文章编号: 1001 - 2486(2003) 06 - 0101 - 05

动力车纵向气动力风洞试验及数值模拟*

梁习锋[1], 田红旗[1], 邹建军[2]
(1. 中南大学高速列车研究中心, 湖南 长沙 470015; 2. 国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 采用风洞试验(在地板抽吸和不抽吸情况下) 和数值模拟计算对 200km/h 动力集中型电动旅客列车组动力车纵向气动力进行了研究, 得到了动力车作为头、尾车的纵向气动力系数。结果表明, 地板抽吸后, 头、尾车空气阻力均有明显增加, 头车负升力增加, 尾车正升力减少; 动力车头、尾两车联挂时底部空气阻力占总的空气阻力的 25.9%, 列车减阻的重点在车体底部空气阻力。

关键词: 动车组; 风洞试验; 数值计算
中图分类号: U266.2 文献标识码: A

The Wind Tunnel Test and Numerical Simulation of Longitudinal Aerodynamic Force of the Traction Car

LIANG Xi-Feng[1], TIAN Hong-qi[1], ZOU Jian-Jun[2]
(1. High Speed Train Research Centre, Central South University, Changsha 410075, China;
2. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The wind tunnel tests (in the case of suction plate and normal plate) and numerical simulations of longitudinal aerodynamic force of the 200km/h EMU's traction car are performed, and the longitudinal aerodynamic force coefficients are obtained respectively when the traction car is the front and rear one. The results show that, in the case of suction plate, the aerodynamic drag of the front car and the rear car increase evidently, and the negative lift of the front car increases while the positive lift of the rear decreased; the aerodynamic drag of the sub-floor contributes to the total drag by 25.9 percent. So to decrease drag the emphasis is the sub-floor.

Key words: EMUs; wind tunnel test; numerical simulation

列车运行时受到的空气阻力与车速的平方成正比, 随着列车速度不断提高, 空气阻力急剧增大。如德国 ICE 列车运行速度为 200km/h 时, 空气阻力已占列车总阻力的 70% 左右。近年来, 随着我国铁路事业的发展, 列车运行速度越来越高, 列车运行空气阻力成为列车提速和发展高速铁路必须解决的空气动力学问题之一。国外在提高传统列车运行速度和研制高速列车过程中, 对如何测定列车空气阻力做过许多研究, 研究方法以风洞试验为主, 辅以实车试验和数值模拟方法[1]。

“200km/h 动力集中型电动旅客列车组”(以下简称动车组) 是我国自行研制的首列 200km/h 快速列车。本文介绍了在国防科技大学低速风洞中对动车组动力车开展的纵向气动力研究情况, 采用流体动力学计算软件 CFX 进行了数值模拟计算, 并将风洞模型试验结果与数值模拟计算结果进行了对比分析。

1 动力车纵向气动力风洞试验

1.1 风洞试验设备及列车模型

1.1.1 KD-03 低速风洞

试验在国防科技大学 KD-03 低速风洞中进行, KD-03 低速风洞是一座闭口直流式切角矩形低速风

* 收稿日期: 2002 - 12 - 20
基金项目: 铁道部科技发展计划项目
作者简介: 梁习锋(1963—), 男, 副教授, 硕士。

洞,实验段长宽高尺寸为2m × 1m × 0.8m,空风洞最大风速60m/s。本次试验风速为20~ 50m/s。

1.1.2 均匀抽吸地板系统

列车是在地面运行的长大物体,进行列车模型风洞试验时,来流在固定地板表面形成的边界层顺着流向不断加厚,使模型气动力测量产生较大偏差[2]。均匀抽吸地板和移动带地板技术目前是较先进的地板边界层控制技术。本次试验中采用了国防科技大学和中南大学铁道学院联合研制的均匀抽吸地板[3]。

1.1.3 列车模型及安装

试验模型为1∶25的缩比木质模型。受风洞试验段尺寸限制,模型列车由两节车编组而成。一节为动力车模型(见图1),另一节为整流模型车(见图2)。测力试验只对动力车模型进行,整流模型车的作用是当动力车分别处于头车和尾车位置时,使气流平稳过渡,提高测量的准确度。

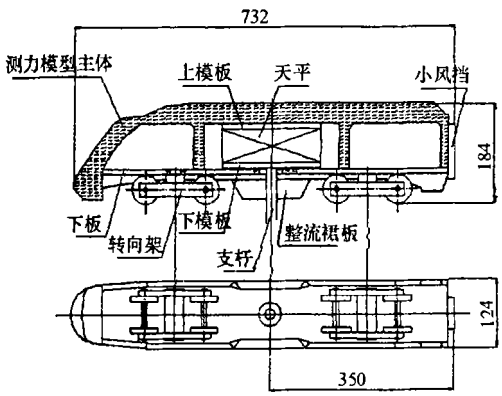


图1 动车测力模型

Fig.1 Measuring force model of the traction car

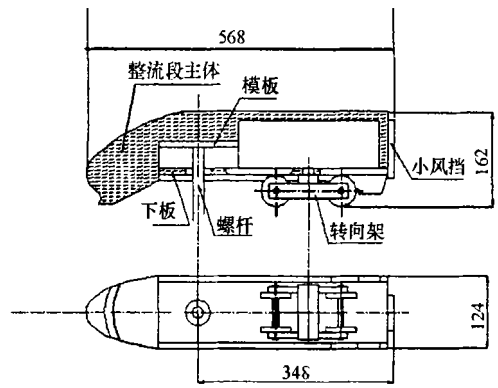


图2 整流车模型

Fig.2 Model of the streamlined car

本次试验将对动力车分别作为头车和尾车时进行测力试验,模型安装见图3,模型由穿过地板的支杆安装在风洞实验段的底板上,抽吸地板固定在风洞中的升降导轨上,通过调节地板高度来调节地板与模型间的距离。模型气动力由盒式六分量应变天平测量,天平通过腹撑安装在动力车车身模型内部。

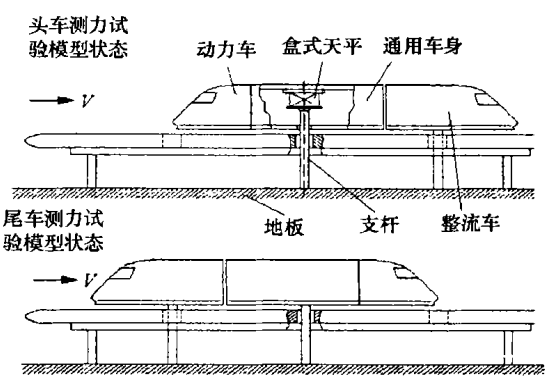


图3 风洞试验模型状态示意图

Fig.3 Sketch map of the model state in the wind tunnel

1.2 试验内容

在地板抽吸和不抽吸两种情况下,分别对动力车位于头车和尾车时的气动力进行了测量。试验是在侧滑角为0°情况下进行的,试验风速为20~ 50m/s。为消除偶然误差,每一状态作3次重复性试验。

1.3 试验结果

为与数值计算结果进行对比,风洞试验结果将在后面介绍。

2 动力车空气阻力数值模拟计算

本次数值计算采用国际上通用的大型流场计算软件CFX5.3进行,该软件采用非结构网格和有限体积法分别对区域和方程进行离散,流场求解采用耦合求解器,它比传统的分离求解器速度快,只需较少的迭代步数就可得到收敛解。在求解器迭代过程中,可利用求解管理器方便地监控求解过程。

描述列车周围空气流动的控制方程包括连续性方程、动量方程及湍流模型方程,CFX5.3提供了多种湍流模型,这里我们选取工程上应用较广的k-ε双方程模型。有关控制方程的描述见文献[4]。

2.1 计算模型

本次计算列车编组为两节车(头车+ 尾车), 采用全尺寸模型, 坐标系如图 4 所示($Y = 0$ 为轨面, $Z = 0$ 表示纵向对称面, 动车头最前点 $X = 0$)。由于计算机硬件条件有限, 计算模型不可能完全模拟列车的真实情况, 必须对列车某些结构尤其是列车底部进行简化, 否则将导致计算网格急剧增加, 在现有计算机硬件条件下无法求解。具体简化措施为: ㈠ 去掉转向架, 以裙板代替; ㈡头、尾两节车连接在一起, 中间不考虑风挡; ㈢不考虑受电弓。

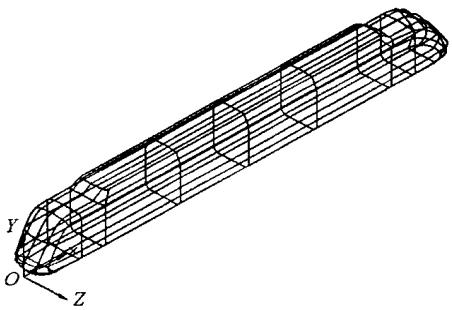


图 4 计算模型图

Fig. 4 The computational model

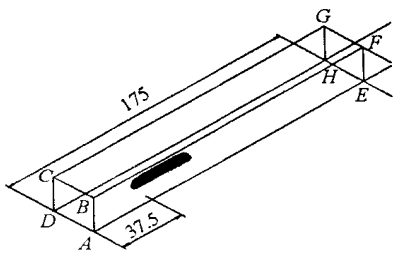


图 5 计算区域

Fig. 5 The computational zone

2.2 计算区域

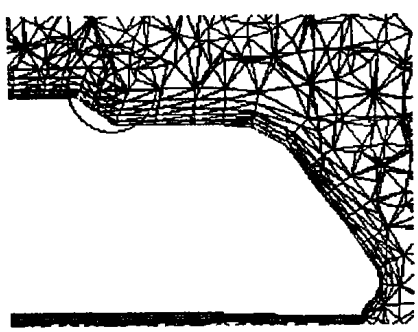
由于列车尾部存在较强的横向流动, 对列车的安全运行影响很大, 因此计算区域长度的选取应使区域下游边界尽可能远离列车尾部。本次计算选取尾流区长度为 100m, 列车头部距计算区域上游边界的长度与列车的全长基本相当, 为 37.5m, 计算区域总长度取为 175m, 宽 25m, 高 20m, 列车底部距计算区域底面为 190mm, 计算区域如图 5 所示, 计算模型阻塞比为 2.4%。

2.3 边界条件

为消除地板附面层影响, 计算区域底面给出的边界条件是滑移边界条件, 速度与来流速度一致, 区域两侧面和顶面以及列车表面均给出无滑移边界条件, 在入口截面上按均匀流给定 X 向速度分量, Y、Z 向速度分量为零, X 向给定的流速分别为 20m/s、30m/s、40m/s、50m/s, 出口截面上静压系数为 0。

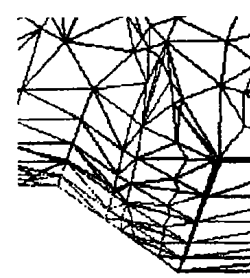
2.4 网格生成

本次计算生成面单元 6.5 万个, 体单元 186.4 万个, 节点 34.1 万个。其中, 面单元为三角形网格, 体单元为非结构四面体网格。网格之间通过节点连接。为了获得列车表面边界层信息, 对列车表面进行了网格控制(加密列车表面附近网格, 如图 6)。



(a) 计算区域局部网格

(a) Partial grid of the computational zone



(b) 网格局部放大

(b) Amplified partial grid

图 6 数值网格示意图

Fig. 6 Sketch map of the numerical computation grid

3 结果分析

3.1 雷诺数的影响

进行变风速试验的目的是为了研究雷诺数对阻力系数的影响。图7和图8给出了动力车模型作为头尾车时风洞试验(地板不抽吸)和数值模拟计算阻力系数、升力系数与风速的关系曲线。从图上可以看出,无论是风洞试验还是数值计算,随风速增加,阻力系数及升力系数(绝对值)均有所下降,两者的趋势是一致的。对风洞试验而言,风速大于20m/s以后阻力系数基本不变;而对于数值计算来说,风速大于40m/s以后,阻力系数基本不变。上述现象说明,对风洞试验和数值计算来说,由于模型缩比及模型结构不同,流动进入自模拟区的临界雷诺数并不相同。对于升力而言,当风速大于40m/s以后,升力系数基本不变,因此可认为40m/s风速所对应的雷诺数为自模拟区临界雷诺数。

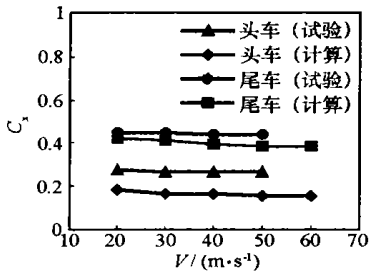


图7 空气阻力系数 C_x 与风速的关系

Fig. 7 Relationship of the air drag coefficient with the wind speed

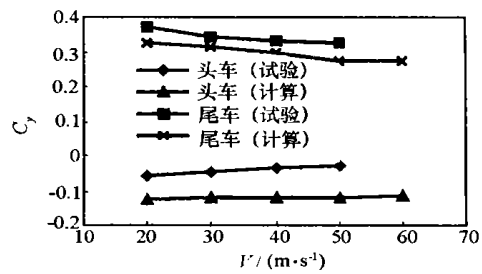


图8 升力系数 C_y 与风速的关系

Fig. 8 Relationship of the lift coefficient with the wind speed

3.2 地板附面层的影响

为对比抽吸地板与固定地板对风洞试验结果的影响,本试验对动力车作为头、尾车时分别采用地板抽吸和不抽吸的办法进行了测力试验。当来流速度 V_∞ = 40m/s时,地板抽吸对测试结果的影响见表1。

表1 地板抽吸对测试结果的影响

Tab. 1 Influences of the suction plate on measuring results

项目名称		C_x	C_y	C_{mz}	备注
头车		0.269	-0.034	-0.516	地板不抽吸
尾车		0.442	0.332	-0.412	
头车		0.283	-0.055	-0.710	地板抽吸
尾车		0.473	0.317	-0.400	
地板抽吸影响	头车	5.2%	-61.8%	-37.6%	$\frac{R_Y - R_N}{R_N} \times 100\%$
	尾车	7.01%	-4.51%	-2.91%	

注:表中 R_N 表示地板不抽吸的测量结果,R_Y 表示地板抽吸的测量结果。

从表1可以看出,地板抽吸以后,头、尾车空气阻力均有明显增加,由于地板附面层顺流动方向增厚,因此,尾车空气阻力增加幅值大于头车。地板抽吸使头车负升力增加,尾车正升力减少。

3.3 试验与数值计算的相关性

由于列车长细比很大,数值计算所需的硬件条件很高,加之列车底部(转向架、底部悬挂部件)和上部结构(受电弓)复杂,在目前计算机硬件条件下,很难将这些因素全部考虑,因此,目前列车数值计算只能作为定性分析及头型比选的依据。表2给出了风速为40m/s时风洞试验和数值计算中阻力系数的对比情况。

表 **2** 风速为 **40**m/s 时风洞试验和数值计算阻力系数对比

Tab. 2 Comparison of the drag coefficient between the results of the wind tunnel test and that of numerical computation at the speed of 40m/s

项目名称		头车(C_x)	尾车(C_y)	头车+ 尾车(C_{mz})	备注
风洞实验		0.269	0.442	0.711	地板不抽吸(固定地板)
		0.283	0.473	0.756	地板抽吸
数值计算		0.163	0.397	0.560	地板滑移(活动地板)
计算与试验比较	不抽吸	39.4%	10.2%	21.2%	$\frac{R_{\text{wind}} - R_{\text{computation}}}{R_{\text{wind}}} \times 100\%$
	抽吸	42.4%	16.1%	25.9%	

数值计算结果与地板抽吸风洞试验结果相差 25.9%, 说明对于试验模型而言, 头、尾车两车联挂时车体底部阻力占总阻力的 25.9%。从以往风洞试验结果来看[1], 车辆底部结构不同, 其空气阻力占总阻力的份额也不相同, 车体底部阻力大约占总阻力的 20% ~ 40%。从定性的角度分析, 上述计算与试验结果的差值是合理的。

4 结束语

(1) 风洞试验研究结果表明, 动力车作为头车时(地板抽吸, 40m/s), 纵向气动力系数分别为

$$C_x = 0.283, \quad C_y = -0.055, \quad C_{mz} = -0.710$$

尾车时纵向气动力系数分别为

$$C_x = 0.473, \quad C_y = 0.317, \quad C_{mz} = -0.393$$

(2) 地板抽吸以后, 头、尾车空气阻力均有明显增加, 头车增加 5.2%, 尾车增加 7.01%, 头车负升力增加, 尾车正升力减少。

(3) 经计算与风洞试验结果对比, 动力车头、尾车两车联挂时车体底部阻力占总阻力的 25.9%, 因此, 列车减阻的重点在车体底部空气阻力。

参 考 文 献:

[1] 陈南翼, 张健. 高速列车空气阻力试验研究[J]. 铁道学报, 1998, 20(5).

[2] Sardou M. The Sensitivity of Wind Tunnel Data to a High Speed Moving Ground for Different Types of Road Vehicles[C]. S. A. E. 880246, 1988.

[3] 易仕和, 邹建军, 等. 利用均匀抽吸地板进行高速列车模型地板边界层影响的试验研究[J]. 流体力学实验与测量, 1997, 11(2).

[4] 曾剑明, 陈南翼, 王开春. 列车周围流场数值研究[J]. 长沙铁道学院学报, 1998, 16(2).