

文章编号:1002-7602(2009)03-0005-05

# 高速列车等速会车时气动作用力仿真分析

刘 杰, 李人宪, 赵 晶

(西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:基于三维、非稳态、粘性  $N-S$  方程及  $k-\epsilon$  两方程紊流模型,采用有限体积法仿真计算了 2 辆同外形列车等速交会时的动态过程,分析了会车时由列车壁面气体压力引起的气动阻力、侧向力、侧翻力矩及偏转力矩的变化特点。

关键词:高速列车;会车;气动作用力

中图分类号:U271.91 文献标识码:B

高速列车会引起空气动力学问题,尤其是当两列车高速交会时,两车之间的气流受到挤压发生强烈运动,对行驶的列车产生很强的压力波,使车体及乘客受到压力冲击。国内外不少学者对高速会车的气动作用进行过研究,通过实车测试、模型试验、数值计算,对会车压力波及影响因素进行了分析,并取得了一定的成果。本文采用计算流体力学的数值计算方法对列车交会引起的气动阻力、侧向力、侧翻力矩和偏转力矩及其变化进行仿真模拟,并得到其变化规律,为车辆及轨道的设计提供参考。

## 1 计算模型

### 1.1 基本假设

(1)列车运行速度大于 200 km/h 时,以车宽作为特征长度,所得外部流场的雷诺数  $Re > 10^6$ ,流场处于紊流状态,本文的计算采用  $k-\epsilon$  两方程紊流模型模拟这一紊态流场。

(2)忽略车体外部复杂结构细节,如受电弓、门把手、转向架突起物、车体连接部分等,假设车体表面完全光滑,并且交会的两列车头尾形状相同。为保证计算精度并节省计算机资源,取列车长度为 100 m。

### 1.2 数值模型

2 列交会列车周围的流场为三维、粘性、非稳态紊流流场,本文利用瞬态  $N-S$  方程及  $k-\epsilon$  两方程紊流模型来描述这一流场。流场控制微分方程为:

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \bar{u}) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad } u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_{Mx}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \bar{v}) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad } v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_{My}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \bar{w}) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad } w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_{Mz}$$

$$\text{紊动能方程: } \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \bar{u}) =$$

$$\text{div} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{k} \right) \text{grad } k \right] - \rho \mu_t P_G$$

$$\text{紊流耗散率方程: } \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon \bar{u}) =$$

$$\text{div} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{k} \right) \text{grad } \epsilon \right] - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} + \mu_t C_1 \frac{\rho}{k} P_G$$

$$\text{其中 } \mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon}$$

$$P_G = 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2$$

式中:  $u, v, w$  ——分别为速度  $\bar{u}$  在  $X, Y, Z$  坐标方向的分量, m/s;

——空气密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$\mu$  ——空气动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;

$\mu_t$  ——紊流黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;

$K$  ——紊流动能,  $\text{J/kg}$ ;

——紊流动能耗散率,  $\text{J/kg}$ ;

$C_1, C_2, C_\mu, k, \epsilon$  ——常数,经验值分别取 1.44, 1.92, 0.09, 1.0, 1.3。

方程组的求解采用有限体积法。

### 1.3 几何模型

以德国 ICE 列车的形状尺寸建立车体几何模型,取两轨道线间距为 4.7 m,交会前两车头相距 51.3 m。计算区域的高度与宽度约为车宽的 5 倍。为保证计算

收稿日期:2008-04-11

基金项目:高等学校博士学科点基金(2004061301);高等学校创新工程培育基金(705044);杰出青年基金(50525518)

作者简介:刘 杰(1982-),女,博士研究生。



精度,全部采用六面体网格划分求解区域,共划分有超过 88 万个网格。由于会车过程中两车之间存在相对运动,计算模型网格分成两部分,每部分包含 1 列车,分别以规定车速相对运动。两部分网格由 1 个滑动分界面相连接。交会前后某时刻两车头相对位置及网格分布如图 1、图 2 所示。

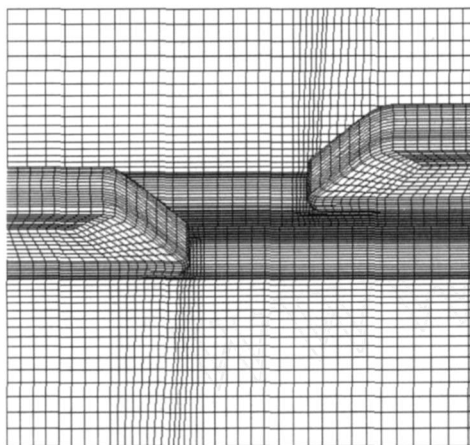


图 1 交会前某时刻两车头相对位置及网格

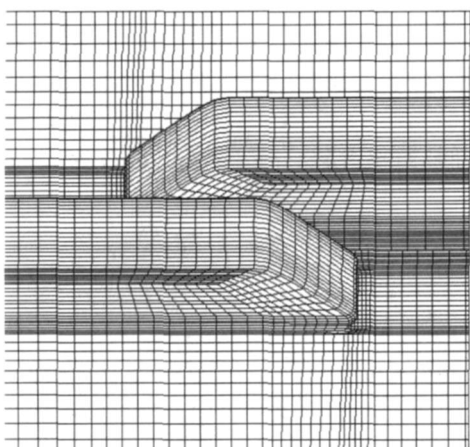


图 2 交会后某时刻两车头相对位置及网格

## 2 计算结果及分析

### 2.1 计算方法验证

高速列车交会时相对速度达 400 km/h 以上,理论上应考虑空气压缩性的影响。如果分别按可压缩流与不可压缩流计算,所得车头经过时侧窗上某点的压力波变化如图 3 所示。由图 3 可以看出,2 种方式计算的正负压力幅值几乎完全相同,且按可压缩流计算,车头通过后观察列车上压力值与实测值相比偏小。同时,相对于地面固定坐标系,列车诱导气流马赫数仍接近于 0.3。因此,本文仍按照不可压缩流场计算。

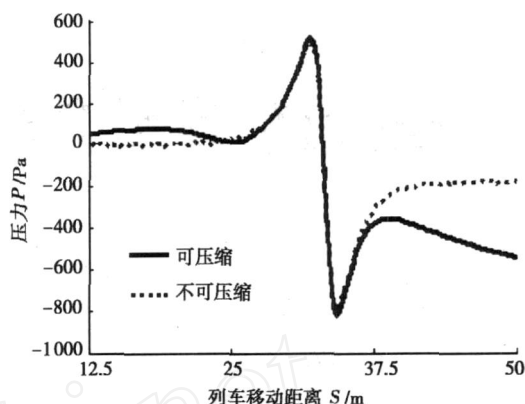


图 3 可压缩流与不可压缩流压力计算结果对比

为进一步验证计算模型和计算方法的正确性,与文献[2]中实测数据作对比分析。实测值为 ICE 列车在线间距为 4.7 m 的轨道上以 250 km/h 等速会车时车窗高度上所测的压力结果。计算时取测点位置为距地面高约 1.8 m、距车头 14 m 的侧壁上。车头车尾经过时测点压力变化的计算结果与实测值比较如图 4、图 5 所示。由图 4、图 5 可以看出,计算结果与实测结果相似程度很高,特别是 2 种方法所得压力变化幅值的误差均在 5% 以内,说明采用本文方法模拟会车时列车外流场具有足够的精确度,计算模型基本正确。

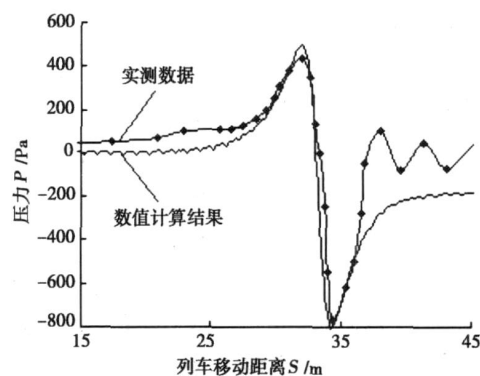


图 4 车头经过时测点压力变化

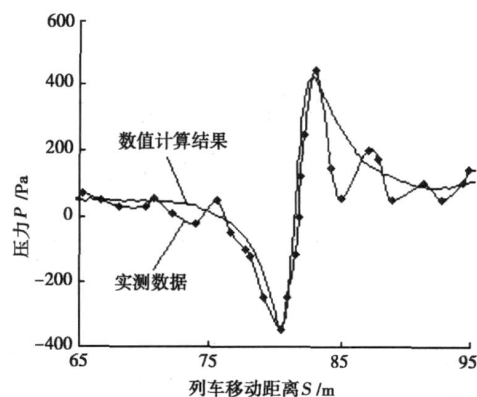


图 5 车尾经过时测点压力变化

## 2.2 列车交会时引起的气动力和气动力矩

研究列车交会时,通常将一列车称为通过列车,另一列车称为观察列车。通过列车对观察列车的气动作用力(矩)是要研究的现象(等速会车时两列车的相互作用相同)。利用上述模型分别计算了 200 km/h、250 km/h、300 km/h、350 km/h、400 km/h 5 种车速等速会车时的动态外流场。将计算得到的列车表面气体压力沿车体表面积分可得出流动空气对车体的作用合力,此合力在列车运行方向及垂直列车运行方向上的投影即为气动阻力、侧向力和升力。分力对不同轴取矩可得侧翻力矩、偏转力矩(也称摇头力矩)和俯仰力矩(也称点头力矩)。影响列车运行动力性的气动作用力主要有气动阻力  $F_d$ 、侧向力  $F_s$ 、侧翻力矩  $M_x$  和偏转力矩  $M_z$ ,所以本文只分析这 4 种作用力(矩)。按工程习惯分别以气动力系数和气动力矩系数的形式描述,各系数计算式如下:

$$\text{气动阻力系数: } C_d = \frac{F_d}{0.5 A v^2}$$

$$\text{侧向力系数: } C_s = \frac{F_s}{0.5 A v^2}$$

$$\text{侧翻力矩系数: } C_{M_x} = \frac{M_x}{0.5 A h v^2}$$

$$\text{偏转力矩系数: } C_{M_z} = \frac{M_z}{0.5 A l v^2}$$

式中: ——空气密度;

$A$  ——参考面积(取列车最大横截面面积);

$h$  ——力矩中心距轨面的高度;

$l$  ——车厢长度;

$v$  ——参考速度。

为突出气动力和气动力矩随车速的变化情况,这里取参考速度  $v$  为一固定值(83.33 m/s),这样,力和力矩系数的变化即反应了同一基准下气动力(矩)随车速的变化。为分析各节车厢的作用力(矩),将 100 m 长的列车分成长度相等的 4 节车,由车头向车尾编号依次为 1 号、2 号、3 号、4 号。1 号车为头车,4 号车为尾车。力矩中心取各节车厢长度和宽度的中心,高度  $h$  取 1.75 m,各节车力矩中心的局部坐标示意图如图 6 所示。

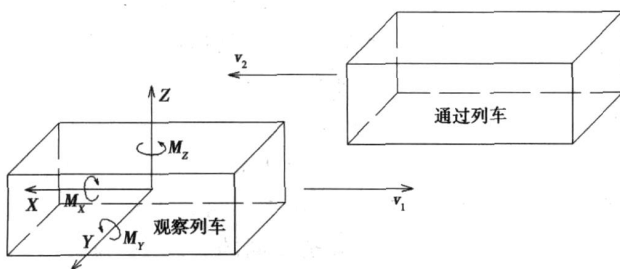


图 6 力矩中心示意图

### 2.2.1 气动阻力计算分析

5 种车速会车时整车(4 节车厢)的气动阻力系数  $C_d$  的计算结果如图 7 所示。由图 7 可看出,阻力系数  $C_d$  在会车开始时先小幅增大,后急剧减小,当通过列车车头与观察列车车头重叠时,  $C_d$  又有小幅回弹,之后阻力保持在低于单车运行阻力水平,直到通过列车车头与观察列车车尾相遇时  $C_d$  又进一步降低,随后急剧增大至一正峰值,再经过一个急剧下降和缓慢上升过程回复到会车前的阻力水平。总体上看,会车时气动阻力除极短瞬间超过单车运行阻力外,整个会车过程的气动阻力低于单车运行时的阻力值。图 8 为 2 次阻力系数变化幅值随车速的变化关系图,可以看出,2 个幅值随车速变化近似为二次方函数关系。

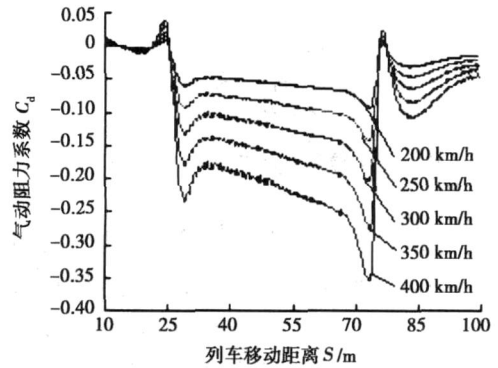


图 7 气动阻力系数  $C_d$  变化曲线

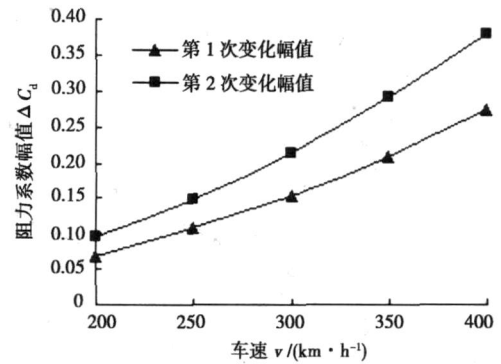


图 8 阻力系数幅值  $\Delta C_d$  与车速的关系

### 2.2.2 侧向力计算分析

以 250 km/h 的速度会车时 4 节车厢的侧向力系数  $C_s$  变化的计算结果如图 9 所示。可以看出每节车厢所受侧向力的变化趋势是一致的。图 10 为头车的侧向力系数变化曲线。

由图 10 可以看出,观察列车车厢所受侧推力发生 2 次变化:前一次变化是由通过列车的车头经过时引起的,使车厢受到先向(轨道)外后向内的侧推力;后一次变化是由通过列车的车尾经过时引起的,这些变化使车厢受到先向内后向外的侧推力。不同车厢受到的

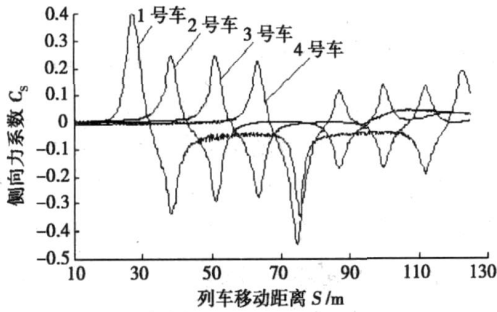


图 9 各车厢侧向力系数  $C_s$  变化曲线

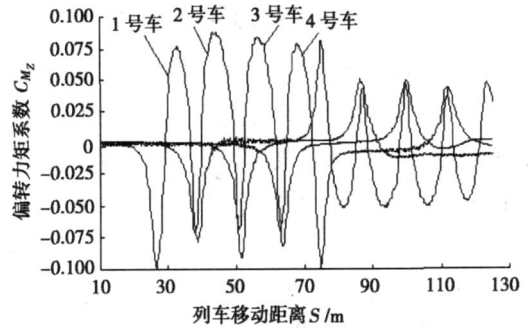


图 12 各车厢偏转力矩系数  $C_{M_z}$  变化曲线

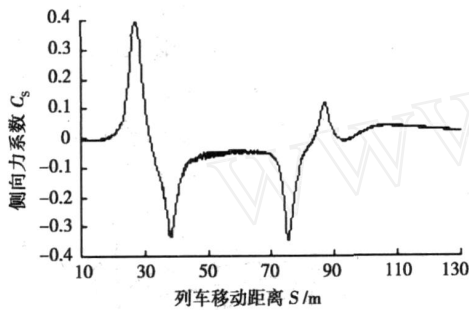


图 10 1 号车侧向力系数  $C_s$  变化曲线

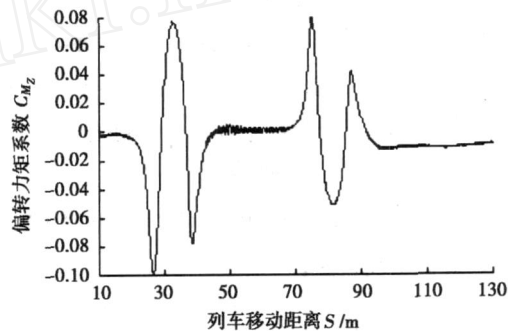


图 13 1 号车偏转力矩系数  $C_{M_z}$  变化曲线

2 次侧向力系数变化幅值  $C_s$  的大小依次为头车、尾车、中间车。两列车并行时车厢受到向内的侧推力。

不同车速会车时侧向力系数变化幅值  $C_s$  随车速的变化关系如图 11 所示。可以看出,无论是车头经过引起的  $C_s$  还是车尾经过引起的  $C_s$  都随着车速的增大而增大,且大致呈二次方函数关系变化。

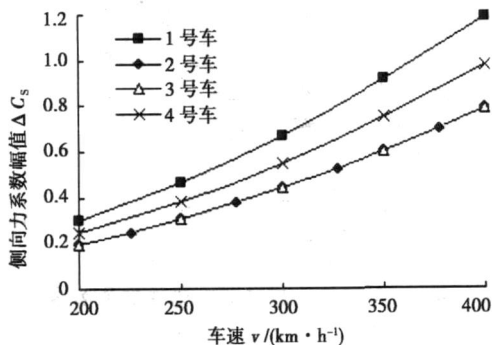


图 11 各车厢侧向力系数幅值  $C_s$  与车速的关系

### 2.2.3 偏转力矩计算分析

以 250 km/h 速度会车时 4 节车厢的偏转力矩系数  $C_{M_z}$  的计算结果如图 12 所示。可以看出每节车厢所受偏转力矩的变化趋势是相同的。图 13 为头车的偏转力矩系数变化曲线。

由图 13 可以看出,通过列车车头经过时  $C_{M_z}$  出现 2 个负峰值和 1 个正峰值;车尾经过时  $C_{M_z}$  出现 2 个正峰值和 1 个负峰值。负的  $C_{M_z}$  意味着车厢前部向轨道

外偏转;正的  $C_{M_z}$  意味着车厢前部向内靠拢。偏转力矩的变化主要由侧向力的变化引起,将图 10 与图 13 对比可发现,当通过列车车头经过且侧向力为正峰值时,侧向合力作用在车厢前半部分,形成负的偏转力矩,即  $C_{M_z}$  的第 1 个负峰值;当侧向合力逐渐减小时,车厢前后两部分所受侧向力发生变化,前半部分侧向力逐渐减小,后半部分侧向力逐渐增大;当两者大小相等、方向相反时,侧向合力为零,而偏转力矩则最大,即  $C_{M_z}$  的正峰值。当侧向力为负峰值时,侧向合力作用在车厢后半部分,形成负的偏转力矩,即  $C_{M_z}$  的第 2 个负峰值。同理,通过列车车尾经过时,  $C_s$  的正负峰值分别对应  $C_{M_z}$  的 2 个正峰值,  $C_s$  的零值点对应  $C_{M_z}$  的负峰值。偏转力矩的 4 次换向将使得会车时每节车厢都会在短时间内产生较剧烈的摇头振动。

通过列车车头经过时各车厢偏转力矩幅值大于通过列车车尾经过时的偏转力矩幅值,但均随车速的增大而增大。1 号车偏转力矩系数幅值  $C_{M_z}$  与车速的关系如图 14 所示。可以看出,通过列车车头和车尾经过时引起偏转力矩系数的 2 次变化幅值  $C_{M_z}$  与车速大致呈二次方函数关系变化。

### 2.2.4 侧翻力矩计算分析

以 250 km/h 速度会车时 4 节车厢的侧翻力矩系数  $C_{M_x}$  的计算结果如图 15 所示。可以看出每节车厢所受侧翻力矩的变化趋势是相同的。图 16 为头车的侧翻力矩系数变化曲线。

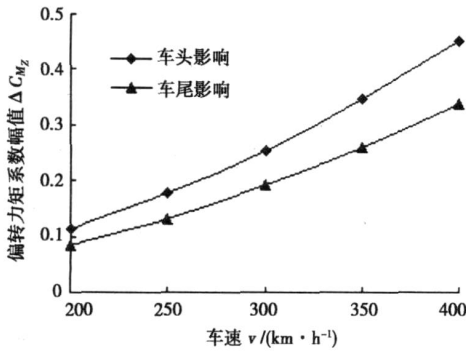


图 14 1 号车偏转力矩系数幅值  $\Delta C_{M_z}$  与车速的关系

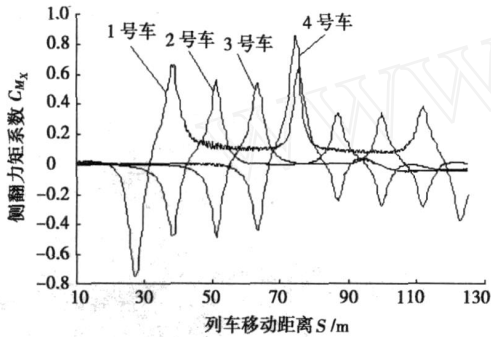


图 15 各车厢侧翻力矩系数  $C_{M_x}$  变化曲线

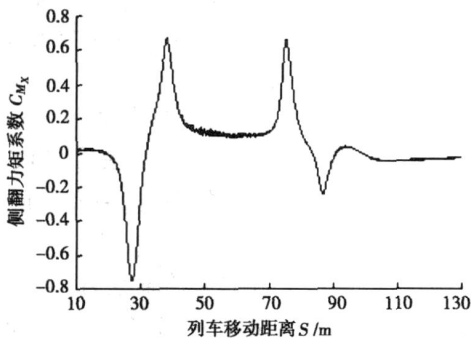


图 16 1 号车侧翻力矩系数  $C_{M_x}$  变化曲线

负的侧翻力矩系数意味着车厢有向外翻转的趋势;正的侧翻力矩系数意味着车厢有向内翻转的趋势。图 16 曲线表明,会车时观察列车车厢有 2 次侧翻力矩换向,分别是由通过列车车头和车尾经过时引起的。通过列车车头经过时,观察列车车厢有先向外后向内的翻转趋势;车尾经过时则相反,将使得各车厢先后发生侧滚振动。车头经过时的影响大于车尾经过时的影响。

通过列车车头经过时,观察列车头车向外侧翻力矩最大,尾车向内侧翻力矩最大,中间车的侧翻力矩大小基本相同。正、负侧翻力矩的极值与车速大致呈二次方函数关系变化。

### 3 结论

(1) 两列车交会过程中观察列车所受气动阻力出现 2 次剧烈变化,分别发生在通过列车车头经过观察列车车头和经过观察列车车尾时。会车过程中气动阻力比单车运行气动阻力减小约 10%~20%。

(2) 会车时各车厢所受侧向力在通过列车车头和车尾经过时各产生一次波动。车头经过时侧向力先向外后向内,车尾经过时则相反,即会车过程中观察列车车厢所受侧向力 2 次换向。

(3) 会车时各车厢所受偏转力矩发生 4 次换向,通过列车车头经过时,车厢前部先向外扭转,后向内扭转,再向外扭转;通过列车车尾经过时过程相反。

(4) 会车时各车厢所受的侧翻力矩经历 2 次换向,通过列车车头经过时车厢运动趋势为先向轨道外侧翻转后向轨道内侧翻转;车尾经过时过程相反。

(5) 侧向力、侧翻力矩和偏转力矩均随会车速度的增大而增大,大致呈二次方函数规律变化。

(6) 侧向力、侧翻力矩和偏转力矩在通过列车车头经过时的变化幅值均大于车尾经过时的变化幅值,意味着通过列车车头的气动影响大于车尾的气动影响。

#### 参考文献:

- [1] 王福天. 车辆动力学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1981.
- [2] Joseph A Schetz. Aerodynamics of high-speed trains [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2001, 33(3): 371—414.
- [3] Federal Railroad Administration of USA. Assessment Potential Aerodynamics Effects on Personnel and Equipment in Proximity to High-Speed Train Operations[R]. Washington: 1999.
- [4] 陆冠东. 高速列车的空气动力学问题 [J]. 铁道车辆, 2006, 44(10): 1—3.
- [5] 田红旗. 列车交会空气压力波研究及应用 [J]. 铁道科学与工程学报, 2004, 1(1): 83—89.
- [6] 田红旗, 贺德馨. 列车交会压力波三维数值的计算 [J]. 铁道学报, 2001, 23(3): 18—22.
- [7] 田红旗, 许平, 梁习锋, 等. 列车交会压力波与运行速度的关系 [J]. 中国铁道科学, 2006, 27(6): 66—69.
- [8] 毕海权, 雷波, 张卫华. 高速磁浮列车会车压力波数值计算研究 [J]. 空气动力学学报, 2006, 24(2): 213—217.
- [9] 李人宪, 刘应清, 翟婉明. 高速磁悬浮列车纵向及垂向气动数值分析 [J]. 中国铁道科学, 2004, 25(1): 8—12.
- [10] 李人宪. 有限体积分法基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

(编辑: 郭 晖)

# ABSTRACT

## Thinking and Assumption of Independent Innovation of Wheels for High Speed Cars in China

ZHANG Shu-guang ,et al.

(male ,born in 1956 ,senior engineer (professorial) ,the Ministry of Railways of the People 's Republic of China ,Beijing 100080 ,China)

**Abstract :**The wheels for high speed cars should have the features of fine cleanliness ,rational match of high strength and toughness and proper material properties which suit for the service conditions of high speed multiple units. The conditions and foundation for independent innovation of wheels for high speed cars in china are ready ,and should be included in the independent innovation system of high speed multiple units. The innovation shall be carried out according to the principles of systematicness ,advancement and practicability. The independent innovation and on-line service of wheels for 200 ~ 250 km/ h cars will be realized within 2 ~ 3 years and those for 350 km/ h or above will be realized within 4 ~ 5 years.

**Key words :**high speed multiple units ;wheel ;independent innovation

## Simulation Analysis of Aerodynamic Force for High Speed Trains Passing at the Same Speed

LIU Jie ,et al.

(female , born in 1982 , graduate student for doctor degreee , School of Mechanical Engineering of Southwest Jiaotong University , Chengdu 610031 , China)

**Abstract :**On the basis of the three-dimensional , unsteady-state , viscous  $N-S$  Equation and  $k-\epsilon$  two equation turbulence model , the simulation calculation is made with the finite volume method on the dynamic process of two high speed trains with the same contour passing at the same speed , and the variation features of the aerodynamic drag , lateral force , overturning moment and deflecting moment caused by the aerodynamic pressure on train surface while the two trains passing are analyzed.

**Key words :**high speed train ; train passing ; aerodynamic force

## Initial Discussion of Research in Aerodynamic Brake

TIAN Chun ,et al.

(male , born in 1977 , Institute of Railway & Urban Transit of Tongji University , Shanghai 201804 , China)

**Abstract :** The features of brake system for high speed trains with the speed higher than 350 km/ h are analyzed. The numerical simulation calculation is made for the train mounted with the air resistance braking plate , the value of the braking force genera-

ted by the designed air resistance braking plate is obtained , the effect of the braking force generated by the air resistance plate and the effect of mutual interference between the front and the rear braking plates are verified. The additional points caused by the aerodynamic brake are analyzed , and the relevant contents which need further research and discussion for the aerodynamic brake are pointed out.

**Key words :**high speed train ; aerodynamic brake ; computer simulation ; calculation result

## Development of Meter Gauge Flat Cars Exported to Sudan

XIAO Yan-mei ,et al.

(female , born in 1974 , engineer , Technical Center of Baotou Beifang Chuangye Co. , Ltd. , Baotou 014032 , China)

**Abstract :**Described are the technical parameter , structure features and testing of meter gauge flat cars exported to Sudan.

**Key words :**meter gauge flat car ; parameter ; structure ; test result

## Application of the Smoke Detecting Fire Alarm System on Metro Vehicles

XU Hui-lin

(male , born in 1969 , senior engineer , Development Department of BMTROC. Rolling Stock Plant , Beijing 100079 , China)

**Abstract :**The causes to fire on metro cars and the model selection requirements on the fire alarm system are analyzed. The composition , parameters , function , electrical interface , test method , operation test for the suction type smoke detecting fire alarm system are described. And suggestions on the model selection of the system are given.

**Key words :**metro car ; smoke detection ; fire alarm ; application

## Brief Description of Network Monitoring System for Qingzang Passenger Cars

HAN Jun ,et al.

(male , born in 1954 , engineer , Sales Service Center of CSR Sifang Locomotive and Rolling Stock Co. , Ltd. , Qingdao 266031 , China)

**Abstract :**The necessity to apply the whole-train network monitoring system for Qingzang Railway passenger cars is analyzed. The composition and main functions of the system are described.

**Key words :**Qingzang passenger car ; network monitor ; composition ; function

## The Air Source System on Metro Trains for No. 1 Beijing Metro Line