

文章编号: 1001-8360(2012)07-0018-06

高速列车气动阻力分布特性研究

姚拴宝¹, 郭迪龙¹, 杨国伟¹, 李明高²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国北车唐山轨道客车责任有限公司产品研发中心, 河北唐山 063000)

摘 要: 针对由 8 辆车组成的 CRH3 型动车组的实际外形, 生成约 1.6 亿个计算网格, 采用大规模并行计算, 模拟单列高速列车在明线轨道上以 350 km/h 速度运行时的气流流场, 并对列车各组成部分的气动阻力特性进行统计和归类, 给出各部件气动阻力对列车总气动阻力的贡献, 为高速列车局部减阻优化设计提供参考。

关键词: 高速列车; 复杂外形; 气动阻力; 数值模拟

中图分类号: U238 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2012.07.003

Distribution of High-speed Train Aerodynamic Drag

YAO Shuan-bao¹, GUO Di-long¹, YANG Guo-wei¹, LI Ming-gao²

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

2. Product Research and Development Center, Tangshan Railway Vehicle Co., Ltd, Tangshan 063000, China)

Abstract: For the real configuration of CRH3 with the head + six carriages + tail train combination running at 350 km/h in the open air, the flow field was massively parallel-simulated with 160 million of computational grids. The aerodynamic drag of various components was calculated and the component drag contribution to the total train drag was analyzed. The results are helpful to local drag-reduced optimization.

Key words: high-speed train; complex shape; aerodynamic drag; numerical simulation

列车贴近地面运行, 长径比远大于其他交通工具, 其运行速度也已达 300 km/h 以上, 空气阻力分布特性与汽车、卡车或飞机相比更为复杂^[1-10]。列车的空气阻力特性关系到列车的提速和列车的节能环保能力, 是高速列车空气动力特性研究中的重要部分。对于列车阻力的研究, 一直以来人们都沿用 1926 年发表的 Davis 公式^[1]及后来的修正形式。这些公式的统一形式为

$$R = A + (B_1 + B_2)V + CV^2$$

式中: R 为列车运动总阻力; V 为列车相对于静止空气的速度; A 为滚动机械阻力; B_1 为其他机械阻力, 包括传递损耗和制动阻力; B_2 为空气动量阻力; 公式的最后一项为列车所受的外部气动阻力, 系数 $C = \frac{1}{2\rho SC_D}$, 其中: ρ 为空气密度, S 为列车的迎风面积, C_D 为阻力系数。

当传统列车速度为 120 km/h 时, 空气阻力约占

总阻力的 40%; 头部长度稍大于 5 m 的流线型动车组, 当其速度为 300 km/h 时, 空气阻力可以达到总阻力的 85%; 头部长度在 10 m 左右且流线型程度非常高的动车组, 当其速度为 300 km/h 时, 空气阻力占总阻力的 75%^[6]。由此可见, 高速列车气动阻力分布的研究对有效进行气动减阻起着至关重要的作用。本文将以此为出发点, 着重探讨列车及其各主要部件的气动阻力分布特性, 为高速列车的减阻设计提供参考。

由于列车的头车、中间车、尾车以及在空调整流罩、受电弓、车厢连接处、转向架等部位的气动阻力不同, 因此通过对列车各部分气动阻力的分解, 可为找到减阻途径提供帮助, 以达到降低列车总气动阻力、减少能耗、提高列车运行速度的目的。目前国内外文文献^[1-3, 11-14]大都是针对由 3 辆车组成的简化外形的动车组(即不考虑空调装置、受电弓、车厢连接处、转向架等)进行的列车空气动力特性研究。高速列车作为一种大长径比交通工具在地面高速运行时, 其长度及主要组成部件对列车的气动阻力有很大影响, 对短编组简化外形进行研究, 很难得到满足工程要求精度的阻力分布情况。为此, 本文以 CRH3 型动车组为样板,

收稿日期: 2011-04-21; 修回日期: 2011-08-05
基金项目: 国家科技支撑计划(2009BAG12A00)
作者简介: 姚拴宝(1986—), 男, 河南濮阳人, 硕士研究生。
E-mail: ysbao566@163.com

对速度为 350 km/h、由 8 辆车组成、实车大小及外形的动车组模型进行数值模拟,并分析各部分的气动阻力分布及其在列车总气动阻力中所占的比例。

1 计算模型与网格划分

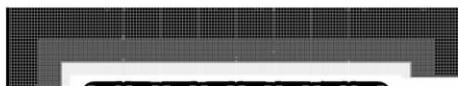
1.1 计算模型

计算模型为由 8 辆 CRH3 型车组成的动车组,见

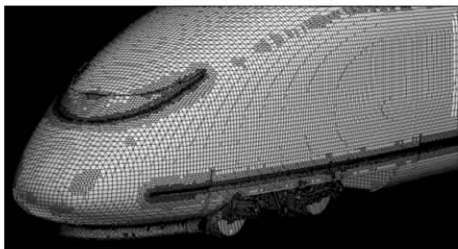


图 1 CRH3 型动车组构成分布示意图

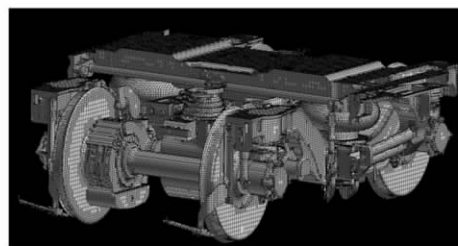
30h、车尾后 30h、高度 30h 及左右各 30h 的范围为计算区域。为了更准确地计算车体表面摩擦阻力,在车体、转向架表面以及地面生成边界层网格。由于网格数量太大,为保证网格质量并提高网格划分的效率,采用分区域划分网格的方法,每辆车为一个区域,网格量约为 2 000 万个,各区域通过交接面进行连接。考虑到车身附近流场对车体气动力影响较大,故对车体周围进行网格加密,为更为准确地模拟各部件的流场特征,对列车转向架、受电弓和车体的尾流区进行单独加密,计算总网格数约 1.6 亿个单元,列车网格、头车和转向架局部网格分布示意图如图 2。依托中国科学院力学研究所的计算力学平台进行计算,使用 256 个 CPU,计算用时约 150 h。



(a) 整体网格分布



(b) 头车网格分布



(c) 转向架网格分布

图 2 整体网格、头车和转向架局部网格分布图

图 1。该动车组由 4 辆动车与 4 辆拖车组成,从头车到尾车的编号依次为头车、中间车 1、中间车 2、中间车 3、中间车 4、中间车 5、中间车 6、尾车。其中头车、中间车 2、5 和尾车为动车,其余为拖车,受电弓安装在中间车 1 和 6 上。

1.2 计算区域及网格划分

计算区域:以列车高度 h 为特征长度,车头前

2 计算方法

本文使用 STAR-CCM+ 流体计算软件进行流场计算。控制方程为三维定常可压缩 N-S 方程;离散方法采用基于格心格式的有限体积法;空间离散格式采用 Roe 格式,时间离散采用 LU-SGS 隐式离散方法^[15];湍流模型为 $k-\omega$ SST 模型;为控制边界层的网格数量并保证计算精度,在壁面处使用了标准壁面函数^[16]。计算参数为:列车运行速度为 350 km/h,远场压力取 101 325 Pa,参考温度为 288 K,列车横断面参考面积为 10.8 m²。

边界条件:由于高速列车运行速度处于亚音速范围,此时,远场边界一般通过引入与边界垂直的一维无黏流动的 Riemann 不变量来处理^[17],即无反射边界条件。因此,本文计算时,进口、出口及外场均设置为远场无反射边界条件,车体为无滑移固壁边界条件。同时,计算过程中包含了对地面效应的模拟,设地面为移动壁面,移动速度与来流速度相等。受网格量的限制,本文未考虑路基对高速列车气动阻力的影响,将地面模型假设为光滑水平地面。

3 结果与分析

3.1 车辆的气动阻力分析

本文所选用列车运行工况为列车的稳态运行。列车稳态运行,是指列车在平直轨道、明线、非会车工况下及静止风环境、周围空旷等特定条件下单向匀速行驶^[6]。由于列车为细长体,在稳态行驶时各辆车的流场有很大不同,所受阻力差异也很大,通过计算各辆车气动阻力分布,可为列车局部减阻优化提供依据。虽是稳态运行,列车周围流场仍表现出很强的非定常性。由于网格量巨大,计算时间受到限制,本文未考虑列车流场的非定常性,但即便使用定常算法,仍可模拟列车表面非连续区域(如转向架、受电弓、车厢连接处等)及

尾流区引起的非对称的涡脱落,从而导致列车阻力系数无法收敛到一个稳定的定常解。当迭代次数达到一定值时,阻力系数在一个较小范围内呈现出准周期性的振荡。本文所论述的阻力系数均为其在呈现准周期性振荡时若干周期的平均值。

图 3 为列车切片阻力系数分布。将整列车每隔 0.5 m 分割为一段,通过对每一段的阻力系数进行积分,得到各段的总阻力系数,最后将各段总阻力系数值进行曲线拟合,即可得到列车切片阻力系数分布。从图 3 可见,在头车、尾车、车厢连接处、受电弓和空调整流罩及限压电阻区域,整体流场分布不均匀,导致压力波动很大,列车阻力增加。因此,在列车的减阻优化过程中,应减小车身表面的凹凸,使车身尽量光滑。

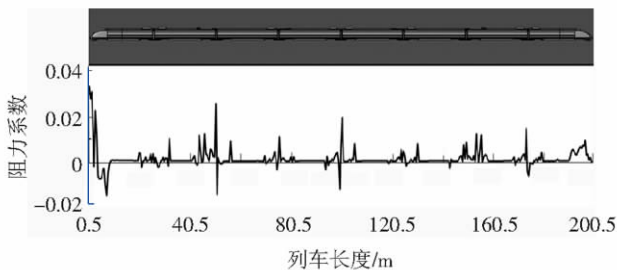


图 3 列车切片气动阻力系数分布

将 8 辆车组成的 CRH3 型动车组的总气动阻力系数归一化为 1,气动阻力的计算式为

$$F = \sum (F_f^p + F_f^s) \cdot n_f \quad (1)$$

式中: F_f^p 、 F_f^s 分别为列车表面网格单元 f 所受的空气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。

列车总气动阻力 F 是由摩擦阻力 F_{shear} 和压差阻力 F_{pressure} 所组成的。

$$F_{\text{shear}} = \sum F_f^s \cdot n_f = - \sum (T_f \cdot a_f) \cdot n_f \quad (2)$$

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。

$$F_{\text{pressure}} = \sum F_f^p \cdot n_f = \sum (-p_f + p_{\text{ref}}) \cdot a_f \cdot n_f \quad (3)$$

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。

对于整列车,摩擦阻力占列车总气动阻力的 24.7%,压差阻力占列车总气动阻力的 75.3%。各车辆气动阻力系数分别占列车总气动阻力系数的百分比如图 4 所示。中间车 2、3、4、5 的气动阻力系数明显小于其他车辆。中间车 1 和中间车 6 带有受电弓装置,使其压差阻力增大,中间车 1 受电弓系统气动阻力占列车总气动阻力的 6.4%,中间车 6 受电弓系统气动

阻力占列车总气动阻力的 5.6%。中间车 1 的受电弓系统气动阻力贡献更大:一方面是因为中间车 1 受电弓与中间车 6 受电弓相向安装,致使两个受电弓的尾流场明显不同,中间车 1 受电弓诱发的尾涡强度更大,导致其所受的压差阻力更大;另一方面是因为中间车 1 表面边界层厚度远小于中间车 6 的表面边界层厚度,中间车 6 的受电弓完全浸没在边界层内,导致中间车 1 的受电弓引起的压差阻力大于中间车 6 的受电弓引起的压差阻力。

从图 4 可见,头车和尾车气动阻力对列车总的气动阻力贡献很大,占列车总气动阻力的 31.5%,主要表现为压差阻力。因此,头型减阻设计是高速列车气动设计的主要问题之一。

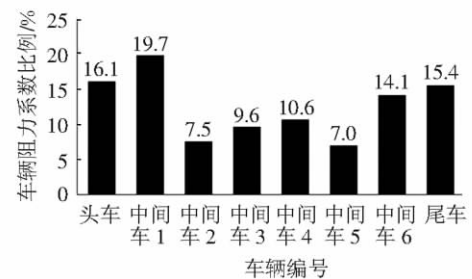
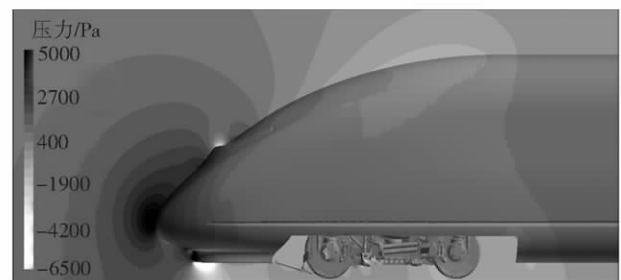
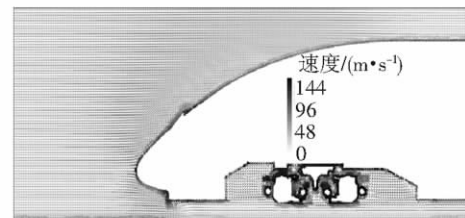


图 4 各辆车的气动阻力占列车总气动阻力的百分比例

头车由于其迎风面积大,对来流压缩得最厉害,从图 5 看出,气流在流经鼻锥后被分流至车顶和车底两个方向,在接近列车鼻锥时速度急剧减小,在鼻锥前端



(a) 车体纵向压力云图



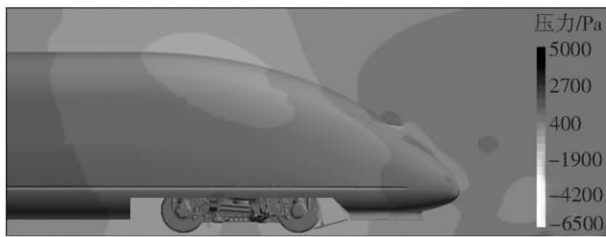
(b) 速度矢量图

图 5 头车车体气流压力云图和气流速度矢量图

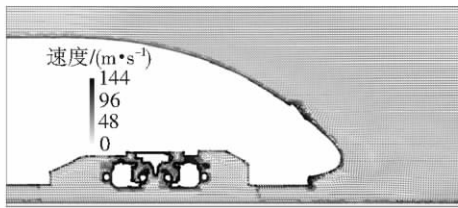
滞止为零,从而在列车鼻锥处形成驻点,产生强高压区。流向鼻锥下方的气流经过断面收缩而加速后,在排障器附近速度又迅速降低,最终在排障器处再次滞止为零,形成第二驻点和对应的高压区。流向鼻锥上方的气流沿车体上表面逐渐加速,由于司机室前窗与

车体存在倾角,气流在前窗与车体交角处速度降低,形成车头位置的次高压区。气流在经过司机室前窗时再次加速,在车顶曲率最大处达到最高值,产生一个较弱的低压区。这种流动特性直接导致头车的压差阻力明显大于中间各辆车,而通过优化头车流线型外形,进而改变头车流场特性,成为高速列车头型气动减阻设计的主要思路。

从图 6 可看出,与头车鼻锥的流场不同,尾车鼻锥附近流场受上下左右气流的作用和地面效应的影响



(a) 车体压力云图



(b) 速度矢量图

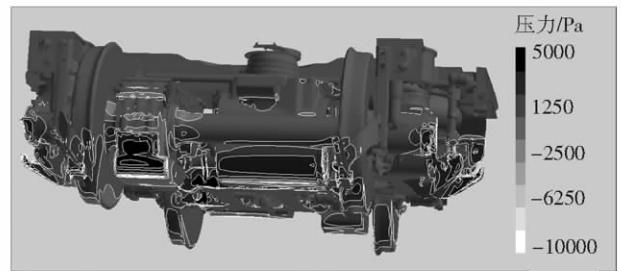
图 6 尾车车体气流压力云图和气流速度矢量图

下,在尾流区形成强度不一的旋涡,其中列车底部的气流影响尤为明显。由于尾车鼻锥附近尾涡的快速生成、脱落和破裂,致使尾锥附近流场极为复杂,压力显著降低,形成一个低压区,不仅导致尾车摆动更加剧烈,且导致其气动阻力明显增大。因此,可考虑改变尾车外形,从而改变尾流区的流动特性,减小尾涡的影响,降低尾车压差阻力,实现列车气动减阻。

3.2 关键车辆部件的气动阻力分析

3.2.1 转向架系统气动阻力分析

由于车辆走行装置结构极为复杂,又有地面效应的影响,因此,车辆走行装置的外形会对列车的气动性能产生很大影响。本文所采用的计算模型为车体裙板结构,即在两转向架之间安装中裙板,在转向架两侧安装短裙板。本文所定义的转向架系统包括转向架和转向架区域,见图 7(b);图 7(a)则给出头车第一个转向架的表面空气压力云图。从图 7(a)可见,转向架表面空气压力分布极不均匀,在迎风面的传动齿轮箱和牵引电机位置存在高压区,且转向架许多细部结构附近也存在高压区。从图 8 可见,转向架区域流场极为复杂,气流经过鼻锥处的压缩,速度迅速增大,经过导流板的二次压缩,气流以极高的速度流向转向架区域,气



(a) 头车第一个转向架表面压力云图



(b) 转向架区域示意图

图 7 转向架区域及头车第一个转向架表面空气压力云图

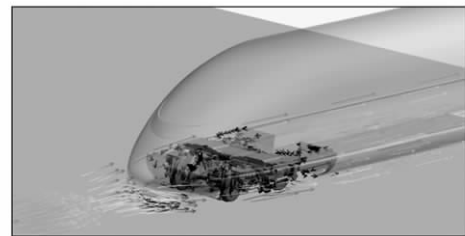


图 8 转向架附近流线图

流猛烈冲击转向架而导致该区域产生复杂的湍流。大小不同、强度各异的旋涡会快速生成和脱落,从而导致转向架产生很大的气动阻力。通过对列车各转向架气动阻力的研究,可为转向架的气动减阻优化提供相应的依据。

图 9 给出计算模型中 16 个转向架区域的气动阻力分布。从图 9 可知,转向架系统气动阻力占列车总气动阻力的 27.4%,且第一个转向架的气动阻力远大于其他转向架。转向架气动阻力主要由压差阻力引

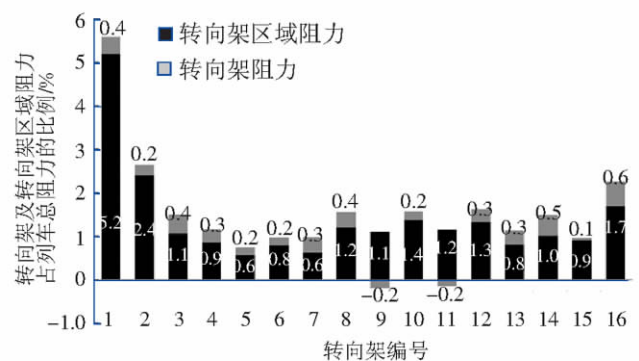


图 9 各转向架区域气动阻力占列车总气动阻力的百分比起,压差阻力占转向架气动总阻力的 97.9%。原因是:地面与车辆底架间沿车长方向的截面积很小,空气流动速度很大,当气流到达转向架前端,速度迅速减小,形成高压区,流过转向架后,气流又开始加速,最终在各转向架附近形成较大的压差,导致转向架压差阻力很大。因此,通过采取适当的措施对转向架区域进

行优化,改善转向架附近的流场结构,可实现对转向架系统的气动减阻。

3.2.2 车体连接处气动阻力分析

车厢与车厢的连接部件不同的设计方式会直接影响到列车整体的气动性能。本文所采用的车厢连接区域如图 10。从车头到尾车之间车体连接处的编号依次为:连接处 1、连接处 2、连接处 3、连接处 4、连接处 5、连接处 6、连接处 7。图 11 给出了各车体连接处气

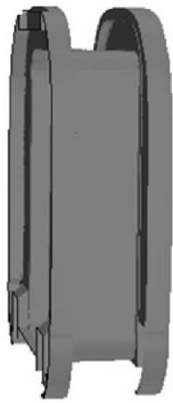


图 10 车体连接处计算区域

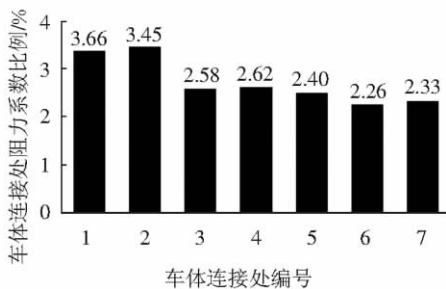
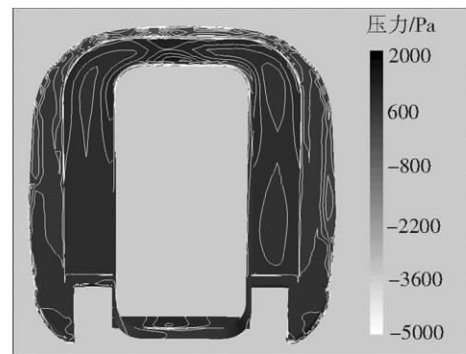


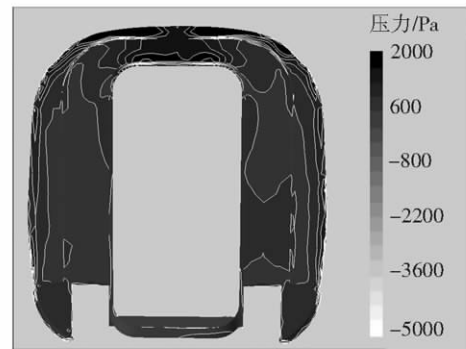
图 11 车体连接处气动阻力占列车总气动阻力的百分比。从图 11 可见,各连接处气动阻力之和占列车总气动阻力的 19.1%。车厢连接处前半部分的气动阻力系数远小于后半部分的气动阻力系数,且前半部分的气动阻力系数均为负值,即为推力。原因是:在不安装外风挡的情况下,车厢与车厢连接处缝隙中会产生回流,形成凹腔流动,导致连接处前后两部分的压力分布明显不同。如图 12 所示,连接处前半部分气动阻力为负值,后半部分气动阻力为正值,且大于前半部分气动阻力的绝对值,使连接处整体气动阻力为正值。车厢连接处 2 阻力系数之所以很大,是因为该连接处紧邻中间车 1 的受电弓系统,受到强气流干扰,致使该处的压差阻力明显大于其他车厢连接处前半部分的压差阻力。

3.2.3 附属部件气动阻力分析

列车的附属部件主要包括受电弓系统、空调整流罩和限压电阻,其中受电弓系统包括受电弓、绝缘子和



(a) 连接处 1 前半部分表面压力分布



(b) 连接处 1 后半部分表面压力分布



(c) 纵剖面速度矢量图

图 12 连接处 1 前半部分和后半部分表面空气压力分布及纵剖面气流速度矢量图

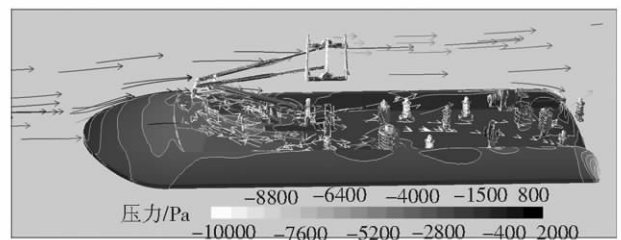


图 13 受电弓区域 1 的气流压力云图和流线图。受电弓导流罩。本文计算的受电弓系统包括中间车 1 和中间车 6 两个受电弓区域,本文分别称为受电弓区域 1 和受电弓区域 2。车体附属部件的致使车体表面光滑度遭到破坏,在附属部件附近,流场会发生显著变化。实车试验和数值模拟表明,附属部件对列车整体气动性能有很大影响。计算结果表明:空调整流罩气动阻力占列车总气动阻力的 7.6%;限压电阻区域所受气动阻力占列车总气动阻力的 3.3%;受电弓系统

总气动阻力占列车总气动阻力的 12.0%，其中受电弓区域 1、2 气动阻力分别占列车总气动阻力的 6.4% 和 5.6%；受电弓、绝缘子和受电弓导流罩气动阻力分别占列车总气动阻力的 3.6%、2.6% 和 5.8%。从图 13 可见，由于受电弓系统的外形极为复杂，气流在受电弓区域受到严重干扰，形成高压区。受电弓系统的气动阻力主要由压差阻力引起，占受电弓总气动阻力的 94.0%，因此可考虑通过受电弓及受电弓导流罩的优化设计改善此处的流场分布，达到减小压差阻力的目的。

4 结论

(1) 由 8 辆 CRH3 型车组成的动车组在明线、无侧风、车速为 350 km/h 的运行条件下，列车压差阻力和气动摩擦阻力分别占列车总气动阻力的 75.3% 和 24.7%，头车气动阻力占列车总气动阻力的 16.1%，尾车的气动阻力占列车总气动阻力的 15.4%。列车气动阻力的优化应从减小列车压差阻力入手，头车和尾车需要进行重点优化设计。

(2) 转向架区域和车体连接处所受气动阻力各占列车总气动阻力的 27.4%、19.1%。第一个转向架比其他转向架的气动阻力明显偏大，前两个车体连接处比其他车体连接处的气动阻力也明显偏大。可考虑在转向架两侧安装中裙板和安装全封闭风挡等来改善转向架和车体连接处的流场结构，达到气动减阻效果。

(3) 车辆附属部件对列车气动性能影响显著，空调整流罩气动阻力占列车总气动阻力的 7.6%，限压电阻气动阻力占列车总气动阻力的 3.3%，受电弓系统气动阻力占列车总气动阻力的 12.0%。可考虑通过受电弓及受电弓导流罩的优化设计，达到减小受电弓系统气动阻力的作用。

参考文献：

- [1] JOSEPH A S. Aerodynamics of High-speed Trains[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2001, 33(1):371-414.
- [2] RAGHUATHAN S, KIM H D, SETOBUCHI T. Aerodynamics of High-speed Railway Train[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(1):469-514.
- [3] BAKER C. The Flow Around High Speed Trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(6-7):277-298.
- [4] DIEDRICHS B. Aerodynamic Calculations of Crosswind Stability of a High-speed Train Using Control Volumes of Arbitrary Polyhedral Shape[J]. Bluff Bodies Aerodynamics & Applications, 2008, 6: 20-24.

- [5] SCHOBER M, WEISE M, ORELLANO A, et al. Wind Tunnel Investigation of an ICE 3 Endcar on Three Standard Ground Scenarios[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(6-7):345-352.
- [6] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京:中国铁道出版社, 2007:160-161.
- [7] TIAN Hong-qi. Formation Mechanism of Aerodynamic Drag of High-speed Train and Some Reduction Measures [J]. Journal of Central South University of Technology (English Edition), 2009, 16(1): 166-171.
- [8] HASSAN H, NAHIA G, BAKER C. LES of the Slipstream of a Rotating Train[J]. Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(5): 511031-511039.
- [9] ARTURO B, MICHELE M, STEFANO S. The Alleviation of the Aerodynamic Drag and Wave Effects of High-speed Trains in Very Long Tunnels[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(5): 365-401.
- [10] SINISA K. Large Eddy Simulation of Flows Around Ground Vehicles and Other Bluff Bodies[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society, 2009, 367(28): 2917-2930.
- [11] 陈燕荣,肖友刚. 高速列车空气动力学性能计算[J]. 铁道车辆, 2009, 47(1): 14-16.
CHEN Yan-rong, XIAO You-gang. Calculation in Aerodynamics Performance of High Speed Trains[J]. Rolling Stock, 2009, 47(1): 14-16.
- [12] 陈锐林,曾庆元,向俊,等. 高速列车不同头部形状的气动性能研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2009, 24(1): 45-48.
CHEN Rui-lin, ZENG Qing-yuan, XIANG Jun, et al. Study on the Performances of Aerodynamics of High-speed Train with Different Nose Shapes[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2009, 24(1): 45-48.
- [13] 王开春,朱国林,金钢. 高速列车气动力数值计算研究[C]//第十届全国计算流体力学会议论文集. 北京:中国空气动力学会, 2000.
- [14] BAKER C J, STERLING M, BOUFERROUK A, et al. Aerodynamic Forces on Multiple Unit Trains in Crosswinds[J]. Journal of Fluids Engineering, 2009, 131(10): 101103.
- [15] BLAZEK J. Computational Fluid Dynamics Principles and Applications[M]. London: Elsevier Ltd, 2005: 204-210.
- [16] 阎超. 计算流体力学方法及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006: 255-257.

(责任编辑 武晓明)