

# 考虑车下环境的高速动车组空气流场数值仿真

左建勇, 吴萌岭, 罗卓军

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 200092)

**摘要:** 在建立典型高速动车组模型、轨道等环境模型基础上, 根据流场有限元知识, 将整体仿真模型划分为车头部分、车尾部分、中间车前部及中间车后部。采用对称计算域, 选择非结构网格进行网格处理, 进而仿真分析  $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的流场分布规律。结果表明: 建立的典型动车组模型总体受力  $69.4 \text{ kN}$ , 车下部分尤其是转向架附近流场分布各异, 湍流形式明显, 该部分阻力占总体阻力  $33.6\%$ , 最大正负压力差约  $8 \text{ kPa}$ 。通过分析比较 ICE 和 TGV-A 高速列车相关试验数据, 验证了仿真方法与结果的合理性。

**关键词:** 高速动车组; 车下环境; 空气流场; 数值仿真

**中图分类号:** U270.1

**文献标志码:** A

## Simulation on Air Flow Field of High-speed Train Concerning the Environment Under Train

ZUO Jianyong, WU Mengling, LUO Zhuojun

(Institute of Railway and Urban Mass Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** A 3D model of the EMU and the railway is built, based on the requirements of finite element methods (FEM), the whole simulation model of the EMU is divided into 4 different parts to improve the efficiency of simulation, including the head part of the train, the tail part of the train, the front part of middle vehicles and the rear part of middle vehicles. The distribution characteristic of the air flow field at the speed of  $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  is simulated by using unstructured mesh. The simulation results show that the resistance of the whole train is approximately  $69.3 \text{ kN}$ . The lower parts of the flow field, especially the parts near the bogies, show very complicated distribution, which are dominated by turbulence. The lower parts of the flow field contribute about  $33.6\%$  of overall resistance, and the maximum pressure difference of these parts is about  $8 \text{ kPa}$ . Compared with the test results of inter city express (ICE) and Train à Grande Vitesse (TGV) high-speed trains, the proposed simulation method and its results are verified.

**Key words:** high speed EMU; environment under train; air flow field; numerical simulation

随着高速动车组运行速度的提高, 空气流场对动车组影响越来越明显<sup>[1]</sup>, 资料及试验数据表明当高速列车以  $250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  速度平稳运行时, 空气阻力约占列车总阻力的  $80\% \sim 90\%$  以上<sup>[2]</sup>。高速动车组在运行过程中其近地面空间将形成一个复杂的流场, 该流场直接作用在车底及转向架上, 包括安装在转向架上的各个部件并相互作用<sup>[3-7]</sup>。因此, 有必要研究其车下流场规律, 进而揭示高速动车组车下复杂流场环境与高速动车组之间的相互作用关系。本文在建立典型高速动车组模型、轨道等环境模型的基础上, 根据流场有限元知识将高速列车整体仿真模型划分为车头部分、车尾部分、中间车前部及中间车后部四个计算区域, 仿真分析了运行速度为  $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时高速列车各部分的流场分布规律和运行阻力分布规律。

## 1 仿真对象及模型

图 1 为典型高速动车组及环境仿真对象, 通过 CATIA 等三维软件建立列车模型, 利用流场分析软件确定车下近地面流场分析域, 研究动车组运行过程中列车与流场环境间的耦合关系。

仿真研究对象的流场复杂, 网格数较多。六节编组动车组如果在同一模型中进行计算, 网格数将达 7 000 万个, 拟通过对称分析简化处理方式, 采用小型工作站进行仿真揭示其规律性变化关系。根据动车组及环境构成特点, 将模型划分为车头部分、车尾部分、中间车前部和中间车后部四种类别。通过这四种类别仿真的不同组合即可得出六节、八节等编组列车的仿真结果, 图 2 为典型动车组模型划分示

意图。

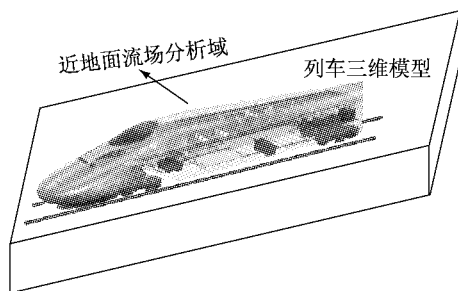


图 1 高速动车组及环境仿真对象

Fig.1 Simulation object of high-speed train and its operating environment

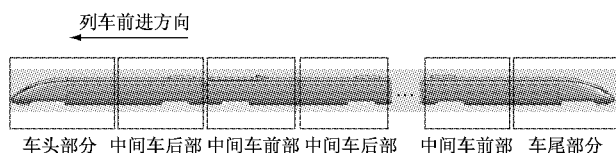
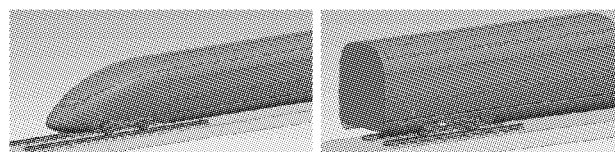


图 2 典型动车组仿真建模简化方法

Fig.2 Modelling method of typical high speed train

在进行动车组类别划分的基础上,仍需对动车组各部分进行简化处理.车头部分和车尾部分所采用的三维模型相同,区别在于 Fluent 软件中所设置边界条件有所差异,仿真中该部分建模如图 3a 所示.车头部分和车尾部分模型简化如下:① 转向架采用无动力转向架,对结构复杂且对流场影响不大的部件进行简化,重点考虑构架、轴箱、心盘、空气弹簧、轮对、轴盘、轮盘以及制动盘夹钳等对流场影响;② 运行环境中轨道模型采用整体道床,为了保证在最大程度模拟车下真实流场的前提下减少模型生成的网格数量,在转向架附近设置了钢轨以及轨枕对扣件进行简化;③ 删除了车下转向架附近车体裙边及其周围复杂结构,一方面为简化网格划分减小计算模型规模,另一方面相对于转向架和车体来说裙边结构面积较小且基本呈纵向分布,对分析列车阻力分布趋势影响较小;④ 简化了整个模型中影响网格划分的小边、小面、小体和小缝隙.

中间车前部和中间车后部所采用的三维模型相同,其 Fluent 软件中所设置的边界条件有所差异,仿真中该部分建模如图 3b 所示.中间车前部和中间车后部模型简化如下:① 转向架同样为无动力转向架,处理方式同车头部分和车尾部分;② 运行环境中关于轨道的建模,处理方式同车头部分和车尾部分;③ 简化车辆连接处风挡;④ 简化整个三维模型中影响网格划分的小边、小面、小体和小缝隙.



a 车头部分和车尾部分及环境模型 b 中间车前部和中间车后部及环境模型

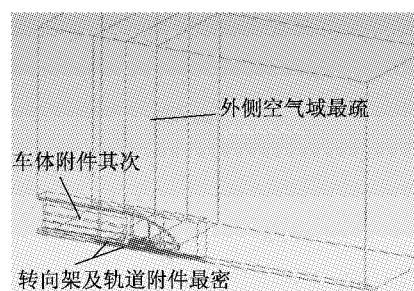
图 3 整体仿真模型的简化

Fig.3 Simplification of the simulation model

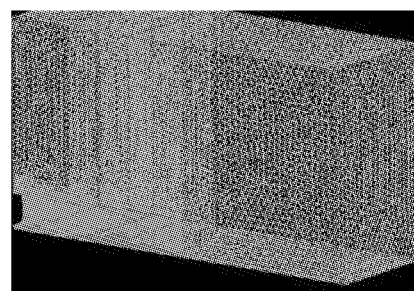
## 2 仿真过程与结果

### 2.1 参数设置

动车组具有中截面几何对称特点,因此计算域采用对称计算域,同时考虑了空气绕流和流场的充分延展.根据实际计算需要采用非结构网格进行划分.将上述四种类别模型与空气域采用布尔运算可得到相应空气域模型.由于仿真模型复杂,因此在网格划分时结构复杂的地方设置较小的网格尺寸,结构简单的地方设置较大的网格尺寸.以车头部分为例说明网格划分的策略如图 4 所示,计算工况的空间单元体网格数约 500 万.使用 Gambit 软件进行网格划分:车下部分、转向架及其附近空气域以及轨道环境的网格划分较密;车体表面附近网格划分较密,但相对转向架附近网格要疏;离车体表面及转向架比较远的外侧空气域的网格较疏.车尾部分、中间车前部、中间车后部模型的网格划分策略参照车头部分进行.



a 计算域案例



b 网格划分案例

图 4 车头部分空气域模型

Fig.4 Air flow model of the head part of the train

分别对车头部分、中间车前部、中间车后部和车尾部分流场模型进行分析,车头部分的入口面另外设置在车头前方,车尾部分出口面设置在车尾后方.如第一节车的车辆中部分界面作为车头部分流场模型的出口面和中间车后部流场模型的入口面,第一节车后转向架与第二节车前转向架的分界面作为中间车后部流场模型的出口面和中间车前部流场模型的入口面.

四种类别算例在 Fluent 中边界条件设置如下:入口截面均匀来流设置为  $300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,雷诺数以车体高度为特征长度取  $2.46\times 10^7$ ;出口面设为压力出口;地面为移动壁面边界条件;对称面为对称边界条件;车体表面为无滑移壁面边界条件;流域上表面和侧面设为对称边界条件.按不可压缩定常计算方式进行计算,湍流模型选用 Realizable  $k-\epsilon$  两方程模型,并选用 Coupled 压力修正算法对计算模型进行一阶精度计算,当残差收敛到  $10^{-3}$  数量级后再进行

二阶精度计算,直至残差小于  $10^{-4}$ .

2.2 仿真结果

图 5 为车头部分、车尾部分、中间车前部、中间车后部仿真压力云图,表 1 为相应部分的仿真数值.可以看出:① 车头部分的前端有较大正压力,最大正压约 4 kPa;车底转向架附近特别是转向架前方出现负压,最大负压约 2 kPa.因此改善转向架附近结构设计可有效减小空气阻力,同时也可改善流场对转向架的受力影响.② 车尾部分的车体表面呈现较大面积负压,最小负压出现在转向架附近约 3 kPa.同时在车尾部及转向架靠尾部后侧出现局部正压变化.③ 中间车前部的转向架来流方向压力较大,转向架附件区域紊流明显,正负压差最大约 8 kPa.④ 中间车后部的转向架来流方向压力较大,正负压最大约 6 kPa,相比中间车前部而言转向架附近空间的压力变化平缓.

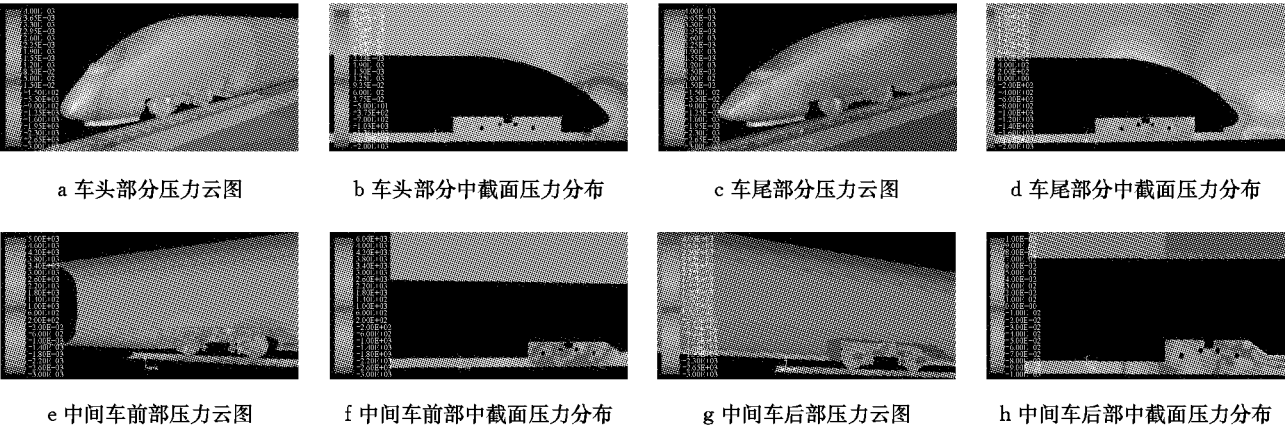


图 5 仿真压力云图

Fig.5 Simulation results

表 1 仿真结果( $300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ )

Tab.1 Simulation results of different parts( $300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ )							N
项目	$F_{LP}$	$F_{TP}$	$F_{CL}$	$F_{ZX}$	$F_{CX}$	$F_{CT}$	总计
车头部分	47.10	84.38	171.46	430.44	1 456.56	3 474.02	5 663.96
车尾部分	53.20	123.82	250.02	1 039.78	1 577.10	6 291.16	9 335.08
中间车前部	42.46	262.80	292.00	2 604.48	2 892.98	1 089.08	7 183.80
中间车后部	54.12	131.66	216.28	963.38	1 160.92	1 166.00	3 692.36

注: $F_{LP}$ 表示轮盘所受的阻力; $F_{TP}$ 表示轴盘所受的阻力; $F_{CL}$ 表示车轮所受的阻力; $F_{ZX}$ 表示转向架所受的阻力; $F_{CX}$ 表示车下部分所受的阻力; $F_{CT}$ 表示车体表面所受的阻力.

3 对比分析

3.1 仿真数据分析

根据第 2 节内容,分析运行速度为  $300\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  时六节编组动车组的运行阻力可按式(1)进行计

算,结果如表 2 所示.从表中可知车体表面和车体上靠近转向架附近所受阻力最大,分别占总阻力 30.3%和 33.6%,即整个车体所受的阻力占总阻力的 63.9%,车下转向架包括构架、轮对和制动盘等占比为 36.1%.

$$F = F_1 + 5(F_2 + F_3) + F_4$$

表2 六节编组列车以  $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  运行时的各部分阻力仿真结果

Tab.2 Drag values of different parts of a six-car train at  $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

项目	阻力/N	比例/%
轮盘1	-340.93	0.5
轮盘2	-242.28	0.4
轮对1	-1 523.32	2.2
轮对2	-1 439.59	2.1
轴盘1	-1 462.43	2.1
轴盘2	-718.09	1.0
车体表面	-21 040.60	30.3
转向架附近	-23 303.14	33.6
转向架除轮对、轮盘、轴盘	-19 309.48	27.8
整体模型	-69 379.86	100.0

注:车体表面阻力值为除去车底下转向架附近车体表面的阻力值。

表3 计算结果与 ICE 试验数据对比( $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )

Tab.3 Comparison of simulation and ICE test results( $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )

项目	仿真计算		ICE 试验结果		TGV-A 试验结果	
	阻力/kN	比例/%	阻力/kN	比例/%	阻力/kN	比例/%
头尾部压差及车体表面	21.0	30.3	27.0	45.0	17.0	27.4
车体下部除转向架部分	23.3	33.6	33.0	55.0	20.0	32.3
转向架	25.1	36.1			25.0	40.3
整体模型	69.4	100.0	60.0	100.0	62.0	100.0

注:ICE 试验数据仅在转向架之间的下部设备上装线型外罩;TGV-A 编组 M+10T+M,列车总重 490 t。

必要的盖板、导流机构等措施改变车下环境的流场分布以减小风阻影响。

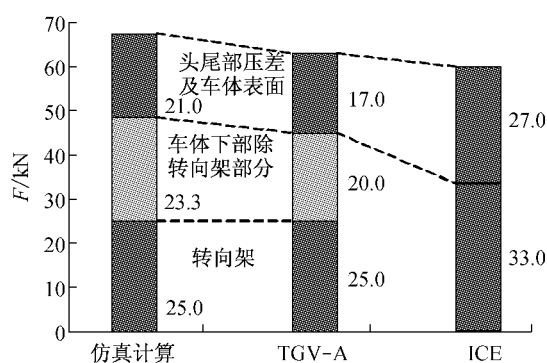


图6 仿真结果与试验数据对比

Fig.6 Result comparison between the simulation and experiment

## 4 结论

(1) 高速动车组在高速运行时流场环境与列车相互作用,尤其是近地面车下环境将形成一个复杂的流场,有必要研究其耦合关系。

(2) 建立了包含车下环境的高速动车组流场规律仿真模型,依据流场有限元知识提出将模型划分

式中: $F$ 为六节编组列车总阻力; $F_1$ 为车头部分阻力; $F_2$ 为中间车后部阻力; $F_3$ 为中间车前部阻力; $F_4$ 为车尾部分阻力。

### 3.2 试验对比

根据文献[2],ICE 和 TGV-A 高速列车车体及关键部件的风阻试验数据如表3所示。

图6为高速动车组模型仿真结果与ICE和TGV-A的数据对比结果。由图6可知高速动车组在 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 运行时,车体表面及头尾压差形成的阻力为 $17 \sim 27 \text{ kN}$ ;转向架部分阻力约 $25 \text{ kN}$ ;因转向架附近空间及间隙等引起的阻力至少 $20 \text{ kN}$ 。因此在关注动车组外形、车体等风阻影响的同时应重点考虑减小转向架附近空间的风阻影响,可通过设置

为车头部分、车尾部分、中间车前部及中间车后部四个类别的方法,有效提高了仿真计算效率,并给出了整体模型仿真计算公式。

(3) 通过与部分高速列车如ICE和TGV-A的试验数据进行对比,验证了上述仿真思路与计算的可行性与合理性。

(4) 针对所建立的六节编组动车组模型,仿真结果表明:其总体受力 $69.4 \text{ kN}$ ,车下部分尤其是转向架附近流场分布各异,紊流形式明显,该部分阻力占总体阻力 $33.6\%$ ,正负压力差最大为 $8 \text{ kPa}$ ;建议在关注动车组外形、车体等风阻影响的同时,重点考虑减小转向架附近空间的风阻影响。

### 参考文献:

- [1] 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 Press, 2007.
- [2] 董锡明. 高速动车组工作原理与结构特点[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007. DONG Ximing. The working principle and structure characteristics of the high-speed EMU [M]. Beijing: China Railway Press. 2007.

(下转第 1750 页)