

列车绕流的瞬态与稳态数值模拟对比

刘业博¹, 刘志明¹, 姚拴宝²

(1. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘要: 采用大涡模拟 (Large Eddy Simulation, LES) 和基于雷诺平均 (Reynolds Average Navier-Stocks, RANS) 的 SST (Shear Stress Transport) $k-\omega$ 湍流模型, 分别对高速列车单车明线运行进行瞬态和稳态的仿真计算, 通过与实车测试数据比较对数值模拟进行了验证. 对比分析 LES 和 RANS 的计算结果发现: 对于车头表面测压点, LES 和 RANS 都能给出高精度的计算结果, 且 LES 的瞬态计算结果表明, 表面压力最大值在一个很宽的范围波动; 对于列车绕流结构, LES 较 RANS 表现出更强的小尺度涡的捕捉能力, 尤其表现在复杂的尾流区; 通过气动力系数的傅里叶变换分析了波动的频域特性. LES 在较复杂列车模型外流场模拟中的高计算精度, 及其广泛的结果信息可以为列车的系统耦合设计提供可靠的数据参考.

关键词: 计算流体力学; 列车空气动力学; 大涡模拟; 非定常流动

中图分类号: U238 文献标志码: A

Comparison of unsteady and steady simulations of the flow around trains

LIU Yebo¹, LIU Zhiming¹, YAO Shuanbao²

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

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

Abstract: The air flow around high-speed trains is usually defined as three-dimensional, unsteady turbulent, for which the transient characteristics are important. Large Eddy Simulation (LES) and Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) with SST (Shear Stress Transport) $k-\omega$ turbulent model were used to perform the transient and steady simulations, respectively and the results were verified with full-scale experimental data. Comparison results of LES and RANS show that they both give accurate results for the tapping pressure points on the head of the train. The transient results of LES indicate that the maximum surface pressure fluctuates in a wide range. LES shows more reliable ability in capturing the small scale vortex structure than RANS with regard to visualizing the flow structure, especially in the wake flow. High accuracy of LES method in aerodynamic simulations under slightly complex train model, as well as its comprehensive results can provide reliable reference for the coupling system design of the train.

Key words: computational fluid dynamics; train aerodynamics; large eddy simulation; unsteady flow

列车空气动力学的研究方法有在线实车试验、
动模型试验、风洞试验、理论分析和数值模拟等^[1].

其中数值模拟, 即计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 因其高效而低成本的优势在地

收稿日期: 2013-10-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1134201)

作者简介: 刘业博 (1984—), 女, 河北石家庄人, 博士生. 研究方向为气动载荷下的结构强度. email: 09116312@bjtu.edu.cn.

面交通工具的空气动力学研究中得到了广泛应用^[2-4]. Gaylard^[4]在1993年就通过对比CFD计算结果和试验结果肯定了CFD在列车空气动力学中的应用前景.

列车绕流一般定义为充分发展的湍流. 现有的湍流数值模拟方法有直接数值模拟(Direct Numerical Simulation, DNS), 大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES), 雷诺平均方法(Reynolds Average Navier-Stocks, RANS)和脱体涡模拟(Detached Eddy Simulation, DES). 其中, RANS方法是将流动的质量、动量和能量输运方程进行统计平均后建立模型, 不需要计算各种尺度的湍流脉动, 因而不需要过高的空间分辨率, 计算工作量小, 在工程计算中得到广泛的应用. 为了闭合RANS方程, 必须引入不同的湍流模型. 在列车空气动力学的数值模拟中, 湍流模型多采用雷诺应力模型(Reynolds Stress Model, RSM)和两方程模型 k_ε ^[1]. Khier和Breuer^[5]等利用 k_ε 模型对列车在侧风风场下的流场进行了数值模拟, 以可视化的结果给出了侧风下列车的流场结构和涡量分布. 杨志刚等^[6]采用 k_ε 模型研究了裙板的安装对高速列车气动阻力性能的影响. 陈燕荣和肖友刚^[7]以 k_ε 模型闭合Navier-Stocks(N_S)方程, 对列车明线运行的气动性能做了数值研究, 通过与实验结果对比, 证明其计算的合理性. 尽管 k_ε 方程的应用非常广泛, 但其求解精度在一定的领域内遭到了 k_ω 模型的挑战. Behery^[8]采用稳态RANS中的不同湍流模型对平面非对称扩散器进行数值模拟, 结果表明, 两方程模型中 k_ω 和SST(Shear Stress Transport) k_ω 的计算结果明显优于标准 k_ε 和低雷诺数 k_ε 模型. Catalano和Amato^[9]对机翼的数值模拟研究进一步证明了SST k_ω 在湍流模型中能够给出较好的计算结果. 毛军和郗艳红等^[10]利用SST k_ω 模型对列车的侧风风场进行数值模拟, 获得了与风洞试验吻合较好的结果. 对于列车绕流, 大尺度涡占主导地位, 流场呈现出极强的非定常特性而且载荷的动态特征变得很重要. 然而基于统计平均的湍流模型并不能捕捉到这种流场的细节和瞬态信息, 此时应该考虑瞬态模拟方法: DNS直接求解N_S方程, 提供流场的所有详细信息, 是目前理论上最准确的湍流计算方法, 但要求非常高的网格分辨率和计算资源, 目前尚不能应用于大型实际工程计算; LES采用直接求解大尺度涡和模拟小尺度涡的方法, 比前者有较低的计算资源要求同时保证求解精度. Hassan和Krajnoviç等^[11-13]利用LES, 研究了列车的横风效应、隧道效应以及车头形状的优化, 证实

了LES在列车空气动力学计算中的可靠性, 但是其列车模型都非常简化, 没有考虑转向架对流场结构的影响; DES在求解精度和计算资源的要求上则介于DNS和LES之间, 在列车空气动力学的研究中逐渐得到应用^[14].

综上所述, 为了研究带转向架的较复杂列车绕流的瞬时特性, 基于商用CFD软件STAR-CCM+, 以带有简化转向架的高速列车CRH₂模型为研究对象, 利用大涡模拟对列车明线运行的流场进行瞬态计算, 并对流场结构和气动载荷进行分析. 采用RANS方法和SST k_ω 模型对相应的稳态流场进行求解, 通过与瞬态LES结果的对比分析, 评估LES和RANS在列车绕流数值模拟中的计算能力和适用范围.

1 数值模拟方法

本次计算中马赫数为0.07, 远小于0.3; 基于车速(25 m/s)和车高(148 mm)的雷诺数为 2.5×10^5 , 因而流场为三维不可压缩湍流.

1.1 大涡模拟

湍流大涡数值模拟方法最早由气象学家Smagorinsky^[15]在1963年提出, 其主要思想是: 大尺度的湍流运动使用N_S方程直接数值求解, 而小尺度涡对大尺度湍流运动的影响则通过建立亚格子模型(sub-grid model)来模拟. 滤波之后, 不可压缩流动的连续性方程和动量方程为

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i' u_j')}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中: U_i 和 P 分别为滤波之后的速度和压力; τ_{ij} 是亚格子应力(sub-grid scale, SGS), 代表小尺度涡对大尺度涡的影响. 用标准Smagorinsky亚格子模型进行模拟, 有

$$\tau_{ij} - \frac{S_{ij}}{3} \tau_{kk} = -2\nu_{\text{SGS}} S_{ij} \quad (3)$$

其中

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$\nu_{\text{SGS}} = (C_s f \Delta)^2 \sqrt{2S_{ij} S_{ij}} \quad (5)$$

式中: S_{ij} 为拉伸率张量; ν_{SGS} 是涡黏系数; C_s 为模型常数, 计算中取0.1; $f = 1 - \exp\left(\frac{-y^+}{25}\right)$ 为滤波尺度在壁面附近的修正, 其中 y^+ 为量纲一的壁面距离.

1.2 SST $k-\omega$ 模型

SST $k-\omega$ 模型是 Menter 于 1994 年提出的. 综合 $k-\epsilon$ 模型在远场湍流求解中的优势和 $k-\omega$ 模型在近壁区域的求解能力, 从而以更高的求解精度在广泛的流体领域得到应用, 其控制方程参见文献 [16].

两种数值模拟都采用 3D 分离式求解器进行求解. SIMPLE 算法耦合压力-速度. 扩散项采用中心差分格式进行离散, 对流项使用二阶迎风格式. 考虑到几何模型的复杂性和网格规模限制, RANS 方法采用混合壁面函数对近壁区流场进行模拟.

2 数值模拟设置

2.1 列车模型和计算网格

采用 1:25 的 CRH₂ 列车模型. 根据 Cooper^[17] 提出的从列车鼻端往下游的一定长度内(少于一节车厢的长度)流场结构几乎不再变化, 减少列车长度并不改变流动的本质特征. 因此列车模型采用头尾两车组合并做了简化: 略去车身表面的附件(如受电弓、车灯等), 闭合车间风挡, 同时保留简化的 4 个转向架, 见图 1.

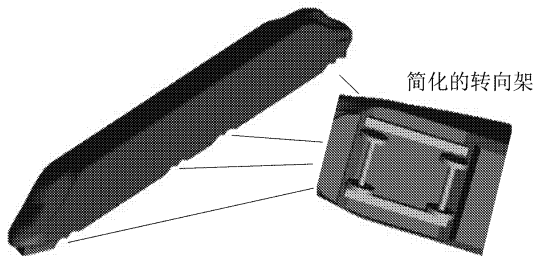


图 1 带简化转向架的列车模型

Fig. 1 Train model with simplified bogies

对于 LES 的计算, 生成两套六面体的结构化网格, 称为 G_LES I 和 G_LES II, 从而对网格无关性进行验证. 为了准确捕捉流场细节, 对列车周围进行网格细化, 设置四个加密区, 布置如图 2 所示.

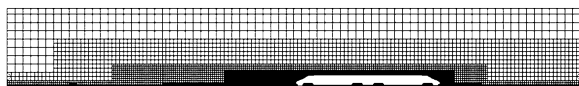


图 2 用于 LES 计算的计算域加密区设置

Fig. 2 Refinement zones of the computational domain for LES

第一加密区和第二加密区的尺寸分别为 3.4mm 和 6.8 mm, 并在列车表面生成 8 层边界层网格, 增长率为 1.2, 其中 G_LES I 的第一层网格高度为 0.02 mm, G_LES II 的第一层网格高度为 0.015 mm, G_LES II 的车头和转向架表面网格如图 3 所示.

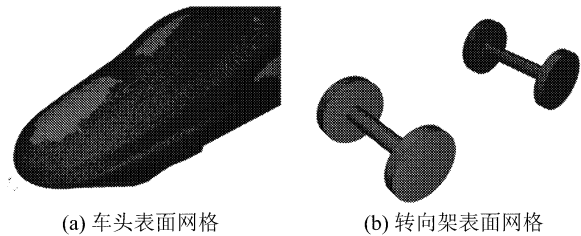


图 3 列车表面网格

Fig. 3 Surface mesh of the train

车身面网格尺寸在 0.4 ~ 0.95 mm 之间, 转向架面网格尺寸约 0.45 mm. 采用 STAR_CCM 的多面体网格技术, 生成用于 RANS 模型的计算网格. 这种网格在保证计算精度的同时能极大降低网格数量, 提高计算效率^[18]. 在车身周围设置了 3 层边界层, 增长率为 1.3, 计算域的第一加密区网格尺寸为 6 mm, 第二加密区为 12 mm, 最终生成 468 万网格, 称为 G_RANS.

2.2 计算域和边界条件

以车高 H 作为特征长度, 计算域高 $7H$, 长 $55.1H$, 两侧距离车体各 $5.5H$, 车尾距离出口处 $27.7H$. 边界条件的设置为: 均匀速度入口, 其大小等于列车运行速度(25 m/s 和 55 m/s); 压力出口; 列车表面设置为无滑移固壁条件; 考虑地面效应的影响, 采用移动壁面, 速度设置为与来流速度相等; 其他边界设置为对称边界条件以消除边界层的影响.

3 结果分析

3.1 数值计算方法检验

网格划分对数值计算的影响不可忽视. 一个重要的衡量指标就是量纲一壁面距离 $y^+ = \Delta y u^* / \nu$. 结果显示, RANS 模型的 y^+ 值主要位于 (10 ~ 120) 之间, 最大值为 228, 平均值为 40; LES 模型的网格参数如表 1 所示.

表 1 LES 模型两套网格的分辨率
Tab. 1 Resolution of G_LES I and G_LES II

网格名称	网格量/万	$y^+ = \Delta y \frac{u^*}{\nu}$		$l^+ = \Delta l \frac{u^*}{\nu}$		$s^+ = \Delta s \frac{u^*}{\nu}$	
		平均	最大	平均	最大	平均	最大
G_LES I	1 680	0.55	3	87	329	87	329
G_LES II	3 440	0.42	2	52	223	52	223

除了 y^+ , 亦给出了展向和流向的网格分辨率, 分别为 $l^+ = \Delta l u^* / \nu$ 和 $s^+ = \Delta s u^* / \nu$. 其中: u^* 为摩擦速度; Δy 、 Δl 和 Δs 分别为垂直壁面、展向和流向的网格尺寸; ν 为流体的运动黏度. 为了对网格无关性进行验证, 在车身上取测压点, 对 G_LES I 和 G_LES II 的计算结果进行比较, 如图 4 所示. 可见两套

网格的计算结果非常接近,说明 G_LES I 已具有足够的计算精度,后继分析也基于 G_LES I 的结果.

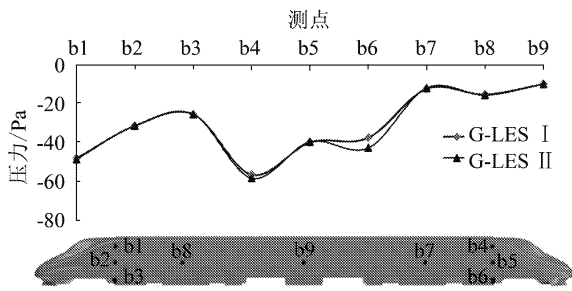


图 4 G_LES I 和 G_LES II 的压力测点计算结果比较

Fig. 4 Pressure comparison between G_LES I and G_LES II

进一步将仿真结果与试验结果进行了对比. 在头车具有代表性的压力区域布置 3 个压力测点: 鼻锥 (A 点)、司机室前窗下方 (B 点) 和流线型车头向车身圆滑过渡处 (C 点), 如图 5 所示.

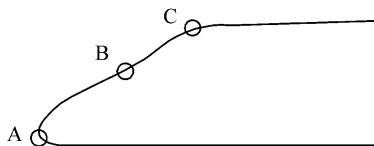


图 5 压力测点位置

Fig. 5 Pressure measuring point location

为了便于比较,将各压力测点结果量纲一化得到压力系数,即

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho V^2} \quad (6)$$

$$P_A = 0.5\rho V^2 \quad (7)$$

式中: P 为测点压力; P_A 为滞止点压力; ρ 为空气密度,取值 1.225 kg/m^3 ; V 为列车运行速度.

将计算结果与实车测试结果^[7]进行对比,列于表 2. 列车时速为 55.56 m/s 时, RANS 方法的计算结果与实车测试结果非常接近, 3 个监测点中最大误差出现在 B 点,为 3.2% . 综合考虑试验误差,数值计算误差及测点位置的布置偏差,这一误差位于合理的范围内,证明 RANS 方法的正确性. 当模拟列车速度为 25 m/s 时, RANS 和 LES 方法的计算结果与车速 55.56 m/s 的实车试验结果误差最大为 4.36% ,在误差范围内,认为两者结果是一致的,由此说明此时列车速度的变化对列车表面压力分布规律及压力系数几乎没有影响^[1]. 此外, A 点位于鼻尖处,为流动滞止点,其理论压力计算公式见式 (7),据此得到 A 点的理论压力系数为 1,与表 1 中对应的不同数值模拟工况下的压力系数几乎相等. 通过以上分析,验证了 RANS 和 LES 两种方法的正确性. 本文后面的分析针对车速为 25 m/s 的工况.

表 2 头车压力测点的计算值与试验值比较

Tab. 2 Pressure comparison between computational and experimental results

监测点	试验结果 (55.56 m/s)		RANS (55.56 m/s)		RANS (25 m/s)		LES (25 m/s)	
	压力/Pa	压力系数	压力系数	误差/%	压力系数	误差/%	压力系数	误差/%
A	1 930	1.021	0.992	2.84	1.007	1.37	1.007	1.37
B	650	0.344	0.355	-3.19	0.354	2.97	0.334	2.90
C	-810	-0.428	-0.424	0.93	-0.409	4.36	-0.420	1.87

3.2 表面压力分析

图 6 给出车头和车尾的稳态压力分布. 车头鼻尖是流动滞止点,因而表面压力最大并以此为中心在周围形成小面积高压区域. 在车头和车身圆滑过渡处出现面积较大的负压区,这是因为气流在经过司机室车窗时短暂受阻,之后经过圆滑过渡处时流

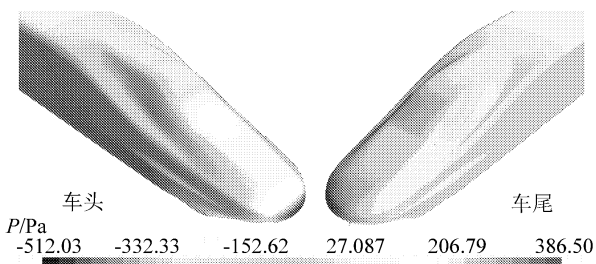


图 6 车头和车尾的稳态压力分布

Fig. 6 Steady pressure distribution of the head and the tail of the train

速又迅速提高,从而导致低压区出现. 在车头鼻尖区域和司机室车窗区域外,车头大部分处在负压区,压力沿车身向后逐渐降低且趋于稳定. 车尾大部分区域同样处于负压区,只有司机室车窗处出现小范围的正压,且压力分布的变化梯度比车头要小得多,尤其在鼻尖和车头与车身的过渡处. 同时注意到,车头和车尾的表面压力在稳态 RANS 模拟下以沿列车纵向的垂直中心面为对称面,呈对称分布.

大涡模拟的瞬态计算结果在图 7 中给出,其表面压力分布与稳态相比车头表面压力依然呈对称分布,并随时间产生一定的变化,但分布规律基本一致. 车尾的表面压力分布却表现出了明显的非对称性,且分布规律随时间产生的变化相对明显. 这是因为气流的湍流特性沿列车向后逐渐加强,到列车尾部时形成强烈的非定常尾涡脱落. 从 $t = 1.36 \text{ s}$ 到 $t = 1.5 \text{ s}$ 的表面压力分布图,可以清晰的看到表面压

力随时间波动的特征,并且这段时间内车头的最大正压在一个较大的范围内波动(107~975 Pa).为了分析这一波动的频域特征,以量纲一化的斯特劳哈尔数 $Sr = f_v H/U_\infty$ 为横轴,在图8中给出测点A、B和C的功率谱密度(PSD),其中 f_v 为时域信号的波动频率, U_∞ 为列车前方来流速度.由图8可知3个

测压点的主要频谱峰值范围基本一致,分布在 Sr 为(0~2)的范围内,最大峰值频域位于 $Sr = 1$ 左右,且因3测点位置不同而略有差异.根据频域信息可以确定振动能量的集中频段,避开共振模态,为列车结构设计提供参考.

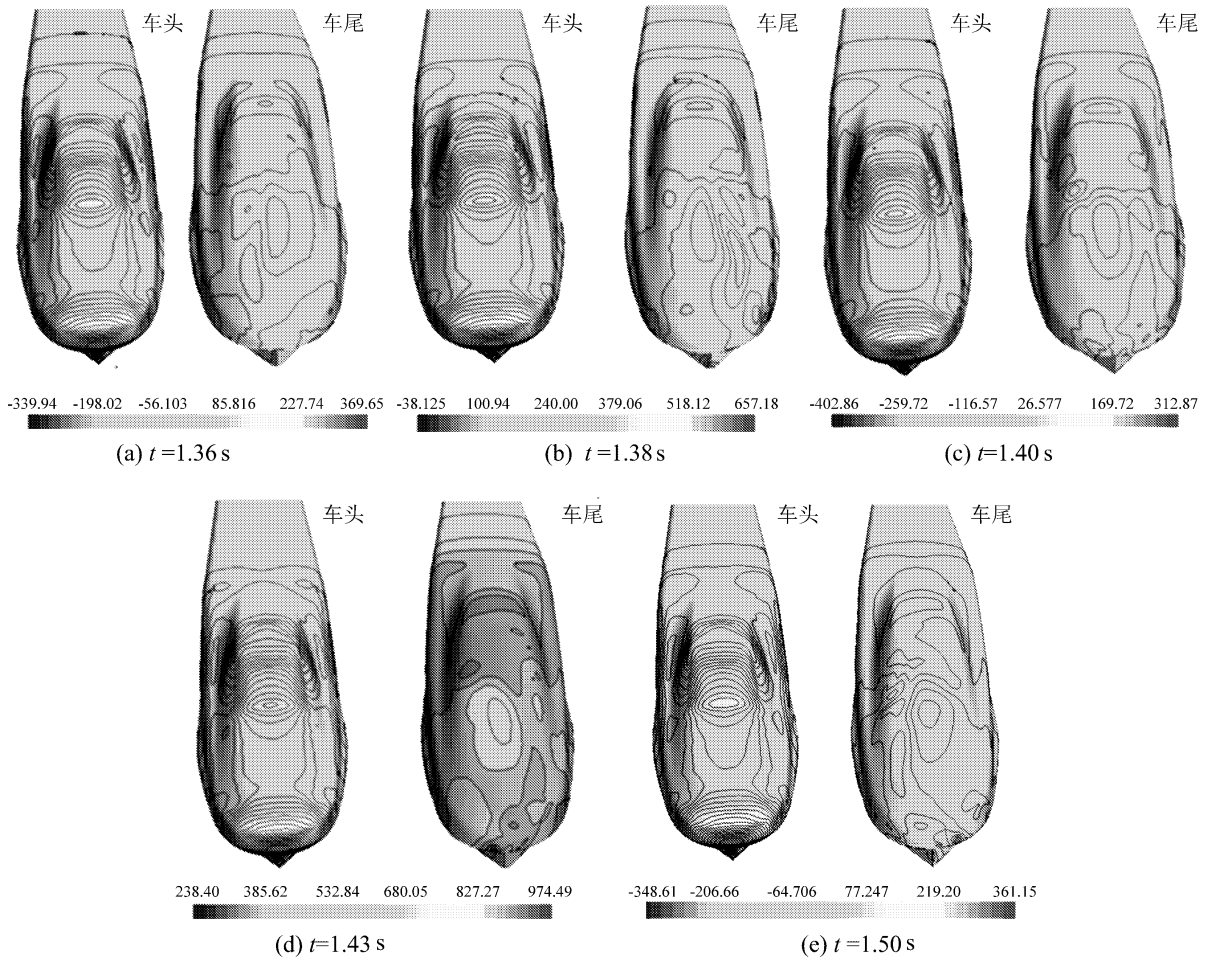


图7 车头和车尾的瞬态压力分布(单位: Pa)

Fig. 7 Transient pressure distribution of the head and the tail of the train (unit: Pa)

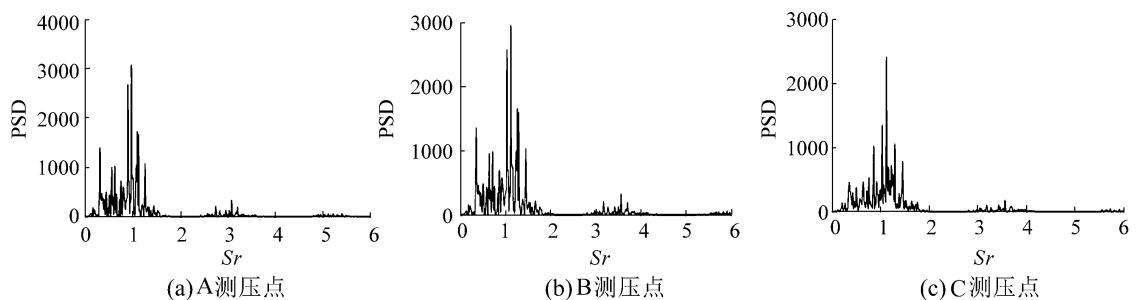


图8 压力测点功率谱密度

Fig. 8 The power spectrum density of the pressure

3.3 列车尾涡分析

大涡模拟的主要优势之一就是能够精确求解大于滤波尺度的湍流尺度,从而捕捉到更丰富的湍流

信息.图9和图10分别是稳态和瞬态流场的速度标量图.可以看到,稳态和瞬态流场的尾流速度分布区域相似,但后者比前者在横向上的扰动范围略宽.瞬

态速度标量图清晰的显示了列车尾流的强湍流特性: 从 $t = 1.46\text{ s}$ 到 $t = 1.50\text{ s}$, 尾涡不断的在车尾产生、脱落, 向车后迁移并扩散, 形成具有一定规律的涡街结构. 尾涡的这一特性使得车尾表面的压力分布随时间变化(图 7). 同时, 尾涡脱落对列车气动力产生很大影响, 其振动频率直接影响列车, 尤其是尾车运行的稳定性和乘坐舒适性^[13].

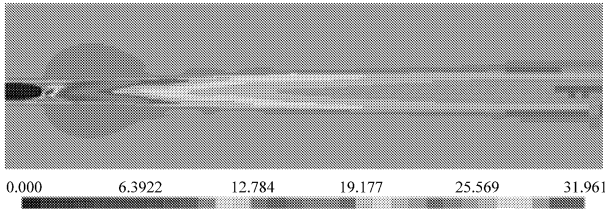
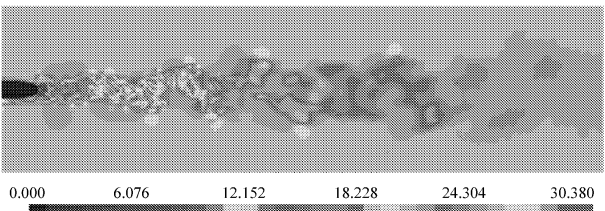
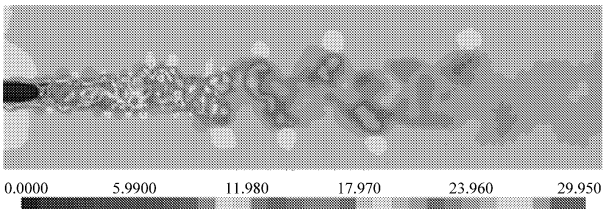


图 9 稳态速度标量图(单位: m/s)

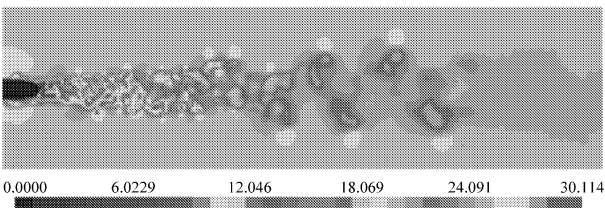
Fig. 9 Steady velocity magnitude



(a) $t = 1.46\text{ s}$



(b) $t = 1.48\text{ s}$



(c) $t = 1.50\text{ s}$

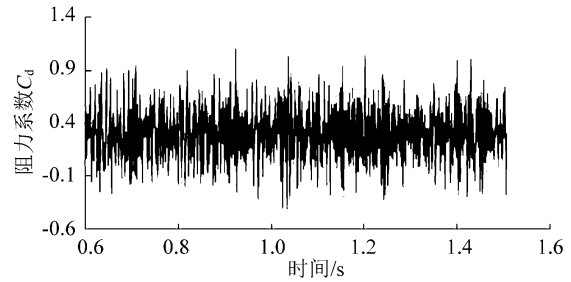
图 10 瞬态速度标量图(单位: m/s)

Fig. 10 Transient velocity magnitude

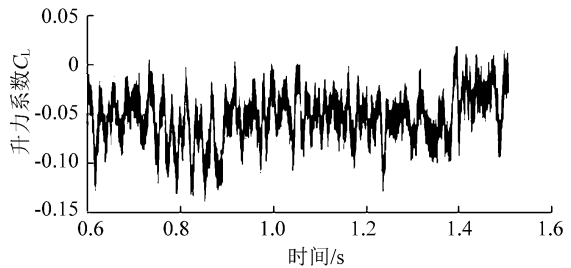
3.4 气动力分析

列车空气动力学的一个重要研究内容就是列车在行进过程中所受到的气动力, 因为列车的提速、运行平稳性和舒适性等都受到这些力的影响和制约. 图 11 给出了大涡模拟的计算结果, 阻力和升力系数都具有很强的脉动性, 绕均值在一个较宽的范围内上下波动. 由此可见, 当考虑列车运行安全性和平稳性等因素时, 只考虑稳态结果是不恰当的, 应当考虑其瞬时特性, 因其瞬时值可能比稳态值大得多. 图

12 给出气动力系数的 PSD 图, 升力的主频分布在 Sr 为 $(0 \sim 0.4)$ 之间, 第一个峰值位于较低的频率 0.025 左右, 第二个峰值区域出现在 0.25 左右. 这些主频范围主要涉及尾涡脱落, 车体表面的气流分离及车体底部小尺度流场结构的分离和再附着等, 这些波动成为升力的主要影响因素. 阻力的主频域分布远高于前者, 在 Sr 为 $(0 \sim 2)$ 之间时, 对比图 12 (b) 和图 8 可知, 阻力的频域分布范围与车头测点的压力频域分布一致, 说明阻力主要受车身表面气动压力波动的影响, 而不像升力那样, 主导频率为尾涡脱落和气流分离的频率等.



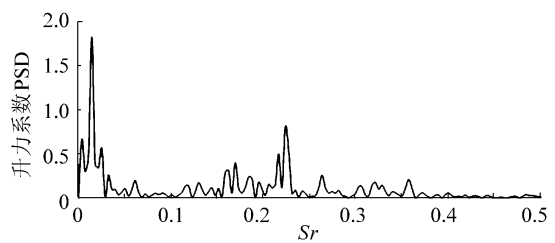
(a) 阻力系数



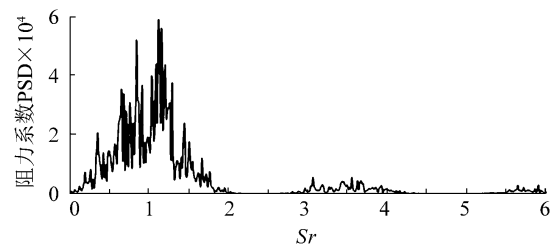
(b) 升力系数

图 11 列车的气动力系数

Fig. 11 Aerodynamic coefficients of the train



(a) 升力系数



(b) 阻力系数

图 12 列车气动力系数功率谱密度

Fig. 12 PSD of train aerodynamic coefficients of the train

将 LES 的气动力系数求平均值,与 RANS 的计算结果对比列于表 3,阻力系数相差 24.1%,升力系数差值更偏大,为 19.4%,由于侧向力接近 0,所以不对其进行分析。表 4 给出了阻力中压力和摩擦力各自所占的成分,可以看到 LES 和 RANS 在表面压力的求解上误差很小,但由于 LES 可以更精确求解黏性底层,于是摩擦力的结果出现较大分歧,导致了 LES 结果均值与 RANS 稳态结果的差异;尾涡脱落和气流分离对升力有主导性影响,然而 RANS 由于算法的限制,无法求解这些特征,很可能造成其结果与 LES 的精确求解之间出现较大误差。

表 3 LES 和 RANS 的气动力系数计算结果

Tab.3 Aerodynamic force coefficients of LES and RANS

项目	阻力系数 C_d	升力系数 C_L	侧向力系数 C_s
LES	0.311	-0.031	0.002
RANS	0.386	-0.025	-0.001
差值/%	-24.1	19.4	—

表 4 阻力中的压力和摩擦力成分

Tab.4 Pressure and shear forces distribution in the drag force

模拟方法	压力系数	摩擦力系数	总阻力系数
LES	0.203	0.108	0.311
RANS	0.215	0.171	0.386

4 结论

1) 通过与试验数据对比,LES 和 RANS 在测点压力值的求解中最大误差只有 4.36%,两者求解精度相当。但由于 RANS 无法精确求解边界层黏性底层,也无法捕捉流场的强湍流特性,其求解的阻力和升力系数与 LES 出现了较大偏差。

2) LES 方法进行瞬态计算的结果显示,由于列车尾涡的强湍流特性影响,车尾的表面压力分布呈明显的非对称性。然而 RANS 方法只能给出对称分布的列车表面压力。且 LES 成功捕捉到尾涡的脱落情况,比 RANS 的定常结果复杂的多。

3) 通过对瞬态阻力系数和升力系数的频域分析,发现阻力主要受列车表面压力波动的影响,其主频分布范围与表面测点压力主频一致,位于 $Sr = 1$ 左右;而升力主要受到尾涡脱落和边界层分离的影响,主频范围比阻力要低得多, Sr 主要分布在 $0 \sim 0.4$ 之间。

4) RANS 方法可用于快速计算出具有适当精度的测点压力值,但 LES 更适合求解真实的流场结构和气动力特征(尤其涉及到黏性底层的求解时),为列车运行平稳性和舒适性设计及合理的结构设计提供完善的载荷输入。

参考文献(References):

- [1] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社 2007: 21-25.
TIAN Hongqi. Trains aerodynamics [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007: 21-25. (in Chinese)
- [2] 张英朝. 汽车空气动力学数值模拟技术[M]. 北京: 北京大学出版社 2011.
ZHANG Yingchao. Numerical simulation of the automotive aerodynamics [M]. Beijing: Peking University Press, 2011. (in Chinese)
- [3] Paul J C, Johnson R W, Yates R G. Application of CFD to rail car and locomotive aerodynamics [C]//Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics: The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains, Springer, 2009: 259-297.
- [4] Gaylard A. The application of computational fluid dynamics to railway aerodynamics [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 1993, 207(2): 133-141.
- [5] Khier W, Breuer M, Durst F. Flow structure around trains under side wind conditions: a numerical study [J]. Computers & Fluids, 2000, 29(2): 179-195.
- [6] 杨志刚, 高喆, 陈羽, 等. 裙板安装对高速列车气动性能影响的数值分析 [J]. 计算机辅助工程, 2010, 19(3): 16-21.
YANG Zhigang, GAO Zhe, CHEN Yu, et al. Numerical analysis on influence on aerodynamic performance of high-speed train caused by installation of skirt plate [J]. Computer Aided Engineering, 2010, 19(3): 16-21. (in Chinese)
- [7] 陈燕荣, 肖友刚. 高速列车空气动力学性能计算 [J]. 铁道车辆, 2009, 47(1): 14-16.
CHEN Yanrong, XIAO Yougang. Calculation in aerodynamics performance of high-speed trains [J]. Rolling Stock, 2009, 47(1): 14-16. (in Chinese)
- [8] El_Behery S M, Hamed M H. A comparative study of turbulence models performance for separating flow in a planar asymmetric diffuser [J]. Computers & Fluids, 2011, 44(1): 248-257.
- [9] Catalano P, Amato M. An evaluation of RANS turbulence modeling for aerodynamic applications [J]. Aerospace Science and Technology, 2003, 7(7): 493-509.
- [10] 毛军, 郝艳红, 李明高, 等. 列车侧风效应的数值模拟 [J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(1): 14-19.
MAO Jun, XI Yanhong, LI Minggao, et al. Numerical study on the crosswind effects of high-speed train [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(1): 14-19. (in Chinese)
- [11] Hemida H, Baker C. The calculation of train slipstreams

