

轨道交通全封闭式声屏障列车风压载荷特性分析

卢彦宏^{1,2},朱剑月^{1,2},郭 璠³,刘洪波³,邢海灵³

(1.同济大学铁道与城市轨道交通研究院,上海市 201804; 2.同济大学上海地面交通工具风洞中心,上海市 201804;

3.上海申通地铁集团有限公司技术中心,上海市 201103)

摘 要:基于雷诺平均湍流模型与滑移网格方法,数值模拟了轨道交通车辆通过全封闭式声屏障时声屏障表面风压载荷特性,根据特征波叠加理论计算了声屏障表面脉动风压时程,分析了脉动风压幅值在声屏障内的空间分布特性。结果表明:声屏障同一截面不同测点位置的风压载荷时间变化规律相似,但压力幅值随着测点高度增加而逐渐减小;列车单列通过时,远离运行线路侧声屏障的压力幅值远小于邻近运行线路侧;列车运行速度由80 km/h提高至140 km/h,脉动风压空间分布特性相似,但压力幅值增加约22%;列车会车通过时,声屏障入口与出口端压力波的叠加效应使得声屏障表面压力幅值增大,其中位于远离运行线路侧声屏障压力幅值增加,与邻近运行线路侧声屏障压力幅值接近。

关键词:城市轨道交通;全封闭式声屏障;列车风压载荷;压力波

中图分类号:

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)06-0276-06

0 引 言

为解决地铁列车运行噪声对环境的影响,声屏障被广泛应用于地铁线路,并取得了良好的吸声降噪效果^[1]。全封闭式声屏障常设置在对噪声防控要求较高的路段,但其封闭式结构使得列车通过时形成强烈的活塞风效应,对声屏障结构的强度与稳定性产生了一定影响。

国内外学者针对列车通过声屏障结构时的脉动风压开展了较多研究。施洲等^[2]采用移动网格方法,计算了高速列车不同运行速度与屏轨间距下声屏障周围流场特性,发现声屏障最大脉动风荷载值与屏轨间距成反比关系,并随列车运行速度提高而显著增大。毕然等^[3]建立了列车与直立式声屏障数值模型,分析了脉动风压在声屏障内表面的空间分布特性,以及声屏障与列车之间的间距、声屏障高度对脉动风压的影响。结果表明:脉动风压的头波正压幅值沿声屏障高度方向逐渐减小,脉动风压幅值与列车运行速度平方成正比,与列车至声屏障之间间距的平方成反比。Xiong等^[4]通过现场试验,得到不同外形高速列车以不同速度通过直立式声屏障时,作用

于声屏障表面的脉动风压值,并对其频域特性进行了分析。结果表明:列车以380~420 km/h速度通过时,瞬态空气动力压力值频率范围为4.21~4.74 Hz,主频值与列车运行速度成正比,而与列车长度成反比。Du等^[5]采用缩比移动模型,分析了列车运行速度、声屏障高度与会车速度对声屏障表面压力分布的影响,认为声屏障与列车表面的气动力幅值随着列车运行速度的提高与声屏障高度的增加而增加;与单列列车运行工况相比,列车会车通过虽然不改变压力曲线特性,但加剧了压力幅值的变化程度。

目前,列车通过声屏障气动效应研究主要针对直立式声屏障,全封闭式声屏障研究相对较少。何旭辉等^[6-7]采用动网格技术,数值模拟了列车通过圆形截面全封闭式声屏障时气压荷载在声屏障内分布,发现声屏障同一截面处与声屏障长度方向上的风压载荷分布不均匀,越靠近列车表面,压力幅值越大,声屏障中部区域压力幅值大于出口与入口区域。欧双美等^[8]通过缩比模型试验,得到了列车以不同速度通过矩形截面全封闭式声屏障时声屏障表面风压特性,发现测点压力变化幅值与列车运行速度的二次方呈近似线性关系,建议以较大的中间截面压力值为声屏障设计参考值。杨斌等^[9]基于数值模拟方法,对高速列车通过不同截面面积全封闭声屏障时声屏障表面风压载荷变化与空间分布特性进行了仿真分析,发现阻塞比对声屏障风压载荷影响显著,随着阻塞比增大,最大

收稿日期: 2023-09-25

基金项目: 上海申通地铁集团有限公司资助项目(JS-KY19R047)

作者简介: 卢彦宏(1998—),男,硕士在读,研究方向为列车空气动力学。

压差幅值呈指数增长。李玉学等^[10]采用动态层铺法研究了列车单列通过、在声屏障 1/2 跨与 1/4 跨截面处会车时全封闭式声屏障表面气动载荷特性,表明 1/2 跨截面处会车时正压幅值与负压幅值的绝对值最大,为气动载荷最不利工况,在该工况下声屏障入口与出口处出现了较大断面环向压差。周朝晖等^[11]基于列车在隧道中运行时压力波产生与传播机理,结合多特征波叠加理论对隧道与列车压力波时程特性进行了分析,根据特征波经验公式推导了隧道内压力波叠加计算方法,验证了该方法的可行性与正确性。

参考上述研究,本文基于滑移网格方法,数值模拟得到了轨道交通列车通过全封闭式声屏障时,作用于声屏障表面的脉动风压特性,基于压力波产生传播理论分析脉动风压幅值在声屏障内的空间分布特性,为全封闭式声屏障的设计、优化与建造提供理论参考。

1 数值模拟

1.1 几何参数

根据上海轨道交通 6 号线运行列车,建立 6 节编组 A 型车模型。列车表面进行光滑处理,忽略受电弓、车门与车窗等结构部件;简化全封闭式声屏障结构,忽略内部钢结构骨架、工字梁与连接板块等部件。列车高 3.75 m(H),宽 3 m(W),全长 140.6 m ($37.5H$),正投影面积为 10.35 m²。根据线路段实际情形,建立高度为 1.8 H 、总长为 65.3 H 、断面面积为 51.92 m²的全封闭式声屏障结构。声屏障与列车几何模型如图 1 所示,邻近运行线路侧声屏障与列车中心线之间距离为 0.59 H ,远离运行线路侧声屏障与列车中心线之间距离为 1.49 H 。

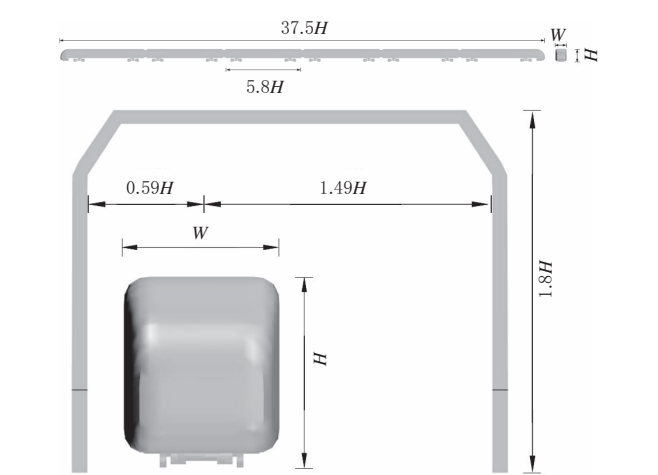


图 1 列车与声屏障几何模型

1.2 网格划分、计算域和边界条件

为防止计算域边界对内部流场造成干扰,参考国家铁路行业标准^[12],计算域高度设为 16 H ,宽度为 32 H 。为了确保列车驶入声屏障之前流场发展充分,将列车模型设置在距离入口边界 100 m 处,计算域与内部滑移网格区域设置如图 2 所示。

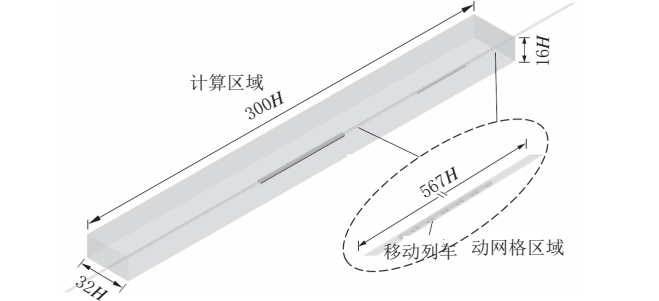


图 2 计算域示意图

将列车周围一定范围区域设置为滑移网格区域,其余区域为静网格区域。静网格区域前后、左右与顶部设为压力出口边界条件,列车与声屏障表面及计算域底部设置为无滑移壁面边界。静网格与滑移动网格区域之间通过滑移交界面实现流场信息的传递与交换。计算域边界条件设置如图 3 所示。

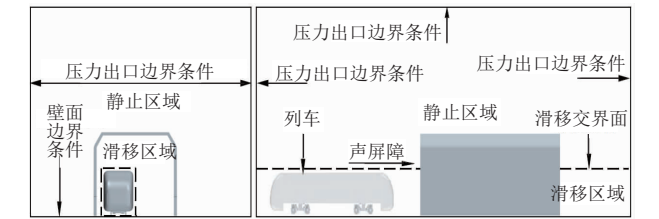
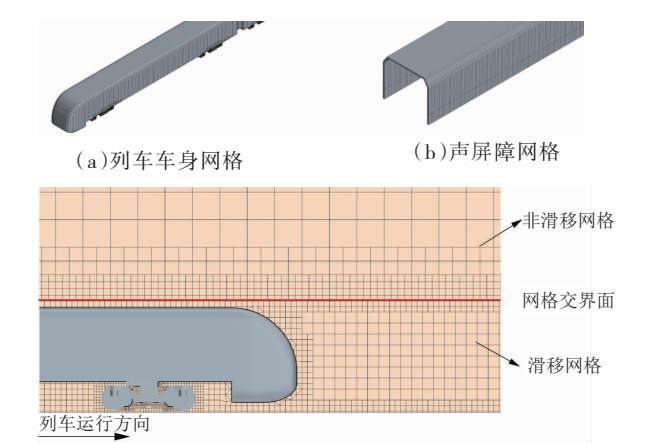


图 3 计算域边界条件设置

基于雷诺平均(Reynolds-averaged navier-stokes, RANS)方法,采用标准 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型,对流场进行数值计算。列车与声屏障表面,以及计算域内网格划分如图 4 所示,转向架与声屏障周围区域进行加密处理,整个计算域网格总数为 2 400 万。



(c) 计算域网格

图 4 网格划分

1.3 试验验证

列车通过时声屏障风压载荷现场实测点位于上海轨道交通6号线五莲路站至博兴路站区间,试验时列车以70 km/h速度单列通过全封闭式声屏障。在声屏障表面布置压力传感器,采集列车通过时作用于声屏障表面风压值,测点布置如图5所示。试验前进行各传感器的标定与校准,确保其精确度满足试验要求。数值计算时,在声屏障模型沿线路中心线中部区域相应位置设置压力监测点,数值仿真与现场测试得到的脉动风压幅值结果对比见表1。另外,风压幅值仿真值与实测值比较如图6所示。从中可以看出,计算值与实测值之间误差在10%以内,两者吻合良好,验证了数值计算准确性。



图5 现场测点布置

表1 声屏障风压幅值计算值与实测值对比

测点位置	计算值 /Pa	实测值 /Pa	计算误差 /%
声屏障透明屏体中部	131.8	143.3	8.7
声屏障透明屏体下部	151.6	154.9	2.2

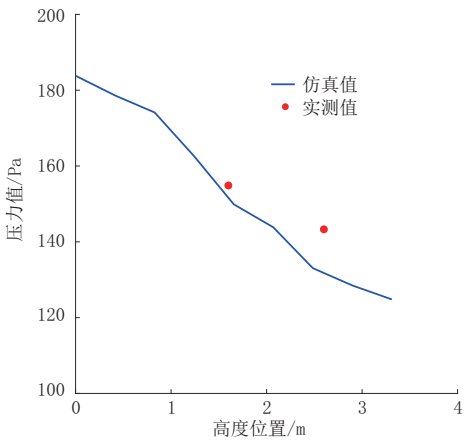


图6 声屏障风压幅值仿真值与实测值比较(单位:Pa)

2 压力波特性分析

2.1 压力波时程特性分析

与隧道结构类似,全封闭式声屏障结构同样具有良好的封闭特性,故基于压力波产生传播机制,分

析全封闭声屏障表面压力脉动的形成机制与变化特性。图7绘出了地铁列车以140 km/h单列与会车通过全封闭式声屏障时,作用于声屏障表面中间高度处脉动风压时程曲线与压力波形成传播过程。从中可以发现,当列车车头驶入声屏障瞬时,由于声屏障结构限制了车头前方气流向周边扩散,导致前方空气被压缩,形成压力快速增大的压缩波,压缩波以声速向声屏障的另一端传递,传递过程中引起当地位置的压力迅速增加。当列车车尾驶入声屏障时,列车通过后在尾端产生低压区域,使得车尾气压低于大气压强形成膨胀波。膨胀波同样以声速向声屏障出口处传递,膨胀波传播到某一位置时会使得当地压力减小。当膨胀波传递至声屏障出口处时,又会以压缩波的形式反射回入口位置,随后再以压缩波的形式在声屏障内传递。同样,由车头通过引起的压缩波也遵循类似的演化发展规律,以属性相反的波传播形式在声屏障内经历反复传递与反射过程。

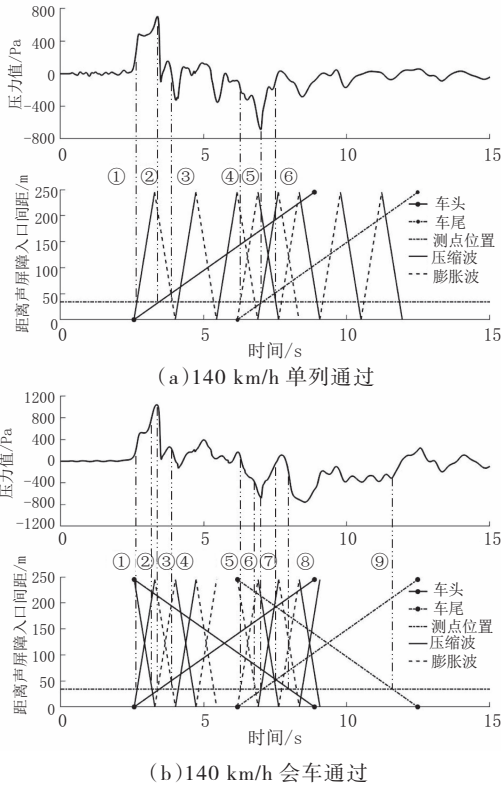


图7 全封闭式声屏障压力时程曲线与压力波形成过程

分析图7(a)列车单列通过工况可知,在2.6 s左右,列车由开放空间驶入声屏障结构的瞬时产生压缩波,压缩波在①时刻传递至测点,导致测点压力值逐渐增大;当列车车身经过测点位置时,受车身周围流动分离作用形成的低压区影响,测点压力在②时刻迅速降低。随后由于受到从出口反射回来的膨胀波的作用,测点压力在③时刻显著下降。列车车尾于

6.2 s 驶入声屏障内部时产生膨胀波,并于时刻④传递至测点,导致测点压力值减小;车尾通过引起的压力波动与反射回来的压缩波在⑤时刻叠加,使得测点压力值上升;随后由于车尾膨胀波反射形成的压缩波作用,压力曲线在时刻⑥又出现上升趋势。

分析图 7(b) 列车会车通过工况可以发现,会车运行时,两列车的头车分别同时从声屏障两端驶入,并在同一时间产生压缩波向对方侧传递。由于测点位置更靠近声屏障一侧端口,压缩波先后分别传递至测点位置,因此测点压力值在①、②时刻分阶段逐渐增加至最大值 1 044.3 Pa;在③时刻,受列车通过时压力波动影响及反射膨胀波的叠加作用,脉动压力突然减小;随后由于膨胀波的作用,测点压力在④、⑤、⑥时刻依次降低,并在⑥时刻出现负压最低值 -756 Pa。之后受到反射压缩波,以及车头、车尾通过产生的压力波动影响,测点压力在⑦、⑧、⑨时刻分别出现上升、下降与再上升现象。

由于实际线路上声屏障长度较短(245 m),列车运行产生的压缩波与膨胀波在声屏障内部频繁进行反射与叠加,传递过程中特征波与运行列车模型相遇同样会产生反射,导致声屏障内部表面压力时程曲线呈现较为复杂的波动特性。

2.2 截面处压力波分布特性

图 8 所示为列车以 140 km/h 单列通过时,邻近与远离运行线路侧声屏障中间高度测点,以及声屏障顶部中间位置测点的脉动风压时程曲线。从中可以发现,同一截面位置上各个测点的压力变化趋势相似,均在车头接近时出现正压幅值,在车尾接近时出现负压幅值,但不同测点正压、负压幅值,以及压力变化幅值有所不同。

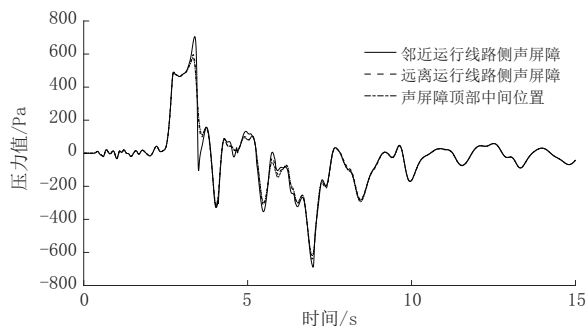


图 8 声屏障截面测点压力时程曲线

地铁列车具有高频次的通行特性,使得声屏障表面反复承受正负交替的风压载荷作用,影响声屏障结构强度特性、诱发疲劳破坏。因此,对声屏障 1/2 跨截面处列车脉动风压幅值进行分析,分别绘出邻近与远离运行线路侧声屏障及声屏障顶部测点压力

幅值变化,如图 9 所示。

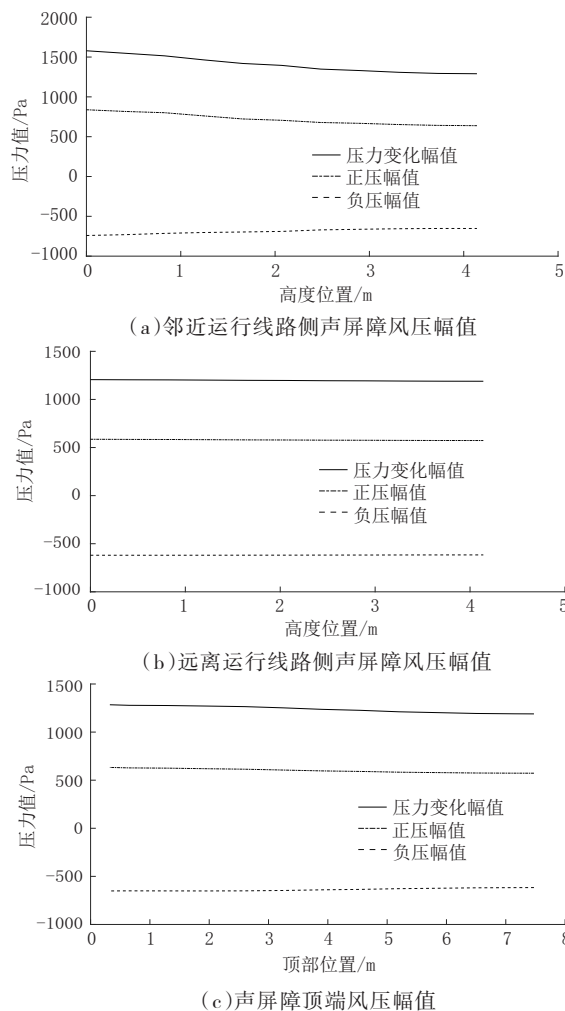


图 9 声屏障截面压力幅值变化

由图 9(a)可知,作用在邻近运行线路侧声屏障最大正压值为 838.2 Pa,最小负压值为 -740.6 Pa,最大压力变化幅值为 1 578.7 Pa,均出现在声屏障底部位置。随着测点位置升高,声屏障表面正压幅值、负压幅值的绝对值与压力变化幅值都有所降低。其中,顶端正压幅值为 638.0 Pa,比线路侧风压最大值减小了 23.9%;顶端负压幅值为 -652.4 Pa,其绝对值比线路侧风压最小值的绝对值减小了 11.9%;顶端压力变化幅值为 1 290.4 Pa,比线路侧最大值减小了 18.3%。

图 9(b)表明,远离运行线路侧声屏障压力幅值呈现相似的变化规律,正压、负压幅值绝对值及压力变化幅值最大值同样出现在声屏障底部区域,并随着测点位置的增加而降低。可以发现,随着高度增加,邻近运行线路侧声屏障表面风压受测点位置变化影响较大,风压幅值变化显著,远离运行线路端声屏障风压幅值变化相对平缓。同时,邻近运行线路侧声屏障受列车风脉动风压作用较强,风压幅值略大

于作用在远离运行线路侧声屏障相应位置处的风压幅值。远离运行线路侧声屏障最大正压幅值、最小负压幅值与最大压力变化幅值分别为近端最大正压幅值、最小负压幅值与最大压力变化幅值的69.9%、83.7%与76.4%。

声屏障顶端横梁不同位置处风压幅值变化如图9(c)所示,可以看出,随着声屏障顶部测点位置从邻近运行列车一侧向另一侧过渡,声屏障风压幅值逐渐减小,压力幅值变化较为平缓:远离运行线路侧声屏障最大正压幅值、最小负压幅值的绝对值与最大压力变化幅值相较于邻近运行线路侧分别减小了9.5%、5.4%与7.4%。

3 压力波影响因素

3.1 列车运行速度

当列车分别以80 km/h与140 km/h单列通过时,全封闭式声屏障邻近运行线路侧中间高度处声屏障表面风压时程曲线如图10所示。从中可以发现,随着列车运行速度提高,作用于声屏障表面的脉动风压幅值显著增大,脉动风压时程曲线也产生较大变化。当列车以140 km/h通过时,由于内部流场具有较强的非定常性,声屏障表面脉动风压呈现较强的波动特性。

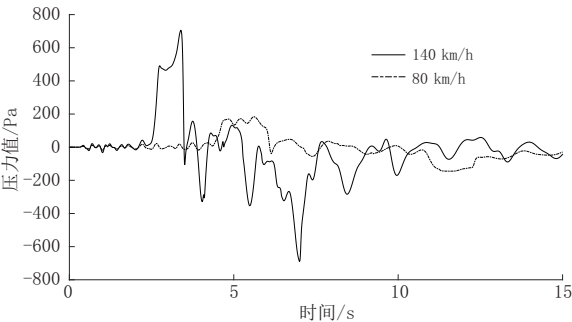
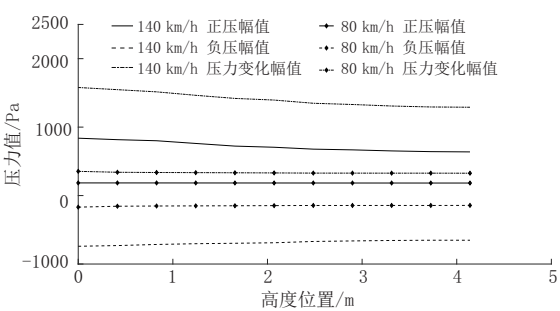
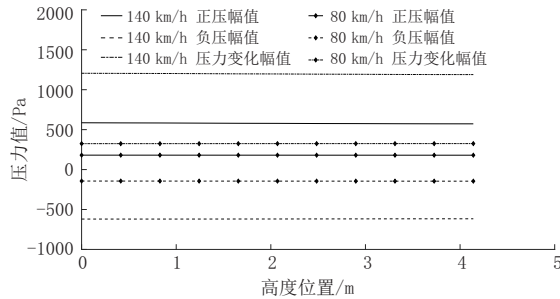


图 10 不同运行速度下声屏障表面风压时程曲线

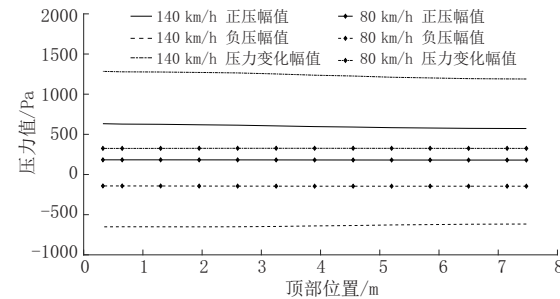
不同运行速度下声屏障压力幅值沿声屏障环向分布比较如图11所示。从中可以看出,列车运行速度改变并不会使得压力幅值沿声屏障环向的分布特性发生变化,基本保持随着测点高度增加,压力幅值逐渐减小的变化趋势,但随着列车运行速度提高,压力幅值增加显著。当列车运行速度由80 km/h提高至140 km/h,与远离运行线路侧和声屏障顶端区域相比,声屏障邻近运行线路侧压力幅值变化较为显著:最大正压幅值由184.9 Pa增至838.2 Pa,最小负压幅值的绝对值由169.1 Pa增至740.6 Pa,压力变化幅值由354.0 Pa增至1578.7 Pa,增幅较大。因此,列车运行速度变化对声屏障内压力波特性影响显



(a) 邻近运行线路侧声屏障风压幅值



(b) 远离运行线路侧声屏障风压幅值



(c) 声屏障顶端风压幅值

图 11 不同速度下声屏障压力幅值分布曲线

著,列车通过速度越高,产生的压力波强度越大。

3.2 单列与会车通过

图12绘出了运行速度为140 km/h时,列车分别以单列及在声屏障1/2跨截面处会车通过全封闭式声屏障时,作用于邻近运行线路侧声屏障中间高度处列车风压时程曲线。对比发现,与单列运行工况相比,会车运行时,列车驶入在声屏障入口与出口端产生的压力波在全封闭式声屏障内传播时出现相互叠加现象,导致压缩波与膨胀波相互作用加强,风压幅值略大于列车单列通过声屏障时的风压幅值,风压曲线波动显著。

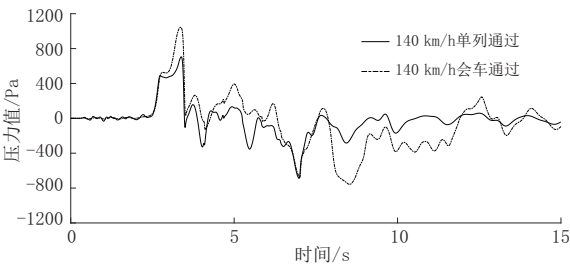


图 12 单列与会车通过时声屏障风压时程曲线

不同运行状态下声屏障压力幅值沿声屏障环向分布如图13所示。从中可知,列车会车通过时,声屏障环向压力幅值有所增加。与单列运行状态相比,远离列车运行线路侧正压幅值为973.6 Pa,增幅66.1%;负压幅值为-885.2 Pa,降幅42.8%;压力变化幅值为1 858.9 Pa,增幅54.2%。而邻近列车运行线路侧最大正压幅值为1 160.9 Pa,增幅38.5%;最小负压幅值为-763.2 Pa,降幅3.1%;压力变化幅值为1 924.1 Pa,增幅21.9%。邻近运行线路侧压力幅值增加程度要远小于远离运行线路侧。列车会车运行工况下,列车与声屏障结构之间的间距及相对运动关系在声屏障两侧较相似,使得邻近与远离运行线路侧声屏障压力幅值较为接近。

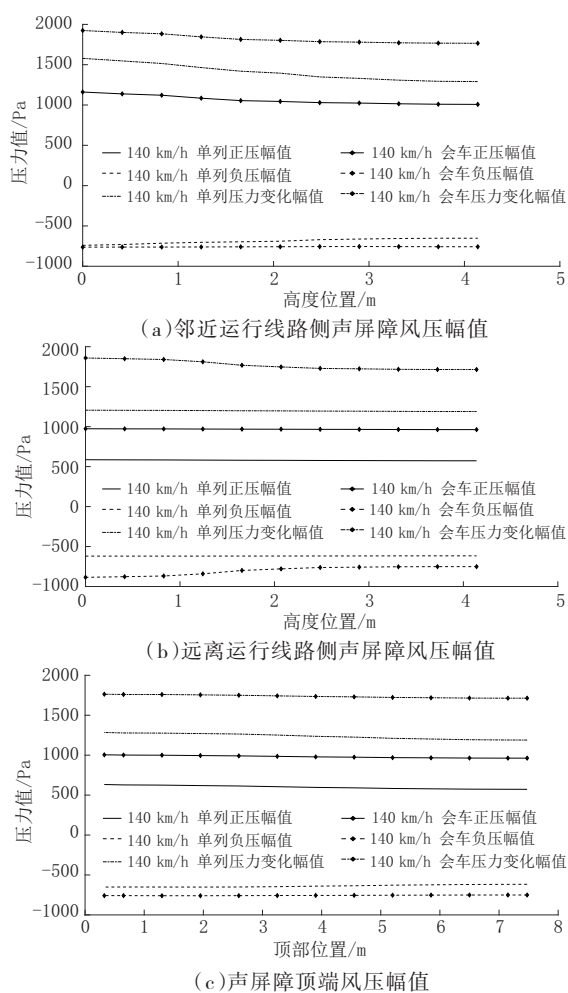


图13 单列与会车通过时声屏障压力幅值分布

4 结论

(1)列车通过全封闭式声屏障时,声屏障表面风压随时间变化特性可采用特征波叠加理论进行分析。当压缩波与膨胀波分别传播至测点位置时,风压呈现出增加与减小的交替变化特性。

(2)声屏障同一截面各个测点的压力时程曲线

相似,但不同测点正压、负压幅值及压力变化幅值有所不同。随着测点高度位置变化,邻近运行线路侧声屏障风压幅值变化显著,远离运行线路侧风压幅值变化相对平缓。同时远离运行线路侧声屏障幅值略小于邻近运行线路侧声屏障相应位置处的风压幅值;远离运行线路侧声屏障最大正压幅值、最小负压幅值及最大压力变化幅值分别为邻近运行线路侧相应值的69.9%、83.7%与76.4%。

(3)压力幅值空间分布特性不随列车运行速度变化而变化,保持沿声屏障高度方向压力幅值减小的变化趋势,声屏障压力幅值随着列车运行速度提高而显著增加:列车运行速度为80 km/h时声屏障表面最大正压幅值、最小负压幅值与压力变化幅值分别为140 km/h时相应数值的22.1%、22.8%与22.4%。

(4)列车会车运行过程中,两端列车驶入产生的压力波相互叠加,使得风压时程曲线出现较多局部波动。与列车单列通过相比,会车通过时,声屏障环向压力幅值均有所增加。其中,远离运行线路侧声屏障最大正压幅值增加了66.1%,最小负压幅值的绝对值增加了42.8%,压力变化幅值增加了54.2%,要略大于邻近运行线路侧声屏障相应38.5%、3.1%与21.9%的增幅。由于声屏障左右两侧与列车的相对空间位置在会车工况下一致,远离运行线路侧声屏障压力幅值大幅增加而与邻近运行线路侧声屏障压力幅值基本接近。

参考文献:

- [1] 周强. 高速铁路减载式声屏障隔声性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [2] 施洲, 杨仕力, 蒲黔辉, 等. 350~400 km·h⁻¹ 高速列车作用于声屏障的脉动风荷载特性研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(2): 103-111.
- [3] 毕然, 李小珍, 郑净, 等. 400 km·h⁻¹ 高铁桥上直立声屏障脉动风压特性[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(6): 68-77.
- [4] X XIONG, B YANG, K WANG, et al. Full-scale experiment of transient aerodynamic pressures acting on a bridge noise barrier induced by the passage of high-speed trains operating at 380~420 km/h[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 204: 104289.
- [5] J DU, L ZHANG, M YANG, et al. Moving model experiments on transient pressure induced by a high-speed train passing through noise barrier[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 204: 104267.
- [6] 何旭辉, 郭柯桢, 杨斌, 等. 高速铁路840 m全封闭声屏障气压荷载数值模拟研究[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(3): 137-144.

(下转第292页)

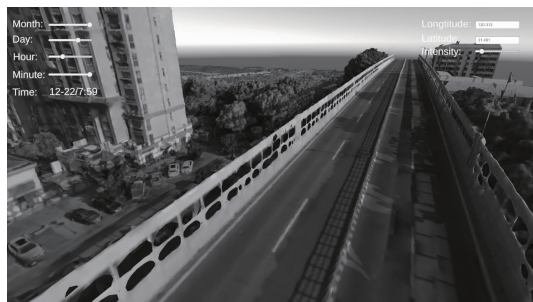


图 5 冬至日旧方案高架 7 点 59 分日照模拟

表 1 设计和现状高架对建筑日照影响分析

影响 楼层	设计方案高架		现状方案高架		时长增加 /min
	影响时间	时长 /min	影响时间	时长 /min	
一层	7:08—8:32	84	7:06—9:53	167	83
二层	7:08—7:59	51	7:06—9:21	135	84
三层	7:08—7:29	21	7:06—8:54	108	87
四层	—	0	7:06—8:08	62	62

响最大,在设计方案建成后,受到采光影响时间为167 min。根据《民用建筑设计统一标准》,冬至日当天满窗日照不小于1 h,即要求冬至日照时间不低于1 h。模拟结果如图6、图7所示。



图 6 一层楼冬至日 9 点 53 分光照模拟

从图中可以看出,受影响的一层能收到光照的时间为 9:53—11:50,能接收到 2 h 的光照,满足标准



图 7 一层楼冬至日 11 点 50 分光照模拟

要求。因此,该设计方案对居民楼的采光影响在可接受范围内。

5 结 论

本文结合 BIM 和 GIS 模型真实还原日照模拟环境,基于 Unity 游戏引擎对光照进行精确模拟,可直观且准确地分析各个时间点高架桥梁对周边建筑的日照影响,为高架设计方案优化提供有效指导,填补了高架领域日照分析模拟的空白,具有较强的实际应用价值。

参考文献:

- [1] WONG K D, FAN Q. Building information modelling (BIM) for sustainable building design[J]. Facilities, 2013, 31(3): 138-157.
- [2] LIM Y W. BIM-based sustainable building design process and decision-making[C]//2017 5th International Conference on Research and Innovation in Information Systems (ICRIIS). 2017.
- [3] 何波. BIM 建筑性能分析应用价值探讨[J]. 土木建筑工程信息技术, 2011(3): 63-71.
- [4] 王杉杉. BIM 在绿色建筑中的应用探讨[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [5] 范围, 朱珊, 刘阔. 长春市高层住宅日照分析研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [6] 刘洁. 太阳辐射量与太阳高度角的关系[J]. 西部大开发: 中旬刊, 2011(11): 96.

(上接第 281 页)

- [7] 何旭辉, 吉晓宇, 敬海泉, 等. 高速铁路全封闭声屏障列车压力波和微气压波数值模拟研究[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(5): 142-150.
- [8] 欧双美, 邹云峰, 黄永明, 等. 基于动模型的列车风作用下全封闭声屏障风荷载研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(3): 781-789.
- [9] 杨斌, 马西章, 郭柯桢, 等. 全封闭声屏障断面尺寸对列车风压荷载影响规律的数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(12): 3013-3020.
- [10] 李玉学, 陈玄烨. 列车运行致高速铁路全封闭声屏障气动荷载研究[J]. 铁道建筑, 2023, 63(6): 81-88.
- [11] 周朝晖, 郭安宁, 梅元贵, 等. 基于波叠加法高速列车单列通过隧道诱发压力波计算方法[J]. 空气动力学学报, 2015, 33(3): 375-383.
- [12] TB/T 3503.4—2018, 铁路应用 空气动力学 第 4 部分: 列车空气动力学性能数值仿真规范[S].