

高速列车明线交会压力波特性研究

李现今 刘晨辉 杨国伟

(中国科学院力学研究所,北京 100190)

摘要 列车交会压力波是影响列车运行安全性和乘客舒适度的重要因素之一,因此需要对压力波特性进行研究。采用计算流体力学方法求解三维黏性可压缩 N-S 方程组,对不同时速下国产新型高速列车会车过程进行三维非定常仿真。得出了压力波以及侧向力的变化规律曲线。结果表明最大压力波幅值出现在尾车等截面与变截面过渡处的鼻尖高度位置。会车过程中,车体将承受两次排斥力和一次吸引力,这将对列车的稳定行驶产生一定的影响。列车所受侧向力随会车线间距的增大而减小。

关键词 高速列车 明线交会 压力波

中图分类号 V211.3; **文献标志码** A

会车压力波是两相向行驶的列车对周围空气产生强烈扰动,造成对方车体表面产生压力突变的瞬时压力冲击现象。尤其是车头、尾通过的瞬间,会对另一车的侧墙产生显著的压力冲击,即形成列车交会压力波。压力波会造成车体侧向摆动,严重时甚至损坏车体结构,如列车头部前窗、中部车厢玻璃以及空调进排风阀口等。压力波传入车内,也会严重影响乘客的舒适性。近几年来,国内外对列车会车引起的压力波特性以及高速列车安全会车逐渐予以重视,已利用实验和仿真手段开展了大量的研究。田红旗等人对 200 km/h 动车组交会的空气压力波特性开展了风洞实验研究^[1],并分析了列车交会压力波的影响因素^[2]。崔桂香等人在水槽拖模实验中应用流向标法显示会车的非定常流场,给出了会车初期、中期和末期两列列车会车流场的二维流谱^[3]。国外学着也对高速列车会车产生的压力波及其对列车安全行驶的影响做了研究。Kozo Fujii 等人采用可压缩 Euler/N-S 方程和计算域分解

方法成功仿真了列车会车过程,强调压力波瞬时冲击对列车安全行驶的重要影响^[4]。Pierre Ricco 对列车在 6 m 长的隧道内以 150 km/h 会车开展仿真,得到了隧道会车压力波对于列车头部等处的影响^[5]。

为了真实模拟列车会车相向运动过程,本文采用计算流体力学软件 Fluent 中的滑移网格模型,对不同时速下(350 km/h, 380 km/h 和 400 km/h)列车会车过程进行了数值模拟。通过对不同车身位置测点压力波幅值对比,探索了车身上最大压力波幅值出现的位置;同时研究了列车会车的压力波特性随会车速度的变化规律以及侧向力的变化特性。

1 计算方法

1.1 控制方程

对于一般列车空气动力学问题,由于车速较低可按不可压缩流动问题处理。但是高速列车会车时,两车相对速度将达到 400 km/h 到 800 km/h 甚至更高,空气的压缩性已经不可忽略,故本文采用流动分析软件 Fluent 数值求解三维黏性可压缩 N-S 方程,方程具体形式如下。

连续方程

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

动量方程

2012年2月29日收到,3月14日修改 国家“973”计划项目
(2011CB711100)、国家科技支撑计划项目(2009BAG12A03)资助
第一作者简介:李现今,男。中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室博士研究生。研究方向:流体力学。E-mail: Vip-manlxj@yahoo.com.cn。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \quad (2)$$

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i \tau_{ij} \right) \quad (3)$$

对于可压缩流动,还需引入理想气体状态方程

$$p = \rho RT \quad (4)$$

其中, $E = \frac{1}{2} u_i u_i + C_v T$ 。 u_i 代表列车周围流场速度, x_i, x_j 代表三个坐标分量, ρ, P, T 分别为空气密度、压力、绝对温度, μ 为空气动力黏性系数, C_v 为定容比热, R 为气体常数, $\delta_{i,j}$ 为克罗内克尔符号。同时为了更好地模拟壁面附近那流动,计算中引入标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型。

1.2 动网格技术

由于计算过程中列车为运动的,需引入动网格技术,在本次计算中应用的动网格技术主要是滑移网格法和动态层方法。

滑移网格方法将运动物体与静止物体所在的网格区域分别划分网格,在区域交界面上可以使用非连续网格。随着运动区域的平动或转动,不同区域的边界网格在交界面处相互滑移,计算时程序对变量在交界面处插值,并保证两侧通量连续。由于边界网格之间只能相切,不能互相交错,这种方法只适用于物体进行定轴转动(如旋转机械)或平动(如火车交会)等简单运动方式。二维的滑移网格交界面形式如图 1。

本文中高速列车算例就是基于此种动网格方法。但物体平动时,仅仅依靠滑移网格头尾就会发生交错现象,流场的外场边界随之改变(如图 2)。因此,必须结合另外的网格层状改变方法,如图 2 中所示加入层状网格改变区域。车头前方区域减少网格层,车尾后方区域增加网格层,从而保证整个流场区域大小不变。该算法的作用方式如图 3 所示。

底部壁面沿其法向方向向上运动,第 j 层网格将被压缩,而第 i 层网格保持不变。当第 j 层网格高度 h 满足下式。

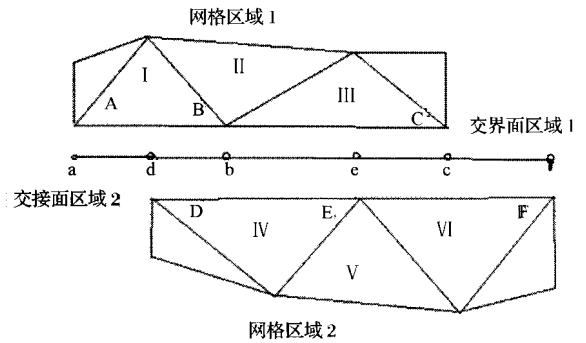


图 1 滑移网格交界面形式

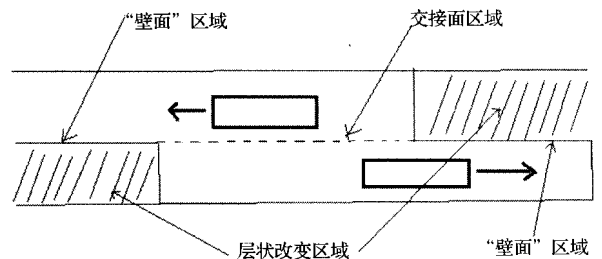


图 2 列车交会滑移网格示意图

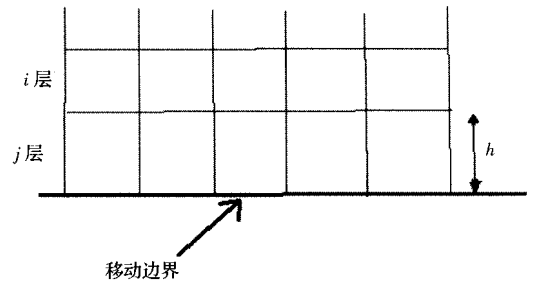


图 3 网格更新算法

$$h < \alpha_c h_{ideal}$$

此时,第 j 层将与第 i 层合并形成新的一层网格。其中, $\alpha_c (0 < \alpha_c < 1)$ 为合并系数, h_{ideal} 为标准网格高度。

反之,底部壁面沿其法向方向向下运动,第 j 层网格将被拉伸,而第 i 层网格保持不变。当第 j 层网格高度 h 满足下式,

$$h < (1 + \alpha_s) h_{ideal}$$

此时,第 j 层将被分割成两层。其中, $\alpha_s (0 < \alpha_s < 1)$ 为合并系数, h_{ideal} 为标准网格高度。

这种网格更新算法的特点是:由于只涉及到网格层的增加和减少,网格更新的速度非常快,但是

只能用于层状网格。这里的层状网格指的是,六面体网格或者棱柱网格。

1.3 边界条件参数

列车表面设为动壁面条件,速度大小和方向与列车一致;地面为静止壁面条件。计算域其余外边界设为压力远场条件。流场介质设定为空气(理想气体),湍流模式为 standard $k-\varepsilon$ 模型,时间步长 0.005 s,交会速度为 350 km/h,压强为 101 325 Pa,温度为 300 K,线间距 5 m。

1.4 计算网格

会车计算使用 ICEM 划分网格,利用滑移网格和层状网格更新算法进行模拟网格的变化。会车核心区网格如图 4。

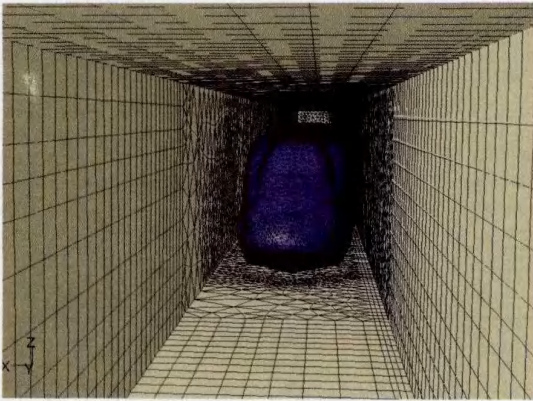


图4 会车核心区网格

1.5 压力测点分布

列车明线交会共设 10 列测点,头车、中间车、尾车各四个测点,均位于列车。头车测点 m_{h1} 、 m_{h2} 位于头车流线型部分与车身连接处,位置对称布于列车两侧; m_{h3} 、 m_{h4} 位于头车车厢中部,位置对称布于列车两侧; m_{b1} 、 m_{b2} 位于中间车距头车风挡二节车厢长度的位置,对称布于列车两侧; m_{b3} 、 m_{b4} 位于中间车距尾车风挡二节车厢长度的位置,对称布于列车两侧; m_{t1} 、 m_{t2} 、 m_{t3} 、 m_{t4} 布于尾车,位置与 $m_{h1} \sim m_{h4}$ 相同。其中单数编号均位于会车内侧,双数编号位于会车外侧。示意图见图 5。

2 计算结果及分析

从数值计算结果可以看出,不同会车速度下,

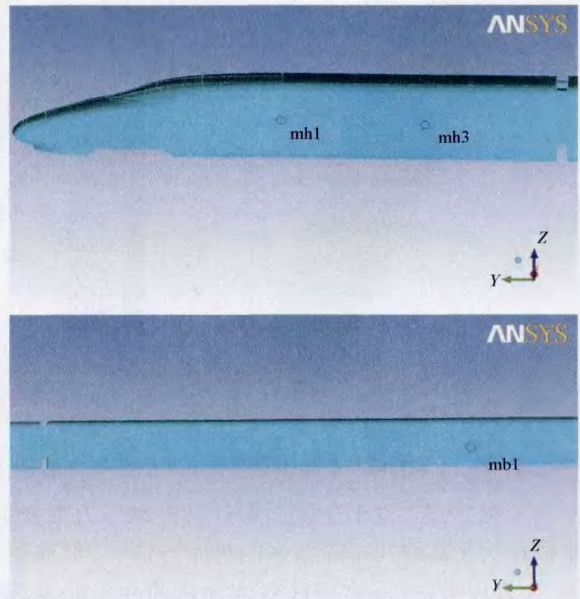


图5 列车交会测点位置示意图

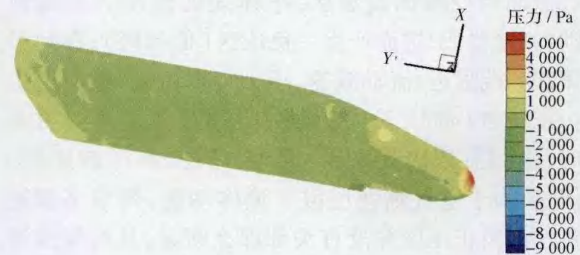


图6 交会前列车头车表面压力分布云图

各测点的压力波变化规律以及侧向力变化规律一致。故本文以时速 350 km,线间距为 5.0 m 为典型工况进行计算。

2.1 压力波产生机理分析

图 8 为头车、中车和尾车内外侧及各测点压力时间历程曲线图,图中左边一列为列车交会内侧的测点压力时间历程图,右边一列为列车交会外侧的测点压力时间历程图。从中可以看出对所有测点先后经历从高压到低压、再由低压到高压的过程,而且前一个压力波幅值(头波)较后一个压力幅值(尾波)大。以头车和尾车为例,其原因可见图 6 和图 7。

图 6 和图 7 为会车前列车头尾部压力分布云图。从图中可以看出列车在高速运行时,周围流场

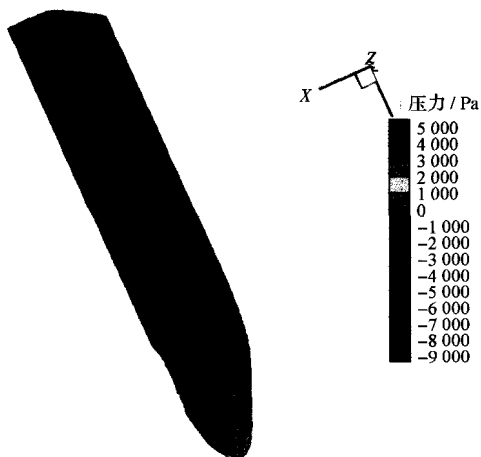


图7 交会前列车尾车表面压力分布云图

受到干扰,头车、尾车变截面附近会出现压力突变。来流在头车鼻端及排障器内凹槽附近滞止,形成前驻点,表现为正压(高压区);流动从前驻点向等截面车身发展时,流管不断收缩,流动速度不段增大,压力逐渐减小,表现为负压(低压区);在尾部车身等截面与变截面过渡区,车体表面流动为附着流动,流速增大,进而产生一负压区(低压区);在列车尾部鼻端附近,流动减速,压力得以恢复,进而产生一正压区(高压区)。因此,当列车经过某一测点时,该测点依次受高压、低压、低压、高压的影响。但是,由于空气黏性耗散了流体动能,列车尾部的负压区及正压区并没有头部那么明显,其对周围测点的影响没有头部对此测点的影响强烈,这也是头波幅值大于尾波幅值的原因。

2.2 最大压力波幅值与车速间的关系

表1为头车、中车、尾车以及内、外测点的压力峰值。从中可以看出列车内侧压力波的幅值远大于列车外侧。

由于交会压力波实际上源自于列车对周围流场的影响,即列车周围空间压力分布。而根据列车明线稳态运行章节^[2,4]中结论,列车实际上在250 km/h,300 km/h,350 km/h速度运行时已经处于自模拟状态,列车流场中的无量纲压力系数 $C_p = \frac{P}{2\rho V^2}$ 基本与速度无关。所以列车交会压力波幅值基本与速度平方成正比。

2.3 会车侧向力变化特性

图9为侧向力随时间的变化曲线。由图可知,交会前期,列车将受到一个向外的排斥力;交会中期(两列车看齐时),列车将受到一个向内的吸力;交会后期,列车又将受到一个向外的排斥力,但没有第一次排斥力明显。表2为同一时速不同线间距下车体侧向力,从表中可知,车体所受的侧向力随会车线间距的减小而增大,线间距从5.0 m减小到4.4 m时,车体所受的排斥力和吸力分别增加约19%和44%。

表1 列车头、中、尾车及内(右)、外(左)侧测点压力峰值

	最大压力/Pa	最小压力/Pa		最大压力/Pa	最小压力/Pa
头车	4 184.243 2	-7 017.412 1	头车	5 069.937	-7 857.732 9
中车	3 911.025 4	-7 226.142 1	中车	3 495.148 4	-5 929.986 8
尾车	3 679.387 5	-6 443.491 2	尾车	777.763 73	-6 303.217 3
MH1	1 040.437	-5 131.595 7	MH1	2 716.337 4	-5 189.626
MH2	1 010.571	-4 976.800 3	MH2	2 680.724 6	-5 116.685 5
MB1	701.504 21	-5 218.604 5	MB1	2 447.387 5	-5 104.631 8
MB2	716.363 34	-5 060.905 3	MB2	2 458.143 3	-4 959.581 5
MB3	384.562 47	-5 191.608 9	MB3	1 213.312 7	-5 370.085
MB4	415.015 84	-5 178.458 5	MB4	1 198.938	-5 250.784 2
MB5	164.234 07	-5 227.587 9	MB5	513.797	-5 120.800 8
MB6	179.707 15	-5 231.439 5	MB6	515.182 37	-5 117.487 8
MT1	37.098 083	-5 333.170 9	MT1	268.952 18	-5 044.611 8
MT2	16.042 957	-5 345.979	MT2	242.674 03	-5 050.260 3

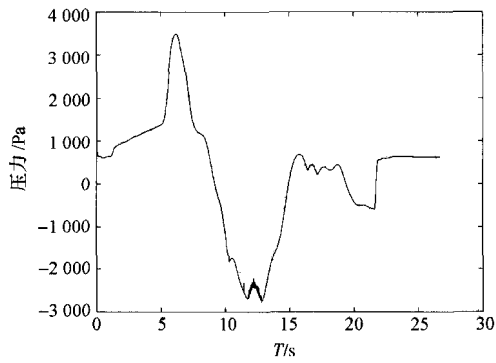
表2 不同线间距下车体侧向力(350 km/h)

线间距/m	排斥力/N	吸力/N
5	63 036.4	-80 481.2
4.4	74 944.8	-115 642.1

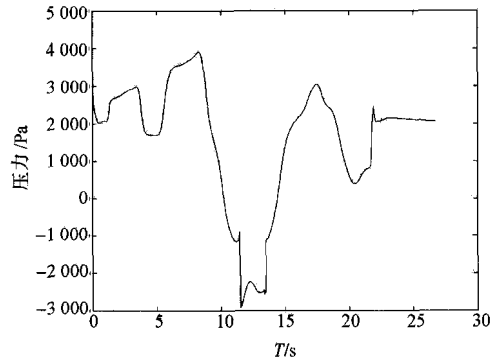
3 结论

综合以上对高速列车明线环境下等速会车压力波特性的计算结果和分析,可以得出如下结论:

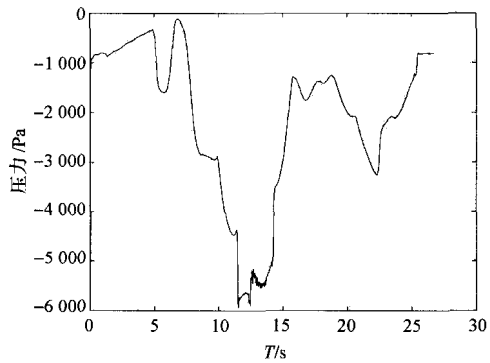
- 1)最大压力波幅值出现在尾车等截面与变截面交界处的鼻尖高度位置,因此该部位的材料比其他部位要保证更大的抗压能力。
- 2)列车交会前期,车体将受到一个向外的排斥力;交会中期,车体将受到一个向内的吸力;交会后期,车体又将受到一个向外的排斥力,交会前期的排斥力强于交会后期的排斥力。列车在交会过程中的这种侧向力变化特征将对其稳定行驶产生一定影响。
- 3)列车所受压力波幅值和侧向力随会车线间距的减小而增大,因此铁路设计中应考虑合理的线间距。



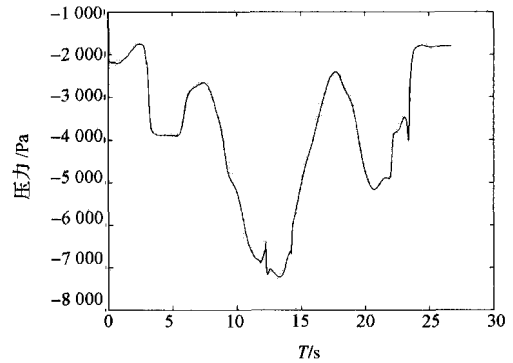
测点 m_{b1-} 压力时间历程曲线



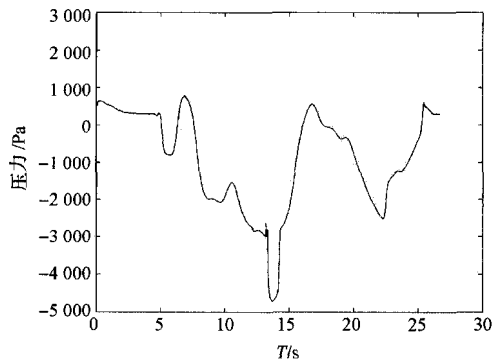
测点 m_{b1+} 压力时间历程曲线



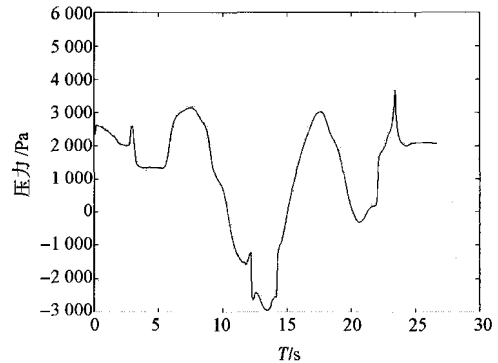
测点 m_{b2-} 压力时间历程曲线



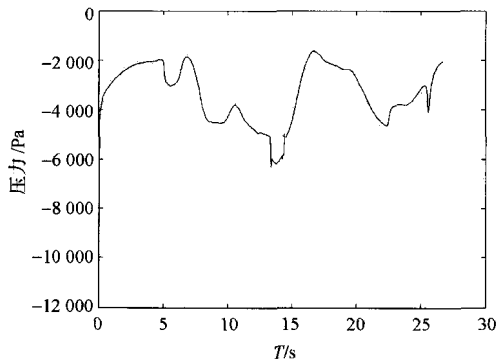
测点 m_{b2+} 压力时间历程曲线



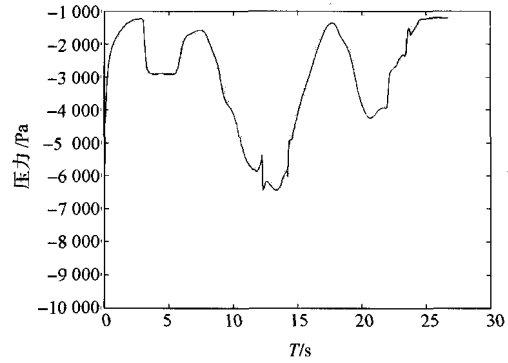
测点 m_{b3-} 压力时间历程曲线



测点 m_{b3+} 压力时间历程曲线



测点 m_{b4-} 压力时间历程曲线



测点 m_{b4+} 压力时间历程曲线

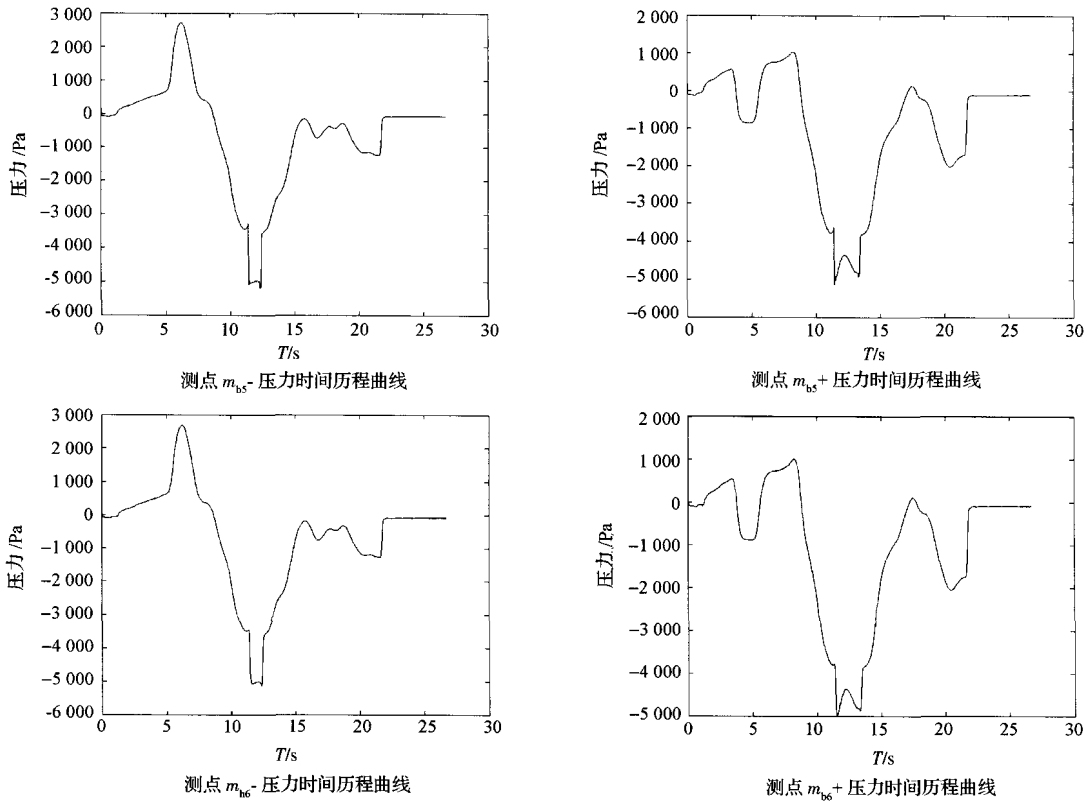


图 8 各测点压力时间历程曲线图

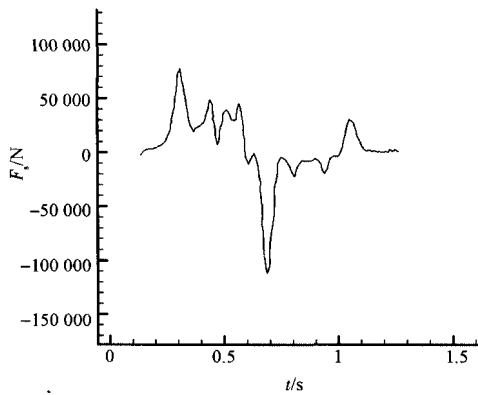


图 9 侧向力随时间变化的曲线

参 考 文 献

- 1 梁习锋,田红旗. 200 km/h 动车组交会空气压力波试验. 中南工业大学学报,2002;33(6):621—624
- 2 田红旗,卢执中. 列车交会压力波的影响因素分析. 铁道学报,2001;23(4):17—20
- 3 崔贵香,张晓航,张兆顺. 列车交会过程非定常流场的显示. 空气动力学学报,1998;16(2):255—295
- 4 Fujii K,Ogawa T. Aerodynamics of highspeed trains passing by each other. Computers and Fluids,1995;24(8):897—908
- 5 Ricco P,Baron A,Molteni P. Nature of pressure waves induced by a high-speed train travelling through a tunnel. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007; 95(8): 781—808
- 6 田红旗. 列车空气动力学. 北京:中国铁道出版社,2007

(下转第 3702 页)

The Application of the PDF and EBU Models Using in Combustor's Development

CHANG Feng, SUO Jian-qin, LIANG Hong-xia, LI Ming, WU Xiao-xin

(School of Power and Energy Source, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China)

[**Abstract**] Two common combustion model are used which are finite rate eddy broken (EBU) model and PDF model in FLUENT software to calculate the high temperature rise combustor. The velocity field, temperature field and other features are gotten. The model suitable for the high temperature rise combustor is obtained.

[**Key words**] CFD Combustor EBU model PDF model

(上接第 3694 页)

Characteristics of Pressure Wave Induced by High Speed Trains Meeting in Open Air

LI Xian-jin, LIU Chen-hui, YANG Guo-wei

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100191, P. R. China)

[**Abstract**] The pressure wave caused by two trains' meeting shows great effect on train running safety and passengers comfort. So it is necessary to study the pressure wave characteristics. The Reynolds Averaged N-S equations were numerically solved by utilizing CFD methods in order to simulate the three-dimensional unsteady China-made trains' meeting process at different speeds. The time-history of pressure wave and side force were obtained. Results show that the maximal pressure wave amplitude is located at the tail of the train, the same level with the nose; two strong side forces and one maximum suction force occur between the two trains in the whole process of the trains' meeting which will have a negative effect on the stabilities of the highspeed trains. The side force increases as the railway distance becomes smaller.

[**Key words**] high speed train trains' meeting in open air pressure wave

(上接第 3698 页)

6 Greer D, Hamory P, Krake K, *et al.* Design and predictions for a high-altitude (low-reynolds-number) aerodynamic flight experiment. NASA/TM - 1999 - 206579, 1999

7 恽起麟. 风洞实验. 北京:国防工业出版社, 2000

8 周瑞兴, 鄱忠祥, 解亚军, 等. 翼型实验阻力测量方法的探讨. 气动实验与测量控制, 1995; 9(4): 64-68

In-flight Measurement of Wing Section Drag Using the Momentum Method

CHU Jiang, WANG Xiao-jiang, JIAO Xiao-hui

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, P. R. China)

[**Abstract**] Flight test technology of wing section drag measurement using the momentum method has been discussed. The basic principle of the momentum method and the test aircraft are first briefly introduced, then focused on two kinds of test equipment: wake probe and wake rake, and put forward the flight test method and the test difficulties, finally, given a preliminary data processing method and uncertainty analysis. The flight test about wing section drag measurement has not been carried out in our country, the research can provide reference for future flight tests.

[**Key words**] flight test wing section drag momentum method wake probe wake rake