

典型箱梁断面双竖向涡振区的成因分析

管青海,李加武,刘健新

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为研究箱梁断面产生双竖向涡振区的原因,通过同步测振和测压均匀风场风洞试验,基于涡振区的振幅响应与表面压力脉动时程,分析了 2 个竖向涡振区的振幅与风速关系、表面压力系数均值与均方差值、局部升力与总升力的相关性及其局部升力对竖向涡振的贡献。分析结果表明:高风速涡振区比低风速涡振区锁定区间长、振动响应大;低风速涡振区的 Strouhal 数为 0.145,高风速涡振区的 Strouhal 数为 0.082,2 个竖向涡振区是由具有不同 Strouhal 数的 2 个独立气流涡脱所致;低风速涡振区涡激力主要来源于箱梁上表面中部 2 道防护栏区域和下表面背压区的气流脉动,高风速涡振区涡激力主要来源于箱梁上表面下游区域和下表面背压区的气流脉动,两者在上表面的气流涡脱相互独立。研究成果对典型钝体箱梁断面有一定的普遍适用性,研究方法可为类似研究提供借鉴。

关键词:桥梁工程;双竖向涡振区;风洞试验;箱梁断面;Strouhal 数

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

Investigation into formation of two lock-in districts of vertical vortex-induced vibration of a box bridge deck section

GUAN Qing-hai, LI Jia-wu, LIU Jian-xin

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The formation of two lock-in districts of vertical vortex-induced vibration of a box bridge deck section was investigated via the amplitude response and surface pressure time-histories obtained by synchronizing vibration and surface pressure measurement in the uniform flow wind tunnel test. The relationship between amplitude and wind velocity, means and standard deviations of surface pressure coefficient, correlation coefficient between local lift force and total lift force, contribution of the local lift force to vertical vortex-induced vibration were studied. The results show that the lock-in district of high wind speed vertical vortex response is wider than that of low wind speed vertical vortex response, and the amplitude of high wind speed vertical vortex response is larger than that of low wind speed vertical vortex response. It is considered that the cause of two vertical vortex shedding response results from two different vortex shedding with a respective Strouhal number of 0.145 and 0.082. Vortex-induced forces of low wind vertical vortex response come mainly from the airflow fluctuation at 2 guard rails's area of the middle upper surface and back pressure zone of the lower surface, vortex vortex-induced forces of high wind vertical vortex response come mainly from the airflow fluctuation at the downstream zone of the upper surface and back pressure zone of the lower surface, and the vortex shedding at their upper

surface are significantly different. The research results have general applicability for some typical blunt box girder sections, and the research methods can provide a reference for similar studies. 1 tab, 9 figs, 15 refs.

Key words: bridge engineering; two lock-in districts of vertical vortex-induced vibration; wind tunnel test; box bridge deck section; Strouhal number

0 引言

涡振是桥梁结构在低风速下很容易出现的一种带有自激性质的风致限幅振动,尽管涡振不像颤振、弛振一样是发散的毁灭性振动,但由于发生风速低、发生频次高、振幅较大足以影响行车安全与结构疲劳,因而抑制涡振发生或者限制其振幅在可接受的范围内具有十分重要的意义^[1-2]。通常情况下,桥梁断面只会发生某一阶模态的涡振(竖向涡振或者扭转涡振),而不会发生两阶模态的耦合涡振。诸多学者通过理论分析、风洞试验、现场实测以及数值模拟等方法详细研究了桥梁结构的涡振特性^[3-6]。涡振的典型特征就是,当涡脱频率等于结构的某一自振频率时,振动的结构会对涡脱形成某种反馈作用,使得涡脱频率在相当长的风速范围内被结构振动频率所“俘获”,产生一种锁定现象(Lock-in)^[1]。一般情况下,桥梁断面只会产生一个涡振锁定区,但也有双涡振区产生的案例。Larsen 等研究昂船洲大桥分离双箱主梁节段模型涡振响应时发现,缩尺比为 1:80 的导流板断面节段模型出现了双竖向涡振区^[7];周建龙等研究腹板斜率和中央开槽率对分离式箱型断面的涡振性能影响时也发现,一定的腹板斜角和一定的开槽率都有可能出现双竖向涡振区,但是他们都没有对该现象进行分析^[8-9];鲜荣等在扁平钢箱梁 1:20 大比例节段模型涡振试验中,成桥状态+3°风攻角出现了 2 个显著的竖向涡振区^[10];

虞乐宸等在重庆千厮门嘉陵江大桥桁架加劲梁断面节段模型涡振试验中,缩尺比为 1:37.65 的加劲梁节段模型在-3°和 0°风攻角下都出现了双竖向涡振区,他们推断低风速涡振区并非主梁本身涡脱所致,而可能是由附属结构等涡脱作用导致,并认为检修车轨道不是产生低风速涡振区的原因,但是并没有指出低风速涡振区产生的具体原因^[11]。

为此,本文以港珠澳大桥江海直达船航道桥为研究背景,基于弹簧悬挂节段模型风洞试验对箱梁断面的涡振特性进行研究,从表面压力和气动力角度分析了箱梁断面产生双竖向涡振区的原因。

1 工程背景及风洞试验概况

港珠澳大桥江海直达船航道桥为中央单索面三塔钢箱梁斜拉桥,跨径组合为 110+129+258+258+129+110=994 m,2 个中跨和次边跨布设斜拉索,整桥采用六跨连续半漂浮体系。大桥地处南亚热带海洋性季风气候区,风环境十分恶劣,抗风问题是大桥必须考虑的重点问题。大桥桥面距水面高度为 31.59 m,风速剖面指数 $\alpha=0.098$,桥位 120 年重现期基本风速 $V_{10}=47.20$ m/s,根据风速剖面指数律公式,桥面设计基准风速 $V_d=52.83$ m/s。大桥主梁为两侧带有长悬臂的钝体钢箱梁断面,如图 1 所示,箱梁顶板宽 38.8 m,底板宽 20.7 m,悬臂长度 5.68 m,梁高 4.5 m,内外侧护防栏高 1.5 m。

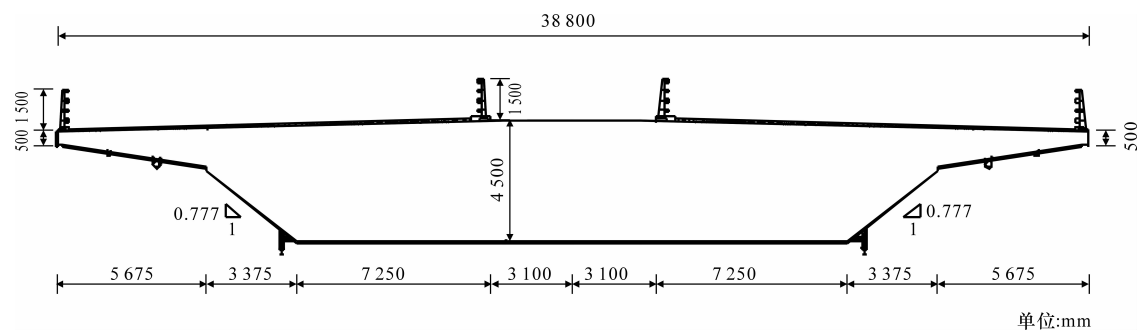


图 1 主梁断面
Fig. 1 Main girder section

节段模型风洞试验在长安大学 CA-1 风洞中进行,该风洞试验段长 15 m、宽 3 m、高 2.5 m,风洞流场品质优良,空风洞最高风速可达 53 m/s,均匀流场紊流度小于等于 0.3%。为使试验雷诺数较大,同时更精确地模拟箱梁的构造细节,使试验结果更接近实际,设计制作几何缩尺比为 1:20 的大尺度试验模型(图 2)。试验模型采用铝合金、高密度泡沫板、环氧树脂板等材料制作,以满足刚度、质量和质量惯距等相似要求,试验模型参数详见表 1。试验模型中部横截面布置一圈孔径为 1 mm 的测压孔,测点编号如图 3 所示,使用电子压力扫描阀测量模型表面压力。在均匀流场中分别对 0°、±3°、±5°等 5 种风攻角工况进行风洞试验研究,试验风速比为 1:2。试验发现试验模型在+3°和+5°风攻角下均出现了双竖向涡振区,但+3°风攻角下的振幅很小,最大振幅远小于文献[12]规定的振幅允许值,而+5°风攻角下振幅较大,高速风涡振区最大振幅是文献[12]规定限的 1.37 倍。为规避风攻角的影响,本文仅以+5°风工况为研究内容分析双竖向涡振区的成因。

表 1 试验模型参数

Tab. 1 Test model parameters

项 目		理论值	实测值	误差/%
几何参数	长度/m	2.40	2.40	0
	宽度/m	1.94	1.94	0
	高度/m	0.225	0.225	0
质量参数	质量/kg	210.00	209.88	-0.06
	质量惯距/(kg·m ²)	54.45		
频率参数	竖弯频率/Hz	3.37	3.38	+0.30
	扭转频率/Hz	10.21	10.17	-0.39
阻尼参数	竖弯阻尼比/%		4.1	
	扭转阻尼比/%		2.3	



图 2 悬挂在风洞中的试验模型

Fig. 2 Two spring suspended models in wind tunnel

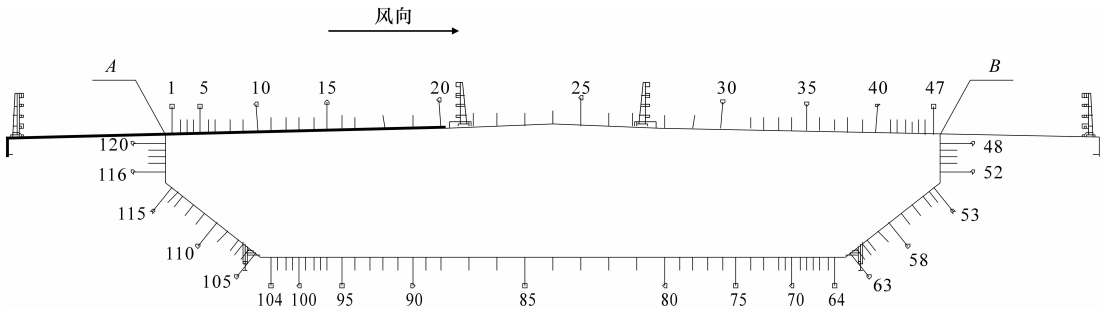


图 3 模型表面测压点布置

Fig. 3 Sketch of pressure taps arrangement

2 双竖向涡振区成因分析

2.1 振幅与风速关系

通过振幅与风速关系曲线可以判断是否发生涡振以及发生涡振的锁定风速区间与最大振幅对应风速。图 4 为振幅随风速变化曲线,图中振幅是指振动位移时程均方根,横线为按照文献[12]计算的竖向位移均方根允许值,其值为 0.84 cm。需要说明的是,文献[12]规定的涡振位移允许值是最大振幅,对于简谐振动,最大振幅可以认为是均方根的 $\sqrt{2}$ 倍。由图 4 可见:箱梁断面出现高低风速 2 个竖向

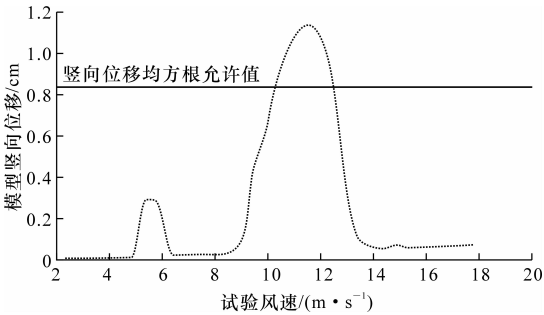


图 4 振幅随风速变化曲线

Fig. 4 Vertical displacement VS. wind velocity

涡振区,低风速涡振区锁定风速区间为 5.25~6.50 m/s(对应实桥风速为 10.5~13.0 m/s),最大

振幅风速为 5.75 m/s(对应实桥风速为 11.5 m/s),最大振幅为 $\sqrt{2} \times 0.307 = 0.43$ cm(对应实桥振幅为 8.68 cm);高风速涡振区锁定风速区间为 9.25~13.5 m/s(对应实桥风速为 18.5~27.0 m/s),最大振幅风速为 11.5 m/s(对应实桥风速为 23.0 m/s),最大振幅为 $\sqrt{2} \times 1.144 = 1.62$ cm(对应实桥振幅为 32.40 cm)。定义低风速涡振区为第 1 涡振区,高风速涡振区为第 2 涡振区。

2.2 最大振幅状态对应卓越频率

最大振幅风速下的竖向位移功率谱密度曲线如图 5 所示,第 1 涡振区和第 2 涡振区在最大振幅状态时出现的卓越频率一致,均为 3.39 Hz,考虑到快速傅里叶变换中频率分辨率与涡振过程中气动刚度对频率的影响,该频率已近似等于模型竖弯频率 3.38 Hz。

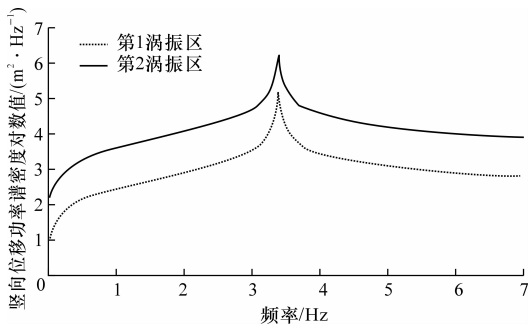


图 5 最大竖向位移功率谱密度曲线

Fig. 5 Vertical displacement power spectral density of maximum amplitude

旋涡脱落现象可以用 Strouhal 数(简称 St 数)描述为

$$St = \frac{fD}{U} \quad (1)$$

式中: f 是涡脱频率; D 是横风向特征尺寸; U 是气流速度。

第 1 涡振区的 St 数为 0.145,第 2 涡振区的 St 数为 0.082,前者比后者约大 1.76 倍,可以认为是 2 个独立气流涡脱,同一断面出现 2 个 St 数在于不同风速与结构的相互作用不同所致。值得注意的是,第 1 涡振区的雷诺数范围为 $7.74 \times 10^4 \sim 1.01 \times 10^5$,第 2 涡振区的雷诺数范围为 $1.43 \times 10^5 \sim 1.78 \times 10^5$,两者雷诺数相差大约 1.76~1.85 倍,这与 2 个涡振区的 St 数相差倍数基本一致。

2.3 表面压力系数均值

通过桥梁断面表面压力分布可以判断断面绕流

形态与断面所受气动力情况,所以测压试验是分析涡振发生原因的重要手段。由空气动力学知识可知,顺压梯度导致气流加速,对气流的稳定是有利的,逆压梯度导致气流减速甚至倒流,会引发气流转折和分离,而气流分离激发的涡旋是促成涡振发生的根本原因^[13]。由于涡振最大振幅状态积聚的能量最大,最能反映问题的本质,所以以下测压数据结果除特殊注明外,均是指涡振最大振幅风速下的压力数据。

由箱梁表面各测点压力系数可以判断气流在箱梁表面的分布情况,图 6 给出了两涡振区的表面压力系数均值,横坐标定义量纲一距离 x/D ,其中 x 为某个测点距 A 点的距离, D 为 A 点与 B 点之间的距离(A 点、B 点如图 3 所示)。由图 6(a)可见,两涡振区上表面均处于分离气流产生的负压包裹之中,第 1 涡振区上表面压力系数均值沿横桥向波动比第 2 涡振区略大,第 1 涡振区在 x/D 为 0.25~0.57 区域有一个平稳台阶,该区段是上表面中部 2 道防护栏区域。由图 6(b)可见,两涡振区下表面压力系数均值近乎一致,压力系数零点、第 1 与第 2 最小压力点、背压区都处于相同位置。总体来看,除上表面中部 2 道防护栏处有突变外,第 1 涡振区的表面压力系数均值与第 2 涡振区差别不大。

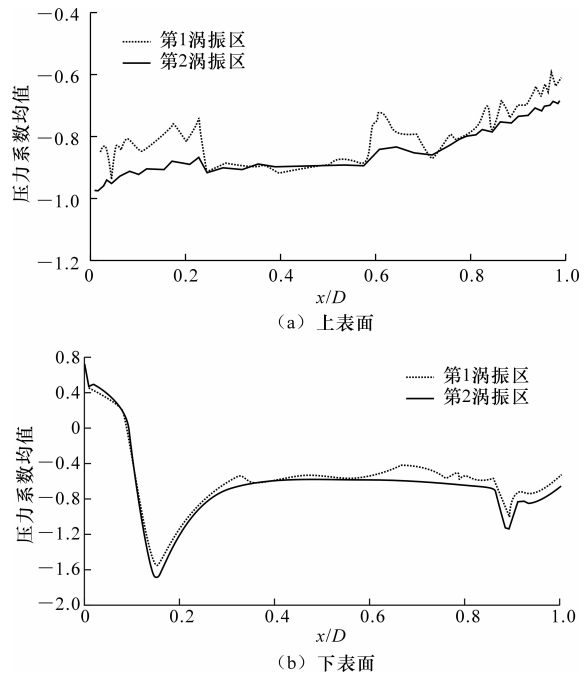


图 6 表面压力系数均值

Fig. 6 Means of surface pressure coefficients

2.4 表面压力系数均方差值

在结构风致振动中,压力均值提供静力作用,压力脉动值提供动力作用,所以压力脉动值对于风致振动分析至关重要。压力系数均方差值可以反映压力脉动情况,两涡振区表面压力系数均方差值如图 7 所示。

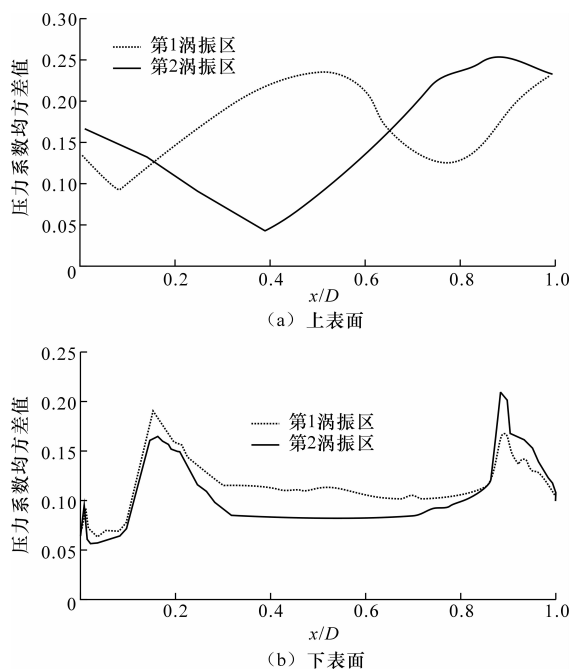


图 7 表面压力系数均方差值

Fig. 7 Standard deviations of surface pressure coefficients

对于箱梁下表面:第 1 涡振区下表面压力系数均方差值与第 2 涡振区相类似,说明下表面的压力脉动不是产生双竖向涡振区的原因,即排除了下表面检修车轨道的影响。

对于箱梁上表面:①第 1 涡振区上表面压力系数均方差值与第 2 涡振区呈现了显著的区别,虽然两者都近似谐波曲线,但两者波峰波谷对应相反,说明 2 个涡振区上表面压力脉动强弱区相反,这足以表明两者的气流涡脱相互独立;②第 1 涡振区压力脉动峰值集中在 x/D 为 0.36~0.61,这段区域刚好是箱梁上表面中部 2 道防护栏区域;③第 2 涡振区在箱梁上表面 $x/D=0.39$ 以后压力脉动迅速增大,尤其是 $x/D=0.65$ 以后脉动压力处于领先水平(其中 $x/D=0.39$ 是上表面中部迎风第 1 道栏杆后第 1 个测点, $x/D=0.65$ 是上表面中部第 2 道防护栏后第 1 个测点),同时箱梁下表面 x/D 为 0.39~0.86 为气流彻底分离的背压区,这说明促成第 2 涡振区

的关键区域是 x/D 为 0.65~0.86,这段区域处于中部 2 道防护栏的尾流区,中部 2 道防护栏扰流对气流涡脱应该有较大贡献。

2.5 各测点气动升力与总气动升力的相关性

箱梁表面各测点所受的气动力是指该测点的压力与其所占权重面积的乘积,总气动力由各测点气动力累加得到^[14]。各测点气动力与总气动力的相关性可以通过 Pearson 相关系数来表征。图 8 给出了 2 个涡振区各测点升力与总升力的相关系数。

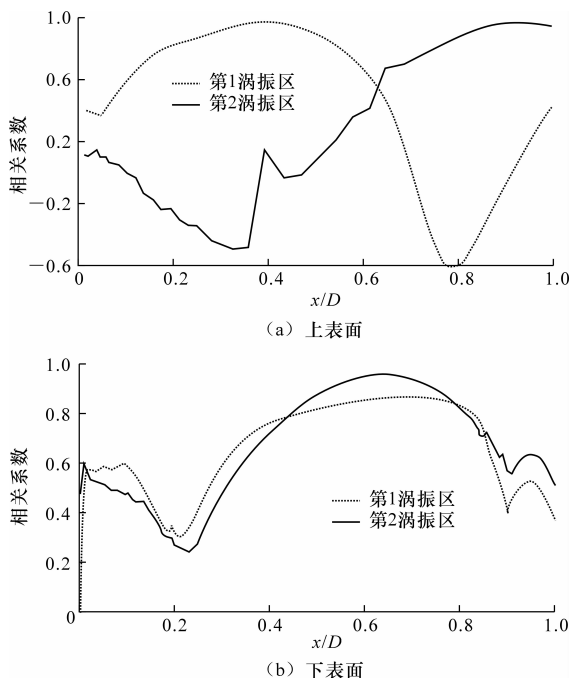


图 8 各测点升力与总升力相关系数

Fig. 8 Pearson correlation coefficients between local lift forces and total lift forces

分析图 8(a)发现,对于第 1 涡振区:箱梁上表面中上游(x/D 为 0.12~0.61)正相关性明显增强, $x/D=0.65$ 以后,由正相关转为负相关,但负相关幅值没有上游区域大。负相关与正相关仅仅是相关方向的不同,其绝对值大小说明相关性强弱,上表面上下游在涡振时分别呈现正负相关,表明上表面上游涡脱与下游涡脱的波动相位不同,可以称为异步涡脱。对于第 2 涡振区:与第 1 涡振区刚好相反,箱梁上表面由上游负相关转变为下游正相关,从量值上看,下游正相关性较强,尤其是 $x/D=0.65$ 以后。

分析图 8(b)发现,第 1 涡振区与第 2 涡振区沿箱梁下表面的相关性变化情况一致,均是在下表面 x/D 为 0.23~0.90 区域,相关性明显增强,特别是

x/D 在 0.32~0.86 区域,这一区段刚好是下表面的背压区,这一点也说明下表面脉动压力不是产生 2 个涡振区的原因。

由上述分析可知:箱梁上表面中上游和下表面背压区是第 1 涡振区的气流脉动强区,箱梁上表面下游和下表面背压区是第 2 涡振区的气流脉动强区,两者在上表面的气流脉动强区明显处于不同位置。

2.6 各测点升力对竖向涡振的贡献

相关系数虽然能够反映局部气动力与总体气动力的相关程度,但并不能说明局部气动力对断面涡振的贡献大小。箱梁表面各测点气动力对涡振的贡献同时取决于各测点气动力脉动大小以及各测点气动力与总升力的相关性。箱梁表面各测点气动力对竖向涡振的贡献可以用各测点压力均方差值和各测

点升力与总升力相关系数的乘积来表示^[15]。图 9 对比了第 1 涡振区和第 2 涡振区各测点升力对竖向涡振的贡献大小。通过图 9 可以看出:① 2 个涡振区在上表面的涡激力强区明显不同,第 1 涡振区发生在中部栏杆区域,第 2 涡振区则发生在栏杆以后的下游区域,两者上表面上下游对竖向涡振的贡献方向变化相反;② 2 个涡振区在下表面的涡激力强区基本一致,均发生在背压区,第 2 涡振区背风区斜腹板对涡振也有较大贡献;③ 无论是第 1 涡振区还是第 2 涡振区,箱梁的竖板(迎风区 116~120 测点与背风区 48~53 测点)以及迎风区斜腹板(105~115 测点)对断面竖向涡振几乎没有贡献;④ 无论是上表面还是下表面,第 2 涡振区的涡激力强区明显强于第 1 涡振区,这也是第 2 涡振区振幅大于第 1 涡振区的原因。

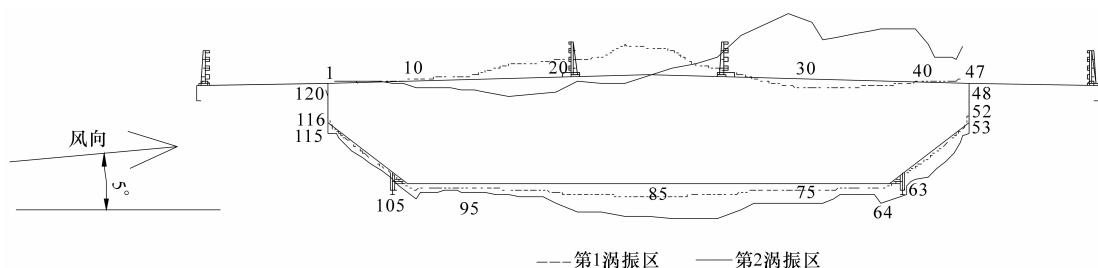


图 9 各测点升力对竖向涡振的贡献

Fig. 9 Contribution of local lift forces to vertical vortex-induced vibration

3 结 语

(1) 基于同步测振和测压风洞试验,得到了港珠澳大桥江海直达船航道桥箱梁断面双竖向涡振区的位移响应、表面压力分布、气动力特征。分析发现高风速涡振区比低风速涡振区锁定区间长,振动响应大,两者表面压力与气动力分布明显不同,认为双竖向涡振区是由具有不同 Strouhal 数的 2 个独立气流涡脱所致。

(2) 第 1 涡振区涡激力主要来源于箱梁上表面中部防护栏区域和下表面背压区的气流脉动,第 2 涡振区涡激力主要来源于箱梁上表面下游区域和下表面背压区的气流脉动,两者在上表面的气流涡脱相互独立。考虑到涡振响应对气动外形的强烈依赖性,本结论应该适用于具有本文气动外形的桥梁断面,对于其他型式的桥梁断面有待于进一步的试验验证。

(3) 同一个桥梁断面产生 2 个不同的气流涡脱,深层次的原因在于气流的不同绕流形态与断面振动的相互作用所致。2 个不同的气流涡脱必然有 2 个不同的 St 数,究其原因应源自 St 数的雷诺数效应,该推论需要进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
CHEN Zheng-qing. Bridge wind engineering[M]. Beijing: China Communications Press. (in Chinese)
- [2] Simiu E, Scanlan R H. Wind effects on structures: fundamentals and applications to design[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons Incorporation, 1996.
- [3] Kimura K, Shima K, Sano K, et al. Effects of separation distance on wind-induced response of parallel box girders[J]. Journal of Wind Engineering and Industri-

- al Aerodynamics, 2008, 96(6/7): 954-962.
- [4] 崔欣, 李加武, 陈飞, 等. 准流线型桥梁断面涡激共振的雷诺数效应[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(2): 47-62.
- CUI Xin, LI Jia-wu, CHEN Fei, et al. Reynolds number effect on vortex response of streamline-like bridge deck section [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(2): 47-62. (in Chinese)
- [5] 刘志文, 陈政清, 胡建华, 等. 大跨度双幅桥面桥梁气动干扰效应[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(6): 55-59.
- LIU Zhi-wen, CHEN Zheng-qing, HU Jian-hua, et al. Aerodynamic interference effects of twin decks bridges with long span[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(6): 55-59. (in Chinese)
- [6] Sarwar M W, Ishihara T. Numerical study on suppression of vortex-induced vibrations of box girder bridge section by aerodynamic countermeasures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(12): 701-711.
- [7] Larsen A, Savage M, Lafreniere 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(6/7): 934-944.
- [8] 周建龙. 桥梁结构涡激振动及其控制[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- ZHOU Jian-long. Vortex-induced vibration of bridge structure and control[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [9] 何晗欣, 李加武, 周建龙. 中央开槽箱形断面斜拉桥的涡激振动试验与分析[J]. 桥梁建设, 2012, 42(2): 34-40.
- HE Han-xin, LI Jia-wu, ZHOU Jian-long. Testing and analysis of vortex-excited vibration of central slotted box section cable-stayed bridge [J]. Bridge Construction, 2012, 42(2): 34-40. (in Chinese)
- [10] 鲜荣, 廖海黎, 李明水. 大比例主梁节段模型涡激振动风洞试验分析[J]. 实验流体力学, 2009, 23(4): 15-20.
- XIAN Rong, LIAO Hai-li, LI Ming-shui. Analysis of vortex-induced vibration of large-scale section model of girder in wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, 23(4): 15-20. (in Chinese)
- [11] 虞乐宸, 曹丰产, 葛耀君, 等. 桥梁桁架断面涡振特性试验研究[C]//中国土木工程学会桥梁与结构工程分会风工程委员会. 第十五届全国结构风工程学术会议暨第一届全国风工程研究生论坛论文集. 北京: 人民交通出版社, 2011: 485-488.
- YU Le-chen, CAO Feng-chan, GE Yao-jun, et al. Experimental study on performance of vortex-induced vibration of truss bridge girder deck[C]//Bridge and Structures Engineering Branch of Wind Engineering of China Civil Engineering Society Committee. The Proceeding of the 15th National Conference on Structural Wind Engineering and the 1st National Forum on Wind Engineering for Graduate Students. Beijing: China Communications Press, 2011: 485-488. (in Chinese)
- [12] JTG/T D60-01—2004, 公路桥梁抗风设计规范[S].
- JTG/T D60-01—2004, Wind-resistant design specification for highway bridge[S]. (in Chinese)
- [13] John D A. Fundamentals of aerodynamics[M]. 4th ed. New York: McGraw Hill Higher Education, 2005.
- [14] 李加武, 林志兴, 金挺. 压力积分法在桥梁断面雷诺数效应研究中的应用[J]. 振动工程学报, 2006, 19(4): 505-508.
- LI Jia-wu, LIN Zhi-xing, JIN Ting. Application of pressures integration in Reynolds number effects of bridge decks[J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(4): 505-508. (in Chinese)
- [15] 陈海兴, 赵林, 郭增伟. 流线断面涡激力发展规律研究[C]//中国土木工程学会桥梁与结构工程分会风工程委员会. 第十五届全国结构风工程学术会议暨第一届全国风工程研究生论坛论文集. 北京: 人民交通出版社, 2011: 409-412.
- CHEN Hai-xing, ZHAO Lin, GUO Zeng-wei. Research on evolvement of vortex-induced force of streamline section[C]//Bridge and Structures Engineering Branch of Wind Engineering of China Civil Engineering Society Committee. The Proceeding of the 15th National Conference on Structural Wind Engineering and the 1st National Forum on Wind Engineering for Graduate Students. Beijing: China Communications Press, 2011: 409-412. (in Chinese)