

文章编号: 1001-4888(2024)01-0086-09

# 风屏障对分体式钢箱梁桥 涡振性能影响的风洞试验研究<sup>\*</sup>

黄文俊<sup>1</sup>, 孙洪鑫<sup>1</sup>, 温青<sup>1</sup>, 黄涛<sup>2</sup>, 杨向阳<sup>2</sup>

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南湘潭 411201; 2. 湘潭城建集团有限公司, 湖南湘潭 411204)

**摘要:** 分体式钢箱梁颤振性能好, 但涡振性能差, 有效抑制分体式钢箱梁涡激振动是这类桥梁建设与运维必须要解决的关键问题。以某在建大跨分体式钢箱梁斜拉桥为工程背景, 本文通过节段模型风洞试验, 研究了护栏、中央透气格栅和风屏障等常见气动措施对分体式钢箱梁断面涡振性能的影响, 提出了一种风屏障和中央透气格栅联合抑振的气动措施方案。研究结果表明: (1) 分体式双箱梁断面在 5 个风攻角( $\alpha$  为  $0^\circ, \pm 3^\circ, \pm 5^\circ$ ) 中均观测到大幅涡激振动, 需进行主梁抑振措施研究。(2) 封堵护栏不能有效改善主梁涡振性能, 采用风屏障可明显降低主梁涡振振幅。(3) 中央透气格栅可大幅抑制主梁涡激振动, 但会出现 2 个涡振风速区间。(4) 联合风屏障和中央透气格栅可基本抑制主梁涡激振动。

**关键词:** 分体式钢箱梁; 节段模型; 涡激共振; 风洞试验; 风屏障

**中图分类号:** U441.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-014

## 0 引言

涡激振动是大跨桥梁易在常遇风速下发生的一种自限幅的风致振动现象。目前, 已观测到我国多座桥梁发生了涡激振动, 如虎门大桥<sup>[1]</sup>和西堠门大桥<sup>[2]</sup>等。涡激振动虽因其自限幅特性不会造成桥梁的风致毁坏, 但会对桥梁运营和行车安全造成不利影响。有效抑制大跨桥梁涡激振动是当前桥梁设计和运营亟需解决的问题。

分体式钢箱梁具有良好的颤振性能, 在大跨桥梁中应用较广, 如西堠门大桥<sup>[2]</sup>、昂船洲大桥<sup>[3]</sup>、嘉绍大桥<sup>[4]</sup>等。但是, 分体式钢箱梁涡振性能差, 如西堠门大桥在常遇风速内易发生竖弯模态涡激振动<sup>[2]</sup>, 韩国的 YiSunsin 桥在施工期实测到大幅涡激振动<sup>[5]</sup>。涡激振动不仅会降低行车和行人的舒适性, 还可能导致结构构件发生疲劳破坏, 为此, 研究分体式钢箱梁的涡激振动抑振措施具有重要意义。

气动措施、结构措施和机械措施是抑制主梁涡激振动的主要方法<sup>[6-9]</sup>, 其中, 气动措施是控制桥梁涡振最为经济有效的方法。主梁涡振性能对其结构外形十分敏感, 不同的主梁尺寸, 不同的气动措施, 所产生的抑振效果均不一致, 因此, 众多学者为减小各类桥梁涡振振幅, 进行了广泛的气动措施研究<sup>[10-20]</sup>。樊永波等<sup>[10]</sup>研究了改变人行道栏杆的形式、附加斜腹板导流板以及风嘴分流板等气动措施对宽幅箱梁抗风性能的影响。杨婷等<sup>[11]</sup>通过 CFD 数值模拟发现, 改变检修车轨道可使分体式钢箱梁中央开槽区域连续脱涡现象消失。梁爱鸿等<sup>[12]</sup>发现当双幅钝体钢箱梁在两箱的间距较小时, 改变栏杆透风率对主梁涡振影响较为明显。马存明等<sup>[13]</sup>发现在分体箱梁上设置隔涡网和采用组合气动措施后

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2023-01-14; 修回日期: 2023-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078210); 湖南省杰出青年科学基金项目(2021JJ10003)

通信作者: 温青(1985-), 男, 博士, 副教授。主要研究领域: 桥梁及结构风工程。Email: cewenq@hnust.edu.cn

能有效降低主梁涡振振幅。贺耀北等<sup>[14]</sup>采用上、下中央稳定板和局部封闭人行栏杆联合气动措施,使双边钢主梁-UHPC 组合梁的涡振振幅减小了 85%。风障是改善桥上行风环境、确保行车安全的重要措施<sup>[15]</sup>,合理地设置风障能有效提高主梁涡振性能。周建龙<sup>[16]</sup>以港珠澳大桥为背景,比较了有无风障对分离式钢箱梁涡振性能的影响,发现单一风障措施难以达到较好的抑振效果。杨咏昕等<sup>[17]</sup>以 3 座分体箱梁为背景,提出了一种能有效抑制分体箱梁涡激振动的可调风障气动控制措施,但其有效性还待验证。杨咏昕等<sup>[18]</sup>还研究了风障对 60% 开槽率分体箱梁涡振性能的影响,研究结果表明,增设水平风障可有效抑制分体箱梁的扭转涡振振幅。潘韬等<sup>[19]</sup>对比了不规则开孔形式和等距开孔形式的风屏障对超宽分体三箱梁涡振振幅的影响,发现采用不规则开孔形式的风屏障对主梁涡振的抑振效果更佳。

上述研究大多是通过改变透风率或开孔形式来研究风障对主梁涡振性能的影响,对风障高度的研究较少。本文依托某在建大跨分体式钢箱梁斜拉桥为工程背景,通过节段模型风洞试验测试了主梁的涡振性能,然后根据不同的抑振机理研究了护栏、中央格栅和风障等单独气动措施对主梁涡振性能的影响,最后提出了一种联合中央开槽和风屏障的有效抑振方案,并优化了风障高度。本文研究成果对类似分体式钢箱梁断面桥梁涡振控制具有一定的参考意义。

## 1 工程概况

本文研究的桥梁为双塔双索面半漂浮体系斜拉桥,全长 1108m,桥跨布置为(70+70+70+658+100+70+70)m。桥梁两边边跨均采用混凝土箱梁,主跨和东边部分主梁采用钢箱梁。钢箱梁全长 733.4m,为分体式钢箱梁断面,含风嘴总宽 51.85m,梁高为 3.8m。钢箱梁由桥面顶板、底板、内腹板、外腹板、横隔板、风嘴、锚固构造等组成,两箱中间以钢横梁连接,斜拉索锚固于风嘴处的外纵腹板。相同的气动措施对不同横断面产生的影响是难以预测的,将能有效抑制某座桥梁涡激振动的气动措施放置到另一座桥上所产生的抑振效果不一,且分体式钢箱梁涡振性能差,因此,有必要对本文试验桥梁开展涡激振动及其抑振措施研究。斜拉桥立面布置如图 1 所示,钢箱梁横断面图如图 2 所示。

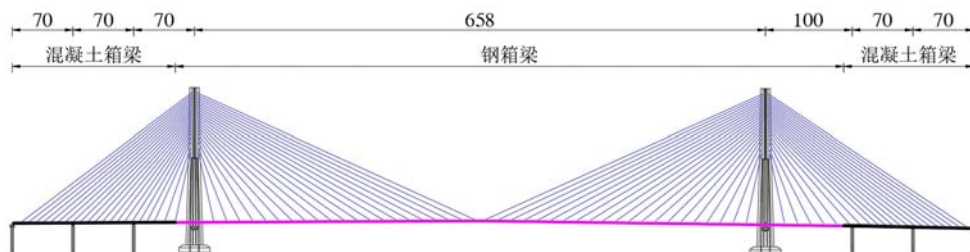


图 1 斜拉桥立面图(单位:m)

Fig. 1 Cable-stayed bridge elevation (unit: m)

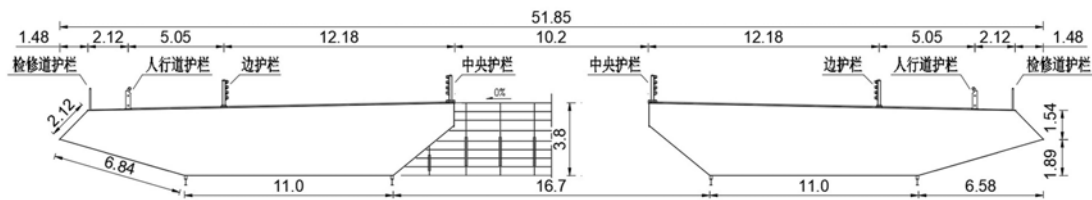


图 2 钢箱梁主梁横断面(单位:m)

Fig. 2 Steel box girder main girder cross section (unit: m)

## 2 原主梁涡激振动风洞试验

### 2.1 节段模型风洞试验

节段模型风洞试验在湖南科技大学风工程试验研究中心开展,风洞试验段的尺寸为 4.0m(宽)×3.0m(高)×21.0m(长)。节段模型缩尺比取 1:60,模型长 2.690m,宽 0.864m,高 0.063m。模型长度与模型宽度之比为 3.1<sup>[20]</sup>。

模型由 8 根弹簧悬挂在风洞专用支架上,风洞中弹性悬挂节段模型如图 3 所示。弹性悬挂系统的设计参数和动力特征见表 1。根据《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)中的规定,本次试验的分体式钢箱梁的竖向与扭转阻尼比均取值为 0.3%,并根据规范计算得到一阶竖向模态涡振限值为 0.175m,一阶扭转模态涡振限值为 0.100°。



图 3 弹簧悬挂节段模型风洞试验

Fig. 3 Spring-suspended sectional model wind tunnel test

表 1 节段模型试验动力参数

Tab. 1 Dynamic parameters of section model tests

| 参数名称   | 符号        | 单位                              | 实桥值      | 缩尺比                    | 模型值   |
|--------|-----------|---------------------------------|----------|------------------------|-------|
| 等效质量   | $m_{eq}$  | $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ | 38000    | $\lambda_m = 1/n^2$    | 10.30 |
| 等效质量矩  | $J_{meq}$ | $\text{kg} \cdot \text{m}$      | 10240044 | $\lambda_{Jm} = 1/n^4$ | 0.790 |
| 对称竖弯模态 | $f_h$     | Hz                              | 0.338    | $\lambda_f = n/k$      | 3.931 |
| 对称扭转模态 | $f_t$     | Hz                              | 0.662    | $\lambda_f = n/k$      | 7.699 |
| 竖弯阻尼比  | $\zeta_h$ |                                 | 0.30%    | 1                      | 0.30% |
| 扭转阻尼比  | $\zeta_t$ |                                 | 0.30%    | 1                      | 0.30% |
| 风速比    | $k$       |                                 |          | 1 : 5.16               |       |

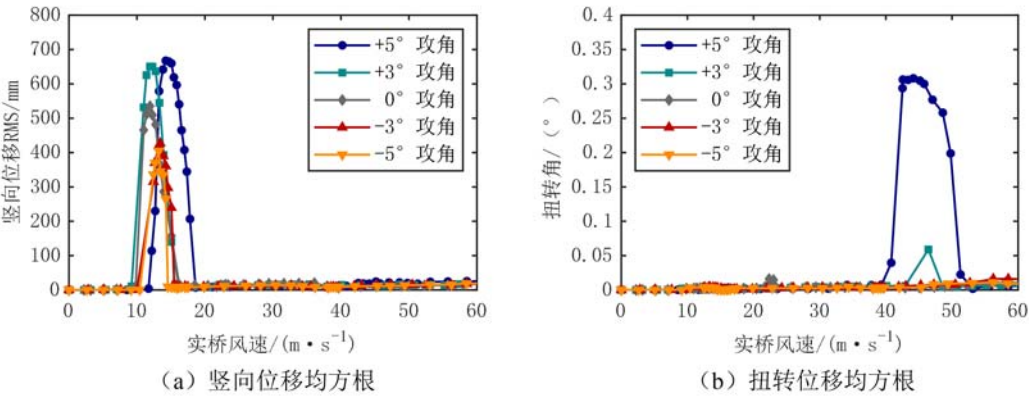


图 4 原断面涡振响应

Fig. 4 Vortex-induced vibration(VIV) response in original section

2.2 原主梁涡激振动性能

在风洞实验室中对主梁原始横断面开展了 5 种风攻角( $\alpha$  为  $0^\circ, \pm 3^\circ, \pm 5^\circ$ )涡激振动试验,不同风速下实测的主梁涡振振幅如图 4 所示。试验结果表明:在常遇风速内( $0 \sim 25\text{m/s}$ ), $+5^\circ, +3^\circ, 0^\circ, -3^\circ$ 和 $-5^\circ$ 风攻角均实测到远超规范限值的竖向涡振振幅,对应最大竖向涡振振幅分别为 0.668m、0.651m、0.535m、0.427m 和 0.405m;在 $+5^\circ$ 和 $+3^\circ$ 风攻角下观测到大幅扭转涡激振动,最大扭转振幅分别为 0.31°和 0.06°。原设计主梁断面在 5 种风攻角下均实测到大幅涡振,因此有必要通过阻尼措施或气动措施抑制主梁涡激振动。

表 2 气动措施优化工况  
Tab. 2 Aerodynamic countermeasures optimization test conditions

| 工况  | 气动措施                         | 图示           |
|-----|------------------------------|--------------|
| L1  | 原设计方案,无气动措施                  | 护栏原型,如图 5 所示 |
| L2  | 中央护栏全部封堵                     |              |
| L3  | 边护栏全部封堵                      |              |
| L4  | 边护栏隔 4 封 4                   |              |
| L5  | 检修道护栏全部封堵                    |              |
| L6  | 检修道护栏隔 4 封 4                 |              |
| L7  | 中央风障,透风率 25.9%               |              |
| L8  | 中央风障(透风 50.8%)和边风障(透风 55.9%) |              |
| L9  | 全部覆盖透风率 30%中央格栅              |              |
| L10 | 间隔覆盖透风率 30%中央格栅              |              |
| L11 | 全部覆盖透风率 12%中央格栅              |              |
| L12 | 3.82m 高风障+12%透风率中央格栅         |              |
| L13 | 3.28m 高风障+12%透风率中央格栅         |              |
| L14 | 2.47m 高风屏+12%透风率中央格栅         |              |

3 气动措施优化

3.1 封堵护栏气动措施

分体式钢箱梁单箱共设置了 4 道护栏,分别为检修道护栏、人行道护栏、边护栏和中央护栏,护栏高度分别为 1.2m、1.1m、1.2m、1.2m,透风率分别为 84%、64%、59%、59%。护栏布置如图 2 所示,护栏设计如图 5 所示。为了研究护栏透风率对分体式钢箱梁涡振性能的影响,通过连续或间隔封堵护栏的方式,开展了 5 种不同护栏透风率的主梁涡振试验。

封堵护栏措施工况包括中央护栏全部封堵(L2)、边护栏全部封堵(L3)、边护栏等距间隔封堵(L4)、检修道护栏全部封堵(L5)和检修道护栏等距间隔封堵(L6),对应的护栏透风率分别为 0%、0%、24.5%、0%和 42%。试验工况见表 2,在+5°风攻角下,封堵护栏工况的主梁涡振振幅随风速的变化曲线如图 6 所示,实测各工况最大涡振振幅见表 3。由图 6 可知,不同的封堵方式,对主梁涡振性能影响不同,但封堵护栏工况均不能有效抑制主梁涡激振动。

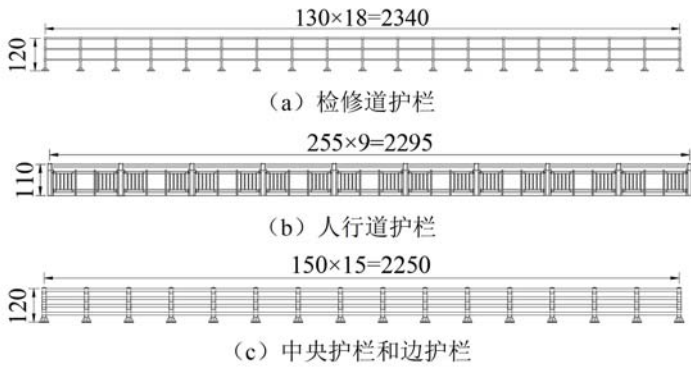


图 5 护栏设计图(单位:cm)  
Fig. 5 Guardrail design drawings(unit: cm)

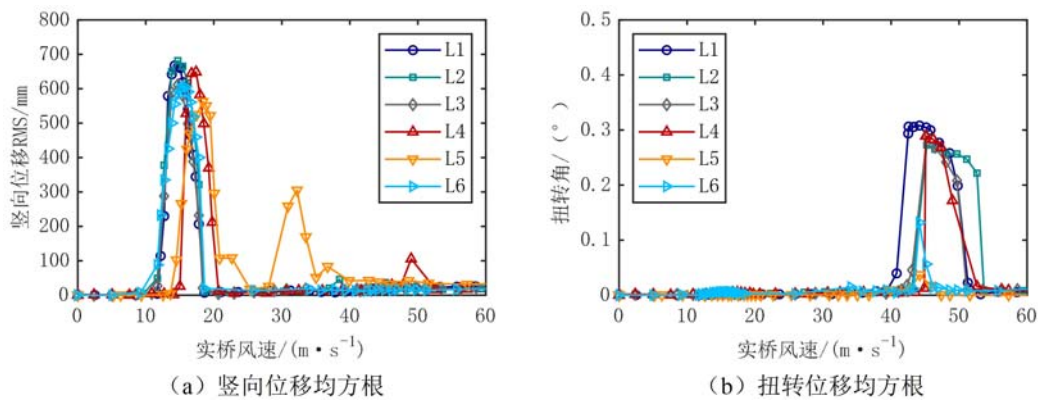


图 6 封堵护栏气动措施涡振性能

Fig. 6 Vortex vibration performance of aerodynamic countermeasures for blocking guardrails

表 3 不同工况实测涡振振幅均方根特征

Tab. 3 Root mean square(RMS) characteristics of measured vortex vibration amplitudes under different working conditions

| 工况    |       | 一阶竖弯模态 |       | 一阶扭转模态   |        |
|-------|-------|--------|-------|----------|--------|
|       |       | 竖向位移/m | 减小率/% | 转角位移/(°) | 减小率/%  |
| L1~L8 | L1    | 0.667  | 0.00  | 0.308    | 0.00   |
|       | L2    | 0.682  | −2.20 | 0.273    | 11.40  |
|       | L3    | 0.612  | 8.25  | 0.287    | 6.82   |
|       | L4    | 0.649  | 2.70  | 0.289    | 6.17   |
|       | L5    | 0.562  | 15.74 | 0.037    | 87.99  |
|       | L6    | 0.605  | 9.30  | 0.132    | 57.14  |
|       | L7    | 0.561  | 15.90 | 0.189    | 38.64  |
|       | L8    | 0.502  | 24.74 | 0.220    | 28.57  |
| L9    | 区间 1  | 0.128  | 80.80 | 0.077    | —      |
|       | 区间 2  | 0.625  | 6.40  | 0.375    | −20.80 |
| L10   | 0.243 | 63.60  | 0.322 | −4.55    |        |
| L11   | 区间 1  | 0.092  | 86.20 | 0.043    | —      |
|       | 区间 2  | 0.523  | 21.60 | 0.220    | 28.60  |
| L12   | 未测到   | —      | 未测到   | —        |        |
| L13   | 0.028 | 95.70  | 0.155 | 49.70    |        |
| L14   | 0.075 | 88.48  | 0.151 | 51.00    |        |

3.2 风障措施

护栏(风障)高度是影响涡振振幅的重要参数。由于原护栏高度较小,最高仅有 1.2m,封堵护栏没有达到理想的抑振效果,因此,本文试验设计了 2 种风障措施,分别为风障替换中央护栏(L7)和风障同时替换中央护栏和边护栏(L8)。风障下部与原护栏相同,中央风障与边风障上部分别采用格构式与网格式,中央风障高为 3.06m,边风障高为 3.82m。风障措施设计说明和图示见表 2,风障细部图如图 7 所示,2 种工况下实测的主梁涡振性能如图 8 所示。

由图 8 可知:(1)风障措施能降低主梁竖弯和扭转涡振振幅,且抑振效果优于封堵护栏措施。(2)风障措施使竖弯涡振起振风速小幅后移。风障措施虽然使主梁涡振性能得到了一定的改善,但是涡振振

幅仍然不满足限值标准。

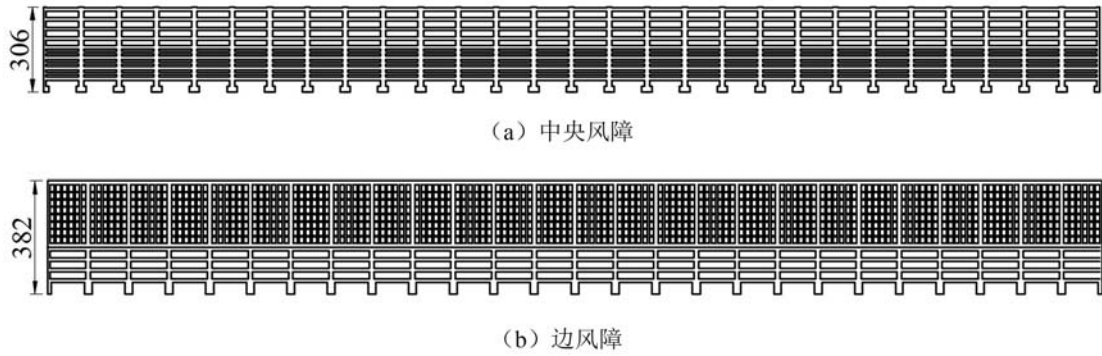


图 7 风障示意图(单位: cm)

Fig. 7 Schematic diagram of wind barrier(unit: cm)

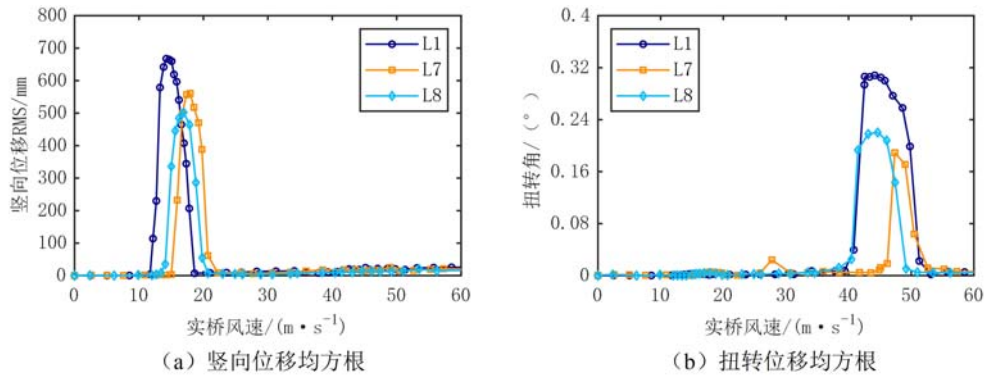


图 8 风障措施工况实测涡振振幅

Fig. 8 Measured vortex vibration amplitude under wind barrier measures

### 3.3 中央格栅措施

采用封堵护栏和风障措施后的主梁涡振振幅均未达到限值要求,而中央格栅是抑制分体式钢箱梁涡激振动的有效措施,因此本文设计了 2 种不同透风率的圆孔透气中央格栅(如图 9 所示),其透风率分别为 30%与 12%。试验共设置了 3 种工况,分别为全部布置 30%透风率中央格栅、间隔布置 30%透风率中央格栅和全部布置 12%透风率中央格栅,分别对应表 2 中 L9、L10 和 L11。增加中央格栅后的主梁涡振性能如图 10 所示。试验结果表明:(1)中央格栅透风率为 30%时,实测到 2 个竖向涡振锁定区间,全部覆盖中央格栅不能有效减小涡振振幅,但最大振幅对应风速推迟到 34m/s,间隔覆盖中央格栅能明显减小涡振振幅,最大振幅对应风速与原设计相同。(2)中央格栅透风率为 12%时,同样出现 2 个竖向涡振锁定区间,但 2 个风速区间均迟于 30%透风率中央格栅,且最大涡振幅值为 0.523m。(3)单独的中央格栅未能改善扭转涡振性能。

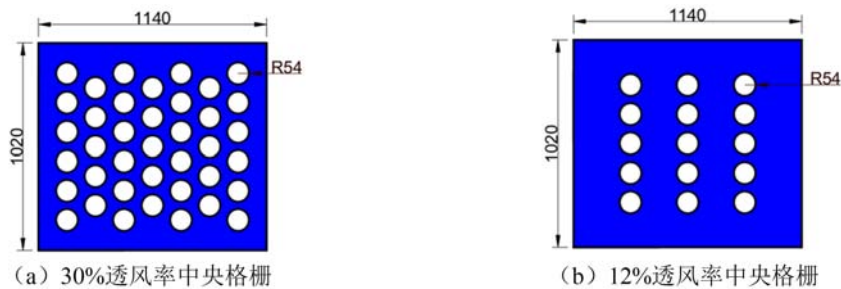


图 9 中央格栅设计图(单位:cm)

Fig. 9 Central grille design(unit:cm)

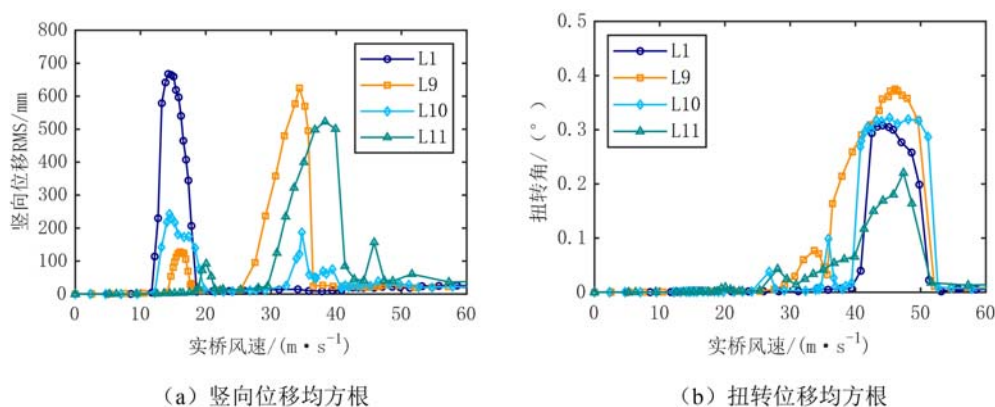


图 10 封堵透气盖板实测涡振振幅

Fig. 10 Measured vortex vibration amplitude of plugging ventilating cover

### 3.4 联合气动措施

独立的气动措施均未能产生理想的抑振效果,但增设风障和中央格栅均能不同程度地改善主梁涡振性能,为此,通过联合风障和中央格栅气动措施,开展了一系列主梁涡振抑振试验。在主梁中央开槽处全部布置 12% 透风率的中央格栅,并设计了 3 种不同高度的边风障替换边护栏,分别为 3.82m (L12)、3.28m (L13) 和 2.47m (L14)。联合气动措施设计见表 2,实测主梁涡振性能如图 11 所示。试验结果表明:

- (1) 采用风障和中央格栅联合气动措施可显著减小主梁竖向和扭转涡振振幅。
- (2) 3.82m 高风障与中央格栅气动措施能有效抑制主梁涡激振动,仅在  $0^\circ$  风攻角下检测到小幅竖向涡激振动,且扭转涡激振动现象消失。
- (3) 随着风障高度的减小,竖向和扭转涡振振幅呈现增大的趋势。

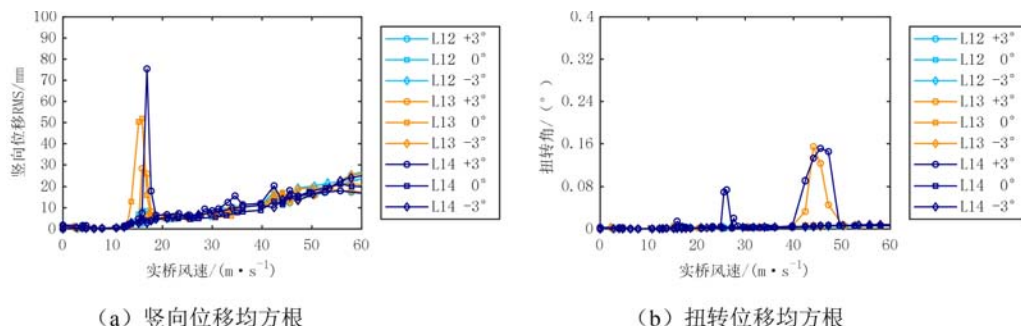


图 11 删减防撞栏杆实测涡振振幅图

Fig. 11 Deleting the measured vortex vibration amplitude diagram of the crash railing

## 4 结论

本文以某大跨分体式钢箱梁斜拉桥为背景,开展了主梁涡激振动性能及抑振措施风洞试验研究,研究结果表明:

- (1) 原设计分体式双箱梁断面在 5 种风攻角 ( $\alpha$  为  $0^\circ, \pm 3^\circ, \pm 5^\circ$ ) 下均观察到大幅涡振,  $+5^\circ$  风攻角下主梁涡振振幅最大,竖向涡振振幅为 0.67m (实桥),扭转涡振振幅为  $0.31^\circ$ 。
- (2) 封堵护栏的减振效果不明显,将护栏替换为高风障时,主梁涡振性能得到了一定的改善,但涡振振幅仍然不满足限值标准。
- (3) 中央格栅能显著抑制主梁竖向涡振,将格栅透风率减小至 12% 能进一步减小竖向涡振振幅,但中央格栅措施对扭转涡振的抑制效果有限。
- (4) 风障和中央格栅联合气动措施能显著减小主梁涡振振幅值;3.82m (实桥) 高的边风障联合 12% 透风率中央格栅可使主梁涡振现象几乎消失,随着风障高度的减小,涡振振幅呈现增大的趋势。

## 参考文献:

- [1] 赵林, 刘丛菊, 葛耀君. 桥梁结构涡激共振的敏感性[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(4):694—704 (ZHAO Lin, LIU Congju, GE Yaojun. Vortex-induced vibration sensitivity of bridge girder structures[J]. Acta Aerodynamic Sinica, 2020, 38(4):694—704 (in Chinese))
- [2] LI H, LAIMA S, OU J, et al. Investigation of vortex-induced vibration of a suspension bridge with two separated steel box girders based on field measurements[J]. Engineering Structures, 2011, 33(6):1894—1907.
- [3] LARSEN A, SAVAGE M, LAFRENIÈRE A, et al. Investigation of vortex response of a twin box bridge section at high and low Reynolds numbers[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96:934—944.
- [4] 王骑, 林道锦, 廖海黎, 等. 分体式钢箱梁涡激振动特性及制振措施风洞试验研究[J]. 公路, 2013(7):294—299 (WANG Qi, LIN Daojin, LIAO Haili, et al. Wind tunnel test study on vortex-induced vibration characteristics and vibration control measures of split steel box girder[J]. Highway, 2013(7):294—299 (in Chinese))
- [5] HWANG Y C, KIM S J, KIM H K. Report of an unexpected vortex-induced vibration in an actual suspension bridge[C]//IABSE Conference: Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges, Geneva, Switzerland, 2015:832—835.
- [6] 葛耀君, 赵林, 许坤. 大跨桥梁主梁涡激振动研究进展与思考[J]. 中国公路学报, 2019, 32(10):1—18 (GE Yaojun, ZHAO Lin, XU Kun. Review and reflection on vortex-induced vibration of main girders of long-span bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(10):1—18 (in Chinese))
- [7] 赵林, 李珂, 王昌将, 等. 大跨桥梁主梁风致稳定性被动气动控制措施综述[J]. 中国公路学报, 2019, 32(10):34—48 (ZHAO Lin, LI Ke, WANG Changjiang, et al. Review on passive aerodynamic countermeasures on main girders aiming at wind-induced stabilities of long-span bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(10):34—48 (in Chinese))
- [8] 陈政清, 华旭刚, 牛华伟, 等. 永磁电涡流阻尼新技术及其在土木工程中的应用[J]. 中国公路学报, 2020, 33(11):83—100 (CHNE Zhengqing, HUA Xugang, NIU Huawei, et al. Technological innovations in eddy current damping and its application in civil engineering[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(11):83—100 (in Chinese))
- [9] 王修勇, 胡仁康, 邹晨枫, 等. 单面碰撞 TMD 及其桥梁涡激振动控制研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(1):169—174 (WANG Xiuyong, HU Renkang, WU Chenfeng, et al. Single-side pounding TMD and its application in bridge's VIV control[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(1):169—174 (in Chinese))
- [10] 樊永波, 李春光, 张记, 等. 基于节段模型试验的宽幅箱梁涡振性能气动措施优化[J]. 实验力学, 2016, 31(5):607—616 (FAN Yongbo, LI Chunguang, ZHANG Ji, et al. On the aerodynamic optimization measures for vortex-induced vibration performance of wide box girder based on section model experiment[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(5):607—616 (in Chinese))
- [11] 杨婷, 周志勇. 中央开槽箱梁涡激共振特性及抑振措施机理研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(10):76—83 (YANG Ting, ZHOU Zhiyong. Vortex-induced resonance characteristics and anti-vibration measures mechanism of central-slotted box girders[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(10):76—83 (in Chinese))
- [12] 梁爱鸿, 毛禹, 李春光, 等. 双幅钝体钢箱梁桥涡振性能气动优化风洞试验研究[J]. 实验力学, 2022, 37(3):399—406 (LIANG Aihong, MAO Yu, LI Chunguang, et al. Wind tunnel test study on aerodynamic optimization of vortex induced vibration performance of double bluff body steel box girder bridge[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022, 37(3):399—406 (in Chinese))
- [13] 马存明, 王俊鑫, 罗楠, 等. 宽幅分体箱梁涡振性能及其抑振措施[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(4):724—730 (MA Cunming, WANG Junxin, LUO Nan, et al. Vortex-induced vibration performance and control measures of wide twin-box girder[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(4):724—730 (in Chinese))
- [14] 贺耀北, 周洋, 华旭刚. 双边钢主梁-UHPC 组合梁涡振抑制气动措施风洞试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(20):142—148 (HE Yaobei, ZHOU Yang, HUA Xugang. A wind tunnel test on aerodynamic measures for vortex-induced vibration suppression of a bilateral steel-UHPC composite beam[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(20):142—148 (in Chinese))

- [15] 刘叶, 韩艳, 胡朋, 等. 风屏障对平层高铁桥上列车气动特性影响的风洞试验研究[J]. 振动工程学报, 2022, 35(2):284—296 (LIU Ye, HAN Yan, HU Peng, et al. Wind tunnel test studies on the influences of wind barrier on the aerodynamic characteristics of trains on a highway and railway same-story bridge[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(2):284—296 (in Chinese))
- [16] 周建龙. 桥梁结构涡激振动及其控制[D]. 西安: 长安大学, 2010 (ZHOU Jianlong. Vortex-induced vibration of bridge structure and its control[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010 (in Chinese))
- [17] 杨咏昕, 周锐, 葛耀君. 大跨度分体箱梁桥梁的涡振性能及其控制[J]. 土木工程学报, 2014, 47(12):107—114 (YANG Yongxin, ZHOU Rui, GE Yaojun. Vortex-induced vibration and its control for long-span bridges with twin-box girder[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(12):107—114 (in Chinese))
- [18] 杨咏昕, 周锐, 罗东伟, 等. 不同槽宽分体箱梁桥梁的涡振及其控制措施[J]. 工程力学, 2017, 34(7):30—40 (YANG Yongxin, ZHOU Rui, LUO Dongwei, et al. Vortex-induced vibration and its control for twin box girder with various slot widths[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(7):30—40 (in Chinese))
- [19] 潘韬, 肖海珠, 赵林, 等. 大跨度桥梁超宽分体三箱梁抗风性能及控制措施研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(增刊 2):29—35 (PAN Tao, XIAO Haizhu, ZHAO Lin, et al. Study of wind-resistant performance and control measures for very wide girder with three separated boxes in long-span bridge[J]. Bridge Construction, 2020, 50 (Suppl2):29—35 (in Chinese))
- [20] 温青, 华旭刚, 池俊豪, 等. 端部条件和长宽比对矩形断面节段模型涡激振动的影响[J]. 振动工程学报, 2020, 33(4):653—659 (WEN Qing, HUA Xugang, CHI Junhao, et al. Effects of end conditions and aspect ratios on vortex-induced vibration for a rectangular sectional model[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(4):653—659 (in Chinese))

## Wind tunnel test study on the effect of wind barrier on the vortex-induced vibration of twin steel box girder

HUANG Wenjun<sup>1</sup>, SUN Hongxin<sup>1</sup>, WEN Qing<sup>1</sup>, HUANG Tao<sup>2</sup>, YANG Xiangyang<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China;

2. Xiangtan Urban Construction Group Co., Ltd., Xiangtan 411204, Hunan, China)

**Abstract:** Twin steel box girder has good flutter performance, but poor vortex-induced vibration (VIV) performance. Effectively suppressing the VIV of twin steel box girder is a key issue that must be addressed in the construction and maintenance of such bridges. Taking a large-span twin steel box girder cable-stayed bridge under construction as the engineering background, the influence of common aerodynamic countermeasures such as guardrails, central breathable grilles, and wind barriers on the VIV performance of the twin steel box girder was studied through section model wind tunnel tests, and a combined VIV suppression aerodynamic countermeasures scheme consisting of wind barriers and central breathable grilles was proposed. The research results show that: (1) The section of the twin steel box girder showed significant VIV at five wind attack angles ( $0^\circ$ ,  $\pm 3^\circ$ ,  $\pm 5^\circ$ ), and further research on main girder vibration suppression measures is required. (2) sealing guardrails cannot effectively improve the VIV performance of the main girder, but using wind barriers can significantly reduce the VIV amplitude of the main girder. (3) the central breathable grille can greatly suppress the VIV of the main girder, but there will be two VIV wind speed ranges. (4) the combined use of wind barriers and central breathable grilles can effectively suppress the VIV of the main girder. The research findings can provide a reference for the design of aerodynamic measures for suppressing VIV of similar twin steel box girder.

**Keywords:** twin steel box girder; section model; vortex-induced vibration; wind tunnel test; wind barrier

文章编号: 1001-4888(2024)01-0095-20

# 综述: 微纳米尺度材料与结构的 原位疲劳实验及性能研究进展\*

李振凯, 闫亚宾, 轩福贞

(华东理工大学 上海市智能感知与检测技术重点实验室, 上海 200237)

**摘要:** 随着集成电路芯片、传感器、柔性电路系统、微/纳机电系统等微机械装置向集成化和小型化不断发展, 如何预测其内部微纳米尺度结构和材料的机械性能及其可靠性成为了制约上述微机械装置进一步发展和应用的关键问题之一。在这些装置的长期服役过程中, 微纳米尺度材料的疲劳性能又成为了近年来人们关注的热点问题。针对上述问题, 首先, 调研了与微纳米尺度材料原位疲劳实验方法和疲劳性能研究有关的文献。然后, 总结了微纳米尺度原位疲劳实验方法和疲劳性能的研究现状, 包括含有孪晶组织金属、梯度组织或粗细晶金属以及在单轴、多轴应力状态下的金属疲劳性能研究, 并归纳了微纳米尺度界面疲劳损伤行为的研究现状。最后, 对微纳米尺度材料的疲劳性能研究进行了展望, 提出了对未来发展方向的思考。

**关键词:** 微纳米尺度; 原位疲劳实验; 疲劳性能; 展望

**中图分类号:** TG115 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-030

## 0 引言

从 2000 年开始, 微纳米尺度材料与结构的力学性能引起了人们的广泛关注, 因为这些结构是包括集成电路系统、传感器、柔性电路系统、微/纳机电系统 (Micro/Nano-Electromechanical Systems, MEMS/NEMS) 在内的各种先进微机械装置的重要组成部分<sup>[1-3]</sup>。微纳米尺度结构具有体积小、质量轻和功耗低等优点, 因此被广泛应用在航空航天、电子通信、工业设备、汽车自动化、军事、医疗卫生、生物技术等领域中<sup>[4-15]</sup> (图 1)。随着微纳米尺度材料应用的日益广泛, 深入研究其疲劳性能已成为人们关注的重点问题。各种各样的微/纳机电系统中包含了很多功能各异的小型执行器和传感器, 这些小型组件在目标寿命期内通常要承受静载或者循环载荷<sup>[16-18]</sup>, 还有一些在高温、强化学腐蚀环境下工作的部件, 会不可避免地导致服役小型组件机械特性逐渐但显著的退化, 即微纳米尺度材料的疲劳损伤, 并最终导致整个微纳系统的故障<sup>[19-20]</sup>。

在材料科学中, “疲劳”一词的概念最初由 BRAITHWAITE<sup>[21]</sup> 正式提出, 随后, 英国的 GOUGH<sup>[22]</sup> 在 1924 年出版了第一部疲劳相关的专著《The fatigue of metals》。我国的疲劳专著始于高镇同教授在 1980 年出版的《疲劳性能测试》<sup>[23]</sup>。“疲劳”一词定义了由于反复施加应力或应变而引起的材料性能的变化, 通常意味着材料发生断裂, 进而导致失效, 最终会影响装置的正常使用<sup>[24-25]</sup>。在 20 世纪 20 年代, 许多大型设备如飞机、承压设备、航空发动机叶片等由于疲劳造成的事故给人们带来了惨痛的教

\* 收稿日期: 2023-02-14; 修回日期: 2023-04-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52275149, 51835003)

通信作者: 闫亚宾 (1984—), 男, 博士, 副研究员。主要研究方向为微纳米材料强度学。Email: yanyabin@ecust.edu.cn

轩福贞 (1970—), 男, 博士, 教授。主要研究方向为机械强度学、智能传感与健康感知技术。Email: fzxuan@ecust.edu.cn