

文章编号:1671-6833(2017)02-0026-04

高速列车隧道等速交会条件下人体舒适度分析

张运良^{1,2}, 张志成¹, 杨伟超^{1,2}, 丁铭鸿¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410075)

摘要: 基于三维非定常黏性不可压缩 Navier-Stokes 方程和标准湍流模型, 利用 Fluent 流体计算软件, 建立高速列车隧道内等速交会数值计算模型. 模拟同样外形的两辆 CRH380HL 型高速列车以 4 种车速在隧道内交会时气动作用力的变化过程, 得出列车车体内外压力变化规律; 运用车体内部瞬变压力计算公式计算车厢内压力, 根据车厢内压力大小对乘客乘车舒适性做出评价.

关键词: 高速列车; 人体舒适度; 车内压力; 隧道等速交会

中图分类号: U25 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.007

0 引言

列车高速通过隧道或在隧道内交会时会产生剧烈、大幅和复杂的压力波动, 这些压力波动首先会造成高速运行列车的车厢外表面压力波动, 进而通过车体缝隙向车厢内传递, 造成车厢内压力急剧变化. 过大的车厢压力变化会导致乘客出现耳鸣、耳痛等不良症状, 严重条件下甚至会出现恶心、呕吐等问题. 车体压力与列车速度直接相关, 列车速度提高和车厢密封性能下降时, 这一问题将更加突出. 因此对车厢内的压力变化规律和乘坐环境的舒适度进行研究, 对我国高速铁路的发展具有重要意义.

车厢内人体舒适度与车体表面压力、车厢的密封性和个体敏感性等密切相关, 但本质是车厢内外压力的传递方法, 为此国内外很多学者就此问题展开研究. 文献[1-5]对列车高速驶入隧道时车体的表面压力进行了较深入的研究; 王建宇等^[6]对车厢内外压力的对应关系进行了现场实测, 结果表明, 当列车以 200 km/h 通过隧道时产生的压力变化即可对车厢内的乘坐舒适性产生不良影响. 李玉洁等^[7]根据气动力学的原理, 以德国和法国动车组气密性评价指标为例, 介绍了评价车辆气密性的时间常数法和等效泄漏孔面积法的物理模型及数学模型, 并开发了相关程序, 较好地处理了列车高速通过隧道时车厢内压力的计算问题. 但我国高速铁路大多数是单洞双线结构形

式, 列车在隧道内交会时靠近线路中线一侧车体压力远远大于另外一侧.

笔者运用 Fluent 流体计算软件, 对高速列车分别以 200、250、300、350 km/h 速度在 2 800 m 隧道内等速交会进行了针对性研究, 得到了列车在隧道内交会条件下车体表面压力的变化过程; 然后采用文献[8]的压力计算方法, 考虑车体两侧压力不相等的特性, 进一步推导出了车体左右两侧压力不平衡时的车厢内压力变化公式, 对高速列车隧道等速交会条件下车厢内的压力进行了计算, 得到了车厢内压力的变化规律和不同速度条件下车厢内压力峰值等影响乘坐舒适性的关键指标, 最后以此对不同列车速度下车厢内的人体舒适度进行了讨论和评价.

1 Fluent 计算理论与方法

1.1 控制方程

当列车速度 $v \leq 360$ km/h 时, 相应的马赫数小于 0.3, 列车绕流问题可以采用三维黏性不可压缩非定常流动来进行处理. 笔者采用 N-S 方程和标准湍流流动处理. 设 ϕ 为流场某一参数, 则对于任一控制容积 P , 流场控制方程统一写成^[5]

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_S [\rho \phi U - \Gamma_\phi \text{grad} \phi] dS = \int_V S_\phi dV, \quad (1)$$

式中: 当 ϕ 为 1、 U 、 e 、 k 和 ε 时, 式(1) 分别表示连续方程、动量方程、能量方程、湍动能方程和湍动

收稿日期: 2016-10-28; 修订日期: 2016-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478474)

作者简介: 张运良(1963—), 男, 湖南湘潭人, 中南大学副教授, 硕士, 主要从事隧道与地下工程研究, E-mail: 296450764@qq.com.

能耗散率 ε 方程; Γ_{ϕ} 和 S_{ϕ} 分别为广义扩散系数及广义源项; ρ 为空气密度.

为了封闭方程组,引入完全气体状态方程

$$P = \rho RT,$$
 (2)

式中: P 为压力; R 为气体热力学常数; T 为空气热力学温度.

1.2 车内压力计算公式

假设空气从列车车体外部渗入到车体内部的速度与车内外压差成正比,利用 Clapeyron 方程式得微分方程

$$\frac{dP}{dt} = k \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\sum_{j=1}^m S_{ij} P_{ij}}{\sum_{j=1}^m S_{ij}} \right) - 2kP. \quad (3)$$

对式(3) 积分,引入初始条件 $t = 0, P = P_0$ 得车内瞬变压力的计算公式

$$P = e^{-2kt} \left[\int_0^t k \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\sum_{j=1}^m S_{ij} P_{ij}}{\sum_{j=1}^m S_{ij}} \right) e^{2kt} dt + P_0 \right], \quad (4)$$

式中: J 为某一节车厢某侧第 j 个测区; m 为一节车厢某侧测区个数,文中头车与尾车 $m = 1$,中间车 $m = 7$; k 为表征车体密封程度的常数,是车厢密封指数 τ 的倒数; P_{1j} 、 P_{2j} 分别为车厢外部左右侧第 j 个测区的压强,是时间的函数; P_0 为初始时刻车厢内压力.

若在一次试验中车体表面每个压力测区的贴片面积相等,公式(4) 可简化为:

$$P = e^{-2kt} \left[\frac{k}{m} \int_0^t \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^m P_{ij} e^{2kt} dt + P_0 \right]. \quad (5)$$

密封指数 τ 物理意义为将车内外的压差降低到初始值的 38% 所需的时间,用于衡量车辆密封程度,密封性分级见表 1^[8]. 笔者取 $\tau = 10 \text{ s}$,则 $k = 0.1 \text{ s}^{-1}$.

表 1 车辆的密封程度

Tab.1 Seal extent of train

车辆类型	密封指数 τ
不密封车辆,例如用于支线	$\tau < 1 \text{ s}$
最低密封性,例如 Eurcity	$1 \text{ s} \leq \tau < 6 \text{ s}$
密封较好,例如德国 ICE1、法国 TGV	$6 \text{ s} \leq \tau < 10 \text{ s}$
密封很好,例如德国 ICE3、Transrapid	$\tau \geq 10 \text{ s}$

2 仿真建模

2.1 计算模型

笔者运用 Fluent 流体计算软件,采用滑移网格技术来模拟列车在隧道内等速交会. 计算流场划分区域如图 1 所示. 一区为隧道壁及出入口附近区域;二区为观测列车周围及行驶方向前后的区域;

三区为运动列车周围及行驶方向前后的区域.

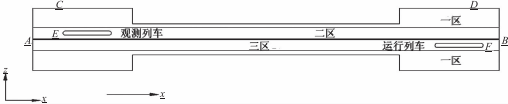


图 1 流场分区示意图

Fig.1 The schematic of flow field partition

列车设置为 3 节车厢编组,长度为 60 m,车型为 CRH380HL. 计算流场中 A 、 B 、 C 、 D 断面边界条件均设置为压力出口边界,即压力等于初始大气压;两列车车体表面均设置为无滑移壁面, E 、 F 区域交界面设置为动态附着边界条件;地面设置为无滑移壁面条件;在 x 方向列车运动速度分别设为 200、250、300、350 km/h, y 、 z 方向速度为 0.

2.2 测区布置

图 2 为观测列车右侧(观测列车与运动列车的交会侧)的测区布置图,各个断面左侧的测区与相对应的右侧测区处于同一高度. 图中 cty 为头车右侧测区, $cxy1$ 、 $cxy2$ 、 $cxy3$ 、 $cxy4$ 、 $cxy5$ 、 $cxy6$ 、 $cxy7$ 为中间车右侧测区, cwy 为尾车右侧测区.

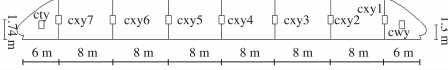


图 2 运动列车测区布置图

Fig.2 The layout of motion train surveyed area

2.3 网格划分

应用 ANSYS ICEM 划分结构化网格,共划分为 10 048 272 个单元,9 553 027 个节点,图 3 为车身和整体模型的网格划分示意图.

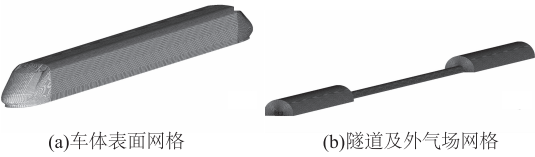


图 3 网格划分图

Fig.3 Meshing schematic

3 仿真结果与分析

3.1 交会条件下车体表面压力特性

为研究列车运行过程中车体表面压力时程变化规律,笔者以列车 350 km/h 运行时头车和尾车交会侧测点(cty , cwy)和非交会侧测点(ctz , cwz)模型计算结果为例进行分析. 列车交会运行时,观测列车车厢外压力变化过程如图 4 所示.

根据图 4 分析可知:①列车在进出隧道口及两车交会时,车体外部压力均会发生突变;②列车交会之前,非交会侧测区压力大于交会侧,这是由于非交会侧测区比交会侧测区与隧道壁面间的距

离小;③列车交会过程中,交会侧测区压力明显大于非交会侧,头车最大差值为 1 097.5 Pa,尾车最大差值为 1 121.6 Pa;④列车的头车经过测点时,测点压力会突然增大,这是由于头车高速运行时,车头空气压缩,产生压缩波,使得测点附近压力发生急剧的升高;⑤列车的尾车经过测点时,测点压力会突然减小.这是由于列车高速运行时,车后空气来不及填充车体经过时所占据的空间,出现负压,产生膨胀波,使得测点附近压力急剧降低;⑥列车的车身经过测点时,测点的压力维持在某一稳定值附近;⑦尾车测区压力的最大值要大于头车,但是列车交会时压力幅值基本相等.

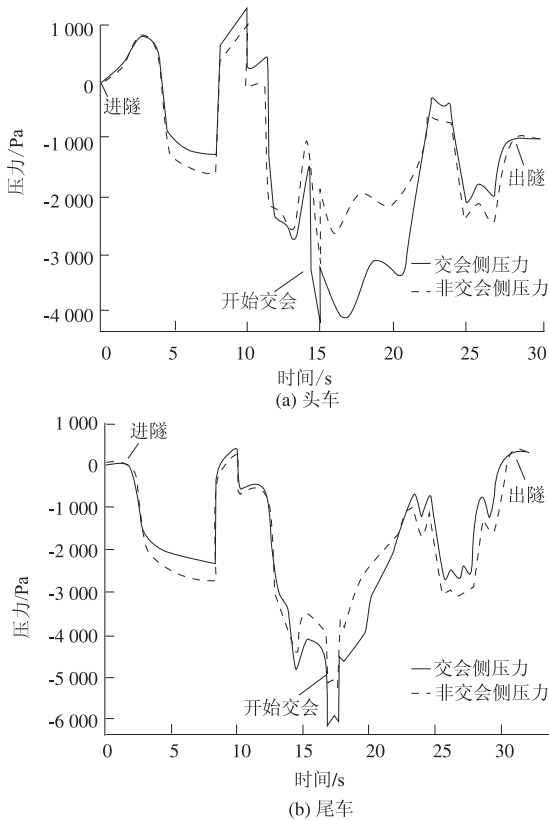


图4 车厢外压力时程图

Fig.4 Time-history curves of train outside pressure

3.2 列车车内瞬变压力时程变化基本规律

为验证计算模型的正确性,笔者将计算结果与文献[6]中实测数据进行对比分析.车厢内部压力实测值结果与数值模型计算结果均为列车在线间距为 5 m 的双线轨道上以 350 km/h 等速会车时获得.车厢内部压力计算值与实测数据如图 5 所示.

从图 5 可知:车内瞬变压力计算值与实测值很接近,说明笔者的数值计算模型比较合理;列车交会时,车内瞬变压力的变化率会发生突变;车厢内部的密封性会缓解和滞后车内压力变化,使得车厢内部压力最大值并不是在车外压力峰值出现,并且车厢内压力波动幅值明显小于车外;头车

与尾车车内瞬变压力变化趋势基本相同,但尾车车内瞬变压力最大值要大于头车.

3.3 车内瞬变压力与速度关系

列车在不同速度运行条件下,通过计算得出车体内瞬变压力幅值如图 6 所示.从图 6 分析可以得出,随着列车速度提高,车头、车尾及车身内瞬变压力幅值均呈非线性增长,压力幅值与速度接近二次方关系,如式(6)~式(8)所示.

头车车内压力: $P = -0.044v^{1.842}$, $R = 0.999$; (6)

尾车车内压力: $P = -0.030v^{1.921}$, $R = 0.998$; (7)

车身车内压力: $P = -0.071v^{1.721}$, $R = 0.999$. (8)

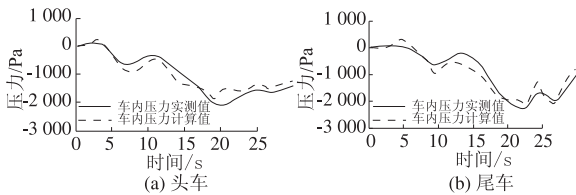


图5 车内压力计算与实测值

Fig.5 Train interior pressure of calculation and measuring

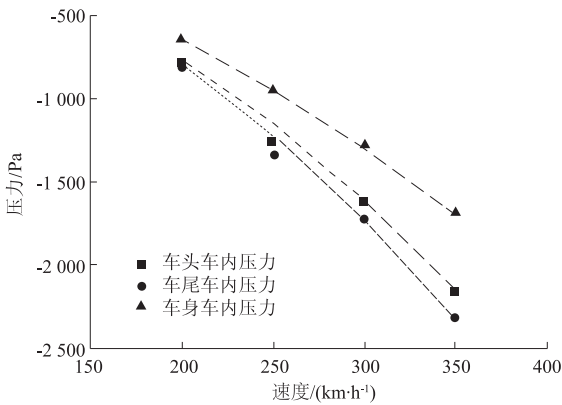


图6 不同速度车内压力幅值

Fig.6 Inside pressure amplitude of different speeds

3.4 人体舒适度评价

目前,人体的舒适性评价有两种方法,第一种方法是以压力变化幅值和压力变化率指标进行评估;第二种方法是考核某个时间段内压力变化幅值,这一段时间是根据人耳对外界气压变化完成自我调整所需时间来确定.第二种方法不仅考虑了压力变化幅值和压力变化率,还考虑了人体的生理需求,所以被大多数国家采用,并制定了相应标准.我国人体舒适度评价标准为 3 s 内压力变化幅值不得超过 1.25 kPa^[8].

笔者将计算出的车内瞬变压力时程值进行处理,找出任意 3 s 时间段内最大的压力差值,即为 3 s 内压力幅值.对不同速度条件下,头车、尾车及车身内 3 s 内压力幅值进行计算,并对乘客乘车舒适性做出评价,结果如表 2 所示.

表 2 不同列车速度舒适性评价

Tab.2 The comfort evaluation of different train speed

列车速度/(km·h ⁻¹)	头车/(kP·s ⁻¹)	舒适性	车身/(kP·s ⁻¹)	舒适性	尾车/(kP·s ⁻¹)	舒适性
200	0.649	正常	0.458	正常	0.783	正常
250	0.886	正常	0.729	正常	0.923	正常
300	1.167	正常	1.055	正常	1.249	不舒适
350	1.369	不舒适	1.258	不舒适	1.524	不舒适

分析表 2 可以得出,列车速度为 200、250 km/h 时,3 s 内压力幅值较小,车内瞬变压力对乘客乘车舒适性影响不大;当速度为 300 km/h 时,头车和车身 3 s 内压力幅值已经很接近人体舒适度临界值,尾车超过人体舒适度临界值,开始影响乘客的乘车舒适性;当列车速度为 350 km/h 时,整个列车内部 3 s 内压力幅值都超过人体的舒适度临界值,旅客会出现耳鸣现象,明显影响乘车舒适性。

4 结论

- (1) 车厢内部的密封性会缓解和滞后车内压力变化,使得车厢内部压力最大值并不是在车外压力峰值出现,并且车厢内压力波动幅值明显小于车外。
- (2) 车内压力增长幅值与列车运行速度均接近二次方关系,车内压力幅值最大值出现在尾车。
- (3) 当列车速度为 300 km/h 时,头车、车身 3 s 内压力幅值接近人体舒适度临界值,尾车超过人体舒适度临界值,开始影响乘客的乘车舒适性;当列车速度为 350 km/h 时,3 s 内压力幅值已经超过人体的舒适度临界值,明显影响乘车舒适性。

参考文献:

[1] 费瑞振,彭立敏,施成华,等. 高速铁路双隧道列车风特性与人员安全分析[J]. 郑州大学学报(工学版),2013,34(4):5-9.

[2] 施成华,杨伟超,彭立敏,等. 高速铁路隧道列车风作用下接触网安全性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(9):3652-3658.

[3] 梅元贵,孙建成,许建林,等. 高速列车隧道隧道交会压力波研究[J]. 交通运输工程学报,2015,15(5):34-43.

[4] 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):64-67.

[5] 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.

[6] 王建宇,吴剑,万晓燕. 车辆的密封性及瞬变压力向列车内传递规律[J]. 现代隧道技术,2009,46(3):17-21.

[7] 李玉洁,梅元贵. 动车组车辆气密性指标的初步探讨[J]. 铁道机车车辆,2009,29(2):31-35.

[8] 赵有明,马伟斌,程爱君,等. 高速铁路隧道气动效应[M]. 北京:中国铁道出版社,2012.

The Human Comfort Degree Analysis of High Speed Trains
Intersection at the Same Speed in the Tunnel

ZHANG Yunliang^{1,2}, ZHANG Zhicheng¹, YANG Weichao^{1,2}, DING Minghong¹

(1. School of Civil Engineering, Center South University, Changsha 410075, China; 2. National Engineering Laboratory of High Speed Railway Construction Technology, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on the three-dimensional unsteady viscous incompressible Navier-Stokes equations and the standard turbulence model, using the Fluent computational fluid dynamics software, the situation that the high-speed train intersected in tunnel by the same speed was simulated. Two CRH380HL of same shape were arranged to intersect in the tunnel at four kinds of speed to simulate the changing process of aerodynamic forces, and the data of internal and external pressures of train body was collected. Using the formula to calculate the interior pressure of train body, this paper presented the passenger comfort evaluation of different train speeds.

Key words: high speed trains; human comfort degree; the internal pressure; intersection in the tunnel