

Numerical Analysis of Flow Field in Straddle-Type Monorail Air-Conditioning Duct

Yuhai Meng Liang Sun

Research Institute of China Railway Rail Transportation Equipment Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

Abstract

In order to analyze whether the air-supply air duct of the straddle-type monorail air conditioner meets the requirements, the author carried out numerical calculation of the airflow field. In this paper, a three-dimensional model of variable cross-section air duct is established. Based on the standard $k-\epsilon$ double equation turbulence model and SIMPLE algorithm, the CFD calculation is performed on the mathematical model. The calculation results show that the non-uniformity coefficient of the wind outlet is 9.5%, and the average wind speed of the air outlet is 3.5 m/s.

Keywords

straddle-type monorail; air-conditioning duct; numerical analysis; wind uniformity

跨座式单轨空调风道流场数值分析

孟玉海 孙亮

中铁轨道交通装备有限公司研究院, 中国·江苏 南京 210000

摘要

为了分析跨座式单轨空调送风风道, 出风均匀性是否满足要求, 笔者进行了风道流场数值计算。论文建立了变截面风道三维模型, 基于标准 $k-\epsilon$ 双方程紊流模型和 SIMPLE 算法, 对数学模型进行 CFD 计算。计算结果表明: 风道出风不均匀系数为 9.5%, 风道出风口平均风速为 3.5m/s, 认为出风均匀性较好。

关键词

跨座式单轨; 空调风道; 数值分析; 出风均匀性

1 引言

跨座式单轨交通系统技术成熟, 车辆技术性能优越, 在运行噪声、爬坡能力、转弯半径、线路造型及工程投资等方面均具有显著优势, 不仅适应重庆山水城市的地形特点, 在其他城市也具有十分广阔的推广和应用前景^[1-2]。重庆在中国最早运行跨座式单轨, 随后, 其它很多城市计划或已经开通运行, 如正在建设的芜湖庞巴迪单轨, 已经开通的银川花博园单轨, 拟规划的安徽蚌埠、四川广安、广州汕头和安徽淮南等城市。

空调系统是轨道交通车辆重要的系统之一, 其作用是将空调机组处理过的空气经风道送入车内。风道的功能将直接影响送风的均匀性, 从而影响乘客的舒适性, 因此, 有必要对风道送风均匀性进行数值研究。

中国各主机厂和相关学者对风道送风均匀性进行了研究,

形成了一定的方法和结论。龙静等^[3]对地铁车辆空调系统送风风道进行了分析, 并总结了不同类型的风道使用是具有一定条件, 如准静压送风风道比较适合车顶较大的车辆, 要尽可能增大主风道截面积, 同时要尽可能减小支风道送风风速; 圆管组合式软风道安装比较灵活, 适应较多车辆, 但送风阻力需要详细计算和试验; 条缝式静压风道尺寸小, 结构比较简单, 比较容易达到送风均匀。戚新秋^[4]等选取了 3 种不同角度送风风道进行理论和实验研究, 并得出以综合指标(送风压降和均匀性指标)评价送风风道热力学性能, 结果是 60° 的变截面风道综合指标最佳。肖婷^[5]等进行了变截面风管进行了研究, 认为变截面风管在一定程度上保证管内气流分布均匀并保持条形风口的静压相等, 但受管内流速限制。

以上研究包含了各种截面均匀送风风道, 基本可应用于轨道各车型的, 但对跨座式单轨风道的运用还没有经验。

由于跨座式单轨运行在山区，隧道，楼房的环境下，受限界要求以及轨道梁截面尺寸，进一步限制了车体外轮廓，限制了空调机组、风道的尺寸和布置。论文将变截面风道静压送风方案用于新设计的跨座式单轨中，合理布置空调机组和风道。

2 计算模型

2.1 简化物理模型

空调机组将处理过的空气分别送入车体对称布置的 4 个支风道，再经由风道底部若干个孔口将空气均匀输送到客室内，通过 CFD 计算得出 1/4 风道出口质量流量，出风风速，评价出风均匀性。

根据车体结构，建立 1/4 风道模型。由于风道形状较为简单，按照实际建立模型，去除风道工艺铆钉和支架，忽略工艺影响，减少计算时间。风道模型出口标识为 out1-out16，如图 1 所示。截面取风道出口几何中心位置，如图 2 所示。

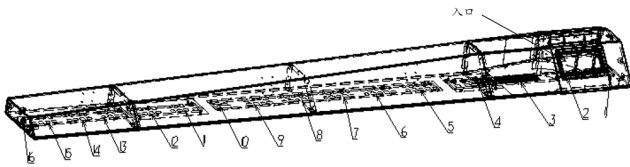


图 1 1/4 风道模型

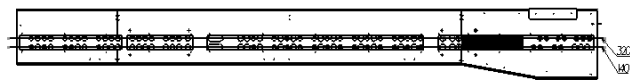


图 2 截面

2.2 边界条件和数学模型

由于风道内空气流动属于紊流运动，采用标准 k-ε 双方程模型和 SIMPLE 算法进行模拟。

采用速度入口边界条件，方向垂直于入口界面（送风风量为 5000m³/h）和压力出口边界条件（大气压力），壁面处为无滑移边界条件，风道壁面粗糙度 0.15mm。

计算中对风道内的空气进行如下假设：

- (1) 流动为低速、常温下的不可压缩流体流动。
- (2) 密度符合 Boussinesq 假设。
- (3) 流体流动为充分发展的三维稳态紊流流动。
- (4) 风道采用隔热材料，忽略外部热源的影响。

在此基础上建立其满足质量守恒、动量守恒、能量方程等在内的一套封闭方程组，其通用形式为：

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} \text{div}(\rho v\phi - \Gamma_\phi \text{grad}\phi) = S_\phi$$

式中：φ 为通用变量；Γ_φ 为广义扩散系数；S_φ 为广义源项；ρ 为空气密度；v 为速度矢量；t 为时间 [6-10]。

风道离散后模型如图 3 所示，网格质量 Orthogonal Quality=0.363。

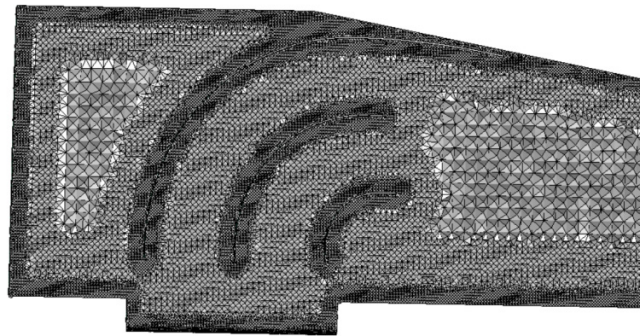


图 3 数学模型

3 计算结果及分析

根据云图可以看出，入口段风速较高，最高风速 12m/s，动压较高。出口 4 向后风道内静压较均匀，风速逐渐降低，出风量逐渐均匀。送风过程中，风道内部两个截面都产生回流现象，而且产生回流的位置也不相同，但都靠近送风前端区域，这是由风道结构所决定的。风道布置在机组两侧，送风沿纵向往车体两端送风，必然需要风向“转弯”，此过程增加内部导流板，在风速突变时减少局部阻力系数，减少回流。

回流会阻碍送风，也会损失一部风能量，进而不同位置出口的风量和风速也不相同，但送风是连续的，在满足长度方向上静压相等时尽可能改善风道内部回流现象。

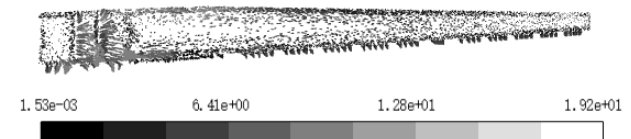


图 4 速度云图 140



图 5 静压云图 140

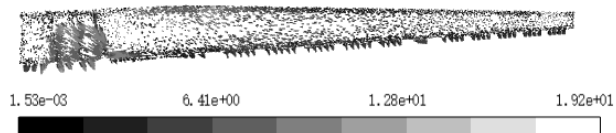


图6 速度云图 320



图7 静压云图 320

由于风道内部不同截面静压是不相同的，为了减少不同出风口风量的差值，在采用主送风道变截面时，改变不同出风口的面积。经过计算比较，得出比较优的出风量和速度，各出风口平均风速为 3.5m/s，基本符合舒适度要求。风道出口风速如表 1 所示。

表 1 出口风速

出口	风速 (m/s)	出口	风速 (m/s)
out1	4.9	out9	3.4
out2	5.2	out10	4.0
out3	1.4	out11	3.4
out4	2.0	out12	3.4
out5	3.2	out13	3.5
out6	3.3	out14	3.6
out7	3.3	out15	3.7
out8	3.4	out16	4.0

4 出风均匀性评价

根据有限元计算得出各出口质量流量，入口质量流量为 0.421kg/s，出口质量流量如表 2 所示。通过生成的质量流量坐标图，可以看出出口 3 质量流量较低，这是由于出口 3 和出口 1 分别位于出口 2 左、右两侧，而出口 1 近似于一个静压腔，出风较理想，而出口 3 的风道截面平均风速较高，出口静压很低，出风量就很少，出风口 2 在送风口斜下方，且位于导流板处，正压出风，出风量取决于开孔面积。

其余出口出风质量流量偏差在 0.001kg/s，是比较理想的状态。

出口 16 为风道端部进入司控台区域，而且占比为 1.6%，

忽略不计。

$$\text{平均值: } \bar{L} = \frac{\sum L_i}{n}$$

$$\text{均方根偏差: } \sigma_L = \sqrt{\frac{\sum (L_i - \bar{L})^2}{n}}$$

$$\text{不均匀系数: } K_L = \frac{\sigma_L}{\bar{L}} \times 100\% = 9.5\%$$

表 2 出口质量流量

出口	质量流量 (kg/s)	出口	质量流量(kg/s)
out1	-0.027	out9	-0.029
out2	-0.028	out10	-0.028
out3	-0.018	out11	-0.026
out4	-0.026	out12	-0.028
out5	-0.027	out13	-0.027
out6	-0.029	out14	-0.028
out7	-0.029	out15	-0.029
out8	-0.029	out16	-0.007

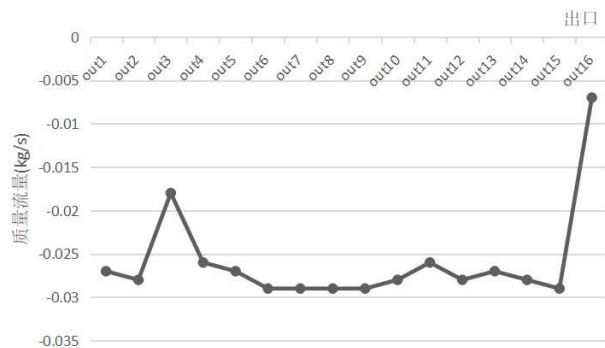


图 8 出口质量流量坐标图

5 结论

通过以上数值计算和分析，可以总结如下结论：

- (1) 风道出风口不均匀系数为 9.5%，小于 10%，趋于均匀。
- (2) 风道出口平均风速为 3.5m/s，处于比较低的水平。
- (3) 在出风“转弯”处增加多块导流板可以降低局部阻力系数，噪音也会降低；“转弯”大小取决于车体内部空间，尽可能利用。

参考文献

[1] 仲建华. 跨座式单轨交通在中国的应用和创新 [J]. 都市快轨交

- 通,2014,27(2):623-628.
- [2] 陈学峰,武衣,亢跃华等.跨座式单轨交通对中等规模城市产城融合发展促进作用的思考[J].铁道标准设计,2019,63(6):1-6.
- [3] 龙静,王书傲.地铁车辆空调系统送风风道分析[J].电力机车与城规车辆,2004(4):41-42.
- [4] 戚新秋,张仲斌等.人工环境实验室送风风道结构的计算、验证及评价[J].制冷学报,2018,39(3):100-108.
- [5] 肖婷,李林等.变截面风管均匀送风的气流组织 CFD 模拟[J].湖南工业大学学报,2016,30(2):13-20.
- [6] 于凤娇,郑学林,臧建彬.动车组空调系统风道仿真及送风均匀性优化分析[J].制冷,2018,37(3):44-50.
- [7] 孙春华,宁智,付娟等.高速列车司机室内热舒适性的评价与优化[J].铁道学报,2014,36(4):21-25.
- [8] 王东屏,兆文忠,马思纯.CFD 数值仿真在高速列车设计中的应用[J].铁道学报,2007,29(5):64-68.
- [9] 张登春.旅客列车车厢内气流分布特征与环境舒适性研究[D].上海大学,2010:1.
- [10] BERLITZ T,MATSCHKE G.Interior air flow simulation in railway rolling stock[J].Journal of Rail and Rapid Transit, 2002,216(4):231-236.