



CSTAM 2012-B03-0171

不同列车头型在横风条件下的非定常气动特性

姚远，姚拴宝，郭迪龙，杨国伟

中国科学院力学研究所

第七届全国流体力学学术会议

2012年11月12—14日 广西·桂林

不同列车头型在横风条件下的非定常气动特性¹⁾

姚远^{*, 2)}, 姚拴宝^{*}, 郭迪龙^{*}, 杨国伟^{*}

^{*}(中国科学院力学研究所, 北京海淀区 100190)

摘要 横风对于高速列车气动性能的影响显著, 不同头型在横风条件下的气动性能并不相同, 这在非定常条件下表现尤其突出。本文采用脱体涡模拟方法对于两种列车头型在不同横风条件下的非定常气动特性进行计算, 从计算结果可以看出, 列车在横风条件下的非定常受力系数振荡特性明显; 对比相同头型在不同横风条件下气动特性, 列车所受到的气动力与力矩系数会随着横风侧偏角的增大而一致恶化; 在相同横风条件下, 两种头型列车所受到的气动力与力矩系数的大小和振荡特性也有较大不同。列车在横风条件下的气动性能对于列车横风运行安全性影响重大, 因此可以为高速列车安全运行以及头型比选和优化提供重要参考。

关键词 高速列车, 侧偏角, 脱体涡模拟, 流场结构, 气动力与力矩系数

引言

现代高速列车与以往普通列车相比运行速度提高不少, 由此引起的一系列空气动力学问题必须加以特别考虑^[1]。高速列车在横风条件下的气动性能关系到列车运行的安全性, 因此成为列车空气动力学中一个重要的研究热点。在横风作用下, 不仅列车的各项气动特性会恶化, 而且还会影响列车的运行稳定性, 甚至导致列车倾覆^[2]。另外, 列车为了达到高效节能运行的目的, 需要不断减轻车身重量, 而这会进一步加大横风效应的影响^[1,3]。

过去对于高速列车气动特性的研究主要以定常流动作为基本假设, 但真实的列车流场是完全湍流流动, 具有明显的非定常特性。近些年相关的研究表明^[4-5], 尤其对于横风条件下的列车流场有必要进行非定常特性的研究。尽管现在对于横风条件下列车非定常气动特性的研究已经开始, 但大部分研究对象仅仅局限于简化模型。本文的计算模型来源于真实的列车外形, 经过的简化较少, 保留了列车的转向架、风挡等重要部件。因而可以反映接近真实的列车外形在横风条件下的非定常气动特性。在此基础上, 对不同头型进行参数化, 对比之间的非定常气动特性差异, 得出不同头型参数在横风条件下的影响。

1 几何模型与网格划分

本文主要针对列车头型的横风气动性能进行考察, 因此采用三辆编组的模型进行模拟, 而且对于受电弓和空调整流罩等附属结构并未考虑, 这些附属结构对于整个列车流场的影响

并不明显。列车的转向架和风挡对于列车流场和受力都有明显影响^[6], 为了尽量模拟真实列车的非定常流场和受力, 在几何模型中对转向架和风挡都予以保留, 如图1和图2。

本文选取流线型长度不同的两种列车头型进行对比分析, 两列模型除流线型外形不同以外其余参数基本相同和列车各部件完全一致。方案一头型的流线型长度为9m, 车身横截面积为11.2m², 方案二流线型长度为12m, 车身横截面积为11.12m², 按照相关文献^[7]的计算公式: $\lambda = L / \sqrt{S / \pi}$ (其中, L 为列车流线型长度, S 为列车横截面积) 计算所得到的两种头型方案的长细比分别为: 4.77和6.38。

计算外场区域大小以列车高度 H 作为特征长度, 入口距列车头部距离为 $22H$, 列车尾部距出口距离为 $43H$, 外场高度为 $11H$, 宽度为 $16H$ 。列车车轮距地面高度按照实际轮轨接触点到地面的高度确定, 如图3。

计算网格采用混合网格, 外流场内采用正交切体六面体网格, 如图4, 边界层网格为金字塔和三棱柱网格, 第一层边界层网格高度设置满足使用壁面函数的要求, 边界层网格共设置10层, 使不同网格间过渡更加平缓。由此两种模型各自的计算网格量为3000万左右。

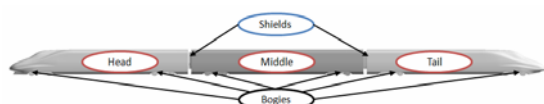


图1 方案一模型

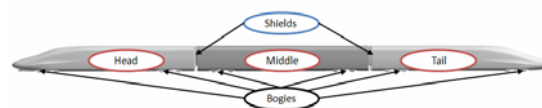


图2 方案二模型

1) 本文受到国家科技支撑计划项目 (NO.2009BAG12A03) 和 973 计划项目 (2011CB711101) 的资助。

2) Email: yaoyuan210@mails.gucas.ac.cn

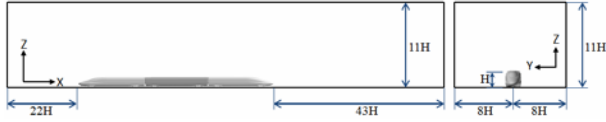


图3 流场计算区域尺寸

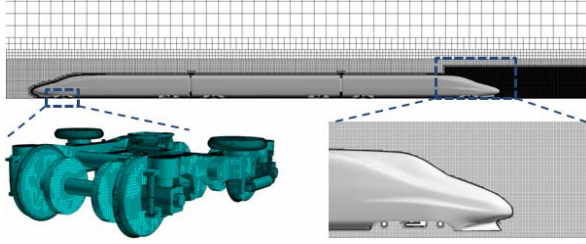


图4 计算网格

2 计算方法及边界条件

高速列车流场具有明显的非定常特性，目前计算流体力学中常用的非定常的计算方法包括直接数值模拟（DNS）、大涡模拟

（LES）、脱体涡模拟（DES）和非定常雷诺平均（URANS）。直接数值模拟（DNS）所要求的网格量和计算时间十分巨大，完全不能用于工程计算。大涡模拟（LES）能够较好地反映流场中大尺度的旋涡结构，提供较详细的流场瞬态信息，但计算所需要的网格量仍然很大，特别是在近壁面附近网格量要求很高^[8]。而非定常雷诺平均数值模拟（URANS）具有计算量小的优点，但很难准确模拟具有大分离的流动，如高速列车的尾流场，另外对于非定常的复杂流动也很难准确进行模拟，如振动和气动噪声等^[8]。

为了能够以现有的计算条件，较为准确地模拟高雷诺数、大分离的流动过程，Spalart 等人于 1997 年提出了脱体涡模拟（Detached-eddy simulation）方法。DES 是一种结合了 RANS 和 LES 优点的折中方法，其基本思想是通过模型内置开关，使得在近壁面附近采用 RANS 方法，用雷诺平均的湍流模型模拟近壁面处小尺度的脉动运动；而在远离壁面的区域，自动调整为亚格子模型，用 LES 方法来模拟脱体涡运动。通过这种根据当地网格自动调整的方法，既可以在边界层内发挥 RANS 方法计算量小的优势，又可以在远离物面的区域对大尺度的脱体分离涡进行较好的模拟。目前，比较常用的 DES 方法有两种：一种是基于 SA 湍流模型的 DES 方法；第二种是基于 SST 两方程模型的 DES 方法^[9]。本文采用基于 SST 两方程模型的 DES 方法。控制方程为非定常 N-S 方程，方程的离散采用有限体积法。对流项采用 Roe 格式进行离散，并加入限制函数提高差值的精度，粘性项采用二阶中心差分进行离散，时间项采用 LU-SGS 方法进行离散。非定

常计算时间步长取为 $5 \times 10^{-4} \text{s}$ ，内迭代步数为 10 步。

首先对于数值计算所采用的 SST $k-\omega$ 湍流模型进行说明，SST $k-\omega$ 湍流模型是被广泛应用的两方程湍流模型，其通过混合函数将 Wilcox $k-\omega$ 模型和 $k-\varepsilon$ 模型结合，对于分离流动和自由剪切流动都能进行很好的模拟。SST $k-\omega$ 模型的两方程为^[10]：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \omega)}{\partial x_i} = r \frac{\omega}{k} P_k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (2)$$

其中， ρ 为流体密度， U_i 为沿 i 方向的平均流速分量， k 为湍流运动的湍动能， P_k 表示湍动能的生成项，其定义为 $P_k = \tau_{ij} \partial U_i / \partial x_j$ ， τ_{ij} 为雷诺应力， ω 为湍流比耗散率， μ 为动力粘性系数， μ_t 为涡粘性，其定义为 $\mu_t = \rho k / \omega$ ， F_1 为混合函数， F_1 在边界层内是 1，模型为 $k-\omega$ 模型；而 F_1 在远离壁面的区域转换为 0，模型变为 $k-\varepsilon$ 模型。其余的 β^* ， β ， γ ， σ_k ， σ_ω 都是以上模型方程中的参数，他们每个都可以用 φ 来表示，若用 φ_1 表示原始 Wilcox $k-\omega$ 模型中的系数，用 φ_2 表示转化的 $k-\varepsilon$ 模型中的系数，则 SST 模型中的常数 φ 可表示为：

$$\varphi = F_1 \varphi_1 + (1 - F_1) \varphi_2 \quad (3)$$

其中 $k-\omega$ 模型中的各系数为：

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \beta_1 = 0.075, \beta^* = 0.09, \gamma_1 = 0.5532$$

转化后的 $k-\varepsilon$ 模型中的各系数为：

$$\sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{\omega 2} = 0.856, \beta_2 = 0.0828, \beta^* = 0.09, \gamma_2 = 0.4404$$

涡粘性系数定义为：

$$\nu_t = \frac{\alpha_i k}{\max(\alpha_i \omega, \Omega F_2)} \quad (4)$$

式中， Ω 是涡量的绝对值， $\alpha_1 = 0.31$ ， F_2 为第二混合函数，其可以表示为：

$$F_2 = \tanh \left[\max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{0.99 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right) \right]^2 \quad (5)$$

混合函数 F_1 定义为到最近壁面的距离 y 的函数：

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.99 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \quad (6)$$

式中， $CD_{k\omega}$ 代表了 $k-\omega$ 模型中的交叉扩散，其表达式为：

$$CD_{k\omega} = \max \left(2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-20} \right) \quad (7)$$

接下来介绍基于 SST 两方程湍流模型的 DES 方法，其基本思想是保持 SST 模型中的 ω 方程（式 2）不变，而在 k 方程（式 1）的耗散项中引入湍流尺度参数 $l_{k-\omega}$ ，由此模型 k 方程变为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = P_k - \frac{\rho k^{1.5}}{l_{k-\omega}} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (8)$$

$$\text{其中, } l_{k-\omega} = \frac{k^{0.5}}{\beta^* \omega}$$

在 DES 方法中，模型的长度尺度 $l_{k-\omega}$ 将由 DES 的尺度参数 $\min(l_{k-\omega}, C_{DES}\Delta)$ 来代替，其中 Δ 为网格单元的最大边长，即 $\Delta = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 。常数 C_{DES} 可以通过混合函数 F_1 得出：

$$C_{DES} = (1 - F_1) C_{DES}^{k-\varepsilon} + F_1 C_{DES}^{k-\omega}, \text{ 其中 } C_{DES}^{k-\varepsilon} \text{ 和 } C_{DES}^{k-\omega} \text{ 分别取为 } 0.61 \text{ 和 } 0.78^{[9]}。$$

经过以上模型的构造，在靠近物面的边界层内，由于 ω 值相当大，而湍流动能 k 值有限，此时 $l_{k-\omega}$ 远小于网格单元尺度，SST 两方程模型起作用，采用的是雷诺平均的算法。在远离壁面的区域， ω 值减小，当 $l_{k-\omega}$ 大于 $C_{DES}\Delta$ 时，模型就转换为大涡模拟的亚格子雷诺应力模型。

本文计算工况中列车运行速度最大值 $M > 0.3$ ，因此需要考虑空气的可压缩性。据此计算边界条件具体设置为：入口边界、出口边界和外场壁面均采用远场边界条件；为尽量模拟真实的列车流场特性，考虑列车与地面间的相对运动，地面采用移动壁面条件，其移动速度与列车运行车速相同。

3 计算工况

本文对于每种头型进行三种横风工况下的数值计算，三种工况条件下列车运行速度和横风风速各不相同，相应横风侧偏角也呈现不同。

表 1 计算工况

计算工况	运行速度 (km/h)	横风风速 (m/s)	侧偏角 (°)
工况一	400	15	7.7
工况二	350	20	13.5
工况三	160	30	34.0

4 计算结果与分析

列车在横风作用下，气动性能会显著恶化，导致列车运行安全系数和舒适性明显降低，而且伴随着流场的非定常特性，这种影响会更加明显。不同横风侧偏角和不同列车头型都会对列车在横风条件下的非定常气动性能产生重要影响，本文主要针对两种列车头型在不

同横风条件下的非定常气动性能展开对比分析，从中得出随着列车头型和横风侧偏角的不同对列车横风非定常气动性能的影响规律。

4.1 非定常流场分析

列车周围的流场特性是造成列车气动载荷的直接原因，下面首先对于两种列车在不同横风条件下的流场特性进行对比分析。图 5、图 6 和图 7 分别展示了两种头型列车在不同横风条件下的表面压力分布情况。从图中可以看出：鼻尖区域的驻点位置在横风作用下向迎风侧偏移，且由于风向偏转后，列车迎风面积增大，使得列车表面高压区范围比无横风时显著扩大；迎风侧列车表面压力较大，而在列车头部背风侧、车身顶部与迎风侧的拐角处以及尾车流线型表面存在明显的低压区。

在相同横风工况下，两种方案的表面压力分布呈现出明显差异，方案一列车流线型长度较短，流线型与车身过渡较剧烈，从而导致列车流线型表面压力分布变化剧烈，而流线型长度较长的方案二头型，由于流线型与车身过渡较为平滑，表面的压力分布也趋于平缓，这点可以从各方案流线型及车身表面的高、低压区强度中看出。

相同方案在不同横风条件下表面压力分布随着横风侧偏角的改变呈现一定的规律。以方案一为例，随着横风侧偏角的增大，流线型表面的高压区和低压区的强度和范围逐渐减弱和缩小，而车身表面的高压区和低压区则随着侧偏角的增大，强度不断加强，范围不断扩大。

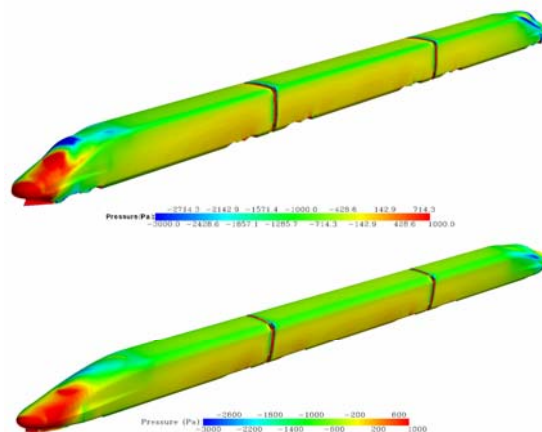


图 5 两方案在工况一条件下的瞬时表面压力分布

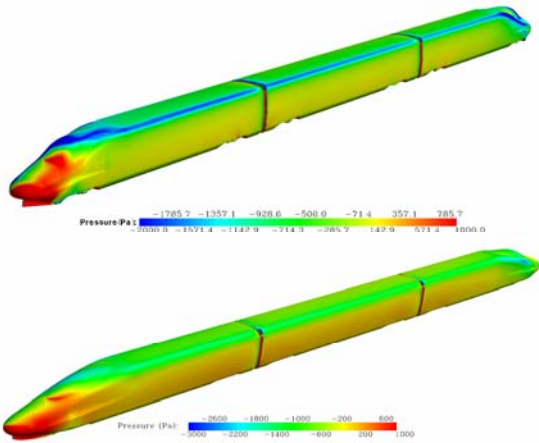


图 6 两方案在工况二条件下的瞬时表面压力分布

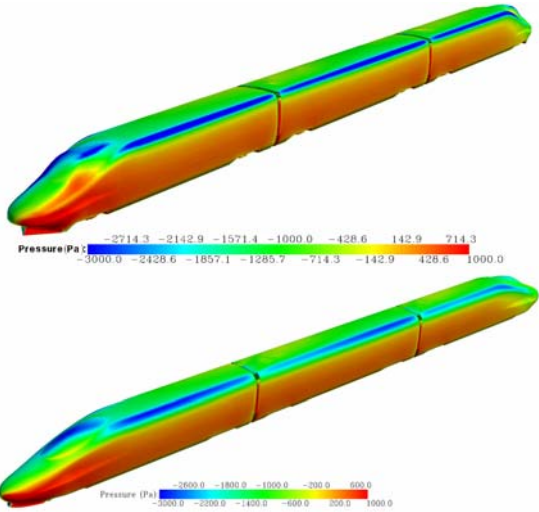


图 7 两方案在工况三条件下的瞬时表面压力分布

高速列车流场是具有大分离流动的湍流流场，列车表面的流动分离现象对于列车的气动载荷影响巨大。为了研究列车表面的流动分离与再附现象，下面对于列车流线型与车身的流线进行分析。图 8 和图 9 分别显示了两种头型方案在工况三条件下头尾车表面的瞬时流线情况。从图 8a 和图 9a 中可以看出，表面流线在两种列车流线型迎风区域都没有发生分离现象，而在流线型背风区域则可以看到明显的流动分离现象，头部流动分离主要发生在列车司机室前窗和车身顶部与背风侧转角处等曲率较大的部位。对比两种方案头车表面流线，方案二头型由于司机室前窗与流线型交接处过渡平滑，在此并没有产生流动分离，而在流线型上表面与侧面的拐角处出现分离线，而车身上的流动分离与再附线位置与方案一基本相同。

从图 8b 和图 9b 中可见，尾车表面的流线情况更加复杂，尤其是在尾车流线型部位形成多条分离线与再附线。在方案一尾车流线型与司机室前窗连接处，由于不平滑过渡，产生明显流动分离，并紧接着再附于列车司机室前窗

表面，在司机室前窗与流线型壁面交接处形成的分离线进一步与司机室前窗顶部形成的分离线在下游位置汇合，从而形成更大的流动分离现象，尾车表面的流动分离和再附现象并不仅仅发生在流线型上表面，在流线型两侧也出现多处流动分离线，有些流动分离线在列车鼻锥位置交汇形成流动分离点，从而在分离点处产生尾涡脱落现象。方案二尾车流线型由于前窗与周围壁面过渡更加平滑，并未在此产生流动分离与再附，尾车流线型顶部形成的分离线与列车侧面的分离线在下游汇合最终形成分离点，产生尾涡脱落。其余横风工况条件下的分离与再附现象与工况三相似，分离线和再附线的位置也基本相同，因此不再做说明。

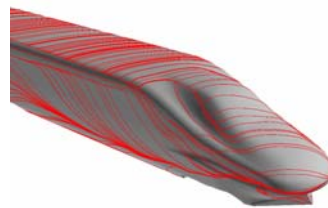


图 8a 头车瞬时表面流线

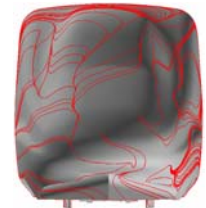


图 8b 尾车瞬时表面流线

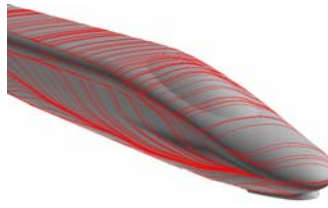


图 9a 头车瞬时表面流线

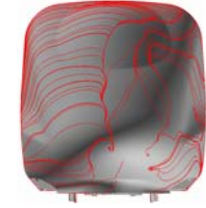


图 9b 尾车瞬时表面流线

横风条件下，在列车背风区域会产生多个大型旋涡结构，这些旋涡结构的脱落对于列车气动载荷的非定常振荡具有重要影响。图 10、图 11 和图 12 分别展示了两种模型在不同横风条件下的瞬时等 Q 值图。Q 值（Q 定义为： $Q = -1/2 \partial u_i / \partial x_j \partial u_j / \partial x_i$ ）作为速度梯度张量的二阶不变量，可以用于显示流场中旋涡结构的涡核位置。从图中可见，在强横风作用下，在列车背风侧形成了强度较大的涡系，尾流场的整体涡结构向背风侧偏移，横风侧偏角越大，尾涡系的侧偏角越大，背风侧的涡系对尾流的影响越严重，从而导致尾流场的结构也越复杂。对比不同横风条件下的流场结构可以发现，旋涡结构的形成位置基本都处于列车头部、尾部和风挡区域，而且旋涡结构的偏转角度与横风侧偏角并不一致。对比不同头型的流场结构可以看出在相同横风条件下，背风侧旋涡结构的形成位置和偏转角度都具有一定的相似性，尤其是形成于列车头部和中间风挡部位的旋涡结构的偏转位置、强度基本能够相互对应一致，而对于列车尾部的尾涡结构，两种方案间有一定差异，在不同横风条件下方案一头型的尾涡强度和范围都要强于方案二。



图 10 两方案在工况一条件下的瞬时流场结构

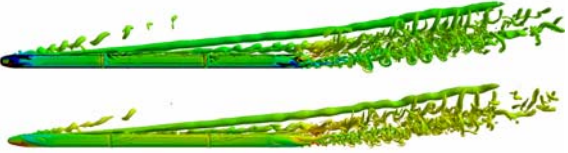


图 11 两方案在工况二条件下的瞬时流场结构

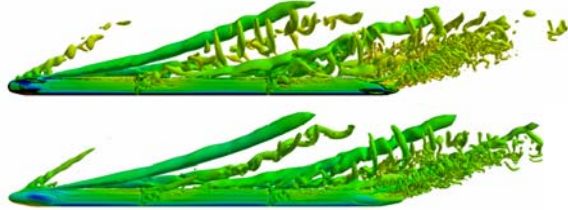


图 12 两方案在工况三条件下的瞬时流场结构

4.2 非定常气动载荷分析

强横风作用下，列车的气动性能会显著恶化，导致其运行安全性能和乘坐舒适性明显降低。高速列车周围流场的复杂非定常三维流动特性致使列车所受的气动载荷不可能收敛到一个定值，为此，本文提取物理时间为 0.5s~1.5s 时的气动载荷的时均值作为评估列车性能的参数。另外，文中的气动载荷数据均以无量纲系数的形式给出，无量纲所用到的主要参数包括：参考速度为列车运行速度，参考面积为列车的最大横截面积，参考长度为列车的车高（3.5m）。

经过非定常计算得出各节列车车厢的气动力系数和力矩系数。与无横风条件相比，横风条件下高速列车气动特性发生了显著的变化，首先中间车和尾车气动阻力的显著增大，导致三辆编组整车的气动阻力系数也明显增大，而且在所计算的横风工况下列车总的气动阻力系数会随着横风风速与侧偏角的增大而增加；其次，横风条件下列车各节车厢的气动升力系数均为正值，并且各节车厢的气动升力系数都会随着侧偏角和横风风速的增大而增加，这会对列车的安全运行造成不利影响。以上是根据计算结果分析了横风条件下列车所受气动阻力系数和升力系数的特点，由于横风侧偏角作用，对于列车所受气动侧向力系数的影响最为显著，图 13、图 14 和图 15 分别给出了不同横风工况下两种列车各车厢侧向力系数对比图表。从中可见，与无横风条件相比，横风条件下列车的侧向力系数明显增大，而且在各节车厢中头车的侧向力系数最大，侧偏角越大，头车的侧向力系数越大。对比不同头型的侧向力系数

分布可以看出，不同头型的头车侧向力系数在不同横风条件下相差较小，而尾车的侧向力系数差异较大，这与不同尾车外形导致列车尾流场不同，进而引起尾车表面压力分布不同有关，但从图 15 可见，随着横风侧偏角的增大这种差异逐渐被抹平。

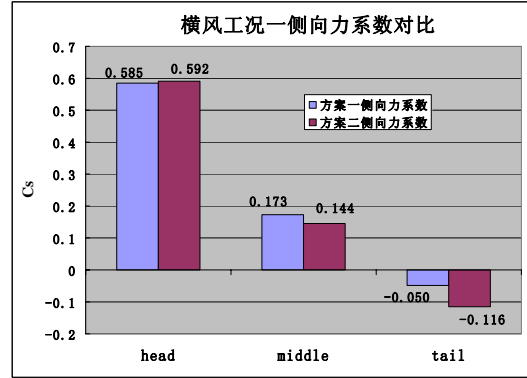


图 13 工况一 侧向力系数分布

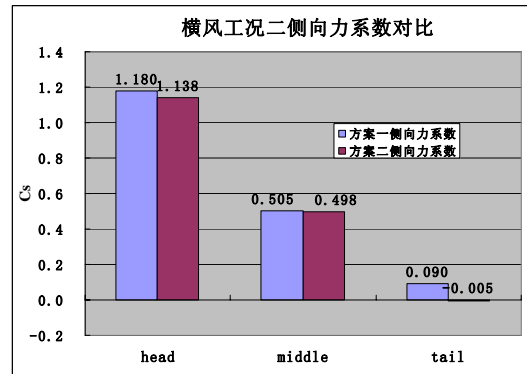


图 14 工况二 侧向力系数分布

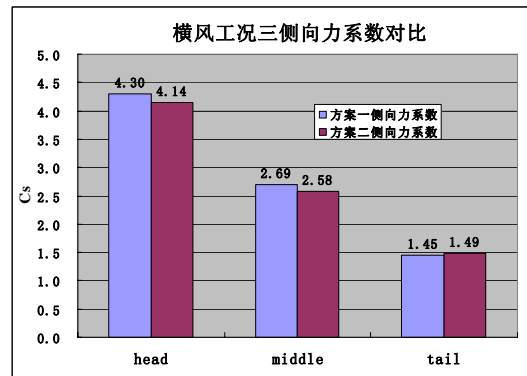


图 15 工况三 侧向力系数分布

在横风条件下，列车不仅受到的较大气动力系数的扰动，而且同时也受到严重气动力矩系数的作用，列车所受到的气动力矩系数按照方向不同可以分为倾覆力矩系数、俯仰力矩系数和偏航力矩系数，这其中倾覆力矩系数对于列车在横风工况下的运行安全性有着重要影响。图 16、图 17 和图 18 给出了不同横风工况下两种列车各车厢倾覆力矩系数的对比图表。从图中可以看出，在各种横风工况下，倾覆力矩系数都是头车最为严重，中间车次之，尾车

最小，并且随着横风侧偏角的增大，各节车厢的倾覆力矩系数的绝对值也逐渐增大，由此列车因横风效应而发生倾覆或脱轨事故的危险性也越高。对比不同头型间的差异，在横风侧偏角较小的工况一条件下，方案二头车的倾覆力矩系数大于方案一，而在横风侧偏角较大的工况二和工况三条件下，方案二头车的倾覆力矩系数小方案一，由此说明方案二头型在强横风作用下气动性能更好。另外，在两种头型方案各车厢的倾覆力矩系数分布中，尾车的倾覆力矩系数差异最大，因此对比不同头型间的差异，尾车的气动载荷会是重点分析对象。

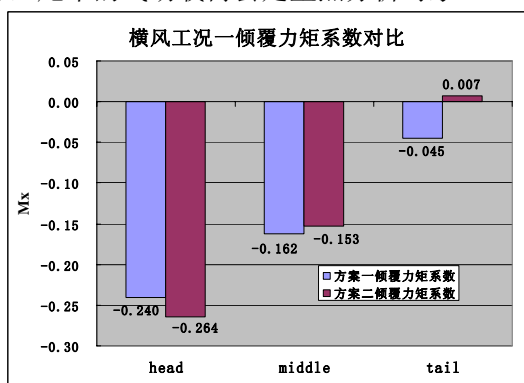


图 16 工况一两方案倾覆力矩系数分布

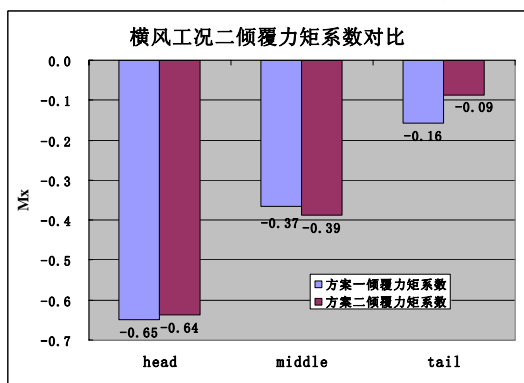


图 17 工况二两方案倾覆力矩系数分布

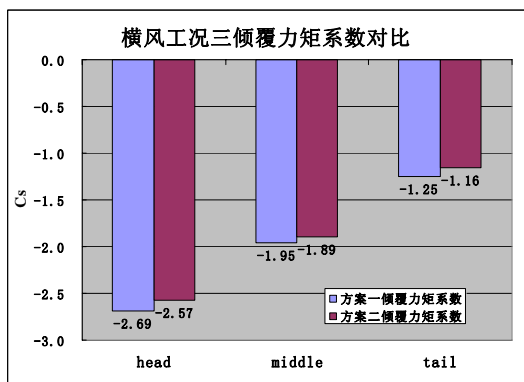


图 18 工况三两方案倾覆力矩系数分布

如前所述，在横风条件下，列车流场和气动载荷的非正常效应会更加显著^[1,4-5]。对列车在横风条件下所受到的非正常气动载荷进行分

析，一般较常用的分析方法包括时域分析和频域分析。下面就对两种方案在不同横风条件下的气动载荷在时域与频域上的特性进行分析。图 19、图 20 和图 21 分别显示了方案一尾车侧向力系数和倾覆力矩系数非正常振荡的时域和频域图。从图中可以看出，在不同横风工况下，尾车所受到的非正常侧向力系数和倾覆力矩系数的振荡幅值与时均值皆处于同一量级，由此可见列车的非正常特性是不能够忽略的。

对比同一方案尾车在不同横风条件下的非正常气动载荷特性可见，尾车所受非正常侧向力系数和倾覆力矩系数的振荡幅值会随着侧偏角的增大而不断增加，而非正常侧向力系数和倾覆力矩系数的振荡频率则随着侧偏角的增大而减小。尾车侧向力系数振荡的主频在不同横风条件下基本都处于 1Hz 左右，而倾覆力矩系数振荡的主频在前两种工况下基本集中在 1-5Hz 之间，而方案一尾车在工况一条件下，其倾覆力矩系数的主频会达到 23Hz。

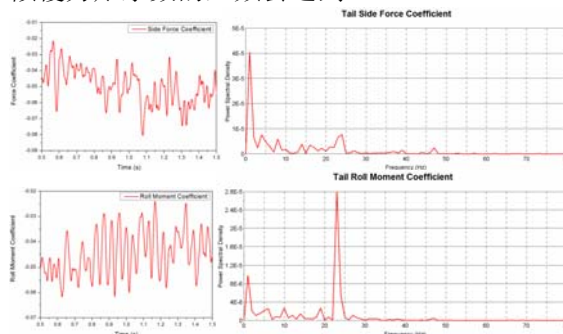


图 19 方案一在工况一下尾车侧向力系数和倾覆力矩系数时域与频域图

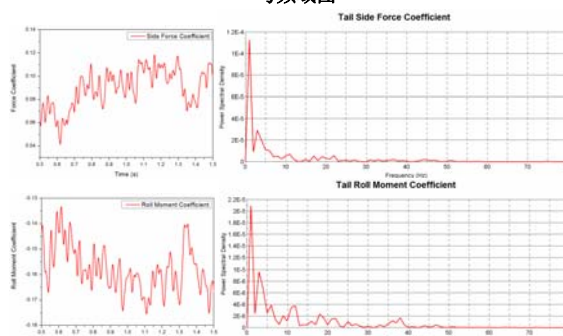


图 20 方案一在工况二下尾车侧向力系数和倾覆力矩系数时域与频域图

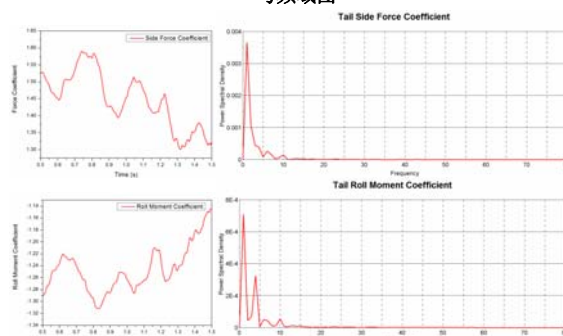


图 21 方案一在工况三下尾车侧向力系数和倾覆力矩系数时域与频域图

下面对比两种不同方案尾车侧向力系数和倾覆力矩系数的非定常振荡特性。图 22、图 23 和图 24 分别给出了方案二尾车侧向力系数和倾覆力矩系数非定常振荡的时域和频域图。从图中可以看出，方案二尾车侧向力系数和倾覆力矩系数振荡特性随横风侧偏角变化的规律与方案一基本相同。在不同横风条件下，方案二的侧向力系数和倾覆力矩系数振荡的幅值都小于方案一，由此可知方案二头型所受到的非定常效应的影响相对于方案一头型较小，在横风条件下的气动性能更优，这与方案二头型流线型长度更长、长细比更大有关。方案二尾车侧向力系数和倾覆力矩系数的振荡主频基本处于 1-5Hz 之间，这与方案一尾车的振荡频率特性较为一致。

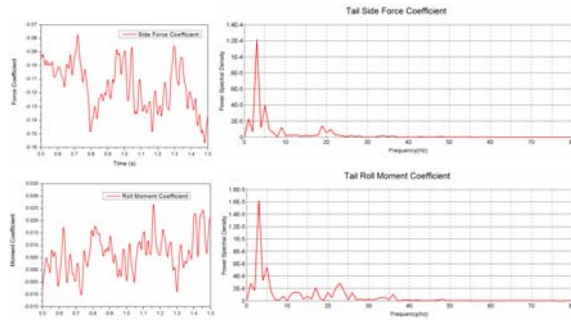


图 22 方案二在工况一时尾车侧向力系数和倾覆力矩系数时域与频域图

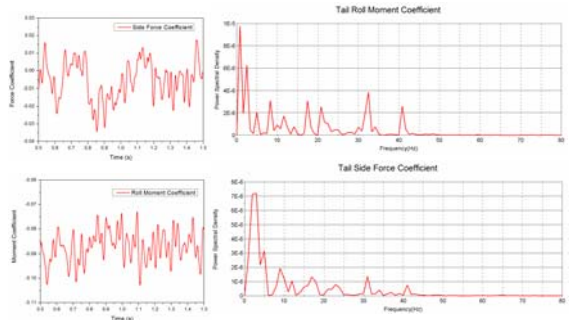


图 23 方案二在工况二时尾车侧向力系数和倾覆力矩系数时域与频域图

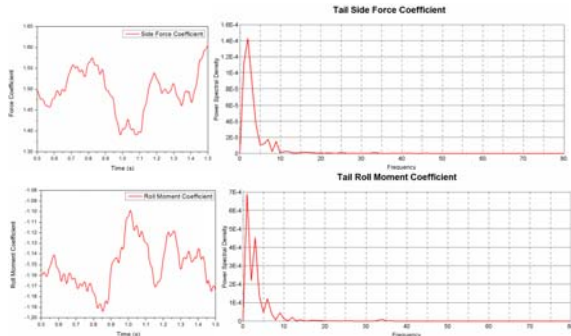


图 24 方案二在工况三下尾车侧向力系数和倾覆力矩系数时域与频域图

5 结论

本文针对两种列车头型在不同横风条件下的非定常气动特性，利用脱体涡模拟方法 (DES) 进行了数值计算，通过对于两种头型非定常流场和气动载荷的分析，可以得出如下结论：

在横风条件下，列车背风侧形成多个涡系，横风速度和侧偏角越大，列车周围流场结构越复杂，背风侧流场对尾流场的影响也越严重。由头车鼻锥和风挡位置形成的涡系发展到尾流区，并与尾涡系发生强烈的相互作用，导致尾流场的复杂程度明显高于无横风时的情况。

在横风条件下，高速列车所受到的气动载荷发生了显著的变化。首先由于中间车和尾车气动阻力的增大，导致整车的气动阻力系数明显增大；横风条件下，列车各节车厢的气动升力系数均为正值，这对列车的安全运行造成不利影响；列车的侧向力系数明显增大，其中头车的侧向力系数最大，并且随着侧偏角增大，头车的侧向力系数也逐渐增大；横风作用也使得列车受到较大的气动力矩作用，其中头车所受力矩系数最大，而且随着侧偏角越大，头车的气动力矩系数的绝对值越大，列车因横风作用发生事故的危险性也越高。

在横风条件下，列车流场和气动载荷的非定常效应会更加显著。从计算的结果可以看出，两种方案列车在不同横风条件下气动力与力矩系数的非定常振荡幅值与时均值都在同一量级，由此列车在横风条件下的非定常特性需要特别考虑。

经过对于两种不同头型方案流场和气动载荷的对比分析，在横风条件下，两方案的流线型外形不同是导致列车流场特性和所受气动载荷不同的主要原因，流线型外形对于非定常气动特性的影响主要表现在气动载荷的振荡幅值上。据此，可以通过优化列车流线型外形达到改善列车非定常气动特性，进而增强列车横风运行安全性的目的。

参考文献

- Schetz J A. Aerodynamics of high-speed trains. Annual Review of Fluid Mechanics 33(2001): 317-414.
- Diedrichs B. Aerodynamic calculations of crosswind stability of a high-speed train using control volumes of arbitrary polyhedral shape. BBAA VI

- International Colloquium, Milano, Italy, July, 20-24, 2008.
- 3 Diedrichs B. Study of two aerodynamic effects on high-speed trains: crosswind stability and discomforting car body vibration inside tunnels [Dissertation], Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2006.
- 4 Sanquer S, Barre C, Marc Dufresne de Virel, et al. Effect of cross wind on high-speed trains: development of a new experimental methodology. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92(2004): 535-545.
- 5 Hemid H, Krojnovic S. LES study of the influence on the nose shape and yaw angle on the flow structure around trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98(2010): 34-46.
- 6 梁习锋, 舒信伟. 列车风挡对空气阻力影响的数值模拟研究. *铁道学报*, 25(2003), 1: 34-37.
- 7 张健. 高速列车动车头型风洞试验研究. *流体力学实验与测量*, 11(1997), 2, 85-89.
- 8 Spalart P R. Detached-eddy simulation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 41(2009):181-202.
- 9 Strelets M. Detached eddy simulation of massively separated flow. *AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit*, Reno, January, 8-11, 2001, No. AIAA-2001-879.
- 10 Menter F R, Kuntz M, Langtry R. Ten years of industry experience with the SST turbulence model. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*, Antalya, Turkey, October, 12-17, 2003.

THE UNSTEADY AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF HIGH-SPEED TRAINS WITH DIFFERENT LOCOMOTIVE SHAPES UNDER CROSSWIND CONDITIONS

Yao Yuan¹ Yao Shuanbao¹ Guo Dilong¹ Yang Guowei¹

(1 Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)

Abstract The aerodynamic characteristics of high-speed trains are significantly impacted by the crosswind effect. Under the crosswind conditions, the unsteady aerodynamic characteristics of high-speed trains with different locomotive shapes are different. In this paper, the Detached-eddy simulation (DES) is employed to explore the influence of two different locomotive shapes on the unsteady aerodynamic characteristics of high-speed trains under the crosswind conditions. The calculated results show that the unsteady oscillation characteristics of train aerodynamic loads are significant and can't be ignored under the crosswind conditions. Furthermore, under the different crosswind conditions, the aerodynamic loads of trains are deteriorated with the increasing of yaw angles. On the other hand, even under the same crosswind condition, the magnitudes and unsteady oscillation characteristics of aerodynamic loads of two trains with different locomotive shapes are various. The aerodynamic characteristics of high-speed trains under cross wind conditions have a great influence on the safety operation. Therefore, the results can provide a reference for the safety operation and further optimization of high-speed trains.

Key words high-speed trains, yaw angles, Detached-eddy simulation (DES), flow structures, aerodynamic forces and moments