

文章编号: 1674-599X(2021)01-0051-09

风屏障对平层公铁桥上列车防风效果分析

刘叶¹, 王方立², 韩艳¹, 胡朋¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中国路桥工程有限责任公司, 北京 100011)

摘 要:为探讨风屏障的防风效果,对侧风作用下平层公铁桥梁-列车-风屏障系统气动特性进行了风洞试验研究,针对两类风屏障的不同透风率和高度对不同风偏角下桥上中间列车的三分力系数进行测试,研究了风屏障在不同风偏角下的倾覆力矩系数的折减系数。研究表明:风屏障在桥面上安装位置不同,对列车气动力特性影响有明显区别;设置风屏障能够有效减小作用在车辆上的三分力系数,给桥上列车提供更有利的行驶环境;风屏障的透风率比高度对列车气动特性的影响要大。无风屏障作用时,侧风下单车上游时列车的倾覆力矩系数最大,受风荷载影响最显著。由于上游车的挡风作用,双车交会时下游列车三分力系数较小,受风屏障和风偏角影响也较小。风偏角在 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 时,风屏障透风率和高度对风屏障防风效果影响不明显;风偏角 $60^{\circ}\leq\beta\leq 90^{\circ}$ 时,设置风屏障 A 的风速折减率要大于设置风屏障 B 的,防风效果更佳。

关键词:风屏障;公铁平层桥面;车-桥系统;风洞试验;气动力系数

中图分类号: U448.12 **文献标志码:** A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.008

Study on the protective effects of wind barriers on the train on highway and railway same-story bridge

LIU Ye¹, WANG Fang-li², HAN Yan¹, HU Peng¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. China Road & Bridge Corporation, Beijing 100011, China)

Abstract: To investigate the protective effect of the wind barrier, the wind tunnel test was carried out on the aerodynamic characteristics of highway and railway same-story bridge wind barrier system under the action of crosswind. For the two types of wind barriers, the three-component force coefficient of the vehicles in the middle of the bridge under different wind deflections was tested with different wind rates and heights, and the wind speed reduction coefficient of the wind barrier under different wind deflections was studied. The results show that the installation position of the wind barrier on the bridge deck is different, which has a significant difference on the vehicle aerodynamic coefficient. The wind barrier can effectively reduce the lateral wind load on the vehicles and provide a more favorable driving environment for the vehicles on the bridge. The influence of the wind barrier permeability on the aerodynamic characteristics of the train is greater than that of the height of the wind barrier. When there is no wind barrier, the overturning moment coefficient of single vehicle upstream is the largest, and it is most significantly affected by wind load. Because of the wind effect of upstream vehicle, the three-component force coefficient of downstream train is smaller when two vehicles meet, and it is also less affected by wind barrier and wind deflection angle. When the wind deflection angle is $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$, the air permeability and height of the wind barrier have no obvious effect on the wind protection effect. Under the wind deflection angle ($60^{\circ}\leq\beta\leq 90^{\circ}$), the reduction rate of wind speed for setting the wind

收稿日期: 2020-03-15

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金项目(51822803)

作者简介: 刘叶(1995-), 女, 长沙理工大学博士研究生。

barrier A is greater than that for the wind barrier B, so the wind prevention effect is better.

Key words: wind barrier; highway and railway same-story bridge; train-bridge system; wind tunnel test; aerodynamic coefficient

随着高速铁路的快速发展,侧风作用下列车的行驶安全引起了人们的广泛关注^[1-2]。桥梁相对于地面高度较大,桥面处风速较大^[3],增大了桥上列车的风荷载。车桥耦合作用也会增大列车的动力响应,加大了桥上行车的不安全性。为了降低大风天气桥上列车发生事故的可能性,在强风地区的桥上均会设置风屏障^[4],改善桥上的风环境,提高列车的行驶速度和安全系数。因此,风屏障对桥上列车行车防风性能的研究具有重要意义。

国内外相关学者针对风屏障的防风性能进行了大量研究。苏洋^[5]等人针对分离式公铁双层桥面桥梁-列车-风屏障系统气动效应进行了风洞试验,研究了有无风屏障对列车的气动力系数的影响,讨论了间隔高度对列车气动力系数的影响情况。向活跃^[6]等人利用风洞试验和数值模拟2种方法,分别对风屏障作用下桥梁和列车的气动特性进行了系统分析,研究表明:轨道上方的流场分布和车辆风荷载受风屏障高度和透风率影响较大。何旭辉^[7]等人采用同步测压方法,分析了风屏障对典型车桥组合状态下列车的风压分布特征,从流体力学角度解释了风屏障的气动效应机理。Telenta^[8]等人通过改变风屏障的障条倾斜角度,对车辆气动特性进行了研究,以车辆所受最小侧向力为目标,对障条间距及倾斜角度进行了优化。Papesch^[9]通过风洞试验对铁路桥上风屏障防风性能进行分析,研究了风屏障形式对车辆倾覆力矩的影响,并得到了合理的风屏障形式。Suzuki^[10]等人研究了风屏障的防风性能,表明:路基、桥梁等下部结构及周围地貌等因素对风屏障高度、透风率等参数最优值的选取有影响,可通过风洞试验确定。张佳文^[11]等人通过风洞试验,研究了不同风屏障高度与透风率,以及风偏角对桥上高速列车气动系数的影响情况。这些研究中桥梁断面大多为箱形结构,桥面单一,仅部分针对分层或分离式公铁两用桥。对于不同风偏角下风屏障对公铁平层桥上列车气动特性的影响研究还未见报道。列车在侧风环境中行驶,气动特性与风偏角 β 有关,运行速度和风速的改变会使 β 发生变化,对不同风偏角下风屏障的防风性能研究具有现实

意义。

公铁平层桥梁结构较公铁分层桥梁或一般公路桥梁结构面宽,桥上汽车、列车与桥梁间的气动干扰较其他桥梁有显著不同,还需考虑风屏障的影响。因此,开展公铁平层桥梁-列车-风屏障系统间的相互气动干扰研究,非常有意义。本研究以某公铁平层大跨度斜拉桥为研究对象,拟对两类风屏障考虑风屏障透风率和高度的影响下,对不同风偏角的桥上中间列车的三分力系数进行了风洞试验。基于试验结果,对比分析2种风屏障下桥上列车的气动特性。计算桥上列车的倾覆力矩系数,研究不同风偏角下风屏障的透风率和高度,探讨风屏障防风效果的影响。

1 风洞试验

1.1 测试模型及装置

试验在长沙理工大学大型边界层风洞实验室中进行,该实验室包括水平回流高速试验段(高速试验段)和直流低速试验段(低速试验段)。高速试验段的尺寸为宽4.0 m×高3.0 m×长21 m,风速范围为1.0~45.0 m/s。低速试验段的尺寸为宽10.0 m×高3.0 m×长21.0 m,风速范围为1.0~18.0 m/s。本次试验在高速试验段内的均匀流场中完成,试验风速为11.5 m/s。

模型为某平层公铁两用大桥,桥梁中间为双线铁路,线间距为4.6 m,铁路两边是双向6车道的高速公路,公路与铁路之间设防护栏。试验中所有节段模型均采用1/43的几何缩尺比。列车原型为CRH2型客车(中间列车),列车模型尺寸长2 300.0 mm×宽78.6 mm×高81.4 mm。横风作用下外形复杂的头车三维绕流特性显著。中间车辆的外形相对比较规则,可通过测压积分得到气动力,精度可得到保证^[12-13],其结果可反映整车的气动力。缩尺后的主梁与列车断面组合如图1所示。上游列车布置6个测压断面,下游列车布置2个测压断面,图2的测压断面4为列车中心,每个测压断面有30个测压点,列车测压断面及测压孔布置如图2,3所示。

采用等效透风率法进行风屏障缩尺模型风洞试验时, 保持透风率相同的情况下, 通过适当增加孔径, 而减少开孔数量。风屏障 A 采用方形孔, 布置在最外侧防护栏所在位置; 风屏障 B 采用圆孔形, 布置在内侧防护栏所在位置。本试验主要针对这 2

种类型风屏障(如图 4,5 所示), 3 种透风率(20%、40% 和 60%)和 3 种高度(3.0 m、3.5 m 和 4.0 m), 研究其对车-桥系统气动特性的影响。

桥梁采用 2 台六分量应变天平测量气动力和气动力矩, 而列车采用原装进口美国 PSI DTC Initium

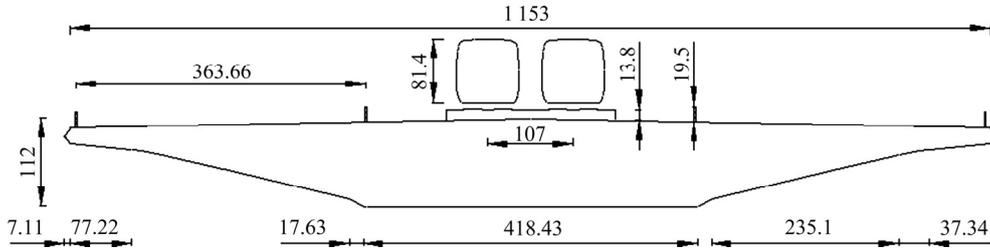


图 1 车-桥断面组合缩尺图(单位: mm)

Fig. 1 Scale cross section of train-bridge system (unit: mm)

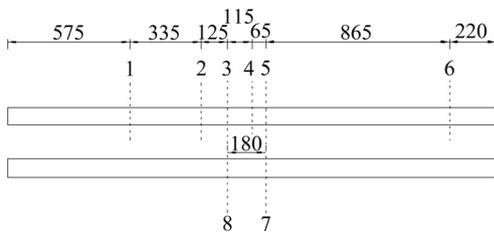


图 2 列车测压断面(单位: mm)

Fig. 2 Section diagram of train pressure measurement (unit: mm)

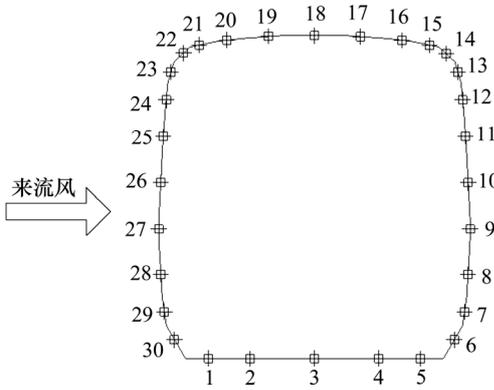


图 3 列车测压孔布置

Fig. 3 Train pressure hole layout

电子压力扫描阀, 512 通道自由组合选用 64 通道/块×8 块, 各压力测量通道精度为 0.06%, 参考点的风速由皮托管测量得到。试验中, 采样时长 60 s, 采样频率 330 Hz。

1.2 试验工况及数据处理

为研究列车所在位置、双车交会及不同风屏障组合对列车-桥梁系统气动特性的影响。试验在均匀流场中以风速 11.5 m/s 进行, 仅考虑 0°风攻角, 风

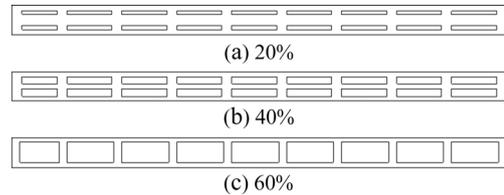


图 4 方形风屏障 A 不同透风率

Fig. 4 Different ventilation rate of highway square wind barrier characterized by the type A

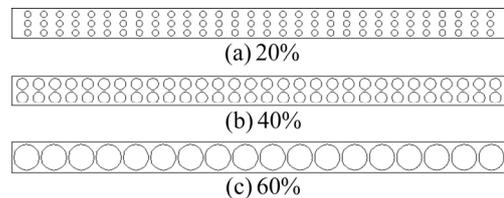


图 5 圆形风屏障 B 不同透风率

Fig. 5 Different ventilation rate of railway circular wind barrier characterized by the type B

偏角为 0°~90°, 间距为 15°, 逐一测试不同工况下中间列车的三分力系数。

本试验主要考虑单独设置风屏障 A 和 B 对桥上中间列车气动特性的影响。主要试验工况为单车上游(工况 1)、单车下游(工况 2)、双车交会上游(工况 3)和双车交会下游(工况 4)。

测点 i 处的风压系数 $C_{p_i}(t)$ 定义为^[7]:

$$C_{p_i}(t) = \frac{P_i(t) - P_0}{0.5\rho U_H^2} \quad (1)$$

式中: $P_i(t)$ 为压力扫描阀测得的 i 点处风压时程, 规定以压力作用方向指向结构表面为正, 离开为负; t 为时间, s; P_0 为无穷远处试验参考高度处的

静压; ρ 为空气密度, 取 $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$; U_H 为无穷远处参考点高度处的来流风速。

压力系数反映结构某一点的受力情况。为研究列车受到的整体气动力, 将压力系数对面积积分, 得到列车的三分力系数。气动力系数可以用体轴坐标系或风轴坐标系表示, 本试验选择风轴坐标系下的静力三分力系数为^[14]:

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U^2 HL} \quad (2)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho U^2 BL} \quad (3)$$

$$C_M = \frac{M}{0.5\rho U^2 B^2 L} \quad (4)$$

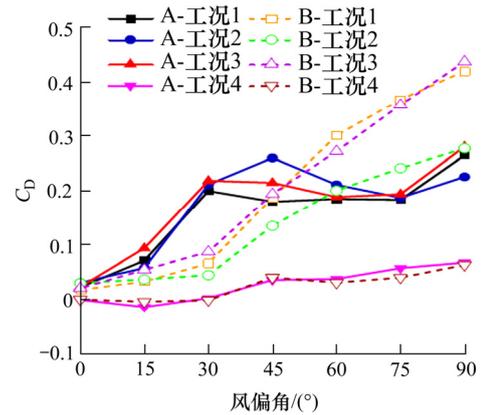
式中: C_D 、 C_L 和 C_M 分别为风轴系下模型的侧力系数、升力系数和扭矩系数; H 、 B 、 L 分别为模型的高、宽、长; F_D 、 F_L 、 M 分别为风轴系下模型受到的侧力、升力和力矩, 由风压积分得到; U 为来流平均风速。

2 车-桥-风屏障系统的列车气动特性测试结果分析

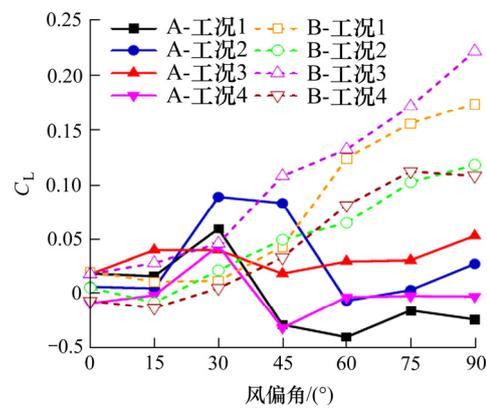
2.1 风屏障安装位置对列车气动力系数的影响

风屏障的方形开孔方式与圆形开孔方式对列车气动特性影响相差不大^[4]。因此, 对比风屏障 A 和风屏障 B 时, 可近似为相同风屏障透风率。研究风屏障不同安装位置对列车气动特性的影响, 仅考虑风屏障与列车之间的间距为变量。

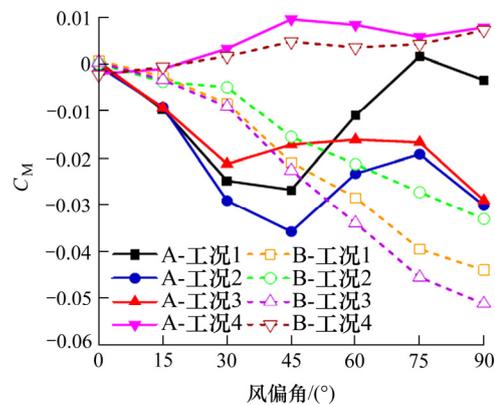
工况 1~4 在 A、B 两类风屏障下, 气动力系数随风偏角的变化情况(风屏障高 3.0 m, 透风率 40%)如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 由于风屏障 A 和风屏障 B 在桥上安装的位置不同, 两类风屏障对中间列车气动力系数影响有明显区别。风偏角小于 45°时, 工况 1~3 与风屏障 B 组合, 其列车的侧力系数和扭矩系数的绝对值均小于与风屏障 A 组合的; 风偏角大于 45°时, 设置风屏障 A 的列车三分力系数的绝对值更小。双车交会下游车的侧力系数在 4 种测试工况中最小, 主要是由于上游车的挡风作用, 使得双车交会下游车的侧力系数和扭矩系数基本不受风屏障类型影响, 仅随风偏角发生微小变化。设置风屏障 B 时, 在工况 1~3 下列车三分



(a) 侧力系数



(b) 升力系数



(c) 扭矩系数

图 6 不同风屏障类型组合下的列车三分力系数

Fig. 6 Three component force coefficient of train under different combinations of wind barrier types

力系数的绝对值均随风偏角的增大而增大, 列车迎风面与背风面的压差和车体顶部与底部的压差均随风偏角的增大而变大, 使得列车受到的侧力和升力较大。单车上游与双车交会上游车的侧力系数一致, 表明: 双车交会下游车对上游车的干扰作用不明显, 而单车上游的三分力系数要大于单车下游的, 风屏障对列车气动力的影响机理与列车所处上

下游位置相关。设置风屏障 A 时, 在工况 1~3 工况下, 列车的侧力系数随风偏角影响趋势一致, 升力系数和阻力系数随偏角变化规律性不强。4 种测试工况在横风作用下, 与风屏障 A 组合能更有效降低列车的三分力系数。

2.2 风屏障透风率对列车气动力系数的影响

单车上游时, 列车气动力系数随风屏障透风率和风偏角的变化情况(风屏障高 3.0 m, 工况 1)如图

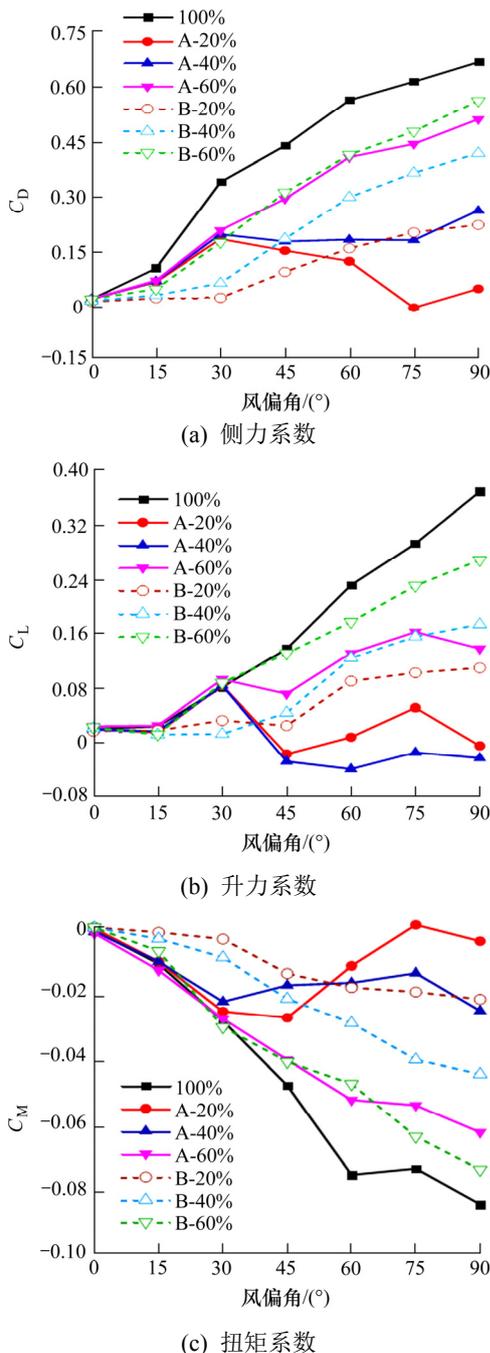


图 7 单车上游列车在不同风屏障透风率下的三分力系数

Fig.7 Three component force coefficient of single upstream train under different air permeability of wind barrier

7 所示。从图 7 中可以看出, 风屏障能有效改善侧风作用下桥上列车气动性能, 提高列车在大风环境下的运行安全。风偏角大于 30°时, 单车上游, 列车的侧力系数随风屏障透风率的增大而增大, 小透风率的风屏障承受了较多侧向风荷载。风屏障透风率为 60%时, A、B 两类风屏障下, 列车的侧力系数曲线吻合, 表明: 此时列车迎风面与背风面压差只与风屏障的透风率有关。设置风屏障 B 时, 列车的侧力系数和升力系数随风偏角的变化趋势与无风屏障时的相似, 均随风偏角的增大而增大。设置风屏障 A 时, 风偏角小于 30°, 风屏障透风率的大小对列车三分力系数没影响; 当风偏角大于 75°时, 能更有效降低列车的三分力系数。

90°横风下, 列车 4 种工况随风屏障 A 的透风率变化的情况(风屏障高 3.0 m)如图 8 所示。4 种测试工况下的列车侧力系数均随风屏障透风率增大而增大。风屏障透风率依次增加 20%时, 列车侧力系数发生等比例增长。在工况 1~3 下, 风屏障透风率从 40%上升到 60%时, 列车的升力系数剧增。表明: 风屏障的透风率越小, 车顶部与底部的压力差越小, 列车升力会大幅度减小。单车上游和单车下游的列车扭矩系数受风屏障透风率的影响一致。双车交会下游时, 列车在不同透风率影响下, 升力系数和扭矩系数的变化趋势相同, 均在透风率为 40%时最小。

2.3 风屏障高度对列车气动力系数的影响

单车上游时, 列车的三分力系数随风屏障高度和风偏角的变化情况(风屏障透风率 40%, 工况 1)如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 单车上游时, 列车的侧力系数随着风屏障高度的增大而减小。由于列车迎风面的正压和背风面的负压均在减小, 使得列车侧力减小。与图 7 相比, 风屏障透风率的大小比高度对列车气动特性的影响要大。设置风屏障 B 时, 列车的三分力系数的绝对值随风偏角的增大而增大, 列车的升力系数在风屏障高度为 3.5 m 时最小。表明: 列车顶部和底部压力差随风屏障的高度变化有一个先减小后增大的过程。随着风偏角的增大, 设置风屏障 A 列车的气动力系数会更小, 对列车在横风下行驶更有利。

90°横风下, 列车 4 种测试工况随风屏障 A 高度的变化情况(风屏障透风率为 40%)如图 10 所示。

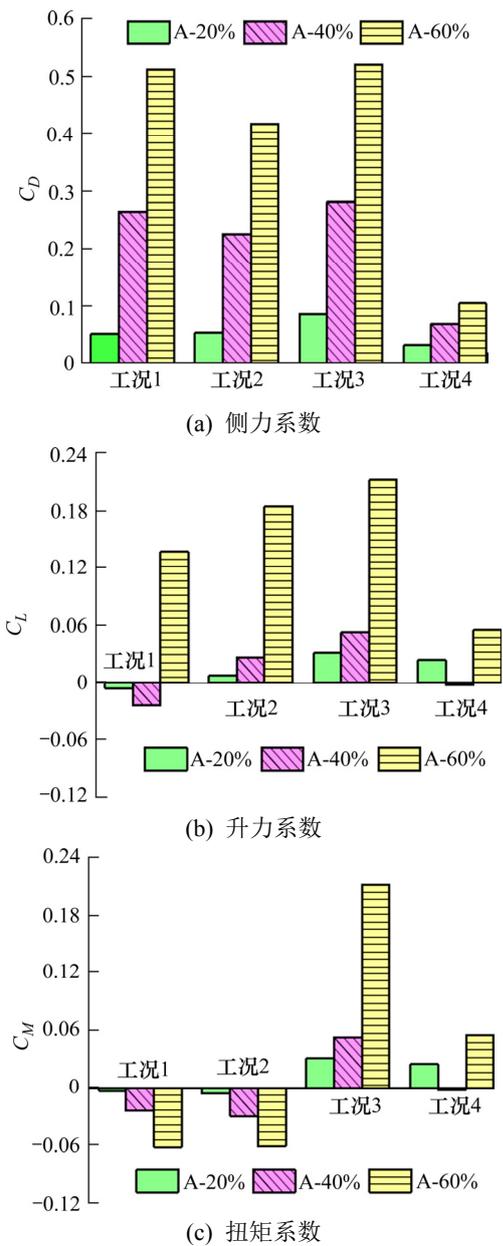


图 8 横风下列车三分力系数随风屏障 A 透风率变化情况
Fig.8 The variation of train three component force coefficient under cross wind with the permeability of wind barrier A

从图 10 中可以看出, 当风屏障高度超过 3.5 m 时, 单车下游列车的侧力系数不发生变化, 列车迎风面与背风面压力的变化不明显。双车交会下游列车的扭矩系数为正值, 与其他 3 种测试工况相反。单车上游和双车交会上游列车的侧力系数和扭矩系数受风屏障高度的影响趋势相同。列车 4 种测试工况下, 升力系数随风屏障高度的变化规律不明显。

3 风屏障防风效果研究

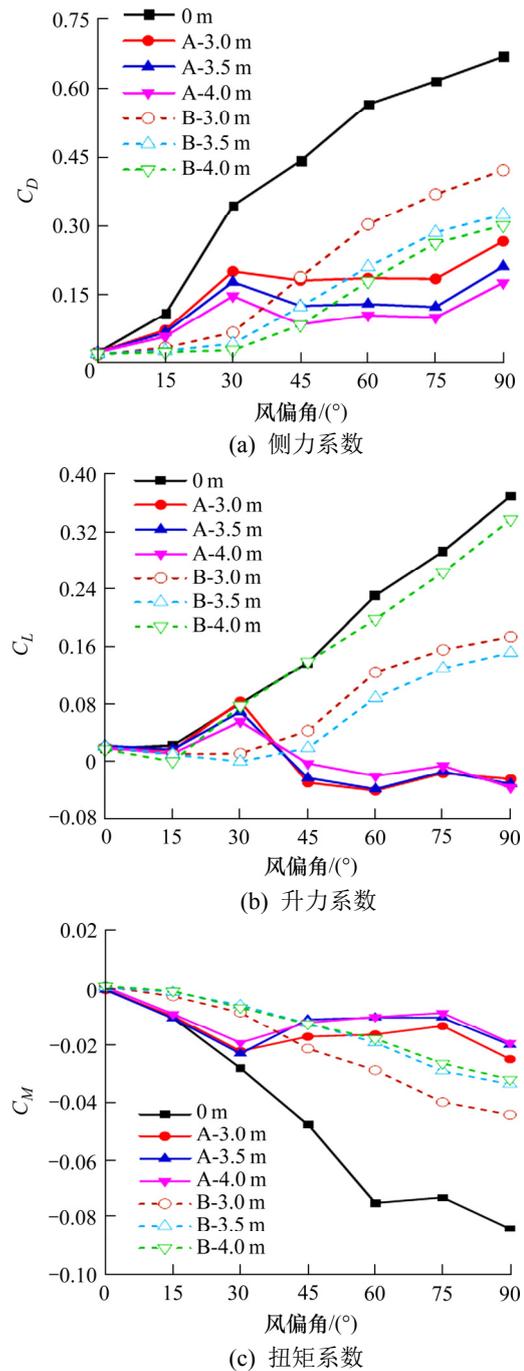


图 9 单车上游列车在不同风屏障高度下的三分力系数
Fig.9 Three component force coefficients of single-vehicle upstream trains at different wind barrier heights

车侧力、升力和二者共同产生的倾覆力矩过大造成的。倾覆力矩反映列车在横风作用下的倾覆性能, 是衡量列车横风稳定性最重要的指标。为了探讨风屏障的防风效果, 可以用三分力系数分量来定义列车的倾覆力矩系数^[15], 其表达式为:

$$C_O = \frac{C_D Hy + C_L Bx + C_M B^2}{B^2} \quad (5)$$

式中: x 和 y 分别为升力臂和阻力臂。

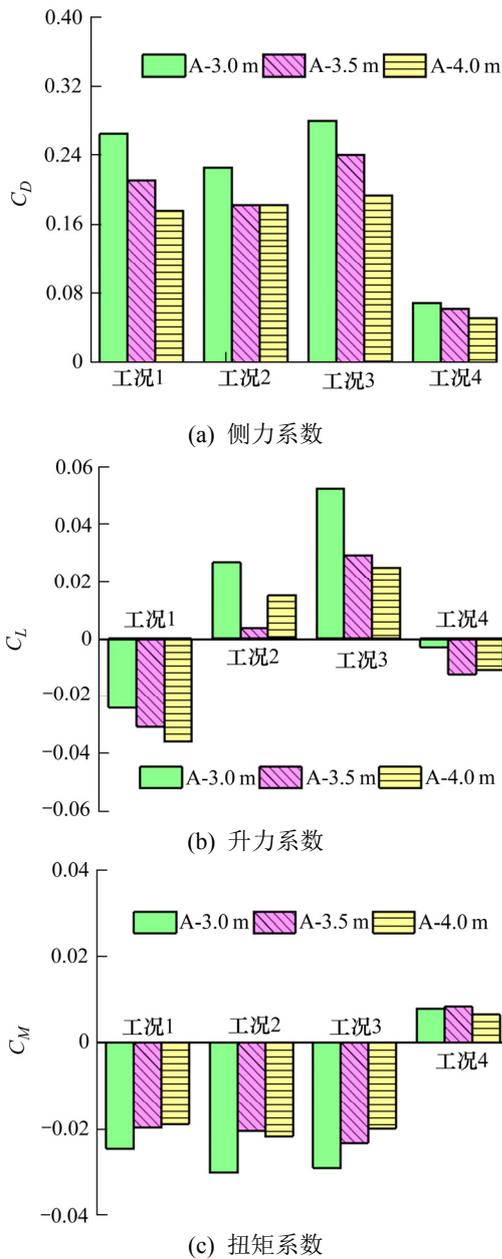


图 10 横风下列车气动力系数随风屏障 A 透高度变化情况

Fig. 10 The aerodynamic coefficient of vehicles under crosswind varies with the permeable height of wind barrier A

工况 1~4 测试工况在无风屏障作用下列车的倾覆力矩系数随风偏角的变化情况如图 11 所示。从图 11 中可以看出, 列车 4 种测试工况的车辆倾覆力矩系数均随风偏角的增大而增大, 90°横风下的列车倾覆力矩系数最大, 行驶安全性问题最突出。单车上游列车倾覆力矩系数在 4 种测试情况中最大, 受风荷载影响最显著; 双车交会上游与单车上游列车倾覆力矩系数随风偏角变化趋势基本一致, 数值也相差不大。表明: 双车交会下游列车对上游列车的气动干扰不明显。由于双车交会下游列车受

上游列车对风荷载的遮挡作用, 使得双车交会时下游列车的倾覆力矩系数最小, 列车运行偏安全。

列车的气动力系数随风偏角的变化而变化, 在不同的风偏角下, 风屏障的防风效果可能会有所不同。因此, 本研究针对不同风偏角下风屏障的防风性能进行了分析, 风屏障对列车的防风效果可用倾覆力矩系数的风速折减率指标 ζ_0 近似评价^[15]:

$$\zeta_0 = \frac{C_{O} - C_{OW}}{C_{O}} \quad (6)$$

式中: C_{OW} 为有风屏障情况下的倾覆力矩系数; C_{O} 为无风屏障时的倾覆力矩系数。

针对单车上游给出了风屏障 A 和 B 在不同透风

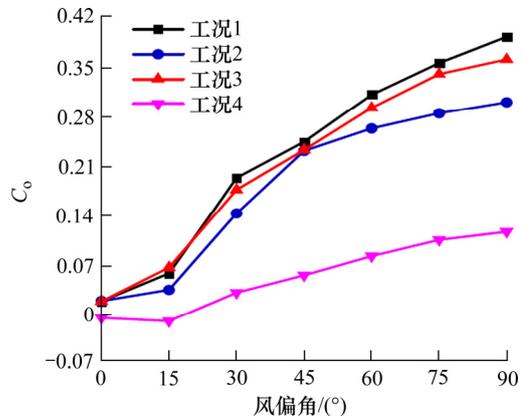
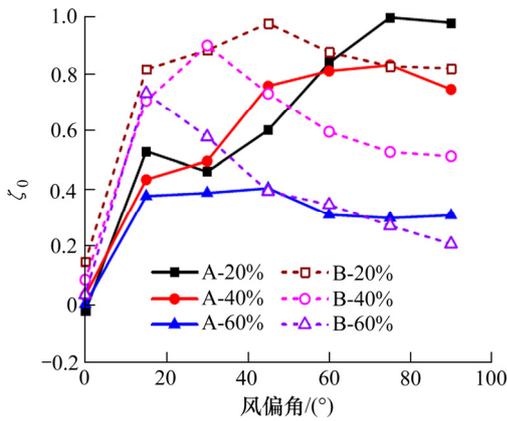


图 11 列车倾覆力矩系数随风偏角变化情况

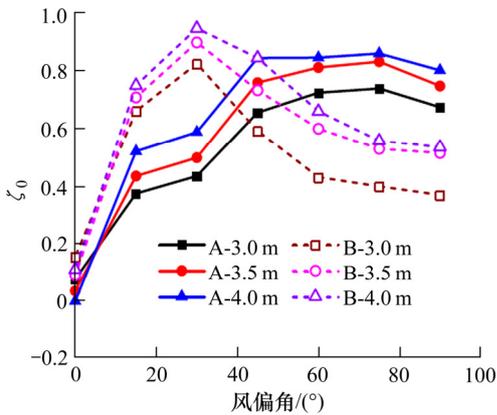
Fig.11 Variation of wind deflection of vehicle overturning moment coefficient

率和不同高度下 ζ_0 随风偏角的变化情况(工况 1)如图 12 所示。从图 12(a)和(b)中可以看出, 风偏角小于 15°时, 风屏障 A 的防风效果受透风率和高度的影响不明显, 主要受风偏角的影响。当风偏角大于 60°时, ζ_0 随风屏障 A 透风率的增大而减小。风屏障 A 透风率为 60%时, 风偏角在 15°~45°和 60°~90°两个范围内, ζ_0 为 2 个恒值, 风屏障防风效果一致。风屏障 A 透风率为 20%, 风偏角超过 75°时, ζ_0 接近 1, 此时风屏障防风效果极佳。从图 12(b)中还可以看出, 不同风屏障高度下, ζ_0 随风偏角变化规律一致, 风屏障防风效果随着风屏障高度的增加而变好。风偏角在 45°~90°范围内, 设置风屏障 A 的防风效果随风偏角变化影响不大。

对比图 12(a)和 12(b), 风屏障 A 透风率对 ζ_0 影响程度明显大于高度的影响。设置风屏障 B 时, ζ_0 随风偏角的增大先增大后减小。风偏角大于 30°时, 风屏障透风率的大小对 ζ_0 的影响程度明显大于高度的。风偏角在 0°~15°范围内, ζ_0 随风偏角的增



(a) 风屏障高 3.5 m



(b) 风屏障透风率 40%

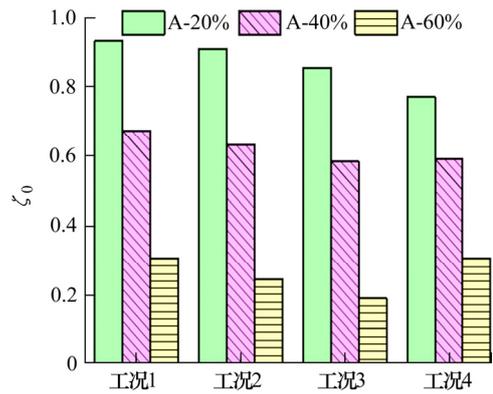
图 12 风屏障 A 和 B 作用下 ζ_0 随风偏角的变化情况

Fig. 12 Variation of ζ_0 with wind yaw angle under the action of wind barriers A and B

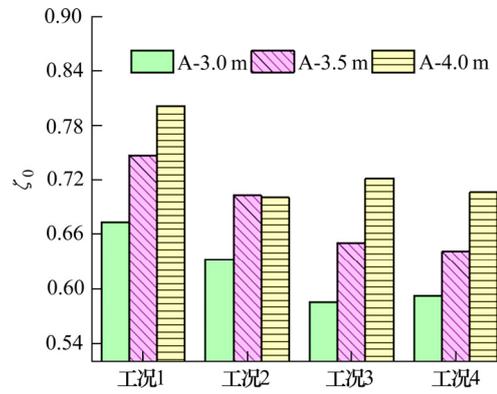
大而剧增, 风屏障防风效果明显, 此时风屏障 B 的透风率和高度对风屏障的防风效果没影响。

在图 12(a)中还可以看出, 当风偏角大于 45°时, ζ_0 随风偏角、透风率的增大而减小。风屏障 B 的透风率与风偏角的最佳组合是: B-20%-45°、B-40%-30°、B-60%-15°。从图 12(b)中还可以看出, 在不同风屏障高度下, 随风偏角变化的趋势相同。当风偏角大于 15°时, ζ_0 随风屏障 B 高度的增大而增大; 在风偏角为 30°时, 风屏障 B 在不同高度下, 防风效果均达到最优。

从图 12 中还可以看出, 风偏角在 0°~15°范围内, 风屏障的透风率和高度对风屏障的防风效果影响不明显。风偏角小于 30°时, 设置风屏障 B 的倾覆力矩系数的折减率均大于设置风屏障 A 的。风偏角大于 60°时, 风屏障 A 的防风效果明显比风屏障 B 的好。横风下, 风屏障 A 的防风效果要优于风屏障 B 的。



(a) 风屏障高 3.0 m



(b) 风屏障透风率 40%

图 13 横风下风屏障 A 不同透风率和高度对列车的防护效果

Fig. 13 Protection effect of different air permeability and height of wind barrier A under cross wind on train

因此, 针对 4 种测试工况, 在横风下风屏障 A 的不同透风率和高度对列车 4 种测试工况的防护效果如图 13 所示。从图 13(a)中可以看出, 4 种工况下, ζ_0 随风屏障透风率的变化趋势一致, 均随透风率的增大而减小, 透风率为 20%时, 风屏障防护效果最好。在图 13(b)中工况 1、工况 3 和工况 4 三种测试工况中, ζ_0 随风屏障 A 高度变化的趋势相同, 均随风屏障高度的增大而增大。单车下游时, 风屏障高度超过 3.5 m 时, ζ_0 没有变化, 风屏障的防风效果不再是设置越高越好, 所以风屏障对单车上游列车的防护作用是最好的。双车交会下游列车由于上游列车的挡风效应, 风屏障对其影响不大。

4 结论

以某高铁平层桥面桥梁-列车-风屏障系统为研究对象, 通过对不同工况下的列车三分力系数的

测试, 分析了风屏障的类型、透风率和高度对桥上列车气动力系数的影响, 并对不同风偏角下风屏障的防风性能进行了研究, 得出的结论为:

1) 设置风屏障, 能够显著减小列车的三分力系数。风屏障透风率大小较风屏障高度对列车的气动特性影响。风屏障在桥面上安装位置不同, 对列车气动力系数的影响也有明显区别。设置风屏障 B 时, 列车的三分力系数绝对值随风偏角的增大而增大, 与无风屏障时列车三分力系数变化规律较接近。

2) 无风屏障作用时, 侧风下单车上游列车的倾覆力矩系数最大, 受风荷载影响最显著。双车交会上游列车侧力系数随风偏角变化的趋势与单车上游列车的一致, 双车交会下游列车对上游列车干扰作用不明显。双车交会下游列车的三分力系数较小, 受风屏障和风偏角的影响小, 主要由于上游列车对其挡风作用明显。

3) 风偏角在 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 范围内, 倾覆力矩系数的折减率主要随风偏角的增大而增大, 风屏障的透风率和高度对防风效果影响不明显。风偏角小于 30° 时, 设置风屏障 B 的倾覆力矩系数折减率均大于设置风屏障 A 的; 风偏角大于 60° 时, 风屏障 A 的防风效果明显要比风屏障 B 的好。 90° 横风下, 设置风屏障 A 对桥上列车行车安全更有利。

这里需要特别说明的是, 如果只有列车存在的条件下, 可以通过转动列车模型模拟列车相对风速风偏角的变化, 测得的列车气动力结果与运动状态下列车各相对风速风偏角的较吻合。但对于列车-桥系统而言, 由于只有列车沿桥轴方向(顺桥向)运动, 而桥梁在列车运动方向是不动的, 两者与气流的相对风偏角不一样。因此, 测得的列车相对风速风偏角的气动力, 会存在一定的误差。但本研究的试验结果可以定性地反映风屏障各参数对列车气动特性的影响, 对风屏障的设计具有一定的指导意义。后期会研发移动列车测试装置与方法, 进一步研究移动列车气动力随风偏角的变化情况。

参考文献(References):

[1] He X H, Zou Y F, Wang H F, et al. Aerodynamic characteristics of a trailing rail vehicles on viaduct based on still wind tunnel experiments[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 135: 22-

- [2] 王海龙, 张治, 刘畅, 等. 侧风环境高速公路隧道口防风栅优化设计[J]. 公路工程, 2019, 44(5): 99-104. (WANG Hai-long, ZHANG Zhi, LIU Chang, et al. Research on wind tunnel of tunnel portal based on strong crosswind environment[J]. Highway Engineering, 2019, 44(5): 99-104. (in Chinese))
- [3] 晏聪, 李春光, 韩艳. 非均匀风场对大跨度悬索桥颤振性能的影响[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(3): 51-58. (YAN Cong, LI Chun-guang, HAN Yan. Influence of non-homogeneous wind field on flutter performance of long-span suspension bridges[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(3): 51-58. (in Chinese))
- [4] 向活跃. 高速铁路风屏障防风效果及其自身风荷载研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013. (XIANG Huo-yue. Protection effect of wind barrier on high speed railway and its wind loads[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese))
- [5] 苏洋, 李永乐, 陈宁, 等. 分离式公铁双层桥面桥梁-列车-风屏障系统气动效应风洞试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(12): 101-108. (SU Yang, LI Yong-le, CHEN Ning, et al. Study on aerodynamic effects of the separate-type highway-railway double-deck bridge-vehicle-wind screen system by wind tunnel tests[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(12): 101-108. (in Chinese))
- [6] 向活跃, 李永乐, 胡喆, 等. 铁路风屏障对轨道上方风压分布影响的风洞试验研究[J]. 实验流体力学, 2012, 26(6): 19-23. (XIANG Huo-yue, LI Yong-le, HU Zhe, et al. Effects of wind screen on wind pressure distribution above railway tracks by wind tunnel test[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(6): 19-23. (in Chinese))
- [7] 何旭辉, 邹云峰, 杜风宇. 风屏障对高架桥上列车气动特性影响机理分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(3): 66-71. (HE Xu-hui, ZOU Yun-feng, DU Feng-yu. Mechanism analysis of wind barrier's effects on aerodynamic characteristics of a train on viaduct[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(3): 66-71. (in Chinese))
- [8] Telenta M, Batista M, Biancolini M E, et al. Parametric numerical study of wind barrier shelter[J]. Wind and Structures, 2015, 20(1): 75-93.
- [9] Papesch A. A model study of windbreaks on railway on bridge[J]. New Zealand Engineering, 1972, 27(4): 132-139.
- [10] Suzuki M, Tanemoto K, Maeda T. Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1/2): 209-218.

(下转至 74 页)

- side walls[J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*,2004,69(3 Pt 1):031303.
- [9] 胡乐山.圆弧形挡土墙主动土压力计算[J].水利水电技术,1982,13(5):31-37.(HU Le-shan.Calculation of the active soil pressure of circular retaining wall[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*,1982,13(5):31-37.(in Chinese))
- [10] 单锦洪.圆弧形挡土墙的整体计算[J].水利水电技术,1983,14(11):10-15.(SHAN Jin-hong.Calculation of the Active Soil Pressure of Circular Retaining Wall[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*,1983,14(11):10-15.(in Chinese))
- [11] 何俊.圆弧形挡土墙稳定计算[J].海河水利,1989(5):52-57,64,61.(HE Jun. Stability calculation of circular retaining wall[J].*Haihe Water Resources*,1989(5):52-57,64,61.(in Chinese))
- [12] 黄旺,杨建军,黄娟.几种挡土墙主动土压力理论对比及墙体应力分析[J].长沙理工大学:自然科学版,2017,14(3):29-34.(HUANG Wang, YANG Jian-jun, HUANG Juan. Comparison of several active earth-pressure theories and stress analysis for retaining walls[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science*,2017,14(3):29-34.(in Chinese))

(上接第 59 页)

- [11] 张佳文,郭文华,熊安平,等.风障对桥上高速列车气动特性影响的风洞试验[J].中南大学学报:自然科学版,2015,46(10):3888-3897.(ZHANG Jia-wen, GUO Wen-hua, XIONG An-ping, et al. Experiment study on the effect of wind barrier on aerodynamic characteristics of high-speed train on bridge[J]. *Journal of Central South University:Science and Technology*,2015,46(10):3888-3897.(in Chinese))
- [12] 邹云峰,何旭辉,李欢,等.风屏障对车桥组合状态下中间车辆气动特性的影响[J].振动工程学报,2016,29(1):156-165.(ZOU Yun-feng, HE Xu-hui, LI Huan, et al. Effect of wind barrier on aerodynamic characteristics for the trailing train under cases of vehicle-bridge coupling[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2016, 29(1): 156-165. (in Chinese))
- [13] 韩艳,蔡春声.风-车-桥耦合系统的车桥气动特性[J].长沙理工大学报:自然科学版,2009,6(4):21-26.(HAN Yan, CAI Chun-sheng. The aerodynamic characteristics of the vehicle and bridge for the coupled wind-vehicle-bridge system[J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science*, 2009, 6(4): 21-26. (in Chinese))
- [14] Xiang H Y, Li Y L, Chen B, et al. Protection effect of railway wind barrier on running safety of train under cross winds[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2014, 17(8): 1177-1187.
- [15] Xiang H Y, Li Y L, Wang B, et al. Numerical simulation of the protective effect of railway wind barriers under crosswinds[J]. *International Journal of Rail Transportation*, 2015,3(3):151-163.