

文章编号: 1671-6612 (2021) 02-225-09

基于 B 型地铁的空调通风系统设计

杨延龙 刘保生 王 岩

(中车大连机车车辆有限公司 大连 116022)

【摘要】 空调系统的送风舒适性是衡量地铁性能的重要指标。为了达到乘坐的舒适性,需要将温度、风速均匀性控制在合理的范围内。通过对地铁车辆参数、运用环境等方面进行分析,设计了某地铁项目的空调通风系统。运用计算流体动力学技术,创建了客室的三维模型及风道系统模型,模拟客室内流场,得到空载和满载状态下坐姿、站姿头部风速场和温度场的分布情况。模拟验证了:环境温度+33℃时,保证满载状态下,客室内温度不高于+28℃。气流均高于 0.07m/s,距地板面 1.7m 处的平均微风速在 0.3~0.5m/s 范围内。将设计方案于真实的地铁车辆上进行了空载状态下温度、湿度和风速的测试。实测结果与模拟计算相近似。研究结果对地铁车辆的设计有着指导意义。可推广出适用于 B 型地铁车辆的空调通风系统设计平台。

【关键词】 空调通风系统; 气流组织; 模拟仿真; 实车验证; 平台化
中图分类号 U231.5 文献标识码 A

Design of Air Conditioning System Based on Type B Subway

Yang Yanlong Liu Baosheng Wang Yan

(CRRC DALIAN Co.,LTD, Dalian, 116022)

【Abstract】 The air supply comfort of air conditioning system is an important index to measure the subway performance. In order to achieve riding comfort, it is necessary to control the uniformity of temperature and wind speed within a reasonable range. The air conditioning and ventilation system of a subway project is designed by analyzing the parameters of subway vehicles and the application environment. Using computational fluid dynamics (CFD) technology, the three-dimensional model of the passenger room and the model of the air duct system were created to simulate the flow field in the passenger room, and the distribution of wind speed field and temperature field of the head in sitting and standing posture under AW0 and AW2 were obtained. The simulation verifies that when the ambient temperature is +33℃, the temperature in the guest room is not higher than +28℃ under AW2. The airflow is all higher than 0.07m/s, and the average breeze velocity at 1.7m away from the floor is within the range of 0.3~0.5m/s. The design scheme is tested on a subway vehicle in AW0 condition in terms of temperature, humidity and wind speed. The measured results are similar to the simulated calculation. The research results have guiding significance for the design of subway vehicles. The design platform of air conditioning and ventilation system for Type B subway vehicles can be popularized.

【Keywords】 Air conditioning and ventilation system; Air distribution; Simulation; Real car verification; platform

作者(通讯作者)简介: 杨延龙(1982.5-),男,工程硕士, E-mail: YYL0517@163.com
收稿日期: 2020-08-19

0 引言

地铁具有速度快、载客量大、无排放污染、乘坐舒适等优点,目前全球已有百余城市建造了地铁^[1]。国内各级城市依照国务院批复,积极开展地方

地铁建设。随着社会的发展,乘客会对舒适性出更高的要求,其中空调通风系统就显得尤为重要。地铁客室内气流组织主要受送风速度,送风温度,送风湿度,送风角度,送风口布置,热源分布等众多

因素影响^[2]。通过建立地铁客室和风道系统等数学模型,对温湿度场、风速场的均匀性进行模拟,以提升气流组织的效果,达到舒适性。为乘客营造高品质的乘坐环境^[3]。

大连交通大学的王斌通过三维建模分析了风道内部气流组织变化规律,并在车厢内加入了人体模型,通过客室内具有代表性位置的气流组织分布和环境温度进行分析,来评估空调系统、风道系统的性能。还对满载状态下客室之间进行了模拟,分析两车之间贯通道处受流场和温度场的影响情况^[4]。中南大学的李超等人采用流体软件建立计算模型,分析人体与环境之间的气固耦合散热问题,优化客室内的气流组织^[5]。于淼、王东屏等通过对人体的散热、地铁结构的壁面传热等进行了模拟研究,采用调整送风口数量改善出风均匀性^[6]。综上,目前学者多是进行理论研究,关注影响客室气流组织的各种因素,如:人体散热及与环境之间的耦合散热、相邻两客室之间的气流组织;地铁结构的壁面对传热的影响。但缺少理论向实践转化的应用案例。而且理论中采用了很多经验公式及计算模型简化,难免造成与实际结果的差异。

通过以往地铁项目中空调系统设计积累的经验,结合地铁车辆参数、环境等信息,针对国内某个地铁进行方案设计,并采用计算流体动力学对客室内部气流组织的模拟,最终采取在地铁车辆实车上对客室内部温湿度场、风速场测试验证。

1 空调通风系统设计

1.1 地铁车辆参数

常规的 B 型地铁均采用 6 节编组,编组如下:

Tc—Mp—M—M—Mp—Tc

其中, Tc 为拖车; Mp 为带受电弓的动车; M 为动车。Mp 与 M 车客室两侧均设置四套车门系统,并有 3 组大窗,两组小窗。Tc 车的配置与 Mp 及 M 车基本类似,但 Tc 车一位端增设了司机室,司机室两侧配有司机室车门系统。基本参数及载客能力如表 1 所示。

即为乘客提供良好舒适的环境,又达到节约制冷时的能量能耗。根据国家标准的要求,空调机组的制冷能力达到满足额定载荷人数(AW2)的制冷量即可^[7]。

表 1 基本参数及载客能力

Table 1 Basic parameters and passenger carrying capacity

序号	项点	参数
1	车辆长度	Tc 车: 19500mm
		Mp、M 车: 19000mm
2	车辆高度	3800mm
3	车辆宽度	2800mm
4	客室内部高度	约 2100mm
5	车辆传热系数	2.3W/m ² ·K
6	定员人数(AW1)	Tc 车: 36 人
	定员人数(AW2)	Mp/M 车: 42 人
	定员人数(AW3)	Tc 车: 230 人 Mp/M 车: 254 人
		Tc 车: 290 人 Mp/M 车: 325 人

1.2 空调系统设计

地铁车辆空调通风系统由空调机组、风道系统、废排装置构成。通过地铁客室顶部配置的两台空调机组和 4 台废排装置,形成内部的气流组织,为了利于保证车辆内温度场、风速场分布的一致性。将空调机组分别设计在整车的 1/4 及 3/4 位置,如图 1 所示。

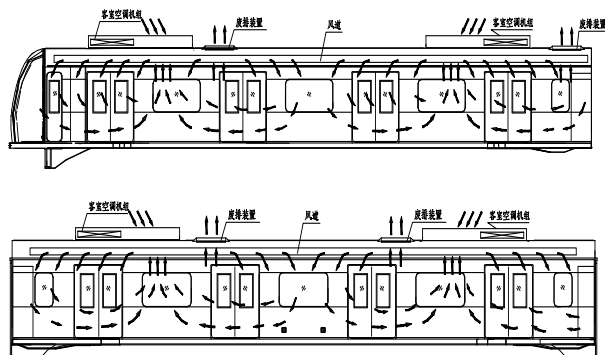


图 1 空调机组、废排装置布置及气流组织图

Fig.1 Air conditioning unit, waste discharge device layout and air distribution diagram

1.3 风道系统设计

根据地铁运用的特殊性限制,送风道布置在客室顶部内装中,通过内装顶板的送风格栅将新风送入到客室内。综合考虑能耗,空调在制冷工况,均采用空调回风模式。客室内的回风气流较废排的排风对气流组织影响更为明显。客室内较优的气流组织方式应为上送风,下回风的方式,但回风的阻力偏大,易出现贴壁现象。因此,现有地铁多采用上送风,上回风的气流组织形式^[8]。

新风与回风在空调机组内充分混合并经冷却后, 经空调内部的送风机送入送风道, 通过风道系统内接口处的分风板和导流板后, 冷却气流从主风道上条缝式的出风口送入到静压腔内。在静压腔稳定后由中顶的格栅送入到客室内, 风道组成如图 2 所示。如此, 气流再次从客室回风口被空调机组重新吸入, 完成客室降温的循环过程。

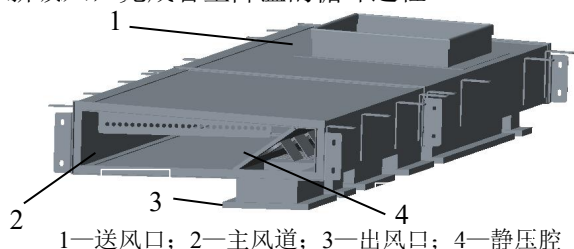


图 2 风道组成局部放大图

Fig.2 Partial enlargement of air duct

综合考虑生产便利, 风道采用规则矩形, 沿着车辆对称布置, Tc 车风道总长度为 16540mm, Mp/M 车风道总长度为 17760mm 宽度均为 500mm。Tc 车出风面积为 2.5m², Mp/M 车出风面积为 2.9m²。每节客室均设置两个尺寸为 254mm×1100mm 的回风口。

2 空调通风系统流场计算

2.1 地铁车辆模型

为了便于进行模拟分析和计算, 应对客室进行简化, 仅保留对结果有贡献的参数。采用 Hypermesh 软件进行网格划分。由于风道模型在末端的出风口处存在通孔出风的情况, 网格划分具有一定难度。因此按不同的部分进行网格划分, 详见

图 6 所示。其中两个风道组成部分网格共 264 万, 客室内网格 1025 万, 总计 1289 万网格, 最大扭曲均小于 0.96, 网格质量良好, 如图 3 所示。

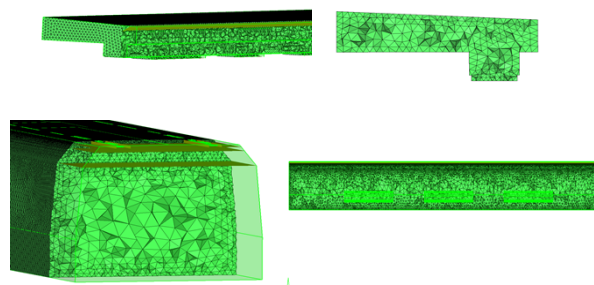


图 3 车辆模型网格图

Fig.3 Vehicle model grid

2.2 空调通风系统模拟分析

由于地铁客室结构及风道均对称, 在计算中可仅选取一半。边界参数如表 2 所示。

表 2 边界参数表

Table 2 Boundary parameters table

序号	项目	参数
1	室外温度	33℃
2	室外湿度	65%
3	客室新风量	2×1468m ³ /h
4	客室送风量	2×4000m ³ /h
5	车体传热系数	2.3W/(m ² ·K)
6	单台空调机组制冷功率	29kW

2.2.1 空载状态下客室的速度和温度

(1) 室地板面 1.2m 处风速速度及温度图(空载), 如图 4 所示。

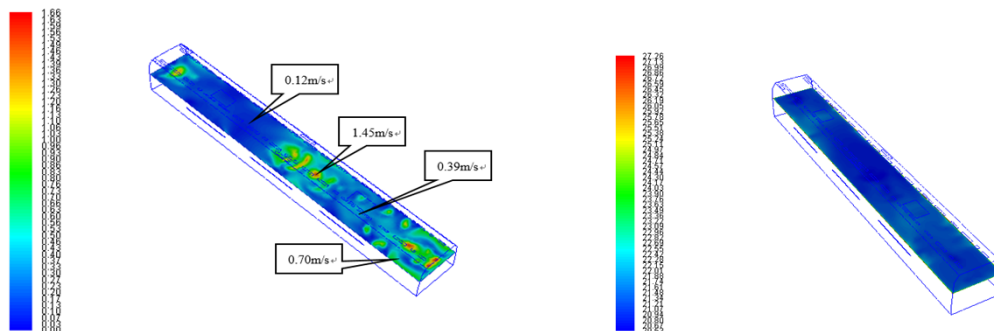


图 4 客室地板面 1.2m 风速速度及温度图(空载)

Fig.4 1.2 M wind speed and temperature diagram of passenger room floor surface (AW0)

如图 4, 距地面 1.2m 处的人体坐姿头部位置截面, 绝大部分气流速度为 0.12m/s。小部分 0.7m/s, 由于送风口与回风口的布置位置, 小区域

会出现风速稍大的情况, 最大风速 1.45m/s, 但从云图分析, 不均匀的区域占比微小。模拟的情况基本满足空气流速的要求。

在送风温度为 20℃ 的情况下,距地板 1.2m 处,客室温度较为均匀。客室内仿真计算结果客室平均温度为 21℃。客室内温度满足设计要求。

(2) 客室地板面 1.7m 处风速速度及温度图(空载), 如图 5 所示。

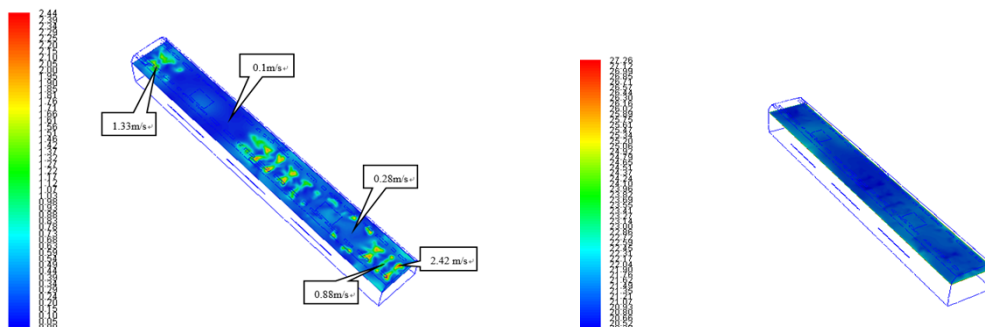


图 5 客室地板面 1.7m 风速速度及温度图(空载)

Fig.5 Diagram of wind speed and temperature of the passenger room floor surface at 1.7m (AW0)

如图 5, 距地面 1.7m 处人体站立时头部截面, 大部分区域气流速度为 0.1m/s, 小部分 1.33m/s, 小区域会出现气流速度较大的情况, 最大风速 2.42m/s, 但从云图分析, 不均匀的区域占比微小。

由于 1.7m 距风道出风口较近, 所以风速较 1.2m 处大。模拟的情况满足空气流速的要求。

距地板 1.7m 处, 客室温度分布较为均匀。计算结果客室平均温度比距地面 1.2m 处平均温度小, 为 20.5℃, 客室舒适区温度满足设计要求。

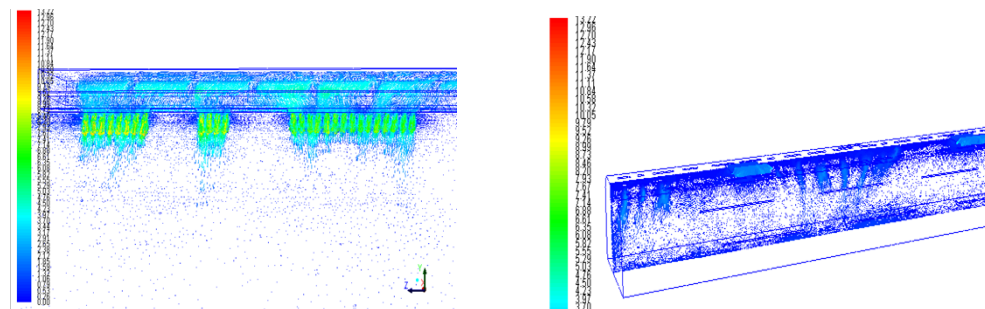


图 6 客室气流整体速度矢量图

Fig.6 Overall velocity vector diagram of passenger room airflow

图 6 是地铁客室气流速度矢量图, 从图 6 中可以看出, 客室中间区域出风口处速度相对较高, 整体呈现向下的气流。在客室长度方向和高度方向上存在风速不均的情况, 在同一水平面上送风口处流速比较大。在客室高度方向上, 距客室顶部近的地方气流速度较大, 远离客室顶部处气流动速度减小。但从整体方面能够达到证客室气流的均匀分配。

2.2.2 满载状态下客室的速度和温度

客室中的速度分布, 图 7~图 10 是客室的速度矢量分布, 满足在人体周围气流速度约为 0.3~0.5m/s 的舒适性要求。

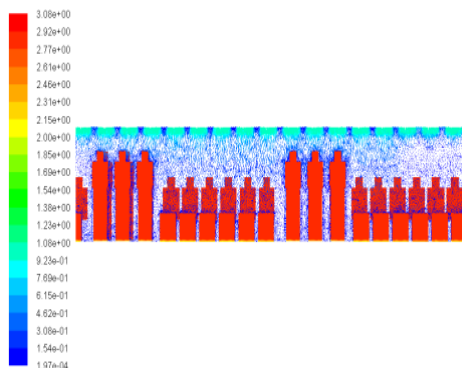


图 7 送风口处速度矢量图

Fig.7 Velocity vector diagram at air outlet

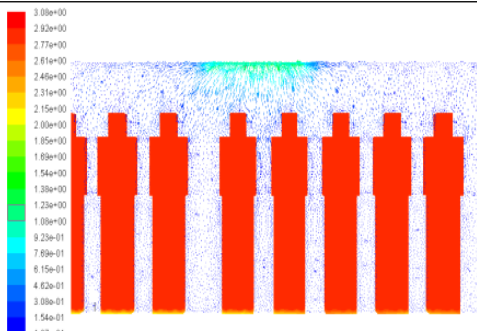


图 8 回风口处速度矢量分布图

Fig.8 Velocity vector distribution at the inlet

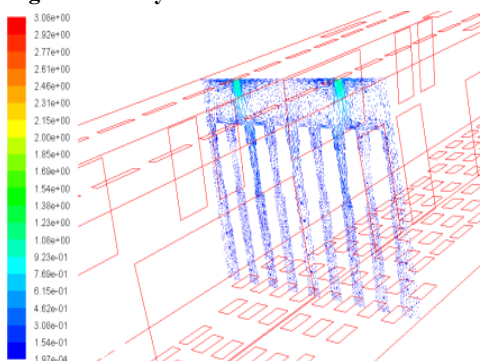


图 9 中部送风口处速度矢量图

Fig.9 Velocity vector diagram at the central air outlet

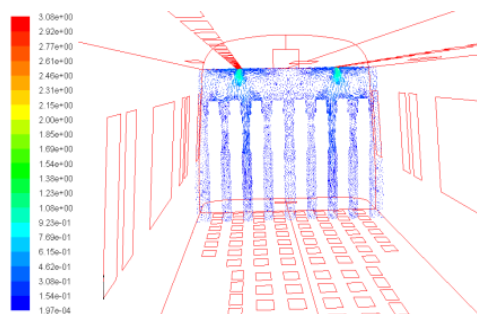


图 10 前端截面的速度矢量图

Fig.10 Velocity vector diagram at the front section

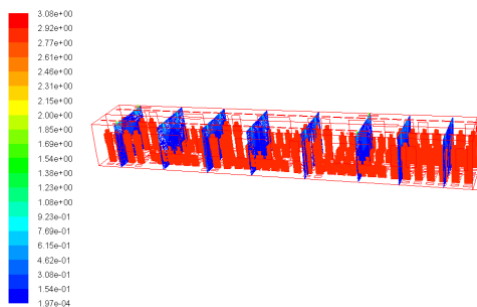


图 11 客室内多个位置横截面的速度矢量分布

Fig.11 Velocity vector distribution of cross sections at multiple locations in the passenger room

通过图 11 可分析出, 从整体上客室内的各断面风速速度满足设计要求。

客室中的温度分布, 人体与空调机组向客室内的送风进行热量交换。图 12 是客室送风口位置纵向截面温度分布云图, 由于送风口直接进入客室, 所以温度较低。

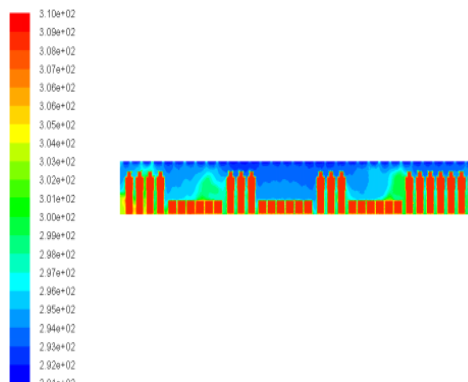


图 12 送风口处温度分布云图

Fig.12 Temperature distribution cloud map at air outlet

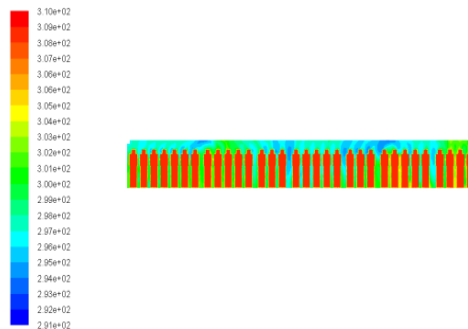


图 13 中部纵向截面温度分布云图

Fig.13 Temperature distribution cloud map at central longitudinal section

从图 13 分布云图中看, 客室前端和后端人体周围的温度为 26~28℃。满足设计要求。图 14 是客室前端温度分布的云图。从中可以看出, 人体周围温度为 28℃, 满足设计要求。

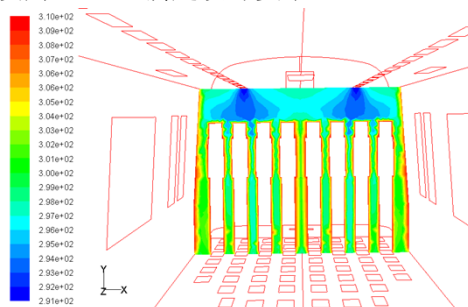


图 14 客室前端温度分布云图

Fig.14 Temperature distribution cloud map at the front of the passenger room

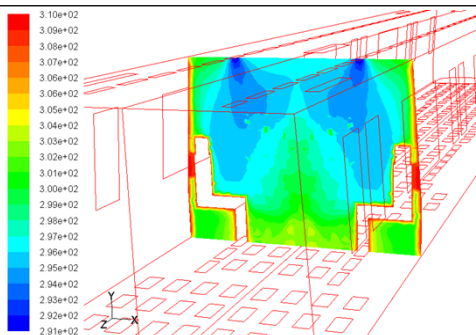


图 15 客室中部坐姿乘客周围温度分布云图

Fig.15 Temperature distribution cloud map around passengers sitting in the middle of the passenger room

在图 15 中, 由于此截面存在坐姿乘客的原因, 所以温度相对低, 乘客面前的温度为 23℃。图 16 显示的是客室内多位置的温度分布。从整体上, 客室内的温度比较理想。达到了设计规定的温度。

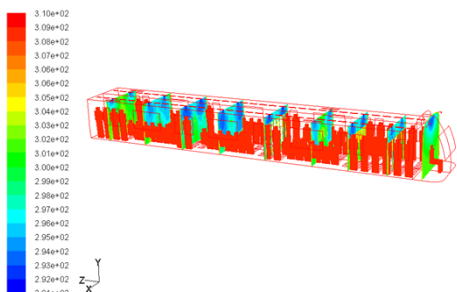


图 16 客室内多位置温度分布

Fig.16 Temperature distribution at multiple locations in the passenger room

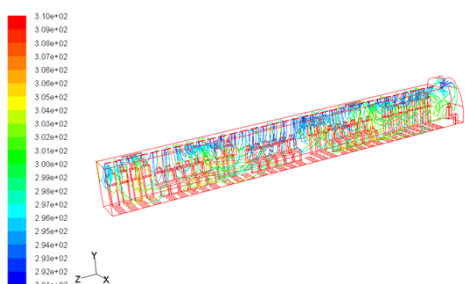


图 17 室内空气粒子运动轨迹

Fig.17 Trajectories of air particles in the passenger room

图 17 是客室的气流流动轨迹。客室中乘客为 230 人, 由于人数较多, 送风基本上在人体上部, 到达人体下部位置, 温度普遍增高到 28℃。

图 18、图 19 分别是乘客坐姿头部 (1.2m) 和站姿头部 (1.7m) 处位置的温度分布云图。从图中得出, 由于乘客的原因, 车辆下半部温度普遍增高到 28℃。客室前端温度, 约 28℃, 中部温度约 22~23℃, 均满足设计要求。

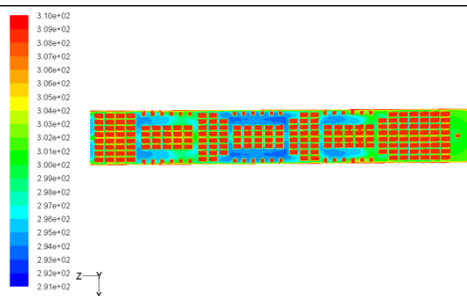


图 18 乘客坐姿头部(1.2m 处)温度分布云图

Fig.18 Temperature distribution cloud map of passenger sitting head (1.2m)

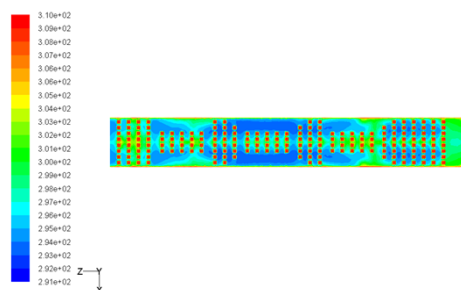


图 19 客室站姿位置头部(1.7m 处)温度分布云图

Fig.19 Temperature distribution cloud map of passenger sitting head (1.7m)

2.3 客室通风系统模拟结论

对地铁车辆空载和满载的状态下进行模拟分析。空载状态下, 乘客坐姿头部 (1.2m 处) 温度为 21℃, 乘客站姿头部 (1.7m 处) 温度为 20.5℃; 满载状态下, 受客室内部乘客的影响, 客室下半部温度普遍增高到 28℃。客室前端温度, 约 28℃, 客室中部温度约 22~23℃。在满载的状态下乘客周围的风速在 0.3~0.5m/s 左右, 未出现“静态区域”, 客室内的风速与温度的分布均能够满足在客室外环境温度为 +33℃ 时, 能保证客室内温度不高于 28℃ 的要求。并且温差不超过 6℃。满足设计要求。保证了乘客身体感到舒适。

3 地铁客室通风系统测试验证

由于理论和实际情况可能会存在差别, 良好的计算模型能够模拟客室气流组织和温度的变化趋势, 计算结果是否准确, 还需通过实际的地铁车辆进行客室送风的速度场、温度场和风量的测试。将检测和验收合格的空调机组、风道系统、废排装置根据施工图纸装配在地铁车辆上。

依据《CJ/T354 城市轨道交通车辆空调》标准中规定^[9], 在客室内的中间及两端取 3 个测温截面,

如图 20、图 21 所示位置的截面 1、截面 3、截面 5 测试温度和湿度。并在标注所有五个截面测试风速。

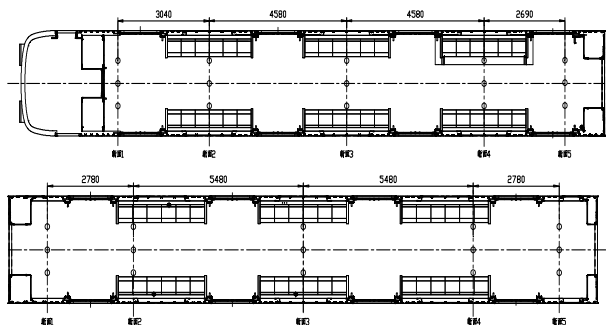


图 20 Tc 车、Mp 车俯视位置图

Fig.20 Overlooking location of Tc and Mp

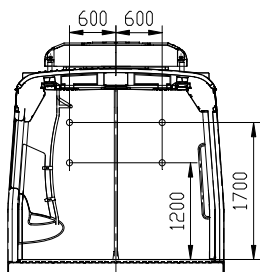


图 21 风速、温度和湿度的测试截面位置

Fig.21 Locations of test cross sections for wind speed, temperature and humidity

由于风道系统存在风阻, 因此空调机组出风量会受机外静压而发生变化, 影响实际出风量。因此在进行温度、湿度和风速测试前, 需要对组装完成的地铁车辆进行风量测试验证。

地铁车辆在组装后, 客室内的扶手、吊环等设施会对出风口风量采集产生影响, 根据空调机组送风量等于回风量与新风量之和, 因此采用此方法求得空调机组的送风量。

空调机组设置在通风模式下, 空调机组新风量如表 3 所示, 回风量如表 4 所示。

表 3 空调机组新风量测试数据

Table 3 New air volume test data of air conditioning units

项点	测试数据	项点	测试数据
1#风口平均风速	1.806m/s	2#风口平均风速	1.808m/s
Tc 车 1#空调单侧新风量	821.48m ³ /h	Tc 车 2#空调单侧新风量	822.39m ³ /h
Tc 车总新风量	3288 m ³ /h		

续表 3 空调机组新风量测试数据

项点	测试数据	项点	测试数据
1#风口平均风速	1.813m/s	2#风口平均风速	1.815m/s
Mp 车 1#空调单侧新风量	824.67m ³ /h	Mp 车 2#空调单侧新风量	825.57m ³ /h
Mp 车总新风量	3300m ³ /h		

注 1. 以地铁车辆靠近 I 位端的空调为 1#空调, 靠近 II 位置端的为 2#空调;

2. 地铁车辆关于纵向中心线对称, 因此仅对空调机组的一侧测试新风量。

表 4 空调机组回风量测试数据

Table 4 Air conditioning unit return air volume test data

项点	测试数据	项点	测试数据
Tc 车 1#空调回风量	2476m ³ /h	Tc 车 2#空调回风量	2494m ³ /h
Tc 车总回风量	4970m ³ /h		
Mp 车 1#空调回风量	2558m ³ /h	Mp 车 2#空调回风量	2543m ³ /h
Mp 车总回风量	5101m ³ /h		

Tc 车实测总风量为 8258m³/h, Mp 车实测总风量为 8401m³/h。空调机组与风道系统在车辆安装后的风量能够满足测试的需求, 可以进行温度、湿度测试。测试时, 地铁车辆外部环境满足测试的要求地铁车辆客室温度湿度测试结果, 见表 5。

表 5 温度湿度测试结果

Table 5 Temperature and humidity test results

车型	测试数据				
Tc 车	截面 1				
		1 温度/湿度		2 温度/湿度	
	1.2m	22.2℃	59.80%	22.4℃	58%
	1.7m	22℃	50.60%	22.3℃	57%
	截面 3				
		5 温度/湿度		6 温度/湿度	
	1.2m	22.2℃	60.80%	22.6℃	58%
	1.7m	22.1℃	59.40%	22.5℃	57%
	截面 5				
		9 温度/湿度		10 温度/湿度	
1.2m	22.4℃	62%	22.3℃	61%	
1.7m	22.3℃	61.40%	22.4℃	60%	

续表 5 温度湿度测试结果

车型	测试数据				
Mp 车	截面 1				
		1 温度/湿度		2 温度/湿度	
	1.2m	22℃	62.50%	22.5℃	63.90%
	1.7m	21.9℃	61.20%	22.4℃	62.20%
	截面 3				
		5 温度/湿度		6 温度/湿度	
	1.2m	21.9℃	61.90%	22.4℃	63.10%
	1.7m	21.5℃	51.30%	21.6℃	62.60%
	截面 5				
		9 温度/湿度		10 温度/湿度	
1.2m	21.4℃	62.60%	21.3℃	63.80%	
1.7m	21.3℃	62%	21.3℃	63%	

在外部环境 33.7℃的情况下，实测的结果为：Tc 车 1.2m 处平均温度 22.35℃，1.7m 处平均温度 22.27℃；Mp 车 1.2m 处平均温度 21.92℃，1.7m 处平均温度 21.67℃。与本文的模拟分析结果 1.2m 处平均温度 21℃；在 1.7m 处平均温度 20.5℃接近，满足设计要求。

采用风速仪在地铁车辆五个截面进行测试，测试结果见表 6。

根据标准要求进行的测点，其微风速均高于 0.07m/s 的要求，并且 1.7m 处的平均微风速在 0.4~0.5m/s 范围内，满足设计要求。

表 6 地铁车辆风速测试结果 (单位: m/s)

Table 6 Wind speed test results of subway vehicles(unit:m/s)

车型	截面位置	1.2m 处风速测试结果			1.7m 处风速测试结果		
		中心线左	侧中心线右侧	平均风速	中心线左	侧中心线右侧	平均风速
Tc 车	截面 1	0.42	0.35		0.42	0.35	
	截面 2	0.28	0.49		0.28	0.49	
	截面 3	0.59	0.55	0.421	0.59	0.55	0.421
	截面 4	0.25	0.34		0.25	0.34	
	截面 5	0.32	0.62		0.32	0.62	
Mp 车	截面 1	0.46	0.42		0.46	0.42	0.415
	截面 2	0.4	0.27		0.4	0.27	
	截面 3	0.58	0.49	0.415	0.58	0.49	
	截面 4	0.29	0.34		0.29	0.34	
	截面 5	0.45	0.45		0.45	0.45	

4 结论

通过对典型 B 型地铁车辆特点分析，设计出在室外环境温度为 +33℃ 时，能保证客室内温度不大于 28℃，相对湿度不大于 65% 的空调通风系统。采用有限元对空载和满载状态模拟分析，得出了客室内部的温湿度及风速分布情况。此设计方案于真实的地铁车辆上进行了空载状态下温度和风速的测试，加以验证空调通风系统设计效果，得到以下结论：

(1) 通过数值模拟的方法分析了在空载和满载的状态下，设计的 B 型空调通风系统具有在外部环境温度为 +33℃ 时，能保证客室内温度不大于 28℃，相对湿度不大于 65% 的能力。

(2) 通过数值模拟的方法分析了在空载和满载的状态下，空调通风系统在运行时，气流速度均高于 0.07m/s，未出现“静态区域”，平均微风速约为 0.4~0.5m/s，乘客身体感到舒适。

(3) 通过实车测试的方法测试空载状态下，地铁车辆温度和风速分布情况。在外部环境 33.7℃ 的情况下，实测的结果为：Tc 车 1.2m 处平均温度 22.35℃，1.7m 处平均温度 22.27℃；Mp 车 1.2m 处平均温度 21.92℃，1.7m 处平均温度 21.67℃。Tc 车 1.2m 处平均微风速为 0.385m/s，1.7m 处平均微风速为 0.421m/s；Mp 车 1.2m 处平均微风速为 0.39m/s，1.7m 处平均微风速为 0.415m/s，均满足设计要求。

在实车验证时, 测试点的风速均匀性良好, 而在地铁车辆客室数值验证计算时, 存在部分点风速过高的情况, 但占比微小, 或是网格划分引起的, 但模拟与实车测试的结果趋势及分布情况非常近似。

(4) 根据本文研究的空调通风系统, 能够实现地铁的平台化设计方案, 减少了新造地铁的设计周期, 并大幅度减少了后期的验证时间。对地铁空调通风系统的设计有着一定的工程应用借鉴价值。

参考文献:

- [1] 廖神德. 上海地铁客室冬季热舒适与空气环境调查研究[D].上海:东华大学,2016.
- [2] 刘静悦,张大林,纪兵兵.飞机座舱内空气品质计算[J].机械制造与自动化,2011,40(2):6-9,52.
- [3] 李超,张成力.石家庄地铁 3 号线客室内气流组织的数值模拟及分析[J].制冷与空调,2016,30(2):153-157.
- [4] 王斌.地铁车空调通风系统及车厢内流场数值仿真[D].大连:大连交通大学,2012.
- [5] 李超,齐朝晖,盛思思.地铁车厢内气流组织的探讨[J].制冷与空调,2009(3):109-112.
- [6] 于淼,王东屏,裘望,等.地铁车空调风道及车室内气流组织数值仿真[J].大连交通大学学报,2014,35(2):16-19.
- [7] GB 7928-2003,地铁车辆通用技术条件[S].北京:中国标准出版社,2003.
- [8] 易柯.地铁车厢内回风方式数值仿真分析[J].电力机车与城轨车辆,2012,35(2):12-15.
- [9] CJ/T354-2010,城市轨道交通车辆空调、采暖及通风装置技术条件[S].北京:中国标准出版社,2010.