

文章编号: 1001-8360(2017)03-0019-06

风挡缝宽对高速列车气动性能的影响

张 业¹, 孙振旭¹, 郭迪龙¹, 杨国伟¹, 尚克明²

(1. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190; 2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术中心, 山东 青岛 266111)

摘 要: 以 3 节车厢组成的 EMU 列车 1:8 缩比简化外形为基础, 在速度为 65 m/s 条件下, 对全封闭原始外风挡, 平整外风挡缩比后间距缝隙分别为 5、7、9 mm, 半包外风挡, 以及 5 mm 缝隙前移 27 mm 工况下的 6 种外风挡形式对列车各车厢气动性能的影响进行了研究, 并对列车各组成部分的气动力特性进行了统计和归类, 给出不同外风挡缝宽条件下各部件对列车总气动力的贡献, 详细分析风挡内部的压力和速度特性随缝宽的变化规律, 为高速列车局部减阻优化设计提供了决策依据。

关键字: 高速列车; 车厢间缝隙; 风挡; 流动控制; 空气动力学

中图分类号: U292.91 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2017.03.004

Effects of Windshield Slot Width on Aerodynamics of High-speed Trains

ZHANG Ye¹, SUN Zhenxu¹, GUO Dilong¹, YANG Guowei¹, SHANG Keming²

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. R&D Center, CSR Qingdao Sifang Co. Ltd., Qingdao 266111, China)

Abstract: Based on a 1:8 scaled model of an EMU consisting of 3 cars with simplified appearance, the impact of 6 external windshield types of enclosed, slot widths with 5, 7, 9 mm, semi-closed and 5 mm slot offsetting forward by 27 mm, on the aerodynamic performance of each car was studied at the train speed of 65 m/s. The aerodynamic characteristics of different components of the train were calculated and classified. Under the condition of different slot widths of the external windshields, the contribution of each component to the total aerodynamic force of the train was given. A detailed analysis was conducted on the change of windshield internal pressure and velocity characteristics with the change of slot width. The results are helpful to the optimized design in local drag-reduction for high-speed trains.

Key words: high-speed train; car-connecting gap; windshield; flow control; aerodynamics

风挡作为高速列车车端连接的重要部件, 其拓扑结构及连接方式对列车的气动性能、运行平稳性及旅客的乘坐舒适性有重要的影响^[1]。随着列车运行速度的提高, 空气阻力在列车总阻力中所占的比重随之增大, 列车的能耗增加, 气动噪声问题也越来越突出。这些对高速列车的外形设计提出了更高的要求。列车高速运行时, 单一结构的风挡由于在相邻车厢之间存在较大间隙, 对气流产生明显扰动因而使列车的空气阻力增加, 同时单一结构的风挡无法保证良好的密封性, 旅客乘坐舒适性较差。因此一般高速列车的风挡采用

双风挡结构, 即分为外风挡和内风挡 2 个部分^[2], 旅客通过内风挡结构在不同车厢内穿行, 同时内风挡也提高了车厢内的气密性。外风挡主要起光滑连接相邻两节车厢的作用, 合理的外风挡结构可以减小列车所受到的气动阻力, 降低气动噪声。研究表明, 风挡结构不仅影响空气阻力、气动噪声, 对列车各组成部分的气动力分配等也有较大的影响^[3-4]。高速列车外风挡主要有半封闭式和全封闭式 2 种, 半封闭外风挡在车体间连接处仍然存在一定宽度的间隙从而在风挡内部形成凹腔结构, 气流流经时会产生复杂的凹腔流动, 从而影响列车的气动性能^[5-7]。另一方面, 在对动车组高速列车 1:8 缩比模型开展的风洞试验中, 各节车厢的气动力分量需要独立测量, 因而要求试验所使用的列车模型各节车厢之间要做到相互独立, 互不影响, 于是需要

收稿日期: 2015-02-09; 修回日期: 2015-09-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)
(2011CB711101)

第一作者: 张业(1988—), 男, 山东莱芜人, 博士研究生。

E-mail: lixuezhangye@126.com

通信作者: 孙振旭(1983—), 男, 山东高密人, 副研究员, 博士。

E-mail: sunzhenxu@imech.ac.cn

将各节车厢分离开,这样在相邻两节车厢全封闭风挡处会存在一定距离的人为造成的间隙(1:8模型的间隙约为5 mm),即在风挡对称面上存在5 mm宽的缝隙,而计算模型为无缝连接的平整光滑的外风挡。缝隙宽度不同,产生的漩涡大小、强度随之不同,对列车的影响效果也不尽相同。因此,研究外风挡缝隙宽度对列车气动性能的影响,对合理设计风挡形式,进一步开展高速列车气动减阻降噪设计具有重要的意义。

目前,国内外对于高速列车风挡外形结构对列车气动性能影响的研究相对较少,对风挡缝隙宽度的研究更是寥寥无几。杨加寿等^[1]针对CRH380型动车组3节编组简化模型,在速度分别为360、420、500 km/h的条件下,通过数值计算研究了典型风挡、全封闭外风挡、无外风挡3种情况以及基于典型风挡构建的4种其他风挡形式对高速列车气动性能的影响;黄志祥等人^[8]进行了3节编组高速列车缩比模型的风洞试验,研究了半封闭外风挡和全封闭外风挡结构形式对列车空气阻力的影响;Hitoshi^[9]利用低噪声大型风洞研究了高速列车的气动噪声,其研究结果表明车辆连接处的间隙是高速列车上主要的气动噪声声源部位,通过合理设计车体连接处的外形,根据不同的外形设计安装平滑罩结构能够有效减小此处带来的气动噪声。

为进一步分析车厢间外风挡缝宽对高速列车气动性能的影响,研究气动力随缝宽的变化规律,以进一步掌握风挡形式的设计准则,本文基于3辆编组的动车组高速列车(以下简称EMU)1:8简化外形,在速度为65 m/s条件下,对缩比模型平整外风挡缝宽分别为5、7、9 mm,全封闭原始风挡,半包外风挡,以及5 mm缝宽风挡偏置1/3工况下6种风挡形式进行了数值研究,并对列车整体气动阻力、各车厢气动力特性以及风挡内部压强的差异进行了对比分析,得到了外风挡缝宽对列车气动性能的影响规律。

1 计算模型与网格

1.1 整车模型

本文以EMU动车组1:8缩比3辆编组简化外形为研究对象,三编组列车共计2组风挡,编号为Shield-1、Shield-2。为减小计算量,忽略门窗、受电弓等部件对风挡气动性能的影响。由于车体底部存在转向架、车轮等结构,外形十分复杂,同时列车贴近地面运行,地面效应^[10]影响十分明显,因此,车体底部外形会对列车的气动性能产生很大影响^[5],同时考虑到风挡所在位置离转向架较近,转向架对风挡附近流场尤其是风挡底部干扰作用明显,因而计算外形保留了转

向架及侧罩裙板结构,共计6个转向架,编号分别为Bogie₁~Bogie₆,见图1。

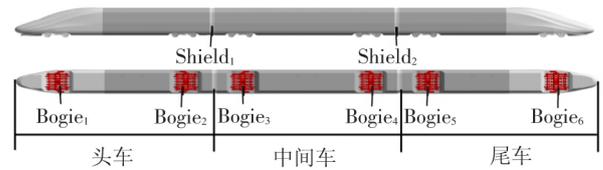


图1 列车计算外形

EMU3节编组车型的外形参数分别为:头车、尾车长度均为26.5 m,中间车长度为25 m,头、尾车几何外形完全相同。头车流线型部分长度为12 m,高度为4.05 m,宽度为3.38 m,横截面积为11.942 m²,见图2。

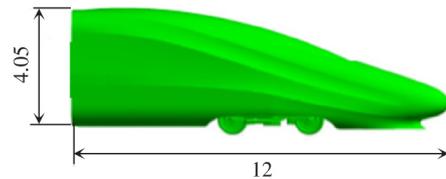


图2 列车头部外形(单位:m)

1.2 风挡模型

风挡模型包括平整外风挡缝宽分别为5、7、9 mm,全包原始外风挡,半封闭外风挡以及5 mm缝隙偏置1/3,共计6种外风挡模型;内风挡均采用原始模型保持不变,见图3。每组外风挡均由2个对称的单侧风挡组成,缝隙宽度为2个单侧外风挡之间的间隔宽度。其中,EMU列车原始外风挡为全封闭风挡,真实全封闭风挡与车厢的连接并不是平整光滑连接,计算时采用真实全封闭风挡外形以有效反应风挡结构对列车气动性能的影响。5、7、9 mm缝隙均位于风挡对称面上,5 mm偏置外风挡为保持风挡位置不变,将风挡上缝隙的位置相对风挡对称面前移1/3,风挡的1:8计算模型宽81 mm,前移1/3即27 mm左右。设置偏置模型的目的是为对比研究风挡缝隙所处相对位置对风挡气动性能的影响。为准确捕捉风挡内部的流动情况,对风挡附近网格进行了加密处理,见图4。6种模型的整体网格量均在4 500万左右。

1.3 计算域

计算域:选取列车高度 H 为特征长度,来流方向取 $30H$,出口方向取 $60H$,外场高度取 $30H$,宽度在列车左右两侧对称各取 $30H$,见图5。来流速度为 $V=65$ m/s,远场压力取为1个大气压,温度为 $T_{\infty}=288$ K,参考面积取列车横截面面积。由于高速列车风洞试验设置了路基,为了与试验结果进行对比并更加精确地模拟地面效应的影响,计算模型同样设置了

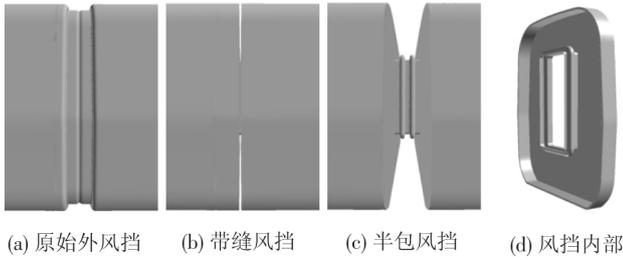


图 3 典型外风挡模型

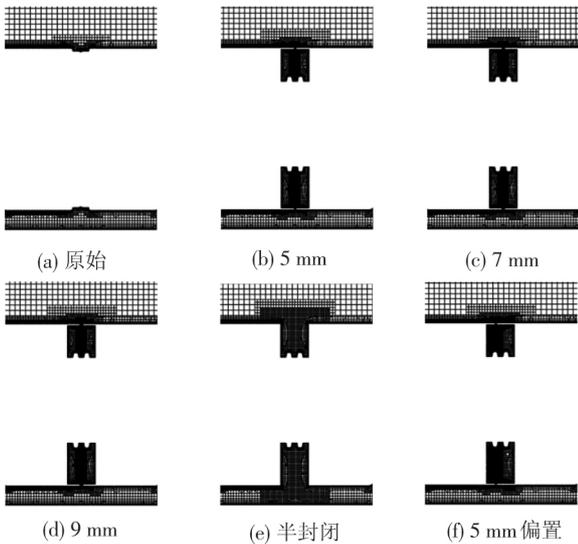


图 4 风挡网格加密示意图

路基,见图 5。

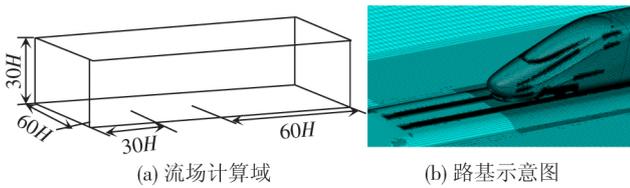


图 5 流场计算区域及路基示意图

2 计算方法

本文所研究的高速列车运行速度为 65 m/s,马赫数为 $Ma=0.191$,空气的压缩效应对列车阻力有一定的影响。因此,流场计算方法采用基于格心格式有限体积法的三维定常可压缩雷诺平均 N-S 方程,空间离散格式采用 Roe 格式,时间离散采用 LU-SGS 离散方法^[11],湍流模型采用 $k-\omega$ SST 模型^[12],它是一种在工程上得到广泛应用的混合模式,在近壁面保留原始 $k-\omega$ 的模型,在远离壁面的地方应用了 $k-\epsilon$ 模型。为控制物面处的边界层网格数量并保证流场计算精度,在壁面处使用了标准壁面函数^[13]。

边界条件:由于采用了可压缩计算模型,因此,远场边界通过引入与边界垂直的一维无黏流动的 Riemann 不变量处理,即无反射边界条件。流入边界、流

出边界和顶部边界均为远场边界条件,车体为无滑移固壁边界条件。

3 结果分析

3.1 整车气动特性

列车的气动阻力与列车运行产生的能耗直接相关,而列车受到的升力尤其是尾车的升力将影响运行稳定和乘坐的舒适性,因而气动阻力系数 C_d 和升力系数 C_l 是衡量列车气动性能的重要参数,对于分析比较不同模型的气动特性具有重要意义。 C_d 和 C_l 计算

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (1)$$

式中: D 为气动阻力; L 为升力; ρ 为空气来流密度; A 为列车迎风面积,即横截面面积。

气动阻力 D 的计算式为

$$D = \sum_f (f_f^p + f_f^s) \cdot n_f \quad (2)$$

式中: f_f^p 和 f_f^s 为列车表面网格单元 f 所受的压力矢量和剪切力矢量; $n_f=(1,0,0)$,表示气动阻力与列车运行速度方向相反。由式(2)可以看出,气动阻力 D 可分为两部分:摩擦阻力和压差阻力,其中摩擦阻力的计算方法为

$$f_{\text{shear}} = \sum_f f_f^s \cdot n_f = - \sum_f (T_f \cdot a_f) \cdot n_f \quad (3)$$

式中: T_f 为列车表面网格单元的剪切应力张量; a_f 为列车表面网格单元的面积矢量。

压差阻力的计算方法为

$$f_{\text{pressure}} = \sum_f f_f^p \cdot n_f = \sum_f -(p_f - p_{\text{ref}}) \cdot a_f \cdot n_f \quad (4)$$

式中: p_f 为列车表面网格单元受到的压力; p_{ref} 为流场计算时的参考压力。

对应气动阻力系数 C_d 可表示为

$$C_d = C_d^p + C_d^s \quad (5)$$

式中: C_d^p 为压差阻力系数; C_d^s 为摩擦阻力系数。

表 1 给出了 6 种模型对应的列车各部分气动阻力系数 C_d 。从表 1 可以看出,整车气动阻力的大小顺序为:平整有缝风挡 < 全包原始风挡 < 半包风挡。5、7、9 mm 缝隙风挡整车气动阻力系数分别比原始风挡减小了 4.44%、5.39%、4.60%,比半包风挡分别减小了 5.43%、6.38%、5.60%。

根据 5、7、9 mm 缝隙风挡的统计结果可知,风挡缝隙的存在改变了列车各部分的阻力分配。缝宽增加,头车阻力系数减小,尾车阻力系数增大。中间车阻力受第一风挡下游壁面以及第二风挡上游壁面综合影

响,因而中间车阻力系数随缝宽的变化规律不明显。

为详细分析气动阻力的来源构成,图 6、图 7 分别给出了 3 种缝宽风挡的各节车压差阻力系数 C_{d1} 和摩擦阻力系数 C_{d2} 对比情况,从图中可以看出,3 种模型各节车摩擦阻力系数基本相同,压差阻力系数有明显的差别且分布规律与总气动阻力的规律一致,因而风挡缝隙改变列车气动阻力分配主要改变压差阻力。

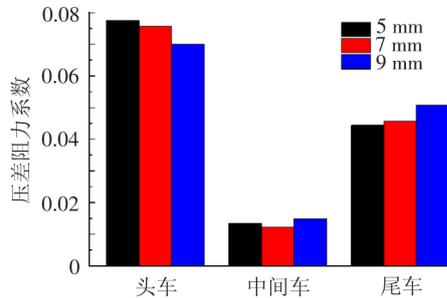


图 6 不同模型压差阻力系数 C_{d1} 对比

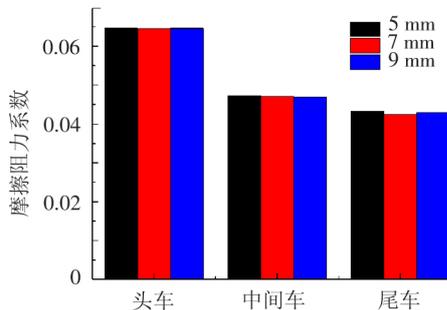


图 7 不同模型压差阻力系数 C_{d2} 对比

表 1 不同模型各节车气动阻力系数 C_d 分配

| 风挡模型 | 原始 | 5 mm | 7 mm | 9 mm | 半封闭 | 5 mm 偏置 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 头车 | 0.129 2 | 0.142 2 | 0.140 2 | 0.134 6 | 0.134 5 | 0.140 9 |
| 中间车 | 0.066 5 | 0.060 7 | 0.059 4 | 0.061 8 | 0.076 0 | 0.055 8 |
| 尾车 | 0.108 4 | 0.087 7 | 0.088 1 | 0.093 7 | 0.096 7 | 0.093 9 |
| 总阻力 | 0.304 1 | 0.290 6 | 0.287 7 | 0.290 1 | 0.307 3 | 0.290 7 |

与原始全封闭风挡相比,有缝风挡的头车阻力系数均高于原始风挡,中间车和尾车的阻力系数均明显小于原始风挡。半包风挡可看做缝宽增大的极限情况,与 9 mm 对比发现,两者头车阻力系数基本相同,中间车和尾车的阻力系数半包风挡要明显高于 9 mm 缝宽风挡。对于原始风挡,5、7、9 mm 缝隙风挡,半包风挡的比较可知,风挡缝宽增大至一定程度时,阻力系数反而会有所上升,因此需要合理设置缝隙宽度以获得较好的气动性能。

5 mm 缝隙风挡与 5 mm 缝隙偏置 1/3 风挡的计算结果对比发现,偏置风挡的中间车阻力系数减小 8.07%,尾车阻力系数增大 7.07%,但总气动阻力计算

结果基本相同。因此小范围内改变风挡缝隙的相对位置同样影响列车的阻力分配但对于列车总气动阻力的影响不大。

表 2 给出了 6 种模型对应的尾车升力系数。在无横风条件下,尾车的气动升力减小轮轨之间的黏着力,导致列车尤其是尾车运行不稳定,不仅影响旅客的乘坐舒适性,同时过大的升力容易导致列车脱轨,严重影响行车安全^[16]。从表 2 中可以看出,尾车升力系数的大小顺序为:半包风挡 < 有缝风挡 < 全包原始风挡。风挡处缝隙的存在减小了尾车的气动升力,5、7、9 mm 缝隙风挡尾车升力系数分别比原始风挡减小了 13.07%、13.37%、23.77%,风挡缝宽增加,尾车升力呈现减小的趋势,综合表 1 的计算结果,合理调整风挡缝宽可以获得相对较小的整车气动阻力和尾车升力。

表 2 不同模型尾车升力系数 C_l

| 风挡模型 | 原始 | 5 mm | 7 mm | 9 mm | 半封闭 | 5 mm 偏置 |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 尾车 C_l | 0.067 3 | 0.058 5 | 0.058 3 | 0.051 3 | 0.038 0 | 0.056 9 |

3.2 风挡影响分析

3.2.1 内部压力特性

风挡缝隙的存在对列车阻力、尾车升力均有较明显的影响,因而有必要对风挡内部的气动特性进行进一步的研究。

图 8 给出了不同模型第一组风挡压力分布情况。

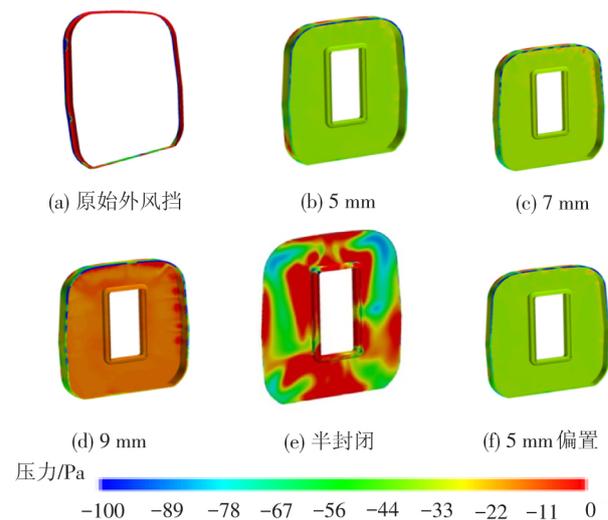


图 8 风挡压力分布图

全包外风挡表面以正压为主,5 mm 风挡内部为负压,内表面平均压强为 -36.16 Pa,7 mm 风挡和 9 mm 风挡内表面平均压强分别为 -30.20 Pa 和 -12.19 Pa,半包风挡表面既有负压区也有正压区。全包外风挡表面为正压,宏观上对风挡产生推力的作用,有缝风挡内部以负压为主,宏观上表现为吸力。缝隙宽度增大,内部负压减小,这就是缝宽增加,头车阻力系数减小,尾车阻力系数增加的内因。

3.2.2 相关试验结果

国内外关于高速列车的风洞试验较多^[8,14-15],为进一步说明风挡内部的压力特性,将内部压力的计算结果与 EMU 动车组列车 1:8 缩比模型进行的风洞试验结果进行了对比。

试验条件:试验以稳动压方式运行,动压 $q = 2\ 366\ \text{Pa}$,对应风速 $65\ \text{m/s}$,以列车宽度为参考长度的雷诺数 $Re = 1.75 \times 10^6$ 。试验模型及安装见图 9,测点分布见图 10。

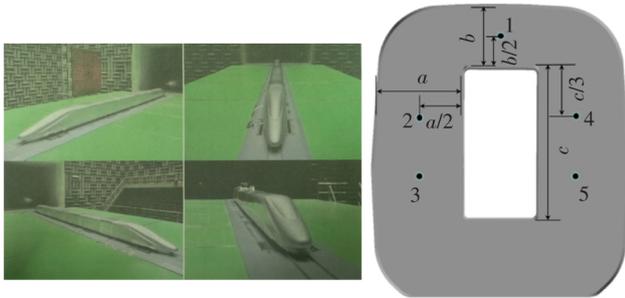


图9 模型在风洞中的安装 图10 测点布置示意图

5 mm 缝宽风挡的试验模型与计算模型相同,见图 3(b)。在风速 $65\ \text{m/s}$ 的条件下,试验模型风挡内部表面 5 个测点的压力值和相同位置处计算值对比见表 3。

从表 3 中可以看出,风挡内部压力的计算值与试验值基本吻合,相对误差在 5% 以内。同时,5 个测点处的压力值差别不大,结合图 8 可知,与半封闭风挡比较,5、7、9 mm 缝隙风挡的内表面压力分布较为均匀,这是由于缝隙较小限制了流进风挡内部的气流,使得内部流速较小且均匀。

表 3 试验压力测量值与计算值

| 测点 | 试验值/Pa | 计算值/Pa | 测点 | 试验值/Pa | 计算值/Pa |
|----|--------|--------|----|--------|--------|
| 1 | -35.41 | -34.68 | 4 | -37.32 | -37.05 |
| 2 | -37.60 | -36.72 | 5 | -37.43 | -36.58 |
| 3 | -36.14 | -35.77 | | | |

3.2.3 风挡内部速度特征

图 11 以第二组风挡为例给出了 5、7、9 mm 以及半包风挡内部流线图,可以看出,气流经过缝隙进入风挡内部流速明显下降并伴随着旋涡的产生,流动非常复杂。进入风挡内部的气流流速随着缝宽的增加而增大。气流在风挡内部的复杂流动是影响列车各节车气动力分配的重要原因。

图 12 给出了 $x = -22, z = 0.515\ \text{m}$ 处列车纵剖面中心线上方的气流在 z 轴方向上的速度分量 V_z 。两组风挡的缝隙分别位于 $x = \pm 1.630\ \text{m}$ 处。从图 12 中可以看出,对于缝隙宽度为 5、7、9 mm 的风挡,

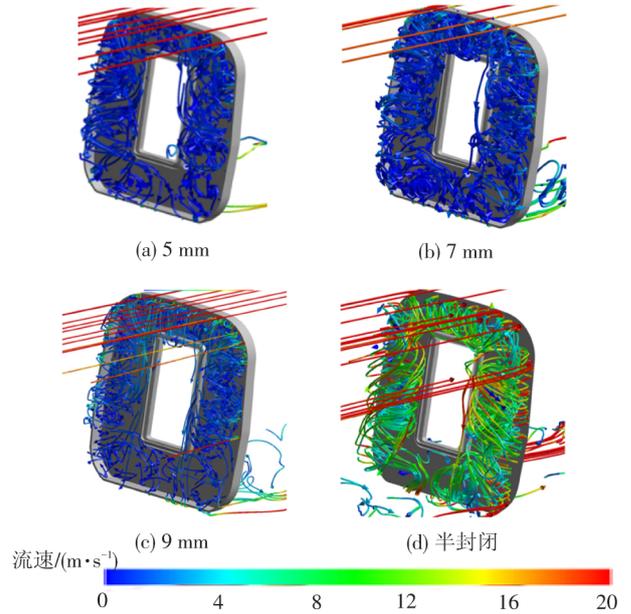


图11 风挡内部流线图

气流流经缝隙上方时速度沿 z 轴负方向的分量增加,形成明显的局部峰值,这说明当风挡开有缝隙时,对气流产生较强的抽吸作用;对于半包风挡,由于风挡两部分之间间距较宽,气流流经间隙时沿 z 轴负方向的分量增加,之后由于风挡后半部分的影响在 $+z$ 方向的速度分量明显增大,离开风挡区域气流的流速较小且均匀。

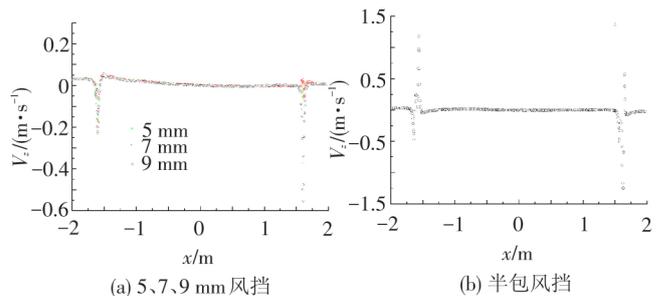


图12 $z=0.515\ \text{m}$ 纵剖面中心线速度分量 V_z

4 结论

本文分析解释了风洞试验与实际模型的阻力结果差异及带缝风挡的内部流动特性,同时得到了以下规律:

(1) 开缝大小对各车阻力分配影响较为显著,外风挡缝隙宽度越大,头车阻力逐渐变小,而尾车阻力逐渐变大,各车阻力越趋于均匀。风挡缝隙宽度对中间车的影响不如头尾车的规律明显,其原因可能为中间车前后两端均连接有风挡,两端的风挡内部空气流动共同作用于中间车的结果。

(2) 当开缝口在风挡处的位置发生偏移时,各节车厢受力也会发生变化,但相同开缝口大小工况整体

阻力值比较接近。

(3) 半包情况下,各车阻力最为平均,尾车升力最小,但总体阻力值也最大。

(4) 平直风挡在中间存在小缝时,风挡内部的压力均为负压。缝宽增加,负压值减小,内部流速增大。有缝风挡有利于减小尾车升力,且缝宽越大对减小尾车升力的作用越明显。

(5) 全封闭原始风挡由于外表面不平整,受压差阻力影响,使得列车总气动阻力偏大。

参考文献:

- [1] 杨加寿, 蒋崇文, 高振勋, 等. 车厢间风挡形式对高速列车气动性能的影响[J]. 铁道学报, 2012, 34(11): 29-35.
YANG Jiashou, JIANG Chongwen, GAO Zhenxun, et al. Influence of Inter-car Wind-shield Schemes on Aerodynamic Performance of High-speed Trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(11): 29-35.
- [2] 王兴伟, 朱闰平, 缪惠勇, 等. 旅客列车风挡的发展方向[J]. 特种橡胶制品, 2014, 35(2): 79-84.
WANG Xingwei, ZHU Runping, LIAO Huiyong, et al. The Development Direction of Passenger Train Windshield[J]. Special Purpose Rubber Products, 2014, 35(2): 79-84.
- [3] 刘珍. 高速列车风挡气动特性及气动疲劳强度研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [4] 黄志祥, 陈立, 蒋科林. 高速列车模型编组长度和风挡结构对气动阻力的影响[J]. 实验流体力学, 2012, 26(5): 36-41.
HUANG Zhixiang, CHEN Li, JIANG Kelin. Influence of Length of Train Formation and Vestbule Diaphragm Structure on Aerodynamic Drag of High Speed Train Model[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(5): 36-41.
- [5] 姚拴宝, 郭迪龙, 杨国伟, 等. 高速列车气动阻力分布特性研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(7): 18-23.
YAO Shuanbao, GUO Dilong, YANG Guowei, et al. Distribution of High-speed Train Aerodynamic Drag[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(7): 18-23.
- [6] 单魏, 邓海, 王金田, 等. CRH3 型高速动车组空气动力学阻力特性优化设计[J]. 铁道车辆, 2012, 50(2): 1-3.
SHAN Wei, DENG Hai, WANG Jintian, et al. The Optimization Design of Aerodynamics Resistance Characteristics of CRH3 High Speed Multiple Units [J]. Rolling Stock, 2012, 50(2): 1-3.
- [7] 张淼, 熊红兵. 高速列车部件对整车气动力的影响分析[J]. 制造业自动化, 2011, 33(4): 202-204.
ZHANG Miao, XIONG Hongbing. Effects of Different Components on the Aerodynamics of High-speed Train[J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(4): 202-204.
- [8] 黄志祥, 陈立, 蒋科林. 高速列车减小空气阻力措施的风洞试验研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(4): 16-21.
HUANG Zhixiang, CHEN Li, JIANG Kelin. Wind Tunnel Test of Air-drag Reduction Schemes of High-speed Trains [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(4): 16-21.
- [9] HITOSHI, SHIRAISHI, 周冬妍. 新干线高速试验列车车辆间平滑罩的改进[J]. 国外铁道车辆, 2010, 47(1): 40-44.
HITOSHI, SHIRAISHI, ZHOU Dongyan. Improvement of Smooth Covers Between Vehicles for Shinkansen High Speed Test Trains [J]. Foreign Rolling Stock, 2010, 47(1): 40-44.
- [10] 孙振旭, 郭迪龙, 杨国伟, 等. 高速列车地面效应数值模拟研究[J]. 计算物理, 2013, 30(1): 61-69.
SUN Zhenxu, GUO Dilong, YANG Guowei, et al. Numerical Study on Ground Effect of High Speed Trains [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2013, 30(1): 61-69.
- [11] 姚拴宝, 郭迪龙, 杨国伟. 基于 GA-GRNN 的高速列车头型三维优化设计[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(11): 1 283-1 294.
YAO Shuanbao, GUO Dilong, Yang Guowei. Three-dimensional Aerodynamic Optimization Design of High-speed Train Nose Based on GA-GRNN [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(11): 3 118-3 130.
- [12] MENTER F R. Zonal Two Equation K-W Turbulence Models for Aerodynamic Flows [J]. AIAA Paper, 1993, 2906(1): 1993.
- [13] BLAZEK J. Computational Fluid Dynamics Principles and Applications [M]. London: Elsevier Ltd., 2005: 204-210.
- [14] BELL J R., BURTON D, THOMPSON M, et al. Wind Tunnel Analysis of the Slipstream and Wake of a High-speed Train [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 134(1): 122-138.
- [15] BAKER C J. The Flow around High Speed Trains [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(1): 277-298.
- [16] 姚拴宝, 郭迪龙, 孙振旭, 等. 基于 Kriging 代理模型的高速列车头型多目标优化设计[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 43(2): 186-200.
YAO Shuanbao, GUO Dilong, SUN Zhenxu, et al. Multi-objective Optimization of the Streamlined Head of High-speed Trains Based on the Kriging Model [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(12): 3 494-3 508.

(责任编辑 何 芳)