

高速列车车体断面外形对列车气动性能的影响

刘晨辉, 郭迪龙, 姚拴宝, 杨国伟

(中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室(筹), 北京海淀区 100190)

摘要 本文通过数值模拟, 研究了明线运行、隧道交会等工况下, 不同断面外形对高速列车气动性能的影响。研究表明: 不同车体断面外形(断面面积、扁宽形与瘦长形、直壁形与鼓壁形)对列车气动性能影响很大, 其中鼓壁断面比直壁断面的阻力系数小; 相同断面面积下, 扁宽形车体的阻力系数较小; 列车所受的倾覆力矩系数随着车体断面圆弧弧度的增大而减小; 列车交会压力波与断面面积在一定范围成近似线性关系, 受断面外形影响不大。通过以上的研究, 可以为列车气动外形设计优化提供科学依据。

关键词 气动性能, 数值模拟, 断面外形, 横风效应, 交会压力波

引言

随着高速列车的速度不断提高, 列车的气动性能有了很大的改变。当车速达到 250-300km/h 时, 列车的气动阻力系数将占列车总阻力系数的 75-80%^[1]。当列车处于横风、隧道交会等工况条件下, 列车气动阻力、倾覆力矩、交会压力波会有很大的改变, 这会严重影响旅客的舒适度, 甚至对列车安全运行造成极大的影响^[2-4]。列车的气动性能很大程度上取决于列车外部外形。目前, 世界各国学者对列车车头头形的优化设计进行了大量的研究^[5], 但是对列车车体断面外形研究较少。本文以 6 种不同列车断面外形为研究基础, 做了两个方面的研究。首先是横风作用下, 气动阻力系数, 倾覆力矩系数与列车断

面外形之间的关系, 之后又研究了隧道交会情况下, 列车交会压力波与列车断面外形之间的关系。

1 计算模型方案

为了研究了不同列车断面外形对高速列车气动性能的影响, 本文总共研究了 6 种不同的列车断面外形, 如图 1、2 所示。其中每个外形参数如表 1 所示。外形 1 到外形 4, 列车侧壁弧度逐渐增大, 其中 α 是侧壁端点处垂线与水平轴的夹角(如图 3); 外形 5 是将外形 1 沿着平面法线逆时针旋转 90 度得到的, 因此, 外形 5 的断面面积与外形 1 相同; 外形 6 的断面积与外形 2 相同, 但是外形 2 是鼓壁, 外形 6 是直壁。

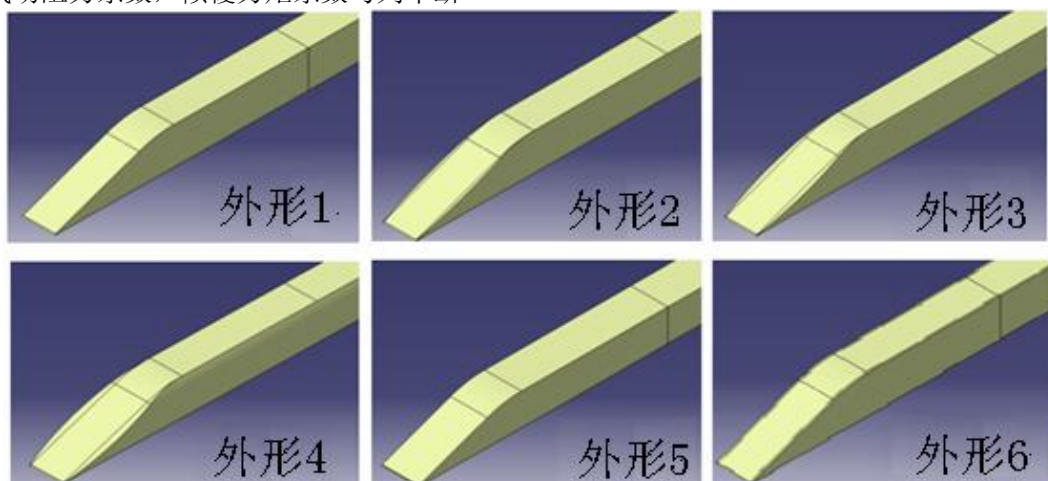


图 1 6 种不同的列车断面外形

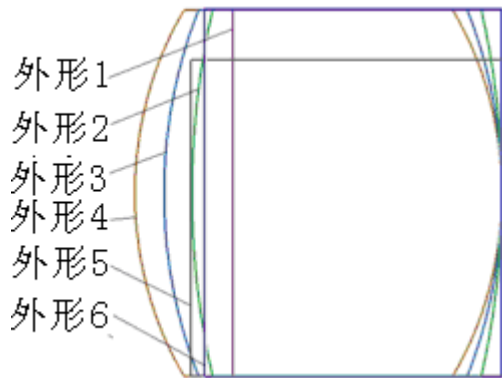


图2 不同列车的断面轮廓图

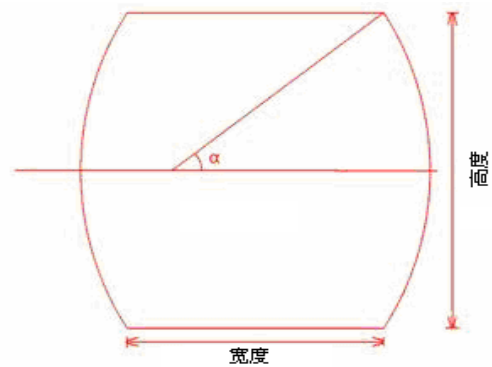
图3 α 的定义示意图

表1 不同列车断面外形的具体数值

	高度×宽度(mm×mm)	面积 Area(m×m)	α
外形1	3700×3200	11.84	0
外形2	3700×3200	13.04	15
外形3	3700×3200	13.88	25
外形4	3700×3200	14.77	35
外形5	3200×3700	11.84	0
外形6	3700×3200	13.04	0

2 横风作用下不同断面列车的气动性能

随着列车车速的提高,横风效应对列车气动性能影响很大。本文采用了有限体积法来模拟气流在车体附近的流动。通过CFD数值模拟,给出列出断面外形与列车气动性能间的关系。

2.1 模型选择与网格划分

模型1—5分别采用外形1—5。所有的模型均为三节车编组(头车+中车+尾车)。

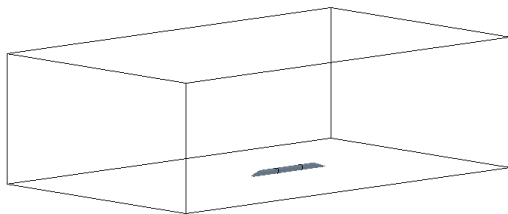


图4 列车计算域示意图

头车外形与尾车外形完全相同。列车模型计算区域的纵向长度约为5倍的列车模型的总长度,高度取30倍的车高(如图4)。计算采用Trimmer网格,为了更好的模拟出边界层的效果,在车体上设置总厚度为60mm,增长比为1.2的6层边界层网格(如图5)。车身上最小网格是5mm(如图6)。图7显示出切面网格。整个计算域的网格总数约为一千五百万。

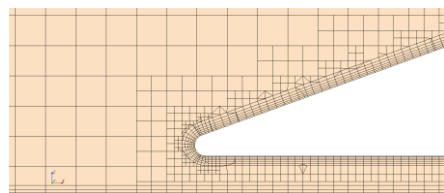


图5 列车头部近壁面网格



图6 列车表面网格划分

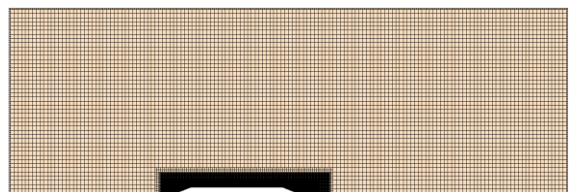


图7 计算域网格切片

2.2 边界条件

1) 外场边界条件。为了模拟出 350km/h 的列车在 15m/s 横风下的气动性能, 在边界上设置 98.37m/s 的来流, 来流的偏转角是 8.77 度。

2) 地面边界条件。在列车实际行驶中, 列车相当于地面速度与列车车速相同。因此在计算中采用移动地面的方法来模拟真实效应, 可以取地面速度与列车速度相同, 即 350km/h。地面采用无滑移壁面条件。

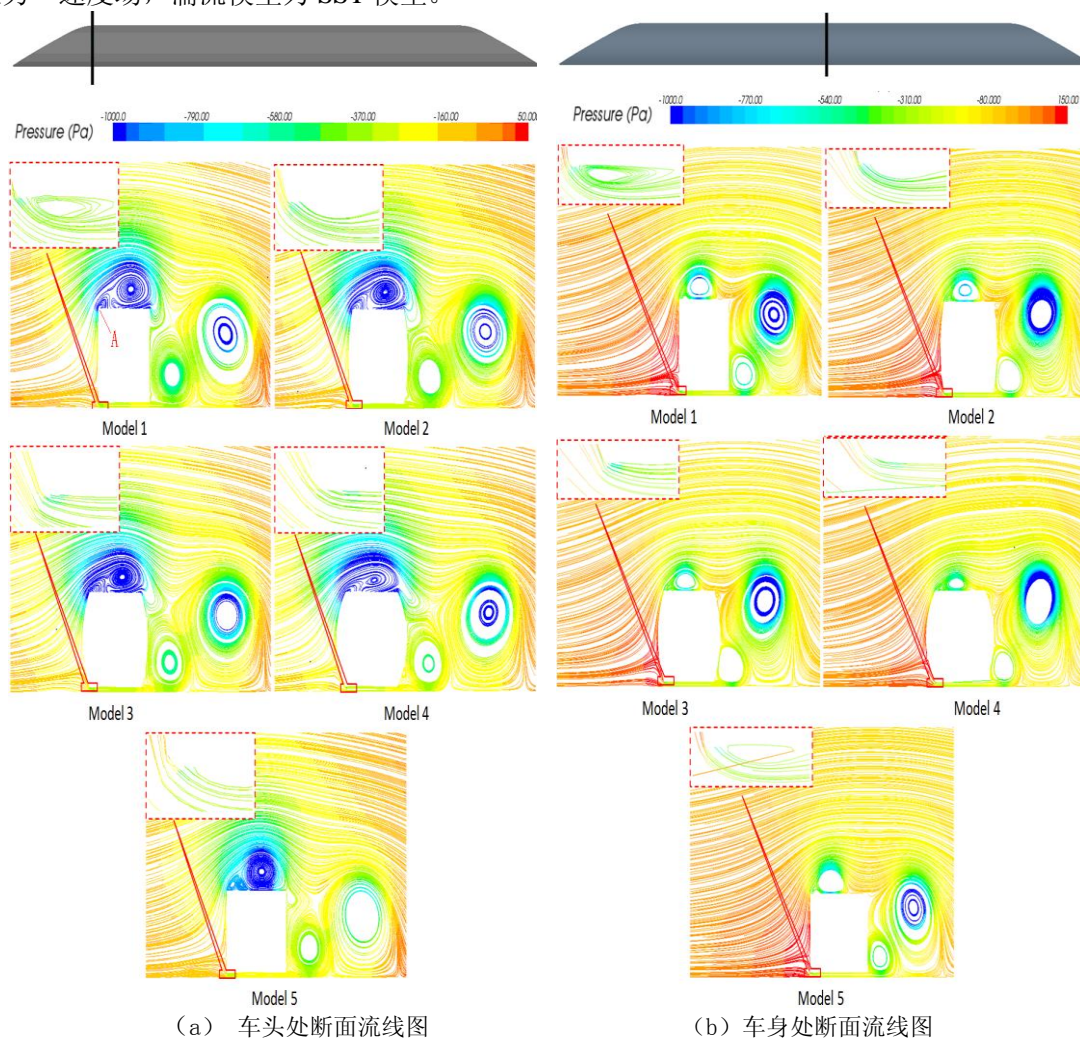
3) 列车表面边界条件。由于边界层效应的存在, 列车表面选取无滑移边界条件。

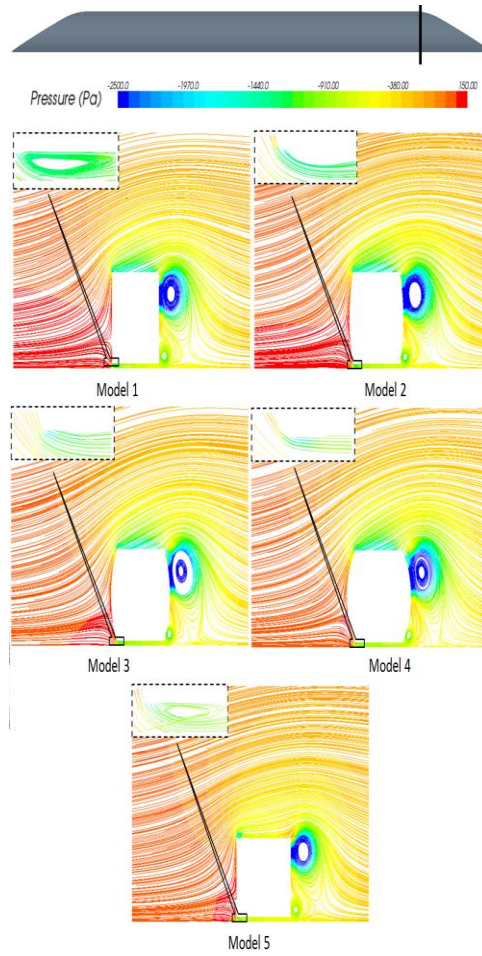
2.3 计算方法

使用计算流体力学软件 STAR-CCM+ 进行并行数值计算。用有限体积法离散控制方程, 采用耦合式求解器, 使用 SIMPLE 法耦合压力-速度场, 湍流模型为 SST 模型。

2.4 计算结果及分析

在横风作用下, 流畅变得极为复杂。图 8.a 所示流动在车顶处出现了分离。在列车的背风侧产生了一个分离区。一部分气流从列车底部经过时被背风侧的漩涡向上卷起。涡在列车顶部或者背风处车身脱落, 这些涡沿着列车车身变得越来越大, 最终消失。图中可以看到尾流场里包括各种尺度的涡。图 8 显示出模型 1 至模型 5 不同断面处的流线图。从图中可以看出, 在模型 1 的 A 点及放大区域处可以看到明显的涡, 然而在模型 2 到模型 4 处, 涡的强度大大的减弱了。这是因为, 由于列车侧壁变得越来越鼓, 气流可以更好的沿着列车表面经过, 而不是在拐角后出现强烈的涡。对于模型 5, 由于它的高度变得更小, 因此受到横风作用更小一些。





(c) 车尾处断面流线图

图 8 列车不同位置断面的流线图

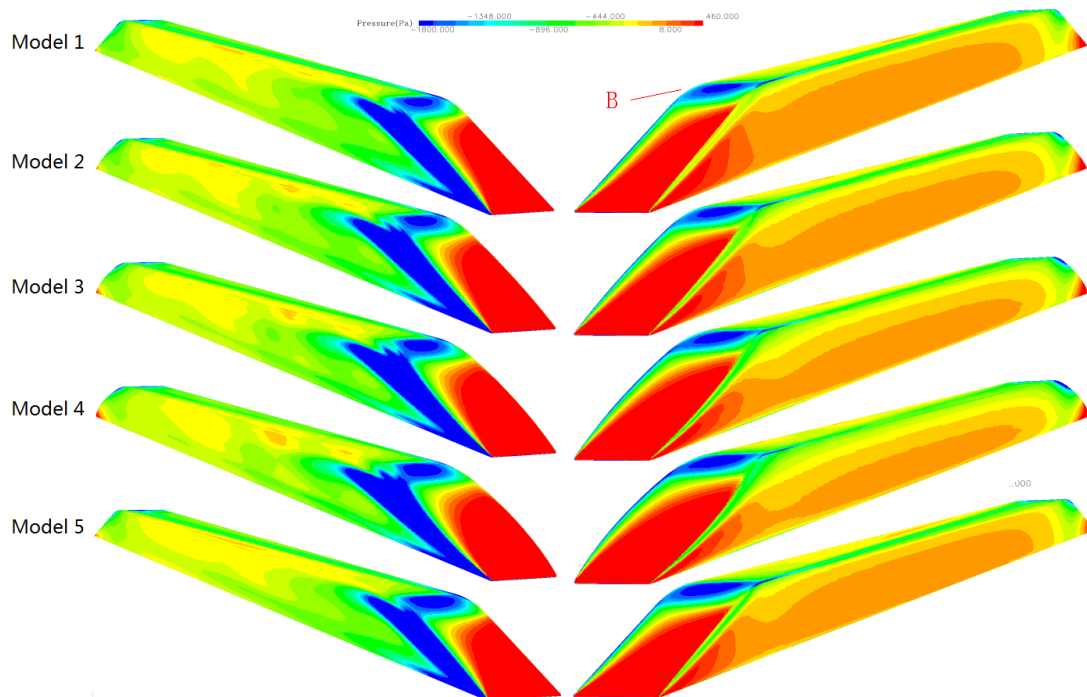


图 9 列车表面压力分布图（左边为背风侧，右边为迎风侧）

图 9 显示了列车表面的相对压强分布。很明显，在列车车头处有很明显的高压区，并且可以观察到由于横风，车体驻点向迎风侧移动。B 点处的压力较低，这是因为列车车头外形导致气流在此处加速。在列车背风侧的气压比较低，这是由于上文中提到的涡所导致的。

接下来，我们要进一步分析气动阻力系数以及倾覆力矩系数。图 10 显示出随着列车侧壁变得越来越鼓，列车的气动阻力系数逐渐下降。模型 1 的气动阻力系数最大，而模型 5 的气动阻力系数要比模型 1 要低。模型 4

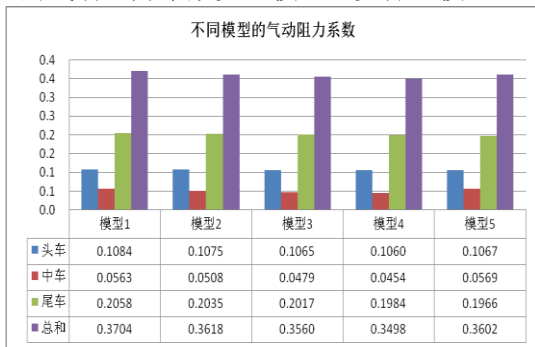


图 10 350km/h 车速，15m/s 横风下的列车气动阻力系数

3 列车交会压力波的研究

列车在隧道中交会时是列车运行过程中一个比较常见的工况。在这篇文章中，采用了 CFD 分析来模拟气流在列车表面的流动，并给出列车表面的压强分布。

3.1 计算域与网格划分

本节中，模型 1—模型 6 均为 16 辆编组的列车，分别采用了外形 1—外形 6。列车隧道选取断面面积是 100m×m 的总长度是 2000m

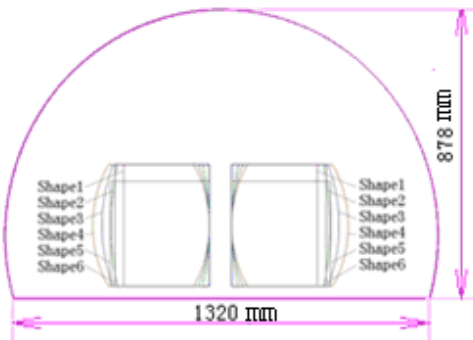


图 12 隧道断面外形

的气动阻力系数最小。倾覆力矩系数变化的规律与阻力系数变化规律类似。模型 1 的倾覆系数是 -0.98，是最大的。模型 5 的倾覆系数是 -0.87，比模型 1 小。模型 4 的倾覆系数最小，是 -0.78。气动性能的改变可以归结于列车气动外形的变化。图 8 显示出鼓形侧壁使得流动更加流畅。直形侧壁使得气流在经过拐角处产生一个明显的涡。涡的产生会导致高压区的压强上升，低压区的压强下降。列车背风侧的涡，由鼓形壁面产生的涡同样会小于直形壁面产生的涡。低侧壁的影响要小于高侧壁的影响。

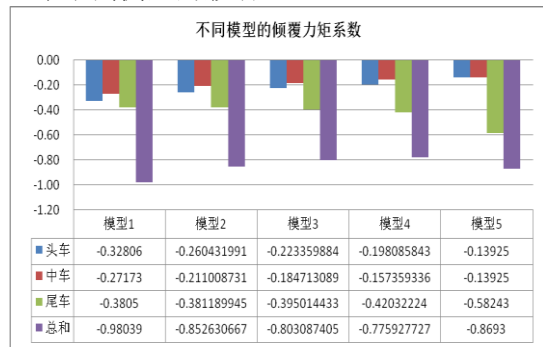


图 11 350km/h 车速，15m/s 横风下的列车倾覆力矩系数的双向轨道的隧道。两列车侧之间距离保持不变（图 12）。隧道出口处设置直径是 200m，长度是 600m 的半圆柱外形的外场（图 13）。计算域采用混合网格，在列车附近设立加密区，列车表面网格设定为 300mm，外层则设置为比较粗糙的网格。为了能够更准确的捕捉流场信息，在列车表面做了厚度为 30mm 的边界层。图 14 显示出计算域网格划分情况。列车总网格数在 400w 左右。

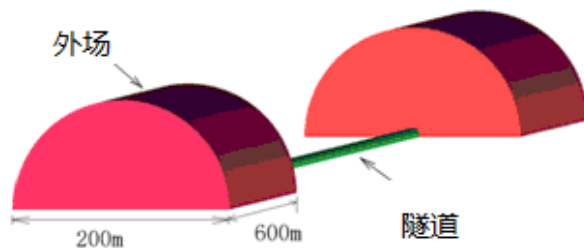


图 13 外场与隧道区域示意图

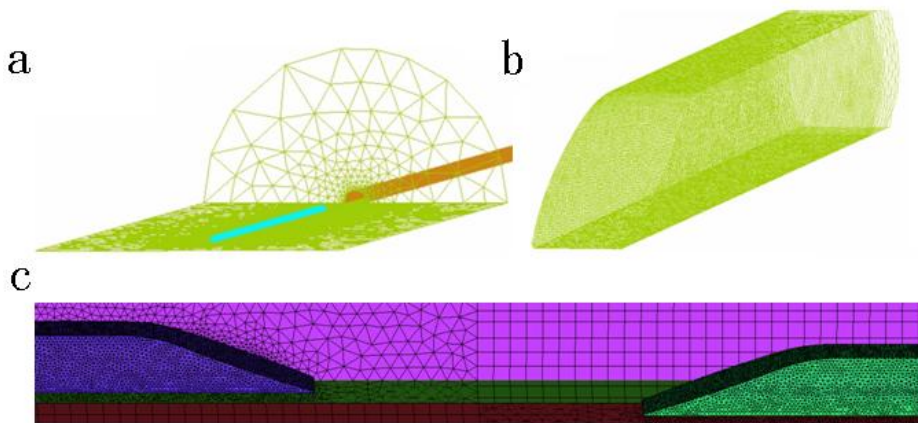


图 14 计算区域网格划分

3.2 边界条件设定与监测点的设置

1) 外场边界条件。由于是非定常运算，外场设置为标准大气压 101325Pa。

2) 隧道与地面边界条件。隧道与地面处于静止状态，选取壁面边界条件

3) 列车表面边界条件。由于边界层效应的存在，列车表面选取无滑移边界条件。

为了获取高速列车交会时，交会压力波的变化，在列车表面上分布了 8 个监测点，

其中头车与尾车各 3 个监测点，车身上有两个监测点（如图 15）。头车测点 mh1、mh2 位于头车流线型部分与车身连接处，mh1 位于列车交会侧，mh2 位于列车顶端，mh3 位于列车，车头迎风面中点处，mb1、mb2 位于列车中间处，其中 mb1 在列车会车内测，mb2 位于列车顶部。mt1-mt3 分布于尾车，位置与 mh1-mh3 相同。

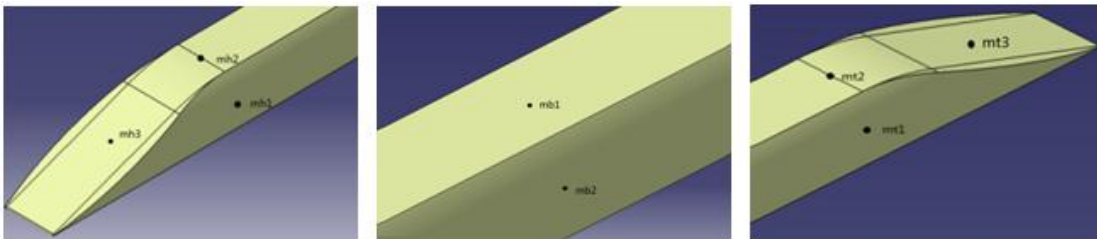


图 15 列车表面压力监测点分布示意图

3.3 计算结果分析

图 16 显示出两列车以 350km/h 隧道交会的压力分布图。在列车车头处由于气流阻滞，有一块高压区。车头附近有很大一块低压区，这是由于两车交会时，阻塞面积增大，气流加速，引起的气压下降。图 17 显示了列车进隧道时，列车车底所在平面内的压力分布。很明显看出模型 1 周围压力变化小，而模型 4 周围压力变化大，因此，模型 4

在进入隧道时对隧道内空气扰动更大一些。图 18 显示出两列车在隧道内交会时，列车车底所在平面的压力分布。可以看出在列车交会时，同样是模型 4 周围压力绝对值更大，而模型 1 周围压力绝对值小，由此可以看出模型 4 会引起较大的交会压力波，而模型 1 引起的最小，模型 2 和模型 3 次之。

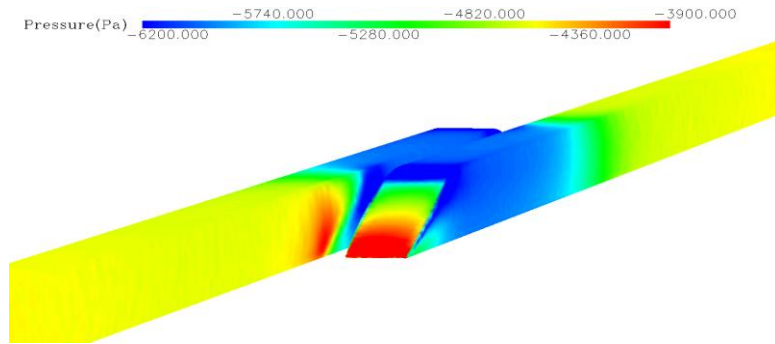


图 16 列车交会瞬间列车表面压力云图

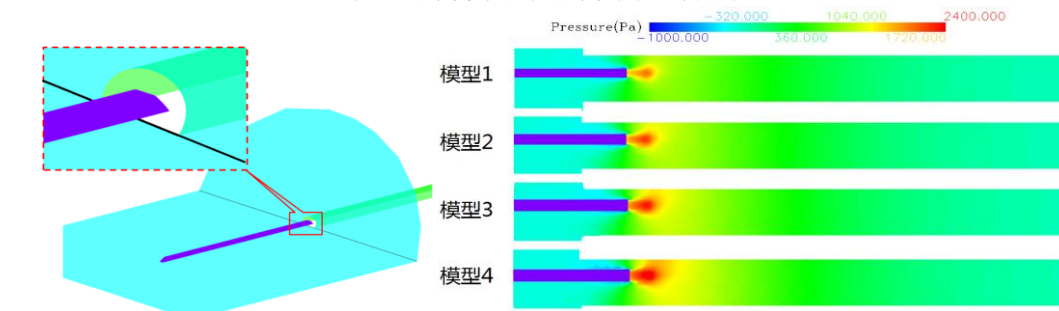


图 17 列车进入隧道时列车附近区域压力云图

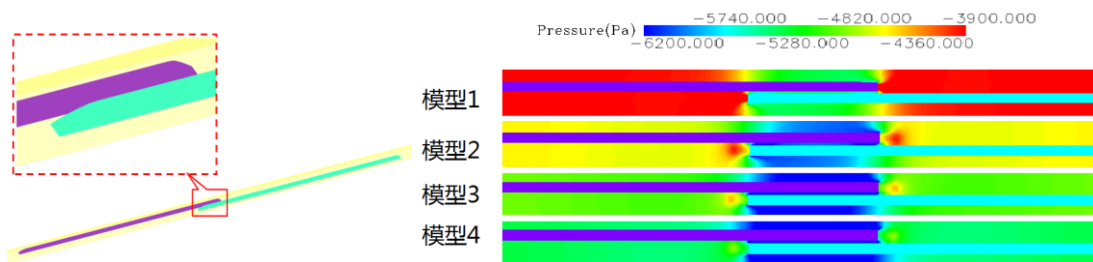


图 18 列车在隧道内交会时列车附近区域压力云图(上面的车从左向右运动)

从图 19 中可以看出，头车的最大压力值表现为升高-降低-升高-降低这样一个过程。最小压力值也表现为同样的趋势。原因如下：（1）第一个上升阶段来源于对面车车头进入隧道产生的初始压缩波（2）第一个下降段的来源有三个：一是对面来车车头产生的初始压缩波经本侧隧道口反射变为膨胀波又作用在本车头部产生，另一个因素是本车车尾进入隧道产生的初始膨胀波的作用，第三个因素为对面来车车尾产生的初始膨胀波（3）随后的压力升高和降低来源于膨胀波反射后形成的压缩波以及再次反射。

接着，我们比较一下不同列车车身变化对列车的交会压力波的影响。图 19 是模型 1 至模型 4 的不同监测点压力随时间变化图。很明显可以看出，列车上分布的各个测点都有显著的变化。模型一的最大最小压力的波动最小，模型二与模型三变化次之，模型四

的最大变化最为明显。最大压力值是模型一最大压力值的 128%，最小压力值是 127%。图 20 是列车交会压力波的最大值与最小值随着断面面积变化图。由上述图，我们可以看出，列车交会压力波与车身断面面积基本上成线性关系。这是由于列车通过隧道的过程可以类比于活塞进入气缸，当隧道的阻塞比越高时，隧道与列车间的空隙也就越少，受到壁面的阻碍也就越严重，列车的交会压力波也就更加的明显。图 21 是模型 1 与模型 5 的对比，可以看出列车的交会压力波没有显著的改变。这就说明了当两车之间间距保持定值时，列车交会压力波与列车横向与纵向长度比无关，而与面积有关。图 22 是模型 2 与模型 6 的对比，可以看出当两辆车间距离保持一定时，列车侧壁是否鼓起程度与列车交会压力波无关，由此可以得出列车交会压力波仅与列车的隧道阻塞比相关。

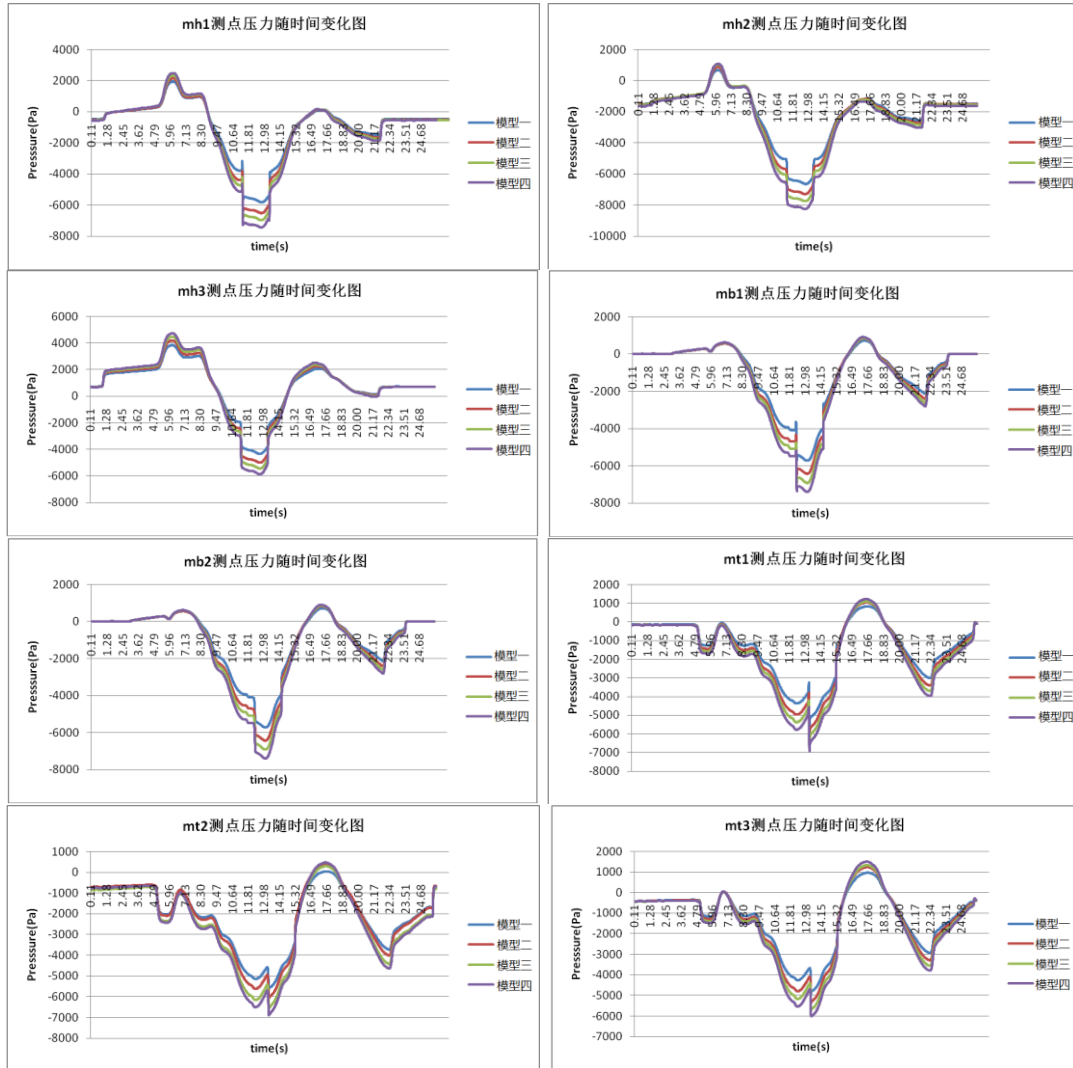


图 19 不同监测点压力随时间变化图

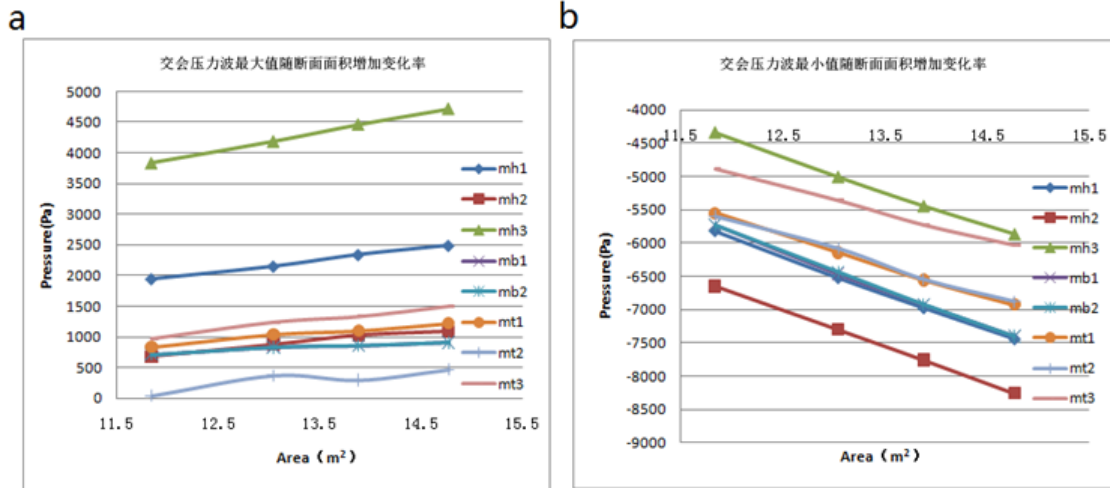


图 20 交会压力波随断面面积变化率

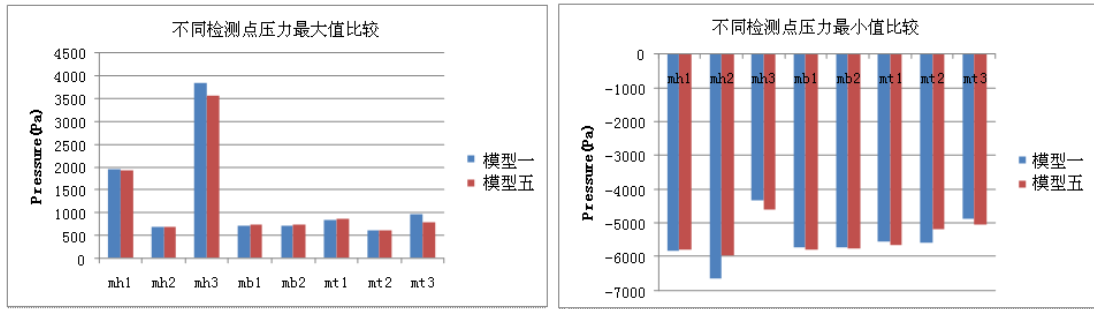


图 21 模型 1 与模型 5 不同监测点的压力最大值最小值比较

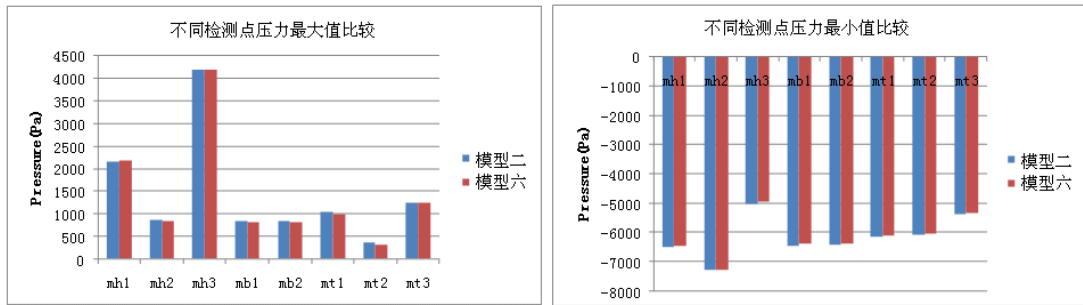


图 22 模型 2 与模型 6 不同监测点的压力最大值最小值比较

4 结论

本文研究了不同的列车断面下高速列车的气动性能研究。数值模拟显示：列车的气动性能与列车的气动外形之间有着密切的关系。

当列车遭遇横风时，列车的气动性能有很大的改变。鼓形侧壁的列车的气动阻力系数与倾覆力矩系数要小于直壁的。随着侧壁

变得越来越鼓，这一规律会变得更加明显。当列车断面一定时，扁宽形车体的个阻力系数与倾覆力矩系数要小些。

高速列车在隧道交会时，会产生显著的隧道交会压力波。当采用相同隧道和相同编组时，压力波与隧道的阻塞比近似成线性关系，但是与列车外形本身无太大关系。

参考文献

- 1 Joseph A. Schetz, Aerodynamics of high-speed trains, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 33, P. 371-414, 2001.
- 2 F. Cheli, F. Ripamonti, D. Rocchi, G. Tomasini. Aerodynamic behavior investigation of the new EMUV250 train to cross wind[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(4/5):189-201.
- 3 Xu Ping, Tian Hong-qi, Yao Shu-guang. Integrative method of design and manufacture on streamlined head of train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering; 2007-01
- 4 Diedrichs, B., Sima, M., Orellano, A., and Tengstrand, H. 2007. Crosswind stability of a high-speed train on a high embankment. Proc. Instn Mech. Engrs, Part F: J. Rail and Rapid Transit, 221(F2), pp. 205 - 225.
- 5 Kim I, Ok H(1998) A study on the aerodynamic characteristics of a high speed train entering a tunnel and frontal shape optimization. JKAS26(1):17-26

THE INFLUENCE OF DIFFERENT CROSS-SECTION SHAPES OF TRAIN BODY ON THE AERODYNAMIC PERFORMANCE

C. H. LIU, D.L.GUO, S.B.YAO and G.W.YANG

(State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)

Abstract In this article, the influence of different cross-section shapes of train body on the aerodynamic performance has been investigated by numerical simulations. The results show that the aerodynamic performance is strongly affected by different cross-section shapes of train body (such as cross-sectional area, width-to-height ratio of cross-section, cross-section with straight or curved sides, etc.). Firstly, the drag coefficient and the overturning moment increase as sides of cross-section become more curved. Secondly, the drag coefficient and the overturning moment are reduced as the width-to-height ratio of the cross-section is increased when the cross-sectional area is kept as a constant. Finally, air pressure pulse produced by two trains passing by is approximately proportional to the cross-sectional area in a certain range and it independent to the cross-section shapes. These studies can be used for aerodynamic shape design.

Key words air pressure pulse, cross-section shape, aerodynamic performance, numerical simulation