32.1	31.8~32.1	31.7~32.0	31.9~33.1
方案四	31.6~34.0	32.1~33.5	30.2~31.0	29.7~31.0	31.8~35.5	29.0~32.1
方案五	29.6~30.8	29.0~30.0	30.6~30.9	29.7~30.6	31.6~33.1	29.0~31.0

表 2 风速分布表(m/s)

方案	地面层	中间层	车顶层
方案一	0.57~0.86	0.57~0.88	0.66~0.50
方案二	0.60~2.00	0.60~2.00	0.60~2.00
方案三	0.40~0.90	0.60~1.00	0.40~0.90
方案四	0.25~1.10	0.21~0.28	0.25~1.10
方案五	0.30~2.00	0.20~0.50	0.30~2.00

果,多联岗位空调方案在工作区温度控制性能、人员舒适性方面更具优势,且风速在 0.25~2.00 m/s,满足检修作业区风速要求。因此从人员的舒适度出发,多联岗位空调在动车所检查库作业场景下具有更加优越的温控性能。

各方案初投资费用调研对比如表 3 所示。由表 3 可知,多联岗位空调为初始投资最高的方案,但相较于移动式岗位空调没有呈现倍数级增长。综上所述,根据比对计算结果及考虑其他因素后,本文认为在初始投资较充裕的情况下,屋顶通风器结合多联岗位空调方案宜在动车所检查库中推广应用。

表 3 各方案初投资费用调研对比表

方案	初投资/(万元)	备注
方案一	35.0	-
方案二	510.0	全天运行
方案三	75.0	全天运行
方案四	720.0	按 10 h/d 运行
方案五	1 008.9	按 10 h/d 运行

4 结论

本文以成都某新建大型动车所检查库为案例,使用计算流体力学模拟仿真对检查库适宜通风降温方案进行研究。得到主要结论如下:

(1)由于列车空调冷凝器出风温度较高,库内高温区主要集中在二层检修平台和列车顶部区域,空气在压力梯度的作用下上升,且列车冷凝出风进一步加剧了烟囱效应。

(2)屋顶通风器可有效排除库内顶部聚集的热量,改善作业环境温度,但降温能力有限;工业吊扇可以增加人员工作区风速,但会加速顶部热空气扰动,扩大了高温分布区域;移动式岗位空调除出风覆盖的工作点外,其冷凝器散热区域温升明显,对近地面层温度控制效果不佳;上述方案均存在部分区域不能满足人员热舒适性要求的情况,部分区域温度大于规范要求值 32℃。

(3)多联岗位空调方案降温效果明显,工作区温度控制良好,能达到控制目标温度的要求,非工作区域平均维持在 30℃左右,工作点区域可达 28℃以下,人员舒适度相对更佳。多联岗位空调在动车所检查库作业场景下温控性能更优越,且风速满足检修作业区要求。

(4)多联岗位空调初始投资最高,但未与其他方案呈倍数级增长,在初始投资较充裕时,屋顶通风器结合多联岗位空调方案宜在动车所检查库中推广应用。

参考文献:

[1] 张正舟,欧阳鹏,宋东升,等. 动车段高级修主要工艺及总平面布置研究[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(4): 220-226.
ZHANG Zhengzhou, OUYANG Peng, SONG Dongsheng, et al. Research on Main Process and General Layout of Advanced Repair on EMU Depot[J]. Railway Standard Design, 2024, 68(4): 220-226.

[2] 王荣华. 关于广州动车段转向架检修库增设空调设施的探讨[J]. 铁道车辆, 2018, 56(10): 40-41, 5.
WANG Ronghua. Discussion of Adding Air-conditioning Facilities in the Inspection and Repair Workshop for Bogies in Guangzhou Depot for Multiple Units[J]. Rolling Stock, 2018, 56(10): 40-41, 5.

[3] 王伟,谢红太,雒沛丰,等. 国内动车段(所)高级修厂房布局及检修工艺设计研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(6): 52-60, 64.
WANG Wei, XIE Hongtai, LUO Peifeng, et al. A Study on the Design of Layout of Advanced Maintenance Workshops of Multiple Unit Depot (Section) and Maintenance Processes[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(6): 52-60, 64.

[4] 张正舟,欧阳鹏,韩永军,等. 动车段车间工艺设计方法研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(4): 1-7.

(下转第 98 页)

- 2022, 13(2): 62–66.
- [4] 章依卿. 城市轨道交通工程投标阶段造价管理的风险因素探析[J]. 商讯, 2023(17): 181–184.
- ZHANG Yiqing. Analysis on Risk Factors of Cost Management in Bidding Stage of Urban Rail Transit Project [J]. Corporate Finance, 2023(17): 181–184.
- [5] 孙旺青, 刘晓峰, 何沁蔓. 基于相似月和 Elman 神经网络的行业月度售电量预测[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(4): 53–58.
- SUN Wangqing, LIU Xiaofeng, HE Qinman. Monthly Electricity Sales Forecasting of Different Industries Based on Similar Month and Elman Neural Network Model[J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(4): 53–58.
- [6] 梁益丰, 许江宁, 吴苗. 基于粒子群算法优化 Elman 神经网络的 GPS 快速钟差预报方法[J]. 海军工程大学学报, 2022, 34(6): 41–47.
- LIANG Yifeng, XU Jiangning, WU Miao. Elman Neural Network Based on Particle Swarm Optimization for Prediction of GPS Rapid Clock Bias[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2022, 34(6): 41–47.
- [7] 杨飞, 张云娇, 范丁元. 基于改进马尔科夫模型的铁路客运量预测研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(5): 45–50.
- YANG Fei, ZHANG Yunjiao, FAN Dingyuan. A Study on Railway Passenger Volume Forecast Based on Improved Markov Model [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(5): 45–50.

(上接第 75 页)

- [5] GB 50019–2015 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].
- GB 50019–2015 Design Code for Heating Ventilation and Air Conditioning of Industrial Buildings[S].
- [6] 王梦影. 双浮升力作用下的混合对流场特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- WANG Mengying. Study on the Characteristics of Mixed Convection Flow Field Under the Action of Double Floating Lift [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [7] 郑浩, 童艳, 王昶舜, 等. 高大空间建筑上部开口驱动自然通风应用潜力[J]. 暖通空调, 2017, 47(9): 125–130, 124.
- ZHENG Hao, TONG Yan, WANG Changshun, et al. Potential of Natural Ventilation Using Upper Openings in a Large Space Building [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2017, 47(9): 125–130, 124.
- [8] 魏琪, 夏国泉. 用低雷诺数 K-E 模型模拟室内空气混合对流换热[C]//计算流体力学研究进展——第十二届全国计算流体力学会议论文集. 西安, 2004: 641–644.
- WEI Qi, XIA Guoquan. Simulation of Indoor Air Mixed Convective Heat Transfer Using the Low-Reynolds-Number K-E Model [C]//Advances in Computational Fluid Dynamics-Proceedings of the 12th National Conference on Computational Fluid Dynamics. Xi'an, 2004: 641–644.
- [9] 陈家明. 基于冲击射流理论的吊扇流场壁面射流区气流分布特性研究[D]. 广州: 广州大学, 2023.
- CHEN Jiaming. Study on Air Distribution Characteristics of Ceiling Fan Flow Field Wall Jet Area Based on Impinging Jet Theory [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023.
- [10] 许建丰. 轨道交通车辆段定修线一层岗位空调技术方案探讨[J]. 隧道与轨道交通, 2024(2): 35–37, 73.
- XU Jianfeng. Exploration of Technical Schemes for First-floor Post Air Conditioning of Maintenance Lines in Rail Transit Depots [J]. Tunnel and Rail Transit, 2024(2): 35–37, 73.
- [11] 张文雯, 李上志, 曾理, 等. 室内空调风口风速对热舒适度影响[J]. 制冷与空调(四川), 2019, 33(6): 674–678, 690.
- ZHANG Wenwen, LI Shangzhi, ZENG Li, et al. The Influence of Indoor Air Conditioning Outlet Wind Velocity on Thermal Comfort [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2019, 33(6): 674–678, 690.