

# 带挑臂箱梁涡振气动控制试验

张文明, 葛耀君, 杨詠昕, 周玉芬

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092, wenmingzhang@hotmail.com)

**摘要:** 为尝试一种有效控制带挑臂箱梁涡振的气动措施, 以某叠合箱梁斜拉桥为背景, 在同济大学 TJ-1 边界层风洞进行了 1:50 缩尺模型 10 个工况的对比试验, 研究移动检修轨道、增设不同形式的导流板和扰流板等气动措施的抑振效果. 结果表明: 带挑臂箱梁涡振振幅随着风攻角增大而增大, 涡振性能对风攻角比较敏感; 导流板可能会增大带挑臂箱梁涡振振幅, 导流板的夹角和水平板的宽度是影响抑振效果的关键因素, 夹角越大, 水平板越宽, 抑振效果越好; 在设有导流板的情况下, 检修轨道对带挑臂箱梁涡振性能没有影响, 移动检修轨道没有抑振效果; 扰流板对带挑臂箱梁抑振效果明显, 在一定范围内扰流板越宽抑振效果越明显, 而且扰流板对涡振的控制效果同风攻角有密切关系.

**关键词:** 桥梁工程; 涡振控制; 风洞试验; 带挑臂箱梁; 气动措施; 导流板; 扰流板

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)12-1948-05

## Experimental study on aerodynamic control of the vortex induced vibrations of a box girder with projecting slab

ZHANG Wen-ming, GE Yao-jun, YANG Yong-xin, ZHOU Yu-fen

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China, wenmingzhang@hotmail.com.)

**Abstract:** To seek an effective aerodynamic measure to control the vortex induced vibrations (VIV) of a box girder with projecting slab (BGPS), VIV of a 1:50 scale sectional model with 10 cases were tested in TJ-1 wind tunnel based on a cable-stayed bridge with composite box girder. The aerodynamic measures whose mitigation efficiencies were studied included moving the rails of tool car, installing guide vanes with different forms and installing spoilers with different forms. The research results show that VIV amplitudes of BGPS increase with the increasing of wind attack angle, so VIV performance is sensitive to wind attack angle. As for the guide vanes, they may raise VIV amplitude of BGPS, and the included angle and the width of horizontal board are key factors to affect mitigation efficiency of them, concretely, the bigger the included angle is and the wider the horizontal board is, the better the mitigation efficiency is. After the guide vanes are installed on BGPS, the rails of tool car have little effect on VIV performance of BGPS, so the mitigation efficiency of moving the rails of tool car is negligible. As for the spoilers, they can control VIV of BGPS efficiently, and the wider the spoilers are, the better the mitigation efficiency is, but the mitigation efficiency of the spoilers is correlative to wind attack angle closely.

**Key words:** bridge engineering; VIV control; wind tunnel test; box girder with projecting slab; aerodynamic measure; guide vane; spoiler

收稿日期: 2009-05-07.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50538050);

国家自然科学基金资助项目(50608059);

国家自然科学基金委重大研究计划重点项目(90715039).

作者简介: 张文明(1983—),男,博士研究生;

葛耀君(1958—),男,教授,博士生导师.

涡振是一种在较低风速下发生的有限振幅振动<sup>[1]</sup>,且只在某一风速区间内发生.虽然涡振不像颤振一样引起桥梁毁灭性的破坏,但其发生频率较高.频繁持续的涡振会造成桥梁构件疲劳破

坏,并引起行人和行车不舒适<sup>[2]</sup>. 因此,桥梁的涡振控制已成为桥梁抗风设计研究中日益重要的课题. 涡振控制措施一般分为阻尼措施和气动措施,其中气动措施较为常用,如增设导流板、扰流板、整流板和风嘴等<sup>[3]</sup>. 宋锦忠<sup>[4]</sup>为主跨 288 m 的东营黄河大桥斜拉桥设计了扰流板,使该桥涡振性能得到很好改善,该桥主梁采用两个分离矩形钢箱,通过桥面板联为整体. A Larse<sup>[5-6]</sup>、G L Larose<sup>[7]</sup>和张伟<sup>[8]</sup>分别研究了导流板对丹麦大带东桥、香港昂船洲桥和中国西堍门大桥的涡振控制效果,这 3 座桥加劲梁均为流线型扁平钢箱. 鲜有文献涉及带挑臂箱梁涡振控制气动措施.

由于涡振理论不十分完善,数值模拟方法也不太成熟,风洞试验仍然是目前桥梁涡振最适合的研究手段<sup>[2]</sup>. 本文以一座独塔单索面叠合箱梁斜拉桥为背景,进行了带挑臂箱梁涡振控制气动措施试验研究,包括移动检修轨道、增设不同形式的导流板和扰流板等,可以为同类桥梁涡振控制提供技术先导和理论支持.

## 1 工程背景

图 1 为某独塔单索面叠合箱梁斜拉桥,跨径布置为 138 m + 138 m = 276 m;主塔为独柱形塔,带有横撑和风缆,总高约 120 m,其中桥面以上塔高约为 98 m;主梁为叠合箱梁,全宽 40 m,中心梁高 4 m,断面形状为梯形,带翼缘板,其中桥面板采用钢筋混凝土,下部梯形箱体为钢箱,梁底安装检修轨道,如图 2 所示. 全桥结构动力分析采用离

散结构的有限元方法,主梁、桥塔和桥墩结构离散为空间梁单元,斜拉索采用空间杆单元模拟. 桥位所在地区属于大陆性季风气候,具有明显的暖温带半湿润季风气候特征,且桥位濒临海域,易受寒流大风影响.

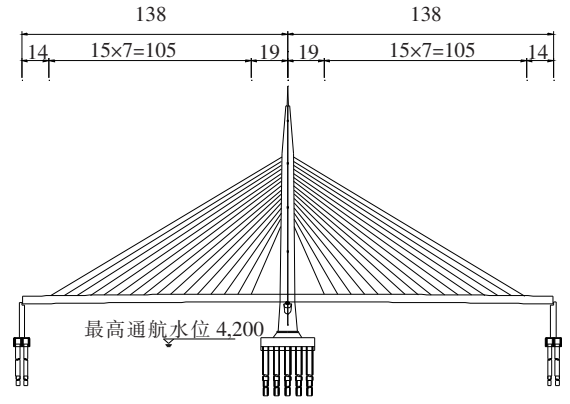


图 1 斜拉桥立面图(单位:m)

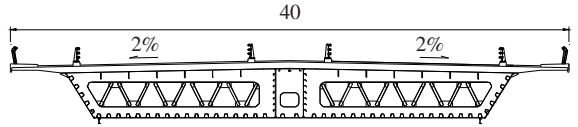


图 2 主梁断面图(单位:m)

## 2 主梁节段模型

### 2.1 模型设计与制作

主梁涡振节段模型的几何缩尺比为  $\lambda_L = 1:50$ ,根据涡振节段模型设计相似性要求,可以确定涡振节段模型的相似比,由此可以进一步确定出实桥主要参数与节段模型主要参数之间的对应关系(表 1).

表 1 节段模型主要参数

参数	$L/m$	$B/m$	$H/m$	$m/(kg \cdot m)$	$I_m/(kg \cdot m^2 \cdot m^{-1})$	$f_h/Hz$	$f_v/Hz$	$U/(m \cdot s^{-1})$
实桥值	85	40	4	73 967	8 070 400	0.544	1.552	-
相似比	$\lambda_L = 1:50$	$\lambda_L = 1:50$	$\lambda_L = 1:50$	$\lambda_m = 1:50^2$	$\lambda_I = 1:50^4$	10:1	10:1	$\lambda_U = 1:5$
模型值	1.700	0.800	0.080	29.587	1.291	5.440	15.520	-

主梁涡振节段模型由铝合金框架与轻质木板覆面组成,桥面栏杆、检修轨道、导流板和扰流板等均选用 ABS 材料或有机玻璃用电脑雕刻机雕刻而成,外形精确模拟实桥. 模型断面主要尺寸如图 3(a)所示,该图所示的断面 1 是原始断面,无任何涡振控制气动措施.

### 2.2 气动措施设置

导流板是一种被广泛应用的涡振控制气动措施<sup>[5-8]</sup>,其基本原理是使气流经过导流板的压缩后速度得到提高,当冲出导流板时这股高速射出的气流将打碎结构表面形成的旋涡,从而抑制涡

振的形成. 本文节段模型设置了两种导流板,即窄导流板和宽导流板. 窄导流板的斜板和水平板宽度均为 20 mm,夹角 122°(见图 4(a)),斜板与箱梁腹板的距离和水平板与箱梁底板的距离均为 5 mm,为了避免检修轨道对导流板冲出气流的阻挡,将检修轨道向箱梁中心线移动了 8.6 mm,形成了断面 2(见图 3(b)),进而将检修轨道去掉,形成了断面 3(见图 3(c)). 与窄导流板相比,宽导流板的水平板加宽了 10 mm,夹角增大了 20°(见图 4(b)),这样可以使更多的气流被压缩,而且被压缩后气流的冲射距离更远一些,水平板与箱梁

底板距离仍为 5 mm, 宽导流板的布置见图 3(d) 所示的断面 4.

扰流板是在安装在栏杆上有一定水平仰角 of 具有扰乱气流、破坏旋涡运动作用的气动措施. 本

文设置了两种扰流板, 即窄扰流板和宽扰流板, 水平仰角均为 14°, 宽度分别为 31.3 mm 和 41.3 mm, 如图 4(c) 和(d) 所示, 其布置分别见图 3(e) 所示的断面 5 和图 3(f) 所示的断面 6.

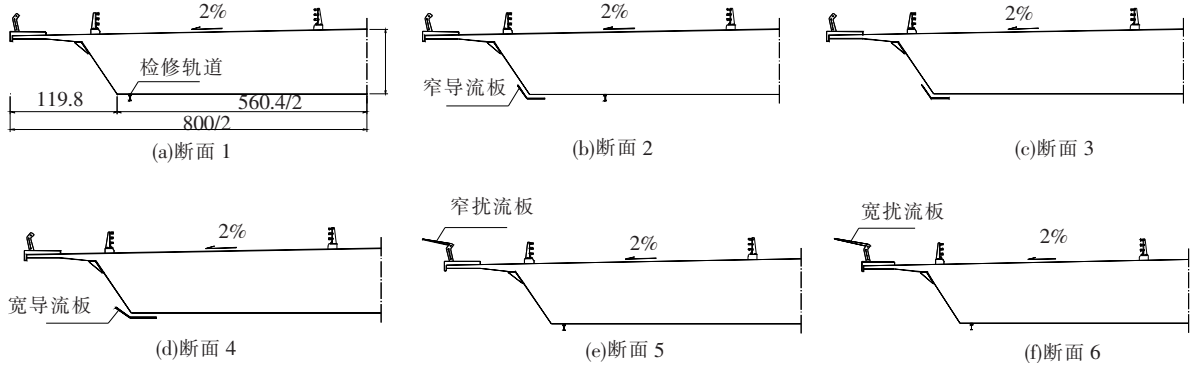


图 3 节段模型 1/2 断面图(单位:mm)

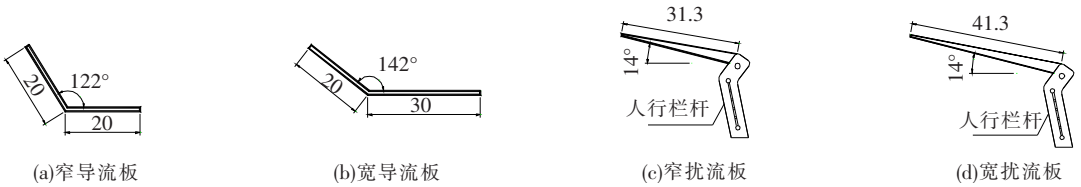


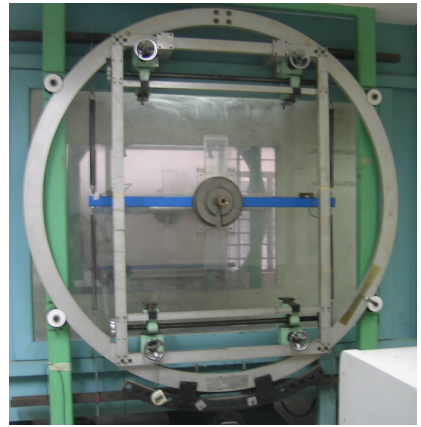
图 4 气动措施模型断面图(单位:mm)

### 3 涡振风洞试验

1:50 主梁节段模型涡振风洞试验是在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 TJ-1 边界层风洞中进行的, 该风洞试验段高 1.8 m, 宽 1.8 m, 长 12 m, 可调风速 1~30 m/s. 节段模型由设在风洞外部支架上的上下各 4 根弹簧组成的悬挂系统悬吊于风洞内部, 整个系统的竖弯和扭转阻尼比分别为 0.28% 和 0.24%, 在此阻尼比条件下涡振能够在各工况广泛出现, 并且振幅不会过大以至于对模型系统的安全造成威胁. 图 5(a) 为洞外弹簧悬挂系统, 图 5(b) 洞内节段模型.

试验中采用 CA-YD-103 型压电式加速度传感器测量模型振动, 用到的测量仪器还包括 YE5866 电荷放大器及 NI 采样系统, 数据采样频率为 200 Hz. 采集的加速度经过两次积分转换为位移, 积分初值的影响用高通滤波消除.

首先进行了断面 1 的涡振风洞试验, 攻角包括 -3°、0° 和 +3°, 均出现了竖弯涡振和扭转涡振现象, 振幅在 +3° 攻角时最大. 为了尝试出一种有效的涡振控制措施, 针对 +3° 攻角依次进行了断面 2~6 的涡振风洞试验, 发现断面 6 的涡振振幅最小. 为了和断面 1 试验结果进行全面对比, 最后进行了断面 6 的 -3° 和 0° 攻角的涡振风洞试验. 所有工况是在均匀流场中进行的.



(a) 洞外弹簧悬挂系统



(b) 洞内节段模型

图 5 风洞试验节段模型

### 4 结果及分析

将试验结果换算到实桥, 表 2 为各断面涡振振幅最大值(单峰值). 可以看出, 断面 1 和断面 6 涡振振幅均随着攻角增大而增大, 说明涡振性能

对攻角比较敏感。

为对象,依次分析导流板和扰流板的抑振效果。

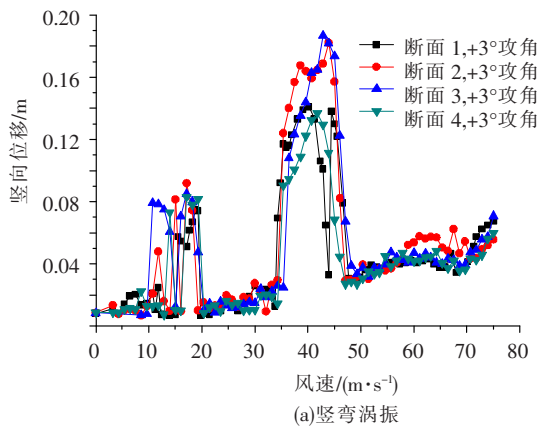
根据涡振试验结果,以涡振振幅和锁定风速

表 2 各断面涡振振幅最大值(单峰值)

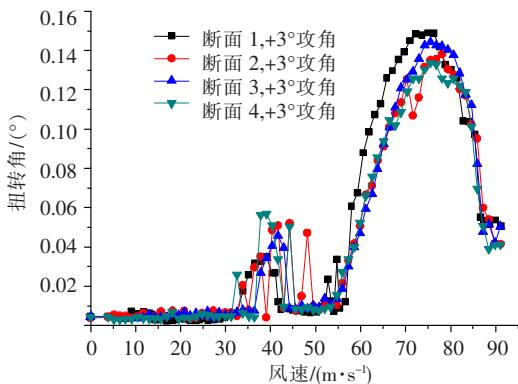
断面 编号	气动措施		攻角/(°)	振幅最大值	
	增设措施	检修轨道		竖弯/m	扭转/(°)
1	无	原位	-3	0.055	0.025
			0	0.080	0.085
			+3	0.141	0.149
2	窄导流板	内移	+3	0.182	0.138
3	窄导流板	无	+3	0.187	0.144
4	宽导流板	无	+3	0.137	0.134
5	窄扰流板	原位	+3	0.069	0.101
6	宽扰流板	原位	-3	0.029	0.019
			0	0.029	0.025
			+3	0.048	0.073

#### 4.1 导流板抑振分析

图 6 对比了增设导流板的断面与原始断面的涡振振幅-风速曲线,可以看出,竖弯涡振和扭转涡振均有两个或多个锁定风速区间,但主要集中在两个风速区域,分别称为低风速锁定区和高风速锁定区,窄导流板和宽导流板将竖弯涡振低风速锁定区的起振风速从 15.5 m/s 分别提前到 10.7 m/s 和 13.9 m/s,对竖弯涡振高风速锁定区以及扭转涡振风速锁定区几乎没有影响。



(a) 竖弯涡振



(b) 扭转涡振

图 6 断面 1~4 涡振振幅-风速曲线(+3°攻角)

结合表 2 可以发现,与断面 1 相比,窄导流板增大了竖弯涡振振幅,而宽导流板将竖弯涡振振幅减小了 2.8%;增设了窄导流板的断面 2 和断

面 3 分别将扭转涡振振幅减小了 7.4% 和 3.4%,增设了宽导流板的断面 4 将扭转涡振振幅减小了 10.1%,因此,宽导流板的抑振效果明显优于窄导流板。这是因为涡振试验时箱梁腹板表面会形成相对较厚的边界层,窄导流板斜板浸没其中<sup>[6]</sup>,没有足够的气流进入导流板间隙,间隙对空气的压缩作用就不明显,有效的冲碎旋涡的高速气流无法形成。相反,旋涡却由于窄导流板这一附属物的存在发生分离并产生了旋涡脱落,可能使得涡振振幅加大<sup>[8]</sup>。而宽导流板的夹角较大,水平板较宽,间隙对空气的压缩作用明显,能够形成有效的冲碎旋涡的高速气流,并且冲射距离较远。因此,导流板的夹角和水平板的宽度是影响抑振效果的关键因素。

另外,比较断面 2 和断面 3 涡振试验结果可以发现,在去掉检修轨道前后涡振振幅和锁定风速几乎没有变化,因此,检修轨道对带挑臂箱梁涡振性能没有影响,移动检修轨道没有抑振效果。

#### 4.2 扰流板抑振分析

图 7 对比示出了增设扰流板的断面与原始断面在 +3°攻角时的涡振振幅-风速曲线。

由图 7(a) 可以看出,3 个断面均存在多个竖弯涡振锁定风速区间,窄扰流板(断面 5)提前了起振风速,而宽扰流板(断面 6)推迟了起振风速;从图 7(b) 可以看出,断面 1 存在多个扭转涡振锁定风速区间,而断面 5 和断面 6 均只有一个扭转涡振锁定风速区间,而且起振风速均滞后于断面 1。结合表 2 可以发现,窄扰流板和宽扰流板将 +3°攻角竖弯涡振振幅分别减小了 55.1% 和 66.0%,将 +3°攻角扭转涡振振幅分别减小了 32.2% 和 51.0%,抑振效果明显,而且宽扰流板优于窄导流板。

图 8 对比了增设了宽扰流板的断面 6 与原始断面在 -3° 和 0° 攻角时的涡振振幅-风速曲线。

从图8(a)可以看出,断面1在-3°攻角时存在两个竖弯涡振锁定风速区间,在0°攻角时存在三个

紧邻的竖弯涡振锁定风速区间,而断面6在-3°和0°攻角时均没有发生竖弯涡振;从图8(b)可以看出,断面1在-3°攻角时存在两个扭转涡振锁定风速区间,在0°攻角时存在多个扭转涡振锁定风速区间,而断面6在-3°攻角时没有发生竖弯涡振,在0°攻角时存在一个扭转涡振锁定风速区间。

断面6相对断面1在各攻角下涡振振幅减小幅度如表3所示,竖弯涡振和扭转涡振振幅减小幅度分别在+3°攻角和0°攻角时最大,因此(宽)扰流板在不同攻角下的抑振效果不同,即设置扰流板对涡振的控制效果同风攻角有密切关系。

表3 不同攻角下宽扰流板抑振幅度

涡振类型	振幅减小百分比/%		
	-3°攻角	0°攻角	+3°攻角
竖弯	47.3	63.8	66.0
扭转	24.0	70.6	51.0

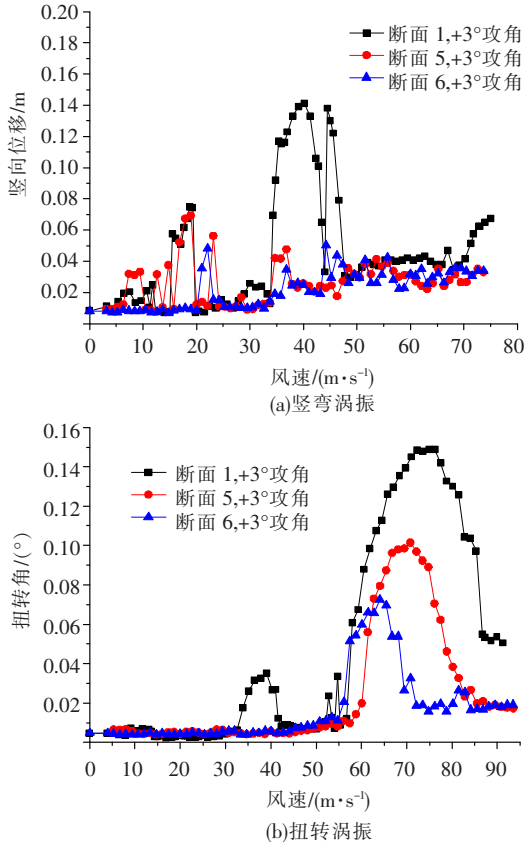


图7 断面1,5,6 涡振振幅-风速曲线(+3°攻角)

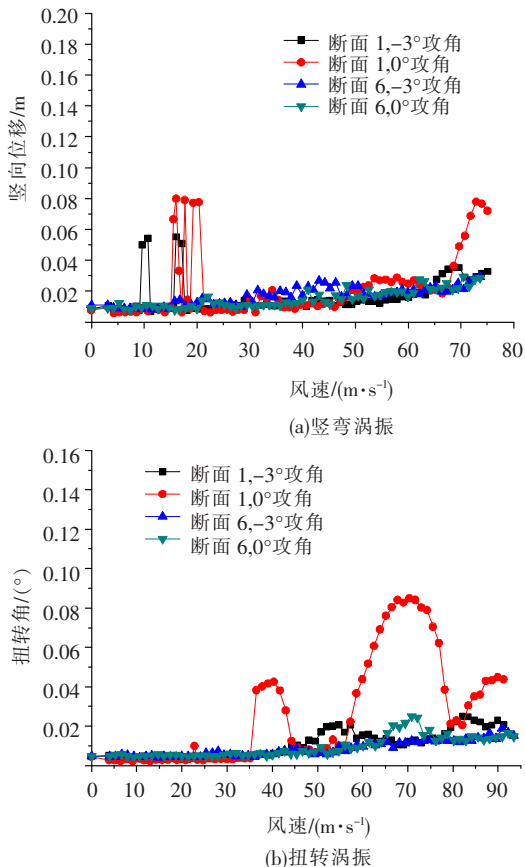


图8 断面1和断面6 涡振振幅-风速曲线(-3°和0°攻角)

### 5 结论

- 1) 带挑臂箱梁涡振振幅随着风攻角增大而增大,涡振性能对风攻角比较敏感。
- 2) 导流板可能会增大带挑臂箱梁涡振振幅,导流板的夹角和水平板的宽度是影响抑振效果的关键因素,夹角越大,水平板越宽,抑振效果越好。
- 3) 在设有导流板的情况下,检修轨道对带挑臂箱梁涡振性能没有影响,移动检修轨道没有抑振效果。
- 4) 扰流板对带挑臂箱梁抑振效果明显,在一定范围内扰流板越宽抑振效果越明显;扰流板对涡振的控制效果同风攻角有密切关系。

### 参考文献:

[1] 朱乐东. 桥梁涡激共振试验节段模型质量系统模拟与振幅修正方法[J]. 工程力学, 2005, 22(5): 204-208, 176.

[2] 周立, 葛耀君. 上海长江大桥车桥系统节段模型涡激共振试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(8): 61-66.

[3] 刘建新. 桥梁对风反应中的涡激振动及制振[J]. 中国公路学报, 1995, 8(2): 74-79.

[4] 宋锦忠, 林志兴, 徐建英. 桥梁抗风气动措施的研究及应用[J]. 同济大学学报, 2002, 30(5): 618-62.

[5] LARSEN A, ESDAHL S, ANDERSEN J E, et al. Storebaelt suspension bridge vortex shedding excitation and mitigation by guide vanes[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 88(2): 283-296.