

悬挑人行道对某PK梁斜拉桥抗风性能的影响试验研究

禹争华

(广西中交一公局平容高速公路有限公司,广西 贵港 537110)

摘要:双边箱钢主梁在大跨双索面斜拉桥中应用广泛。此类桥梁具有频率低、阻尼小、质量相对较轻的特点,其抗风稳定性是桥梁建设必须解决的关键问题。该文以在建平容高速公路上主跨636 m平南特大斜拉桥为工程背景,建立桥梁有限元空间模型并分析结构模态特征,开展了主梁节段模型弹性悬挂涡振和颤振风洞试验,研究悬挑人行道对双边箱主梁抗风性能的影响。试验结果表明:①平南特大桥双边箱主梁具有良好的涡振性能,试验中未观测到涡激振动现象;②悬挑人行道提高了桥梁的颤振稳定性,有利于桥梁抗风安全。

关键词:双边箱主梁;颤振;涡振;悬挑人行道

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

0 引言

半开口分离双边箱断面主梁首次用于美国的Pasco-Kennewick桥^[1],因此,此种类型的主梁被工程界简称为PK梁。PK梁取消了底板,节约了材料用量,且横向刚度好,在宽主梁双索面斜拉桥中广泛应用。大跨度钢桥具有频率低、阻尼小、质量相对较轻的特点,其抗风稳定性是桥梁建设必须解决的关键问题^[2-5]。针对半开口分离双边箱主梁的涡振性能和颤振性能,国内外学者开展了一些研究。孟晓亮等^[6]研究了风嘴角度对封闭和半封闭箱梁涡振及颤振性能的影响;朱乐东等^[7]研究了多孔扰流板对半封闭窄箱梁涡振的减振效果;方根深等^[8]研究了大跨度桥梁PK箱梁断面颤振性能;张天翼等^[9]针对宽幅双箱叠合梁涡振性能,开展了风嘴、中央稳定板、封闭栏杆、裙板、内侧隔流板、箱梁下导流板等常见措施的抑振效果试验研究;李春光等^[10]研究了双边主梁上双向带式输送机对桥梁涡振性能及抑振措施;白桦等^[11]采用了数值模拟方法分析了流线形双边主梁断面桥梁颤振稳定性;段青松^[12]针对宽高比达13.57的宽

幅半封闭箱梁的涡激振动特性,开展了风洞试验和CFD(计算流体动力学)研究。以上研究结果表明:半开口分离双边箱梁的涡振颤振特征十分复杂,通过气动措施,可以有效降低涡振振幅、提高颤振临界风速。

分流板是一种可以改善主梁涡振和颤振性能的气动措施。主梁两侧设计的挑臂或悬挑人行道板具有与分流板相同的气动功能。李春光等^[13-14]通过风洞试验研究了带悬挑人行道板流线形箱梁的涡振性能及气动措施;Fang等^[15]研究了PK截面梁颤振导数及其在概率颤振分析中的应用;熊龙等^[16]研究了挑臂对箱梁竖向涡激振动的影响;董国朝等^[17]通过风洞试验和CFD研究挑臂长度对钢桁梁颤振性能的影响,结果表明:悬挑板对主梁的涡振性能和颤振性能影响明显,合理的悬挑板宽度和布置位置能显著降低主梁的涡振振幅,提高主梁的颤振临界风速。具有人行交通功能的大跨桥梁,主梁外侧人行道悬挑与分流板类似,利用人行道悬挑提高桥梁抗风性能是一种非常经济的气动措施,开展悬挑人行道对双边箱主梁抗风性能影响的研究具有重要意义。

鉴于此,本文以在建的平容高速公路上主跨636 m平南特大斜拉桥为工程背景,建立桥梁有限元空间模型并分析结构模态特征,开展主梁节段模型弹性

收稿日期:2023-06-13(修改稿)

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(编号:2021JJ40208)

作者简介:禹争华,男,硕士,高级工程师.E-mail:640496358@qq.com

悬挂涡振和颤振风洞试验,通过对比无悬挑人行道主梁和有不同宽度悬挑人行道主梁的抗风性能,研究悬挑人行道对双边箱主梁抗风性能的影响。研究成果将为类似桥梁的抗风稳定性设计提供参考。

1 研究背景

为了跨越浔江,在建的平容高速公路平南特大桥采用跨径布置为(54+56+80+636+80+56+54) m的钢箱混合梁斜拉桥,边跨混凝土主梁和中跨钢箱梁均采用分离式双边箱的PK箱梁断面,立面图如图1所示。中跨钢箱梁全宽为30.0 m(不含两侧人非车道),钢箱梁顶板外表面至底板内表面的高度为3.2 m,钢混结合段外轮廓高度为3.2 m。边跨混凝土箱梁标准梁段桥梁中心线梁高3.2 m,采用纵向预应力布置,横梁配置横向预应力,其中纵向钢束由顶板

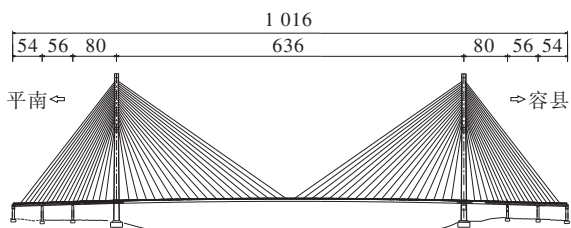


图1 平南特大桥梁立面图(单位:m)

钢束、腹板、底板钢束组成。

索塔采用H形混凝土桥塔,塔高180 m,包括上塔柱(含塔冠)、上横梁、中塔柱(包含上、中塔柱连接段及中、下塔柱连接段)、下塔柱和下横梁,均采用C50混凝土。斜拉索采用1 860 MPa平行钢丝索,双索面布置,共152根斜拉索。为了减少拉索振动,每根拉索安装了外置式阻尼器。桥塔和辅助墩处各设置2个双向活动球形钢支座,过渡墩处设置1个单向活动支座和1个双向活动支座。每个塔梁连接处顺桥向在中跨安装2套纵向黏滞阻尼器。

为了满足人行通道功能和提高颤振临界风速,在分离式双边箱外侧增设了悬挑人行道,增设悬挑人行道后的主梁全宽为35.5 m,高3.2 m。主梁桥面对称布置,单侧布置包括2.75 m的人非混行道、0.5 m的风嘴、1.5 m的拉索区锚固区、0.5 m的防撞护栏、3.0 m的紧急停车带、7.5 m的行车道、0.75 m的路缘带和1.25 m的中央分隔带。增设悬挑人行道后的分离式双边箱钢主梁横断面布置图如图2所示。混凝土主梁如图3所示。

平容高速公路平南特大桥跨径大,采用分离式双边箱钢主梁,使桥梁的频率低、质量轻、阻尼小,分离式双边箱钢主梁是典型的钝体模型,抗风稳定性是本项目重点关注的问题。

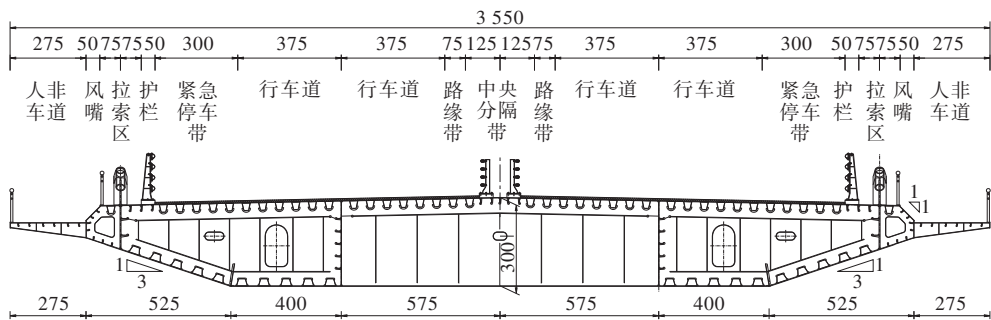


图2 分离式双边箱钢主梁横断面布置图(单位:cm)

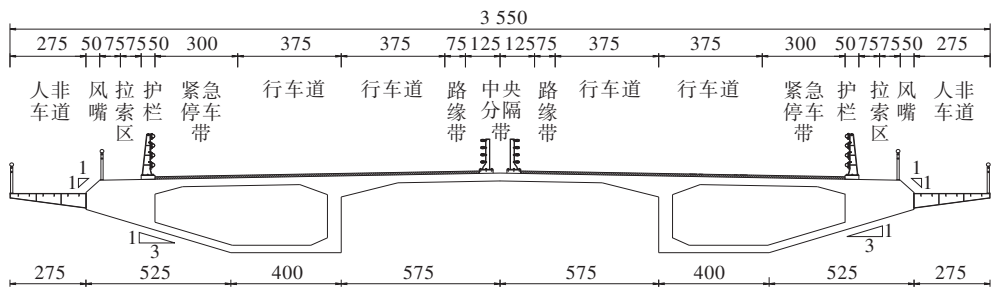


图3 分离式双边箱混凝土主梁横断面布置图(单位:cm)

2 节段模型风洞试验

2.1 桥梁动力特性

为了得到桥梁竖弯和扭转模态的固有频率,建立了空间有限元模型。主跨分离式双边箱钢主梁和边跨分离式双箱混凝土箱梁均采用空间梁单元模拟,桥塔也采用梁单元模拟,拉索采用桁架单元模拟,桥面铺装、栏杆等不考虑其刚度,仅模拟其质量,全桥共3 190个节点,3 353个单元。

通过模态分析得到桥梁的固有频率和模态振型,根据式(1)计算等效质量。平南特大桥前10阶模态的频率、等效质量和模态振型如表1所示。该桥1阶模态为主梁纵漂,频率为0.107 Hz。主梁1阶竖弯模态为对称竖弯振型,固有频率为0.270 Hz,等效质量为28 866 kg/m,模态振型如图4所示。主梁1阶扭转模态为对称扭转振型,固有频率为0.541 Hz,等效质量矩为2 912 476 kg·m²/m,模态振型如图5所示。

$$m_{Er} = \frac{m_r}{\int_0^L \phi_r^2(x) dx} \quad (1)$$

式中: m_{Er} 为第 r 阶模态单位长度等效质量; m_r 为第 r 阶模态的模态质量; L 为主梁的长度; ϕ_r 为第 r 阶模态的主梁的振型函数。

表1 平南特大桥主要模态特征

| 模态 | 频率/ Hz | 等效质量/ (kg·m ⁻¹ 或kg·m ² ·m ⁻¹) | 振型描述 |
|----|-----------|--|-----------|
| 1 | 0.107 | — | 主梁纵漂 |
| 2 | 0.270 | 28 866 | 主梁1阶对称竖弯 |
| 3 | 0.274 | 25 454 | 主梁1阶对称侧弯 |
| 4 | 0.349 | 28 480 | 主梁1阶反对称竖弯 |
| 5 | 0.491 | — | 桥塔1阶侧弯 |
| 6 | 0.491 | — | 桥塔2阶侧弯 |
| 7 | 0.497 | 27 613 | 主梁2阶对称竖弯 |
| 8 | 0.541 | 2 912 476 | 主梁1阶对称扭转 |
| 9 | 0.618 | 26 933 | 主梁2阶反对称竖弯 |
| 10 | 0.651 | — | 桥塔3阶侧弯 |

2.2 节段模型风洞试验设计

根据风洞试验室条件和《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)^[18]相关规定,主梁节段模型缩尺比取1/60,得到节段模型长184 cm,宽59.2

cm,高5.3 cm(不含栏杆)。模型宽度/有效试验区高度为59.2/200=0.24,模型长度/模型宽度为184/59.2=3.1,风洞阻塞率为5.3/200=2.7%。风洞试验室为闭口式风洞,设计的节段模型满足抗风规范风洞试验要求。风洞中节段模型弹性悬挂系统如图6所示。

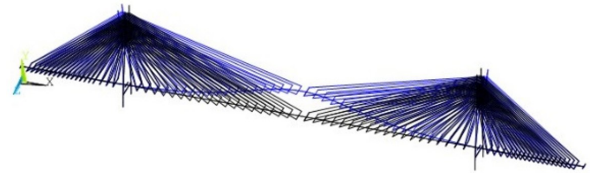


图4 1阶竖弯模态振型(0.270 Hz)

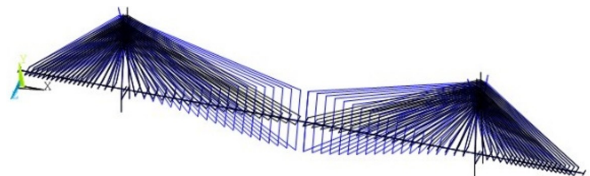


图5 1阶扭转模态振型(0.541 Hz)



图6 节段模型弹性悬挂系统

无悬挑人行道主梁节段模型弹性悬挂系统的动力特征如表2所示,实测弹性悬挂系统竖向和扭转自由振动位移时程及其功率谱如图7、8所示。在带悬挑人行道主梁节段模型颤振稳定性检验试验中,弹性悬挂系统竖向和扭转频率分别降低为2.540 Hz和5.067 Hz,风速比为6.37,以便实现检验更高的实桥风速。

根据《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)的第8.5.1条:在W1风作用水平及以下风速范围内,有行人通行功能的桥梁抖振和涡激共振引起的竖向加速度峰值不宜超过1.1 m/s²,横向加速度峰值不宜超过0.5 m/s²。推导出主梁竖弯涡振及扭转涡振允许振幅峰值分别为:

容许竖向位移峰值:

$$[h] = 0.0279/f_h^2 \quad (2)$$

容许扭转角峰值:

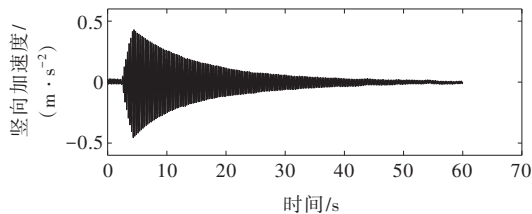
$$[\theta] = 57.3 \arctan \left(\frac{0.0558}{B f_t^2} \right) \quad (3)$$

式中: f_h 为竖弯模态频率; f_t 为扭转模态频率; B 为桥宽。

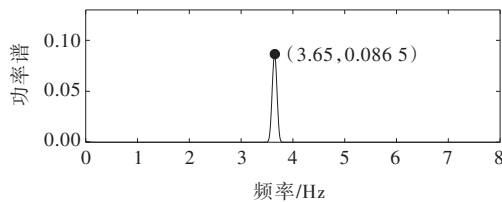
根据式(2)、(3)以及结构动力特性, 1阶竖弯模态的涡振振幅限值为 0.383 m, 1阶扭转模态的涡振振幅限值为 0.325°, 颤振检验风速为 50.5 m/s。

表 2 主梁节段模型风洞试验动力参数

| 项目 | 等效质量/ (kg · m ⁻¹) | 等效质量矩/ [(kg · m ²) · m ⁻¹] | 对称竖弯 模态/Hz | 对称扭转 模态/Hz | 扭弯频 率比 | 竖弯阻 尼比/% | 扭转阻 尼比/% | 风速比 |
|-----|----------------------------------|---|---------------|---------------|-----------|-------------|-------------|------|
| 实桥值 | 28 866 | 2 912 477 | 0.270 | 0.541 | 2.0 | 0.30 | 0.30 | |
| 模型值 | 8.02 | 0.225 | 3.650 | 7.251 | 1.99 | 0.32 | 0.33 | 4.44 |
| 缩尺比 | 1:602 | 1:604 | 13.52:1 | 13.43:1 | — | — | — | |

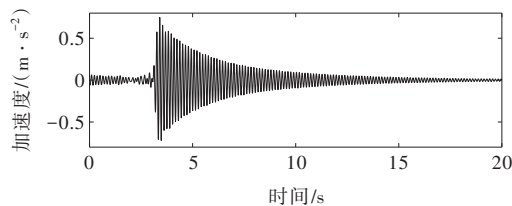


(a) 加速度时程

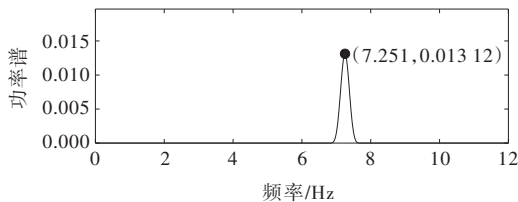


(b) 加速度功率谱

图 7 弹性悬挂系统竖向自由振动时程及其功率谱



(a) 加速度时程



(b) 加速度功率谱

图 8 弹性悬挂系统扭转自由振动时程及其功率谱

3 悬挑人行道对抗风性能的影响

3.1 无悬挑人行道主梁抗风性能

在均匀流场中进行了无悬挑人行道主梁节段模型涡激振动和颤振风洞试验, 试验工况包括 -3° 、 0°

和 $+3^\circ$ 共 3 种来流风攻角。实测主梁竖向和扭转响应均方根随风速的变化分别如图 9、10 所示。风洞试验结果表明: ① -3° 、 0° 和 $+3^\circ$ 共 3 种来流风攻角工况均未观测到涡激振动现象, 表明无悬挑人行道主梁具有良好的涡振性能; ② -3° 和 0° 风攻角条件下, 颤振临界风速大于颤振检验风速, 而 $+3^\circ$ 风攻角下, 桥梁发生了明显的“硬”颤振现象, 临界风速仅为 44.5 m/s, 小于颤振检验风速, 因此, 桥梁的颤振稳定性不满足抗风规范要求。颤振涉及桥梁的安全性, 桥梁设计和建设必须解决该问题。

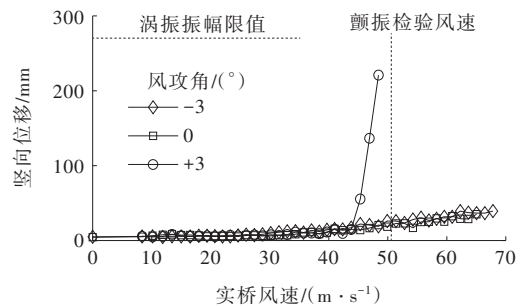


图 9 竖向位移均方根随风速的变化

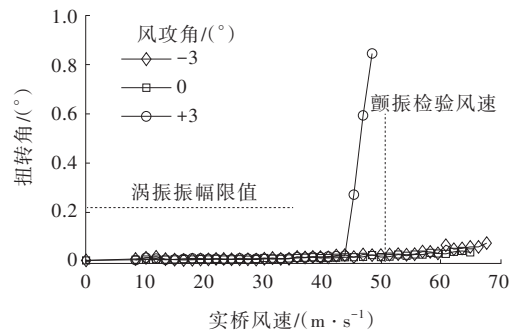


图 10 扭转位移均方根随风速的变化

3.2 悬挑人行道对抗风性能的影响

导流板是提高主梁颤振稳定性的有效气动措施之一, 系列研究结果表明: 在主梁两侧增加导流板可以改善桥梁的颤振稳定性。鉴于该桥梁具有人行通

道功能的需求,提出了在主梁两侧风嘴上增加悬挑人行道的气动措施方案,实现人行通道和颤振临界风速提升双重功能。

设计了3种宽度的悬挑人行道工况,人行道宽度分别为1.60 m、2.10 m和2.75 m。各工况在人行道外侧增加相同的护栏。3种工况的悬挑人行道设计如图11所示,护栏设计如图12所示。针对这3种试验工况,在均匀流场中开展了一3°、0°和+3°共3种风攻角的主梁节段模型风致振动试验,风洞试验结果如表3所示。+3°风攻角条件下3种工况的扭转位移与风速的关系曲线如图13所示。风洞试验结果表明:

① -3°、0°来流风攻角条件下,在实桥风速120 m/s范围内,均未观测到涡激振动和颤振现象;② +3°风

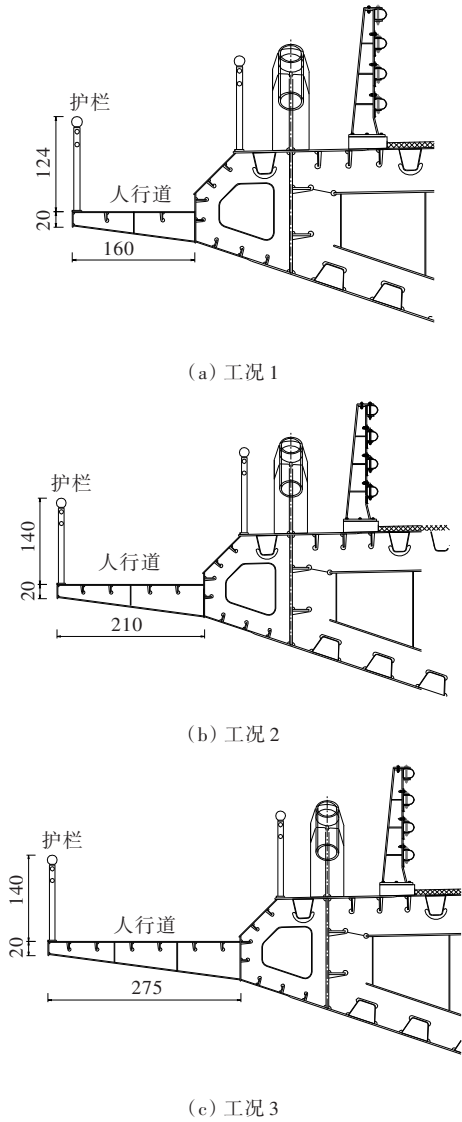


图11 悬挑人行道设计图(单位:cm)

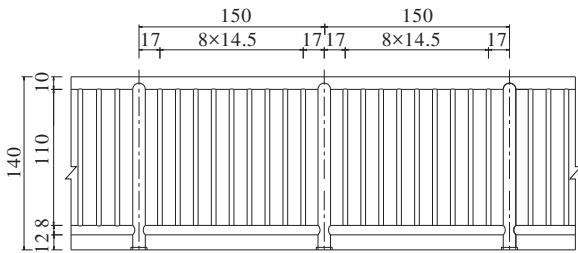


图12 人行道栏杆设计图(单位:cm)

表3 不同工况主梁风致振动性能

| 试验工况 | 风攻角/ (°) | 颤振临界风速/ (m·s ⁻¹) | 涡振 |
|--------------|-------------|---------------------------------|----|
| 无悬挑人行道 | +3 | 44.5 | 无 |
| | -3、0 | ≥65 | 无 |
| 带1.60 m悬挑人行道 | +3 | 82.0 | 无 |
| | -3、0 | ≥120 | 无 |
| 带2.10 m悬挑人行道 | +3 | 96.8 | 无 |
| | -3、0 | ≥120 | 无 |
| 带2.75 m悬挑人行道 | +3 | 111.3 | 无 |
| | -3、0 | ≥120 | 无 |

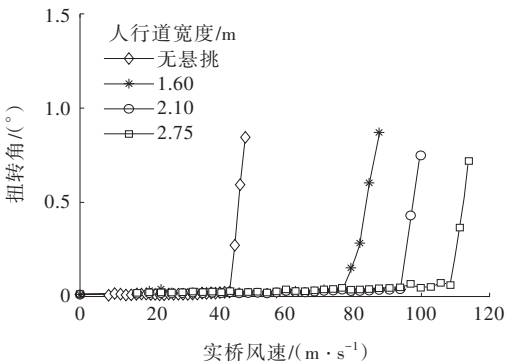


图13 扭转位移均方根随风速的变化(+3°风攻角)

攻角时,颤振临界风速随着悬挑人行道宽度的增加而提高,1.60 m的悬挑人行道就能将颤振临界风速提高到82.0 m/s。

悬挑人行道在抗风稳定性方面其作用与导流板类似,增设悬挑人行道后桥梁颤振临界风速显著提高,且随着悬挑人行道宽度的增加,颤振临界风速更高。

4 结论

以平南特大桥为工程背景,通过节段模型弹性

悬挂风洞试验,研究了悬挑人行道对双边箱主梁抗风性能的影响。得到如下结论:

(1) 在 -3° 、 0° 和 $+3^{\circ}$ 共3种来流风攻角下,无悬挑人行道双边箱主梁和3种工况的带悬挑人行道双边箱主梁均未测试到涡激振动现象,具有良好的涡振性能。

(2) 无悬挑人行道双边箱主梁在 $+3^{\circ}$ 风攻角下的颤振临界风速较低,在风嘴外侧增加人行悬挑可以有效提高主梁的颤振临界风速,随着悬挑人行道宽度的增加,颤振临界风速增大。在双边箱主梁外侧增加悬挑人行道是一种有效的提高颤振性能的气动措施。

参考文献:

- [1] GIMSING N J, GEORGAKIS C T. Cable supported bridges concept and design[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2012.
- [2] 曾广平. 大跨径悬索桥风场特征监测及其与振动加速度关联分析[J]. 中外公路, 2022, 42(2): 142-147.
- [3] 王维民, 梁爱鸿, 刘新华, 等. 超大跨桁架梁悬索桥颤振性能气动优化试验研究[J]. 中外公路, 2022, 42(4): 81-86.
- [3] 龙俊贤, 李前名, 任达程, 等. 上跨铁路桥梁主梁涡振性能及抑振措施研究[J]. 中外公路, 2021, 41(2): 148-153.
- [4] 夏烨, 简旭东, 孙利民, 等. 大跨桥梁主塔施工阶段塔吊风致振动与安全性研究[J]. 中外公路, 2020, 40(5): 93-99.
- [5] 喻宝金, 乔张旺, 付丽. 风屏障对扁平箱梁气动稳定性的影响[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 99-102.
- [6] 孟晓亮, 郭震山, 丁泉顺, 等. 风嘴角度对封闭和半封闭箱梁涡振及颤振性能的影响[J]. 工程力学, 2011, 28(S1): 184-188+194.
- [7] 朱乐东, 张海, 张宏杰. 多孔扰流板对半封闭窄箱梁涡振的减振效果[J]. 实验流体力学, 2012, 26(3): 50-55.
- [8] 方根深, 杨泳昕, 葛耀君. 大跨度桥梁PK箱梁断面颤振性能研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(9): 25-31, 60.
- [9] 张天翼, 孙延国, 李明水, 等. 宽幅双箱叠合梁涡振性能及抑振措施试验研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(10): 107-114, 168.
- [10] 李春光, 毛禹, 颜虎斌, 等. 带输送机边主梁涡振性能及抑振措施试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(4): 886-893.
- [11] 白桦, 魏洋洋, 刘博祥, 等. 流线形双边主梁断面桥梁颤振稳定性能研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(4): 51-62.
- [12] 段青松. 宽高比13.57的宽幅半封闭箱梁的涡激振动特性[J]. 西南科技大学学报, 2022, 37(4): 42-48.
- [13] 李春光, 陈政清, 韩艳. 带悬臂流线型箱梁大比例节段模型涡振试验研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(6): 12-18.
- [14] 李春光, 陈政清, 韩阳. 带悬挑人行道板流线型箱梁涡振性能研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(24): 19-25.
- [15] FANG G S, CAO J X, YANG Y X, et al. Experimental uncertainty quantification of flutter derivatives for a PK section girder and its application on probabilistic flutter analysis[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(7).
- [16] 熊龙, 廖海黎, 孙延国. 带挑臂箱梁竖向涡振特性风洞试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(11): 72-77.
- [17] 董国朝, 许育升, 韩艳, 等. 挑臂长度对钢桁梁颤振稳定性的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(3): 132-142.
- [18] 同济大学. 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.