

侧风下高速列车外流场分析

Study on the crosswind effects of high-speed train external flow

郝艳红 毛军

(北京交通大学)

摘要: 在侧风作用下, 高速列车的空气动力学性能发生显著改变。基于三维定常可压缩流动的 $N-S$ 方程, 采用 SST $k-\omega$ 两方程湍流模型和有限体积法, 对某型高速列车以 350 km/h 的速度在 15 m/s 侧风环境中运行的流场结构进行了数值模拟计算, 分析了风向角为 90 度时列车周围的流场信息。结果表明: 在侧风作用下, 列车的周围包括转向架处均产生复杂的涡流, 沿车身向后, 在不同断面上, 各漩涡的起始位置在高度方向上呈底部、中部和顶部交替变化; 在横风的作用下, 列车表面的压力分布也产生明显变化, 在列车的迎风侧, 最大正压区位于头车鼻尖处, 车身大部分区域为正压, 压力值沿着列车的高度方向逐渐减小, 并在尾车处出现负压; 在列车的背风侧, 头车出现大面积的负压区, 车身基本为负压, 压力值沿着列车的高度方向变化不大, 仅在尾车处出现正压。尾车正压和负压的数值均小于头车, 且尾车背风侧的正压绝对值小于迎风侧的负压绝对值。

关键词: STAR-CCM+; 高速列车; 侧风; 列车外流场

Abstract: The aerodynamic performance of high-speed train will significant change under the action of the side wind. Flow around a certain high-speed train with 350 km/h under the influence of a crosswind with 15 m/s has been studied by numerical technique. To compute the different flow structures numerically, the three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, combined with the standard SST $k-\omega$ turbulence model, were solved on a multi-block structured grid using a finite volume technique. The impact of side wind with 15 m/s on the whole train, pantograph, bogies and inter-car gaps was analysed. The resulting flow fields show that complex vortex and pressure distribution generate around the train and bogies. On the windward side, the largest positive pressure is located at the front train nose and the largest negative pressure is located at the rear end. On the leeward side, due to the development and production of a large number of vortex shedding, large areas of negative pressure is generated at the front train, and positive pressure is generated at the rear end. Except for the windward and leeward edges, the pressure remains more or less constant on the bottom of the train. On the rear end the distribution is opposite to that on the front end.

Keywords: STAR-CCM+; High-speed train; Crosswind; Train external flow

1 综述

在强侧风作用下, 高速列车的空气动力学性能和列车运行的稳定性将受到很大影响, 由侧风效应所导致的列车失稳和倾覆事故在世界各国时有发生, 强侧风已经成为影响高速列车运行安全的重要因素之一^[1]。国内外学者对高速列车的侧风效应进行了较多的风洞试验和数值模拟, 验证了数值模拟的适用性^[2-5]。但一般忽略了受电弓、转向架及风挡等局部结构, 并按不可压流考虑。有的虽然在计算中考虑了受电弓, 但仍忽略了转向架对流场的影响^[6]。在列车高速运行的条件下, 这些简化与实际情况的差距变得比较突出, 不利于准确评估侧风效应的作用。根据某动车组的真实外形建模, 考虑其细部结构, 对时速350km/h的动车组在不同风向角侧风作用下的流场进行了数值模拟, 以便更准确地分析和评估侧风效应对高速列车安全运行的影响。

2 计算模型及方法

采用动车组3节车模型, 头车、中间车和尾车的长度分别为26、25、26m, 宽度为3m, 高度为3.9m。头车和尾车形状相同, 均为流线形。研究中考虑了转向架、受电弓和挡流板等细部结构, 由于列车中间部分截面不变, 缩短的模型并不会改变列车流场结构的基本特征^[7]。

2.1 计算域设定及网格划分

1) 计算域。将计算域划分为来流区域和尾流区域, 根据绕流流场的基本特性, 尾流区域取较大值。列车模型前端的流场区域的纵向长度大于两倍的列车模型宽度, 列车模型尾流区域的纵向长度大于两倍的列车模型总长度, 计算域高度取5倍的车高^[4]。计算域的几何尺寸为 $267\text{m} \times 193\text{m} \times 35\text{m}$, 如图1所示。

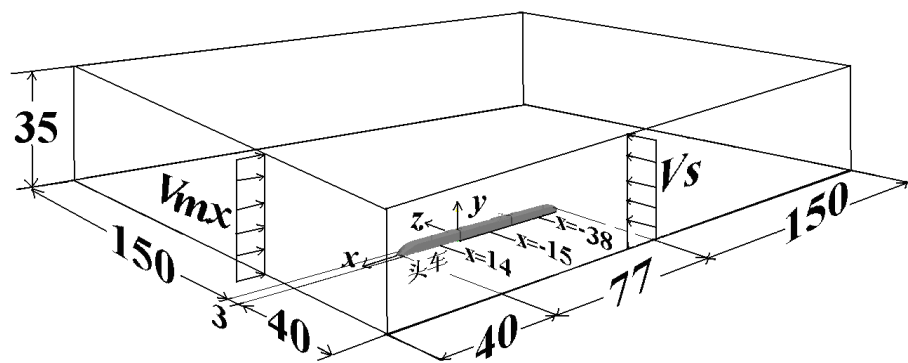


图1 计算域及列车风场的速度三角形

2) 网格划分。采用六面体网格, 在车体表面及地面处生成边界层网格, 边界层第1层网格的厚度为0.2 mm。为了和六面体网格更好的衔接, 保证网格质量, 提高壁面函数应用于边界层模拟的准确性, 共设置6层边界层网格, 增长比为2.5。加密尾流、列车表面和受电弓等流场变化较大区域的网格。整个计算区域的网格总数约为1500万, 图2为网格划分图。

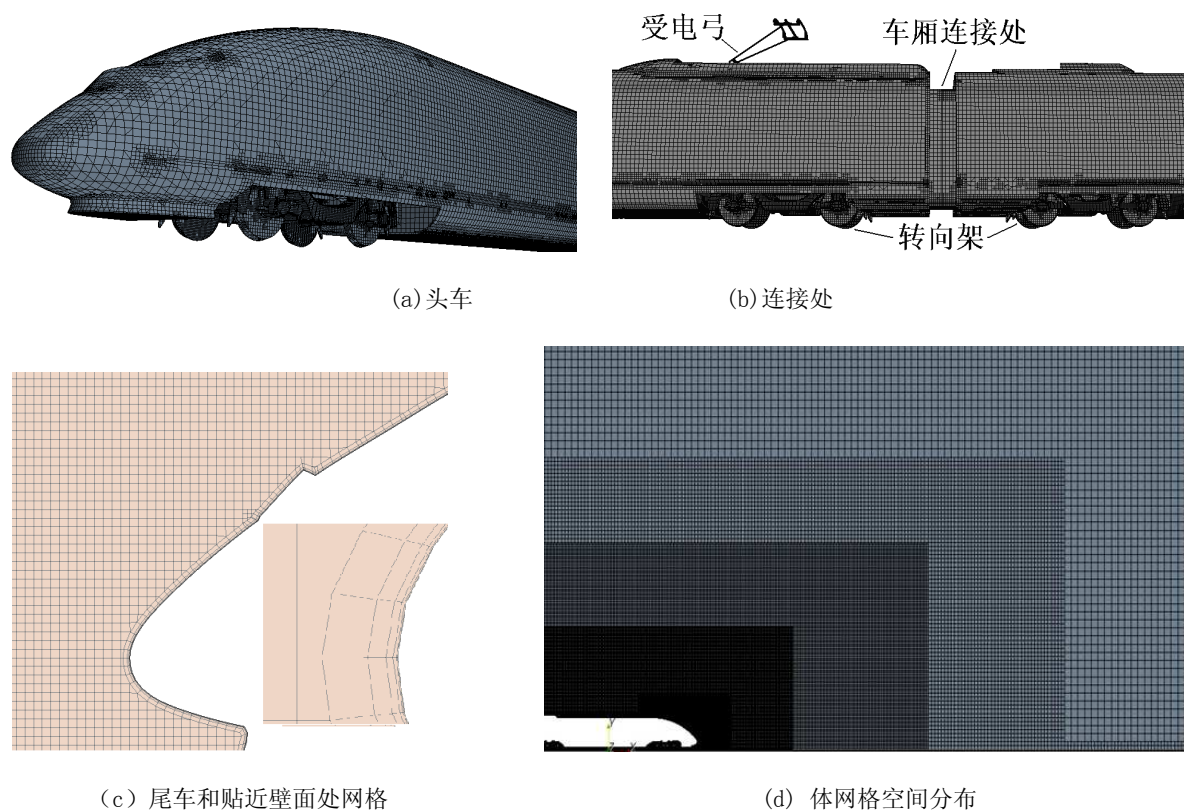


图 2 网格划分

2.2 边界条件设置

1)入口边界条件。假设入口边界来流的三维速度分布没有受到模型的扰动,除运动方向外,另外两个方向的速度分量为零,沿运动方向的速度在另外两个方向上均匀分布。流入速度取为远处的来流速度 v_t ,主流进口风速为 $V_{mx}=350\text{km/h}$,侧风进口风速为 $V_s=15\text{m/s}$ 。

2)出口边界条件。压力边界条件,出口压力取一个标准大气压强。

3)列车表面边界条件。由于在列车表面存在附面层效应的影响,故列车表面设定为有摩擦的墙边界(无滑移边界),接近于实际情况,列车表面粗糙度为 0.045mm ,可较为精确的计算出列车表面的摩擦阻力,以及表面的压力分布等参数。

4)地面边界条件。列车在静止空气中运行时,列车与地面、列车与空气的相对速度均为列车速度。采用相对运动后,运动的气流会在静止的地面上产生附面层;而实际列车行驶时,空气与地面相对静止,不存在地面附面层。为消除地面附面层的影响,在模拟中采用移动地板法,地面粗糙度 0.3mm ,设定地面移动速度与主流进口流速的大小相等、方向相同,即 $V_g=350\text{km/h}$ 。

5)计算域上表面。由于选择的流场计算区域足够大,可认为外围边界对列车周围的流场的影响甚小,计算区域的外围边界设定为无摩擦的墙边界(slip wall)。

2.3 计算方法

使用CFD软件STAR-CCM+进行并行计算。为求解前述控制方程组,用有限体积法(FVM)将控制方程离散。扩散项用二阶精确中心差分格式离散,而对流项用一阶迎风格式离散。用分离式解法对

离散后的控制方程组求解, 使用SIMPLE法耦合压力-速度场, 对压力采用迭代法修正。

3 计算结果及其分析

对列车速度 $v_t=350\text{km/h}$, 侧风速度 $v_w=15\text{m/s}$, 风向角 $\beta=90^\circ$ 的工况进行了数值模拟, 分析了列车外流场特性。

3.1 列车周围流场分布

为了得到详细的尾流信息, 分别从不同的截面观察流场, 截面在列车车身的部分坐标如图 3 所示。不同截面处的二维流线如图 4 所示, 其中横风方向为从左向右。

图 4 显示了列车背风侧尾流漩涡的产生、发展以及与列车表面脱离的情况。列车背风侧产生了多个漩涡, 沿车身向后, 各漩涡的起始位置呈底部、中部和顶部交替变化。在 $x=17\text{m}$ 处, 由列车背风侧底部首先产生一个漩涡 A, 沿车身向后逐渐发展和脱落, 漩涡逐渐远离列车表面, 在 $x=7\text{m}$ 处漩涡 A 脱落完毕。在 $x=3\text{m}$ 处列车背风侧的中部有新的漩涡 B 产生, 沿车身向后, 漩涡 B 逐渐发展, 在 $x=-5\text{m}$ 处漩涡达到最大, 之后开始脱落, 至 $x=-7\text{m}$ 处漩涡变小, 然后又继续发展, 在 $x=-21\text{m}$ 处达到最大, 然后又开始脱落, 在 $x=-27\text{m}$ 处消失, 但是在 $x=-31\text{m}$ 处又重新生成且沿车身向后发展。而且, 在 $x=-31\text{m}$ 处, 由列车背风侧底部生产漩涡 D, 逐渐发展在在 $x=-43\text{m}$ 处最大, 之后开始脱落并在 $x=-45\text{m}$ 处消失。另外, 在 $x=-21\text{m}$ 、 $x=-23\text{m}$ 处受电弓所在的部位, 产生了漩涡 C。此外, 在 $x=23\text{m}$ 、 $x=5\text{m}$ 、 $x=-3\text{m}$ 、 $x=-21\text{m}$ 、 $x=-23\text{m}$ 、 $x=-27\text{m}$ 、 $x=-45\text{m}$ 、 $x=-47\text{m}$ 等带转向架的部位, 流场十分紊乱, 产生多个复杂的漩涡, 这些涡对高速列车的气动性能会产生影响。

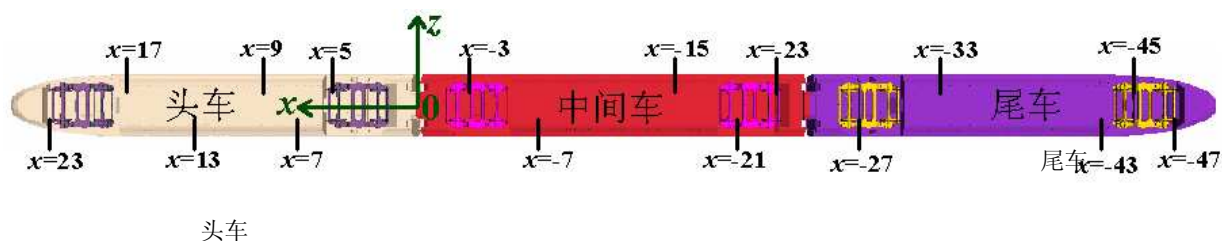
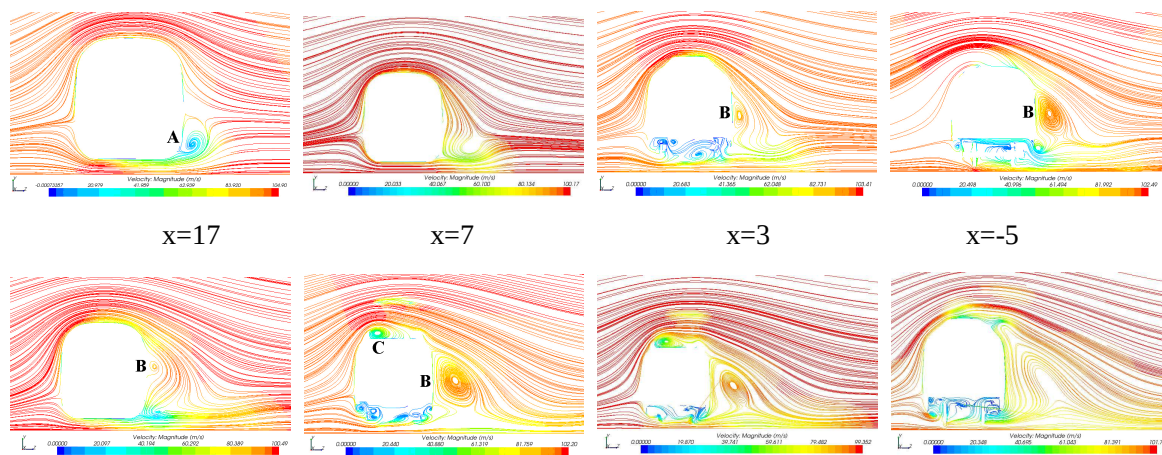


图 3 列车车身坐标及车身网格图 (单位: m)



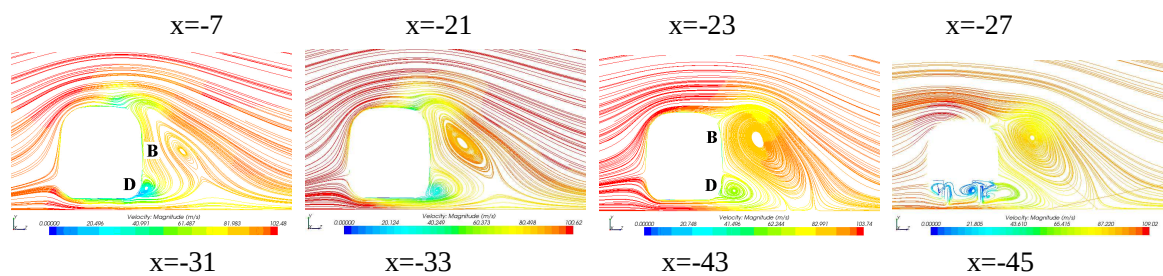
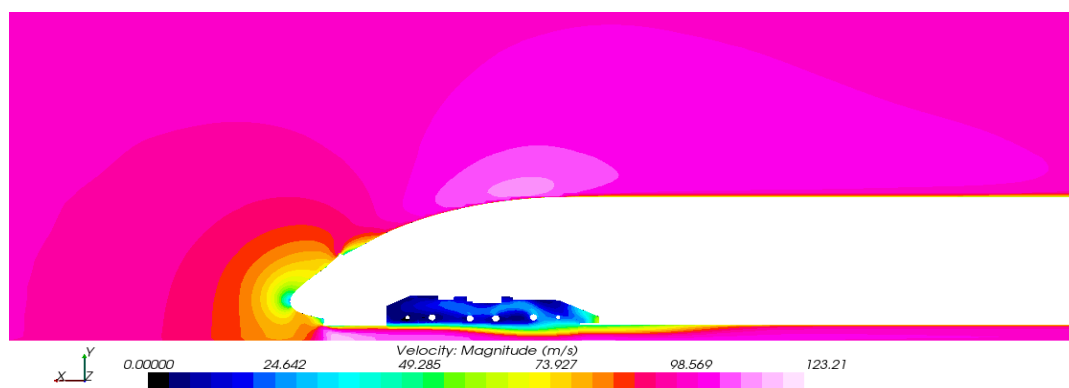
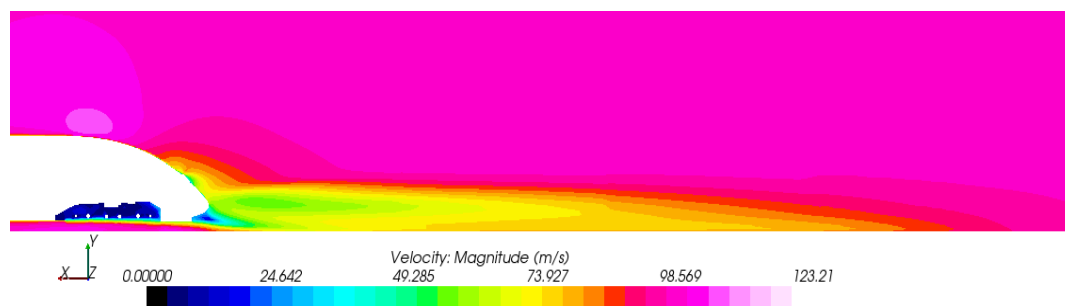


图 4 不同位置处列车横截面流线图



(a) 头车处速度场



(b) 列车尾流速度场

图 5 列车附近的速度云图

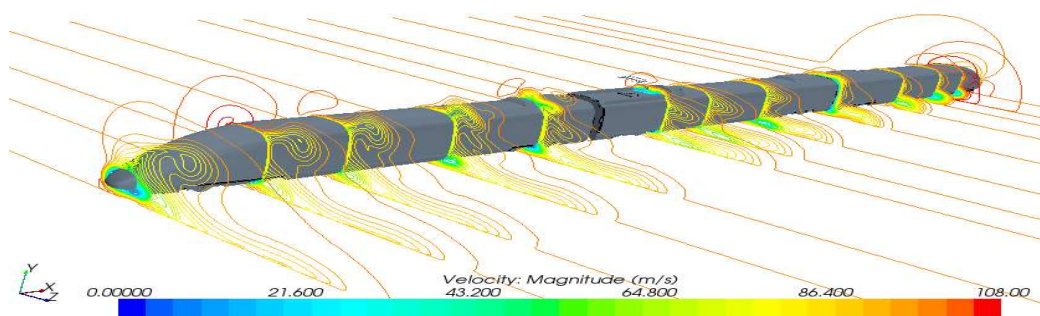


图 6 列车各断面的速度等值线图

由图5、图6可以看出,在恒定横风下(风向角=90°),列车周围流动十分复杂,生成不同尺度的脱落涡,这些涡不断地从车体产生、脱落、合并,并向下游运动,涡的运动及其相互间的位置关系具有随机性。

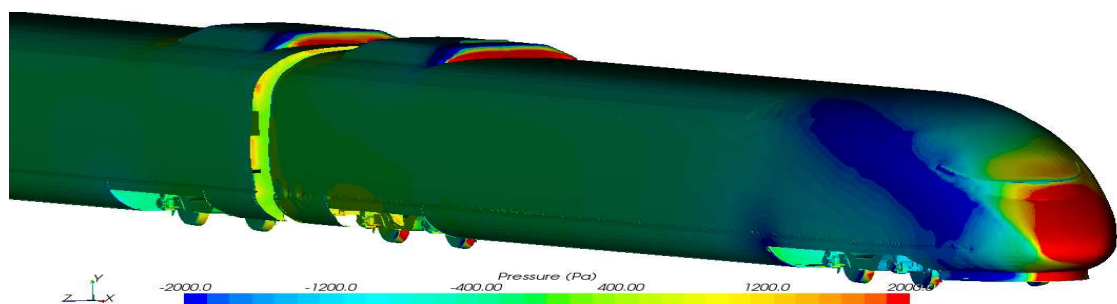
3.2 列车表面压力分布

图7为车速为350km/h、横风风速为15 m/s、风向角为90°时的列车表面压力云图。由图7(a)、图7(b)和图7(f)可知,横风下最大正压区位于车头鼻尖迎风一侧,而车头背风侧出现大面积的负压区。与车头不同,车尾的迎风侧出现负压,而背风侧出现正压。车尾的正压和负压的数值均小于车头。列车背风面大部受负压作用,车头处负压较大,沿车身向后压力逐渐减小,车尾背风面部分区域出现正压。尾部背风面的负压绝对值要小于迎风面的负压绝对值。在列车侧面,列车的迎风侧面大部分区域为正压,仅在车尾部分区域出现负压,从列车侧面到顶面的过渡圆弧面上正压迅速减小变为负压。列车背风面由于产生一系列漩涡脱落,所以基本为负压。

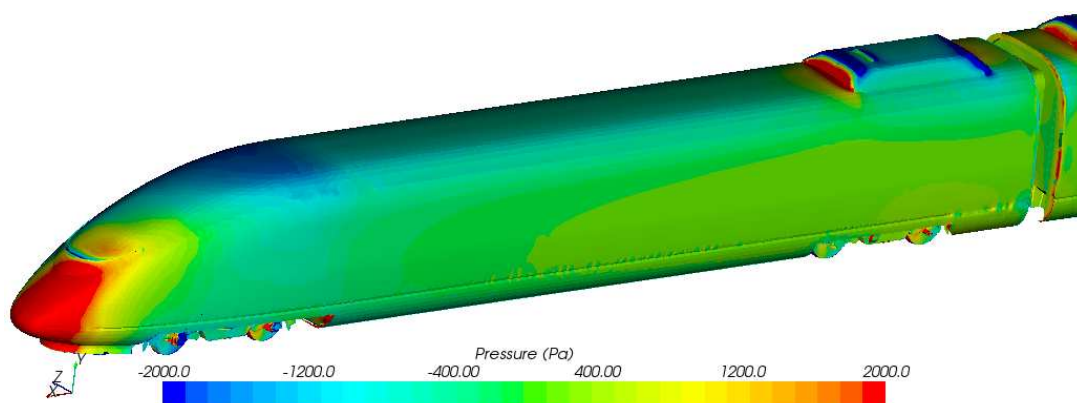
由图7(c)~7(f)可知,由于空气具有黏性,空气流过头部鼻锥和导流板凹槽时因气流被滞止,气流速度近乎为零,压力最大;在受电弓、转向架等外凸物的表面压力升高;在列车连接处的端部,由于风挡和间隙的存在,使列车端部表面的压力改变;在列车尾端,空气流速加快,列车尾部的压力减小。同时,由于附面层厚度沿列车长度方向不断增加,列车表面附面层影响地面效应,进而改变列车中后部的表面空气压力,也使各节列车的前后部表面压力有很大差异。

图8所示为列车不同位置处的横截面压力云图,横风方向从左向右,可以更直观的看出列车周围的压力变化情况。从图7、图8中可以看出:车头和车尾流场压力分布较为复杂,中间段压力分布的变化相对较小,说明文中使用三节列车模型是可行的。

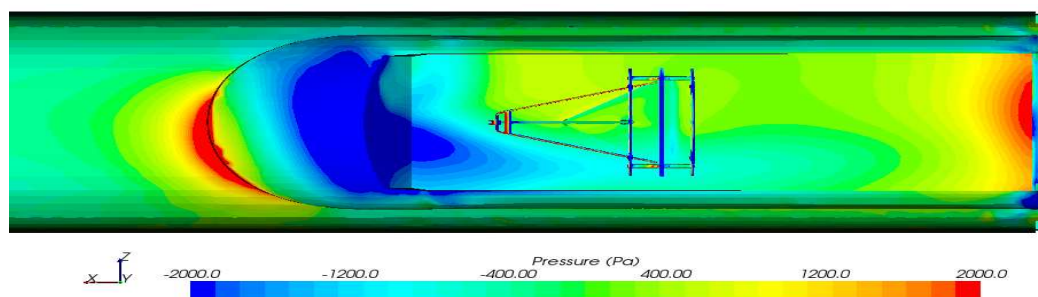
整体来看,无论是在迎风面还是背风面,列车的顶面除了受电弓、导流罩凹凸不平的部位外,基本为负压。从车头鼻尖向上,正压迅速减小变为负压,在车头向车身过渡的顶部,负压达到最大值,沿车身向后,负压值逐渐减小。在列车顶部,当气流在列车表面流动遇到受电弓、导流罩时,使气流速度降低,导致外凸物的表面压力升高。



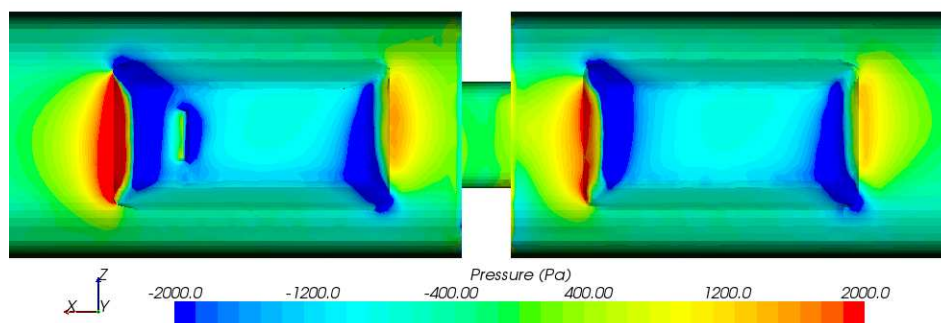
(a) 头车背风侧



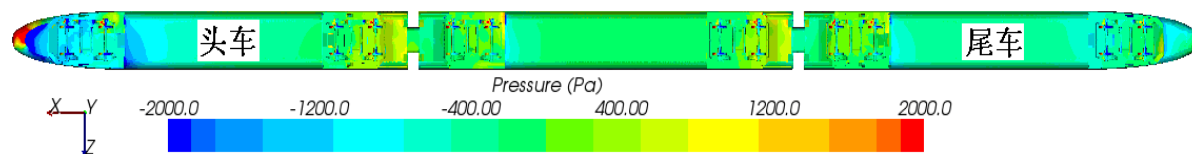
(b) 头车迎风侧



(c) 受电弓处



(d) 连接处



(e) 车底部

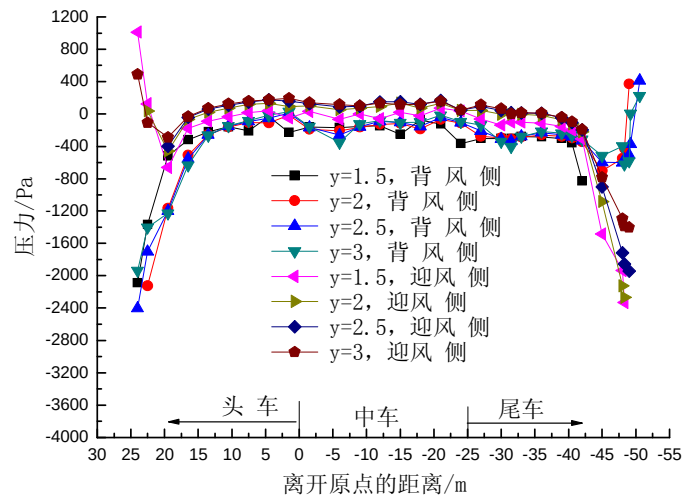
(f) 列车表面压力变化曲线 (y 为列车的高度方向)

图 7 列车表面压力

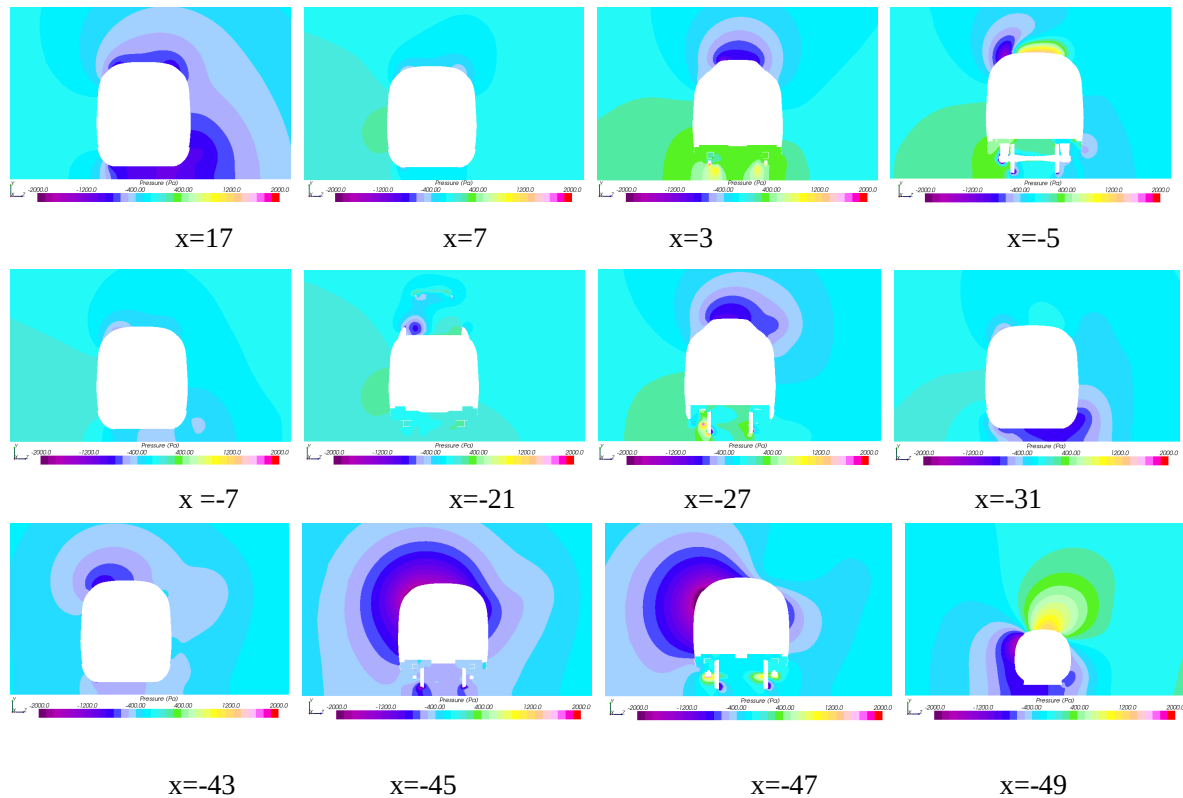


图 8 列车不同位置横截面压力图

4 结论

(1) 列车在侧风环境中高速运行时, 在列车的背风侧会产生不同尺度的脱落涡; 转向架周围产生复杂的涡流, 在模拟计算时不能忽略转向架的对流场的影响。横风的作用下, 列车风场结构的涡流结构发生明显变化。在横风作用下, 原有的边界层流动和尾流被破坏, 在列车背风侧出现了大尺度涡。并且, 沿车身向后, 在不同断面上, 各漩涡的起始位置在高度方向上呈底部、中部和顶部

交替变化;

(2) 在横风的作用下, 列车表面的压力分布也产生明显变化。在横风的作用下, 在列车的迎风侧, 最大正压区位于头车鼻尖处, 车身大部分区域为正压, 压力值沿着列车的高度方向逐渐减小, 并在尾车处出现负压; 在列车的背风侧, 头车出现大面积的负压区, 车身基本为负压, 压力值沿着列车的高度方向变化不大, 仅在尾车处出现正压。尾车正压和负压的数值均小于头车, 且尾车背风侧的正压绝对值小于迎风侧的负压绝对值。

5. 参考文献

- [1] Anderssonl E, Haggstrom J, Sima M. Assessment of train-overturning risk due to strong cross-winds[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2004, 218(3):213-223.
- [2] Orellano A, Schober M. On side-wind stability of high speed trains[J]. Vehicle System Dynamics Supplement, 2003, 40:143-160.
- [3] Carrarini A. Reliability based analysis of the crosswind stability of railway vehicles[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95: 493-509.
- [4] Krajnovic, Sini a. Optimization of aerodynamic properties of high-speed trains with CFD and response surface models[J]. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, 2009, 41: 197-211.
- [5] 杨吉忠, 毕海权, 翟婉明. 基于ALE方法的列车横风绕流动力学分析[J]. 铁道学报, 2009, 31(2): 120-124.
- [6] 荆江. 高速列车及关键部件气动性能数值分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009 .
- [7] Khier W, Breuer M, Durst F. Flow structure around trains under side wind conditions: a numerical study[J]. Computers&Fluids, 2000 (29):179-195.