

开口式风洞高速列车头车气动实验模型选取方法

杨志刚^{1,2,3}, 刘嘉楠^{1,2}, 陈羽^{1,2}

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学上海市地面交通工具空气动力学与热环境模拟重点实验室, 上海 201804; 3. 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

摘要: 合理的风洞高速列车实验模型对其气动评估和研究十分重要。采用计算流体力学方法, 以开口式风洞和高速列车头车为对象, 研究风洞实验头车最短尾部模型和合理缩比模型的选取方法。结果表明: 无侧风时头车阻力系数随着尾部模型缩短而增加, 尾部负压前移使得车厢连接处压力降低, 头车+0.4L尾部模型的头车阻力与3车编组头车偏差为2.8%, 可作为头车气动最短实验模型。头车最大缩比模型选取受风洞边界效应、雷诺数效应和地面效应共同影响, 其中雷诺数效应使得摩擦阻力减小, 地面效应使压差阻力增大, 1:8、1:4缩比模型与1:1模型头车的压差阻力偏差为12.7%和7.2%, 压差阻力分别占头车总阻力63.9%、67.2%和72.5%。结果表明, 对于开口式风洞选取1:4的头车气动实验模型更为合理。

关键词: 高速列车; 风洞试验; 模型选取; 计算流体力学

中图分类号: U270.1

文献标志码: A

Selection of Head Car Model for High Speed Train in Open-section Wind Tunnel Test

YANG Zhigang^{1,2,3}, LIU Jianan^{1,2}, CHEN Yu^{1,2}

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Lab of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management System, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

Abstract: Reasonable scaled model of high-speed train is very important for aerodynamic evaluation and research in wind tunnel. Based on the computational fluid dynamics method, the selection method of the shortest tail model and the reasonable scale model of the head car in wind tunnel test was studied. The results reveals that: the drag coefficient of

the head car increases with the shortening of the tail model, and the negative pressure of the tail moves upstream, which reduces the pressure at the inter-coach space. The deviation between the drag of the head car +0.4L tail model and that of the three cars model is 2.8%, which can be used as the shortest model of the head car. The selection of the scale model of the head car is affected by the wind tunnel boundary effect, Reynolds number effect and ground effect. The Reynolds number effect reduces the frictional drag, while the ground effect increase the pressure drag. The 1:8, 1:4 scale model and full-scale model's head car pressure drag deviation are 12.7% and 7.2%, which account for 63.9%, 67.2% and 72.5% of the head car's total drag respectively. The result shows that, it's more reasonable to choose the 1:4 scale model as high-speed train experiment model in open-section wind tunnel.

Key words: high-speed train; computational fluid dynamics; wind tunnel test; model selection

随着高速列车运行速度的不断提高, 列车与空气之间的相互作用变得越来越显著^[1]。其中, 高速列车头车气动外形对列车的节能环保、横风下安全稳定性十分重要^[2], 头车气动阻力占8节编组整车气动阻力的16.1%^[3], 横风作用下头车承受的侧向力、倾覆力矩远大于其他节列车^[4]。相比于实车路试, 风洞缩比模型试验具有环境稳定、可控等优点, 是研究高速列车头车气动特性时广泛采用的方法^[5]。

风洞头车实验需要合理的模型选取, 其关键是尽可能有较大的尺寸, 便于达到自模拟区所需要的雷诺数, 更重要的是容易实现细部结构几何相似, 能够模拟精细部件的流场^[6], 同时考虑风洞边界效应、雷诺数效应、地面效应的影响。

收稿日期: 2021-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(52002283); 上海地面交通专业技术服务平台(19DZ2290400); 上海市地面交通工具空气动力学与热环境模拟重点实验室(18DZ2273300)

第一作者: 杨志刚(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为车辆空气动力学。

E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

通信作者: 陈羽(1986—), 男, 工程师, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为高速列车空气动力学与气动声学。

E-mail: 08_yu_chen@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

合适的头车缩比模型选取分为两个阶段。首先,给出合理的头车+最短尾部气动力试验模型,保证头车气动特性与多编组列车一致。欧盟列车空气动力学标准^[7]建议风洞实验头车后部附加全长度尾车,最短半长度尾车,但采用不同长度尾车模型导致的偏差及原因不明确。其次,结合风洞试验条件给出合理的缩尺比例,明确缩比模型与实车模型气动力的关系。在高速列车模型试验中,进入自模拟区气动力随雷诺数变化较小,但雷诺数范围以及实际列车复杂几何的适用性,还未有明确结论^[8-9]。黄志祥^[10]采用风洞试验的方法指出列车模型缩比尺寸是影响风洞试验结果的主要因素之一。韩运动^[11]通过数值方法,研究了自由空间下1:20~1:8缩比模型的尺度效应,指出1:20模型的阻力较实车大6%。Niu等^[12]在风洞中研究了1:8、1:20缩比模型气动力在 $Re=3.02\times 10^5\sim 2.27\times 10^6$ 的雷诺数效应,气动阻力有明显下降。小尺寸缩比模型有其缺点,Baker^[13]的研究结果表明,转向架等小尺度结构对于雷诺数比较敏感,Guo^[14]也指出,在不同侧风角度下,转向架几何精细程度会严重影响气动阻力,且近地区域流动复杂,是高速列车气动减阻的重点^[15]。因此,在头车气动模型风洞实验中,合理的最短尾部模型和缩比模型选取对指导头车的气动外形设计。

本文以开口式风洞和高速列车头车模型为研究对象,采用计算流体力学的方法,研究高速列车风洞实验头车最短尾部模型和合理缩比模型的选取方法,分析风洞边界效应、雷诺数效应和地面效应对实验模型选取的影响。为高速列车风洞气动试验模型选取,和推导模型与实车气动参数关系提供指导。

1 头车模型及开口式风洞

1.1 高速列车头车模型

风洞实验的对象选取CRH3型动车组头车模型,头车长、宽、高度为 $3252\text{mm}\times 408\text{mm}\times 488\text{mm}$,包括头车流线段和平直段、两组动力转向架、车厢连接处、空调导流罩。忽略头车雨刮器、车门窗对头车气动阻力的影响。

单独对头车进行风洞气动实验时,需要附加尾部模型来保证头车车厢连接处的流动状态与实际编组状态一致。简化的尾部模型参考欧盟标准模型,如图1所示。本文研究头车附加最短尾部模型,以及头车最大缩比模型选取方法,具体模型设计在第3.4节中给出。



图1 高速列车模型

Fig. 1 Train model

1.2 开口式风洞

开口式试验段的风洞气流可以自由向周围扩散,模型实验时阻塞效应小,在喷口面积一定时可以进行大尺寸模型的实验,缩小与实际情况的雷诺数差异,同时易于保证模型与实物之间的几何相似。其次,在列车侧风实验工况下,风洞内轴向静压梯度比闭口式试验段小,可以很好地满足高速列车侧风实验需求。

开口式风洞选取同济大学上海地面交通工具风洞中心的3/4开口回流式风洞,风洞结构图如图2所示。喷口尺寸为 $6.5\text{m}\times 4.25\text{m}$,试验段驻室尺寸为 $22\text{m}\times 17\text{m}\times 12\text{m}$,风洞试验段长度为 15m ,最高风速 $250\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,水平轴向静压系数梯度小于 $0.005\cdot\text{m}^{-1}$ 。

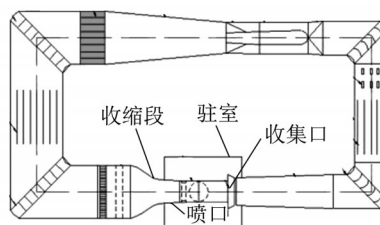


图2 3/4开口式风洞

Fig. 2 3/4 open jet wind tunnel

2 研究方法

2.1 数值计算方法

选用商业计算流体力学软件STAR-CCM+进行高速列车头车的气动力和流场求解,由于高速列车流动的马赫数小于0.3,故按不可压流动计算,湍流模型使用可实现的 $k-\epsilon$ 模型,其对可能导致的负正应力,进行了数学约束,涡粘系数计算公式中,系数不应是常数而应该是与旋转应变率有关的量,对于分离流动计算有较高的精度^[16]。近壁使用双层全 $y+$ 壁面函数求解近壁面问题。

将CRH3的3车编组模型置于3/4开口式风洞

模型中进行计算。使用切割体网格进行划分,在车身周围、风洞喷口射流区域进行网格加密,车鼻距离风洞喷口1m处,整个流体域的网格分布如图3所示,由收缩段、试验段、收集口、扩散段和扩散段延长段组成,其中收缩段的收缩比为6。为了模拟列车在220 km·h⁻¹速度下的气动特性,风洞收缩段入口设为速度入口,速度大小为10.185m·s⁻¹,扩张段延长区的出口设为出流边界条件,延长区壁面设为对称壁面,其他壁面均设为无滑移条件的固定壁面。

在车身周围的加密区分为无侧风和有侧风两种情况,在无侧风下,车身周围的加密区大小为:4L×2W×1.5H;有侧风下车身周围的加密区大小为:4L×7.5W×1.5H,其中,L为头车长度,W为车宽,H为车高。车身周围的网格分布如图3所示。

为了精确的模拟车体表明流动,在车体周围生成5层边界层网格,第一层边界层厚度为1mm。车体表面网格的y⁺在30~200范围内,满足双层全y⁺壁面函数的要求。

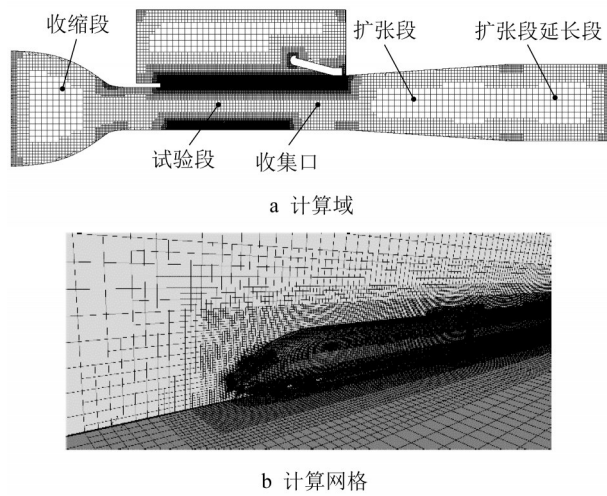


图3 计算域和计算网格

Fig. 3 Computational domain and mesh

2.2 风洞试验及计算方法验证

在同济大学上海地面交通工具风洞中心进行3车编组1:8缩比CRH3型列车空气动力学试验,试验中头、中、尾三车均含上部导流罩,如图4所示。试验中均匀来流,风速从120km·h⁻¹~250km·h⁻¹,试验中地面为静止地面,来流湍流强度为0.5%,测力的天平内置安装在各节列车的重心位置。车体表面布置测压孔,压力测量采用电子扫描阀获得。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。上述系数定义如下:

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

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

式中ρ为空气密度,取1.225kg·m⁻³;u_∞为来流速度;A为参考面积,试验中取A=0.181m²;p₀为大气压,取101325Pa;p为绝对压力值;F_d为气动阻力。

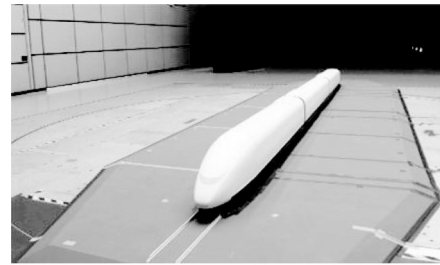


图4 风洞试验布置

Fig. 4 Wind tunnel test

根据试验结果,对比可实现的k-ε模型和k-ω SST模型不同网格数的头车阻力系数,结果如表1所示,可以看出,相同网格数下可实现的k-ε模型偏差较小,网格数为2504万时,偏差小于1%,并将头车表面压力系数与试验结果对比,如图5所示,结果吻合度较好。

表1 不同网格数量与试验数据对比

Tab. 1 Comparison of numerical and experiment results

湍流模型与试验工况	C _d	偏差/%
试验	0.154	—
可实现的k-ε模型	网格1544万	-1.2
	网格2504万	-0.9
	网格3594万	-0.2
k-ω SST模型	网格1544万	7.8
	网格2504万	6.7
	网格3594万	5.8

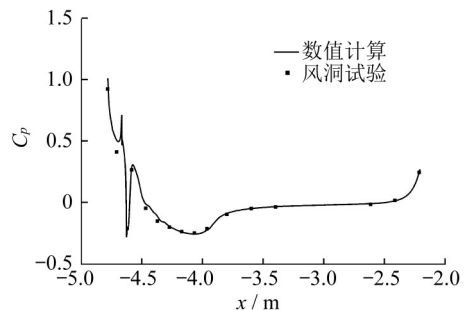


图5 试验与计算头车表面压力系数对比

Fig. 5 Pressure coefficient of head car in simulation and test

3 最短附加尾车实验模型选取

长编组高速列车几何外形的特点是大长细比,在风洞有限尺寸的约束下,模型长度成为模型选取的制约因素。由于头车气动阻力及横风下所受的倾覆力矩远大于其他节列车,在研究高速列车的气动特性时主要针对头车^[2]。不影响头车气动特性的前

提下选取尽可能短的尾车模型,可以有效增大模型尺寸,进而提高头车风洞实验模型的雷诺数。

3.1 无侧风工况最短附加尾车实验模型选取

为得到对头车气动特性影响较小的最短尾车模型,选取了不同长度的1:8缩比的尾车模型进行数值计算仿真,设头车长度为 L ,按照长度对模型进行命名,如表2所示。

表2 不同尾部长度的模型

Tab. 2 Models with different tail lengths

模型组合	模型示意
头车+中间车+尾车	3L
头车+尾车	2L
头车+0.5L尾部模型	1.5L
头车+0.4L尾部模型	1.4L
头车+0.3L尾部模型	1.3L
头车+0.2L尾部模型	1.2L

通过数值计算方法可以得到的无侧风下的头车阻力系数,结果如图6所示,量纲为一计算中参考风速以风洞喷口中心点实际速度处理。本节均以3L模型头车气动力作为最短模型选取的基准,可以看出,随着尾部长度的减小,头车的阻力系数有增大的趋势,且尾部长度越小,阻力系数增加幅度越大。通过数值计算软件对车身面网格上的正应力和切应力沿流向积分,可得到出头车的摩擦阻力和压差阻力,可以看出,不同长度的模型,雷诺数和表面积相同,头车的摩擦阻力为一定值。随着尾部模型长度缩短,总阻力的增加均由压差阻力贡献。

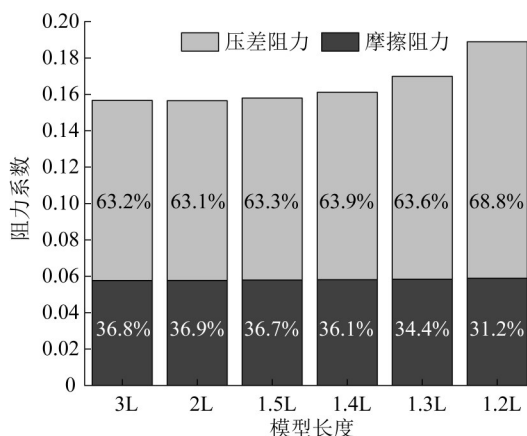


图6 不同长度模型头车阻力系数

Fig.6 Drag coefficient of different length models

给出头车沿流动方向的阻力系数切片积分,如图7所示,以车头鼻尖为量纲为一横坐标原点。在 $x=0\sim$

$0.9L$ 范围内,不同尾部长度模型阻力系数相同,在 $x=0.9L\sim 1L$ 时,各模型阻力系数存在偏差,可知尾部模型缩短的偏差来自于头车2位端转向架区域和车厢连接处的压差阻力。

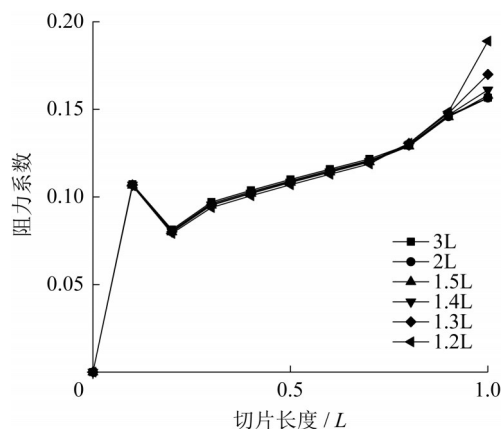


图7 不同尾部长度模型的切片阻力积分

Fig.7 Drag coefficient integral of different tail length models

对比不同长度尾部模型的车厢连接处压力分布,如图8a所示,尾部模型的缩短使得车厢连接处的压力不断降低,对车厢连接处的静压以面积求平均值,可得1.5L模型车厢连接处的平均压力为6.2 Pa,1.2L模型车厢连接处的平均压力为-248.6 Pa,尾部长度减小0.3L,平均压力系数降低了254.8 Pa。图8b为 $z=0.5H$ 高度下水平面压力云图,气流流经尾部流线段时产生一个较大的负压区,随着尾部长度的缩短,尾部的低压

区会向车厢连接处靠近,导致头车的车厢连接处的压力增加。力整体降低,头车的压差阻力升高,最终导致头车的阻

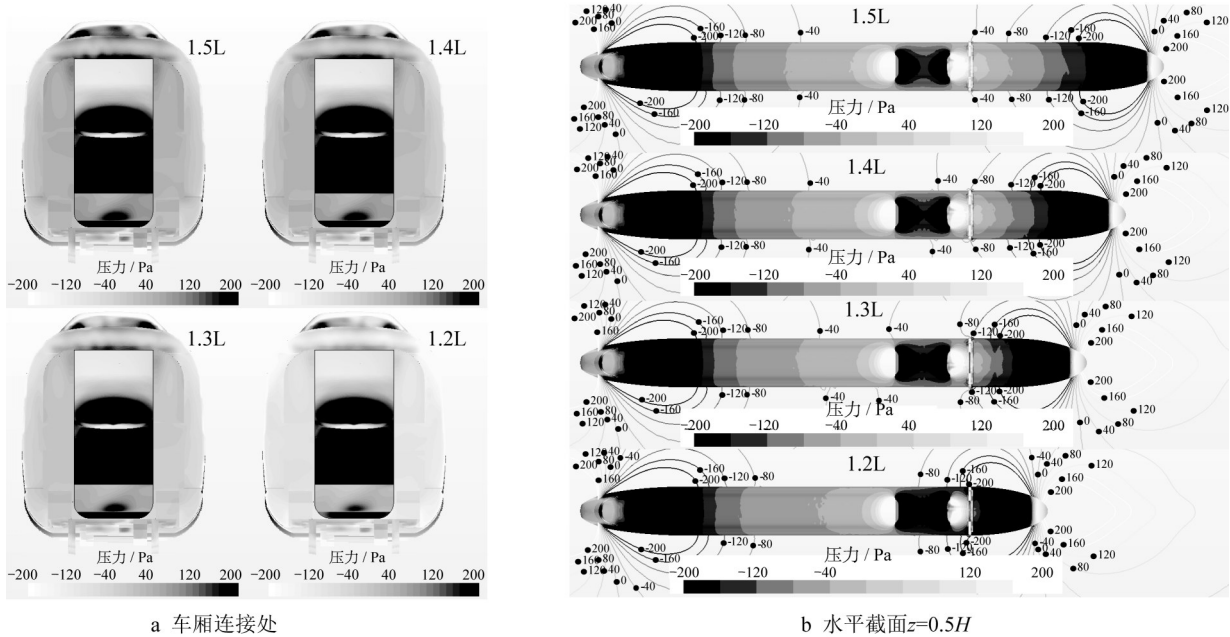


图 8 不同长度模型表面及空间压力分布云图

Fig.8 Surface and spatial pressure distribution of models with different tail lengths

综上所述,由于气流经过列车尾部流线端时会产生一个较大的负压区,且随着尾车长度的缩短,负压区逐渐向头车后端的车厢连接处靠近,导致头车的压差阻力升高。列车总长从3L减小到1.4L时,头车阻力系数仅增大了0.004,偏差为2.8%,列车总长从1.4L变化到1.3L和1.2L时,头车阻力系数分别增大了0.013和0.032,较三车编组状态偏差分别达8.4%和20.5%。因此,头车+0.4L尾部模型在缩短列车总长的同时对头车的阻力系数影响较小,可以作为无侧风时最短实验模型。

3.2 侧风工况下最短实验模型选取

高速列车头车的侧风行驶安全性是其气动外形设计的核心指标之一。因此,头车侧风风洞实验是一项重要的评价内容,其中侧向力对脱轨系数和倾覆力矩的有重要贡献^[17]。后续对侧风工况下不同头车实验模型的阻力和侧向力进行分析。

以3L模型为基准,对比2L模型、1.5L模型、1.4L模型和1.3L模型在6°和12°风向角工况下的头车气动力系数,结果如表3、表4所示。在6°和12°侧风下,模型从3L变化到1.4L时,头车阻力系数偏差均在2.3%以内,模型从1.4L变化到1.3L时,头车阻力系数分别上升了0.004和0.006。对于侧向力系数,各个模型的相比于3L模型的偏差均在1%以内。

车身表面和空间压力变化规律与3.1节相同,模型从1.4L变化到1.3L时,尾部的低压向头车车厢连接处靠近,导致连接处压力降低头车的气动阻力增加。

图9给出12°风向角时不同尾部模型在x=0.1L、x=0.5L和x=0.9L横截面处的流线图。可以看出,不同尾部模型在侧风下的列车背风侧流场结构基本一致,在0.5L处,背风侧脱落涡初步形成,涡核位置贴近车身。在0.9L截面处,背风侧的脱落涡的涡核位置远离车身,且涡核高度均在2/3H左右,随着尾部模型的缩短,脱落涡附近的低速区域范围略有减小,但不明显。不同模型的背风侧流场结构相似,使得各模型侧向力系数与3L模型差异均在1%以内。侧风6°风向角的结论与12°风向角一致,这里不再给出流线图。

表 3 风向角6°下各模型的头车气动阻力和侧向力系数
Tab.3 Drag and side force coefficients of the head car at 6°

模型编号	头车C _d	偏差/%	头车C _s	偏差/%
3L	0.204	0	0.372	0
2L	0.205	0.2	0.375	0.8
1.5L	0.202	-1.0	0.373	0.4
1.4L	0.201	-1.5	0.374	0.5
1.3L	0.205	0.1	0.373	0.2

表4 风向角 12° 下各模型的头车气动阻力和侧向力系数
Tab. 4 Drag and side force coefficients of the head car at 12°

模型编号	头车 C_d	偏差/%	头车 C_s	偏差/%
3L	0.215	0	0.821	0
2L	0.211	-1.6	0.823	0.2
1.5L	0.212	-1.5	0.820	-0.2
1.4L	0.210	-2.3	0.826	0.6
1.3L	0.216	0.1	0.819	-0.3

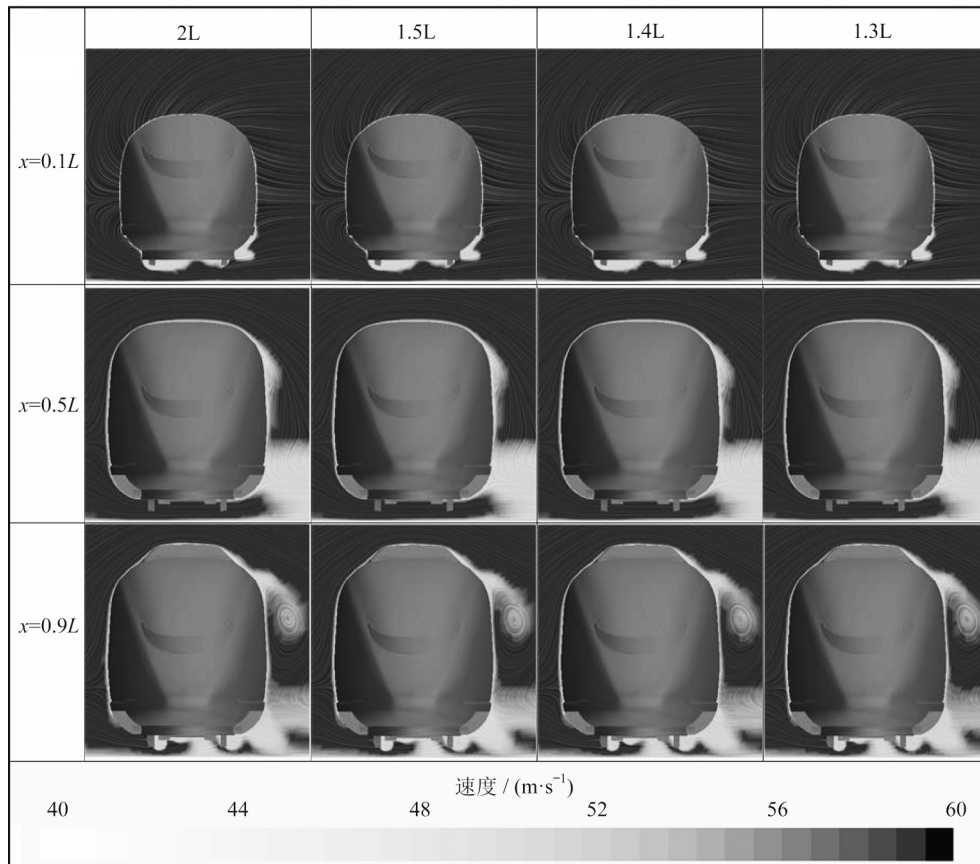


图9 风向角 12° 下各截面流线图

Fig. 9 Streamline of different cross-section plane at 12°

4 头车最大缩比模型选取

风洞实验头车最大缩比模型选取在物理上需要考虑3个问题:①风洞的边界效应;②模型的雷诺数效应;③模型的地面效应。因此,以上文选取的1.4L的1:1比例模型在半自由空间的气动力特性作为基准。采用行业标准计算域^[18]和本文2.1节的数值计算方法,进行头车气动总阻力、压差阻力和摩擦阻力的网格敏感性分析。3 280万、4 740万和6 310万网格数量的计算结果如表5所示。

三种网格划分策略的计算结果均在0.163~0.164范围内,随着网格加密,头车总阻力和压差阻力系数减小了0.001,压差与摩擦阻力占比约为

表5 实车头车气动阻力网格敏感性分析

Tab. 5 Drag coefficient sensitivity on mesh of the head car for real vehicle

网格数量	阻力系数	压差阻力占比/%	摩擦阻力占比/%
3 280W	0.164	73.7	26.3
4 740W	0.163	73.3	26.7
6 310W	0.163	73.1	26.9

73%和27%。前人对8节编组的CRH3高速列车实车气动力进行了数值模拟^[3],整列车压差阻力占比75.3%、摩擦阻力占比24.7%,本文结果与其占比接近。后续以4 740万网格的头车气动力数值结果作为最大模型选取的基准。

研究表明,当高速列车雷诺数超过临界雷诺数时,气动阻力系数进入自模区,阻力系数受雷诺数

影响可忽略不计^[6,21]。使用第 3 节中得到的最短 1.4L 头车模型,不同缩比模型的计算工况、阻塞比和长度与试验段占比如表 6 所示,对应的雷诺数在 2.3×10^6 到 6.1×10^6 (以车宽为参考长度)范围内。用 2.1 节的数值计算方法和边界条件,模拟开口式风洞中,不同缩比模型在 $220 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 下的头车阻力系数。

以 1.4L 的 1:1 模型作为参考,结果如图 10 所

示。1:8、1:6、1:4、1:3 和 1:1 的气动阻力系数分别为 0.162、0.166、0.164、0.159 和 0.163。以 1:1 的 1.4L 模型为基准,压差阻力占比从 63.9% 提高到 73.3%,是不同缩比模型引起的主要差异。随着模型尺寸的增加,阻力系数变化为非线性,风洞边界、雷诺数和地面效应共同影响头车气动阻力。以下从上述三个方面给出分析。

表 6 各缩比模型计算工况

Tab. 6 Configurations of different scale models

缩比模型	雷诺数	高度阻塞比/%	宽度阻塞比/%	面积阻塞比/%	模型试验段长度比/%
1:8	2.3×10^6	8.0	9.6	0.7	30.2
1:6	3.0×10^6	10.6	12.7	1.2	40.3
1:4	4.6×10^6	16.0	19.1	2.7	60.4
1:3	6.1×10^6	21.3	25.7	4.6	80.6

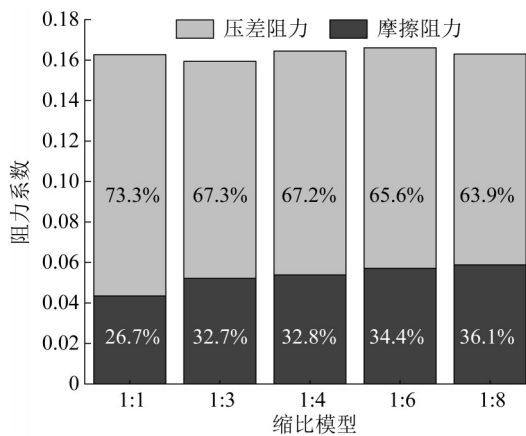


图 10 不同缩比模型的头车阻力系数

Fig. 10 Drag coefficient of different scale model

实验模型在开口式风洞中流场受到有限边界效应的影响,与实际流场的差异主要表现在^[19]:①阻塞效应;②轴向静压梯度引起的粘性效应;③水平浮力。对于阻塞效应,四个缩比模型的阻塞比分别为 4.6%、2.7%、1.2% 和 0.7%,采用理论公式计算^[20],所有模型的阻塞比修正均在 0.001 以下,可知阻塞效应对阻力系数影响可以忽略。头车所在位置的轴向静压系数梯度均小于 $0.005 \cdot \text{m}^{-1}$,其粘性效应影响可忽略不计。

图 11 给出离地高度 0.25m 处的风洞水平轴向静压系数曲线,4 个缩比模型的相对位置也在图中给出。其中,1:8、1:6 和 1:4 模型的头车均处于风洞试验段的零压力梯度区,占试验段总长均在 50% 以内。1:3 模型的头车的车厢连接处位于风洞收集口压力回升区,水平浮力导致车厢连接处压力升高,因此 1:3 模型的头车压差阻力系数比 1:4 模型降低了 0.004。水平浮力是风洞边界效应中的

主要影响因素。

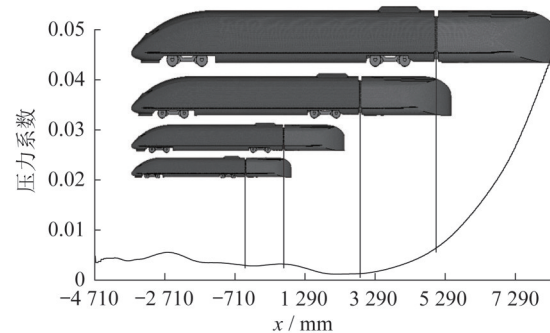


图 11 不同缩比模型在风洞试验段的位置

Fig. 11 Location of different scale models in wind tunnel test section

随着模型尺寸增大,雷诺数从 2.3×10^6 增加到实车的 1.3×10^7 (以车宽为参考长度),头车的摩擦阻力系数减小。1:8、1:6、1:4 和 1:3 模型与 1:1 模型摩擦阻力系数 0.043 的差值分别为 0.015、0.014、0.010 和 0.008。变化趋势符合湍流平板边界层摩擦阻力系数随雷诺数增大的变化规律。

行业和学界通常采用等比例缩比离地间隙的方法,对列车模型进行风洞试验和数值分析。由于 1:3 模型的压差阻力还受到风洞水平浮力的影响,这里不进行对比分析。由图 13 可知,压差阻力系数随模型尺寸的增大而增大,1:8、1:6、1:4 模型和 1:1 的 1.4L 模型压差阻力系数分别为 0.104、0.109、0.110 和 0.119,三个缩比模型压差阻力与实车的偏差分别为 12.7%、8.7% 和 7.2%。

将头车压差阻力分解为车身、排障器和转向架区域三部分,其中转向架区域包含转向架舱和转向架,如图 12 所示。可知,车身压差阻力系数随雷诺

数增加基本不变,排障器有小幅增加。1:8、1:4、1:1模型转向架区域的压差阻力系数分别为0.050、0.056和0.062,占比从47.7%增大到51.9%。推断是地面效应导致不同缩比模型底部结构压差阻力产生变化,以下对其进行详细分析。

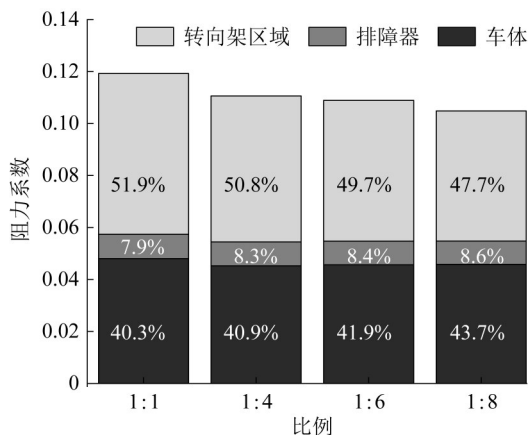


图12 不同缩比模型头车压差阻力组成图

Fig 12 Drag composition of head car with different scale models

在1:8、1:6和1:4三个缩比模型中,离地间隙相对于车体的比例相同,其绝对值不同。图13给出了头车底部对称中截面的 $z=0.75G$ 高度的平均流速, G 为模型离地间隙。第1个速度峰值的位置是排障器下部,第2、3、4个速度峰值是头车1位端转向架区域,第5、6个速度峰值是头车2位端转向架区域。

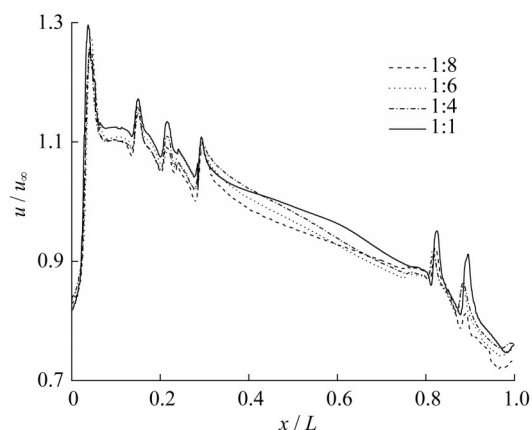


图13 不同模型列车底部流速 $z=0.75G$ 处的

Fig. 13 Mean velocity at $z=0.75G$ in different scale models

由图13可知,随模型尺寸的增大,底部平均流速随之增大,导致其撞击到转向架和转向架舱后壁上的滞止压力增大,压差阻力增加。在1位端转向

架区域,实车模型平均流速较1:8模型大 $0.022u_{\infty}$,在2位端转向架区域大 $0.031u_{\infty}$ 。文献中也表明,当模型比例尺寸一定时,模型离地间隙绝对值不同会使得列车底部流速存在差异^[21]。可知,地面效应是不同缩比模型底部结构压差阻力变化的主要原因。

从风洞边界效应的角度,模型试验段长度比是制约实验模型选取的主要因素。从地面效应的角度,1:4实验模型的底部流速分布与实车模型接近,其总阻力系数,压差阻力及其占比均与实车模型更为接近。因此,开口式风洞选取1:4的头车气动实验模型更为合理。

5 结论

(1)开口式风洞无侧风时,头车阻力系数随着尾部模型的缩短而增加,是尾部负压区前移导致车厢连接处压力降低,1.4L模型头车阻力系数较3车编组的头车减小了0.004,偏差为2.8%,可以作为头车气动力最短实验模型。

(2)开口式风洞侧风时,头车阻力系数、侧向力系数随尾车模型缩短的偏差分别在2.5%和1%以内,背风侧流场结构基本一致。

(3)开口式风洞最大缩比模型选取受风洞边界效应、雷诺数效应和地面效应共同影响,水平浮力是开口式风洞边界效应的主要影响因素,雷诺数效应使得头车摩擦阻力减小,地面效应使得头车压差阻力增大,1:8、1:6、1:4与1:1的头车压差阻力偏差为12.7%、8.7%和7.2%,压差阻力占比分别为63.9%、65.6%、67.2%和73.3%。

(4)从风洞实验边界效应和地面效应的角度,开口式风洞中1:4缩比头车气动实验模型的底部流速分布、总阻力系数、压差阻力及其占比均与实车模型更为接近,是更为合理的模型缩比尺寸。

作者贡献声明:

杨志刚:概念提出,理论指导,实验与仿真资源

刘嘉楠:数值计算,数据处理,论文撰写

陈羽:理论指导,数据分析,文章撰写与修改

参考文献:

- [1] 丁叁叁,陈大伟,刘加利.中国高速列车研发与展望[J].力学学报,2021,53(1):35.
DING Sansan, CHEN Dawei, LIU Jiali. Research, development and prospect of China high-speed train [J].

- Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(1): 35.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 杨志刚,马静,陈羽,等. 横风中不同行驶工况下高速列车非正常空气动力特性[J]. 铁道学报, 2010,32(2):18.
YANG Zhigang, MA Jing, CHEN Yu, *et al.* The unsteady aerodynamic characteristics of a high-speed train in different operating conditions under cross wind[J]. Journal of the China Railway Society, 2010,32(2):18.
- [5] 黄志祥,陈立,张为卓. 高速列车模型风洞试验的模拟方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2013,10(3):87.
HUANG Lixiang, CHEN Li, ZHANG Weizhuo. Study on simulation manner of wind tunnel test of high-speed train model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, 10(3):87.
- [6] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京:中国铁道出版社,2007.
TIAN Hongqi. Train aerodynamics [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007.
- [7] British Standard Institution. Railway applications— aerodynamics—part6: requirements and test procedures for cross wind assessment: BS EN 14067-6 [S]. London: British Standard Institution, 2018.
- [8] BAKER C J, BROCKIE N J. Wind tunnel tests to obtain train aerodynamic drag coefficients; Reynolds number and ground simulation effects [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1991, 38(1):23.
- [9] WILLEMSSEN E. High Reynolds number wind tunnel experiments on trains [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1997, 69/71:437.
- [10] 黄志祥,陈立,蒋科林. 高速列车模型风洞试验数据的影响因素分析[J]. 铁道学报, 2016, 38(7):34.
HUANG Zhixiang, CHEN Li, JIANG Kelin. The analysis of effect factors on wind tunnel testing data of high-speed train model [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(7):34.
- [11] 韩运动,姚松. 高速列车气动性能的尺度效应分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017,51(12):2383.
HAN Yundong, YAO Song. Scale effect analysis in aerodynamic performance of high-speed train [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(12): 2383.
- [12] NIU Jiqiang, LIANG Xifeng, ZHOU Dan. Experimental study on the effect of Reynolds number on aerodynamic performance of high-speed train with and without yaw angle [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 157:36.
- [13] BAKER C J. A review of train aerodynamics Part 2 — applications [J]. The Aeronautical Journal, 2014, 118 (1202): 345.
- [14] GUO Zijian, LIU Tanghong, CHEN Zhengwei, *et al.* Aerodynamic influences of bogie's geometric complexity on high-speed trains under crosswind [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 196: 104053.
- [15] 杨志刚,毛懋,陈羽. 高速列车底部结构参数对气动阻力作用规律[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019,47(7):1055.
YANG Zhigang, MAO Mao, CHEN Yu. Influence laws between underbody structure parameters of high speed train and aerodynamic drag [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019,47(7):1055.
- [16] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, *et al.* A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flow—model development and validation [J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227.
- [17] 李田,张继业,张卫华. 横风下高速列车流固耦合动力学联合仿真[J]. 振动工程学报, 2012,25(2):138.
LI Tian, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Co-simulation of high-speed train fluid-structure interaction dynamics in crosswinds [J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25 (2):138.
- [18] 中华人民共和国国家铁路局. 中华人民共和国铁道行业标准—铁路应用空气动力学 第4部分:列车空气动力学性能数值: TB/T 3503.4-2018[S]. 北京:中华人民共和国国家铁路局,2018.
National Railway Administration of the people's Republic of China. Railway industry standard of the People's Republic of China—railway applications— aerodynamics—part4: requirements for train aerodynamic simulation: TB/T3503.4-2018 [S]. Beijing: State RailwayAdministration, 2018
- [19] 庞加斌,林志兴,余卓平,等. TJ-2风洞汽车模型试验的修正方法[J]. 汽车工程, 2002,24(5):371.
PANG Jiabin, LIN Zhixing, YU Zhuoping, *et al.* Correction methods for automotive model tests in TJ-2 wind tunnel [J]. Automotive Engineering, 2002,24(5):371.
- [20] MERCKER E, WIEDEMANN J. On the correction of interference effects in open jet wind tunnels [C]//SAE 96061. Detroit: Society of Automotive Engineers, 1996:795-809
- [21] 夏超,单希壮,杨志刚,等. 风洞地面效应对高速列车空气动力学特性的影响[J]. 铁道学报, 2015(4):8.
XIA Chao, SHAN Xizhuang, YANG Zhigang, *et al.* Influence of ground effect in wind tunnel on aerodynamics of high speed train [J]. Journal of the China Railway Society, 2015(4):8.