

文章编号:1005-0523(2019)03-0007-09

强侧风对时速 350 km 高速列车气动性能影响分析

谢红太^{1,2}

(1. 中设设计集团股份有限公司铁道规划设计研究院,江苏 南京 210014;2. 兰州交通大学机电工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:采用 NURBS 曲面设计方法完成对某型高速列车头车的三维数字化设计建模,基于三维定常不可压的黏性流场 N-S 及 $k-\varepsilon$ 方程湍流模型,利用有限体积数值模拟方法分析计算出列车的速度阻力函数关系,同时针对列车在不同风向角的强侧风环境中运行时压力场和速度场做了进一步研究。研究发现:在无风明线上运行时列车所受空气阻力与运行速度的平方成正比,侧风运行时随着风向角的扩大空气阻力系数呈现先增大后逐渐下降的变化趋势。流场分布结构复杂不规律,当侧风情况较为严重时正压区主要分布在迎风侧,负压区主要分布在背风侧和车顶部位,且负压表现更为强烈,列车前端滞止点向迎风侧发生偏移,致使迎风侧与背风侧产生巨大压差。

关键词:高速列车;空气动力学;流场结构;NURBS 方法

中图分类号:U266.2

文献标志码:A

近年来,高速动车组旅客列车逐渐普及并大幅提速,2017年9月我国在京沪线相继开行350 km/h“复兴号”高速动车组,并在此基础上做了大范围推广的战略规划。高速列车与空气存在的相对复杂无规律的高速强烈运动,致使列车气动阻力问题突出,高速列车空气动力学性能恶化^[1-4]。在高速列车设计研发过程中如何使其具有优良的空气动力学性能显得愈来愈重要,尤其在适应空气运行环境较差的地段及应对突发恶劣天气变化的能力要求越来越高。比如列车高速运行过程中的气动阻力问题及列车在强侧风下的横向、纵向、垂向不稳定性问题等^[5-8]。本文重点针对350 km/h某型高速列车列车风与大风耦合作用下的列车空气动力特性进行数值分析研究,为我国自主研发高性能高速列车提供理论支撑与技术保障。

1 阻力特性分析

有限元法是一种有限的单元离散某连续体然后进行求解的一种数值计算的近似方法,Simulation分析工具作为计算机嵌入式分析软件与Solidworks无缝集成,能够提供大量的计算与分析工具来对较为复杂的零件及装配体进行模拟计算,测试和仿真分析其主要功能模块有结构计算与应力分析、应变计算分析、产品的优化设计、流体模拟仿真、线性与非线性分析等^[9]。为了分析高速列车的气动阻力特性,现分别等梯度选取列车在长大直线不同运行速度,使用Solidworks flow Simulation流体动力学分析工具,对某型高速列车分别进行气动阻力特性数值模拟计算。

1.1 几何及数模创建

相关研究表明,列车在时速300 km及以上时运行总阻力中由于气动摩擦产生的阻力可占85%以上^[10-11]。因此在列车头车司机室设计中通常采用国际标准化组织定义的工业产品曲线设计标准方法,非均匀B样条线进行流线型设计,即NURBS方法^[12-13]。在具有先进混合建模技术及复杂曲面设计技术的三维设计软件CATIA中,根据头车设计技术参数,确定高速列车头部司机室流线型曲面主控制线,并顺次添加进一步优化两侧辅助控制线,完成高速列车的计算模型创建^[14-16]。

收稿日期:2018-12-19

作者简介:谢红太(1993—),男,助理工程师,硕士,研究方向为铁道规划及动车组行车安全设计。

将于 CATIA 软件中创建的高速列车头车模型导入到 Solidworks 软件中,为了能够较为准确直观地模拟高速列车在空气中的运行情况,在此气动阻力分析列车计算几何模型及后面侧风问题分析中均采用 3 辆编组的形式,即头车、中间车和尾车连挂,模拟计算时简化风挡连接处,直接实体相接。同时外流场采用如图 1 所示的空壳薄壁长方体模型,定义某型高速列车几何模型全长为 L ,取外流场计算模型的长宽高分别为 $4L, 2L, 1L$,其中列车位于该长方体流场中部,列车底部具体流场下部设为 0.5 m ,列车头部距来流入口面 $1L$ 处,尾部距出口面 $2L$ 处。采用全局网格与局部网格相匹配的模式进行该几何模型的网格划分处理,局部细化网格为列车及周围 10 m 范围内。

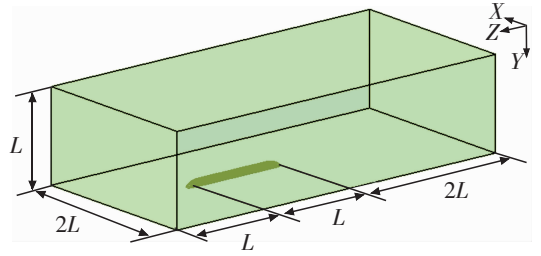


图 1 外流场模型设计及计算域

Fig.1 External flow field model design and calculation domain

列车气动阻力问题及后述侧风向问题均可归结为流体运动问题,而任何一个流场流动问题均可用非稳态的 N-S 方程描述^[17-19]。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

动能守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} (K + K_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} + S_h \quad (3)$$

在对高速列车进行 CFD 数值模拟分析计算时采用三维定常不可压黏性流场,其中外流场的湍流运动采用 $K-\varepsilon$ 湍流方程模型^[20],即湍动能方程和湍动能耗散方程,如式(4)~式(5)所示。

湍动能方程

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (4)$$

湍动能耗散方程

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{\varepsilon 3} G_b) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

式(1)~式(6)中: ρ 为流体的密度; μ_i 为流体速度沿 i 方向的分量; p 为静压力; τ_{ij} 为应力矢量; ρg_i 为 i 方向的重力分量; $\mu = \mu_l + \mu_t$ 为有效粘性系数; $F_i = \rho f_i$ 为由于阻力和能源而引起的其他能源项; h 为焓; T 为温度; K 为分子传导率; K_t 为由于紊流传递而引起的传导率; S_h 为定义的任何体积热源; μ_i, μ_j 为流体沿 i, j 方向的速度分量; x_i, x_j 为横坐标; $C_\mu, C_1, C_2, C_3, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为系数,取值同参考文献[21]; G_k 为由于浮力产生的湍流动能; G_b 为由于层流速度梯度而产生的湍流动能; k 为湍动能; ε 为湍动能耗散率; i, j 为哑标。

1.2 计算分析

将建立的高速列车及模拟外流场空壳薄壁长方体模型进行纵向对称面重合装配及相关约束,并转换到 Solidworks flow Simulation 计算流体动力学分析工具环境中^[22]。分别选取大小不同且垂直于外流场入口平面的速度 v_c 作为来流速度模拟列车在无风环境下以不同速度运行情况。如图 2 及图 3 所示为来流速度 $v_c = 350\text{ km/h}$ 计算某型高速列车车身表面压力及外围速度迹线。

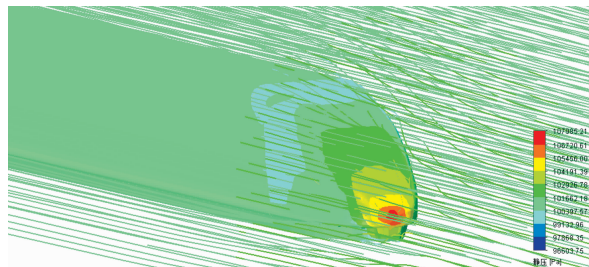


图2 车身压力及外围速度迹线

Fig.2 Body pressure and peripheral speed traces

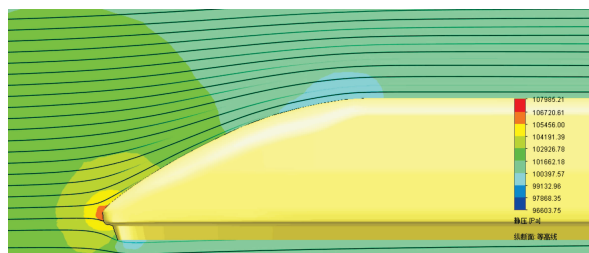


图3 纵向对称面上压力分布

Fig.3 Pressure distribution on the longitudinal symmetry plane

外流场纵向中间对称面上高速列车外围静压分布如图3所示,列车运行时,由于车头驾驶室部位受到空气正向挤压,前部鼻尖处达到最大 $P_{\max}=107.985$ kPa,与流场初始给定标准大气压相比 $P_{\max}>atm$,周围流场呈正压状态,同时周围空气流速迅速增加,沿着两侧及车顶上侧逐渐减小达到一个最小值 $P_{\min}=96.603$ kPa, $P_{\min}<atm$,周围流场呈负压状态,此时周围风速达到最大 $v_{\max}=398$ km/h。其中纵向对称面外流场与列车上表面接触线静压如图4所示。

通常对流动流场引入一个无量纲的参数压力系数做进一步研究,对于列车表面上任一点的压力系数 $C_p^{[17]}$ 可表示如下

$$C_p = \frac{p - p_{\infty}}{0.5 \rho_{\infty} V_{\infty}^2} \quad (7)$$

式中: p 为所求压力点处的静压, Pa; ρ_{∞} 为标准大气压下空气密度, kg/m^3 ; p_{∞} 为远离列车的无扰动外流场独立静压即此处标准气压, Pa; V_{∞} 为空气流过列车的速度, m/s。

列车表面静压分布沿轴线方向呈现正、负压力波动,变化较大,列车前缘鼻部是滞止点,此处压力达到最大,相应压力系数最大,沿列车表面,速度逐渐增加,在压区速度达到最大值,在列车中部表面上压力和速度都比较平稳,在列车尾部,由于列车的行驶产生负压区。

其分布规律主要表现为:① 头车正对来流方向的鼻尖部位为正压区;② 从鼻尖向上及向左右两侧,正压逐渐变为负压,车头与车身曲线过渡连接处负压达到最大,外围空气流速达到最大,即图2中蓝色带状区域。

为了更为全面的研究某型高速列车气动阻力问题,分别取来流速度 $v_c=50, 100, 150, 200, 250, 300$ km/h 及 350 km/h 分别计算。在忽略干扰阻力(车辆突出物等所引起的阻力),只考虑压差阻力和摩擦阻力的情况下,拟合出速度-空气阻力曲线呈二次抛物线变化趋势曲线,如图5所示。

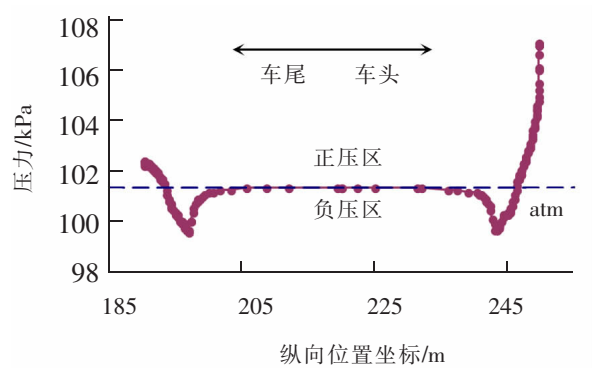


图4 纵向对称面上部流固接触线静压

Fig.4 Vertically symmetric surface fluid-solid contact line static pressure

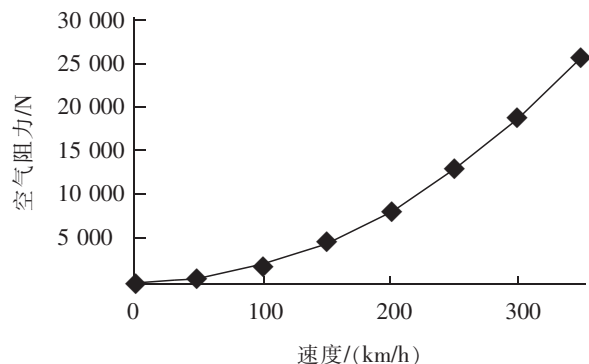


图5 某型列车速度-空气阻力曲线

Fig.5 Speed-air resistance curve of a certain type of train

即列车所受空气阻力 F_e 与来流速度 v_c 的平方(列车运行速度的平方)成正比,可表示为

$$F_e = C_e v_c^2 \quad (8)$$

式中: C_e 为该某型高速列车的空气阻力系数,为一常量,经拟合计算得 $C_e=0.192$;阻力系数 C_e 是一个与高速列车的形状及表面特性相关的无量纲量,可用下式进行理论计算^[19]

$$C_e = \frac{F_e}{0.5 \rho_\infty V_\infty^2} \quad (9)$$

式中: F_e 为列车空气阻力, N; ρ_∞ 为标准大气压下空气密度, kg/m^3 ; V_∞ 为空气流过列车的相对速度, m/s 。

不同造型的列车头车部位分布不同的压力 p 和表面附近外围流场的速度 V_∞ 变化,进而影响列车阻力系数 C_e ,由此可见改善列车头车司机室流线型设计是降低气动阻力系数的重要途径和有效技术方法^[23-26]。

2 侧风问题数值研究

侧风指风向与列车运行方向呈一定角度的环境风,现场试验研究表明,在强侧风的作用下,列车空气动力性能恶化,不仅列车空气阻力、升力、横向力迅速增加,还影响列车的横向稳定性,严重时将导致列车倾覆。近年来随着国家对丝绸之路沿线经济带的大力投资建设,逐步在环境恶劣的西部地区开行越来越多的高速动车组,为了使列车安全通过风区,必须开展大风环境下的列车空气动力特性研究^[1]。

2.1 列车侧风计算模型

参照图 1 所示外流场计算域模型,在进行侧风问题研究时,即列车风与环境风的耦合问题分析,外流场延续采用,调整环境风向角即可,具体示意见图 6。

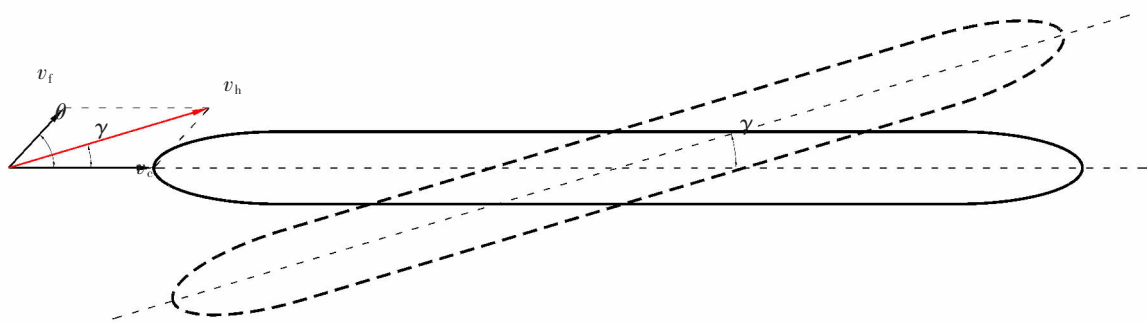


图 6 列车侧风风向示意图

Fig.6 Schematic diagram of the crosswind direction of the train

图 6 中, v_c 为列车风速(列车运行速度); v_f 为环境风速; v_h 为列车和侧风耦合风速; θ 为风向角; γ 为侧偏角。在长大直线无风环境中,高速列车所受环境风沿正向而来,速度方向平行于列车轴线,当有侧风影响时,侧风速度 v_f 与列车中轴线的夹角 θ 定义为风向角。在进行计算侧风对列车运行的影响时,通常采用列车风与侧风速耦合风速 v_h 进行模拟计算。其中耦合风速 v_h 与列车中轴线的夹角 γ 为侧偏角,各量满足如下关系式

$$v_h = \sqrt{v_c^2 + 2v_c v_f \cos \theta + v_f^2} \quad (10)$$

$$\gamma = \arccos \frac{v_c^2 + v_h^2 - v_f^2}{2v_c v_h} \quad (11)$$

为了计算方便通常在保证外流场模型空间位置不动的情况下,将高速列车绕竖直中轴线旋转一个侧偏角 γ 即可对其进行侧风问题分析。

2.2 计算分析

本文取 30 m/s 的强环境风分别以风向角 60° 和 90° 方向,模拟在明线上 350 km/h 的高速列车空气动力学性能及运行稳定性情况。根据式(10)和式(11)分别计算各模拟参数如表 1 所示。

表 1 变量计算参数数值表
Tab.1 Variable calculation parameter value table

模拟参数	风向角 θ	侧偏角 γ	耦合风速 $v_h/(km/h)$
1#	$\theta_1=10^\circ$	$\gamma_1=2.29^\circ$	$v_{h1}=456.73$
2#	$\theta_2=30^\circ$	$\gamma_2=6.93^\circ$	$v_{h2}=446.80$
3#	$\theta_3=60^\circ$	$\gamma_3=13.04^\circ$	$v_{h3}=414.68$
4#	$\theta_4=90^\circ$	$\gamma_4=17.16^\circ$	$v_{h4}=366.26$

分别针对上述各变量参数值,设定好边界条件(主要包括外流场入口流速、出口压力)及目标(主要包括入口压力、出口体积流量),在标准大气压强下,进行数值模拟计算。列车头车表面压力分布及速度迹线如图 7 所示。

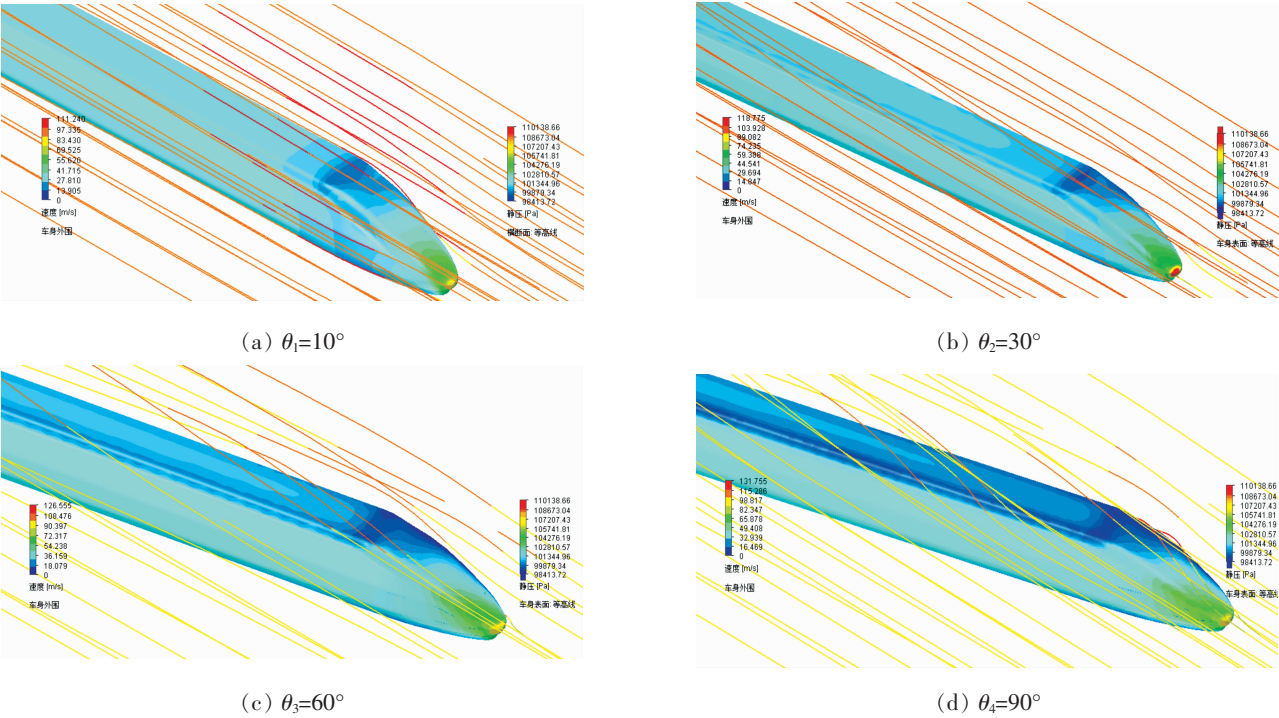


图7 不同风向角外流场速度迹线及列车表面静压分布

Fig.7 Flow field velocity traces outside the wind direction and static pressure distribution on the train surface

从图 7(a)~图 7(d)中不难看出随着侧风风向角 θ 的不断增大,耦合风速逐渐减小,当风向角最大为 90° 时,耦合风速也最小。列车最大正压区由侧风向角为 0° 时的头部鼻尖处,逐渐向迎风侧偏移,当 $\theta_4=90^\circ$ 时偏移最为严重,此时形成的正压区域范围最大。

计算分析得出外流场与列车接触面附近风向角-速度拟合曲线如图 8 所示,随着侧风越来越严重,迎风侧列车顶部边缘外露突出,速度直线增加,这对于列车运行稳定性及环境噪声控制有着极其重要的影响。迎风侧正压区速度加强背风侧负压区速度减弱,导致列车外围附近空气流速趋于稳定。

计算拟合出外流场与列车接触表面风向角-静压曲线如图 9 所示,高速列车车身表面的压力随着侧风越来越严重,最小静压逐渐减小,即与背风侧形成的负压区越来越大越来越明显有关。而平均静压基本保持在标准大气压值 atm 附近,最大静压表现出起伏不定的波动趋势,这与列车头部司机室的曲面设计有关,可引入流线型曲面质量系数来加以说明,该最大静压曲线起伏波动越明显说明该头车曲面设计较差,越平缓曲面流线型趋势越好,曲面设计质量越高,造成的尖点及滞止点越少^[22]。

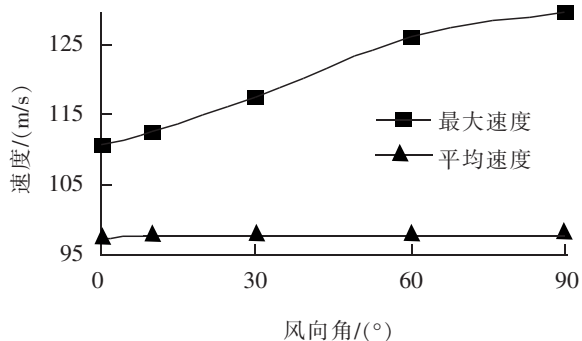


图8 外流场与列车接触面附近风向角-速度拟合曲线
Fig.8 Wind direction angle-speed fitting curve near the external flow field and the train contact surface

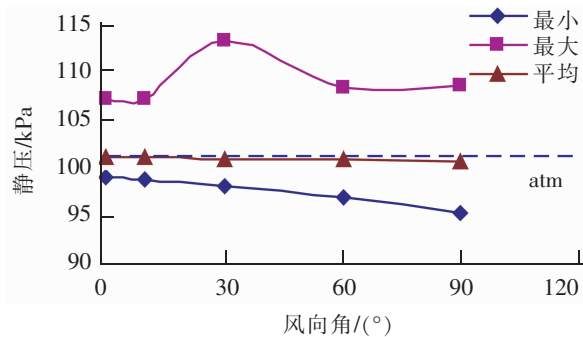


图9 外流场与列车接触表面风向角-静压拟合曲线
Fig.9 Wind direction angle of external flow field and train contact surface-static pressure fitting curve

由于侧风的干扰使列车迎风侧形成强大的正压区,背风侧形成强大的负压区,如图 10 所示,两侧存在很大压力差,严重威胁着列车运行安全。

随着侧风的偏移于车身曲面连接处形成巨大的负压区,且逐渐加强扩大至整个列车头部及车顶区域,如图 11 所示,图中列车向右运行即来入口为右侧。

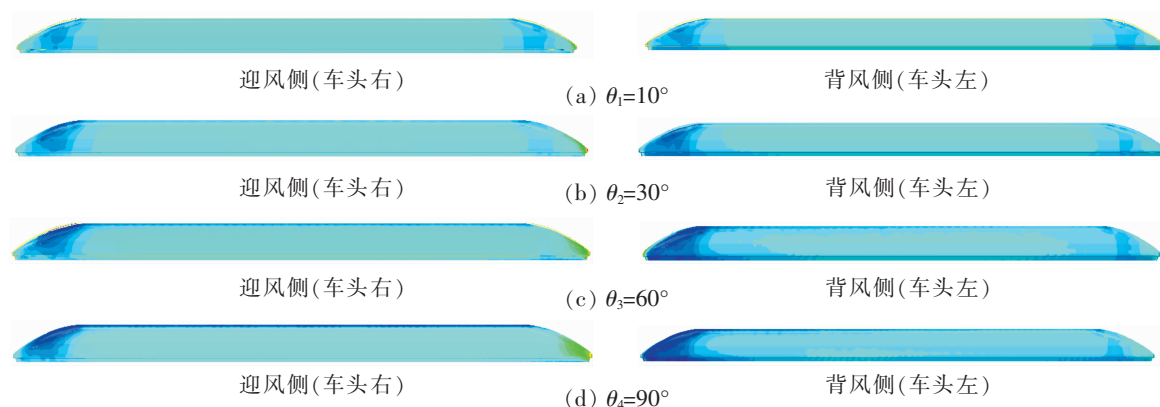


图 10 迎风侧与背风侧静压分布
Fig.10 Static pressure distribution on the windward side and leeward side

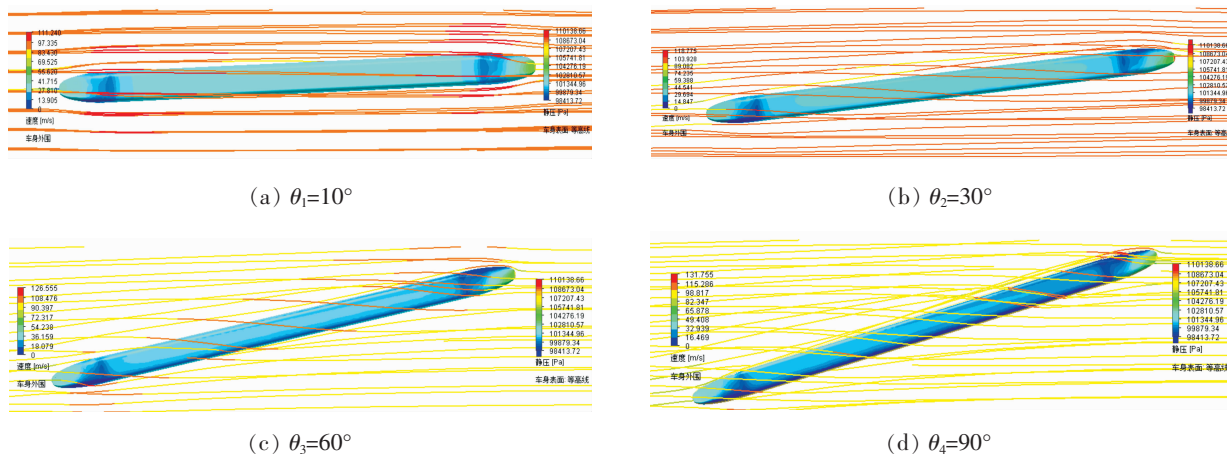


图 11 车顶空气速度迹线及表面静压分布
Fig.11 Roof air velocity trace and indicating static pressure distribution

在高速列车头车流线型曲面设计中,一个很重要的技术问题就是如何处理好头部驾驶室曲面与列车车
厢直面部分的过渡连接,此处易形成强烈负压带,难以消除。针对不同方向侧风分别取该界面,进行压力波
研究,如图 12 所示。

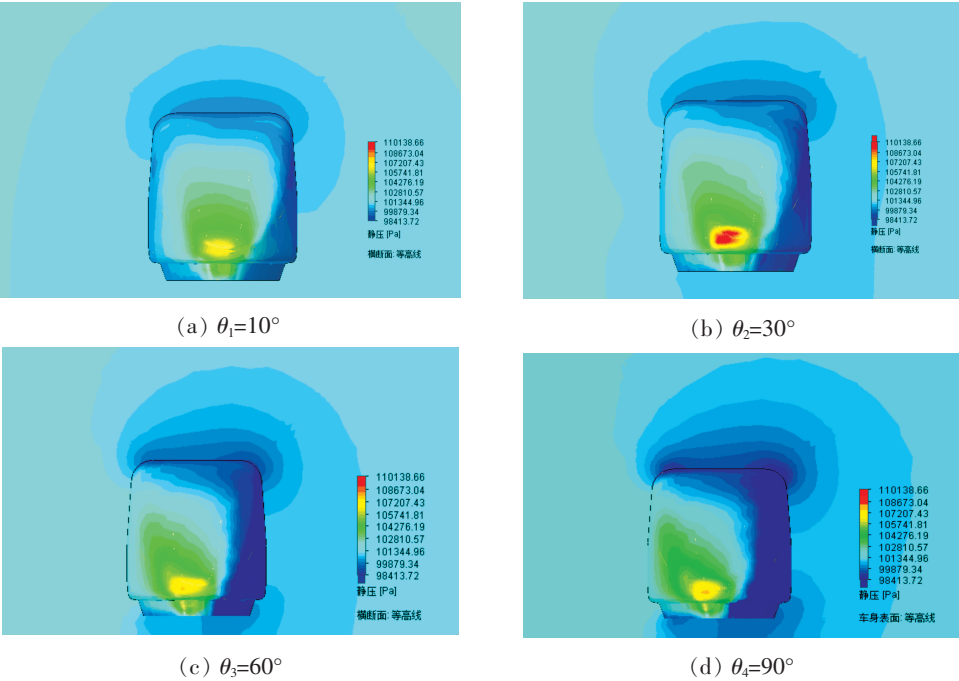


图 12 头身连接处横截面压力分布

Fig.12 Cross-sectional pressure distribution at the joint of the head and body

同时提取该列车在不同风向角侧风影响下的纵向对称面上部流固接触线,计算静压分布如图 13 所示,
其中车头位置在图中右侧位,车尾部分在图中左侧位。该流固接触线上压力分布情况能较为全面的反映侧
风的偏侧趋势和所带来的压差影响,从图中发现随着侧风趋势的加强,列车顶部位置负压现象越来越明显,
在侧风影响下整个列车顶部静压基本上处在标准大气压 atm 线下侧,且呈现出从列车尾部向列车头部逐渐
加强,影响趋势及影响范围越大。

随车风向角的逐渐增加,在忽略其他因素干扰的情况下,高速列车主要受到空气摩擦阻力 F_s 和压差阻
力 F_c 两方面的影响,整车空气阻力 F_w 包括这两部分之和,经模拟计算如图 14 所示为风向角-空气阻力拟合
曲线。

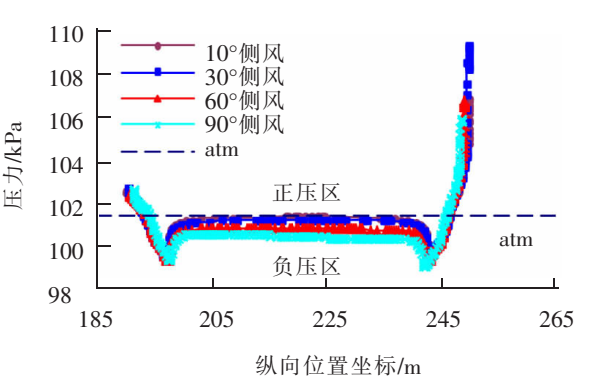


图 13 横向对称面上部流固接触线静压
Fig.13 Statically symmetrical upper surface fluid-solid
contact line static pressure

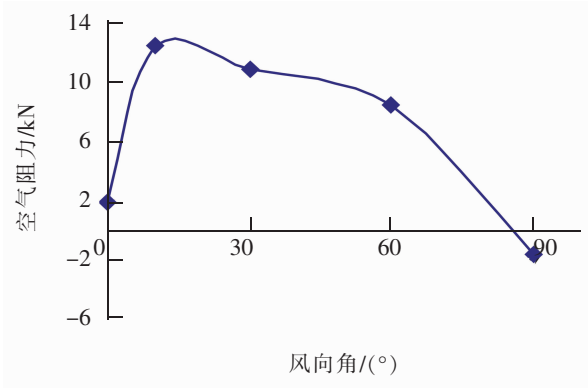


图 14 阻力随风向角变化趋势
Fig.14 Resistance changes with wind direction

图14中风向角 θ 在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 左右范围内该某型列车所受空气阻力 F_w 迅速上升,当 θ 为范围内某一值时阻力达到最大,然后随着风向角进一步扩大列车所受空气阻力逐渐下降,甚至出现当达到 $\theta=90^\circ$ 由于列车车体迎风侧和背风侧分别形成较强的正压场和负压场作用,造成两侧巨大压力差,理论上出现负阻力现象。由式(8)和式(9)可知,该型350 km/h高速列车在环境风30 m/s中以不同风向角运行时,其阻力系数 C_e 呈现与图14风向角-空气阻力拟合曲线相对应一致的变化趋势,即在出现某一最大值 $C_{ex}=1.32$ 后,随着风向角进一步扩大,阻力系数出现负值,其中该型高速列车最大负阻力系数为 $C_{ed}=-0.17$ 。

3 结语

在忽略其它干扰阻力的情况下,无风明线上运行时列车所受空气阻力主要包括摩擦阻力和压差阻力两部分,且随着运行速度的逐渐增加,列车所受阻力等于阻力系数与运行速度平方的乘积。列车侧风运行时随着风向角的扩大,空气阻力系数呈现先增大后逐渐下降的变化趋势,出现负阻力的现象。流场分布结构复杂不规律,当侧风情况较为严重时,列车外围范围内正压区主要分布在迎风侧,负压区主要分布在背风侧和车顶部位,且负压表现更为强烈,随着风向角扩大而愈加明显,列车前端滞止点向迎风侧发生偏移,致使迎风侧与背风侧产生巨大压差。

参考文献:

- [1] 杨国伟,魏宇杰,赵桂林,等. 高速列车的关键力学问题[J]. 力学进展,2015(45):217-460.
- [2] 田红旗. 中国列车空气动力学研究进展[J]. 交通运输工程学报,2006,6(1):1-9.
- [3] ANDERSSON E, H GSTR M J, SIMA M, et al. Assessment of train-overturning risk due to strong cross-wind[J]. Journal of Rail and Rapid Transit,2004,218(3):213-223.
- [4] DIEDRICHS B, SIMA M, ORELLANO A, et al. Crosswind stability of a high-speed train on a high embankment[J]. Journal of Rail and Rapid Transit,2007,221(2):205-225.
- [5] 何华,田红旗,熊小慧,等. 横风作用下敞车的气动性能研究[J]. 中国铁道科学,2006,27(3):73-78.
- [6] 周丹,田红旗,鲁寨军. 大风对路堤上运行的客运列车气动性能的影响[J]. 交通运输工程学报,2007,7(4):6-9.
- [7] BETTLE J, HOLLOWAY A G L, VENART J E S. A computational study of the aerodynamic forces acting on a tractor-trailer vehicle on a bridge in cross-wind[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2003,91(5):573-592.
- [8] SUZUKI M, TANEMOTO K, MAEDA T. Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2003,91(1/2):209-218.
- [9] 谢红太,谭春梅,武振锋. 基于SolidWorks的CRH2轮轴过盈装配有限元分析[J]. 大连交通大学学报,2017,38(6):70-73.
- [10] 王东屏,何正凯,李明高,等. 动车组气动阻力降阻优化数值研究[J]. 铁道学报,2011,33(10):15-18.
- [11] BAKER C J. The flow around high speed trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2010,98(6/7):266-298.
- [12] HU S M, LI Y F, JU T, et al. Modifying the shape of NURBS surface with geometric constraints [J]. Computer Aided Design, 2001(33):903-912.
- [13] ZHONG D H, LIU J, LI M, et al. NURBS reconstruction of digital terrain for hydropower engineering based on TIN model[J]. Progress in Natural Science,2008(18):1409-1415.
- [14] OZBOLAT T, KOC B. Multi-directional blending for heterogeneous objects[J]. Computer Aided Design,2011,43(8):863-875.
- [15] 胡开业,卢友敏,丁勇. NURBS方法的深V型三体船稳性[J]. 哈尔滨工程大学学报,2011,32(10):1273-1294.
- [16] ZHANG G H, YANG X Q, ZHANG C M. Weight-based shape modification of NURBS curve[J]. Journal of Computer-aided Design and Computer Graphics,2004(16):1396-1400.
- [17] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:24-50.
- [18] 谢红太. 基于ANSYS的CRH2型动车组轴盘热应力分析[J]. 机车电传动,2018(2):67-72.

- [19] 谢红太. 动车组轴盘温度场及应力场数值模拟分析[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(1): 116–122.
- [20] 祝志文, 陈伟芳, 陈政清. 横风中双层客车车辆的风荷载研究[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(5): 117–121.
- [21] KHIER W, BREUER M, DURST F. Flow structure around trains under side wind conditions: numerical study[J]. Computers and Fluids, 2000, 29(2): 179–195.
- [22] 谢红太. 高速列车过特长双线隧道时列车及隧道表面所受静压的数值模拟分析方法: 201810572539.2[P]. 2018–11–6.
- [23] 李明, 刘斌, 张亮. 高速列车头型气动外形关键结构参数优化设计[J]. 机械工程学报, 2016, 52(20): 120–125.
- [24] 陈大伟, 姚拴宝, 刘韶庆, 等. 高速列车头型气动反设计方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(04): 631–640.
- [25] 武振锋, 卫晓娟, 陈周锋, 等. 椭球型高速列车头车设计与阻力特性数值模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, 51(5): 711–715.
- [26] 左雄, 罗意平, 刘冬雪. 城际列车气动阻力组成分析及减阻研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(3): 734–740.

Influence of Strong Crosswind on Aerodynamic Performance of High Speed Train at the Speed of 350 km/h

Xie Hongtai^{1,2}

(1. Railway Planning and Design Institute, China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China; 2. School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: This study adopted the NURBS surface design method to complete 3D digital design modeling of a high speed train headstock. Based on the turbulent model of the three-dimensional, steady, incompressible, viscous flow field $N-S$ and $k-\varepsilon$ equations, the finite-element-volume numerical simulation method was used to analyze and calculate the relationship between train speed and air resistance. At the same time, further analysis of the pressure field and velocity field of the train operating in strong lateral wind environments with different wind direction angles was conducted. The study found that the air resistance of the train was proportional to the square of the running speed when the train was running in a wind-free long straight railway line. When the wind was running in the crosswind, the air resistance coefficient increased first and then gradually decreased with the expansion of the wind angle. The distribution structure of the flow field was complex and irregular. When the crosswind condition was more serious, the positive pressure zone was mainly distributed on the windward side of the train, while the negative pressure zone was mainly distributed on the leeward side and the top of the train, and the negative pressure performance was more intense. The front-end stagnation point of the train shifted toward the windward side, resulting in a huge pressure difference between the windward side and the leeward side.

Key words: high speed train; crosswind; aerodynamics; flow structure; finite element analysis; NURBS method; aerodynamic drag