

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022110720240476

文章编号: 1674-599X(2024)02-0038-09

引用格式: 何宝华. 风屏障透风率对T型梁桥车桥耦合振动的影响[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(2): 38-46.

Citation: HE Baohua. Effect of wind barrier porosity on coupled vibration of train-bridge system for simply supported T-beam bridge of heavy haul railway in cross wind[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(2): 38-46.

风屏障透风率对T型梁桥车桥耦合振动的影响

何宝华

(国能新朔准池铁路(山西)有限责任公司, 山西 朔州 036002)

摘 要: 为探究强风环境下, 风屏障透风率对重载铁路桥车桥耦合振动的影响, 依据弹性系统总势能不变值原理, 建立风荷载作用下车桥耦合振动方程, 计算横风作用下, 列车通过安装了不同透风率风屏障的T型梁桥时车桥的气动三分力系数和车桥振动响应。研究结果表明: 随着风屏障透风率的增大, 列车阻力系数增大, 桥梁阻力系数减小; 桥梁竖向位移对风屏障透风率的变化不敏感, 桥梁横向位移随风屏障透风率的增大而小幅增大; 机车的脱轨系数和轮重减载率随着风屏障透风率的增加而增加; 风屏障透风率为30%时重车横向摇摆力最小, 风屏障透风率为20%时空车横向摇摆力最小。

关键词: 重载铁路; 车桥耦合振动; 数值计算; 风屏障; 动力响应; 简支T梁

中图分类号: U24

文献标志码: A

Effect of wind barrier porosity on coupled vibration of train-bridge system for simply supported T-beam bridge of heavy haul railway in cross wind

HE Baohua

(CHN Energy Xinshuo Zhunchi Railway(Shanxi) Co., Ltd., Shuozhou 036002, China)

Abstract: In order to study the effect of wind barrier porosity on coupled vibration of train-bridge system of heavy haul railway in crosswind, the coupled vibration equation of train-bridge system under wind load was established according to the principle of constant total potential energy of elastic system. The aerodynamic three-component force coefficients and the dynamic responses of train-bridge system were calculated when trains pass through a simply supported T-beam bridge with different pored wind barriers in crosswind. The research results show that with the increase of wind barrier porosity, the drag coefficient of trains increases and the drag coefficient of bridge decreases. The vertical displacement of the bridge is not sensitive to changes in the wind barrier porosity, and the lateral displacement of the bridge increases slightly with the increase of wind barrier porosity. The derailment coefficient and wheel unloading rate of locomotive increase with the increase of wind barrier porosity. When the wind barrier porosity is 30%, the lateral swaying force of full-load trains reaches the minimum. When the wind barrier porosity is 20%, the lateral swaying force of no-load trains reaches the minimum.

Key words: heavy haul railway; coupled vibration of train-bridge system; numerical calculation; wind barrier; dynamic response; simply supported T-beam bridge

收稿日期: 2022-11-07

通信作者: 何宝华(1976—), 男, 正高级工程师, 主要从事铁路运输、线路结构方面的研究工作。E-mail: 543013591@qq.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

强风区铁路桥梁的安全运营一直是一些学者关注的重点^[1-2]。为保证列车安全通过强风区,常采用的措施有:列车降速或停运、改善列车气动外形、设置风屏障等^[3-4]。然而列车降速或停运会极大地影响运输效率,改善列车气动外形又对抵御强横风效果不明显,所以设置风屏障是提高列车在强风区安全运营最有效的方法。鉴于横风作用下,风屏障的透风率对车桥系统振动有显著影响,深入分析这一作用机理显得尤为重要。刘叶等^[5]针对平层公铁两用桥,探究了不同风偏角、不同形式的风屏障透风率对列车三分力系数的影响,研究表明:设置透风率为40%的风屏障时,列车三分力系数随风偏角的增大而增大,风屏障方形开孔较圆形开孔的防风效果更好。何旭辉等^[6]基于同步测压技术,通过风洞试验,研究了高架桥上的风屏障对列车气动特性的影响,并依据流体力学,解释了风屏障的气动影响机理,认为风屏障最佳透风率需依据线路实际情况进行优化设计。董国朝等^[7]利用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD),得到了设置不同高度、不同透风率的风屏障时列车桥梁三分力系数,并使用数据包络法评估了不同工况下风屏障相对效率值,最后得到了在设置高为3.5 m、透风率为20%的风屏障时车桥整体气动性最优的结论。王玉晶^[8]通过风洞试验,得到了风屏障高度、透风率对列车、桥梁三分力系数的影响规律,仿真得到了列车高速运行时周围的风场,并与自然风组成联合风场作为外部激励输入车桥系统,分析了风屏障和联合风场对车桥耦合振动的影响。何玮等^[9]讨论了风屏障透风率对大跨斜拉桥车桥耦合振动的影响,研究表明:随着风屏障透风率的增大,桥梁跨中竖向位移随之增大,迎风工况下车辆动力响应增大明显。GUO等^[10]比较了混凝土简支箱梁和槽型梁在设置风屏障后,其车桥耦合系统振动性能的差异。现有的研究主要关注风屏障透风率对客运线路车桥响应的影响,然而重载铁路桥上的货物列车参振质量大,其气动外形与客运列车的相差很大^[11],横风作用下其车桥系统响应与客车的有较大差异^[12]。因此,本研究拟以新朔铁路某简支T梁桥为研究对象,采用CFD方法计算10%、20%、30%、40%四种透风率风屏障下桥梁与列车的三分力系数,使用谐波合成法模拟脉动风速,依据弹性系统总势能不变值

原理,建立车桥耦合振动方程,考虑作用于车桥系统上的静风荷载和抖振力荷载,将风效应作为外荷载列入车桥耦合振动方程中,研究不同透风率风屏障对车桥耦合振动的影响。

1 风荷载计算

1.1 数值模拟方法

采用CFD节段模型,计算设置10%、20%、30%、40%四种透风率的风屏障时,行驶的货物列车在桥梁上不同位置处桥梁与列车的气动三分力系数。桥梁节段截面按照标准双线T梁建立模型,考虑道砟外形、人行道,忽略桥面附属结构,桥梁模型截面如图1所示。根据已有的研究成果^[13-15],风屏障高度为3.5 m,将风屏障简化为带矩形镂空的矩形长条;车辆外观按照C80货物车外形建立模型。

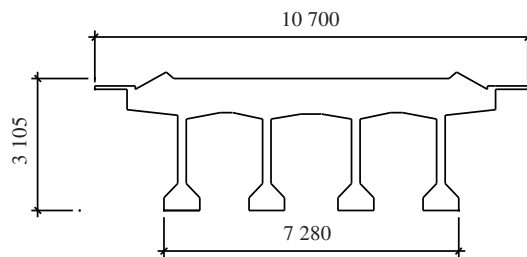


图1 桥梁模型截面(单位:mm)

Fig. 1 Section of bridge model (unit: mm)

本研究基于三维、非定常、不可压缩黏性流场,采用常用的SST $k-\omega$ 湍流模型^[16],选用Fluent建立数值模拟。数值分析区域上、下边界到主梁的距离约为主梁断面宽度的5倍,速度入口距主梁模型断面迎风面的长度约为主梁断面宽度的5倍,出口距主梁模型断面背风面的长度约为断面宽度的20倍,因此,计算域长250 m,宽50 m,高80 m,虚拟风洞阻塞比为2.2%,计算域及边界示意图如图2所示。模型网格划分采用非结构化划分方法,并对桥梁和列车近壁面处的网格进行局部细化,近壁面密网格和流场稀疏网格之间以一定的增长因子均匀过渡。压力与速度耦合方式采用Simple算法。

1.2 风洞试验验证

为验证本数值模拟的准确性,在中南大学风工程试验中心进行了无风屏障单线迎风工况的刚性节段模型测力试验。节段模型长1.8 m,缩尺比为

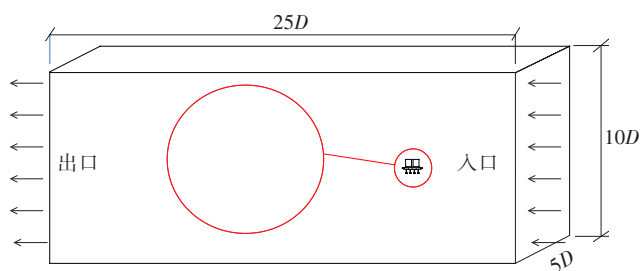


图2 计算域示意图(D 为模型宽度)

Fig. 2 Diagram of calculation domain (D is the model width)

1:25,此缩尺比下模型的长宽比为4.2,在模型两端设置大端板以减小端部效应,试验风速为15 m/s。桥梁模型采用ATI Delta测力天平采集三分力数据,采样频率为1 kHz。列车模型采用测压法测得表面各测点压力,积分得到截面的三分力。桥梁节段模型如图3所示。节段模型试验如图4所示。



图3 桥梁节段模型

Fig. 3 Section model of bridge



图4 节段模型试验

Fig. 4 Wind tunnel test for section model

数值模拟与风洞试验得到的三分力系数结果见表1。

表1 数值模拟与风洞试验结果

Table 1 Comparison of numerical simulation and wind tunnel test results

三分力系数	桥梁			列车		
	模拟值	试验值	差异/ %	模拟值	试验值	差异/ %
阻力系数	1.785	1.701	4.94	1.367	1.311	4.27
升力系数	0.155	0.170	-8.82	0.467	0.541	-13.68
扭矩系数	-0.031	-0.036	13.89	-0.094	-0.082	14.63

由表1可知,模拟得到的桥梁与列车的阻力系数、升力系数和扭矩系数与风洞试验得到的结果相比,差异分别小于5%、15%和15%。风洞试验与CFD模拟结果产生差异的原因可能是试验模型与固定模型的钢架并非完全是刚性的,在来流风时产生小幅振动,试验测得的三分力系数会产生一定误差;其次是由于数值模拟模型外形较为复杂,网格划分时采用非结构化方法划分计算域,而由于非结构化网格的计算收敛性较结构化网格的差,因此,计算结果也存在一定误差。由于阻力系数和扭矩系数是影响车桥耦合振动的主要因素,而扭矩系数绝对值非常小,可以忽略15%的扭矩系数差异,因此,对于车桥耦合振动响应计算,本研究采用数值模拟得到的三分力系数更可靠。

1.3 数值模拟结果

数值模拟得到的桥梁与列车的三分力系数见表2。车桥耦合振动响应对桥梁和列车阻力系数的变化较为敏感,由表2可知,随着风屏障透风率的增加,桥梁的阻力系数变小,列车的阻力系数变大;列车处于迎风侧工况时,列车的阻力系数更大,桥梁的阻力系数更小^[17]。

表2 三分力系数

Table 2 The aerodynamic three-component force coefficients

计算工况			三分力系数		
风屏障透风率/ %	列车位置	对象	阻力系数	升力系数	扭矩系数
10	迎风	列车	0.011	0.047	-0.009
		桥梁	2.490	0.200	0.147
	背风	列车	-0.091	-0.056	0.015
		桥梁	2.534	0.195	0.157

表2 (续)

Table 2 (Continued)

计算工况			三分力系数		
风屏障透风率/%	列车位置	对象	阻力系数	升力系数	扭矩系数
20	迎风	列车	0.329	0.010	-0.031
		桥梁	2.212	0.198	0.127
	背风	列车	-0.039	-0.037	0.010
		桥梁	2.449	0.086	0.164
30	迎风	列车	0.658	0.115	-0.062
		桥梁	1.989	0.204	0.096
	背风	列车	0.118	-0.008	-0.009
		桥梁	2.362	0.012	0.145
40	迎风	列车	0.840	0.221	-0.090
		桥梁	1.746	0.030	0.073
	背风	列车	0.328	-0.324	-0.028
		桥梁	2.246	0.028	0.125

1.4 脉动风模拟

根据文献[18]可知,任意一点的风速为平稳 Gauss 随机过程,可以分解为平均风速与零均值脉动风速。本研究考虑由平均风速引起的静风荷载和由脉动风速引起的抖振力荷载,且仅考虑横向脉动风速。本研究在考虑了模拟点的空间相关性后,运用谐波合成法对桥梁纵向每隔 20 m 处的脉动风场进行了模拟^[19]。图 5 为平均风速 25 m/s 时 0 m 处的脉动风速时程曲线。

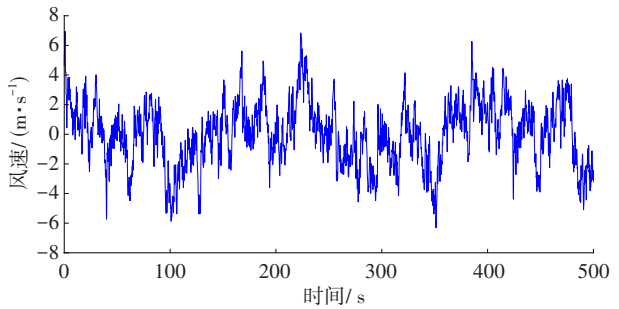


图5 0 m处脉动风速时程曲线

Fig. 5 Time history curve of pulsating wind at 0 m point

2 风-车-桥耦合振动模型的建立

2.1 桥梁有限元模型的建立

桥梁模型为 32 m×10 跨的通用简支 T 梁模型,桥墩截面为圆端形空心截面。简支 T 梁翼板和腹板采用能更好模拟板件弯曲和扭转行为的 4 节点 24

自由度板单元进行建模。T 梁马蹄、桥墩与桩基础采用 2 节点 12 自由度梁单元进行模拟。在考虑桩基础与土体的共同作用时,将土视为具有随深度成正比增长的地基系数的弹性变形介质,依据《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093—2017)^[20],计算其与桩基础间的水平弹性抗力。考虑桥梁的阻尼特性,阻尼比取 2%,采用瑞利阻尼模型建立桥梁的有限元模型,其示意图如图 6 所示。

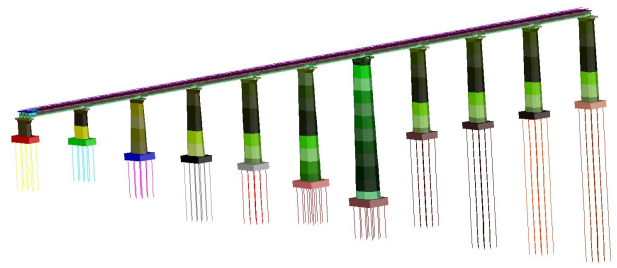


图6 桥梁有限元模型

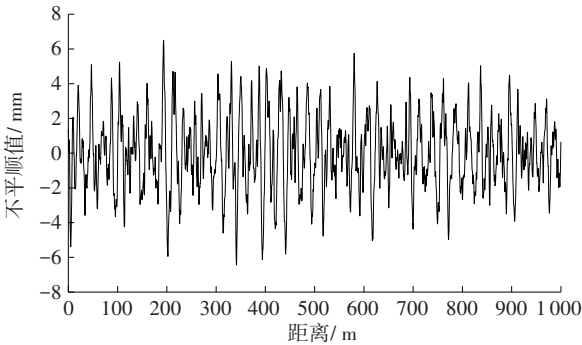
Fig. 6 Finite element model of bridge

2.2 列车模型的建立

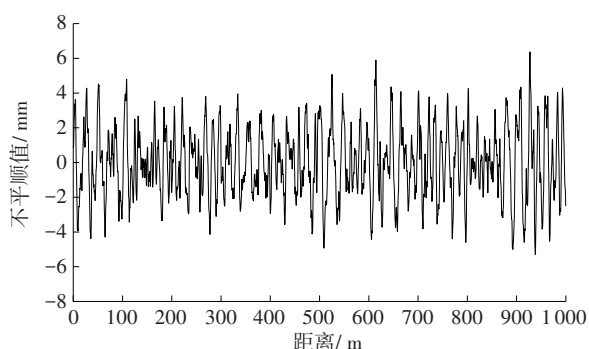
列车选用 C80 货车与 SS4 机车。依据多刚体动力学理论建立车辆仿真模型,车体和转向架考虑除前进方向平动自由度外的 5 个自由度,轮对考虑侧摆和摇头 2 个自由度,故单列列车有 23 个自由度。车辆模型示意图与各自由度参数见文献[21]。轮轨接触计算时,竖向考虑轮轨密贴,蠕滑力按照 Kalker 线性理论进行计算。

2.3 随机轨道不平顺的模拟

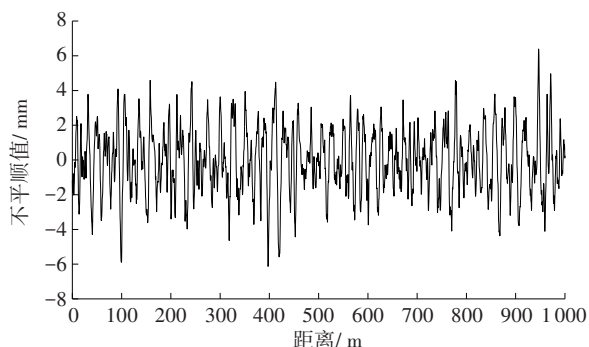
采用三角级数法模拟轨道不平顺时域的模拟样本,模拟点间距 0.25 m,模拟点个数 8 000,样本序列全长 2 000 m,轨道不平顺功率谱密度函数采用美国 AAR6 轨道谱。图 7 为左、右轨向高低不平顺时域图。



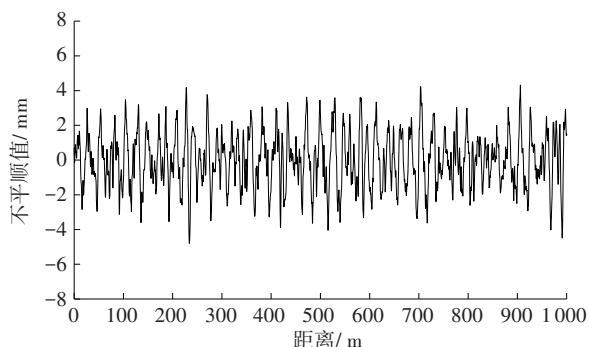
(a) 左轨高低不平顺



(b) 右轨高低不平顺



(c) 左轨向左不平顺



(d) 右轨向左不平顺

图7 轨道不平顺模拟结果

Fig. 7 Simulation results of track irregularity

2.4 风车桥耦合振动方程的建立

将轨道不平顺视为内部激励、风荷载作为外部激励,利用弹性系统动力学总势能不变值原理^[22]和形成矩阵对号入座法^[23],建立风车桥耦合系统振动方程为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_b \\ \mathbf{M}_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_b \\ \ddot{X}_t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b + \mathbf{C}_{bt} & \mathbf{C}_{bt} \\ \mathbf{C}_{tb} & \mathbf{C}_t + \mathbf{C}_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_b \\ \dot{X}_t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b + \mathbf{K}_{bt} & \mathbf{K}_{bt} \\ \mathbf{K}_{tb} & \mathbf{K}_t + \mathbf{K}_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_b \\ X_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_{be} + P_{bw} \\ P_{tw} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: X_b 、 \dot{X}_b 、 \ddot{X}_b 分别为桥梁位移、速度、加速度; X_t 、 \dot{X}_t 、 \ddot{X}_t 分别为列车位移、速度、加速度; \mathbf{M}_b 、 \mathbf{C}_b 、 \mathbf{K}_b 分别为桥梁的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; \mathbf{M}_t 、 \mathbf{C}_t 、 \mathbf{K}_t 分别为列车的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; \mathbf{C}_{bt} 、

\mathbf{K}_{bt} 分别为由桥梁振动速度引起的桥梁阻尼矩阵和刚度矩阵; \mathbf{C}_{tb} 、 \mathbf{K}_{tb} 分别为由桥梁振动速度引起的列车阻尼矩阵和刚度矩阵; \mathbf{C}_{bt} 、 \mathbf{K}_{bt} 分别为由列车振动速度引起的桥梁阻尼矩阵和刚度矩阵; \mathbf{C}_{tt} 、 \mathbf{K}_{tt} 分别为由列车振动速度引起的列车阻尼矩阵和刚度矩阵; P_{bw} 、 P_{tw} 分别为作用于桥梁和列车上的风荷载; P_{be} 为列车自重荷载。

3 结果分析

3.1 计算工况

由于满载货车与空载货车轴重明显不同,尤其在横风荷载作用下,二者的列车走行性有较大差异,因此,在计算时考虑空载和重载混编的列车编组。本研究以1节SS4+2×(5节重车+5节空车)的列车编组为对象,采用美国六级谱模拟轨道不平顺,计算4种透风率风屏障下,风速分别为25和30 m/s,列车于迎风侧、背风侧行驶共16种工况下车桥耦合振动响应,计算工况见表3。

表3 计算工况

Table 3 Calculation cases

工况 编号	风屏障透 风率/%	风速/ (m·s ⁻¹)	风向	工况 编号	风屏障透 风率/%	风速/ (m·s ⁻¹)	风向
1	10	25	迎风	9	30	25	迎风
2			背风	10			背风
3		30	迎风	11		30	迎风
4			背风	12			背风
5	20	25	迎风	13	40	25	迎风
6			背风	14			背风
7		30	迎风	15		30	迎风
8			背风	16			背风

3.2 桥梁响应

列车在迎风侧通过桥梁时,桥梁第6跨跨中竖向位移时程曲线如图8所示。从图8可以看出,对于每种工况,桥梁竖向位移均有2个波峰和2个波谷,每条曲线的每个波峰对应5节重车通过跨中,每个波谷对应5节空车通过跨中,可以看到重车产生的桥梁竖向位移是空车产生的桥梁竖向位移的4倍左右。同时,对比不同风屏障透风率下桥梁的竖向位移后发现,桥梁的竖向位移基本一致,表明:桥梁

竖向位移主要还是受列车轴重影响,对风屏障透风率变化不敏感。

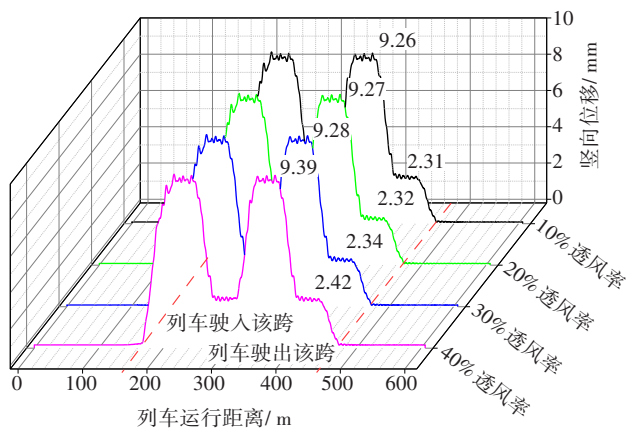


图8 桥梁竖向位移时程曲线

Fig. 8 Time history curves of bridge vertical displacement

列车在背风侧通过设置了不同透风率风屏障的桥梁时,桥梁第6跨跨中横向位移时程曲线如图9所示。从图9可以看出,当列车驶入该跨前与列车驶出该跨后,桥梁均在横风作用下进行强迫振动。因此,风屏障透风率越大,桥梁受到的横风力越小,横向位移越小;当列车运行于该跨上时,随着风屏障透风率增大,桥梁的横向位移仅小幅增大。从图9还可以看出,列车对桥梁横向振动的影响远大于风屏障透风率对桥梁横向振动的影响。

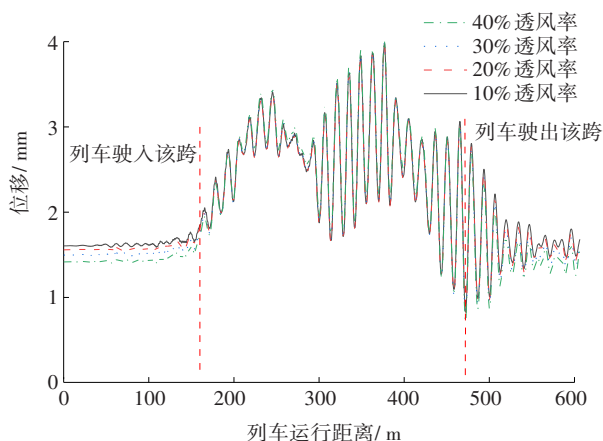


图9 桥梁横向位移时程曲线

Fig. 9 Time history curves of bridge lateral displacement

列车位于桥梁不同位置且在不同风速下通过桥梁时,桥梁跨中横向位移时程曲线如图10所示。从图10可以看出,列车位于背风侧通过桥梁时,桥梁最大位移可以达到4.7 mm,而列车位于迎风侧通过桥梁时桥梁最大位移只有3.0 mm,这是因为列车

位于背风侧时,列车对桥梁中心线的偏载效应与横风作用方向相同,二者相叠加,导致桥梁横向位移比列车位于迎风侧时产生的桥梁横向位移大很多。

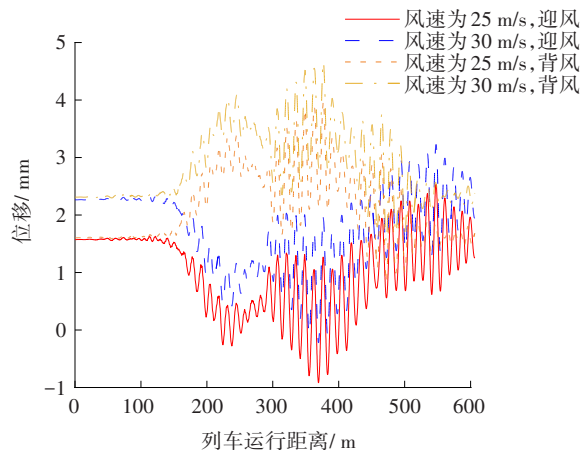
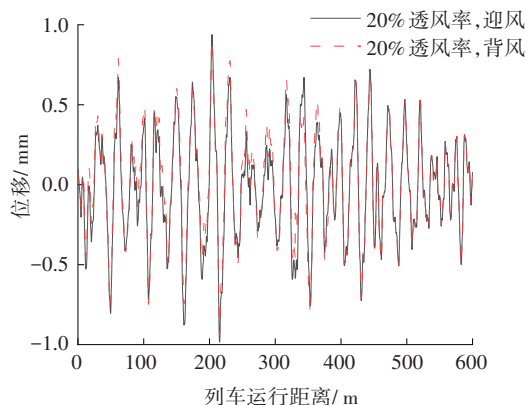


图10 列车位于不同位置时桥梁横向位移时程曲线

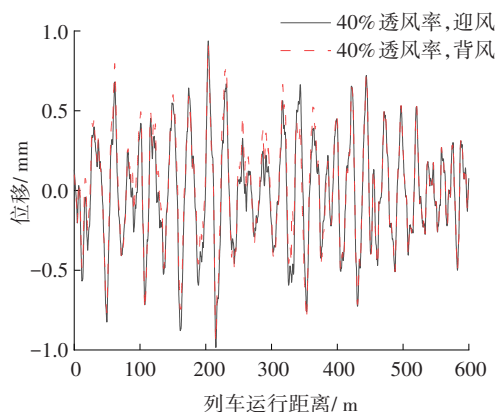
Fig. 10 Time history curves of bridge lateral displacement when trains run in different position

3.3 列车响应

风屏障的透风率分别为20%和40%时,列车第一个轮对相对于轨面的横向位移如图11所示。从图11可以看出,当列车运行在桥面上时,不同透风率风屏障下列车轮对相对于轨面的横向位移基本一致,表明:当风屏障透风率小于40%时,风屏障承受了大部分风荷载,此时列车横向位移主要由轨道不平顺和桥梁振动引起。从图11(a)还可以看出,同一风屏障透风率下,列车位于迎风侧通过桥梁时,列车相对于桥梁的位移大于列车位于背风侧时的相对位移,这是由于列车处于迎风侧行车时,列车的偏载效应与横风作用方向相反,列车振动加剧,因此,列车和桥梁的相对位移变大。



(a) 风屏障透风率为20%



(b) 风屏障透风率为40%

图11 列车轮对相对于轨面横向位移时程曲线

Fig. 11 Time history curves of the lateral displacement of the train relative to the rail surface

当风速为25 m/s,风屏障的透风率不同,且列车也以不同车速通过桥梁时,机车的响应见表4。由表4可知,机车脱轨系数和轮重减载率随着车速的增加而增加,且车速为80 km/h时,列车的轮重减载率显著增大。当风屏障透风率为10%时,横风对列车影响较小,列车运行位置对机车的轮重减载率和脱轨系数影响不大;当风屏障透风率增大时,迎风工况下列车的脱轨系数和轮重减载率都显著增大,而背风工况下列车受到的气动力小,因此,列车的脱轨系数和轮重减载率增大不明显。

表4 不同车速下机车响应最大值

Table 4 Maximum locomotive response at different speeds

透风率/%	风向	脱轨系数			轮重减载率		
		60/ (km·h ⁻¹)	70/ (km·h ⁻¹)	80/ (km·h ⁻¹)	60/ (km·h ⁻¹)	70/ (km·h ⁻¹)	80/ (km·h ⁻¹)
10	迎风	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	0.18
	背风	0.11	0.11	0.11	0.11	0.13	0.18
20	迎风	0.11	0.12	0.14	0.15	0.16	0.21
	背风	0.11	0.11	0.11	0.11	0.13	0.18
30	迎风	0.12	0.14	0.15	0.17	0.18	0.23
	背风	0.1	0.11	0.12	0.13	0.15	0.19
40	迎风	0.13	0.15	0.16	0.19	0.20	0.24
	背风	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.20

空车和重车在不同风屏障透风率和不同风速下的横向摇摆力如图12所示。从图12可以看出,列车横向摇摆力的变化不是随着风屏障透风率的增大而单调递增的。对于重车,当风屏障透风率从10%增大到30%时,横向摇摆力逐渐减小,当风屏障透风率继续增大时,横向摇摆力增大;对于空车,横向摇摆力的最小值对应于风屏障透风率20%。随着风屏障透风率的增大,桥梁受到的横风力减小,列车受到的横风力变大,而列车的横向摇摆力是二者共同作用下的结果。因此,存在一个特定的透风率使得列车的横向摇摆力最小,对于重车最优透风率为30%,对于空车最优透风率为20%。空车相对于重车轴重较轻,受横风的影响也较大,因此空车的横向摇摆力随着风屏障透风率的增大更快达到最小值。

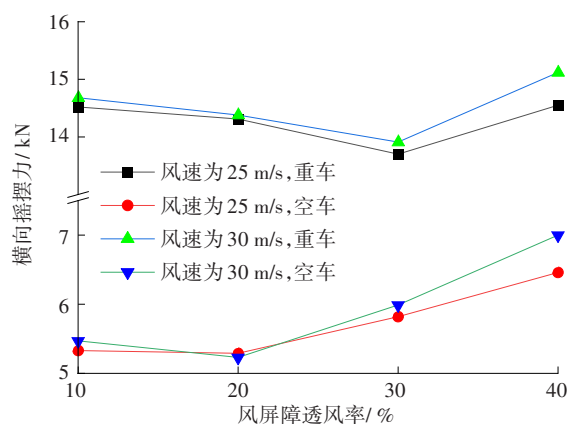


图12 敞车横向摇摆力最大值

Fig. 12 Maximum lateral swing force of gondola car

4 结论

1) 风屏障透风率的变化,在不同行车工况下都会导致列车、桥梁的气动三分力系数的变化。桥梁的阻力系数随着风屏障透风率的增大而减小,列车的阻力系数随着风屏障透风率的增大而增大。

2) 桥梁竖向位移主要由列车轴重引起,风屏障透风率大小对其影响不大;由于简支T梁刚度较大,列车振动产生的桥梁横向位移大于横风产生的桥梁横向位移,因此,桥梁的横向位移随着风屏障透风率的增大仅小幅增大。在背风工况时,列车对于桥梁轴线的偏心矩叠加同向横风力导致此工况下桥梁横向位移远大于迎风工况下桥梁的横向位移。

3) 当风屏障透风率小于40%时,列车相对于轨面的位移最大值基本不受风屏障透风率变化的影响,迎风工况时列车相对于轨面的位移大于背风工况时列车相对于轨面的位移。机车的脱轨系数、轮重减载率随着风屏障透风率和列车车速的增加而增加,且迎风工况下增加幅度更大,列车车速为80 km/h时,轮重减载率显著增大。

4) 对于重车,风屏障透风率为30%时横向摇摆力最小,对于空车,风屏障透风率为20%时横向摇摆力最小。

参考文献(References):

- [1] 金学松,郭俊,肖新标,等.高速列车安全运行研究的关键科学问题[J].工程力学,2009,26(增刊2):8-22,105.
JIN Xuesong, GUO Jun, XIAO Xinbiao, et al. Key scientific problems in the study of safe operation of high-speed trains[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (sup 2): 8-22, 105.
- [2] 田红旗.中国恶劣风环境下铁路安全行车研究进展[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(6):2435-2443.
TIAN Hongqi. Research progress in railway safety under strong wind condition in China[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41 (6): 2435-2443.
- [3] 邱晓为,李小珍,谭懿玲,等.风屏障对简支箱梁桥上风场分布影响的试验研究[J].振动与冲击,2022,41(5):287-295. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.05.038.
QIU Xiaowei, LI Xiaozhen, TAN Yiling, et al. Tests for effects of wind barrier on wind field distribution above track on a simply supported box girder bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41 (5): 287-295. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.05.038.
- [4] 李永乐,向活跃,强士中.风-列车-桥系统耦合振动研究综述[J].中国公路学报,2018,31(7):24-37. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2018.07.002.
LI Yongle, XIANG Huoyue, QIANG Shizhong. Review on coupling vibration of wind-vehicle-bridge systems[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(7): 24-37. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2018.07.002.
- [5] 刘叶,王方立,韩艳,等.风屏障对平层公铁桥上列车防风效果分析[J].交通科学与工程,2021,37(1):51-59,74. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.008.
LIU Ye, WANG Fangli, HAN Yan, et al. Study on the protective effects of wind barriers on the train on highway and railway same-story bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(1): 51-59, 74. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.008.
- [6] 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. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.03.011.
HE Xuhui, ZOU Yunfeng, DU Fengyu. 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. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.03.011.
- [7] 董国朝,黄佳颖,韩艳.风屏障对桥梁及列车的气动特性影响研究[J].交通科学与工程,2022,38(2):75-81. DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.02.010.
DONG Guochao, HUANG Jiaying, HAN Yan. Research on the influence of wind barrier on the aerodynamic characteristic of bridge and train[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38 (2): 75-81. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.02.010.
- [8] 王玉晶.考虑风屏障遮风作用和列车风效应的车桥系统振动分析[D].北京:北京交通大学,2019.
WANG Yujing. Vibration analysis of train-bridge system considering windbreak effect of wind barriers and train-induced wind flow [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [9] 何玮,郭向荣,邹云峰,等.风屏障透风率对侧风下大跨度斜拉桥车-桥耦合振动的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(5):1715-1721. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2016.05.034.
HE Wei, GUO Xiangrong, ZOU Yunfeng, et al. Effect of wind barrier porosity on coupled vibration of train-bridge system for long-span cable-stayed bridge in crosswind [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47 (5): 1715-1721. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2016.05.034.
- [10] GUO W W, XIA H, KAROUMI R, et al. Aerodynamic effect of wind barriers and running safety of trains on high-speed railway bridges under cross winds[J]. Wind and Structures, 2015, 20(2): 213-236. DOI: 10.12989/was.2015.20.2.213.

- [11] 何华, 田红旗, 熊小慧, 等. 横风作用下敞车的气动性能研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(3): 73-78. DOI: 10.3321/j.issn: 1001-4632.2006.03.013.
- HE Hua, TIAN Hongqi, XIONG Xiaohui, et al. Study on the aerodynamics performance of gondola car under cross wind[J]. China Railway Science, 2006, 27(3): 73-78. DOI: 10.3321/j.issn: 1001-4632.2006.03.013.
- [12] 郭向荣, 何玮, 朱志辉, 等. 横风作用下货物列车通过大跨度铁路斜拉桥的走行安全性研究[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(2): 41-47. DOI: 10.3969/j.issn. 1001-4632.2016.02.06.
- GUO Xiangrong, HE Wei, ZHU Zhihui, et al. Running safety of freight train passing long-span cable-stayed railway bridge under cross wind [J]. China Railway Science, 2016, 37(2): 41-47. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2016.02.06.
- [13] 王厚雄, 高注, 王蜀东, 等. 挡风墙高度的研究[J]. 中国铁道科学, 1990, 11(1): 14-23.
- WANG Houxiong, GAO Zhu, WANG Shudong, et al. A study on the height of wind break wall [J]. China Railway Science, 1990, 11(1): 14-23.
- [14] 张健. 铁路防风栅抗风性能风洞试验研究与分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(1): 13-17. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2007.01.003.
- ZHANG Jian. Wind-tunnel test investigations and analysis on wind break performances of wind fences on railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2007, 4(1): 13-17. DOI: 10.19713/j.cnki. 43-1423/u.2007.01.003.
- [15] 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: 22-33. DOI: 10.1016/j.jweia.2014.10.004.
- [16] 刘钥, 陈政清, 张志田. 箱梁断面静风力系数的CFD数值模拟[J]. 振动与冲击, 2010, 29(1): 133-137, 242. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2010.01.026.
- LIU Yue, CHEN Zhengqing, ZHANG Zhitian. CFD numerical simulation for aerostatic coefficients of a box girder section[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(1): 133-137, 242. DOI: 10.13465/j.cnki. jvs. 2010. 01.026.
- [17] 何玮, 郭向荣, 邹云峰, 等. 风屏障透风率对车-桥系统气动特性影响的风洞试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(24): 93-97, 110. DOI: 10.13465/j.cnki. jvs.2015.24.016.
- HE Wei, GUO Xiangrong, ZOU Yunfeng, et al. Wind tunnel test on the effect of wind barrier porosity on train-bridge system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(24): 93-97, 110. DOI: 10.13465/j.cnki. jvs. 2015. 24.016.
- [18] SCANLAN R H. The action of flexible bridge under wind II: buffeting theory [J]. Sound and Vibration, 1987, 60(2): 201-211. DOI: 10.1016/S0022-460X(78)80029-7.
- [19] CAO Y H, XIANG H F, ZHOU Y. Simulation of stochastic wind velocity field on long-span bridges [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(1): 1-6. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(2000)126: 1(1).
- [20] 中国铁路设计集团有限公司. 铁路桥涵地基和基础设计规范: TB 10093—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- China Railway Design Group Co., Ltd.. Code for design on subsoil and foundation of railway bridge and culvert: TB 10093—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2017.
- [21] 徐磊. 轨道不平顺的时-频分析及其作用下铁路列车振动响应的联合分析[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- XU Lei. The time-frequency analysis of track irregularity and a conjoint analysis of the railway train vibration response[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [22] 曾庆元. 弹性系统动力学总势能不变值原理[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(1): 1-3, 14. DOI: 10.13245/j.hust.2000.01.001.
- ZENG Qingyuan. The principle of total potential energy with stationary value in elastic system dynamics [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(1): 1-3, 14. DOI: 10.13245/j.hust.2000.01.001.
- [23] 曾庆元, 杨平. 形成矩阵的“对号入座”法则与桁梁空间分析的桁段有限元法[J]. 铁道学报, 1986, 8(2): 48-59.
- ZENG Qingyuan, YANG Ping. The "set-in-right-position" rule for forming structural matrices and the finite truss-element method for space analysis of truss bridges[J]. Journal of the China Railway Society, 1986, 8(2): 48-59.

(责任编辑: 欧兆虎; 英文编辑: 杜雪明)