

# 某地铁车辆空调送风道出风性能仿真优化及分析

袁心怡 卞世敏\* 邵峥达 陈 博 曾 真 高非池 赵艳敏

(国网上海市电力公司, 200122, 上海//第一作者, 工程师)

**摘 要** 运用计算流体力学方法,通过仿真模型对某地铁车辆送风道出风均匀性进行检验与优化,得出在较小风道阻力下较为合理的静压挡板高度、位置及尺寸。研究发现,添加不同形式的挡风板可改变风道送风前端出风量,进而优化出风均匀性。主风道模型的阻力调节板高度为 90 mm 且距出风口边缘 30 mm 时,出风均匀性较好;扁风道模型的开孔挡板高度 40 mm 且距出风口边缘 15 mm;考虑到扁风道末端渐缩段的影响,添加了 3 块高度分别为 40 mm、30 mm、20 mm 的末端挡板,可改善出风口出风量中部位置小、末端大的状况,使扁风道出风口的出风量趋于均匀。

**关键词** 地铁车辆; 送风道; 出风性能; 计算流体力学

**中图分类号** U270.38\*3

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2021.08.030

## Optimization and Analysis of Air Outlet Performance of Certain Metro Vehicle Air-conditioning Duct

YUAN Xinyi, BIAN Shimin, SHAO Zhengda, CHEN Bo, ZENG Zhen, GAO Feichi, ZHAO Yanmin

**Abstract** Adopting CFD method, simulation model is used to test and optimize certain metro vehicle air duct uniformity, and reasonable static pressure baffle height, position and size under relatively small air duct resistance are obtained. Study found that using different types of baffle changes air outlet volume at air duct front-end, thus air outlet uniformity is optimized. When baffle height of main duct model is 90 mm, being 30 mm away from outlet edge, air outlet performs good uniformity. For flat duct model with baffle height of 40 mm, being 15 mm away from the outlet edge, considering the impact of air duct flat end tapered section, three back-end baffles of height 40 mm, 30 mm, 20 mm are added respectively, to improve the situation where air outlet is too small in the central position, and is too large at back-end, encouraging uniformity of air outlet in flat air duct.

**Key words** metro vehicle; air duct; air outlet performance; CFD

**Author's address** State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, 200122, Shanghai, China

随着人们对乘车环境要求的不断提高,为乘客提供舒适的乘车环境成为地铁相关部门的主要目标之一。研究表明,良好的空调气流组织对于热环境的舒适性相当重要<sup>[1-2]</sup>。地铁车辆空调送风系统中送风道的出风均匀性直接决定了车内气流组织的好坏,风道出风的均匀性又与其内部结构形状密切相关<sup>[3]</sup>。国内很多学者对送风道结构、送风性能及实验进行大量研究<sup>[4,5]</sup>。因此,探讨风道内部结构对出风均匀性的影响具有十分重要的现实意义。

本文以某地铁车辆为例,运用 CFD (计算流体力学)方法对送风道进行调整,对空调风道气流组织进行仿真<sup>[6]</sup>;并通过分配箱、主风道及扁风道进行优化<sup>[7]</sup>来保证风道送风均匀性,并给出了具体的优化方案及仿真前后风量对比。

## 1 送风道理论

常用的均匀送风形式有:① 改变出风条缝宽度或者孔口面积,不改变风道的截面面积;② 改变风道的截面面积,不改变出风条缝宽度或者孔口面积;③ 不改变风道的截面面积、出风条缝宽度或孔口面积,根据静压变化,通过在孔口上设置不同的阻体来实现均匀送风。

本文研究第③种送风形式。要想保证风道送风的均匀性,就要保证各风口静压变化一致。在主风道内两侧沿风道长度方向,各添加具有一定高度的静压挡板,将风道隔开为中间的主风道与两侧的支风道。气流由风道入口流入后沿主风道流动时,部分气流会越过静压挡板与风道顶板之间的缝隙进入支风道(即静压风道),并经静压风道底部出风口流出。在风道内部也要设置阻体,以使静压风道

\* 通信作者

内静压较为均匀。

## 2 初始模型及计算边界

### 2.1 物理模型及基本参数

图1为某地铁车辆送风道的原始模型图。由于风道左右对称,故计算时选用其中一侧进行出风均匀性优化。

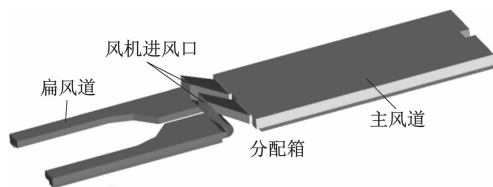


图1 风道初始模型图

空调机组的风机将处理后的空气送入分配箱,并通过分配箱将空气分别送入主风道和扁风道。风道出风口示意图如图2所示。在风道内:一部分气流经过风道的送风孔板进入送风格栅,并经送风格栅下面的出风口以一定速度均匀射入客室;另一部分气流进入侧送格栅。

本研究采用夏季工况参数。风机总风量为 $2\,500\text{ m}^3/\text{h}$ ,理想出风状况下的风道出口平均流速为 $1.1\text{ m/s}$ 。由主风道及扁风道出风口的出风面积可以得出,理想出风状况下的各风口出风量为 $0.012\,8\text{ m}^3/\text{s}$ 。在分配箱内,气流进入主风道及扁风道的理论分配比为 $1.4:1.0$ ,故主风道的理论进风量为 $1\,460\text{ m}^3/\text{h}$ ,扁风道的理论进风量为 $1\,040\text{ m}^3/\text{h}$ 。

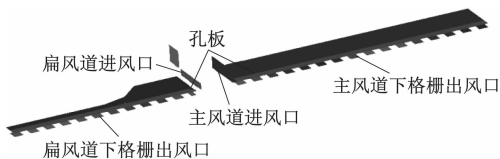


图2 风道出风口示意图

### 2.2 计算模型与边界设定

本文采用 $k-\varepsilon$ 三维紊流模型方程,并作如下简化:① 流体区的物性为常数;② 流动为稳态湍流;③ 风道进口处空气流速均匀,为总流量的平均值。

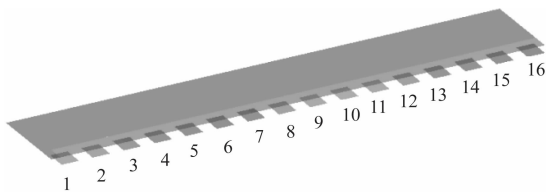
边界条件为:① 以气流入口作为计算边界,速度为 $9.0\text{ m/s}$ ,速度方向垂直于入口边界面;② 以风道底部送风短管的出口为计算出口边界,出口压力设为 $0\text{ Pa}$ ,外界压强为 $1$ 个标准大气压( $101.325\text{ kPa}$ );③ 整个风道内壁附隔热保温材料,故可将风

道各个壁面视为绝热,在计算过程中不考虑换热;④ 出风口上方为多孔板,假设其为多孔介质阶跃内部边界条件,黏性阻力系数 $\alpha = 5.45 \times 10^{-5}$ ,惯性阻力系数 $C_2 = 4.963\,1$ 。

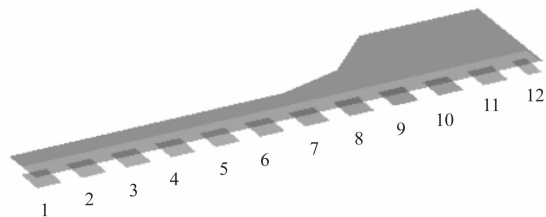
## 3 数值模拟结果

### 3.1 均匀性判断依据

为便于通过与优化方案对比来检验地铁送风道均匀性,对送风风道出风格栅口进行编号,如图3所示。由于风道左右对称,故仿真模拟时只需得出一侧的送风格栅口风量即可。



a) 主风道格栅出风口编号



b) 扁风道格栅出风口编号

图3 风口编号示意图

### 3.2 初始风道仿真结果及分析

通过仿真计算,得到初始风道各风口的仿真出风量。与理想出风状况下的理论出风量 $0.012\,8\text{ m}^3/\text{s}$ 比较,可得到不均匀系数。仿真出风量及不均匀系数如表1所示。

由表1可见:主风道及扁风道的送风均匀性较差,最高不均匀系数分别达到 $0.83$ 和 $0.98$ ;仿真出风量与理论出风量误差较大处主要集中在风道前端和末端。

风口出风量与静压有着密切联系:如风道前端动压大、静压小,则出风量小。沿着风道长度方向上,气流速度逐渐减小,动压逐渐减小,静压逐渐增大,导致风道末端出风量较大。计算可得,主风道内的仿真出风量为 $0.305\text{ m}^3/\text{s}$ ,扁风道的仿真出风量为 $0.041\,5\text{ m}^3/\text{s}$ ,分配比为 $7.4:1.0$ 。可见,初始风道的仿真分配比同理论分配比( $1.4:1.0$ )有较大差距,需要对分配箱进行优化。

表 1 主风道仿真出风量与不均匀系数			
风道	风口编号	仿真出风量/(m <sup>3</sup> /s)	不均匀系数
主风道	1	0.006 9	0.83
	2	0.012 1	0.05
	3	0.010 3	0.23
	4	0.012 6	0.01
	5	0.010 7	0.19
	6	0.013 7	0.07
	7	0.011 5	0.12
	8	0.014 8	0.14
	9	0.014 2	0.10
	10	0.015 1	0.15
	11	0.018 5	0.31
	12	0.019 4	0.34
	13	0.019 7	0.35
	14	0.021 8	0.41
	15	0.023 2	0.45
	16	0.034 2	0.63
扁风道	1	0.005 1	0.36
	2	0.005 8	0.54
	3	0.005 7	0.55
	4	0.006 3	0.50
	5	0.004 7	0.63
	6	0.003 3	0.74
	7	0.002 4	0.81
	8	0.001 8	0.86
	9	0.003 0	0.76
	10	0.003 0	0.76
	11	0.000 3	0.98
	12	0.002 6	0.96

3.3 风道优化及优化后的仿真计算结果

3.3.1 分配箱优化

通过调整人字形分流板与风道上壁面、送风口的距离来对主风道及扁风道的风量分配进行调节,不同优化方案的风量分配结果如表 2 所示。由风量分配调节情况模拟结果可知:当人字形分流板距风道上壁面 65 mm,且距风道送风口壁面为 240 mm 时(如图 4 所示),主风道的进风量为 0.40 m<sup>3</sup>/s;扁风道进风量为 0.29 m<sup>3</sup>/s;风量分配比为 1.38,接近理论分配比。

3.3.2 风道送风均匀性优化

对分配箱进行优化后,在主风道内的两侧,沿

风道长度方向上各添加一块静压挡板,图 5 为送风均匀性较好的 2 种静压挡板方案。

表 2 主风道与扁风道的风量分配结果		
分流板与上壁面距离/mm	风量分配比	
	优化前	优化后
70	7.53:1	1.11:1
65	7.12:1	1.38:1
60	6.88:1	1.45:1

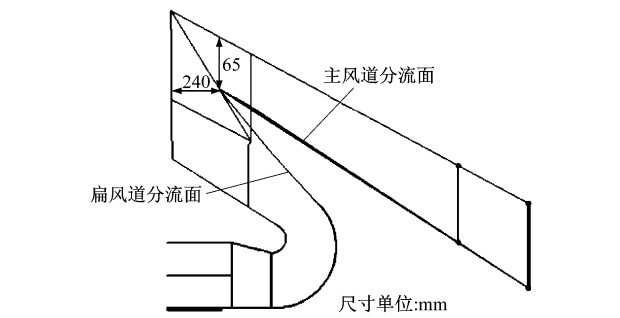


图 4 分配箱优化示意图

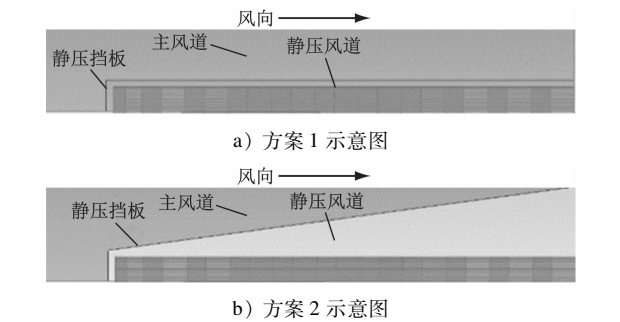


图 5 主风道优化方案示意图

图 6 为优化后主风道各出风口的出风量。从图 6 中可以看出:方案 1 和方案 2 的风道端部位置出风量虽得到了较大改善,但在风道前端靠近风机送风口处存在回流现象。这主要是因为风道前端动压大、静压小。方案 1 及方案 2 的风道不均匀系数分别为 0.38 及 0.20,故以方案 2 为基础作进一步优化。

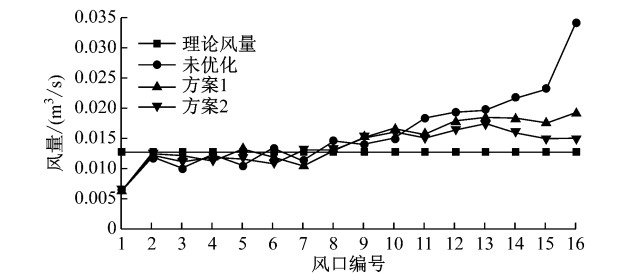


图 6 添加静压风道后风量对比图

图 7 为扁风道优化方案图。方案 3 中,静压风道形如长方体。方案 4 中,静压风道前端与进风口

成45°。

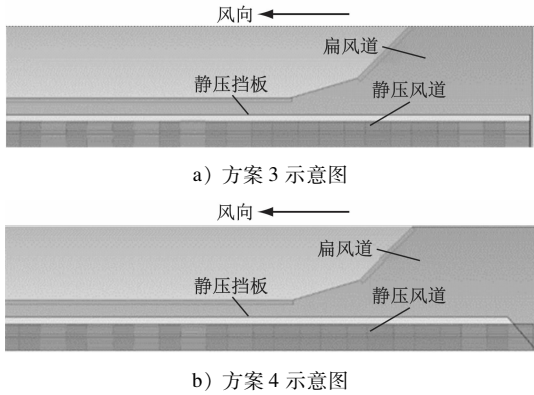


图7 扁风道优化示意图

图8为优化后扁风道各出风口的出风量。由图8可以看出,未优化时出风口出风量均低于理论风量,优化后两种方案扁风道端部出风口风量均得到提高,方案4更接近理论值。

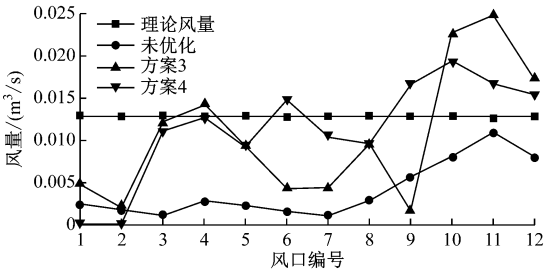


图8 添加静压风道后风量对比图

3.3.3 综合优化方案

综合上述优化内容,经过大量仿真分析,最终确认综合优化方案如图9所示。

1) 设置高度为90 mm的阻力调节板,如图9中构件①所示。主风道分为中间风道及静压风道两部分,从理论上讲,主风道内送风静压越大,气流在流动时越接近垂直于静压挡板与风道顶板之间的缝隙,进入静压风道的风量越均匀,风道出风量就越均匀。

2) 设置高40 mm、长80 mm的开孔挡板,挡板间距为180 mm,如图9中构件②所示。开孔挡板的孔间距为10 mm,孔直径为30 mm。在风道渐缩段,气流速度大、动压大,故添加开孔挡板来减弱动压,以提高此处风口的风量。

3) 在静压风道末端设置长110 mm的末端挡板,沿气流方向高度依次为20 mm、30 mm、40 mm。末端挡板可通过减小流入面积来增大动压,达到减小风量的目的。

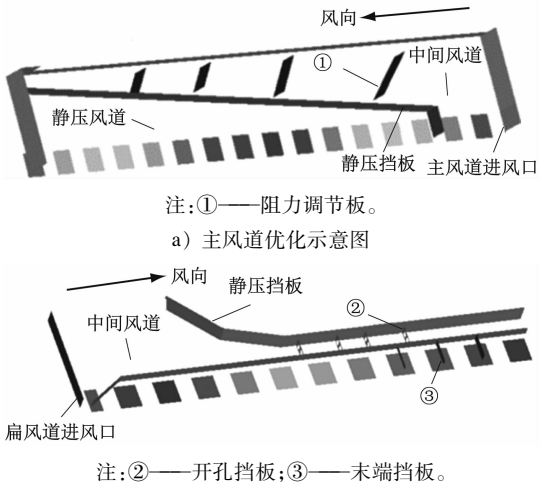


图9 风道优化方案示意图

图10为采用综合优化方案前后的出风口出风量。观察图10可知,优化后,主风道及扁风道出风口出风量均匀性得到了改善,前端风口回流现象及末端风口风量较大现象均得到解决。这说明增加阻力调节板、开孔挡板和末端挡板的优化效果很好。扁风道整体的出风口风量及出风均匀性都得到了提高。

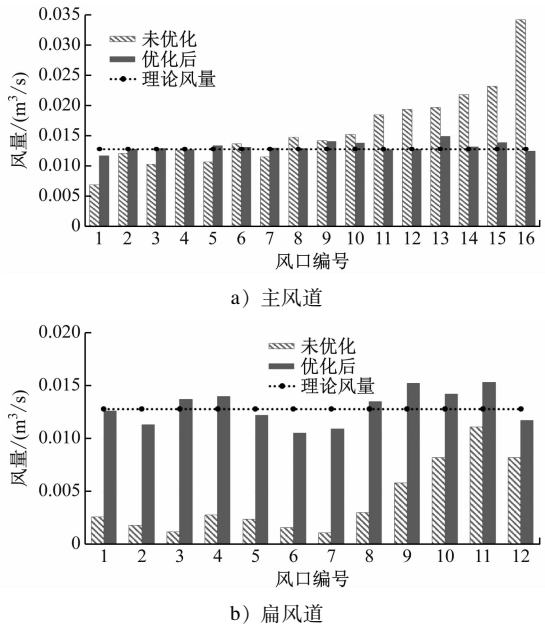
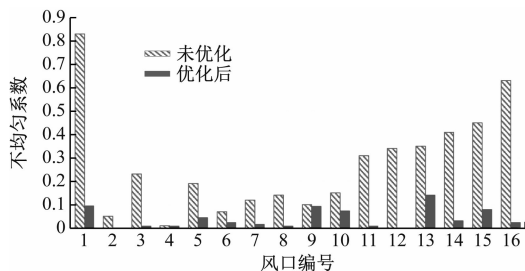


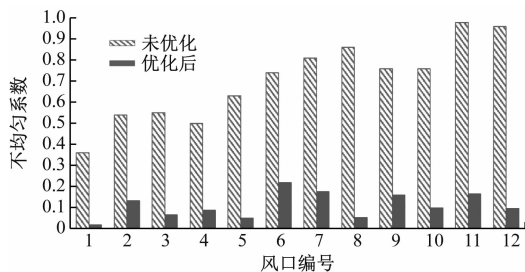
图10 优化后风道出风口出风量

图11为优化前后的风道出风口风量不均匀系数。由图11可见,优化后整个风道的出风口不均匀系数控制在0.15之内,其中主风道平均不均匀系数不超过0.05,扁风道不均匀系数不超过0.10。由此可见,风道出风均匀性得到提升,整体优化效果

较好。



a) 优化前后主风道出口口不均匀系数



b) 优化前后扁风道出口口不均匀系数

图 11 优化前后风道出口口不均匀系数

## 4 结语

地铁车辆空调送风道的出风均匀性直接决定车内气流组织的好坏,若不对其进行结构优化,将

(上接第 139 页)

## 4 结语

腾挪改造是个复杂系统的工程,涉及到规划调整、片区交通、土地利用、技术改造方案等。本文以西塋车辆段为案例,从技术角度详细阐述了改造空间受限的车辆基地腾挪改造思路及改造步骤。西塋车辆段受若干条件限制,改造分为三期,工期长达 7.5 年,既有运用库分了两次腾挪改造,施工过程中涉及到的管线、库房结构等存在大量不可预见的风险。该案例分析结果表明:通过腾挪改造的方式来实现已运营车辆基地的上盖开发在技术上是可行的;车辆基地腾挪改造前期应充分论证改造方案,在条件允许的情况下应尽量减少腾挪次数,尽量一次性新建相对完整的替代功能,一次性拆除相对完整的功能,以缩短工期、规避风险。此外,在设计过程中应针对项目具体情况做好风险分析及相应对策。

车辆段腾挪改造项目虽在技术上可行,但其工程立项、征拆安置及资产折旧处置等仍需有关部门

很难满足均匀送风要求。本文利用仿真方法对地铁送风道送风均匀性进行分析,并提出优化方案。通过采用静压风道内设置末端挡板、主风道内设置阻力调节板、扁风道内设置开孔挡板及改变进口处分流板高度等措施来调节各出风口出风量。合理的静压挡板尺寸及位置对于在较小的风道阻力下实现均匀送风具有极其重要的意义。

## 参考文献

- [1] 方贵银. 蓄能空调技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] YAU Y H,BEHZAD R. A review on cool thermal storage technologies and operating strategies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2012,16 :787.
- [3] 陈孟湘. 汽车空调[M]. 上海:上海交通大学出版社,1997.
- [4] 龙静,王书傲. 地铁车辆空调系统送风风道分析[J]. 电力机车与城轨车辆,2004 (4) :40.
- [5] 徐旭,张旭. 多孔板送风末端流量与管路阻力特性的数值模拟[J]. 制冷技术,2009 (2) :34.
- [6] 龚继如. 地铁车辆空调风道气流仿真与送风均匀性优化[J]. 发电与空调,2012 (6) :75.
- [7] 尤立伟. 地铁列车空调系统送风风道气流组织模拟及优化[J]. 制冷,2016(3) :39.

(收稿日期:2019-12-27)

大力配合。

## 参考文献

- [1] 梁广深,陈东. 上海轨道交通 1 号线上海南站站改建接驳工程设计简介[J]. 城市轨道交通研究,2005(1) :64.
- [2] 周庆灏,陈光华,余海斌. 上海轨道交通 1 号线上海南站站入地改造工程运营组织管理[J]. 城市轨道交通研究,2006(6) :57.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地铁设计规范:GB 50157—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [4] 广州地铁集团有限公司. 广州市轨道交通新线工程设计技术标准[R]. 广州:广州地铁集团有限公司,2018.
- [5] 广州地铁集团有限公司. 广州地铁既有车辆段功能优化及集约发展专题研究项目招标文件[R]. 广州:广州地铁集团有限公司,2018.
- [6] 广州地铁集团有限公司. 广州地铁一号线西塋车辆段竣工图资料[A]. 广州:广州地铁集团有限公司,2014.
- [7] 广州地铁集团有限公司. 广州市轨道交通第三期建设规划调整报告[R]. 广州:广州地铁集团有限公司,2019.

(收稿日期:2020-06-18)