

# 高速列车明线会车压力波波幅研究\*

郝艳红<sup>1,2</sup> 毛军<sup>1,2</sup> 柳润东<sup>1</sup> 杨国伟<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学 轨道工程北京市重点实验室, 北京 100044;  
3. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 采用移动网格原理对列车明线交会的空气动力学特性进行了数值模拟. 修正了 Steinheur 经验公式, 并给出了等速交会的列车表面压力波波幅的新计算公式. 研究表明: 交会列车低速时对应的压力波幅值小于高速时的幅值; 波幅与交会速度、交会侧间距和监测点的高度有关, 并近似与列车运行速度的平方成正比; 交会侧间距越小, 波幅越大; 在其他条件不变的情况下, 交会侧间距比高度对压力波幅的影响大.

**关键词:** 高速列车; 交会压力波; 压力波幅值; 数值模拟; 边界层

中图分类号: U271.91

doi: 10.3969/j.issn.1000-565X.2016.03.017

两列列车高速交会时形成列车交会瞬态压力波, 造成车体的横向摆动, 对列车头部前窗、中部车厢玻璃以及空调进排风阀口等车体结构造成危害, 严重影响列车行驶安全性和旅客舒适度. 因此, 国内外对列车交会问题进行了大量的研究<sup>[1-6]</sup>, 并基于不同的方法得到了会车压力波波幅系数的一些计算公式<sup>[7-12]</sup>, 但是这些研究或者对列车的几何外形进行了过度简化, 或者对边界层模型进行了简化, 与实际情况有一定差异. 文中考虑从头车流线体曲面开始的边界层的影响, 并以我国 CRH 型高速列车在明线上交会为例, 根据其真实外形和细部结构建模, 采用 STAR\_CCM + 软件对高速列车以不同行驶速度的交会做了数值模拟计算. 最后结合数值模拟结果, 修正了 Steinheur 列车交会边界层模型, 在 Steinheur 给出的波幅计算经验公式的基础上, 修正了 Steinheur 经验公式, 并给出了等速交会的列车表面压力波波幅的新计算公式.

## 1 压力波波幅的一般形式

定义交会压力波波幅的系数  $\Delta C_p$ :

$$\Delta C_p = \frac{\Delta p}{0.5\rho v_r^2} \quad (1)$$

式中:  $v_r$  为相对速度  $v_r = v_1 + v_2$ ,  $v_1$ 、 $v_2$  是通过列车和观察列车的车速;  $\rho$  为流体密度;  $\Delta p$  为压力波波幅.

影响列车交会压力波的主要参量有: 列车交会速度  $v$ 、流线体段长度  $L_H$ 、等截面段水力半径  $R_H$ 、线间距或交会侧两壁面之间的间距  $Y$ 、监测点高度  $z$ 、车体离地高度  $\Delta h$ 、列车交会长度  $x$  以及流体密度  $\rho$  和动力粘性系数  $\mu$  等参量, 这些参量均采用国际单位制. 它们之间的关系可以表示为

$$\Delta p = f(v_1, v_2, L_H, R_H, Y, z, x, \Delta h, \mu, \rho) \quad (2)$$

由于列车交会侧会产生边界层, 两列车之间湍流核心区自由流动的通道宽度应该减去边界层的位移厚度.

在式(2)中用有效间距  $Y_f$  代替  $Y$  得到

收稿日期: 2014-10-08

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278032)

**Foundation item:** Supported by the National Natural Science Foundation of China(51278032)

作者简介: 郝艳红(1980-), 女, 博士后, 讲师. 主要从事高速列车空气动力学与行车安全、火灾安全等研究. E-mail: yhxi@bjtu.edu.cn

$$\Delta p = f(v_1, v_2, L_H, R_H, Y_f, z, x, \Delta h, \mu, \rho) \quad (3)$$

选取  $R_H, v_1, \rho$  为基本物理量进行无量纲处理, 得到:

$$\frac{\Delta p}{0.5\rho v_1^2} = f\left(\frac{v_2}{v_1}, \frac{L_H}{R_H}, \frac{Y_f}{R_H}, \frac{z}{R_H}, \frac{x}{R_H}, \frac{\Delta h}{R_H}, Re\right) \quad (4)$$

其中  $Re$  为雷诺数. 考虑到列车交会时中间气流的相对速度为各自速度之和, 将上式左边用相对速度代替观察列车的速度, 则有

$$\frac{\Delta p}{0.5\rho(v_1+v_2)^2} = \frac{1}{\left(1+\frac{v_2}{v_1}\right)^2} f\left(\frac{v_2}{v_1}, \frac{L_H}{R_H}, \frac{Y_f}{R_H}, \frac{z}{R_H}, \frac{x}{R_H}, \frac{\Delta h}{R_H}, Re\right) \quad (5)$$

定义车速比  $\lambda_v = v_2/v_1$ , 头型系数  $r = L_H/R_H$ , 无量纲有效间距  $\bar{Y}_f = Y_f/R_H$ , 无量纲高度  $\bar{z} = z/R_H$ , 无量纲交会距离  $\bar{x} = x/R_H$ , 无量纲离地间隙  $\bar{\Delta h} = \Delta h/R_H$ , 则上式变成

$$\frac{\Delta p}{0.5\rho v_1^2} = \frac{1}{(1+\lambda_v)^2} f(\lambda_v, r, \bar{Y}_f, \bar{z}, \bar{x}, \bar{\Delta h}, Re) \quad (6)$$

将上式右边的  $\lambda_v$  并入  $f$  函数中, 则有

$$\Delta C_p = f(\lambda_v, r, \bar{Y}_f, \bar{z}, \bar{x}, \bar{\Delta h}, Re) \quad (7)$$

该式为压力波波幅的一般表达式.

## 2 Steinheur 无量纲经验公式

Steinheur<sup>[12]</sup> 综合理论和试验研究成果, 使用列车交会侧壁面的边界层模型(如图1所示), 提出了计算交会压力波的无量纲经验公式:

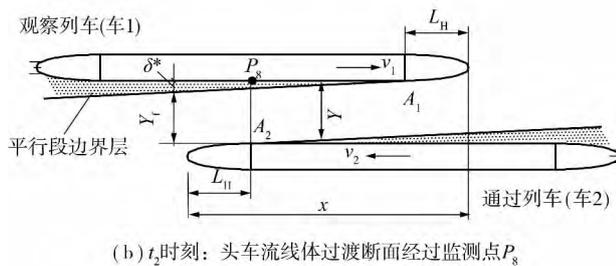
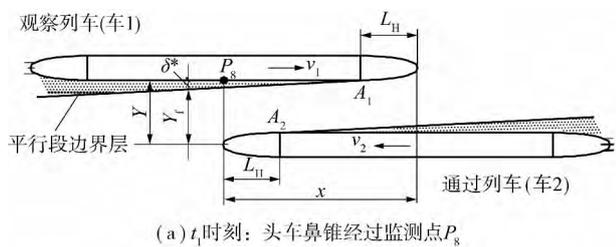


图1 文献[12]使用的列车交会侧壁面的边界层

Fig.1 Boundary layer of side wall surface of crossing high-speed trains used in the reference [12]

$$\Delta C_p = \frac{0.77(1+0.25\lambda_v)}{(1+\bar{Y}_f)^2} \left[ 1 + 0.65 \frac{3.46-r}{(1+\bar{Y}_f)^2} \right] \quad (8)$$

式中:  $\bar{Y}_f = Y_f/R_H, Y_f = Y - \delta^*$ ;  $\delta^*$  是位移厚度.

边界层的位移厚度  $\delta^*$ 、动量厚度  $\theta$  和形状因子  $H$  分别定义为:

$$\delta^* = \int_0^h \left(1 - \frac{u}{u_e}\right) dy \quad (9)$$

$$\theta = \int_0^h \frac{u}{u_e} \left(1 - \frac{u}{u_e}\right) dy \quad (10)$$

$$H = \frac{\delta^*}{\theta} \quad (11)$$

其中  $h$  为边界层厚度,  $u$  为边界层内的流动速度,  $u_e$  为主流速度,  $y$  为边界层增加的方向.

设边界层名义厚度为  $\delta$ , 一般地, 湍流边界层内的速度分布符合指数律:

$$\frac{u}{u_e} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (12)$$

$$\frac{\delta^*}{\delta} = \frac{1}{1+n} \quad (13)$$

根据试验, 在高雷诺数范围内,  $n=7$  的幂数律剖面与平板湍流边界层符合得很好<sup>[13]</sup>, 只在  $y=0$  和  $y=\delta$  的附近给出不正确的  $\partial u/\partial y$ , 不过并不影响后面的计算.

边界层厚度为

$$\delta = k^* z^{-0.37} x Re_x^{-\frac{1}{5}} \quad (14)$$

式中  $k^* = 0.73 \sim 0.92$ , 一般取  $k^* = 0.73$ . 该式是不符合量纲和谐原理的经验公式. 将式(14)代入式(13)得

$$\delta^* = \frac{1}{8} k^* z^{-0.37} x Re_x^{-\frac{1}{5}} \quad (15)$$

式中, 边界层雷诺数  $Re_x = v_2 x/\nu$ ,  $\nu$  为运动粘性系数,  $\nu = \mu/\rho$ .

## 3 Steinheur 边界层模型修正

图1中的壁面边界层的起始点是从车肩所在断面  $A_1, A_2$  开始的, 未考虑头车流线体段的边界层对平行段壁面边界层的影响. 图1(a)是通过列车的鼻锥尖经过监测点  $P_8$  的情形, 图1(b)是通过列车的流线体过渡断面  $A_2$  经过监测点  $P_8$  的情形. 这两种情况都只考虑观察列车上的壁面边界层位移厚度  $\delta^*$ . 利用式(15)、式(8)和式(1)可计算出交会侧平行壁面的压力波波幅值.

但是, Steinheur 公式在计算有效间距  $Y_f$  时忽略了头车流线体段的边界层厚度, 仅考虑了观察列车的位移厚度  $\delta_1^*$ , 即式(9)的  $\delta^* = \delta_1^*$ .

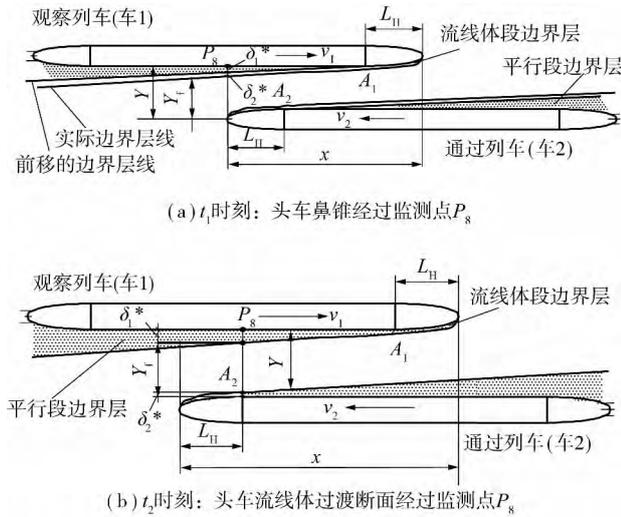


图2 文中采用的边界层模型

Fig. 2 Boundary layer model used in this paper

考虑流线体段边界层时, 列车交会侧壁面的边界层模型如图2所示. 由图2可知, 有效间距的表达式为

$$Y_f = Y - (\delta_1^* + \delta_2^*) \tag{16}$$

式中  $\delta_1^*$  相当于图2(a)中边界层从车肩断面开始的位移厚度, 按式(15)计算; 或相当于图2(b)中通过列车的车肩断面经过  $P_8$  点对应的观察列车的边界层厚度.  $\delta_2^*$  在图2(a)中相当于观察列车车肩断面  $A_1$  处的位移厚度, 在图2(b)中是通过列车车肩断面  $A_2$  处的位移厚度, 相当于观察列车车肩断面  $A_1$  处的位移厚度.  $\delta_2^*$  可以通过变换交会距离得到,

即假定车肩断面  $A_1$  与  $A_2$  相遇, 相当于交会长度为  $L_H$  时观察列车的边界层厚度.

将位移厚度  $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$  变换成满足量纲和谐原理的形式, 得到如下表达式:

$$\delta_1^* = \frac{1}{8} k^* z^m x Re_x^{-\frac{1}{5}} \tag{17}$$

$$\delta_2^* = \frac{1}{8} k^* z^m L_H Re_{L_H}^{-\frac{1}{5}} \tag{18}$$

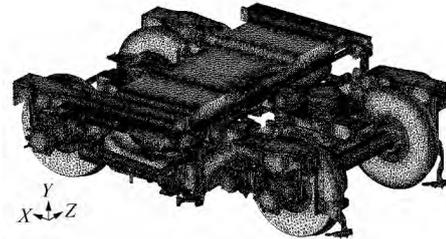
### 4 数值模拟

为了得到波幅系数及边界层厚度的表达式, 文中借助数值模拟手段, 对列车以不同速度交会时列车周身多个监测点的波幅值进行了分析.

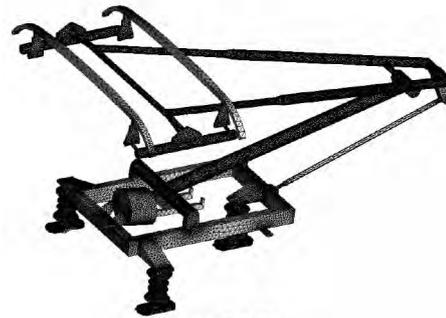
### 4.1 高速列车交会的计算模型与方法

#### 4.1.1 计算模型与条件

以 CRH 型高速列车为例, 采用3辆车编组, 即头车+拖车+尾车, 考虑真实的转向架和受电弓进行计算, 如图3所示. 对于高速列车的交会运动, 两条轨道的线间距为5m.



(a) 转向架



(b) 受电弓

图3 转向架和受电弓网格图

Fig. 3 Grid of bogie and pantograph

主要计算工况和条件是:

- (1) 车速分别为 250、300、350 km/h 等速交会;
- (2) 如图4所示, 用滑移网格的方法模拟列车的交会运动, 即: 将两个运动的列车划分为区域  $\alpha$  和区域  $\beta$ . 随着  $\alpha$ 、 $\beta$  两区域的运动, 区域边界网格在交界面处相互滑移, 两个流场的信息之间通过中间的交界面进行传递. 其中, 截面 5-6-7-8 和截面 13-

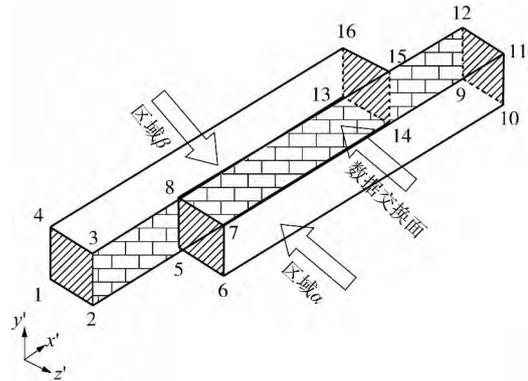


图4 列车明线交会场分区

Fig. 4 Field partition of crossing high-speed trains

14-15-16 设置为压力进口条件; 截面 1-2-3-4、截面 9-10-11-12 和两流域外侧及上顶面设置为压力出口边界条件; 区域  $\alpha$  和区域  $\beta$  设置运动边界条件, 在  $x'$  方向上的速度按两列车的运行速度分别给定, 在  $y'$ 、 $z'$  方向上的速度分量均为 0; 两交会列车车身表面和计算域下底面为无滑移边界条件, 两列车的交界处为滑移网格。

(3) 由于壁面以及粘性的作用使得近壁区域的流动处于低雷诺数状态, 表现出很强的不均匀性和各向异性, 近壁区内流动的特性使得适用于高雷诺数的湍流模型不能正确模拟近壁流动<sup>[14]</sup>。SST  $k-\omega$  湍流模型能适应压力梯度变化的各种物理现象, 可精确地模拟边界层的现象, 无需使用较容易失真的粘性衰减函数<sup>[15-16]</sup>。因此文中采用 SST  $k-\omega$  湍流模型对列车近壁区域的湍流特性进行研究, 流场内粘性流体为可压缩、非定常流动, 流动控制方程见文献 [17]。用有限体积法 (FVM) 将控制方程离散, 扩散项用二阶精度中心差分格式离散, 用分离式解法对离散后的控制方程组求解。使用 SIMPLE 法耦合压力-速度场, 压力采用迭代法修正。

#### 4.1.2 计算域及网格划分

列车交会模拟的计算域如图 5 所示。考虑到动车组尾部存在较强的横向流动, 且有一对称纵向旋涡产生, 为了尽量准确地计算列车交会的绕流流场, 计算域的下游边界设置在离动车组尾部较远的地方, 因此计算域尺寸取为  $2200\text{ m} \times 400\text{ m} \times 100\text{ m}$ 。

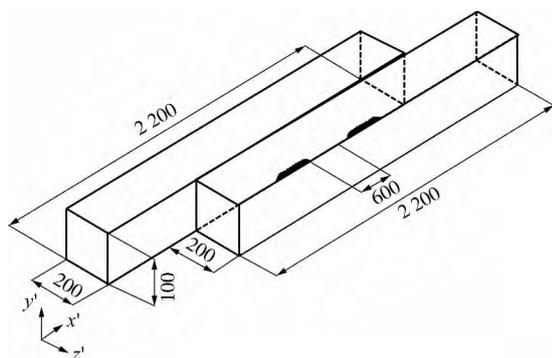


图 5 列车交会模拟的计算域(单位: m)

Fig. 5 Computational domain for train crossing simulation( Unit: m)

采用 Trim 网格和壁面函数法, 在车体表面及地面处生成边界层网格, 边界层网格的厚度为  $0.2\text{ mm}$ ; 层数为 13, 增长比为 1.5。加密列车表面和受电弓等流场变化较大区域的网格, 并采用逐级加密的方式加密列车尾流。计算域的网格总数约为 3100 万, 图 6 给出了壁面处的网格图。

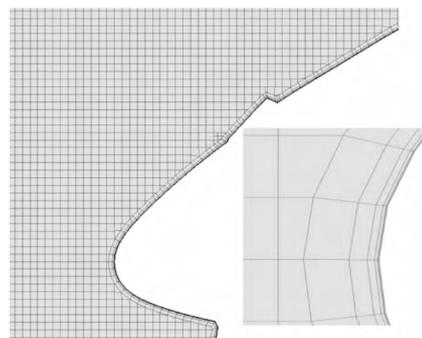


图 6 壁面处网格示意图

Fig. 6 Schematic diagram of computational grids of train wall

#### 4.1.3 列车上的压力监测点布置

从车头开始向后布置 18 个压力监测点, 监测点  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_{17}$ 、 $P_{18}$  离轨顶的距离为  $900\text{ mm}$ ;  $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$ 、 $P_8$ 、 $P_{13}$ 、 $P_{14}$ 、 $P_{15}$ 、 $P_{16}$  沿纵向等距离分布于会车侧面, 位于车体最宽处, 离轨顶的高度为  $1820\text{ mm}$ ; 过监测点  $P_8$  的横断面上布置监测点  $P_6$ — $P_{13}$ , 其中点  $P_6$ — $P_{10}$  沿高度方向分布于会车侧面上, 点  $P_{11}$  位于车顶, 点  $P_{12}$  位于非会车侧面上, 与点  $P_8$  的高度相同; 点  $P_{13}$  位于列车底部中轴线上, 如图 7 所示。两列车相遇时刻定为 0 时刻。

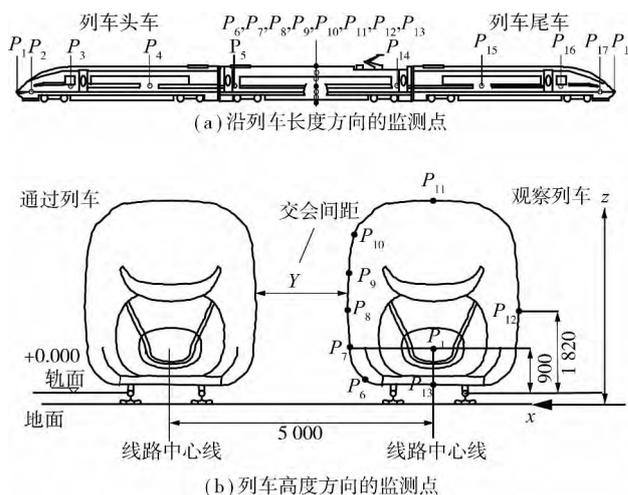


图 7 列车上的压力监测点分布示意图(单位: mm)

Fig. 7 Schematic diagram of pressure monitoring points distribution on the train( Unit: mm)

#### 4.2 数值模拟验证

为了保证数值模拟结果的正确性, 首先与在线实车实验结果进行了对比。

2008 年, 在京津城际铁路上进行了 CRH3 型动车组会车压力波试验, 试验线间距  $5\text{ m}$ , 两列车均为 8 辆编组, 在接近等速的条件下进行交会的试验速

度为 330 km/h.

#### 4.2.1 监测点布置

实验时在 5 个监测点布置了传感器,监测点布置见图 8. 其中监测点 1' 布置在车头第 1 和第 2 个车窗之间,距离车窗区域顶部 100 mm; 监测点 2' 布置在车头第 3 和第 4 个车窗之间,距离车窗区域顶部 300 mm; 监测点 3' - 5' 位于同一个测试断面,布置到第 1 节车的第 3 和第 4 个车窗之间,其中监测点 3' 位于车窗上沿的高度,监测点 4' 位于车窗中心高度位置,监测点 5' 距车窗下沿 160 mm 高度的位置.

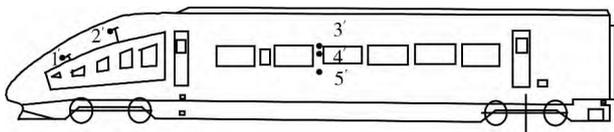


图 8 压力波测点布置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of pressure monitor points

#### 4.2.2 试验工况

由文献 [18] 可知,八节车 - 八节车等速交会和三节车 - 三节车等速交会得到的压力波及气动力变化趋势是相同的,且由两者得到的波幅及气动力的值最大只存在 3% 的误差. 因此,考虑到计算效率,文中进行了三节车 - 三节车等速交会的数值模拟,并和试验数据进行了对比,“头 - 头”会车压力波幅值如表 1 所示. 由表可知,数值模拟和在线实车试验值存在一定的误差. 形成误差的主要原因如下: ① 列车模型与数值模拟的几何模型之间存在几何误差; ② 数值模拟中没有设定风场,而实际在线试验过程中可能存在瞬态风场; ③ 试验中存在接触式测量误

差. 因此,虽然数值模拟与试验得到的压力波幅值存在一定的误差,但是合理的,且相对误差均在 8% 之内,满足工程的需要,可以认为数值模拟方法对分析高速列车的气动性能是适用的,数值模拟结果可以反映实际会车时侧壁上压力的变化情况.

表 1 数值模拟与试验结果对比

Table 1 Comparison between simulation and experiment

监测点	$\Delta p / \text{Pa}$		误差 / %
	试验值	模拟值	
1'	837	772	7.76
2'	817	768	5.99
3'	1012	946	6.52
4'	1167	1086	6.94
5'	1548	1455	6.00

## 5 等速交会的压力波波幅计算

如前所述,Steinheuer<sup>[12]</sup> 使用边界层模型提出了计算交会压力波的无量纲经验公式,但是忽略了头车流线体段的边界层对平行段壁面边界层的影响. 因此,为了更符合实际情况,需要对 Steinheuer 公式进行修正.

### 5.1 Steinheuer 公式修正

高速列车等速交会时,各个监测点的压力波波幅值如表 2 所示. 其中,监测点  $P_{18}$  处于尾流区,存在大量分离涡,具有非定常性、随机性和脉动性,致其压力变得不稳定,没有明显的波峰波谷值,故在表 2 中并未列出.

表 2 不同监测点的压力波波幅与速度的关系

Table 2 Relationship between pressure wave amplitude and velocity in different monitoring points

监测点	会车速度 / ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	头波压力 / Pa			尾波压力 / Pa		
		正波峰值	负波峰值	全波幅值	正波峰值	负波峰值	全波幅值
$P_1$	250	3012.09	2498.34	513.75	2980.00	2650.00	330.00
	300	4350.00	3603.10	746.90	4250.00	3810.00	440.00
	350	5920.00	5260.00	660.00	5810.00	5300.00	510.00
$P_2$	250	255.00	-600.00	855.00	-339.00	-652.00	313.00
	300	450.00	-860.00	1310.00	-461.00	-992.00	531.00
	350	628.00	-987.00	1615.00	-766.00	-1435.97	669.97
$P_3$	250	-8.40	-724.00	715.60	-328.00	-881.00	553.00
	300	37.55	-1164.79	1202.34	-477.00	-1630.00	1153.00
	350	85.71	-1560.00	1645.71	-737.00	-1570.00	833.00
$P_4$	250	321.39	-456.61	778.00	112.00	-305.00	417.00
	300	366.00	-750.00	1116.00	170.48	-488.00	658.48
	350	494.00	-1075.02	1569.02	228.00	-712.00	940.00

续表2

监测点	会车速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	头波压力/Pa			尾波压力/Pa		
		正波峰值	负波峰值	全波幅值	正波峰值	负波峰值	全波幅值
$P_5$	250	328.00	-467.82	795.82	118.00	-319.00	437.00
	300	407.00	-777.49	1184.49	241.00	-456.00	697.00
	350	510.49	-1090.83	1601.32	329.32	-681.00	1010.32
$P_6$	250	373.54	-362.06	735.60	128.00	-293.00	421.00
	300	476.00	-567.33	1043.33	248.00	-341.00	589.00
	350	646.00	-755.20	1401.20	383.00	-564.36	947.36
$P_7$	250	383.44	-392.56	776.00	152.00	-279.00	431.00
	300	471.00	-638.24	1109.24	275.00	-363.00	638.00
	350	638.00	-822.00	1460.00	410.00	-573.36	983.36
$P_8$	250	340.00	-466.33	806.33	132.00	-292.00	424.00
	300	424.00	-761.24	1185.24	239.00	-428.00	667.00
	350	579.00	-976.00	1555.00	370.12	-616.36	986.48
$P_9$	250	282.32	-516.79	799.11	126.00	-280.00	406.00
	300	636.00	-513.34	1149.34	199.00	-437.00	636.00
	350	504.00	-1008.00	1512.00	335.00	-603.36	938.36
$P_{10}$	250	172.10	-525.90	698.00	90.30	-236.00	326.30
	300	301.00	-699.10	1000.10	155.00	-327.00	482.00
	350	430.00	-925.00	1355.00	302.00	-512.36	814.36
$P_{11}$	250	81.29	-136.33	217.62	58.60	-155.40	214.00
	300	224.00	-242.24	466.24	89.90	-135.00	224.90
	350	335.00	-215.32	550.32	240.00	-340.36	580.36
$P_{12}$	250	11.13	-74.43	85.56	5.17	-117.00	122.17
	300	121.10	-158.94	280.04	3.53	-64.60	68.13
	350	198.10	-115.62	313.72	134.66	-295.46	430.12
$P_{13}$	250	171.51	-282.33	453.84	71.50	220.00	-148.50
	300	315.00	-460.24	775.24	120.00	-222.00	342.00
	350	445.00	-518.32	963.32	259.00	-458.36	717.36
$P_{14}$	250	363.00	-445.79	808.79	169.00	-302.00	471.00
	300	473.00	-672.00	1145.00	251.00	-400.00	651.00
	350	605.00	-950.00	1555.00	356.00	-550.00	906.00
$P_{15}$	250	389.00	-423.32	812.32	144.59	-346.00	490.59
	300	463.00	-676.04	1139.04	279.11	-406.00	685.11
	350	664.35	-913.65	1578.00	360.00	-545.00	905.00
$P_{16}$	250	-86.00	-951.00	865.00	-67.70	-530.00	462.30
	300	-68.10	-1160.00	1091.90	-123.00	-780.62	657.62
	350	82.00	-1591.28	1673.28	-427.00	-1070.00	643.00
$P_{17}$	250	49.90	-750.00	799.90	-19.50	-305.00	285.50
	300	53.00	-985.00	1038.00	4.88	-453.00	457.88
	350	89.70	-1470.00	1559.70	58.66	-625.00	683.66

利用式(1)、(8)和(15)可计算出交会侧平行壁面的压力波幅值,但计算的偏差较大,压力波幅值与数值模拟值最大相差18.37%,如表3所示.根据表2的数值模拟结果对Steinheur公式进行修正得到

$$\Delta C_p = \frac{0.77(1+0.25\lambda_v)}{(1+\bar{Y}_f)^2} \left[ 1 + 0.65 \frac{4.16-r}{(1+\bar{Y}_f)^2} \right] \quad (19)$$

式(19)的计算结果与数值模拟值比较接近,但普遍偏小.原因是:在计算有效间距 $Y_f$ 时忽略了头车流线体段的边界层厚度,仅考虑了观察列车的位移厚度 $\delta_1^*$ ,即式(9)的 $\delta^* = \delta_1^*$ .

## 5.2 考虑头车流线体段边界层的压力波波幅公式

由于边界层位移厚度 $\delta^*$ 与交会长度的 $x$ 、监测点高度 $z$ 有关,所以在式(7)中将 $\bar{x}$ 、 $\bar{z}$ 均考虑在 $\delta^*$ 中.

由于列车侧壁面的边界层从头车的三维侧壁流线体段的边界层算起,且在过渡断面出现分离泡,所以与平板边界层相比,流线体段的边界层厚度会比平板的增长得快一些.因此,根据平板湍流边界层得到的式(17)中的边界层雷诺数的指数(-1/5)的绝对值可以再小一些,经过与三维流动数值模拟结果(如表2所示)的比较验算,确定该指数为-1/6,无量纲高度的指数确定为 $m=0.37$ .另外,由于自由流动区的雷诺数很高(在 $10^7$ 量级),流动处于湍流粗糙区,式(7)中的自由流的雷诺数不再影响气动特性,即 $Re$ 的作用可以归并某一常数;离地间隙的作用这里未进行详细的对比分析,暂不考虑.

借鉴式(8),对部分参数进行调整,于是,波幅系数及边界层厚度的表达式可以变为如下形式:

$$\Delta C_p = f(\lambda_v, r, \bar{Y}_f) \quad (20)$$

$$\Delta C_p = \frac{0.77(1+0.25\lambda_v)}{(1+\bar{Y}_f)^2} \left[ 1 + 0.65 \frac{4.16-r}{(1+\bar{Y}_f)^2} \right] \quad (21)$$

$$\bar{Y}_f = \frac{Y - (\delta_1^* + \delta_2^*)}{R_H} \quad (22)$$

$$\delta_1^* = \frac{1}{8} k^* z^{-0.37} x Re_x^{-\frac{1}{6}} \quad (23)$$

$$\delta_2^* = \frac{1}{8} k^* z^{-0.37} L_H Re_{L_H}^{-\frac{1}{6}} \quad (24)$$

式中,边界层厚度计算系数 $k^* = 0.73$ .由式(20)~(24)及式(1)可以计算出交会列车等截面段的监测点的压力波波幅.

表3是使用Steinheur原始经验公式、修正的Steinheur经验公式以及文中提出的公式进行计算的结果.由表3可知,修正后的Steinheur公式与原始的Steinheur公式相比,更接近数值模拟结果, $P_3$ 、 $P_{16}$ 点的偏差在7%左右,其他点的偏差多为3%~4%,且普遍偏小;使用文中提出的公式进行计算, $P_3$ 、 $P_{16}$ 点的偏差也在7%左右,但其他点的偏差多为0.5%~2.0%.修正后的Steinheur公式的计算结果偏小的原因是其未考虑流线体段边界层厚度 $\delta_2^*$ .由该表还可知,如果不考虑 $\delta_2^*$ ,在大多数工况中引起的偏差还在工程可接受范围内.

由式(14)~(16)可知,在车速比、头型系数确定的情况下,交会波幅系数由有效交会间距 $\bar{Y}_f$ 或 $Y_f$ 决定. $Y_f$ 与几何交会间距(名义交会间距)成线性关系,监测点高度 $z$ 出现在边界层厚度的表达式中,其指数为0.37.因此,监测点的交会几何间距 $Y$ 比高度 $z$ 对压力波幅的影响更大.

需要指出的是,上述推导是在假定薄边界层存在并保持、边界层未被破坏的情况下得到的.边界层紊乱、边界层分离或边界层被横风破坏后,上述公式不再适用.表3中给出的列车头尾车肩处的压力波幅计算偏差较大就与边界层的近似性有关.

确定压力波波幅系数后,压力波幅可通过式(1)计算出来,即:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \Delta C_p \rho v_r^2 \quad (25)$$

根据式(20)~(24),对于等速交会,车速比 $\lambda_v = 1$ , $v_r = 2v$ ,头波压力波波幅系数 $\Delta C_p = f(r, \bar{Y}_f)$ 与车速隐式相关,车速出现在边界层厚度中,虽然对波幅系数的影响不是很大,但仍然存在.因此,压力波波幅值近似与速度的平方成正比.

## 6 压力波波幅的对比

为验证文中计算公式的适用性,与4.2节的在线实车试验值进行对比分析,如表4所示.由表可知,Steinheur原公式得到的波幅计算值与试验值的偏差在-16.94%~-24.88%之间,误差较大,而文中对Steinheur的修正公式和文中的计算公式与试验值的偏差均在9.24%之下,满足工程的需要.因此,使用文中提出的计算公式来计算交会压力波波幅值要比Steinheur原公式更加接近真实值.

表3 几种方法的压力波波幅与速度的关系

Table 3 Relationship between pressure wave amplitude and velocity of several methods

监测点	会车速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	波幅/Pa			计算偏差/%			
		模拟值	Steinheur 公式 计算值	修正 Steinheur 公式计算值	文中公式 计算值	Steinheur 公式	修正 Steinheur 公式	文中公式
$P_3$	250	715.60	684.54	760.63	776.09	-4.34	6.29	8.45
	300	1202.34	985.50	1094.90	1116.52	-18.04	-8.94	-7.14
	350	1645.71	1341.10	1489.84	1518.54	-18.51	-9.47	-7.73
$P_4$	250	778.00	687.90	766.35	781.64	-11.58	-1.50	0.47
	300	1116.00	990.17	1102.85	1124.24	-11.27	-1.18	0.74
	350	1569.02	1347.29	1500.34	1528.74	-14.13	-4.38	-2.57
$P_5$	250	795.82	695.02	779.26	794.04	-12.67	-2.08	-0.22
	300	1184.49	1000.13	1120.80	1141.52	-15.56	-5.38	-3.63
	350	1601.32	1360.50	1524.05	1551.62	-15.04	-4.83	-3.10
$P_6$	250	735.60	635.93	689.32	700.52	-13.55	-6.29	-4.77
	300	1043.33	914.85	991.42	1007.06	-12.31	-4.98	-3.48
	350	1401.20	1244.21	1348.10	1368.84	-11.20	-3.79	-2.31
$P_7$	250	776.00	670.82	738.79	751.46	-13.55	-4.79	-3.16
	300	1109.24	965.09	1062.49	1080.21	-13.00	-4.21	-2.62
	350	1460.00	1312.59	1444.65	1468.17	-10.10	-1.05	0.56
$P_8$	250	816.33	697.92	784.92	799.43	-14.51	-3.85	-2.07
	300	1185.24	1004.20	1128.69	1149.05	-15.27	-4.77	-3.05
	350	1555.00	1365.92	1534.49	1561.60	-12.16	-1.32	0.42
$P_9$	250	799.11	685.66	762.51	780.20	-14.20	-4.58	-2.37
	300	1149.34	986.20	1096.09	1120.87	-14.19	-4.63	-2.48
	350	1512.00	1341.05	1489.74	1522.70	-11.31	-1.47	0.71
$P_{10}$	250	698.00	629.85	681.22	701.59	-9.76	-2.40	0.51
	300	1000.10	905.33	978.78	1007.22	-9.48	-2.13	0.71
	350	1355.00	1230.42	1329.81	1367.50	-9.19	-1.86	0.92
$P_{14}$	250	808.79	700.18	789.60	803.84	-13.43	-2.37	-0.61
	300	1145.00	1007.40	1135.21	1155.23	-12.02	-0.86	0.89
	350	1555.00	1370.21	1543.12	1569.80	-11.88	-0.76	0.95
$P_{15}$	250	812.32	704.70	799.88	813.42	-13.25	-1.53	0.14
	300	1139.04	1013.84	1149.56	1168.67	-10.99	0.92	2.60
	350	1578.00	1378.88	1562.14	1587.69	-12.62	-1.01	0.61
$P_{16}$	250	865.00	706.06	803.33	816.60	-18.37	-7.13	-5.60
	300	1091.90	1015.80	1154.39	1173.14	-6.97	5.72	7.44
	350	1673.28	1381.54	1568.55	1593.66	-17.44	-6.26	-4.76

表4 几种方法的压力波波幅的对比

Table 4 Comparison of pressure wave amplitude of several methods

监测点	波幅/Pa					与实测值的偏差/%			与模拟值的偏差/%		
	试验值	模拟值	Steinheur 公式计算值	修正 Steinheur 公式计算值	文中公式 计算值	Steinheur 公式	修正 Steinheur 公式	文中公式	Steinheur 公式	修正 Steinheur 公式	文中公式
1°	837	772	628.79	759.66	761.70	-24.88	-9.24	-9.00	-18.55	-1.60	-1.33
2°	817	768	626.53	758.40	773.99	-23.31	-7.17	-5.26	-18.42	-1.25	0.78
3°	1012	946	840.52	915.00	930.11	-16.94	-9.58	-8.09	-11.15	-3.28	-1.68
4°	1167	1086	954.05	1062.00	1069.17	-18.25	-9.00	-8.38	-12.15	-2.21	-1.55
5°	1548	1455	1257.85	1423.00	1424.00	-18.74	-8.07	-8.01	-13.55	-2.20	-2.13

## 7 结论

文中考虑从头车流线体曲面开始的边界层的影响,修正了 Steinheur 列车交会边界层模型;利用动网格方法对真实列车模型等速交会进行了数值模拟计算,得到各速度下列车周身共 18 个监测点的压力波波幅值;结合数值模拟结果,在 Steinheur 给出的波幅计算经验公式的基础上,修正了 Steinheur 经验公式,并给出了等速交会的列车表面压力波波幅的新计算公式;在车速比、头型系数确定的情况下,交会波幅系数由有效交会间距决定;监测点的交会几何间距比高度对压力波幅的影响更大;压力波波幅值近似与速度的平方成正比。

### 参考文献:

- [1] 铃木 浩明. 车内压力波动引起耳鸣的研究 [J]. 国外铁道车辆, 1999(5): 15-18.  
铃木 浩明. A review of research trends on passengers' aural discomfort caused by rail tunnel pressure change [J]. Foreign Rolling Stock, 1999(5): 15-18.
- [2] 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: 781-808.
- [3] CHEN R L, ZENG Q Y, ZHONG X G, et al. Numerical study on the restriction speed of train passing curved rail in cross wind [J]. Science China Technological Sciences, 2009, 52(7): 2037-2047.
- [4] 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.  
BI Hai-quan, LEI Bo, ZHANG Wei-hua. Numerical study of the pressure load caused by high-speed passing maglev trains [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2006, 24(2): 213-217.
- [5] 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.  
LU Guan-dong. The aerodynamics points of high speed trains [J]. Rolling Stock, 2006, 44(10): 1-3.
- [6] 史龙龙 时瑾. 基于 LS-DYNA 的城际高速铁路高架线路等速双向会车动力响应分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(2): 48-54.  
SHI Long-long, SHI Jin. Dynamic response analysis of intercity high-speed railway bridge under crossing of two trains based on LS-DYNA [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(2): 48-54.
- [7] GAWTHORPE R G. Aerodynamics of trains in the open air [J]. Railway Engineering International, 1978(3): 7-12.
- [8] 雷波 刘应清. 明线上高速列车会车压力波的数值模拟 [J]. 西南交通大学学报, 1995, 30(3): 295-301.  
LEI Bo, LIU Ying-qing. Numerical prediction of pressure pulses on high-speed trains passing in open air [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1995, 30(3): 295-301.
- [9] 田红旗 梁习锋. 准高速列车交会空气压力波试验研究 [J]. 铁道学报, 1998, 20(4): 37-42.  
TIAN Hong-qi, LIANG Xi-feng. Test research on crossing air pressure pulse of quasi high speed train [J]. Journal of the China Railway Society, 1998, 20(4): 37-42.
- [10] ROBERT A M, SAMUEL H, HARVEY S L. Measurement of the aerodynamic pressures produced by passing trains [C] // Proceedings of the 2002 ASME/IEEE joint rail conference. Washington D C: ASME/IEEE, 2002: 57-64.
- [11] 李人宪 刘杰 戚振岩. 明线会车压力波幅变化规律研究 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(4): 125-130.  
LI Ren-xian, LIU Jie, QI Zhen-dang. Air pressure pulse developing regularity of high-speed trains crossing in open air [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(4): 125-130.
- [12] STEINHEUR J. Calculation of unsteady pressures during passing and tunnel entrance of trains [J]. ASME Aerodynamics of Transportation, 1979(6): 177-191.
- [13] 陈懋章. 粘性流体动力学基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [14] 赵吕顺 王丹华 叶建 等. 一种近壁理论湍流模型初探 [J]. 航空动力学报, 2005, 20(2): 177-181.  
ZHAO Lü-shun, WANG Dan-hua, YE Jian, et al. Initial study of a theoretical near-wall turbulence model [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(2): 177-181.
- [15] CHEN H J, MOSHFEGH B, CEHLIN M. Investigation on the flow and thermal behavior of impinging jet ventilation systems in an office with different heat loads [J]. Building and Environment, 2013, 59: 127-144.
- [16] MOHAMMAD M, SONG Y J, XIE Y H. Effects of near-wall grid spacing on SST-K-omega model using NREL

- Phase VI horizontal axis wind turbine [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 107/108: 94-105.
- [17] 周宇 钱炜祺 邓有奇.  $k-\omega$  SST 两方程湍流模型中参数影响的初步分析 [J]. 空气动力学学报, 2010, 28(2): 213-217.  
ZHOU Yu, QIAN Wei-qi, DENG You-qi. Introductory analysis of the influence of Menter's  $k-\omega$  SST turbulence model's parameters [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 28(2): 213-217.
- [18] LI T, ZHANG J Y, ZHANG W H. An Improved algorithm for fluid-structure interaction of high-speed trains under crosswind [J]. Journal of Modern Transportation, 2011, 19(2): 75-81.

## A Probe into Air Pressure Pulse Amplitude of High-Speed Trains Crossing in Open Air

*XI Yan-hong*<sup>1 2</sup> *MAO Jun*<sup>1 2</sup> *LIU Run-dong*<sup>1</sup> *YANG Guo-wei*<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Key Laboratory of Track Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

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

**Abstract:** The aerodynamic characteristics of high-speed trains passing by in open air are numerically analyzed on the basis of moving mesh. Then, the Steinheur empirical formula for calculating air pressure pulse amplitude is modified, and a new formula is presented. The results show that (1) the pressure pulse amplitude of low-speed trains passing by in open air is less than that of high-speed trains; (2) the amplitude is related to crossing speed, tracking distance as well as monitoring point height, and is basically proportional to the traveling speed square of trains; (3) smaller tracking distance results in higher amplitude; and (4) tracking distance has a greater effect on the amplitude in comparison with monitoring point height when other conditions keep constant.

**Key words:** high-speed train; crossing pressure wave; air pressure pulse amplitude; numerical simulation; boundary layer

(上接第 109 页)

## Risk-Based Probe into Appropriate Scour Depth of Bridge Under Multiple Hazards

*YANG Yan-kai* *MA Ru-jin* *CHEN Ai-rong*

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to guide the future design of new bridges or the assessment of existing ones, a multi-hazard design framework is proposed on the basis of risk-consistent design for bridges under earthquake and scour hazards, and the appropriate scour depth considering the earthquake is investigated. Firstly, a fragility analysis considering scour is carried out for the bridge under earthquake to obtain the fragility surface and fragility curve of the bridge. Secondly, two probabilistic risk models respectively corresponding to earthquake and scour hazards are proposed and are used to reveal the relationship between the failure probability under seismic hazard and the scour depth and to obtain the joint failure probability of the bridge. Then, the scour depth corresponding to joint failure probability is taken as the appropriate scour depth to make a comparison with the designed value, from which load combination factors for bridge design are determined. Finally, a case study on a suspend bridge is carried out. The results show that the proposed method effectively considers both bridge risk and economy, so that it lays a foundation for exploring the combined action of earthquake and scour hazards for bridges with different types and scales.

**Key words:** bridge; risks; earthquakes; scour; multiple hazard