

文章编号: 1001-8360(2011)04-0022-09

侧风风场特征对高速列车气动性能作用的研究

毛 军¹, 郝艳红¹, 杨国伟²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘 要: 侧风风场特征, 如均匀风和大气底层边界速度型对高速列车在侧风环境下运行的安全性评估有直接影响。为了准确地评估侧风对在平原上运行的高速列车的影响, 基于三维定常可压缩流动的 NS 方程, 采用 SST $k-\omega$ 两方程湍流模型和有限体积法, 对时速 350 km 的动车组在均匀风和大气底层边界速度型风场中的流场和气动特性分别进行了数值模拟计算和分析。结果表明: 对在平原上运行的高速列车而言, 作用于列车的气动升力、侧向力及倾覆力矩均随侧风风向角的增大而迅速增大; 当风场为大气底层边界速度型时, 列车顶部与底部及两个侧面的压力差小于风场为均匀风时的压力差, 侧向力及倾覆力矩均小于风场为均匀风时的力及力矩, 升力则随侧风风向角的增加具有不确定性。采用均匀风场评估高速列车在平原侧风环境中运行的安全性, 会高估侧风对列车运行安全影响的风险, 使得过低地限制列车的安全行驶速度, 从而影响列车的正常运行效率。建议采用大气底层边界速度型风场进行评估。

关键词: 高速列车; 均匀风; 大气底层边界速度型; 数值模拟; 气动特性

中图分类号: U266 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-8360.2011.04.004

Research on Influence of Characteristics of Cross Wind Field on Aerodynamic Performance of a High-speed Train

MAO Jun¹, XI Yan-hong¹, YANG Guo-wei²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Characteristics of the cross wind field, such as uniform winds and lower atmospheric boundary layer winds, have directly influence on the operation safety of high-speed trains which run in the cross wind environment. In order to accurately assess the effect of cross winds on trains running on plains, on the basis of the three-dimensional steady compressible flow of NS equations, using the SST $k-\omega$ two-equation turbulence model and finite volume method, the flow field and aerodynamic characteristics of the high speed train running at 350 km/h in the cross wind field of uniform winds and lower atmospheric boundary layer winds were simulated numerically and analyzed. The results show as follows: For a high-speed train running under cross winds on a plain, the aerodynamic lift force, lateral force and overturning moment acting on the train increase rapidly with increasing of the wind direction angle; when the train runs through the lower atmospheric boundary layer, compared to the uniform wind field, the pressure differences of the train at the top & bottom and on two sides are less, the lateral force and overturning moment are also less, and the aerodynamic lift force is of uncertainty in the case of increasing of the wind direction angle. Using the uniform wind field for evaluation of operation safety of high-speed trains running under cross winds on a plain will overestimate the risks cross winds may bring about in train operation and will over limit the train speed so that the normal train operation efficiency is affected. The lower atmospheric boundary layer winds are suggested to be used for evaluation of the aerodynamic performance of a train.

收稿日期: 2010-06-16; 修回日期: 2010-12-31
基金项目: “十一五”国家科技支撑计划“中国高速列车关键技术研究与装备研制”重大项目(GTYZ200902)
作者简介: 毛军(1966—), 男, 湖北公安人, 副教授, 博士。
E-mail: jmiao@bjtu.edu.cn

Key words: high-speed train; uniform wind; lower atmospheric boundary layer; numerical simulation; aerodynamic characteristics

列车在强侧风作用下气动特性的变化,特别是所受气动升力、侧向力和倾覆力矩的变化将影响列车运行的稳定性,列车脱轨、倾覆的可能性大大增加^[1-2]。由大风导致的事故在各国时有发生,对乘客的生命和财产构成严重威胁^[3]。国内外针对大风条件下高速列车的空气动力学性能开展了诸多数值模拟计算,验证了数值模拟的适用性^[4-5],并对侧风效应所引起的气动安全问题进行了深入分析^[6-7]。在计算和分析过程中,大多将侧风风场取为均匀风,这与实际的风场速度指数分布规律不符,不利于准确评估侧风下高速列车的安全性。最近,少数研究人员使用自然风风场即大气底层边界速度型风场研究了侧风作用于静止在桥梁上的列车和集装箱列车的气动荷载^[8-9]。采用大气底层边界速度型风场计算作用于时速 300 km 以上高速列车的气动荷载的文献则尚未见到。由于高速列车高速运行,其稳定性与侧风作用密切相关,因此,有必要精确计算侧风作用产生的气动荷载,以便为准确分析高速列车的轨道动力学性能、评估侧风对高速列车安全运行的影响以及确定高速列车在大风条件下的限速提供基础依据。本文以某型高速列车在平原上运行为例,根据其真实外形和细部结构建模,分别采用相同标准风速的均匀风和大气底层边界速度型风场,对高速列车以时速 350 km 在不同侧风中运行时的外流场以及受到的气动力进行计算和分析。

1 数值模拟方法的适用性验证

为了确定数值模拟方法对高速列车侧风效应分析的适用性以及检验数值模拟的准确性,在中国空气动力研究与发展中心的 8 m × 6 m 风洞中进行了缩尺模型实验(图 1),并与缩尺模型实验的数值模拟结果进行了对比分析。

模型列车为 3 列编组,缩尺比例为 1:8,几何尺寸为 9 516 m × 0.369 m × 0.486 m,外形复杂程度与实车相同。风洞中地板中间有一直径 7 m、可旋转的转盘。转盘可改变来流与固定在转盘上的模型列车纵向之间的夹角——气流夹角,其他为固定部分。用于模拟地面效应的轨道、路基贯穿列车底部,并伸出头、尾车各 2.5 m。来流速度和气流夹角可变,进行了不同来流速度和不同气流夹角的若干工况的模型试验。

模型试验中,来流均匀,速度为 60 m/s,湍流强度为 0.1%,气流夹角有 3°、6°等。测定了升力系数 C_L ,阻力系数 C_D ,侧向力系数 C_C ,俯仰力矩系数 C_{ma} ,侧偏力矩系数 $C_{m\alpha}$ 等气动力系数。有关空气压力、力和力矩的系数定义为:



图 1 列车缩尺模型及 8 m × 6 m 风洞

$$\text{压力系数: } C_P = \frac{p - p_0}{q_\infty}$$

$$\text{阻力系数: } C_D = \frac{F_x}{q_\infty S}$$

$$\text{升力系数: } C_L = \frac{F_y}{q_\infty S}$$

$$\text{侧向力系数: } C_C = \frac{F_z}{q_\infty S}$$

$$\text{倾覆力矩系数: } C_{la} = \frac{M_x}{q_\infty S b}$$

$$\text{侧偏力矩系数: } C_m = \frac{M_y}{q_\infty S b}$$

$$\text{俯仰力矩系数: } C_{ma} = \frac{M_z}{q_\infty S c_a}$$

式中, $q_\infty = \rho v_\infty^2 / 2$, 为动压, ρ 为来流密度, 取 1.225 kg/m^3 , v_∞ 为来流速度; p_0 为大气压力值, 环境温度约为 15°C , 大气压力取 $101\,325 \text{ Pa}$; p 为绝对压力值; S 为参考面积, 本试验中 $S = 0.175 \text{ m}^2$; F_y 为升力; F_x 为阻力; F_z 为侧向力; M_z 为俯仰力矩; M_y 为侧偏力矩; M_x 为倾覆力矩; c_a 为纵向参考长度, $c_a = 2.188 \text{ m}$; b 为横向参考长度(轮对两侧接触斑间距), $b = 0.188 \text{ m}$ 。

在完成模型试验后,对相应模型试验的诸多工况的气动性能进行了数值模拟。使用主流 CFD 软件 STAR-CCM+ 在服务器上进行大规模并行计算,得到了相应的气动力系数。

模拟计算的几何模型与模型试验的相同,计算域尺寸为 $16 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 6 \text{ m}$,如图 2 所示。使用 Trim 网格,模型列车周围的局部区域、列车尾部的尾流区域、列车的背风侧区域等均加密网格。近壁面区采用壁面函数法,壁面雷诺数 $y^+ = 30 \sim 100$ 。列车壁面和地面的边界层均设 6 层,共 4.86 mm ,近壁面第一层网格到壁面的距离均为 0.3 mm 。总的网格数量约 6000 万。来流设定为均匀来流,采用 RANS 方法,湍流模型选择改进的剪切应力输运 SST $k-\omega$ 模型,该模型曾成功地应用于壁面约束流动和自由剪切流动,描述近壁面自由流具有相当精确性^[10]。扩散项使用二阶中心差分格式,为了便于调节计算收敛,对流项首先

使用一阶迎风格式进行离散,之后再采用二阶迎风格式进行离散,方程参见文献[11]。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,用迭代法修正压力。

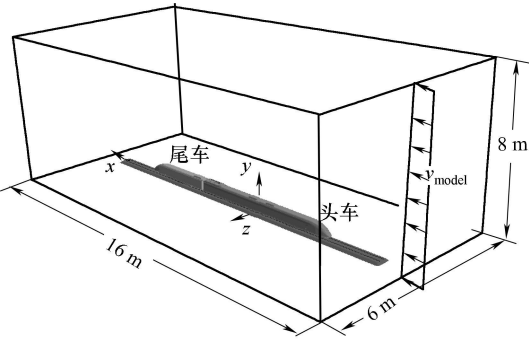


图 2 列车模型及数值模拟的计算域

将模型试验与数值模拟的结果进行对比,受篇幅限制,现只列出来流速度 v_{model} 为60 m/s,气流夹角为 3° 和 6° 条件下的数据,参见表1。

由表1可知,头车和中车的数值模拟与模型试验的气动力及力矩系数的误差为10%左右,在工程误差允许范围之内;尾车的略大一些。存在误差的原因主要有:①列车模型与数值模拟的几何模型之间存在几何误差;②数值模拟的侧风风场设定为均匀风,而模型试验中未完全按照均匀风送风;③接触式测量误差。由于气流速度较高,侧偏角很小,模型实体与数值几何模型的细小差别可能导致列车特别是尾车的横向气动力存在较大误差。

可见,数值模拟与模型试验的结果之间存在合理误差,数值模拟方法对分析气动性能是适用的。

表 1 缩尺模型试验与其数值模拟结果的对比

气流 夹角	作用力 系数	头车			中间车			尾车			整车		
		试验值	模拟值	误差/%	试验值	模拟值	误差/%	试验值	模拟值	误差/%	试验值	模拟值	误差/%
3°	C_D	0.1588	0.1596	0.50	0.1689	0.1797	6.39	0.1741	0.1534	11.89	0.5018	0.4927	1.81
	C_L	0.0525	0.0590	12.38	0.0768	0.0848	10.42	0.1040	0.112	7.69	0.2333	0.2548	9.64
	C_C	0.2374	0.2611	9.98	0.073	0.067	8.22	-0.05	-0.06	20.00	0.2604	0.2681	2.96
	C_{la}	-0.0053	-0.0058	9.43	0.0099	0.0095	4.04	-0.0017	-0.0014	17.65	0.0029	0.0023	20.69
	C_m	-0.5352	-0.582	8.74	-0.1327	-0.146	10.02	-0.2175	-0.2019	7.17	-0.8854	-0.9299	5.03
	C_{ma}	0.1222	0.1302	6.55	-0.199	-0.217	9.05	-0.2377	-0.2188	7.95	-0.3145	-0.3056	2.83
6°	C_D	0.1741	0.1688	3.04	0.1864	0.2083	11.75	0.1895	0.1893	0.11	0.55	0.5664	2.98
	C_L	0.2268	0.2454	8.20	0.2774	0.2822	1.73	0.223	0.2447	9.73	0.7272	0.7723	6.20
	C_C	0.506	0.539	6.52	0.1963	0.1788	8.91	-0.016	-0.0178	11.25	0.6863	0.7000	2.00
	C_{la}	-0.0122	-0.013	6.56	0.0302	0.028	7.28	-0.0007	-0.0011	14.29	0.0173	0.0139	17.92
	C_m	-1.072	-1.17	9.14	-0.236	-0.254	7.63	-0.4386	-0.4624	5.43	-1.7466	-1.8864	8.00
	C_{ma}	0.147	0.136	7.48	-0.089	-0.082	7.87	-0.153	-0.1404	8.24	-0.095	-0.0864	9.05

2 高速列车侧风效应的数值模拟计算

在确定了数值模拟方法的适用性之后,针对我国在线运营的某型高速列车,对其在平原上运行的侧风效应进行如下数值模拟分析。

2.1 计算模型与条件

由于列车中部截面不变,缩短的模型不改变列车流场结构的基本特征^[12],因此,采用3辆车编组,即头车+中间车+尾车,长度分别为26 m、25 m和26 m,列车宽度为3 m,高度为3.9 m,考虑转向架、受电弓等细部结构,头车和尾车均为流线形。主要计算条件和工况如下:

(1) 列车车速350 km/h(97.22 m/s);侧风分别采用大气底层边界速度型和均匀风,在气象上10 m高度处的风速均为25 m/s;侧风风向角分别为 30° 、 60° 和 90° ;大气底层边界速度型按照参考文献[13]确定。

(2) 列车以350 km/h的速度在25 m/s的侧风风场中运行时,在不同的侧风风向角下,合成速度接近或超过1/3音速,因此,流动按三维、黏性、可压缩流动考虑,流动的控制方程见参考文献[14]。

(3) 采用相对运动条件模拟列车附近的外流场。设定列车静止,地面移动,空气来流以与列车运行速度反向等值的速度 v_t 绕流列车,侧风以速度 v_w 吹向列

车。主流方向空气来流的速度是 v_t 与 v_w 的合成速度 v , 速度三角形如图 3 所示。

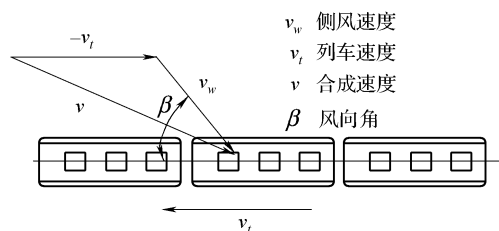


图 3 速度三角形

计算中设定平行于列车方向的主流风速为 $v_{mx} = v_t + v_w \cos \beta$, 垂直于列车方向的横风风速为 $v_s = v_w \sin \beta$ 。速度单位均为 m/s 。

2.2 计算域及网格划分

参考文献[15]给出的计算域如图 4 所示。与模型试验的数值模拟相似, 采用 Trim 网格。在车体表面及地面处利用壁面函数法。列车壁面和地面的边界层均初步设置为 6 层, 厚度 4.86 mm , 近壁面第一层网格到壁面的距离为 0.3 mm 。在模型试验的数值模拟中, 计算域边界包含隧道固体壁面, 壁面附近设置了边界层; 而在原型数值模拟中, 只有地面和列车表面是固体壁面, 计算域的边界不是固体壁面, 且远离列车区域的参数变化很小, 网格可以进一步稀疏, 所以原型数值模拟中的网格数量约为 3 000 万仍可取得良好的计算结果。为了提高计算效率, 继续优化了网格划分。由于减少边界层层数将大量减少网格数量, 且采用壁面函数法时, 壁面附近的划分网格只需将第一个内节点布置在对数律区域即湍流充分发展区内即可, 因此, 列车表面和地面的边界层均设 3 层, 厚度 2.925 mm , 近壁面第一层网格到壁面的距离均为 0.3 mm , 计算区域的网格总数约为 1 700 万。在尾流、列车表面和受电弓等流场变化大的区域进行加密, 如图 4 和图 5 所示。加密区域和非加密区域的网格最小单元尺寸分别为 0.1 m , 0.2 m 。计算表明, 收敛性很好, 监测点参数的脉动值控制在 5% 以下。

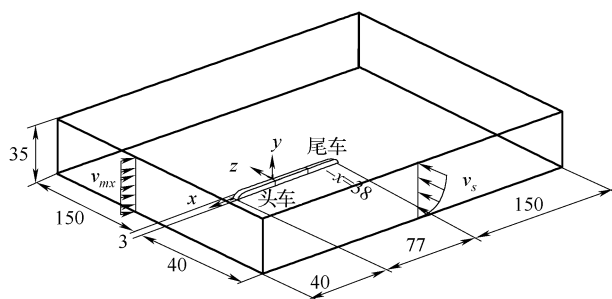
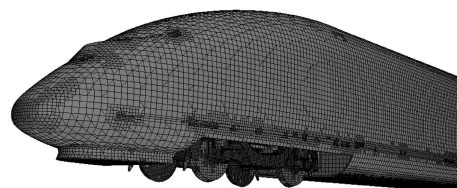
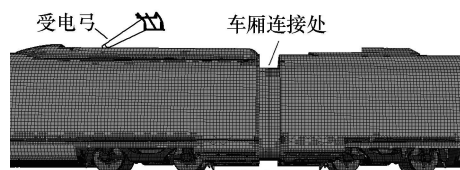


图 4 计算域及大气底层边界速度型风场



(a) 头车



(b) 连接处

图 5 列车网格划分的局部区域

2.3 边界条件

由图 3 及图 4, 边界条件设定如下:

(1) 计算域流动入口。使用速度边界条件: 若侧风为均匀风, 则 $v_w = 25 \text{ m/s}$; 若侧风为大气底层边界速度型, 则 v_w 由高度方向(沿 y 轴)的指数分布律给定, 即: $v_{wy}/v_{wy0} = (y/y_0)^{0.16}$, 其中, $v_{wy} = v_w$; $y_0 = 10 \text{ m}$; v_{wy0} 为 $y = 10 \text{ m}$ 处的侧风速度, 此处取 $v_{wy0} = 25 \text{ m/s}$ 。

(2) 计算域流动出口。使用恒压边界条件, 出口压力设为一个标准大气压。

(3) 列车表面。由于在列车表面存在边界层效应的影响, 故列车表面设定为有摩擦的壁面边界。

(4) 地面。采用移动地板法, 以消除地面效应的影响; 地面移动速度与计算域入口处的主流速度大小相等, 方向相同, 即 $v_g = v_{mx} = v_t + v_w \cos \beta$ 。

(5) 计算域上表面。由于选择的流场计算区域足够大, 可认为计算域的几何边界对列车周围流场的影响甚小, 故上表面设定为无摩擦的壁面边界。

3 计算结果及其分析

为了说明均匀风风场和大气底层边界速度型风场对高速列车气动性能的作用, 下面对列车周围及其表面的压力分布情况以及列车附近的涡流变化情况进行分析。

3.1 两种风场的压力场和流线谱的比较

(1) 侧风风场特征对压力场和流线谱的影响

图 6 和图 7 分别是典型条件下, 列车上 $x = -38 \text{ m}$ 横截面处(该处位于尾车, 离尾车鼻锥 12.58 m) 的压力云图及流线谱图。它们表明, 使用不同侧风风场计算所得到的压力场和流场均不相同, 而且还有出现明显差别的情况。

在压力场方面, 大气底层边界速度型风场中列车

迎风表面的正压区域面积和压力值均明显小于均匀风中的正压区域面积和压力值,而且正压区域在高度方向上的位置较高;列车背风表面的负压区域面积明显小于均匀风中的负压区域面积,但压力高于均匀风。列车顶部的迎风侧顶角 A_1 、 B_1 和 C_1 以及 A'_1 、 B'_1 和 C'_1 等区域呈明显的负压,且大气底层边界速度型风场的压力分别高于与其对应的均匀风风场的压力;列车底部的迎风侧顶角 A_2 、 B_2 和 C_2 以及 A'_2 、 B'_2 和 C'_2 等区域也呈负压,但与大气压比较接近。

在流场方面,在相同的侧风风向角下,迎风面上流动分流点的位置不同,大气底层边界速度型的分流点位置较高。虽然两种风场在列车背风面均产生 2 个不同大小的涡,但两种风场中涡的尺度和位置不同。均匀风的绕流比大气底层边界速度型的绕流有更早脱离车顶和车辆底部的趋势,均匀风产生的涡的尺度大于大气底层边界速度型,且影响距离列车车身更远,说明均匀风对车身绕流下游流动的影响比大气底层边界速度型的影响大。

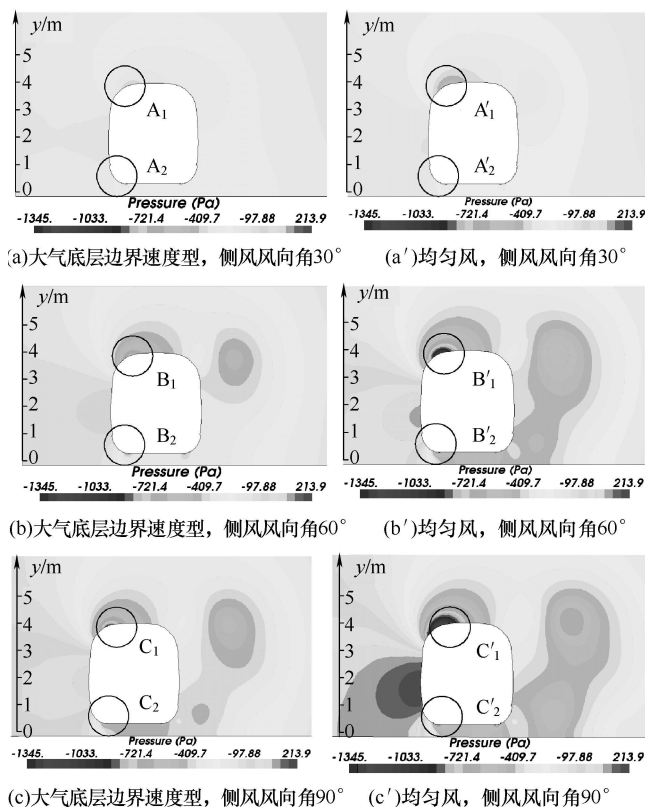


图 6 列车尾车在不同风场中的相对压力云图(侧风方向为从左到右)

(2) 侧风风向角对压力场和流线谱的影响

图 6 表明,两种风场中,在侧风与列车风耦合作用下,随着侧风风向角的变化,列车的迎风面、背风面、底部和顶部的相对压力分布也随之发生明显变化。侧风风向角越大,迎风面的压力越大,背风面的压力越小,

迎风侧顶角处的负压区就越明显,但大气底层边界速度型的不如均匀风的变化显著。侧风风向角越大,两者的压力云图的差异越大。

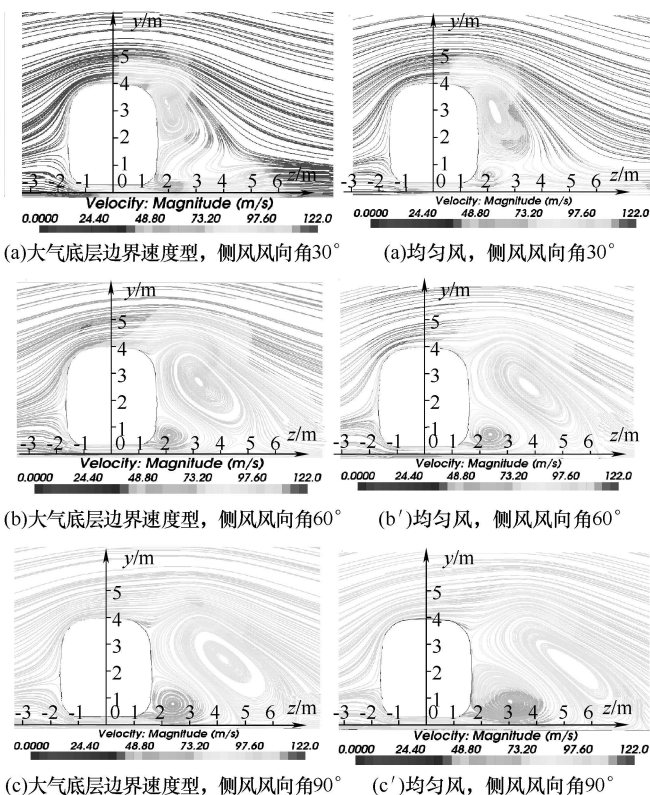


图 7 列车尾车在不同风场中的流线图(侧风方向为从左到右)

图 7 表明,两种风场中的速度分布在不同的侧风风向角下均发生变化。气流在列车背风侧生成涡旋并发展和分离,涡旋随侧风风向角的增大而增大。侧风风向角越大,产生的涡流越明显,涡的尺度越大,影响距离也越长。例如,当侧风风向角为 30° 时,靠近车顶处的涡均向下移动,在均匀风场中,靠近车底处的涡变化不大,而在大气底层边界速度型场中,靠近车底处的涡已经脱落;当侧风风向角为 60° 及 90° 时,列车无论是在均匀风场还是在大气底层边界速度型场中运行,靠近车顶及车底处的涡均向下移动,只是在均匀风场中的涡比在大气底层边界速度型场中更远离车体。

(3) 侧风风场特征对列车表面压力的影响

侧风风场不同,列车表面的压力分布不同,从而使得作用于列车的气动荷载也不同。

图 8 给出了两种风场中,尾车 $x = -38\text{m}$ 处横截面的列车表面的压力值对比曲线。在侧风风向角为 90° 时,在列车迎风面的流动分流点位置,压力达到最大值,且均匀风场中的最大正压值比大气底层边界速度型的高出 182.33 Pa。在各侧风风向角下,当距离地面 3.25 m 左右时(列车高度为 3.9 m),在列车迎风侧

与顶部过渡区域的某点, 均匀风与大气底层边界速度型的压力相等, 且均为负压; 随着高度的增加, 压力继续下降, 而且大气底层边界速度型的压力高于均匀风的压力。在列车的背风面, 列车表面压力均为负压, 且均匀风的压力均小于大气底层边界速度型的压力。相同位置的最大压差可达 70.79 Pa, 最低压力值出现的高度位置随侧风风向角的不同而有所不同。在列车的顶部和底部, 大气底层边界速度型和均匀风的表面压力均为负压, 随位置和侧风风向角变化的趋势相同。但顶部的压力分布很不均匀, 最小压力出现在偏迎风面一侧距列车中心线约 0.8 m 的位置; 在各个侧风风向角下, 大气底层边界速度型的压力均高于相应的均匀风的压力, 最大相差 350.41 Pa; 越靠近背风侧, 这一相差值越小。而底部靠近背风面一侧的区域压力分布比较均匀, 在各侧风风向角下的大气底层边界速度型的风压均高于均匀风的风压, 最大相差 118.41 Pa。

列车中间车和头车的等截面段的表面压力变化趋势与列车尾部的等截面段的相似。

可见, 大气底层边界速度型与均匀风相比, 迎风面压力的变化幅度明显大于背风面压力的变化幅度, 底部压力的变化幅度则明显小于顶部压力的变化幅度。使用均匀风场会高估列车表面压力分布对列车气动力的不利影响的程度。

使用大气底层边界速度型和均匀风风场对列车侧风效应进行数值计算, 出现上述差异的原因是速度边界条件不同所致。大气底层边界速度型考虑了空气黏性切应力对速度分布的作用, 反映了实际风场的基本分布特征; 而均匀风则未考虑速度梯度, 仅存在于风洞测试环境中。速度边界条件的不同使得气体绕流列车的流场也不同, 且均匀风中的侧风空气流量大于大气底层边界速度型中的侧风空气流量, 从而引起列车表面压力分布的不同。

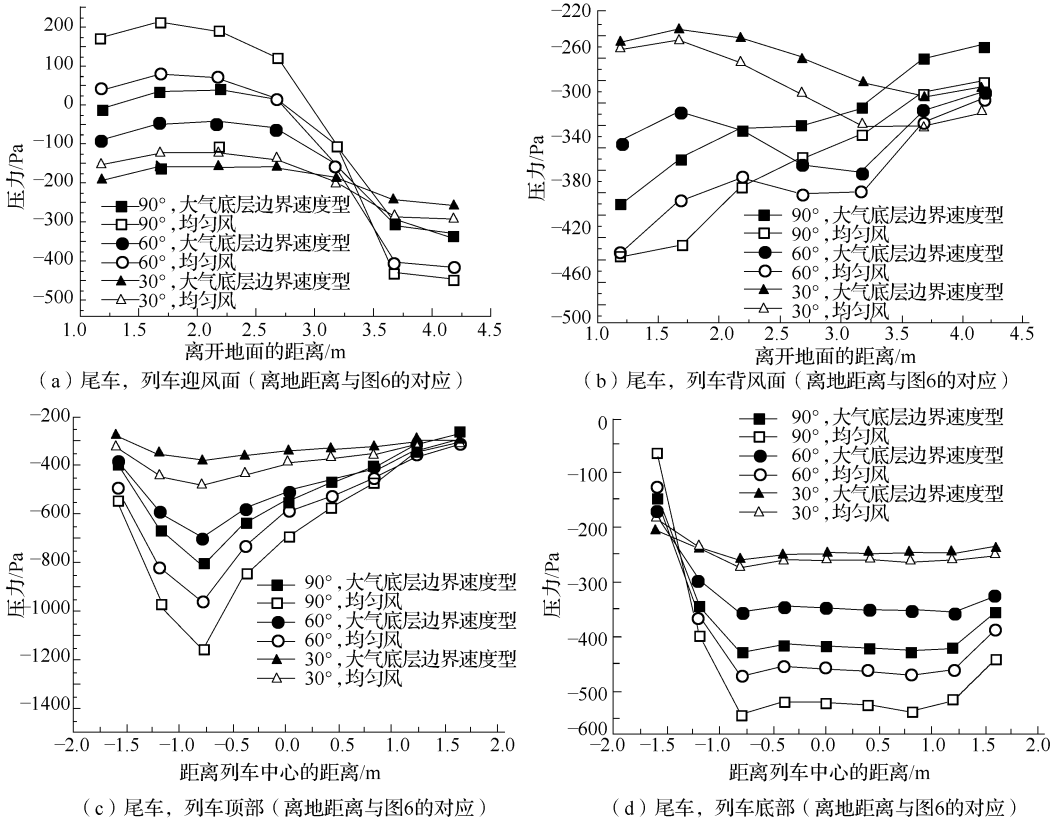


图 8 不同风场条件下的列车尾车表面相对压力变化曲线

3.2 两种风场的气动作用力性能比较

由上面的分析可知, 侧风特征——大气底层边界速度型和均匀风对高速列车的表面压力分布和周围流场的作用存在一定的差异。因此, 两种侧风风场产生的作用于列车的气动力也不相同。气动力的大小直接影响到列车在侧风环境下行驶的安全性, 升力 F_y 、侧向力 F_z 和倾覆力矩 M_x 是对列车的运行安全性最有

影响的三个物理量, 如图 9 所示。

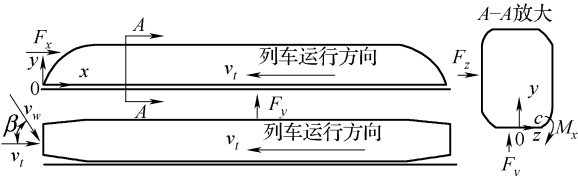
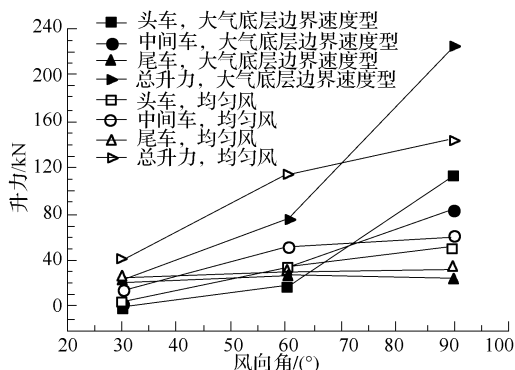


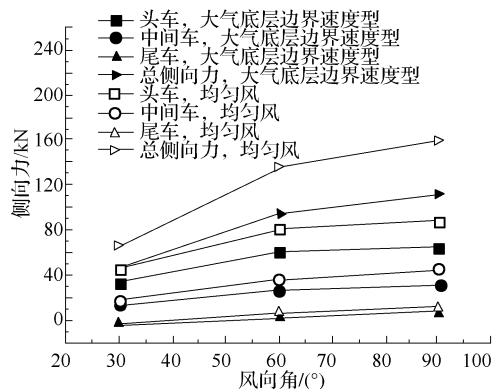
图 9 列车气动力分析图

本文定义的倾覆力矩是气动力对背风侧轨顶之矩(即对 C 轴取矩),顺时针为正,它是侧力与升力所产生的力矩之和。图 10 给出了在大气底层边界速度型和均匀风风场条件下,高速列车所受升力 F_y 、侧向力 F_z 和倾覆力矩 M_x 的对比情况。

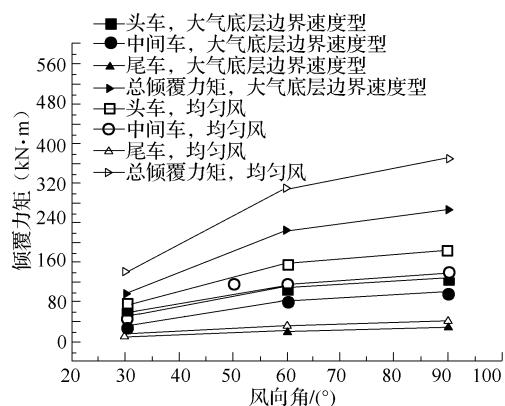
图 10 表明,无论侧风风场是大气底层边界速度型还是均匀风,列车整车所受的升力、侧向力和倾覆力矩都随侧风风向角的增加而增大,而且头车、尾车和中间车对整车受力的贡献并不相同。



(a) 空气升力与侧风风向角的关系曲线



(b) 空气侧向力与侧风风向角的关系曲线



(c) 倾覆力矩与侧风风向角的关系曲线

图 10 大气底层边界速度型与均匀风的气动力与侧风风向角的关系曲线

虽然这些力和力矩随侧风风向角的增加而增大,但增大的幅度和对侧风风向角的敏感程度并不相同,头车对侧风风向角最敏感,而尾车对侧风风向角最不敏感。两种风场中,列车所受的气动作用力相差比较明显。

由图 6 和图 8 可知,列车的上、下表面均为负压,且列车顶部的压力远小于列车底部的压力,经积分后形成向上的压差升力。由图 10(a) 可知,在大气底层边界速度型场中,侧风风向角小于 60° 时,尾车所受升力最大;侧风风向角为 60° 时,中间车所受升力最大;侧风风向角为 90° 时,头车所受升力最大。而在均匀风场中,侧风风向角小于 60° 时,尾车所受升力最大;侧风风向角大于 60° 时,中间车所受升力最大。侧风风向角不超过 60° 时,大气底层边界速度型风场中的整车总升力小于均匀风场中的总升力,最大相差 40.18 kN ;侧风风向角接近和达到 90° 时,在大气底层边界速度型场中的总升力超过了均匀风场中的总升力。

由图 6 和图 8 可知,随侧风风向角的增大,侧风产生的涡流更明显,由涡流引起的能量消耗占的比重增大,两侧压差变大,侧向力也随之增大。图 10(b) 表明,列车在两种风场中运行时,整车及各部分所受的气动侧向力均随着侧风风向角的增加而增大,均在侧风风向角为 90° 时达到最大。在侧风风向角小于 90° 的范围内,头车所受的侧向力最大,尾车的最小,中间车的居中。高速列车在大气底层边界速度型风场中运行时,无论是头车、中间车、尾车还是整车,所受侧向力均小于在均匀风风场中受到的侧向力,二者相差最高可达 47.27 kN 。

倾覆力矩是引起列车倾覆、脱轨的主要原因之一。图 10(c) 表明,列车在两种风场中运行时,整车及各部分所受的倾覆力矩均随着侧风风向角的增加而增大,均在侧风风向角为 90° 时达到最大。侧风风向角越大,引起列车倾覆脱轨的危险性越大。在侧风风向角小于 90° 的范围内,头车所受的倾覆力矩最大,最易发生倾覆和脱轨;尾车的最小,相对安全;中间车的居中。高速列车在大气底层边界速度型场中运行时,无论是头车、中间车、尾车还是整车,受到的倾覆力矩均小于在均匀风中的数值,整车的倾覆力矩相差最大可达 $107.61 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

表 2 给出了采用两种横风风场计算气动力值的差别程度。其中, F_{yj} 为列车在均匀风风场中受到的升力, F_{ye} 、 F_{ze} 和 M_{xe} 分别是列车在大气底层边界速度型风场中受到的升力、侧向力和倾覆力矩; ΔF_y 、 ΔF_z 和 ΔM_x 分别是按两种风场计算的升力、侧向力和倾覆力

矩的差值。从表中可以看到,若使用均匀风风场进行计算,在各种侧风风向角下,所得到的整车的及各节车的气动侧向力和倾覆力矩都偏高。若以更接近实际情况的大气底层边界速度型作为参照,列车整车的升力、侧向力和倾覆力矩偏高的百分数最高分别可达到

76.08%、41.59%、44.9%(30°侧风风向角),53.96%、41.83%、40.06%(60°侧风风向角),36.21%、42.5%、40.73%(90°侧风风向角)。如果据此对列车的侧风安全性进行评估,那么将高估列车在侧风中运行的不安全风险。

表 2 按大气底层边界速度型与均匀风计算气动力值的比较

侧风风向角	列车部位	F_{yj}/kN	F_{ye}/kN	$\frac{\Delta F_y}{F_{ye}}$	$\frac{\Delta F_z}{F_{ze}}$	$\frac{\Delta F_z}{F_{ze}}$	$\Delta M_x/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$\frac{\Delta M_x}{M_{xe}}$
30°	头车	4.47	0.47	848.47%	12.01	36.25%	21.87	39.93%
	中间车	14.22	4.59	209.77%	4.52	34.05%	17.28	52.90%
	尾车	24.77	20.79	19.11%	0.47	11.40%	3.74	38.94%
	整车	39.90	22.66	76.08%	18.94	41.59%	43.42	44.90%
60°	头车	35.02	18.63	88.0%	21.75	36.73%	46.77	41.46%
	中间车	51.81	33.19	56.07%	9.77	37.18%	32.30	38.36%
	尾车	30.21	25.74	17.34%	3.63	173.0%	7.30	29.42%
	整车	114.66	74.48	53.96%	39.87	41.83%	89.79	40.06%
90°	头车	51.70	112.79	54.16%	23.78	37.08%	53.89	41.26%
	中间车	60.37	84.20	28.31%	13.75	44.48%	37.68	37.82%
	尾车	32.19	24.80	29.81%	4.31	64.57%	12.29	41.94%
	整车	142.98	224.15	36.21%	47.27	42.50%	107.61	40.73%

4 结论

通过上述分析,可得到有关高速列车在平原上侧风环境中运行时气动性能评估的结论如下:

(1)在大气底层边界速度型与均匀风风场中,列车整车的升力均随侧风风向角的增加而增大。二者相比,当侧风风向角小于60°时,均匀风风场中的总升力较大;而当侧风风向角接近和达到90°时,大气底层边界速度型场中的总升力较大。

(2)在大气底层边界速度型与均匀风风场中,整车及各部分所受的气动侧向力均随着侧风风向角的增加而增大。无论是头车、中间车、尾车还是整车,列车在大气底层边界速度型中运行时受到的侧向力均小于在均匀风中的力。

(3)在大气底层边界速度型与均匀风风场中,整车及各部分所受的倾覆力矩均随着风向角的增加而增大,列车倾覆脱轨的危险性也增大;在侧风风向角小于90°的范围内,头车所受的倾覆力矩最大,最易发生倾覆和脱轨;无论是头车、中间车、尾车还是整车,所受的倾覆力矩均小于在均匀风中所受的倾覆力矩。

(4)采用均匀风场评估高速列车在平原侧风环境中运行的安全性,会高估侧风对列车运行安全的风险,使得过低地限制列车的安全行驶速度,从而影响列

车的正常运行和通行效率,建议采用更接近实际情况的大气底层边界速度型风场进行评估。

参考文献:

[1] FUJII T, MAEDA T, ISHIDA H. Wind-induced Accidents of Train/ Vehicles and Their Measure in Japan [R]. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, 1999, (1): 50-55

[2] ANDERSSON E, HAGGSTROM J, SIMA M. Assessment of Train-overturning Risk due to Strong Cross-winds [J]. J. Rail and Rapid Transit, Proc Instn Mech Engrs, 2004, 218, Part F: 213-223

[3] ORELLANO A, SCHODER M. On Side-wind Stability of High Speed Trains[J]. Vehicle System Dynamics Supplement, 2003, 40: 143-160

[4] CARRARINI A. Reliability Based Analysis of the Cross-wind Stability of Railway Vehicles[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95: 493-509

[5] 李雪冰, 杨征, 张卫华, 等. 强风中高速列车空气动力学性能[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(2): 66-73
LI Xue-bing, YANG Zheng, ZHANG Wei-hua, et al Aerodynamics Properties of High-speed Train in Strong Wind[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(2): 66-73

[6] 郝艳红, 毛军, 李明高, 等. 高速列车侧风效应的数值模拟[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(1): 14-18

XI Yan-hong, MAO Jun, LI Ming-gao, et al Numerical Study on the Crosswind Effects of High-speed Train [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(1): 14-18

[7] 任尊松, 徐宇工, 王璐雷, 等. 强侧风对高速列车运行安全性影响研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(6): 46-50

REN Zun-song, XU Yu-gong, WANG Lu-lei, et al Study on the Running Safety of High-speed Trains under Strong Cross Winds [J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(6): 46-50

[8] 高广军, 苗秀娟. 强横风下青藏线客车在不同高度桥梁上的气动性能分析[J]. 中南大学学报, 2010, 41(1): 376-380

GAO Guang-jun, MIAO Xiu-juan Aerodynamic Performance of Passenger Train on Different Height of Bridge of Qinghai-tibet Railway Line under Strong Cross Wind[J]. Journal of Central South University, 2010, 41(1): 376-380

[9] 蒋崇文, 陈智, 关雪梅, 等. 平原上不同长度集装箱列车横风载荷的数值研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(5): 18-24

JIANG Chong-wen, CHEN Zhi, GUAN Xue-mei, et al Numerical Study on Crosswind Loads of Container Trains in Different Length on Plain[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(5): 18-24

[10] 周立. 流线型地铁列车车头车设计及其气动性能分析[D]. 东南大学, 2006

[11] 周宇, 钱炜祺, 邓有奇, 等. $k-\epsilon$ SST 两方程湍流模型中参数影响的初步分析[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(2): 213-217

ZHOU Yu, QIAN Wei-qi, DENG You-qi, et al Introductory Analysis of the Influence of Menter's $k-\omega$ SST Turbulence Models Parameters[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 28(2): 213-217

[12] Khier W, Breuer M, Durst F Flow Structure Around Trains under Side Wind Conditions: a Numerical Study [J]. Computers & Fluids, 2000, (29): 179-195

[13] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. GB50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 72-73

[14] 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.

[15] Krajnovic, Sinisa 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.

(责任编辑 聂清立)

《铁道学报》被数据库收录情况

起始年份	收录系统名称
1985	《中文科技资料目录—铁路》、“中国铁路文献数据库”
1988	中国科技信息研究所“中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)”
1990	中国科学院文献情报中心“中国科学引文数据库(CSCD)”
1992	《中文核心期刊要目总览》铁路运输类核心期刊、中国科技信息研究所重庆分所“中文科技期刊数据库”(全文)
1994	清华大学“中国学术期刊(光盘版)”(全文)、“中国知网(CNKI)”(全文)、“中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)”
1995	美国工程信息公司“Ei page one”数据库
1996	中国科协《中国学术期刊文摘》(中文版)
1998	中国科技信息研究所“万方数据电子期刊”(全文)
1999	德国“国际建筑文献数据库(ICONDA)”
2000	美国“剑桥科学文摘(CSA)”
2001	俄罗斯文摘杂志(AJ)
2005	中国台湾华艺中文电子期刊服务数据库(CEPS)(全文)
2006	美国工程信息公司“Ei Compendex”数据库
2007	中国科协《中国学术期刊文摘》(英文版)