文章编号:1671-4598(2017)08-0230-04 DOI:10.16526/j.cnki.11—4762/tp.2017.08.059 中图分类号:U270.12 文献标识码:A

普速列车与动车组交会过程的车窗安全性研究

周丽名，陈春俊，王东威
(西南交通大学 机械工程学院，成都 610031)

摘要：随着既有线路上普通快速列车和动车组运行速度的提高，会车时两车之间的气动压力会明显增大；因此，会车压力波给交会的普通快速列车和动车组造成的舒适性和安全性等影响明显加剧；采用基于雷诺时均法（RANS）的 RNG k－e 二方程的湍流模型仿真计算普通快速列车时速 140 km 与动车组时速 200 km 时，明线和隧道两种工况下会车过程的压力波动情况，并用计算得到的车窗处压力从车窗玻璃的静强度、车窗玻璃的动态冲击强度和车窗安装强度三个方面分析了交会过程的车窗安全性；结果表明：明线会车过程两车交会侧车窗受正压和负压的影响，隧道会车过程两车交会侧车窗主要受较大的负压的影响；受压缩波和膨胀波的叠加影响，交会压力波的头波波峰和尾波波谷的波动较小，而头波波谷和尾波波峰的波动较大；在隧道会车时，动车组车窗中心处的负压极值最大值约为明线会车的 3.87 倍，压力波幅值最大值和最大压力平均变化率较接近；普通快速列车车窗中心处的负压极值最大值约为明线会车的 4.25 倍，压力波幅值最大值和最大压力平均变化率相差较大；车窗的长宽比越大，安装结构强度越大，安装结构越宽，安装强度越大。

关键词：明线会车；隧道会车；会车压力波；静强度；动态冲击强度；安装强度

Study on Safety of Windows in Intersection of Ordinary Fast Train and EMU

Zhou Liming, Chen Chunjun, Wang Dongwei
(College of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With the increasing of the speed of Ordinary Fast Train and EMU on the existing railway, the pneumatic pressure will be significantly increased when they passed each other. Therefore, the influence to the comfort and safety of ordinary fast train and EMU caused by passing pressure wave will clearly exacerbated. When ordinary fast train with the speed of 140 km/h and EMU with the speed of 200 km/h passed each other, the pressure during the process of rendezvous on open tracks and intersection in the tunnel was simulated and calculated by Reynolds averaged Navier — Stokes equations and RNG k—e equations. Meanwhile, the calculated results was used to analyze the safety of windows from three aspects respectively are the static strength, dynamic impact strength of window glass and window installation strength. Calculation results show that the side windows was effected by the positive and negative pressure when Ordinary Fast Train and EMU intersected on open tracks, it was mainly effected by the negative pressure during the process of rendezvous in the tunnel. By the superposition of the compressed wave and the expansion wave, the trough of the head wave and the peak of the coda wave fluctuate less, while the head wave troughs and tail wave crest of larger fluctuations, the maximal value of negative pressure at the window's center of the EMU is about 3.87 times that of the open line, and the maximum value of the amplitude of the pressure wave close to the average change rate of the maximum pressure. The maximal value of negative pressure at the center of the window of the Ordinary Fast Train is about 4.25 times that of the intersection on open tracks. There is a larger difference between the maximum value of pressure wave amplitude and the average change rate of maximum pressure. The greater the aspect ratio of the window, the greater the strength of the installation structure, the wider the installation structure, the greater the installation strength.

Keywords: intersection on open tracks; intersection in tunnel; passing pressure wave; static strength; dynamic impact strength; mounting strength

0 引言

随着近年来国内高速列车的快速发展，我国已成为高速铁路里程最长、速度最高的国家，且由于我国地理环境的复杂性，普通快速列车与动车组在既有提速线路上的明线和隧道交会是普遍存在的。而随着既有线路上普通快速列车和动车组运行速度的提高将导致会车时两车之间的气动压力明显增大。因此，会车压力波给交会的普通快速列车和动车组造成的舒适性和安全性等影响明显加剧。

国内外已有许多针对会车过程的气动作用的研究。如文献[1-8]对会车的压力波动的影响进行过许多数值模拟和实验研究，文献[9]针对会车压力波对高速列车运行稳定性的影响进行了深入的数值模拟研究，文献[10-12]研究了交会压

收稿日期:2017-02-24； **修回日期**:2017-03-15。
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475387)。
作者简介:周丽名(1992-)，男，四川南充人，硕士研究生，主要从事车辆空气动力学方向的研究。
陈春俊(1967-)，男，四川蒲江人，博士，博导，教授，主要从事自动控制、高速列车气动性能测试、车辆空气动力学方向的研究。

力波对列车车窗和车体的影响。到目前为止，研究动车组与动车组交会情况的居多，对普通快速列车与动车组交会的相关研究还鲜有报道。由于普通快速列车的外形和速度区别于动车组，二者会车过程产生的压力波动情况也区别于动车组之间会车产生的压力波动情况，因此，会车过程对列车车窗的影响也是有区别的。交会过程中安装结构和车窗玻璃的强度不够都会造成破窗事故的发生。文中使用 FLUENT 模拟普通快速列车时速 140km 和动车组时速 200km 的明线和隧道交会过程，得出两种会车工况下的普通快速列车和动车组表面的压力波动情况，并用计算得到的会车压力波进一步研究会车过程的车窗安全性。

1　数值模拟

1.1　数学模型及计算工况

文中主要仿真计算普通快速列车时速 140 km 与动车组时速 200 km 在明线和隧道会车两种工况，列车线间距均为 5 m。

1）会车过程中，两列车的位置在不断变化，属于瞬态问题；

2）普通快速列车时速 140 km 与动车组时速 200 km 会车，外部流场雷诺数 $Re>10^6$，故流场属于紊流流场；

3）在交会过程中，尤其是隧道交会时，两交会列车周围空气受到强烈的挤压，因此，流动按可压缩流处理；

综合以上几点，交会过程中的普通快速列车和动车组周围的流场是三维瞬态、可压缩的紊流流场。仿真计算时采用雷诺时均 Navier－Stokes 方程和 RNG k－e 方程的湍流模型。因为在交会过程中，两交会列车周围空气受到挤压，表现出强烈的可压缩性，空气密度改变，而密度跟温度有关，因此计算过程中要联立能量方程求解。雷诺时均形式的控制微分方程如下：

连续性方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0$$

动量守恒方程为：

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

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+div(\rho v\vec{u})=div(\mu\cdot gradv)-\frac{\partial p}{\partial y}+S_{My}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}+div(\rho w\vec{u})=div(\mu\cdot gradw)-\frac{\partial p}{\partial z}+S_{Mz}$$

能量守恒方程为：

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t}+div(\rho i\vec{u})=div\left[\left(\frac{\kappa}{c_p}+\frac{\mu_t}{\sigma_T}\right)gradT\right]+\Phi$$

湍动能方程为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+div(\rho k\vec{u})=div\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_K}\right)gradK\right]-\rho\varepsilon+\mu_t P_G$$

湍动能耗散率方程为：

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+div(\rho\varepsilon\vec{u})=div\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)grad\varepsilon\right]-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k}+\mu_t C_1\frac{\varepsilon}{k}P_G$$

式中，$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$

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

u,v,w 为速度 u 在 x、y、z 坐标方向的分量；ρ 为空气密度；μ 为空气动力粘度；μ_t 为湍流粘度；k 为湍流动能；ε 为湍流动能耗散率；T 为空气温度；κ 为空气热导率；c_p 为空气质量定压热容；C_1，C_2，C_3，σ_k，σ_ε 为常数；Φ 为耗散函数；$\Phi=\mu P_G$；S_{Mx}，S_{My}，S_{Mz} 为 x、y、z 方向动量方程的源项。

论文方程组的求解采用有限体积法[13-14]，数值计算分析采用 fluent 软件完成。

1.2　几何模型

由于动车组车厢间加有外风挡装置，且外风挡的高度尺寸相对于动车组的高度尺寸较接近，因此可认为动车组之间是紧密光滑连接的。列车转向架等结构对流场影响较小，且为了减小计算量，在不会影响计算结果的准确性的情况下，缩短列车长度。对某型 CRH 简化，忽略受电弓、门把手、转向架、车钩、风挡等，假设 CRH 壁面光滑，建立 CRH 的模型包括头车、尾车和一节中间车。普通快速列车的机车与客车、客车车厢间的间距较大，风挡结构的高度和宽度尺寸相对于列车的高度和宽度尺寸要小很多，因此普通快速列车的风挡结构对流场影响较大，不能忽略，对某型提速列车简化，忽略受电弓、门把手、转向架等，假设列车壁面光滑，建立普通快速列车的模型包括某机车和两节客车车厢。建立的明线会车模型如图 1 所示，隧道会车模型如图 2 所示。

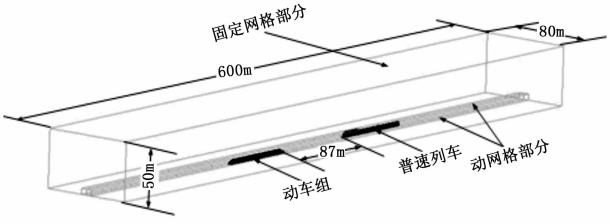


图 1　明线会车模型

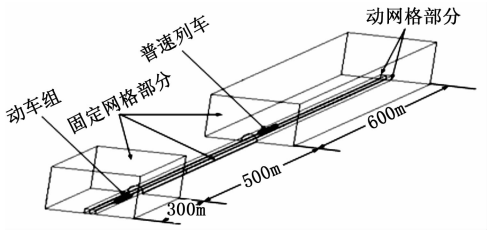


图 2　隧道会车模型

建立明线会车模型，计算区域为长宽高分别是 600 m、80 m、50 m 的矩形区域；建立隧道会车模型，隧道的长度和高度分别为 500 m 和 8 m，隧道外的计算区域长宽高分别为 200 m、80 m、50 m 的矩形区域。对普通快速列车和动车组车体表面、动网格区域、明线会车外部流场区域、隧道外流场区域和隧道区域划分结构网格（四边形和六面体网格），使用动网格技术模拟普通快速列车与动车组、车体与外流场之间的相对运动。

1.3　测点选取

由于本文关心的是交会侧车窗位置的压力变化，无论是普通快速列车还是动车组，都在每节车交会侧面车窗中心处布置

测点，把动车组分为 A、B、C 车，普通快速列车分为 a、b、c 车，分别对车窗进行编号，如图 3 和 4 所示，图中示意车窗忽略了车窗的倒圆角。

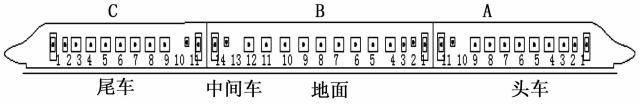


图 3 动车组测点布置

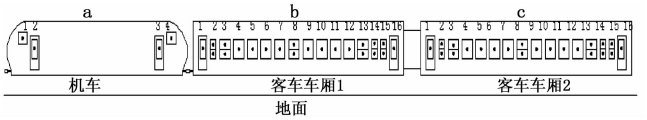


图 4 普通快速列车测点布置

1.4 模型验证

为验证计算模型和计算方法的准确性，将普列和动车组时速分别为 140 km 和 200 km 的明线交会仿真计算结果与实测数据进行对比。实测数据为达成线上明线交会动车组交会侧侧窗中心处的压力值。交会过程中的头波和尾波对比如图 5 所示。列车空气动力学的模型验证主要验证压力波的幅值，从图中可以看出，仿真计算结果的压力波峰值和幅值与实测数据相当接近，误差在 10％以内，说明建立的数值模型有足够的精度。

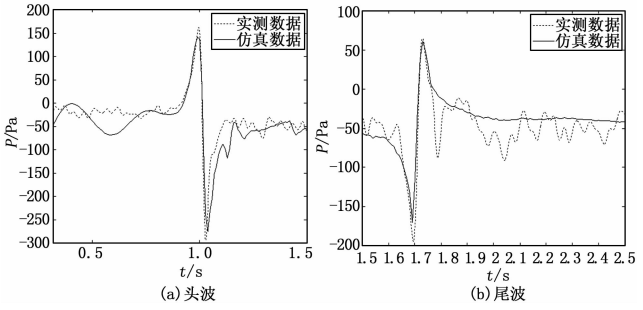


图 5 仿真与试验的头波和尾波对比

2 数值计算结果

由数值计算结果可以看出两车交会侧各测点压力波变化规律分别一致，因此可在普通快速列车和动车组上分别取其中一个测点分析两种工况的压力波变化情况。无论是明线还是隧道会车过程，在动车组的头部和尾部通过时，普通快速列车交会侧测点压力分别达到第一个、第二个波峰和波谷；在普通快速列车机车Ⅰ位端和客车车厢 2 的Ⅱ位端通过时，动车组交会侧测点压力分别达到第一个、第二个波峰和波谷。车厢连接处会对测点压力造成较小的扰动。

2.1 明线会车数值计算结果

图 6 和图 7 给出了动车组上 B8 号车窗中心处和普通快速列车上 b9 号车窗中心处测点在明线会车过程的压力波动情况，从两图中可以看出，测点压力在会车过程中发生两次较大的突变，使车窗受到两次较大的正压和负压的瞬态冲击，将会影响车窗的安全。

2.2 隧道会车数值计算结果

图 8 和图 9 给出了动车组上 B8 号车窗中心处和普通快速列车上 b9 号车窗中心处测点在隧道会车过程的压力波动情况，从两图中可以看出，受压缩波和膨胀波的叠加影响，交会压力波的头波波峰和尾波波谷的波动较小，而头波波谷和尾波波峰的波动较大，车窗受到极大的负压作用，可能会使车窗玻璃被吸出。

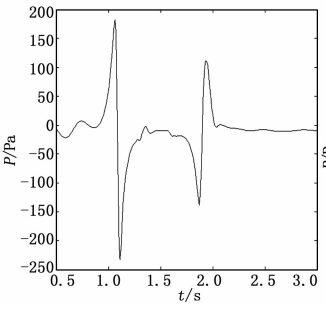


图 6 明线交会 B8 车窗中心处压力波

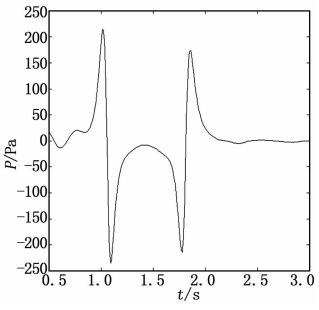


图 7 明线交会 b9 车窗中心处压力波

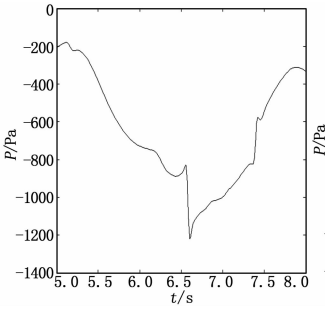


图 8 隧道交会 B8 车窗中心处压力波

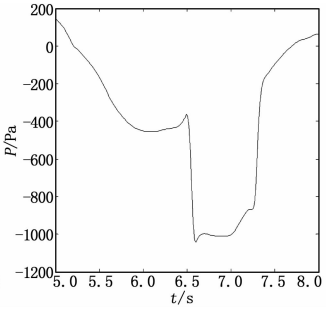


图 9 隧道交会 b9 车窗中心处压力波

3 车窗的安全性分析

3.1 车窗玻璃的强度分析

动车组和普通快速列车的车窗外层材料都是钢化玻璃，车窗玻璃强度主要包括静强度和动态冲击强度。

静强度是指玻璃能承受的最大静载荷即交会压力波的极值。根据 TB3107－2011“铁路客车单元式组合车窗”规定，车窗玻璃抗风压能力为≥3 500 Pa，两种工况交会过程的车窗位置压力波极值最大值如表 1 和 2 所示，由于隧道会车过程波峰及波谷均为负压，因此在考虑静强度的时候不考虑波峰值。

从表 1 和表 2 看出，明线会车和隧道会车过程中交会侧车窗中心处压力极值大小差别很大。对动车组来说，明线会车的最大波谷值约为－324.4 Pa，隧道会车的最大波谷值约为－1 255.3 Pa，后者约为前者的 3.87 倍；对普通快速列车来说，明线会车的最大波谷值约为－293.6 Pa，隧道会车的最大波谷值约为－1 247.8 Pa，后者约为前者的 4.25 倍。但是无论哪种工况，车窗受到的最大波谷值的绝对值均≤3 500 Pa。

表 1 动车组车窗中心处交会压力波极值

会车工况	明线会车	隧道会车
车窗最大波峰值/Pa	197	—
车窗最大波谷值/Pa	－324.4	－1255.3

表 2　普通快速列车车窗中心处交会压力波极值

会车工况	明线会车	隧道会车
车窗最大波峰值/Pa	270.1	—
车窗最大波谷值/Pa	−293.6	−1247.8

由于两车交会过程产生的压力波属于动态冲击载荷，在考虑车窗玻璃的强度的时候，必须考虑玻璃的抗动态冲击强度。通常用交会压力波幅值$\triangle p$及完成这个压力波的时间$\triangle t$来作为玻璃材料本身抗动态冲击强度的评价指标。

从压力波的波峰到波谷的平均压力变化率为：

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} \approx \frac{\triangle p}{\triangle t}$$

经过计算得到的$\triangle p$、$\triangle t$及$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}$如表 3 和 4 所示。

从表 3 和表 4 看出，对动车组来说，明线会车和隧道会车过程的交会侧车窗中心处的压力波幅值最大值分别为 442.5 和 466.5 Pa，几乎相等，最大压力平均变化率分别为 9 833.3 Pa/s 和 10 366.7 Pa/s，较接近；对普通快速列车来说，明线会车和隧道会车过程的交会侧车窗中心处的压力波幅值最大值分别为 532.0 和 736.4 Pa，相差 204.4 Pa，最大压力平均变化率分别为 11 822.2 Pa/s 和 16 364.4 Pa/s，相差较大。

表 3　动车组车窗中心处最大压力平均变化率

会车工况	明线会车	隧道会车
最大$\triangle P$/Pa	442.5	466.5
$\triangle t$/s	0.045	0.045
最大$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}$/(Pa/s)	9833.3	10366.7

表 4　普通快速列车车窗中心处压力平均变化率

会车工况	明线会车	隧道会车
最大$\triangle P$/Pa	532.0	736.4
$\triangle t$/ms	0.045	0.045
最大$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}$/(Pa/s)	11822.2	16364.4

3.2　车窗安装强度分析

普通快速列车与动车组的车窗安装方式不同，前者一般采用胶条安装，后者采用从外部粘接的方式安装。但无论哪种安装方式，在车窗玻璃材料本身的静强度和动态冲击强度足够的情况下，车窗所受的气动压力都要由周边的安装结构承受[12]。

假设车窗的长为a，宽为b，周长为l，面积为A，安装条的宽为c，面积为A_1，车窗所受的气动作用力为F。则安装条单位面积所受的力为：

$$\frac{F}{A_1} = \frac{F}{2(ac+bc)} = \frac{F}{2c(a+b)} = \frac{F}{2lc} \approx \frac{pA}{2lc} = \frac{pab}{2lc}$$

由上式可以看出，在车窗的面积一定的情况下，车窗的周长越长，安装条越宽，单位面积所受的力越小。也就是说，在其余条件一定的情况下，车窗的长宽比越大，安装结构越宽，安装强度越大。

4　结论

综合以上计算结果及分析，得出如下结论：

1）无论是明线还是隧道会车过程，在动车组的头部和尾部通过时，普通快速列车交会侧测点压力分别达到第一个、第二个波峰和波谷；在普通快速列车机车Ⅰ位端和客车车厢 2 的Ⅱ位端通过时，动车组交会侧测点压力分别达到第一个、第二个波峰和波谷。车厢连接处会对测点压力造成较小的扰动。

2）受压缩波和膨胀波的叠加影响，两车交会侧的交会压力波的头波波峰和尾波波谷的波动较小，而头波波谷和尾波波峰的波动较大。

3）明线会车过程两车交会侧车窗受正压和负压的影响，隧道会车过程两车交会侧车窗主要受较大的负压的影响。

4）对动车组而言，隧道会车交会侧车窗中心处的最大负极值约为明线会车的 3.87 倍，而压力波幅值最大值和最大压力平均变化率较接近；对普通快速列车而言，隧道会车交会侧车窗中心处的最大负极值约为明线会车的 4.25 倍，压力波幅值最大值和最大压力平均变化率相差较大。

5）如果车窗本身的静强度和动态冲击强度足够的情况下，还需要考虑车窗安装结构的强度。车窗的长宽比，安装结构强度越大，安装结构越宽，安装强度越大。

参考文献：

[1] 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.

[2] Joseph A S. Aerodynamics of high－speed trains [J]. Annual Review of Fluid Mechanics，2001，33 (3)：371－414.

[3] Robert A M，Samuel H，Harvey S L. Measurement of the Aerodynamic Pressures Produced by Passing Trains [A]. Proceedings of the 2002 ASME/IEEE Joint Rail Conference [C]. Washington，DC，2002. ETATS－UNIS，2002：57－64.

[4] Ricco P，Baron A，Molteni P. Nature of Pressure Waves Induced by a High－speed Train Travelling through a Tunnel [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，2007：95 (8)：781－808.

[5] 冯志鹏，张继业，张卫华. 高速列车在隧道内和明线上交会时气动性能对比分析 [J]. 铁道车辆，2010，48 (12)：1－5.

[6] 潘新先，姚松，曾林森. 挡风墙后动车组与普速列车交会气动特性 [J]. 铁道科学与工程学报，2016，13 (6)：1026－1029.

[7] 刘小燕，陈春俊，王亚南. 高速列车单车通过隧道压力波的研究 [J]. 设计与研究，2014，12 (41)：1－5.

[8] 刘小燕，陈春俊，何洪阳. 高速列车隧道会车时气动载荷的研究 [J]. 机械设计与制造，2014 (11)：161－164.

[9] 缪晓郎，陈春俊，李　森. 高速列车明线交会对列车的横向振动影响研究 [J]. 铁道学报，2014，36 (12)：14－19.

[10] 宋　烨，邬平波，贾　璐. 气动载荷对高速列车车体疲劳强度的影响 [J]. 计算机仿真，2015，32 (2)：194－199.

[11] 田红旗，姚　松，姚曙光. 列车交会压力波对车体和侧窗的影响 [J]. 中国铁道科学，2000，21 (4)：6－12.

[12] 李人宪，赵　晶，刘　杰，等. 高速列车会车压力波对侧窗的影响 [J]. 机械工程学报，2010，46 (4)：87－92.

[13] Versteeg H K，Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics [M]. London Longman Group Ltd，1995.

[14] 李人宪. 有限体积法基础 [M]. 北京：国防工业出版社，2008.