

基于 LBM 方法的高速列车空气动力学计算

王一伟^①, 王洋^②, 安亦然^③, 陈耀松^{③*}

① 中国科学院力学研究所, 北京 100190;

② 上海大学计算机学院, 上海 200072;

③ 北京大学力学系, 北京 100871

* 联系人, E-mail: chenys@pku.edu.cn

收稿日期: 2007-12-25; 接受日期: 2008-02-03

摘要 利用格子波尔兹曼方法计算了高速列车的空气动力学问题. 计算采用真实非简化列车几何, 千万量级空间网格. 不同工况的结果均真实反应实际情况, 表明格子波尔兹曼方法在实际工程计算中有非常广阔的应用空间.

关键词

LBM
空气动力学
工程应用

玻尔兹曼方程是以分子运动论为基础表述气体运动的方程. 由于方程的复杂性质, 除了推得少数热力学关系以外, 对实用的气体运动几乎无能为力. 由于巨型电子计算机的出现, 借助早年试探的格子算法, 人们于 20 世纪 80 年代末开始发展有实用价值的格子波尔兹曼方法 (lattice-boltzmann method, LBM). 这是流体力学从表象的连续介质概念回归到分子运动概念的一个提升, 如今它已是一个先进的计算流体力学方法^[1-3]. 经过人们十余年的努力, 它已从一个学术界的研究模式逐步演化完善, 发展成具有实际工程应用价值的计算软件, 从而在一些主要支柱工业的新产品研发中得到使用^[4]. 如今, 几乎世界上所有重大汽车制造业都转向采用 LBM 计算流体力学软件来优化新车型的气动性能. 我国自行开发高速列车的工作刚刚起步, 由于列车的速度可与飞机相比, 空气动力对其运行关系重大. 本文直接采用 LBM 对动车组在明线\隧道\强侧风环境下的空气动力进行分析, 它将成为高速列车设计的重要技术依据.

高速列车的快速发展, 迫切需要解决其空气动力学问题. 时速高于 200 km 的高速列车受到的空气阻力占列车总阻力的四分之三以上^[5], 直接影响到机车的功率配备以及输电网和变电站的设置. 在强侧风环境中运行的强大的侧向风力则极有可能使列车在高速行进中倾覆. 因此, 有必要对高速列车的空气动力学性能进行分析, 并对列车的运行安全性作出评估.

计算流体力学是研究空气动力学问题的重要手段. 与实验相比, 它具有耗时短, 费用低等优点, 并且能够处理许多用实验不易进行的问题, 因此它也越来越受到人们的重视. 计算流体力学目前最普遍的方法仍然是采用离散纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程 (以连续介质为基础的) 的算法. 而由于当今计算机能力的限制, 很多流体物理现象, 如湍流, 往往不能用直接模拟

(direct numerical simulation)即精确计算求解纳维-斯托克斯方程的方式实现. 因此, 人们往往也必须加入各种物理近似模式, 但这些模型应用于汽车列车这类钝体绕流中, 或是精确性不尽如人意(如 RANS 方法^[6]), 或是计算量太大, 仍不适用于工程实际(如 LES/DES 等方法^[6]). 可是在一定的应用领域内, LBM 却能胜过解纳维-斯托克斯方程这种计算方法.

1 控制方程

波尔兹曼方程是比 N-S 方程更能反映流体基本机理的模型方程^[7,8], 随着计算机技术的迅猛发展和格子算法的成功, 发展出了格子波尔兹曼方法. 标准格子波尔兹曼方程一般由以下的数学表达式描述,

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(\mathbf{x}, t) + C_i(f), \quad (1)$$

其中 f_i 代表粒子分布函数, C_i 代表碰撞项. \mathbf{c}_i 表示某个给定的粒子离散速度^[9]. 为了简洁起见, 通常人们采用单位常规定义. 碰撞项最常用的形式是所谓的 BGK^[10,11]模型, 即

$$C_i(f) = -\frac{f - f^{eq}}{\tau}, \quad (2)$$

其中 f^{eq} 代表平衡态分布, τ 代表通过碰撞使粒子分布向平衡态趋近的迟豫时间. 可以证明, 当离散速度集满足一定对称性要求时, (1)式所代表的系统在宏观上基本满足纳维-斯托克斯方程. 而流量量可以通过以下简单求和得到

$$\text{流体密度} \quad \rho(\mathbf{x}, t) = \sum_i^b f_i(\mathbf{x}, t), \quad (3)$$

$$\text{流体宏观速度} \quad \rho \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \sum_i^b \mathbf{c}_i f_i(\mathbf{x}, t), \quad (4)$$

$$\text{流体内能} \quad \rho e(\mathbf{x}, t) = \sum_i^b (\mathbf{c}_i - \mathbf{u})^2 f_i(\mathbf{x}, t). \quad (5)$$

模拟湍流现象时使用 VLES(very large eddy simulations)^[12]方法, 对大尺度的涡采用直接求解, 同时对于小尺度的涡使用 RNG $k-\varepsilon$ 模型.

2 计算模型

2.1 几何模型

计算考虑三节列车模型(包括头车、中间车厢、尾车各一), 所使用几何模型来自真实高速列车 CAD(computer aided design)数据(包含未简化的门窗/转向架等), 并生成表面网格如图 1 和 2.

2.2 计算网格

空间网格采用笛卡尔正交网格方式, 无侧风条件计算工况的空间网格总数约为 4000 万, 强侧风环境计算工况的空间网格数量超过 5700 万. 最小网格尺度为 1 cm, 在列车表面、转向架、受电弓附近及列车头尾部分离点处进行了网格加密, 如图 3 所示.

2.3 计算条件

2.3.1 计算工况.

- 1) 明线运行, 运行速度为 200 km/h, 250 km/h, 300 km/h.

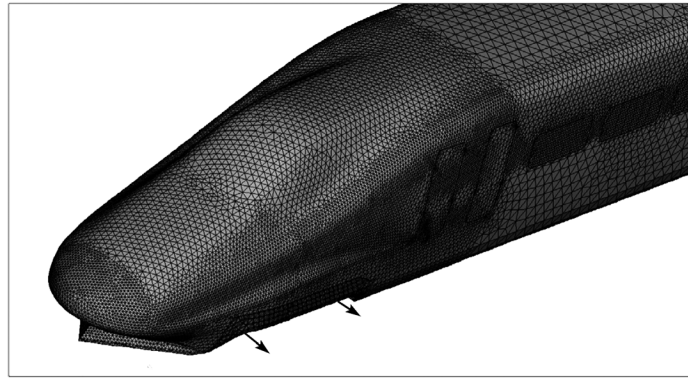


图 1 列车头部面网格

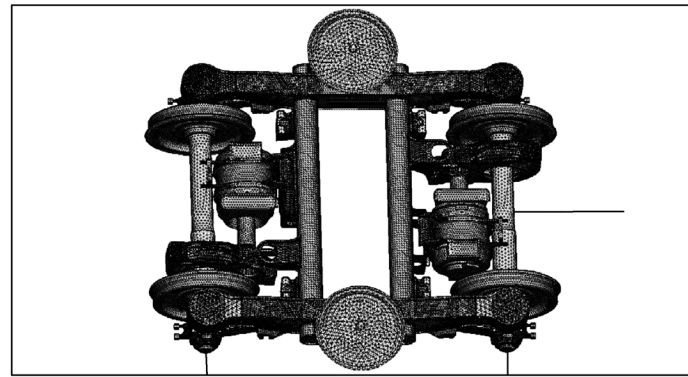


图 2 转向架面网格

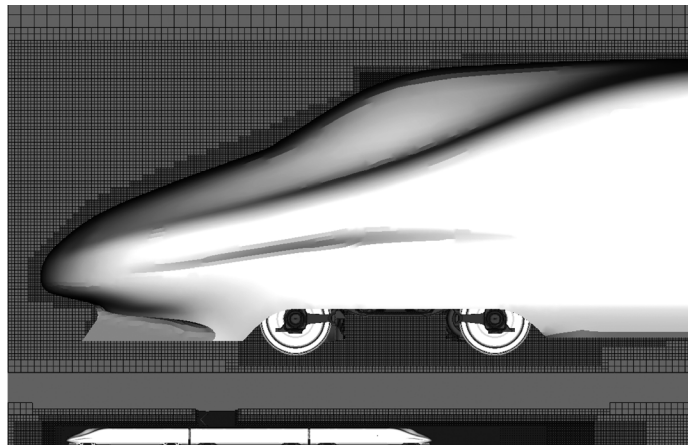


图 3 空间计算网格及车头附近特写

2) 隧道内运行, 运行速度为 200 km/h, 250 km/h, 300 km/h.

3) 强侧风环境下运行, 运行速度为 200 km/h, 侧吹 12 级强风, 风速 36.4 m/s.

2.3.2 计算边界条件^[13]. 如图4所示, 左侧方形区域为速度入口, 明线工况下来流速度为列

车运行速度, 隧道工况来流速度考虑活塞风修正. 右侧方形区域为压力出口, 出口压力 101325 Pa. 上方四周区域模拟风洞壁面, 地面为壁面边界条件, 其中列车正下方一段设定为传送带, 移动速度与列车运行速度相同. 铁轨也为移动壁面, 移动速度与列车运行速度相同.

- 1) 列车车轮为旋转壁面条件, 以轮中心为轴, 边缘线速度与列车运行速度相同;
- 2) 列车车身表面、受电弓表面及转向架除车轮部分为固定壁面.

2.3.3 活塞风修正. 列车在隧道中运行时, 列车的活塞作用产生活塞风, 活塞风速与列车运行速度同向, 则速度入口来流速度应该为列车速度减去活塞风风速. 由波传播理论, 可推出活塞风风速在一维情况下满足条件:

$$\rho c u = \frac{1}{2} \Delta p,$$

其中 ρ 为空气密度, c 为当地声速, u 为活塞风风速, Δp 为产生波动的前后压力差. 计算中可通过假定 u , 进而求解流场得到 Δp , 再修正 u 进行循环迭代. 但实际此方法计算量太大, 因此使用有限体积法通用 CFD 软件 FLUENT 的动网格方法模拟列车在隧道中的运动情况, 并取列车运行前方一定距离处的截面速度平均值即得到活塞风风速.

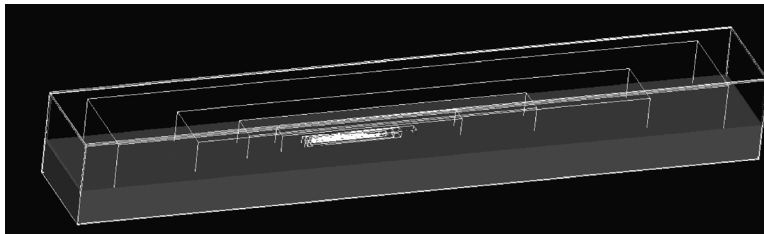


图 4 计算模型

3 计算结果

3.1 气动力结果

列车运行时的表面压力和切应力沿运动反方向、竖直向上方向及侧向的合力, 即为列车运行时受到的阻力、升力和侧向力. 为了便于分析, 通常定义无量纲系数

$$C = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho V^2 S}, \quad (6)$$

其中 F 为列车沿某一方向所受的空气的合力, ρ 为密度, V 为列车运行速度, S 为参考面积, 对于阻力、升力和侧向力, 分别取运行方向最大横截面积、水平投影面积及侧向投影面积.

列车在不同工况下的受力情况如图 5 所示.

高雷诺数光滑圆柱绕流的研究表明, 当雷诺数 $Re_x > 5 \times 10^5$ 时, 流动可认为进入了自模化状态, 即流动特性不再随 Re 变化. 列车绕流流场比圆柱绕流复杂, 临界雷诺数要相应降低. 列车运行 200 km/h 工况下雷诺数 Re_x 在 10^7 量级, 早已进入自模拟区, 因此列车表面的无量纲压力系数 C_p 理论上不再随速度提高而变化, 不同速度得到的同向受力系数大小非常接近.

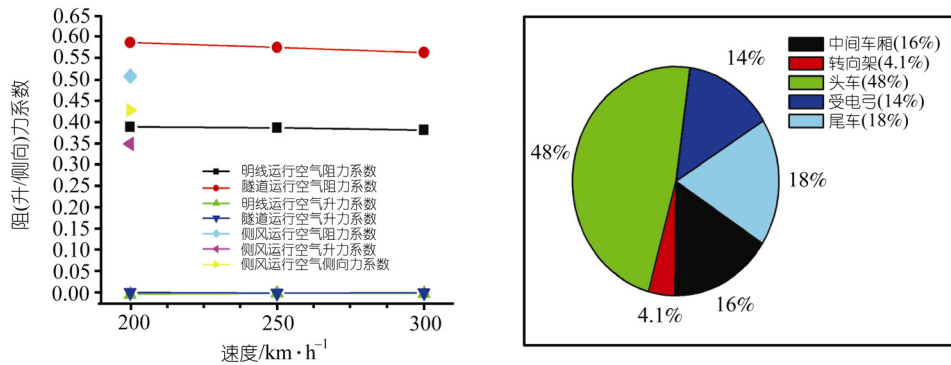


图 5 计算受力系数结果及阻力来源分布

3.2 明线运行结果分析

空气阻力系数是衡量高速列车气动性能最重要的参数之一, 包括压差阻力和摩擦阻力两部分^[14]. 压差阻力是由于各组成列车的车辆前后压力差引起的(如图 6, 红线表示上表面压力, 蓝线表示下表面压力). 由于空气具有粘性, 当列车表面流动遇到凸起物时, 气流速度降低, 导致外凸物的表面压力升高. 例如空气流过头部鼻锥时因气流被滞止, 速度近乎降为零, 使压力最大; 当空气沿列车表面或底面流动遇到受电弓、转向架等外凸物阻挡时, 气流停滞, 流速降低, 表面压力升高; 车轮转动引起其与铁轨接触点前段压力升高, 后段压力降低; 气流在门窗等附近也会发生分离再附等现象, 使门窗表面出现明显的压力梯度(如图 7); 列车运行时尾部发生明显的边界层分离现象(如图 7), 产生回流区, 而回流区压力较低, 因而产生压力差.

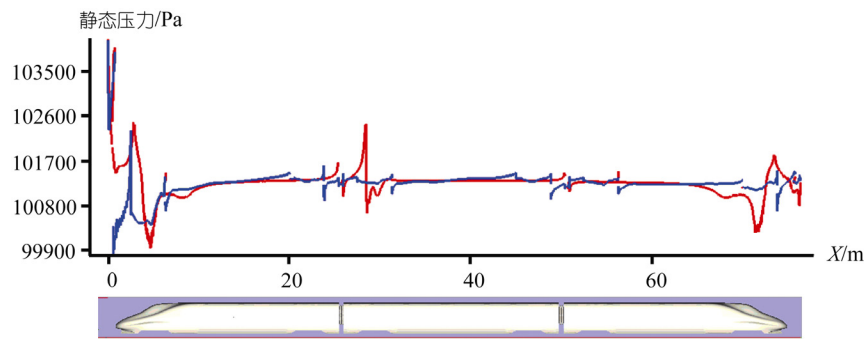


图 6 列车中轴线表面压力分布曲线

当空气沿列车表面流动时, 由于空气的粘性, 在列车壁面将形成一层由流速为零并沿壁面法向迅速升高到与来流速度基本一致的流体层, 即边界层. 其厚度在驻点处为零, 沿速度方向逐渐向下游增加(如图 8). 边界层内的气流, 各不同速度层间将产生切向力, 从而形成列车表面的粘性切应力, 其沿列车运动反方向积分得到的合力即为列车空气摩擦阻力.

总体而言, 车头直接迎风, 是阻力的主要来源, 约占总阻力的一半. 尾车是阻力来源的第二重要部分. 由于所计算的是一个成熟的设计车型, 在明线稳态运行时尾车表面气流分离现象微弱(如图 9), 分离点被推迟到很靠后的位置(如图 7), 以至于尾车所受阻力降到与中间车厢

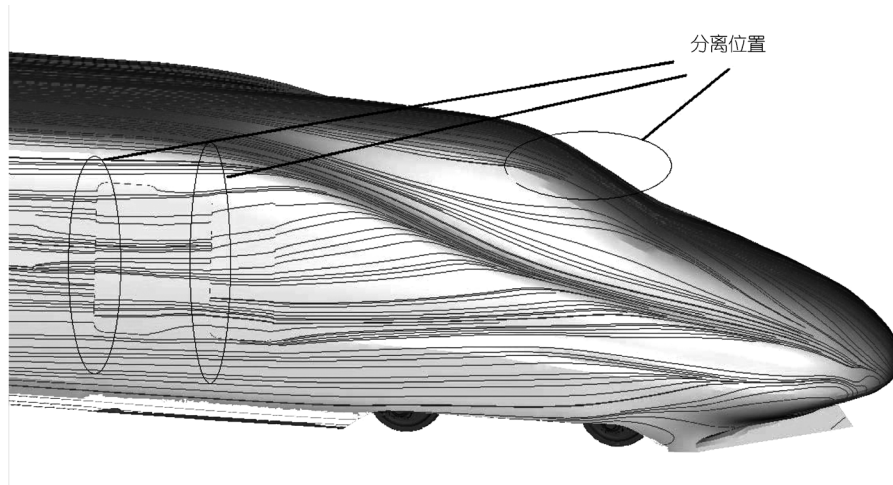


图 7 列车门和车尾摩擦力线及速度分离点图示

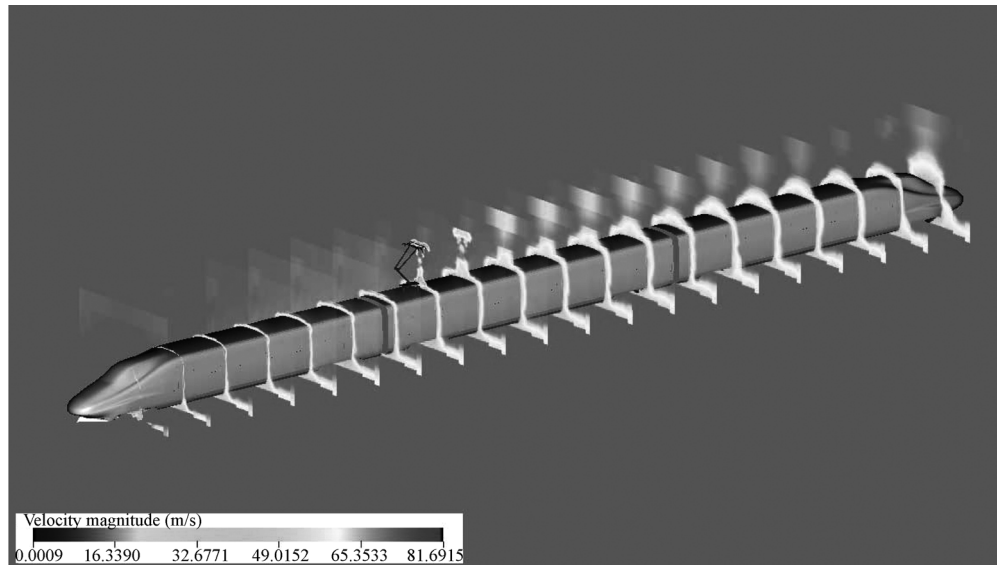


图 8 列车表面边界层分布

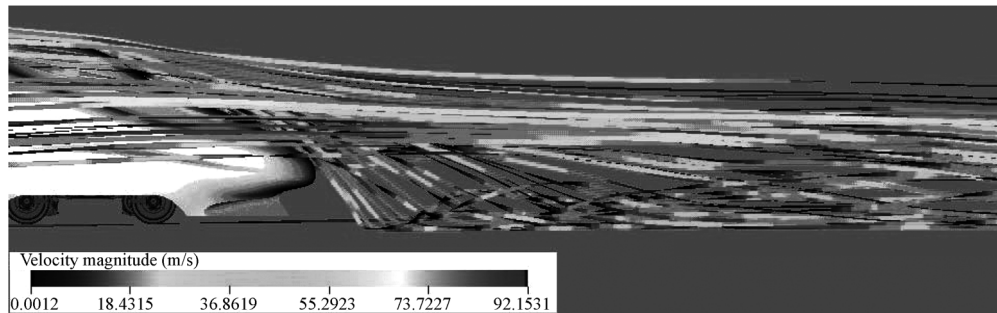


图 9 列车车尾空间流线

及受电弓近似. 受电弓由于正面迎风, 而且迎风面的条状结构对风速有极大的阻碍作用, 阻力贡献相对较大, 设计中仍有较大改进余地. 车轮及转向架直接所受阻力并不大, 但由于其对流场的扰动, 会引起车身气动力的改变, 也间接影响了列车的阻力构成.

气动升力是列车空气动力学性能的另一个重要方面. 对于轮轨系统列车, 当车辆受到正升力作用时, 会降低车轮与轨道间的摩擦力, 进而降低牵引力, 导致列车产生“飘”的现象; 过大的正升力还有可能导致列车爬轨和跳轨. 当列车受到负升力作用时, 将增加列车动态轴重, 加剧列车对轮轨的动力冲击和对钢轨的磨损. 因此, 希望车辆的空气升力尽可能等于零. 由图 5 可以看出, 计算车型在升力控制方面表现非常好, 升力系数均在 10^{-3} 甚至更低量级.

3.3 隧道运行结果分析

当列车在隧道中高速运行时, 就类似活塞在气缸中运动, 会产生强烈的活塞风. 隧道壁面的限制使列车前端的气流受到剧烈压缩, 在隧道壁面上表现出较大的压力梯度(如图 10), 车尾处空间突然扩张, 速度减小, 也存在较强的逆压梯度(如图 10).

列车与隧道的相互作用使得整个列车表面及附近流场都比明线运行时要复杂得多: 隧道运行列车的摩擦力线除表现出类似明线运行时向上发展的特征, 还带有大范围的弯曲现象; 总压系数等值面图显示的分离现象, 在隧道运行状态(图 11(b))比明线运行状态(图 11(a))下显著许多; 尾流也表现出了明显的非定常不对称的涡脱落破碎等状态(如图 12).

更快的绕流速度以及更紊乱的流场使得隧道内阻力系数随时间变化非常明显, 并且平均阻力系数高于明线运行状态, 约为其 1.5 倍左右. (如图 5, 隧道工况计算不包括受电弓, 如包括受电弓, 则阻力会更大.)

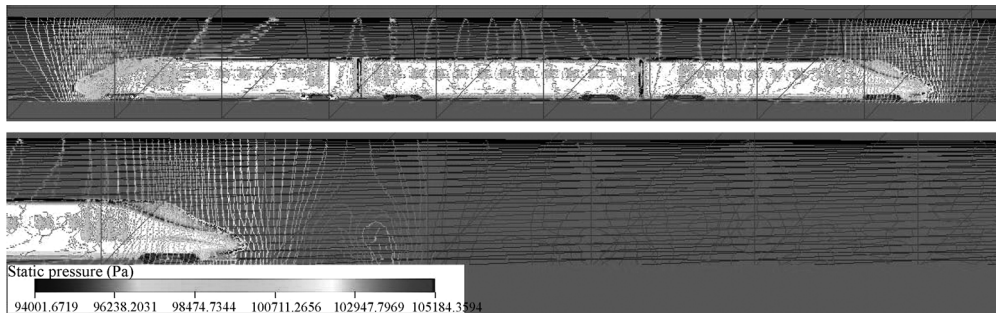


图 10 车身周围及车尾附近壁面压力分布

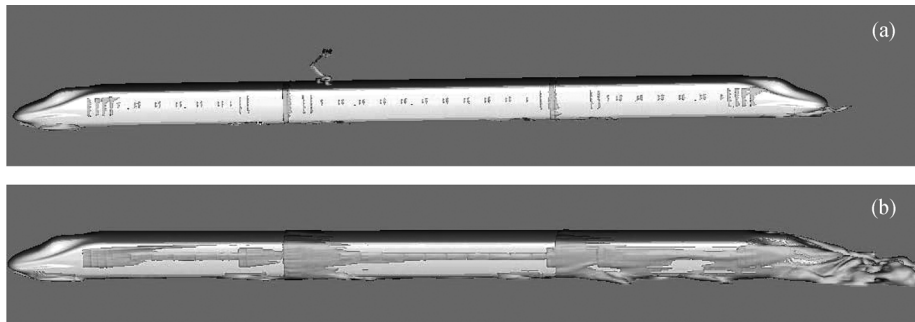


图 11 明线(a)与隧道(b)运行总压系数为零的等值面对比

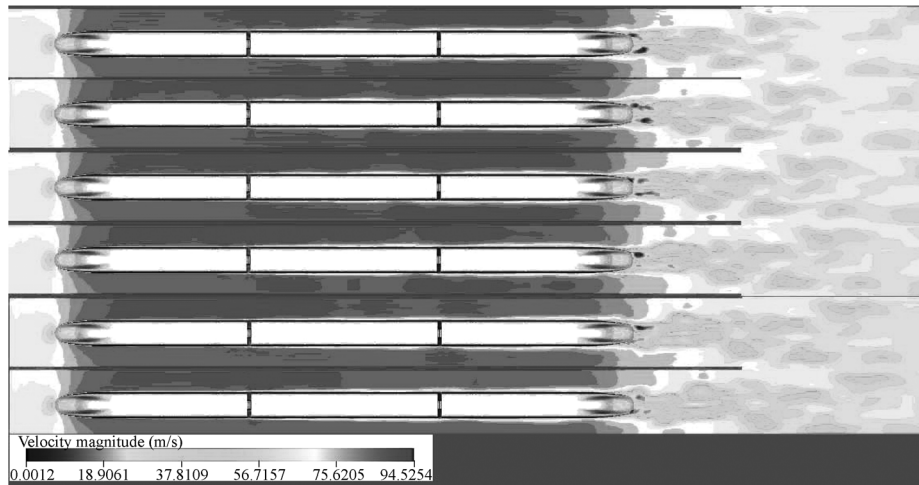


图 12 尾流水平截面速度分布随时间的变化

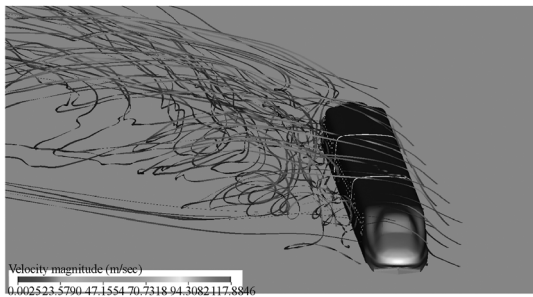


图 13 空间流线

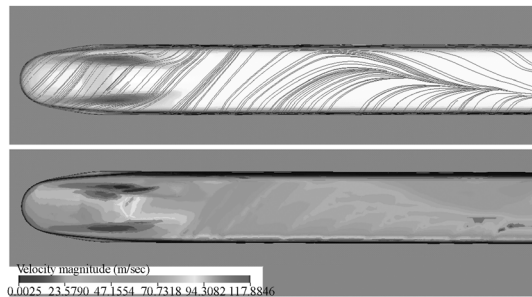


图 15 头车摩擦力线及速度分布

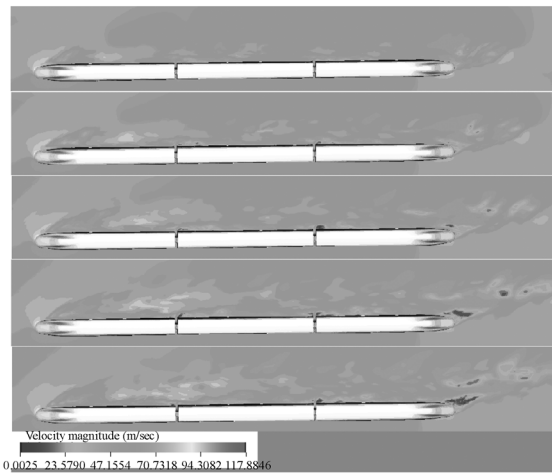


图 14 水平截面速度分布随时间变化图

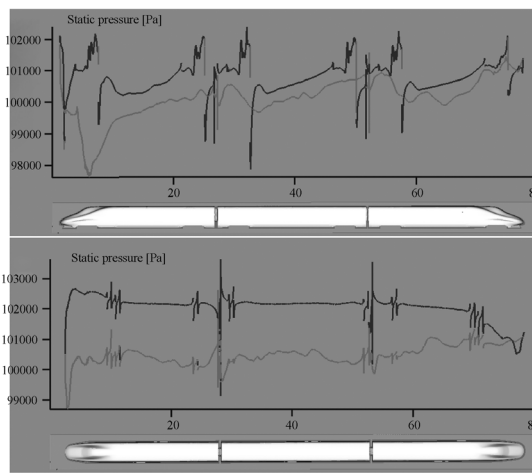


图 16 对称面及水平截面压力曲线

3.4 强侧风环境下运行结果分析

强侧风环境下, 列车空气动力学性能恶化^[15]. 空气阻力、升力、横向力迅速增加(如图 5),

并且受较强的侧滚力矩,严重影响列车的横向稳定性.列车受到正吹列车风和侧向风两种因素耦合作用,流场细节和明线稳态运行有很大不同.

整体流场气流绕过列车流向侧后方,产生巨大的涡旋,车厢连接处和车尾不断有旋涡脱落,引起列车表面压力分布等产生类似周期性的变化.(如图 13 和图 14)列车头部鼻尖及导流板顶端不再为驻点,驻点向迎风一侧移动.列车顶部基本为负压,迎风侧上缘拐角及车头上方部分气流转向处速度最大,表面压力很小,可见明显的分离区域(如图 15).气流通过铁轨及转向架部分时,由于转向架部分结构复杂,通过后的流场很不稳定,涡量等值面图非常凌乱.整体上来讲底面压力远高于顶面,因而产生较大的气动升力(如图 16).

列车迎风面基本为正压,摩擦力线趋势分为两种,大部分向上绕过车顶,小部分向下通过车底.列车背风一侧基本处在尾流区域中,存在大量的分离再附甚至二次、高次涡等现象(如图 17).整体来说,列车迎风侧压力高于背风侧,因而产生较大的横向力及侧滚力矩(如图 17).

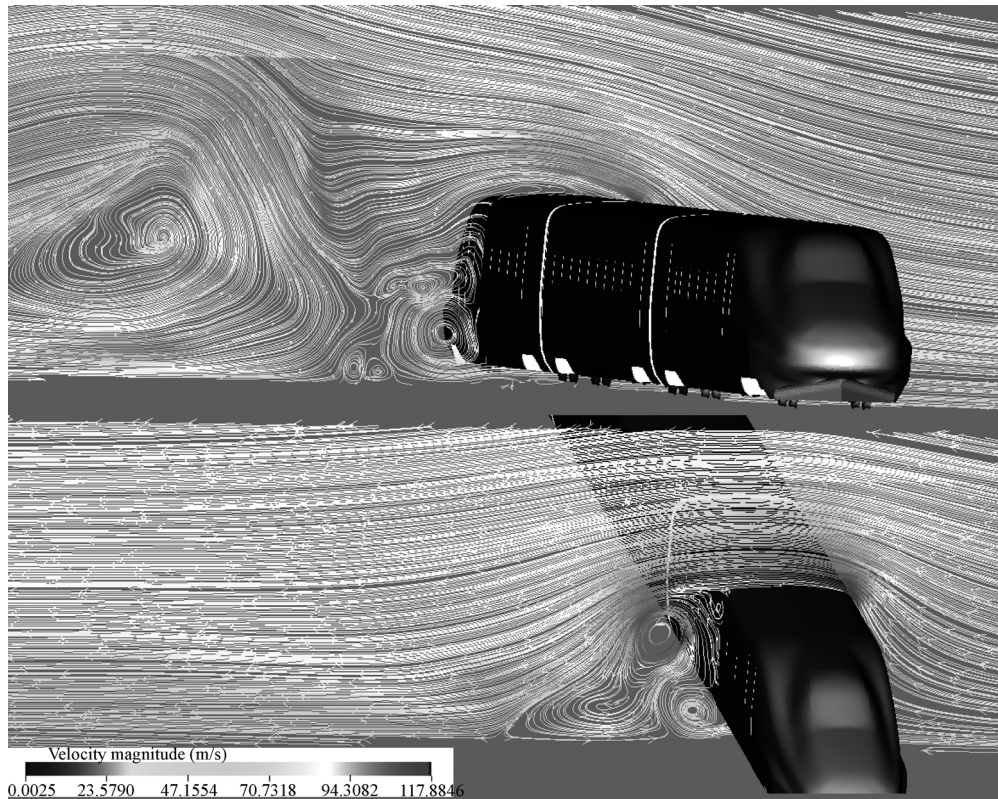


图 17 车尾及车头横截面流线及涡形态图

4 结论

对比求解 N-S 方程的传统 CFD 方法^[16,17],LBM 方法具有计算前处理简单(无需设计计算网格,这对外形复杂的物体非常重要)、并行计算效率高、计算精度高等一系列优点,这对高速列车这一类空气动力分析来说是必须的.本文采用的是 PowerFLOW 商用软件,它是迄今为止

唯一一款基于 LBM 开发的商用软件。目前, 它尚限于低速空气动力学领域(马赫数 <0.5), 不久它将可以应用于高速领域, 多相流领域等方面。我们不但要广泛采用这一新的算法, 并将积极参与新领域 LBM 算法的开发应用。

致谢 本文所用的软件是 EXA 公司作为科学研究免费提供的。在整个计算和论文整理工作中得到卢强院士和秦燕华教授的鼓励和指导。对此, 作者一并表示感谢。

参考文献

- 1 陈耀松, 单肖文, 陈沪东. 计算流体力学的新方向及其在工业上的应用. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2007, 37(9): 1107—1116
- 2 Chen S, Chen H, Martinez D, et al. Lattice Boltzmann model for simulation of magneto-hydrodynamics, *Phys Rev Lett*, 1991, 67(27): 3776—3779
- 3 Li Y, Shock R, Zhang R, et al. Numerical study of flow past an impulsively started cylinder by the lattice-Boltzmann method. *J Fluid Mech*, 2004, 519: 273—300
- 4 Chen H, Chen S, Matthaeus W H. Recovery of Navier-Stokes equations using a lattice-Gas Boltzmann method. *Phys Rev A*, 1992, 45(8): R5339—R5342
- 5 Raghunathan R S, Kim H D, Setoguchi T. Aerodynamics of high-speed railway train. *Prog Aerosp Sci*, 2002, 38(6-7): 469—514
- 6 Wilcox D. *Turbulence Modeling for CFD*. California: DCW Industries Inc, 1993
- 7 Chen S, Doolen G. Lattice Boltzmann method for fluid flows. *Annu Rev Fluid Mech*, 1998, 30: 329—364
- 8 Exa Corporation. *Power Flow User's Guide Version 4.0*, 2007
- 9 Shan X, He X. Discretization of the velocity space in solution of the Boltzmann equation. *Phys Rev Lett*, 1998, 80(1): 65—68
- 10 Qian Y H, d'Humieres D, Lallemand P. Lattice BGK models for Navier - Stokes equation. *Euro Phys Lett*, 1992, 17: 479—484
- 11 Bhatnagar P, Gross E, Krook M. A model for collision processes in gases I: Small amplitude processes in charged and neutral one-component system. *Phys Rev Lett*, 1954, 94: 511—525
- 12 Chen Y S, Kim S W. Computation of turbulent flows using an extended κ - ϵ turbul closure model. NASA, 1987, CR-179204
- 13 Chen H, Teixeira C, Molvig K. Realization of fluid boundary conditions via discrete Boltzmann dynamics. *Int J Mod Phys C*, 1998, 9(8): 1281
- 14 Brockie N J W, Baker C J. The aerodynamic drag of high speed trains. *J Wind Eng Ind Aerod*, 1990, 34(3): 273—290
- 15 Minoru S, Katsuji T, Tatsuo M. Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds. *J Wind Eng Ind Aerod*, 2003, 91(1-2): 209—218
- 16 Anderson J D. *Computational Fluid Dynamics The Basics with Applications*. Beijing: Tsinghua University Press. 2002
- 17 Patankar S V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Mc-Graw-Hill. 1980