

# 底部结构对高速列车流场及气动优化规律的影响

陈羽, 杨志刚, 高喆, 单希壮

(同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

**摘要:** 为了得到底部结构对列车流场及气动阻力优化规律的影响, 通过计算流体力学和正交试验设计分析的方法, 研究真实复杂车体的底部流动和尾迹特征, 得到了复杂车体气动阻力优化规律. 结果表明, 尾车鼻尖静压系数在底部结构影响下降低了 0.06, 尾车流动分离提前, 两反对称尾涡核间横向距离增大, 尾涡间夹角增大. 头型概念设计时的拓扑简化车体模型可以作为真实复杂车体的气动阻力优化设计模型, 但考虑底部结构使得头车参数优化的极差值减小、尾车参数的优化极差值增大. 头车阻力优化重点为转向架周边结构, 尾车阻力优化对流线型长度参数更加敏感.

**关键词:** 高速列车; 气动阻力; 复杂车体; 底部结构; 气动优化

中图分类号: U270.1

文献标志码: A

## Influences of Underbody Structures on Flow Field and Aerodynamic Optimization Laws of High Speed Train

CHEN Yu, YANG Zhigang, GAO Zhe, SHAN Xizhuang

(Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In order to obtain the influence of underbody structures on flow field and aerodynamic drag optimization laws of high speed train, the computational fluid dynamic and the orthogonal experimental analysis methods were adopted to studied underbody flow field, wake and the optimization law in complex train model. The results indicated that the pressure coefficient drops 0.06 in nose region of the tail car, and bogies moved the flow separation of the tail car ahead. The distances and the angle between antisymmetric wake vortices cores increased. The simplified topology model in concept design was suitable for aerodynamic optimization in complex train model design. However underbody structures decreased the optimization range of the head car, and increased the parameter optimization range of the tail car. The drag

reduction of the head car should focus on bogie sections, and drag reduction of the tail car was more sensitive to streamline length.

**Key words:** high speed train; aerodynamic drag; complex train model; underbody structures; aerodynamic optimization

高速铁路是在能源和环境约束下解决我国交通运输能力供给不足的重要设施. 列车明线运行过程中受到的气动阻力与运行速度的平方成正比, 当速度达到  $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时, 气动阻力占总阻力的 85% 以上<sup>[1-2]</sup>; 列车运行中受到正升力使得轮轨黏着力减小, 降低列车牵引力, 车体受到负升力作用, 增加对钢轨的冲击、踏面和钢轨的磨损. 良好的高速列车气动外形设计对其节能降耗、安全运行十分重要<sup>[3]</sup>.

对于列车气动外形设计, 研究关注点已从给定列车的气动特性转变为寻求能够满足气动设计要求的列车外形, 即由逆向求解转变为正向设计. 高速列车作为一种细长、底部结构复杂、近地运行的交通工具, 其空气动力学特性有别于汽车、飞机等其他交通工具<sup>[4-6]</sup>: ①8 节编组列车长细比超过 100; ②车体底部结构和地面效应共同影响绕车身流场结构. 在气动外形设计方面通常先采用拓扑简化模型进行控制参数优化, 获得良好气动拓扑外形后加入转向架得到真实车体气动阻力. 田红旗等<sup>[7-9]</sup>分析了流线型长度、头部水平剖面型线等因素对气动性能影响, 文献<sup>[10-12]</sup>采用神经网络和 Kriging 代理模型对简化车体进行优化, 在高速列车气动外形研究及优化设计方面进行了大量工作, 得到了针对基本拓扑结构外形气动的优化规律和方法. 底部结构使得列车底部流场更为复杂, 与前期优化设计的简化模型不同<sup>[13-14]</sup>. 因此, 基于简化车体的气动性能设计在复杂的真实车体上是否具有适用性和一致性、优化规律

收稿日期: 2015-05-31

基金项目: 上海市地面交通工具空气动力与热环境模拟重点实验室项目; 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 陈羽(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为高速列车空气动力学及气动噪声. E-mail: 08\_yu\_chen@tongji.edu.cn

通讯作者: 杨志刚(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学. E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

是否受到底部结构影响以及对其影响量值的大小需要进一步讨论和分析。

本文围绕底部结构对高速列车流场及气动外形设计的影响展开. 通过计算流体力学和正交试验分析的方法首先研究了车体底部结构对高速列车表面压力分布、底部流场结构和尾迹特征的影响,在此基础上给出了复杂车体气动阻力的优化规律。

## 1 研究方法

### 1.1 研究对象

列车在气动外形设计与优化时均不考虑顶部受电弓和车辆连接处. 与前期优化设计的拓扑简化车体模型相比,影响车体绕流结构最主要部件是底部转向架及转向架舱结构,统称为底部结构. 采用参数化建模的方法建立的高速列车几何模型,车体未安装裙板. 由于车轮结构尺寸远小于转向架舱结构,故不考虑由于车轮旋转对局部流场带来的影响. 列车的长度缩短为只有3节车厢的长度,来模拟头尾对称的3节联挂形式列车,模型为1:8缩比,列车总长9.375 m,单节列车量纲一化长度为 $l$ . 车厢之间连接采用密闭式风挡结构. 同时建立简化车体模型来对比并给出与前人研究工作和结论的关系. 列车模型以及转向架几何分别如图1所示。

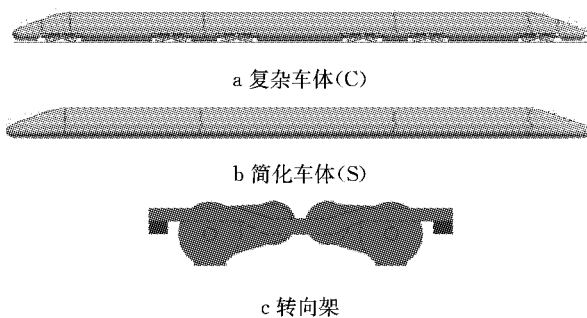


图1 车体模型  
Fig.1 Train models

为说明底部结构对气动优化设计规律的影响,选取流线型长度和水平剖面型线作为2个优化影响因素,对应于实车流线型头部长度分别为5,10,15 m的3个水平. 同时在不同流线型头部长度模型建立了锐型(A)、过渡型(B)、钝型(C)3个水平剖面型线的高速列车模型,如图2所示. 复杂车体与简化车体列车模型数各为9个,共18个. 模型均以字母和数字联合表示,如C-A05表示复杂车体、车头锐型、实车流线型长度5 m;S-B10表示简化车体、车头过渡型、实车流线型长度10 m.

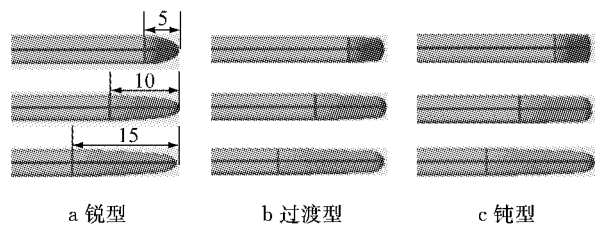


图2 优化控制参数(单位:m)

Fig.2 Optimization parameters (Unit: m)

### 1.2 研究方法

使用非结构化四面体网格进行空间离散,复杂列车模型和简化列车模型的离地间隙相同. 在车体及转向架表面生成的第1层厚度为1 mm,通过计算得到各个模型车体表面 $y^+$ (第1层网格尺寸的量纲一化量)平均值为60,满足非平衡壁面函数要求. 复杂列车模型计算网格数约为800万,简化列车模型计算网格数为300万,如图3所示。

计算使用Fluent商用软件,采用可实现化两方程 $k-\epsilon$ (kinetic energy dissipation rate)湍流模型<sup>[15]</sup>,利用SIMPLEC算法进行方程的求解. 在边界条件的处理上,将计算域底部表面设为移动地面条件,移动速度与方向与速度入口完全一致. 计算域左右以及上边界设为无反射边界条件,计算域入口设为速度入口,采用均匀来流;计算域出口设为压力出口,车体及转向架表面均为无滑移固壁边界. 计算中速度入口的来流速度设为 $97 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,来模拟列车以 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度行驶时的状况. 雷诺数 $Re = 2.5 \times 10^6$ ,其中参考长度为车宽,已进入自模拟区,气动特性不再随雷诺数变化<sup>[7]</sup>. 首先使用一阶迎风格式,再换用二阶迎风格式的方法进行迭代. 由于转向架非连续区域和尾流区的非定常涡脱落,从而使列车阻力系数无法收敛到一个稳定的定常解,在迭代达到一定值时,阻力系数在一个较小的范围内呈现准周期震荡,取呈现准周期性震荡时若干周期的平均值作为阻力系数。

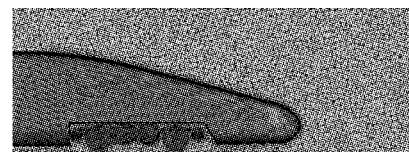


图3 计算网格  
Fig.3 Computational mesh

### 1.3 计算方法检验

为了验证数值方法对高速列车空气动力学特性计算的适用性和准确性,在同济大学上海地面交通工具风洞中心进行3车编组形式的1:8缩比

CRH3 型列车空气动力学试验,如图 4 所示。

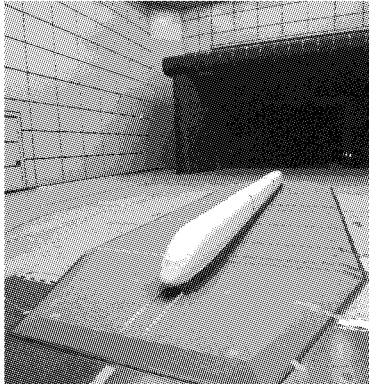


图 4 风洞试验

Fig.4 Wind tunnel test

列车模型长 9.516 m,高 0.486 m,宽 0.396 m,试验模型的阻塞比为 0.63%。试验中均匀来流,风速从 120~250 km·h<sup>-1</sup>,来流湍流强度为 0.5%。测力天平安置在模型重心的位置,结构为盒式天平。底面为天平安装面,固定在由地面支撑上来的安装平台上。天平的上表面为受力感受面,用于固定模型的安装定位面。模型受力通过这个感受面传递到天平上,通过天平上的应力感受应变片将力信号转为电信号输出。车体表面布置测压孔,静压测量采用 4 组 64 路测压电子扫描阀得到。

在 0°风向角的情况下测量了列车的气动阻力系数  $C_d$  和车体表面静压系数  $C_p$ 。

$$C_d = \frac{F_d}{0.5\rho v^2 A} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{p - p_0}{0.5\rho v^2} \quad (2)$$

式中: $F_d$  为气动阻力; $\rho$  为来流密度,试验中来流马赫数小于 0.3,故  $\rho$  取 1.225 kg·m<sup>-3</sup>;  $v$  为来流速度; $A$  为参考面积,试验中取  $A=0.17$  m<sup>2</sup>;  $p$  为绝对压力; $p_0$  为大气压,环境温度约为 20 °C 时取  $p_0=101325$  Pa。

算法验证中计算域、边界条件的设置与 1.2 节中相同。将试验与数值计算结果进行对比,这里给出喷口速度 220 km·h<sup>-1</sup>下列车头车和尾车受到的气动阻力系数(表 1)及车体上表面对称面中截线静压系数曲线(图 5)。由于开口式风洞存在轴向静压梯度,试验中使头车受到附加阻力、尾车受到附加推力,各节列车气动阻力参照 Mercker 等<sup>[16]</sup>给出的风洞修正方法,得到修正后头车阻力系数为 0.161,尾车阻力系数为 0.152。气动力数值模拟与模型试验的结果间最大偏差为 7.2%,表面静压系数与试验趋势一致,数值模拟方法对分析气动性能具有准确性。

表 1 数值与试验气动阻力系数对比

部位	试验	计算
头车	0.154	0.165
尾车	0.144	0.141

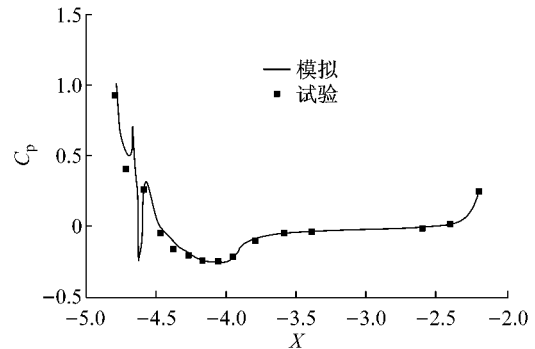


图 5 试验与计算表面压力系数对比

Fig.5 Pressure coefficient of simulation and test

## 2 结果分析

### 2.1 底部结构对列车流场影响

底部结构对列车流场的影响体现在车体表面压力分布、底部速度场和流量分配以及尾迹。给出沿车体对称中截线上的静压系数分布曲线,对称面中截线位置见图 6,静压系数定义参见 1.3 节,图中  $X$  为主流方向位置。复杂和简化车体各有 9 个模型,其规律相似,由于篇幅所限,这里仅给出 B10 模型的对比分析。由三车上表面静压系数分布图 7a 可知,底部结构对头车、中间车上部流场影响可以忽略,其对车体上部静压的影响体现在尾车流线段距离鼻尖 0.15  $l$ ( $l$ 为单节列车长度)范围内,如图 7b 所示。尾车鼻尖静压系数下降了 0.06。在尾车流线段,底部结构使得尾车流线段上部逆压梯度增大,假设 2 种模型在黏性作用相同的情况下(顶部可以近似认为是一有限长度的平板,两者当地雷诺数  $Re_x$  相同, $x$  为该点到车头鼻尖垂直距离),底部结构使尾车流线段上部流动分离提前。

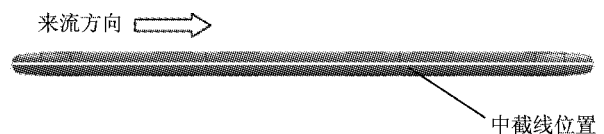
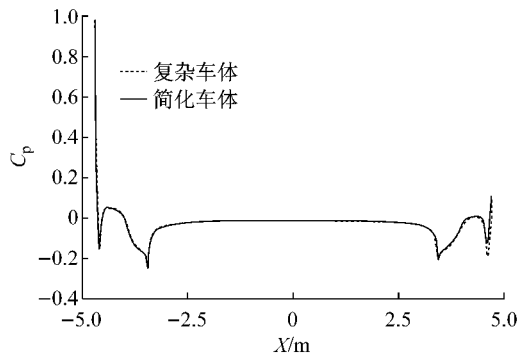


图 6 对称面中截线位置

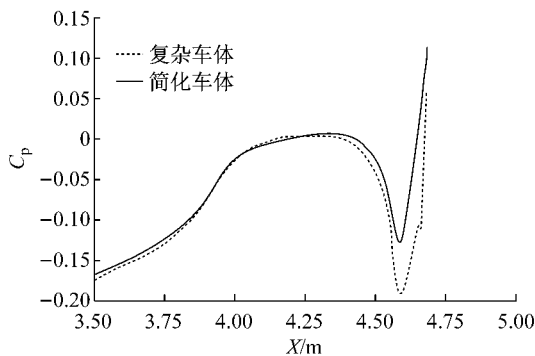
Fig.6 Location of symmetric line

由图 8 可见,转向架使得车体下表面对称中截线静压系数分布发生显著变化。在沿车体方向出现 6 个正负压力跳跃,转向架前隔墙由于流动分离为负

压区,转向架后隔墙由于气流冲击为正压区.第 1 组转向架前后隔墙压力跳跃最为明显,沿流动方向各个转向架前后压力跳跃逐渐减小.可知头车第 1 组转向架区域的阻力在所有转向架区域中最大.从图 9 头车第 2 组转向架区域速度矢量图可知,气流在转向架舱内撞击到转向架,在转向架舱前部背风侧、电机和轴箱后部均有因流动分离而产生的回流,造成能量耗散.



a 3 车上表面



b 尾车流线段上表面

图 7 B10 车体上表面对称中截线静压系数

Fig.7 Pressure coefficient of B10 upper body

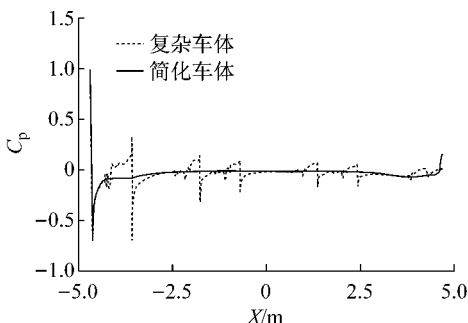
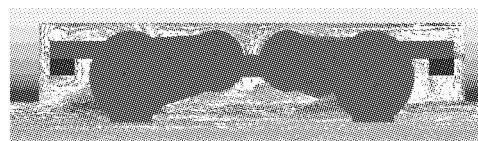


图 8 B10 车体下表面对称中截线静压系数

Fig.8 Pressure coefficient of B10 underbody

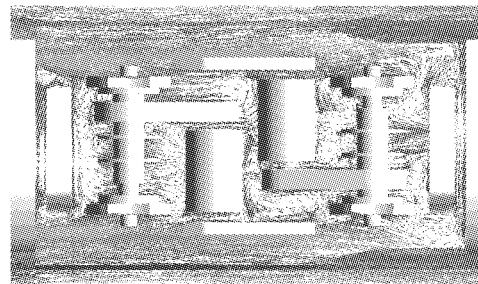
底部结构对列车平均流场的影响体现在底部速度分布和流量比.如图 10 所示给出车体对称面距离车体底部高度 0.02 m 处主流方向 X 的速度分布.气流在由鼻尖向车体下部流动过程中,地面和车体

之间的收缩效应使得气流加速到来流速度的 1.1 倍,之后逐渐降低.经过转向架的气流一部分沿车体底部主流方向继续运动,另一部分在转向架阻塞和地面效应共同作用下由转向架舱两侧流出,各个转向架区域流量比不同,见表 2.头车第 1 组转向架 34.7% 的气流经由两侧流出,后续转向架处经由两侧流出的质量流量比不断降低.经过每个转向架后的气流流速不断降低,在经过尾车第 1 对转向架后,速度降为来流速度的 0.18.气流速度在简化车体相同位置时为来流速度的 0.65.



来流方向

a 对称中截面



来流方向

b 水平截面

图 9 转向架区域速度矢量图

Fig.9 Velocity vector of bogie section

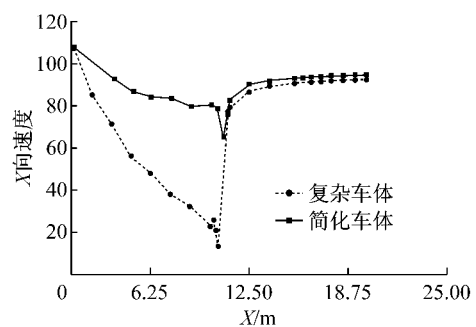


图 10 B10 底部 X 方向速度分布

Fig.10 X Velocity under B10 train models

表 2 各个转向架区域流量比

Tab.2 Flow rate of bogie sections

部位	转向架 1	转向架 2	转向架 3	转向架 4	转向架 5	转向架 6
底部	65.3%	87.5%	89.7%	90.9%	94.5%	96.5%
两侧	34.7%	12.5%	10.3%	9.1%	5.5%	3.5%

气流在尾车流线段发生分离,数值研究采用求解雷诺时均方程方法,在几何对称的情况下尾迹也

为对称分布. 气流在尾部形成 2 个反对称的旋涡, 其中左侧旋涡为顺时针旋转, 右侧旋涡为逆时针旋转.

通过特征向量法确定典型的 A05, B10, C15 3 种外型复杂车体和简化车体, 距离尾车鼻尖  $0.2l, 0.4l, 0.6l, l, 1.2l$  5 个横截面的反对称尾迹涡核间横向距离如图 11 所示. 涡核寻找基于临界点理论展开. 相比于简化车体模型, 在相同流线型外形情况下, 底部流速降低和转向架两侧气流的扰动使得两反对称尾迹的涡核横向距离增大, 两尾涡夹角增大. 这里给出距离尾车鼻尖  $0.2l, 0.6l, l$  横截面的 Y, Z 方向流线图如 12 所示, 图中标注的值以量纲一化形

式给出, 参考长度为单节列车量纲一化长度  $l$ .

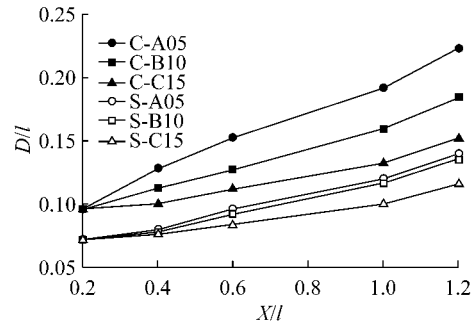


图 11 反对称尾迹涡核间横向距离

Fig.11 Horizontal distances antisymmetry vortices cores

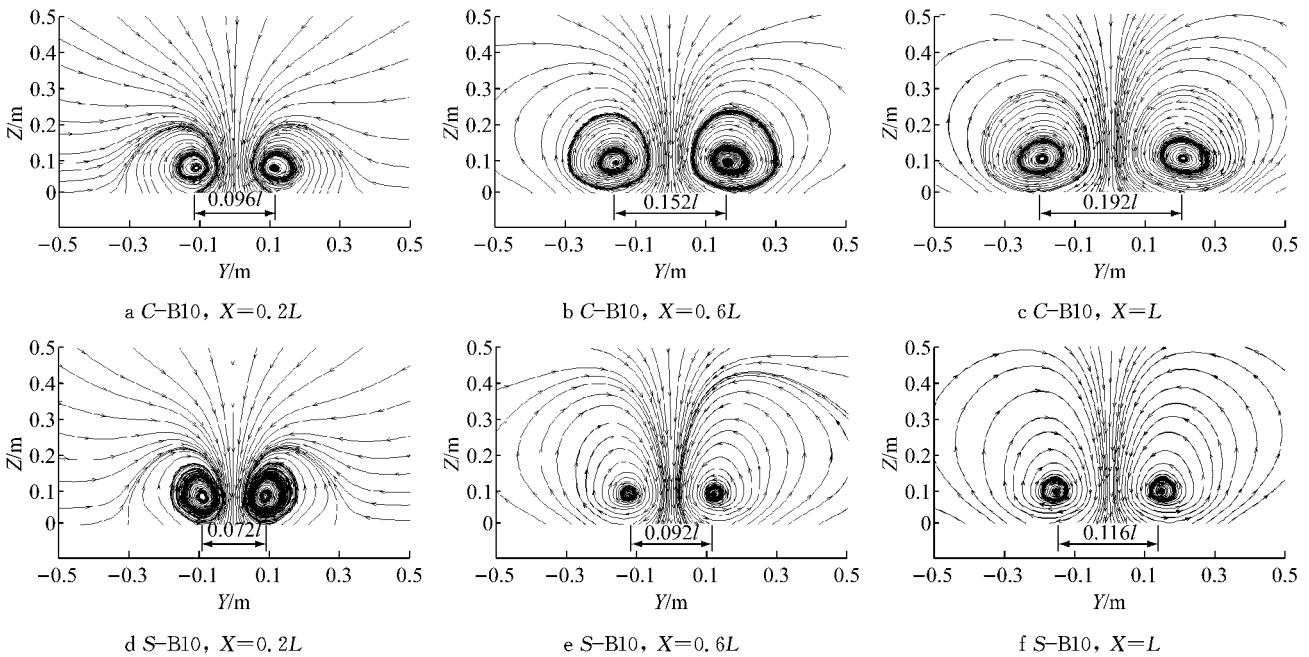


图 12 Y-Z 截面流线图

Fig.12 Streamlines on Y-Z plane

### 2.2 底部结构对气动阻力优化规律影响

从总阻力系数的角度考虑, 底部结构对高速列车气动阻力影响体现在: 压差阻力和黏性阻力在复杂车体和简化车体中的分配差别明显. 图 13 给出了各个头型总阻力系数以及压差阻力与黏性阻力系数所占比例情况. 对于复杂车体, 压差阻力约占 70%, 黏性阻力约占 30%; 对于简化车体, 压差阻力约占 20%, 黏性阻力约占 80%. 转向架舱的大尺度空腔结构使得每一个转向架前后隔墙产生极大的压差阻力. 因为表征的是压差阻力和黏性阻力的分配, 结论对于多节编组列车的情况同样成立. 其中复杂车体相比于简化车体, 其黏性阻力平均减小了 14.5%. 黏性阻力减小区域主要在车体底部, 由于转向架对气流的阻滞作用, 底部流速降低, 近壁面处速度梯度减

小, 壁面摩擦系数减小使得车体底部摩擦阻力减小. 从理论分析的角度估算, 假设底部结构对顶部和两侧气流不产生影响, 复杂车体较简化车体黏性阻力差值理论上最大应在 20% 以内.

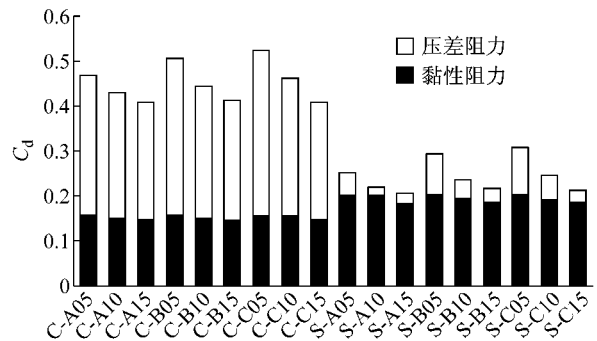


图 13 整车黏性阻力与压差阻力系数

Fig.13 Pressure drag and viscous drag coefficient

给出了2个因素3个水平下的复杂车体和简化车体气动总阻力和头车、中间车、尾车阻力系数如图14所示.可知拓扑简化车体模型可以作为真实复杂车体的气动阻力优化设计模型,在2种模型中流线型参数气动阻力优化的趋势一致.总阻力系数表现为简化车体的气动阻力系数优化曲线在底部复杂结构的影响下整体向上平移了 $\Delta$ ,复杂车体相对于简化车体差值 $\Delta$ 在0.197~0.217之间.从图14b可以看出,复杂车体和简化车体头车气动阻力趋势一致,但底部结构使得各个模型头车气动阻力增量在0.107~0.124之间,远大于流线型长度和水平剖面型线的因素影响.尤其是第1组转向架及其周边结

构的压差阻力是头车气动阻力的主要贡献部分,在具有较好流线型头型的基础上,头车外形优化重点应为转向架及其周边结构的减阻设计.

从图14c可知,复杂模型车体中间车较简化车体气动阻力值大0.04~0.05,不同模型中间车的增量基本一致.

图14d给出底部结构对尾车气动阻力优化规律影响,底部结构不改变尾车气动外形优化趋势,其使得各模型尾车气动阻力增量在0.035~0.068.复杂车体流线型长度和水平剖面的优化极差范围为0.044~0.114,底部结构和优化参数影响量级相同.

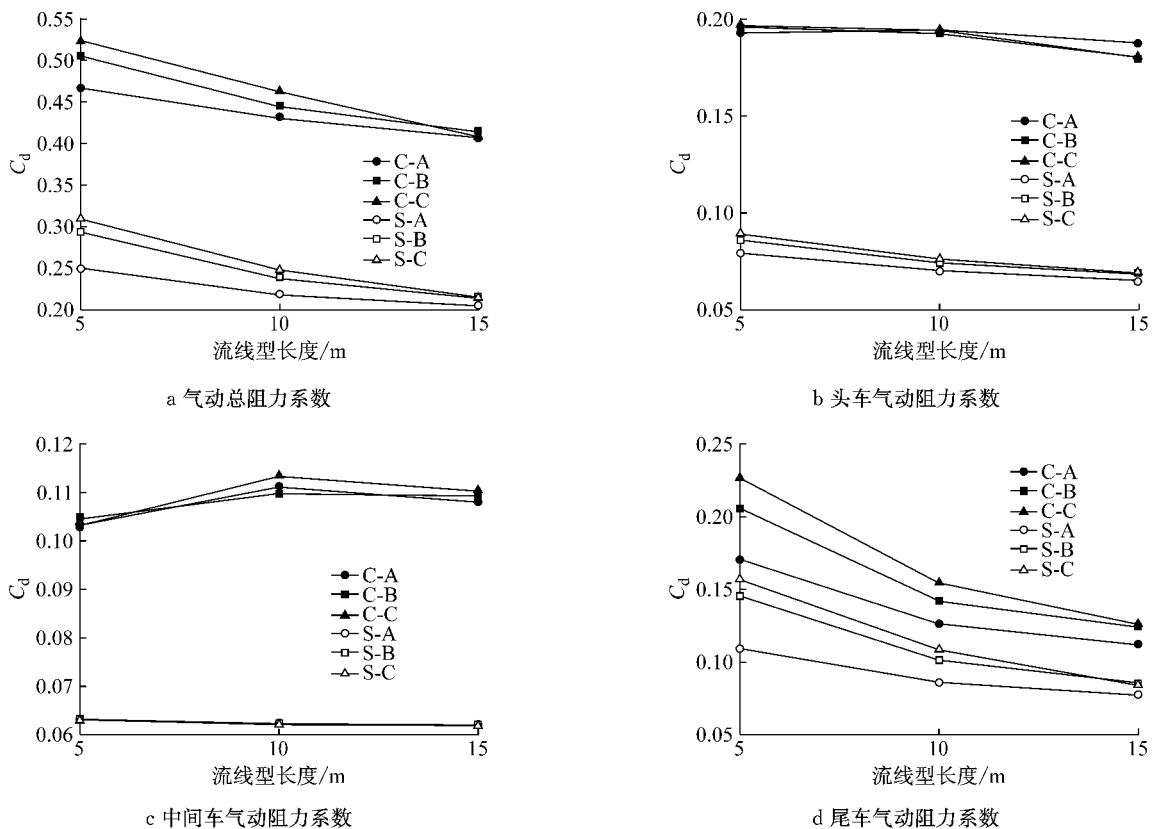


图14 复杂车体与简化车体气动阻力系数

Fig.14 Drag coefficient of complex and simplified trains

对复杂车体和简化车体模型的正交数值试验结果进行极差对比分析,设 $R_j$ 为第 $j$ 个试验因素的极差,其反应该因素水平波动时设计指标的变动幅度.复杂车体和简化车体的18个模型流线型长度和水平剖面型线的极差分析如图15所示.对于整车气动阻力,考虑底部结构使得流线型长度因素的影响增大、头部水平剖面因素的影响减小.底部结构对于头车和尾车气动阻力的优化极差影响相反,对于头车气动阻力,底部结构的考虑减小了2个外形优化因素的影响;对于尾车阻力,底部结构的考虑均增大了

2个优化因素的影响,其中尾车流线型长度的影响增幅明显,较简化车体优化极差增加了0.024.

### 3 结论

通过计算流体力学和正交试验设计分析的方法研究了底部结构对高速列车的气动阻力、底部流动和尾迹特征的影响,得到了复杂车体气动阻力优化规律,主要结论如下:

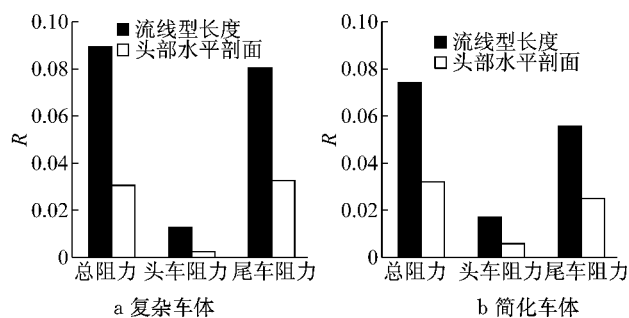


图 15 底部结构影响的极差分析

Fig. 15 Range analysis influenced by underbody structures

(1) 底部结构对头车和中间车上部流场不产生影响,各个转向架区域产生极大的压差阻力,尾车后部 0.15l 范围内压力系数减小,鼻尖静压系数下降 0.06. 流线段逆压梯度增大,车体底部流速降低,尾车流动分离提前,两反对称尾涡的涡核之间横向距离增大,尾涡间夹角增大.

(2) 压差阻力和黏性阻力在复杂车体和简化车体中的分配比例不同,复杂车体压差阻力约占 65%,黏性阻力约占 35%,简化车体压差阻力约占 20%,黏性阻力约占 80%.

(3) 拓扑简化车体模型可以作为真实复杂车体的气动阻力优化设计模型. 底部结构不改变拓扑简化模型设计参数的优化趋势,但其减小了头车的流线型参数优化极差值,增大了尾车优化参数的极差值. 对于流线外型良好的头车,其气动阻力优化的重点为转向架周边结构,而尾车气动阻力对流线型长度参数更加敏感.

**致谢:**同济大学上海地面交通工具风洞中心的博士生夏超协助完成风洞试验的工作,在此致以衷心的感谢!

### 参考文献:

[1] 沈志云. 高速列车的动态环境及其技术的根本特点[J]. 铁道学报, 2006, 28(4): 1.  
SHEN Zhiyun. Dynamic environment of high speed train and its distinguished technology [J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(4): 1.

[2] Raghunathan R S, Kim H D, Setoguchi T. Aerodynamics of high-speed railway train [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38: 469.

[3] 田红旗. 中国高速轨道交通空气动力学研究进展及发展思考[J]. 中国工程科学, 2015(4): 30.  
TIAN Hongqi. Development of research on aerodynamics of high-speed rails in China [J]. Engineering Science, 2015(4): 30.

[4] Baker C. The flow around high speed train [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(6): 277.

[5] Chen Y, Yang Z, Wang W, et al. Effects of length on aerodynamics of high speed train models [C]// Proceedings of the Sixth International Conference on Nonlinear Mechanics. Shanghai: DEStech Publication Inc.; 2013: 468-472.

[6] 孙振旭, 郭迪龙, 姚远, 等. 高速列车地面效应数值模拟研究[J]. 计算物理, 2013, 30(1): 61.  
SUN Zhenxu, GUO Dilong, YAO Yuan, et al. Numerical study on ground effect of high speed train [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2013, 30(1): 61.

[7] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.  
TIAN Hongqi. Aerodynamics of high speed train [M]. Beijing: China Railway Press, 2007.

[8] 梁习锋, 田红旗. 列车气动性能评估参数研究[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(1): 38.  
LIANG Xifeng, TIAN Hongqi. Research on evaluating parameters of train aerodynamic performance [J]. China Railway Science, 2003, 24(1): 38.

[9] 田红旗, 周丹, 许平. 列车空气动力学性能与流线型头部外形[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(3): 47.  
TIAN Hongqi, ZHOU Dan, XU Ping. Aerodynamic performance and streamlined head shape of train [J]. China Railway Science, 2006, 27(3): 47.

[10] 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, 2012, 42(11): 1283.  
YAO Shuanbao, GUO Dilong, YANG Guowei. Optimization and aerodynamic design of high speed train based on GA-GRNN [J]. Science China Technology Science, 2012, 42(11): 1283.

[11] 姚拴宝, 郭迪龙, 杨国伟, 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, 2013, 43(2): 186.  
YAO Shuanbao, GUO Dilong, YANG Guowei, et al. Multi-objective optimization of streamlined head of high-speed train based on Kriging model [J]. Science China Technology Science, 2013, 43(2): 186.

[12] 陈大伟, 姚拴宝, 郭迪龙等. 高速列车头型拓扑结构对气动力的作用规律研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(2): 18.  
CHEN Dawei, YAO Shuanbao, GUO Dilong, et al. Study of influence laws between topology structure of high speed train head and aerodynamic force [J]. Journal of China Railway Society, 2015, 37(2): 18.

[13] 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.  
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.

[14] Quinn A, Hayward M. Full scale aerodynamic measurements underneath a high speed train [EB/OL]. [2015-05-30]. <http://bbaa6.mecc.polimi.it/uploads/treni/bpr06.pdf>.

[15] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new k-ε eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flow-model development and validation [J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227.

[16] Mercker E, Wiedemann J. On the correction of interference effects in open jet wind tunnels [J]. SAE Transactions, 1996, 105: 795.