

# 鼓形动力集中动车组 不同环境交会气动载荷数值研究

耿亚彬<sup>1</sup>, 于 淼<sup>2</sup>, 李国清<sup>2</sup>, 陈争卫<sup>3</sup>

(1. 中车唐山机车车辆有限公司 产品研发中心, 河北 唐山 063035;

2. 中车唐山机车车辆有限公司 技术研究中心, 河北 唐山 063035;

3. 中南大学 轨道交通安全教育部重点实验室, 湖南 长沙 410075)

**摘要:**列车交会对车身产生冲击,影响车窗玻璃强度和空调进风性能等。为评估新研发的鼓形动力集中动车组不同情况下交会的车身压力变化,采用滑移网格技术,基于三维可压非定常雷诺时均方法和 SST  $k-\omega$  湍流模型,分析了隧道内不同线间距和不同车速,以及侧风环境下不同风速和不同车速的列车交会压力。结果发现,隧道内列车等速交会、相同线间距下,  $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$  和  $\Delta P$  随车速增加而增大;同一速度下,  $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$  和  $\Delta P$  随线间距增加而减小。风环境下列车交会,迎风侧列车的交会侧压力变化幅值最大。隧道内列车最大压力变化幅值远大于侧风下的压力幅值,隧道为侧风下的 2.4~3.2 倍。

**关键词:**列车;隧道交会;侧风交会;计算流体动力学

**中图分类号:** U215.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2021)04-0073-08

随着我国高速列车的发展,随之而来也产生了许多问题,包括车桥耦合振动、噪声、空气动力学影响等<sup>[1-3]</sup>。其中,高速列车交会产生的压力波动会对车体疲劳强度和侧窗产生影响,影响列车交会强度的因素包括车速、列车外形等<sup>[4-5]</sup>。对于列车隧道内交会,Chen et al<sup>[6]</sup>研究了沿隧道不同纵向风速对列车交会影响、气动载荷和压力的影响。Chen et al 等<sup>[7]</sup>比较研究了不同流线型长度列车隧道内交会的气动力变化和流场变化。Liu et al<sup>[8]</sup>研究了列车隧道交会产生的压力瞬变对列车车体结构强度的影响。除隧道列车交会外,列车明线交会气动性能也受到了广泛关注。Huang et al<sup>[9]</sup>采用非定常可压缩数值模拟方法,研究了两磁浮列车以 430 km/h 的速度明线交会的瞬态流场。Li et al<sup>[10]</sup>采用风洞实验,研究了简支箱梁桥上,横风作用下高速列车交会时的气动性能。曾广志等<sup>[11]</sup>建立了城际列车不同头部外形方案,并基于三维瞬态不可压的 N-S 方程和  $k-\epsilon$  湍流模型,研究了流线形头部长度和纵向对称面最大控制形线变化对列车明线交会压力波及气动力的影响。

针对我国新开行的动力集中动车组,由于原有车型为直壁车体截面,为优化其气动性能,研发了新型鼓壁动力集中动车组,需对其展开气动性能研究。基于该鼓壁动力集中动车组全编组模型(9 节车),研究了其隧道内不同线间距和不同车速,以及侧风环境下不同风速和不同车速的列车交会压力,重点分析了车身侧窗压力峰值、车窗交变载荷峰值的压力变化等。

## 1 计算模型及方法

### 1.1 计算模型

列车 9 节编组分别命名为 C1~C9,车身外形尺寸如图 1 所示,具体研究工况见表 1。其中隧道内工

收稿日期:2021-07-11 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20210158

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201304)

作者简介:耿亚彬(1983-),男,高级工程师,研究方向为客车车辆设计。E-mail: sjc-gengyabin@tangche.com

耿亚彬,于淼,李国清,等.鼓形动力集中动车组不同环境交会气动载荷数值研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(4):73-80.

况后文简写为 160-4.4、200-4.4、160/200(默认线间距 4.4 m)、160-4、200-4。侧风工况简写为 160-10、160-20、160-30、200-20。

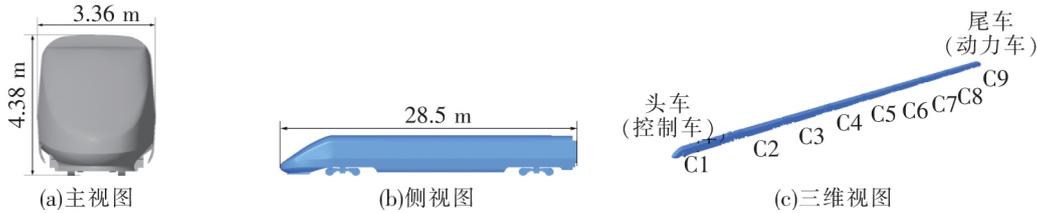


图 1 列车计算模型

表 1 研究工况

隧道交会		侧风交会	
隧道参数	车速	线路条件	车速及风速
横截面 80 m <sup>2</sup> , 长 1 784 m, 线 间距 4.4 m	160 km/h 等速交会(后文简写为 160-4.4)、 200 km/h 等速交会(后文简写为 200-4.4)、 160 km/h 与 200 km/h 不等速交会(后文简 写为 160/200)	线间距 4.4 m	160 km/h 等速交会、10 m/s 侧风(后 文简写为 160-10)
			160 km/h 等速交会、20 m/s 侧风(后 文简写为 160-20)
横截面 80 m <sup>2</sup> , 长 1 784 m, 线 间距 4 m	160 km/h 等速交会(后文简写为 160-4)、 200 km/h 等速交会(后文简写为 200-4)		160 km/h 等速交会、30 m/s 侧风(后 文简写为 160-30)
			200 km/h 等速交会、20 m/s 侧风(后 文简写为 200-20)

## 1.2 数值方法

采用三维可压非定常雷诺时均(URANS)方法和 SST  $k-\omega$  湍流模型来分析列车的车身压力。SST  $k-\omega$  湍流模型结合了标准  $k-\epsilon$  模型和标准  $k-\omega$  模型的优点,两方程式 SST  $k-\omega$  模型使用湍动能  $k$  及其耗散率  $\omega$  作为解变量。其具体控制方程可参见文献[12]。计算基于 Fluent,控制方程使用有限体积法(FVM)离散,对流和扩散项使用二阶迎风格式离散,速度-压力耦合和求解过程基于 SIMPLE 算法,时间步长设置为  $\Delta t=0.001$  s。

## 2 计算域及网格

如图 2(a)所示,列车交会的隧道横截面积为 80 m<sup>2</sup>,隧道长度参照标准 EN14067<sup>[13]</sup>中最不利交会隧道长度公式计算得出

$$L_{tu} = \frac{c}{2} \left( \frac{L_{tr,1}}{V_{tr,1}} + \frac{L_{tr,2}}{V_{tr,2}} \right) \quad (1)$$

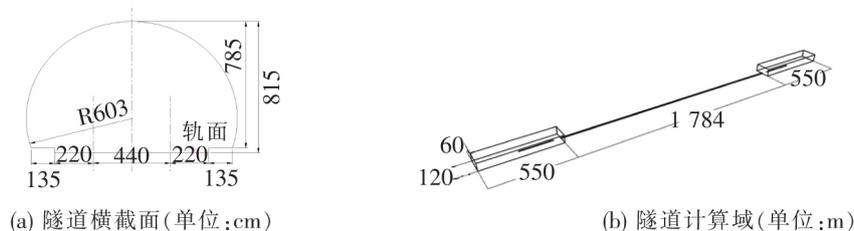


图 2 列车隧道交会计算域

式中,  $L_{tr}$ 、 $V_{tr}$  分别为列车长度(233 m)及车速 44.44 m/s(160 km/h);  $c$  为声速(340 m/s)。计算得到 9 车编组时最不利隧道长度为 1 784 m。列车隧道内交会计算域如图 2(b)所示。采用滑移网格计算方法,列车所在滑移块给定固定车速的运动边界条件;计算域底面、两侧面和顶面,以及隧道壁面,给定无滑移壁面边界条件;入口和出口给定零压力出口边界条件。列车明线交会计算域如图 3 所示,同样采用滑移网格方法。为了使流动在计算域内充分发展,在横风方向上,迎风侧预留 80 m 的距离,背风侧距离压力出口边界的距离为

120 m,可以保证横向流动发展的充分性。图 3 中迎风侧给定速度入口,背风侧给定零压力出口边界条件;计算域上下及两侧面给定无滑移壁面边界条件。图 4 为隧道和列车计算网格示意图。列车表面最小网格为 0.01 m,其中隧道交会模型共约 6 000 万网格,侧风交会约 8 000 万网格。由于流场速度变化主要集中在列车表面周围,因此对列车附近进行网格加密处理。

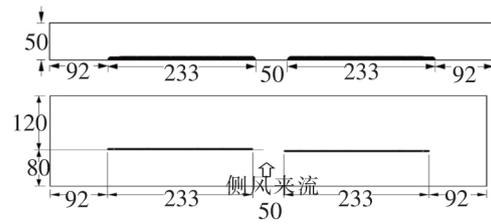
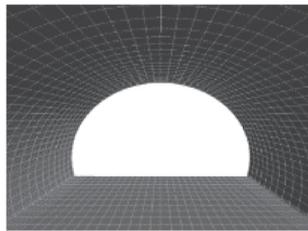


图 3 列车侧风交会计算域侧视图和俯视图(单位:m)



(a)隧道内网格



(b)车体表面网格

图 4 计算网格

### 3 压力测点布置

图 5 分别为头车、第 2 节车、第 4 节车(第 4 至第 8 节车测点布置相同)以及尾车的压力测点位置。头车及第 1 节中间车每一个侧窗设置一个压力测点,其余车只在车身中间位置窗户设置一个压力测点。对于列车交会,图中括号外测点为交会侧测点,括号内测点为非交会侧测点。

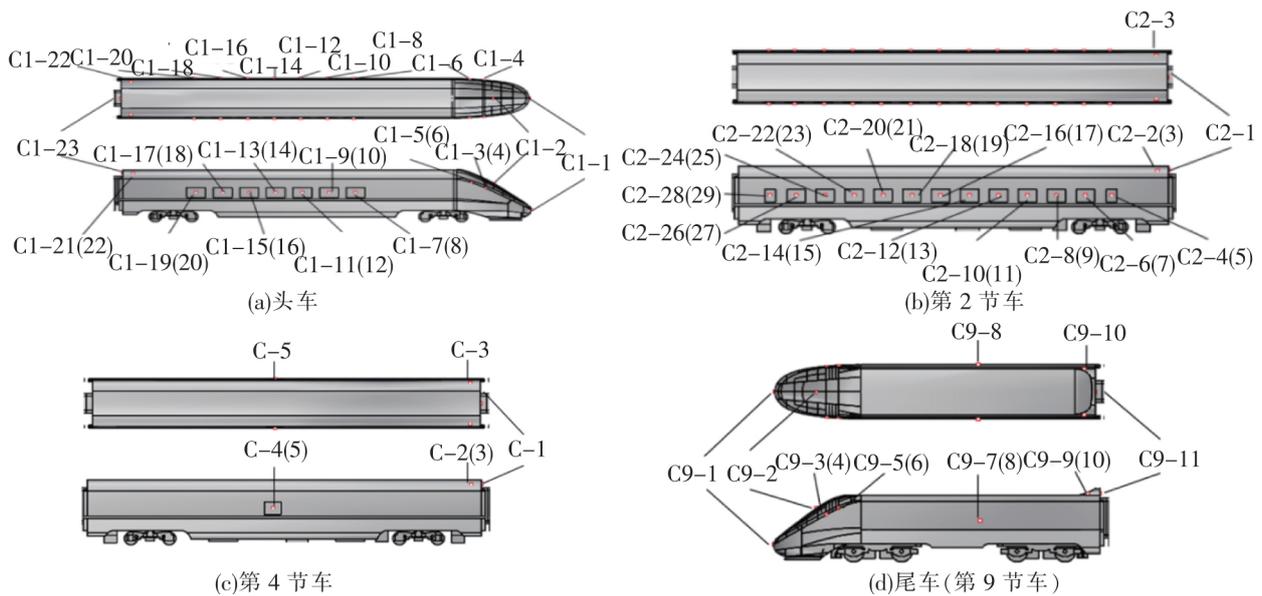


图 5 列车车身压力测点

### 4 结果分析

#### 4.1 数值结果验证

由于所研究的列车交会没有完全一致的实验结果,因此采用另外的列车模型进行间接验证。对于侧风下的结果验证,基于 CRH380A 3 节车 1/8 缩比风洞实验结果进行模拟验证。其中风洞实验在中国空气动力研究与发展中心 8 m(高) 6 m(宽)大型低速风洞开展,风速为 60 m/s,采用同样的列车模型和风洞尺寸,对侧滑角 30°的头中尾 3 车的侧向力结果进行模拟对比,详情可参见文献[14]。对于列车过隧道的

计算方法验证,基于 1/20 的 CRH380A 3 车动模型结果进行模拟对比。动模型实验在中南大学开展,其中隧道横截面实际为  $100\text{ m}^2$  的双线隧道,隧道实际长度为  $400\text{ m}$ ,列车速度  $300\text{ km/h}$ 。采用与本文侧风交会和隧道交会一样的计算方法和网格离散策略,对上述实验结果进行数值模拟,图 6(a)为数值结果与风洞实验的列车侧向力系数  $C_y$  对比, $C_y = \frac{2F_y}{\rho v^2 A}$ ,其中, $F_y$  为列车侧向力; $\rho$  为空气密度; $v$  为来流速度; $A$  为列车横截面积。图 6(b)为数值结果与动模型列车鼻尖点压力系数  $C_p$  变化对比, $C_p = (P - P_0)/(0.5\rho v^2)$ ,其中, $P$  为列车表面绝对压力; $P_0$  为大气压。从图 6 可以看出,数值模拟与实验结果吻合较好,对于气动系数和压力峰值,最大误差小于  $5\%$ ,说明本文的计算方法和数值设置合理可行,可以进行后续结果分析。

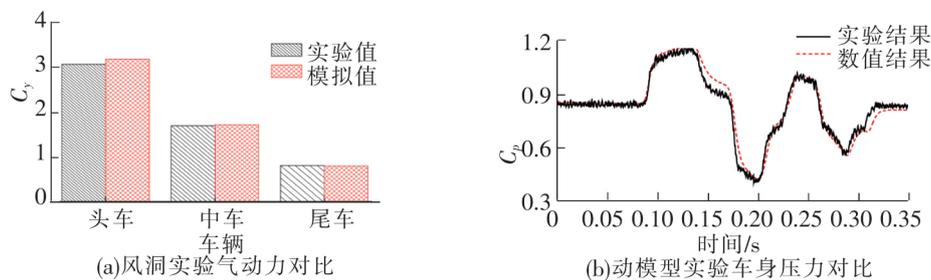


图 6 计算结果与实验对比

#### 4.2 列车隧道交会及侧风下交会压力时间历程

图 7 为隧道内头车交会侧车窗压力时间历程,图中阴影所示为列车交会区域。从图 7 可以看出,对于  $160$  和  $200\text{ km/h}$  等速交会,线间距  $4\text{ m}$  下,列车头尾产生的交会压力波动很明显;而线间距  $4.4\text{ m}$  时,列车头尾产生的交会压力波几乎不可见,说明线间距  $4.4\text{ m}$  已经足够宽,列车交会产生的压力波动不足以影响列车头尾产生的压缩波和膨胀波的传递过程。对于  $4.4\text{ m}$  线间距下的不等速交会,同样由于线间距较大,交会压力波也几乎不可见。

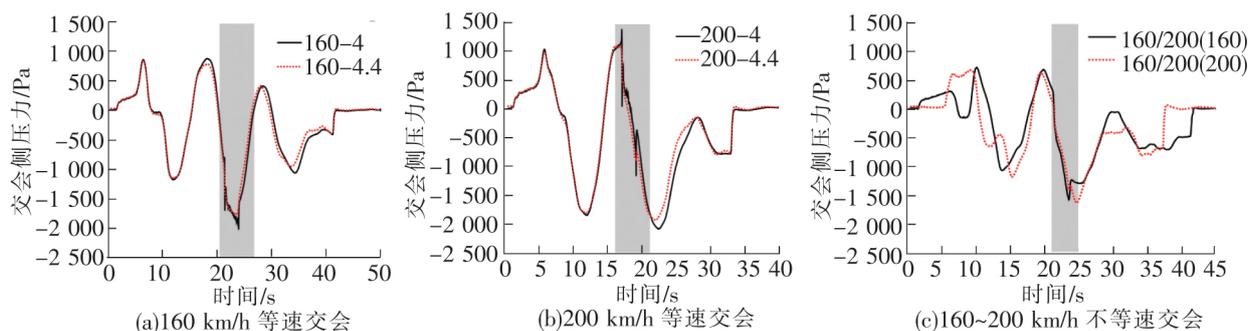


图 7 隧道内头车交会侧车窗压力时间历程

侧风环境下,图 8 为 2 列车的头车交会侧车窗压力时间历程。对于迎风侧列车, $160\text{ km/h}$  列车等速交会时,随着侧风速度增加,如图 8(a) 区域 A 所示,可以发现头车引起的压力正峰值 3 个风速下差异较大,分别为  $403$ 、 $490$ 、 $431\text{ Pa}$ ,且随之而来的中间车压力幅值均随侧风速度增加而增大。此外,如图 8(a) 区域 B 所示,3 个风速下,尾车引起的压力负峰值三者差异较小,分别为  $-379$ 、 $-356$ 、 $-397\text{ Pa}$ ,但随后的平稳负压均随侧风速度增加而增大。对于  $200-20$  列车交会,可以发现中间车的压力波动与  $160-20$  的变化幅值很接近,说明中间车受风速影响更大,受车速影响较小;但是对于头尾车,受车速影响更大,因此  $200\text{ km/h}$  交会的头尾压力峰值比  $160\text{ km/h}$  的大很多,分别为  $728$ 、 $-609\text{ Pa}$ 。图 8(b) 为背风侧列车交会侧压力变化过程,对于  $160\text{ km/h}$  等速交会,随着侧风速度增加,列车从头至尾原有压力波的正负峰值变化范围均随之增大。而  $200-20$  交会时,与迎风侧列车类似,中间车也呈现出与  $160-20$  接近的压力幅值变化过程。结合图 7 和图 8,可以发现隧道内列车交会产生的压力波动是次要的,主要压力变化幅值与列车进入隧道产生的压缩波和膨胀波有关,且隧道内的压力变化幅值比明线交会产生的压力幅值要大得多。

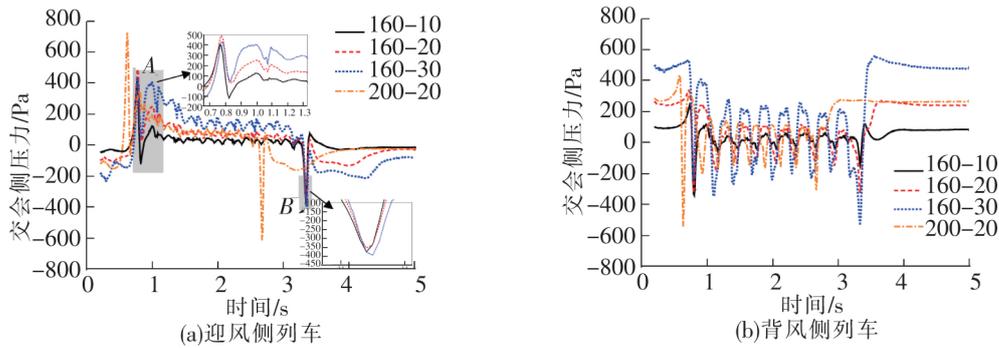


图 8 侧风下头车交会侧车窗压力时间历程

### 4.3 隧道内交会气动载荷

#### 4.3.1 车窗压力

图 9 为不同工况下各节车中间位置车窗平均压力变化。总体对比图 9 可以发现:等速交会、相同线间距下,  $P_{max}$ 、 $P_{min}$  和  $\Delta P$  值随车速增加而增大;等速交会下,  $P_{max}$ 、 $P_{min}$  和  $\Delta P$  值随线间距增加而减小。其次,由于隧道的三维效应相对较小,交会侧与非交会侧压力波动规律基本一致,只是压力值稍有差异,因此后续重点分析交会侧的压力变化。总体而言,对于交会侧  $P_{max}$ ,各个工况下从头车到尾车,  $P_{max}$  逐渐减小。线间距 4.4 m 下的不等速交会,160 km/h 车身  $P_{max}$  大于 200 km/h,这是因为 160 km/h 车身压力变化是由 200 km/h 列车产生的压力波引起的。但是,不等速交会下的 2 列车车身压力  $P_{max}$  均小于任意等速交会下的车身压力。对于交会侧  $P_{min}$ ,160 km/h 下的  $P_{min}$  沿着整个车身变化不大,其他工况下从头车到尾车,压力绝对值逐渐增大,200 km/h 等速交会的这一现象最突出。不等速交会下的各车身压力在第 4 节车之前与 160 km/h 的压力值有交叉重合,而第 4 节车之后的车身压力则介于 160-4 和 200-4.4 之间;且不等速交会下的 2 列车车身负压  $P_{min}$  较正压值更为接近。最后,对于交会侧压力峰峰值  $\Delta P$ ,受  $P_{max}$  和  $P_{min}$  的综合影响,160 km/h 等速交会时从头车到尾车  $\Delta P$  逐渐下降;而 200 km/h 等速交会和 160/200 km/h 不等速交会从头车到尾车  $\Delta P$  逐渐上升。

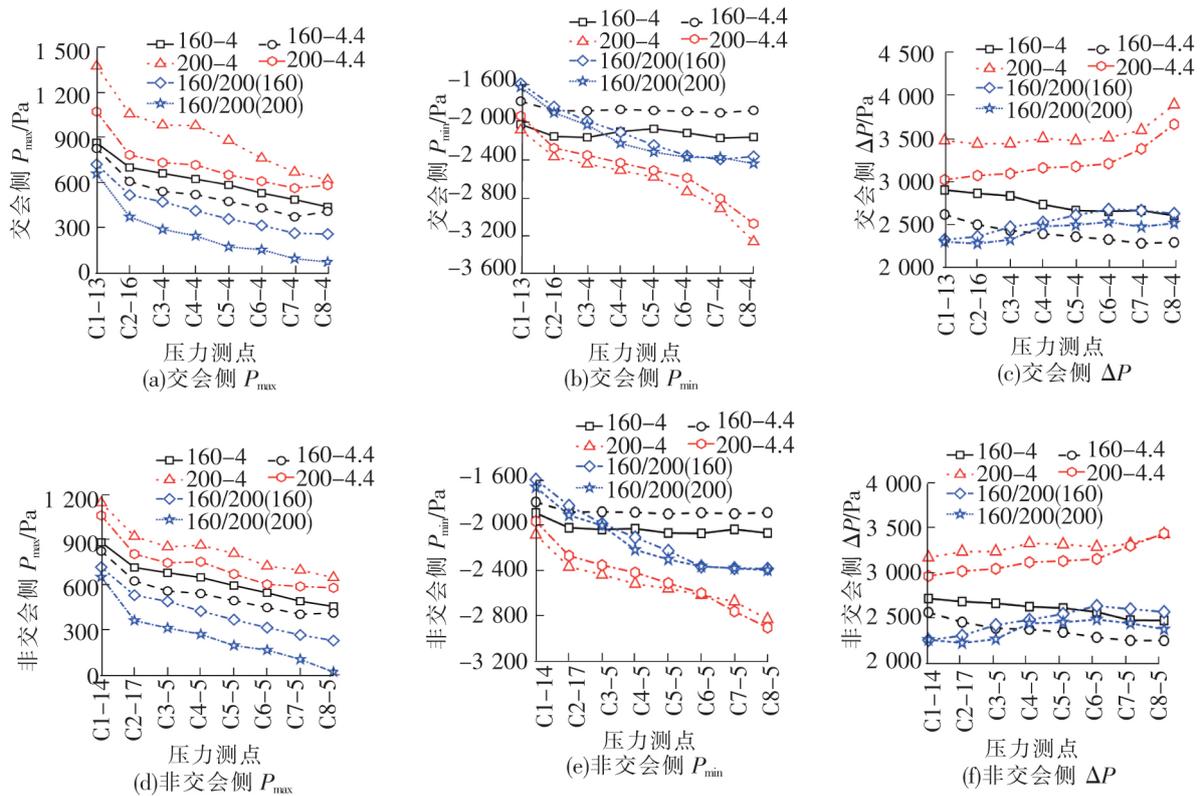


图 9 不同车速及线间距下车窗压力变化

### 4.3.2 车窗气动力

隧道交会下,图 10 为各节车中间位置车窗交会侧交变载荷峰值,包括最大载荷  $F_{\max}$ 、最小载荷  $F_{\min}$  及载荷峰峰值  $\Delta F$ 。由图 10 可以看出,对于最大和最小交变载荷峰值,其沿车身变化规律与压力最大最小值变化规律类似,这里不再赘述。对于交变载荷峰峰值  $\Delta F$ ,160 km/h 等速交会时头车车窗载荷最大(160-4 为 3 169 N),而后从第 2 节车载荷减小,且第 2 节车到第 8 节车载荷变化幅度不大,即 160-4 情况下第 2 节车为 2 646 N,第 8 节车为 2 408 N。220 km/h 等速交会时,车窗载荷变化规律与 160 km/h 不同,即头车车窗载荷最大,其次是 8 车,从第 2 节到第 7 节车,车窗载荷缓慢增大。不等速交会时,头车车窗载荷最大,从第 2 节车到第 5 节车载荷缓慢增大,第 5 到第 8 节车载荷基本不变。

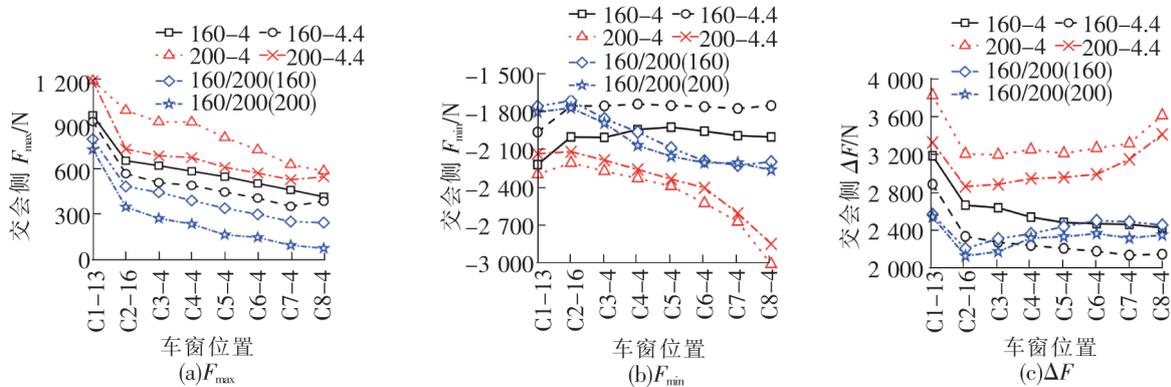


图 10 不同车速及线间距下车窗压力交变载荷峰值

## 4.4 侧风环境下交会气动载荷

### 4.4.1 车窗压力

线间距 4.4 m 情况下,图 11 分别为迎风侧和背风侧列车交会侧的压力变化。对于迎风侧列车(图 11(a)~图 11(c)),除头车外,其他各工况下不同车辆  $P_{\max}$  压力变化不大,且同一车速下,风速越高, $P_{\max}$  越大。各工况下最小压力  $P_{\min}$  从第 4 节车往后压力趋于平稳;对于  $P_{\min}$ ,除头车外,160-30 和 200-20 的压力接近。对于交会侧压力峰峰值  $\Delta P$ ,其变化范围较大,位于 600~1 400 Pa 之间。对于背风侧列车的交会侧压力(图 11(d)~图 11(f)),可以发现从头车到尾车,压力变化更加平稳,尤其是头车与其他车辆之间的区别较小,因此导致  $\Delta P$  各个工况下各节车区别不大。同时背风侧列车交会侧压力变化范围较迎风侧小,位于 600~1 100 Pa 之间。

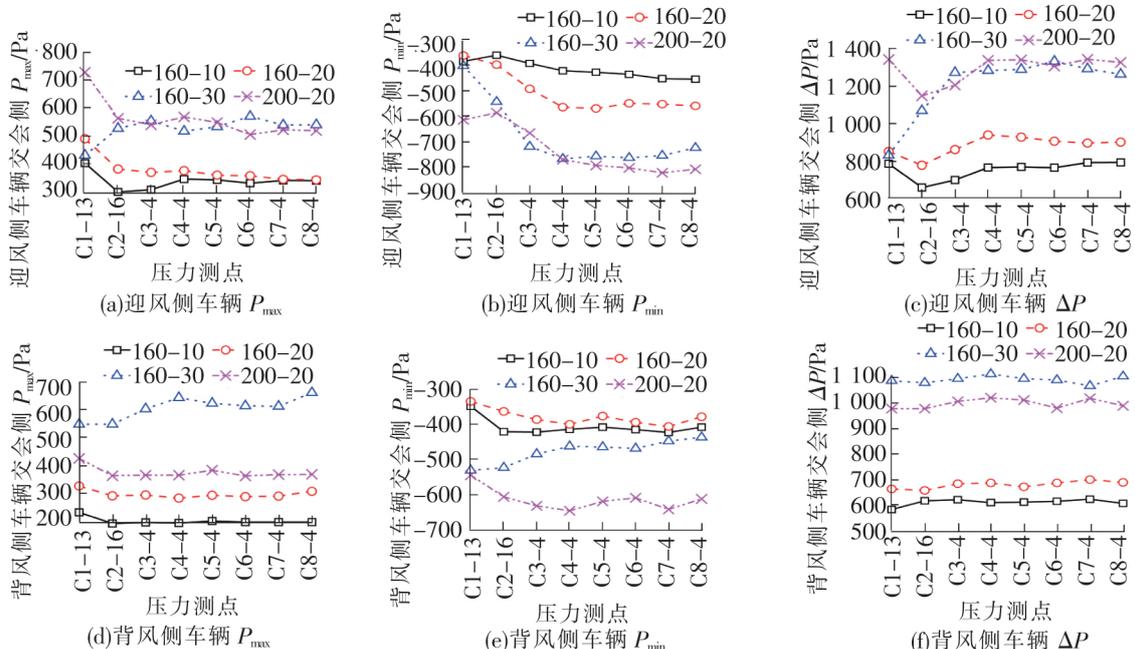


图 11 迎风侧和背风侧列车交会侧压力变化

#### 4.4.2 车窗气动力

通过 4.4.1 小节分析,可以发现迎风侧列车交会侧车窗压力变化幅值最大,因此,如图 12 所示,进一步分析迎风侧列车交会侧的车窗载荷。对于最大载荷  $F_{\max}$ ,160-30 情况下的头车至第 8 节车载荷值在 500 N 附近;其他情况下均为头车最大,而从第 2 节车到至第 8 节车,气动载荷变化较小。对于载荷峰峰值,受最大最小载荷影响,各工况下的载荷峰峰值位于 600~1 500 N 之间,其中 200-20 的头车侧窗气动载荷最大,为 1 453 N。

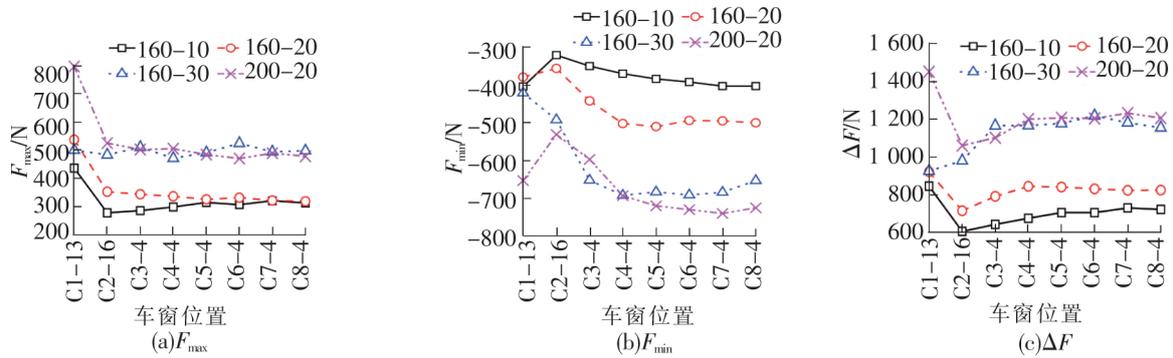


图 12 迎风侧列车交会侧车窗压力交变载荷峰值

#### 4.5 列车隧道交会及侧风下交会压力最大值比较

为了直观评估列车不同工况下隧道交会、侧风下交会的压力幅值,以头车侧窗压力峰峰值  $\Delta P$  为例,综合前述结果,可以发现隧道中,交会侧 200-4 的  $\Delta P$  最大(3 463 Pa),而 160-200(200)的  $\Delta P$  最小(2 295 Pa)。非交会侧 200-4 的  $\Delta P$  最大(3 212 Pa),而 160-200(160)的值  $\Delta P$  最小(2 291 Pa)。由于隧道中压力传播的三维效应较弱,可以发现上述交会侧和非交会侧  $\Delta P$  相差不大。而在侧风交会中,可以发现两列车的非交会侧  $\Delta P$  明显小于交会侧。其中交会侧 160-10 的  $\Delta P$  始终是所有工况中最小的,对于交会侧最大  $\Delta P$ ,迎风侧列车出现在 200-20 工况,为 1 337 Pa,背风侧列车出现在 160-30 工况,为 1 083 Pa。最后,可以发现隧道内头车最大  $\Delta P$  远大于侧风下的  $\Delta P$ ,隧道内为侧风下的 2.4~3.2 倍。

## 5 结论

(1) 隧道内交会侧压力峰峰值  $\Delta P$  受  $P_{\max}$  和  $P_{\min}$  的综合影响,160 km/h 等速交会时从头车到尾车  $\Delta P$  逐渐下降;而 200 km/h 等速交会和 160~200 km/h 不等速交会从头车到尾车  $\Delta P$  逐渐上升。

(2) 侧风下列车交会,迎风侧列车交会侧车窗压力变化幅值最大。对于车窗最大载荷  $F_{\max}$ ,头车最大;对于载荷峰峰值,受最大最小载荷影响,各工况下的载荷峰峰值位于 600~1 500 N 之间,其中 200-20 的头车侧窗气动载荷最大,为 1 453 N。

(3) 侧风下列车交会,对于交会侧头车最大  $\Delta P$ ,迎风侧列车出现在 200-20 工况,为 1 337 Pa,背风侧列车出现在 160-30 工况,为 1 083 Pa。隧道内列车交会产生的压力波动是次要的,主要压力变化幅值与列车进入隧道产生的压缩波和膨胀波有关。隧道内头车最大压力变化幅值远大于侧风下的压力幅值,隧道内的为侧风下的 2.4~3.2 倍。

## 参 考 文 献

- [1]刘小兵,李少杰,杨群,等. 并列双钝体箱梁三分力系数的气动干扰效应[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2018, 31(1): 1-5.
- [2]林玉森,郭超明,路嘉琦,等. 高速铁路桥梁振动噪声影响参数研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(2): 16-23.
- [3]郝礼增,马坤全,郭玉坤. 高速铁路连续梁拱桥拱梁竖向刚度比对结构性能影响的研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2019, 32(4): 8-15.
- [4]Niu J, Sui Y, Yu Q, et al. Aerodynamics of railway train/tunnel system: A review of recent research[J]. Energy and

- Built Environment, 2020, 1(4): 351-375.
- [5] Tian H. Review of research on high-speed railway aerodynamics in China[J]. Transportation Safety and Environment, 2019, 1(1): 1-21.
- [6] Chen Z, Liu T, Zhou X, et al. Impact of ambient wind on aerodynamic performance when two trains intersect inside a tunnel[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 169: 139-155.
- [7] Chen X D, Liu T H, Zhou X S, et al. Analysis of the aerodynamic effects of different nose lengths on two trains intersecting in a tunnel at 350 km/h[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 66: 77-90.
- [8] Liu T H, Chen Z W, Chen X D, et al. Transient loads and their influence on the dynamic responses of trains in a tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 66: 121-133.
- [9] Huang S, Li Z, Yang M. Aerodynamics of high-speed maglev trains passing each other in open air[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 188: 151-160.
- [10] Li X, Tan Y, Qiu X, et al. Wind tunnel measurement of aerodynamic characteristics of trains passing each other on a simply supported box girder bridge[J]. Railway Engineering Science, 2021, 29(2): 152-162.
- [11] 曾广志, 李志伟, 黄莎, 等. 城际列车不同头部外形对明线交会气动性能的影响[J]. 五邑大学学报(自然科学版), 2019, 33(2): 51-57.
- [12] 李常, 梁武科, 金雪红, 等. 翼型厚度对风力机翼型气动特性的影响[J]. 流体机械, 2010, 38(2): 31-34.
- [13] CEN. EN 14067-3 European standard railway applications aerodynamics-part 3: aerodynamics in tunnels[S]. Brussels: CEN, 2003.
- [14] Liu T, Chen Z, Guo Z, et al. Reasonable pressure tap layout to measure the aerodynamic forces of a train at different yaw angles[J]. Measurement, 2020, 166: 108255.

## Numerical Study on the Aerodynamic Loads of Drum-Type Power Concentrated EMUs Passing by Each Other in Different Conditions

Geng Yabin<sup>1</sup>, Yu Miao<sup>2</sup>, Li Guoqing<sup>2</sup>, Chen Zhengwei<sup>3</sup>

(1. Product Development Center, CRRC Tangshan Railway Vehicle Co. Ltd., Tangshan 063035, China;

2. Technology Research Center, CRRC Tangshan Railway Vehicle Co. Ltd., Tangshan 063035, China;

3. Key Laboratory of Traffic Safety on Track of Ministry of Education,

Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** The pressure waves induced by two trains passing by each other impact the car body, especially affecting the strength of window glass and the air intake of air-conditioning. To evaluate the intersecting pressure change of new drum-type power concentrated EMUs under different situations, this paper used sliding grid technology, based on three-dimensional, compressible, unsteady reynolds-averaged Navier-Stokes (URANS) method and SST turbulence model, to analyze the intersection pressure of trains in a tunnel and crosswind environment. The results show that under the same line spaces in a tunnel,  $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$  and increase with the increase of train speed; at the same train speed, the pressure value of  $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$  and decrease with the increase of line spaces. Under crosswinds, the intersection pressure values are the largest for the windward side train. The maximum pressure change amplitude of the train in the tunnel is much larger than that under the crosswind, and the pressure amplitude in the tunnel is about 2.4~3.2 times of that under the crosswind.

**Key words:** train; intersect in the tunnel; intersect in the crosswind; computational fluid dynamics (CFD)