

文章编号:1671-8879(2011)03-0045-06

流线型桥梁断面颤振稳定性数值模拟

白桦,夏勇,刘健新,李加武

(长安大学公路学院,陕西西安 710064)

摘要:对于流线型桥梁断面颤振稳定性,采用动网格实现结构分状态强迫振动法,提取稳定的气动力,按照最小二乘法求得不同折减风速的颤振导数。研究了理想薄平板的 8 个颤振导数,并将数值计算结果与 Theodorsen 理论解进行对比,发现采用该方法识别颤振导数与理论解吻合得很好。采用该方法计算了 3 种不同流线型桥梁断面的颤振导数,并计算了颤振临界风速。结果表明:增大主梁的宽高比,可以提高主梁的颤振稳定性;宽高比相同时,主梁底板采用折线形状要比圆弧形颤振稳定性好。

关键词:桥梁工程;流线型断面;颤振稳定性;数值模拟

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

Numerical simulation for flutter stability of streamlined bridge decks

BAI Hua, XIA Yong, LIU Jian-xin, LI Jia-wu

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

Abstract: To study the flutter stability of streamlined bridge decks, the moving grid technique was adopted to simulate the forced vibration of the rigid body with different motion. The flutter derivatives with different reduced wind speed were extracted from obtained aerodynamic forces with least square method. The flutter derivatives of the ideal flat plate were computed and compared with the Theodorsen's theoretic solutions. The computed results agree well with Theodorsen's theoretic solutions. This method was used to calculate the flutter derivatives and critical wind speeds of three streamlined bridge decks. The results show that: increasing the aspect ratio can improve the flutter stability of the streamlined bridge deck; using the polygonal-line deck, the flutter stability is better than the one of arc line shape deck when their aspect ratio is same. 2 tabs, 6 figs, 11 refs.

Key words: bridge engineering; streamlined section; flutter stability; numerical simulation

0 引言

颤振是一种由气动自激力引起的发散性振动,其研究起源于飞行器机翼颤振现象,并由此建立了颤振自激力理论。经典的理想平板气动自激力理论

较好地反映了流线型薄机翼截面的气动自激力。现代机翼和桥梁断面由于不符合二维流动的条带假定,故气动自激力一般通过风洞试验测定。通过颤振导数反映模型力与实际结构的受力换算关系,颤振导数主要与结构断面的外形有关。以往,风洞试

收稿日期:2010-05-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50578014)

作者简介:白桦(1979-),男,甘肃西和人,工程师,工学博士研究生,E-mail:baihua15@163.com。

验是获取颤振导数的唯一手段。近年来,计算机硬件水平及计算流体动力学理论的飞速发展,数值模拟方法已经越来越多的应用于结构工程,成为风洞试验的一种有益的补充。Walther 首先采用离散涡方法模拟了大带东桥主梁断面,并采用强迫振动法计算了颤振导数^[1];丹麦 Larsen 采用离散涡方法研究了 Tacoma Narrows 桥和 Gibraltar 海峡大桥主梁断面;周志勇等也采用离散涡方法,进行了大量的研究工作^[2];曹丰产等基于有限元方法,计算了桥梁断面的颤振导数与颤振临界风速^[3];祝志文等采用有限体积法,都取得了较满意的结果^[4]。

本文采用有限体积法,依据 Scanlan 气动自激力表达式,使主梁断面分别做单自由度竖向和扭转强迫振动^[5]。采集得到稳定的气动力升力及升力矩时程,再由最小二乘法求得主梁断面的 8 个颤振导数。利用计算得到的主梁断面的颤振导数,采用 Scanlan 提出的二维临界风速计算方法,求得主梁断面的颤振临界风速。为了验证计算结果,先对理想薄平板的气动导数进行计算,并与 Theodorsen 理论解进行对比验证;再通过 3 种不同流线型断面的数值计算,比较其颤振稳定性能,研究断面形状对颤振稳定性的影响,方便相关桥梁的气动选型。

1 数值计算方法

1.1 颤振导数的计算

Scanlan 通过引入 8 个颤振导数,近似将桥梁断面气动自激力表达为状态向量的线性函数,即

$$L = \frac{1}{2}\rho U^2(2B) \left[KH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^* \frac{\dot{\alpha}B}{U} + K^2 H_3^* \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} \right] \quad (1)$$

$$M = \frac{1}{2}\rho U^2(2B^2) \left[KA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^* \frac{\dot{\alpha}B}{U} + K^2 A_3^* \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} \right] \quad (2)$$

式中: L 、 M 分别为主梁单位长度的升力和升力矩; ρ 为空气密度; U 为来流风速; B 为桥梁全宽; h 、 α 分别为主梁的竖向位移和扭转角; \dot{h} 、 $\dot{\alpha}$ 分别为主梁竖向位移速度和扭转角速度; K 为折减频率, $K = \omega B/U$, ω 为运动圆频率; H_i^* 、 A_i^* ($i = 1, 2, 3, 4$) 均为主梁的颤振导数,颤振导数是来流折减频率 K 或折减风速 $V_r = U/fB$ 的函数, f 为模型的运动频率。

Scanlan 的气动自激力公式是基于线性自激力和简谐振动假设,其升力和升力矩与结构自身的竖向振动和扭转运动相关。当模型只做纯竖向振动时,

扭转角及其角速度均为 0,这时式(1)、式(2)就简化为只与竖向位移 h 及其速度 \dot{h} 相关。数值模拟可以强迫刚体断面做纯竖向振动($h = h_0 \sin(\omega t)$, h_0 为竖向运动振幅, t 为时间)。提取竖向运动时的非正常升力与升力矩,代入简化的 Scanlan 气动自激力公式中,采用最小二乘法就可以求出 H_1^* 、 H_4^* 、 A_1^* 、 A_4^* 4 个颤振导数;同理,采用扭转强迫振动($\alpha = \alpha_0 \sin(\omega t)$, α_0 为扭转运动振幅),计算得到非正常升力与升力矩。采用最小二乘法,可以求得与扭转相关的其余 4 个颤振导数。

1.2 颤振临界风速的计算

计算桥梁颤振临界风速的方法很多,本文计算采用半逆解法^[6]。对二自由度桥梁颤振临界风速,不考虑桥梁的侧向运动,只有竖弯和扭转 2 个自由度运动,其运动方程可表示为

$$m(\ddot{h} + 2\xi_h \omega_h \dot{h} + \omega_h^2 h) = L \quad (3)$$

$$I(\ddot{\alpha} + 2\xi_\alpha \omega_\alpha \dot{\alpha} + \omega_\alpha^2 \alpha) = M \quad (4)$$

式中: m 为模型单位长度的质量; I 为模型的质量惯矩; ξ_h 、 ξ_α 分别为模型竖弯运动和扭转运动的阻尼比; ω_h 、 ω_α 分别为竖弯和扭转运动的圆频率; h 、 α 均为与之对应的位移; \dot{h} 、 $\dot{\alpha}$ 均为与之对应的速度; \ddot{h} 、 $\ddot{\alpha}$ 均为与之对应的加速度。

将非正常气动力表达式(1)、式(2)代入式(3)、式(4)中,并引入量纲一时间 s , $s = tU/B$,竖弯运动折减频率 $K_h = B\omega_h/U$,扭转运动折减频率 $K_\alpha = B\omega_\alpha/U$,将简谐振动方程用复数形式表示为 $h = h_0 e^{iKs}$, $\alpha = \alpha_0 e^{iKs}$,其中 i 为复数单位。由此可以得到关于 h_0/B 、 α_0 的量纲一齐次方程组为

$$\left[-K^2 + 2i\xi_h K_h K + K_h^2 - \frac{\rho B^2}{m} K^2 (iH_1^* + H_4^*) \right] \cdot \frac{h_0}{B} - \frac{\rho B^2}{m} K^2 (iH_2^* + H_3^*) \alpha_0 = 0 \quad (5)$$

$$- \frac{\rho B^4}{I} K^2 (iA_1^* + A_4^*) \frac{h_0}{B} + \left[-K^2 + 2i\xi_\alpha K_\alpha K + K_\alpha^2 - \frac{\rho B^4}{I} K^2 (iA_2^* + A_3^*) \right] \alpha_0 = 0 \quad (6)$$

定义函数 $X = \omega/\omega_h$,代入式(5)、式(6)可得到如下方程组:

$$\left[X^2 - 2i\xi_h X - 1 + \frac{\rho B^2}{m} X^2 H_4^* + i \frac{\rho B^2}{m} X^2 H_1^* \right] \cdot \frac{h_0}{B} + \left[\frac{\rho B^2}{m} X^2 H_3^* + i \frac{\rho B^2}{m} X^2 H_2^* \right] \alpha_0 = 0 \quad (7)$$

$$\left[i \frac{\rho B^4}{I} X^2 A_1^* + \frac{\rho B^4}{I} X^2 A_4^* \right] \frac{h_0}{B} + \left[X^2 - 2i\xi_\alpha \left(\frac{\omega_\alpha}{\omega_h} \right) X - \left(\frac{\omega_\alpha}{\omega_h} \right)^2 + \frac{\rho B^4}{I} X^2 A_3^* + \right.$$

$$i \frac{\rho B^4}{I} X^2 A_2^*]_{\alpha_0} = 0 \quad (8)$$

上述方程组有解的充要条件是系数行列式为 0,因此可以得到关于 X 的四次多项式。在颤振状态 X 总是实数,这样就得到关于实部和虚部的 2 个方程。根据计算得到的颤振导数随折减风速的变化曲线,可以得到实部方程 $X_R(K)$ 和虚部方程 $X_I(K)$,这 2 个曲线的交点即为颤振临界状态,对应的颤振圆频率 ω_c 和颤振临界风速 U_c 分别为

$$\omega_c = X_c \omega_h \quad (9)$$

$$U_c = \frac{B \omega_h}{K_c} X_c \quad (10)$$

式中: X_c 为其临界状态对应的方程解。

2 理想薄平板颤振导数识别

理想平板近似为厚度为 0、长度无限的直平板。由于认为其没有厚度,故当平板静止时,对流场没有

任何干扰作用,静风荷载为 0。Theodorsen 借助势流原理和库塔条件,通过基本解的叠加,得到了二维理想平板气动自激力的表达式为

$$L = \pi \rho b \{ -b \dot{h} - 2UC(k) \dot{h} - [1 + C(k)] Ub \dot{\alpha} - 2U^2 C(k) \alpha \} \quad (11)$$

$$M = \pi \rho b^2 \left\{ UC(k) \dot{h} - \frac{b^2 \ddot{\alpha}}{8} + \left[-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} C(k) \right] \cdot Ub \dot{\alpha} + U^2 C(k) \alpha \right\} \quad (12)$$

式中: b 为桥梁半宽, $b = B/2$; k 为量纲一折减频率, $k = b\omega/U$; $C(k)$ 为 Theodorsen 循环函数。

将式(11)、式(12)与颤振导数定义式对比,就可得到理想平板的颤振导数表达式^[7]。

数值模拟的理想平板,应充分保证对理想平板的近似,故本文计算采用较大的宽高比和流线化外形,计算采用的模型尺寸如图 1 所示。

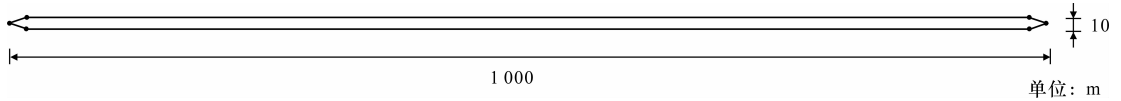


图 1 理想平板

数值模拟采用动网格,使模型按正弦规律分别做竖弯与扭转强迫振动。经过一定时间迭代后,当升力系数与力矩系数时程变化曲线稳定后,采集其气动力时程,求出非定常气动力。依据上节所述分状态识别,可以求得不同折减风速下模型的 8 个颤振导数。模型竖弯运动的频率 $f = 2$ Hz,振幅 $h_0 = 0.02$ m;扭转运动的频率 $f = 2$ Hz,振幅 $\alpha_0 = 4^\circ$ 。竖弯与扭转运动的初始相位均为 0,攻角为 0° 。

图 2 给出了理想薄平板颤振导数的 CFD(计算流体动力学)计算结果。图 2 中实线为 Theodorsen

平板理论解,实点为 CFD 计算得到的不同折减风速 V_r (量纲一的量)下的颤振导数。由图 2 可见:颤振导数在低折减风速下计算结果与理论解吻合得较好。随折减风速的增大,颤振导数 H_2^* 、 H_4^* 、 A_2^* 、 A_4^* 和理论解的误差在增大,其原因可能是由于随折减风速的增大,数值求解的稳定性减低、动网格运动和风速压力耦合等产生误差导致,但颤振导数的整体变化趋势与理论解很相似。颤振导数 H_1^* 、 H_3^* 、 A_1^* 、 A_3^* 在趋势和数值上与理论解完全吻合,说明采用此方法计算颤振导数具有较高的精度。

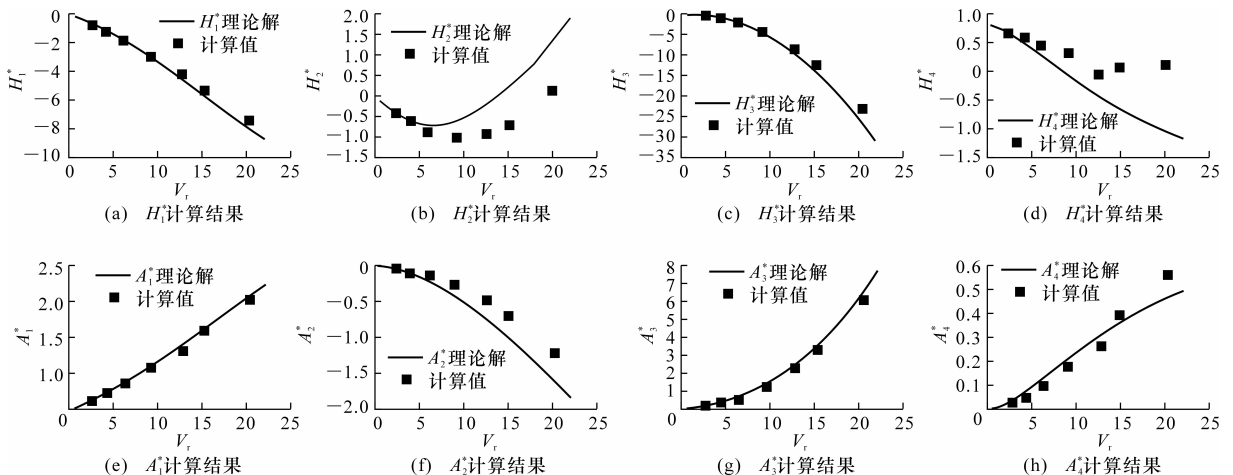


图 2 理想薄平板颤振导数

3 流线型箱梁颤振稳定性计算

前面通过理想平板颤振导数的计算,验证了采用分状态强迫振动法识别颤振导数的可行性;本节通过计算3种不同流线型箱梁断面的颤振导数及颤振临界风速,评价此类断面气动稳定性,以方便气动选型^[8-9]。

图3给出了3种不同流线型箱梁断面。图3中,断面1与断面2梁高相同,断面1梁宽比断面2宽约10 m;断面2与断面3梁高与梁宽均一致,区别在箱梁底缘,一个为折线,另一个为圆弧线。

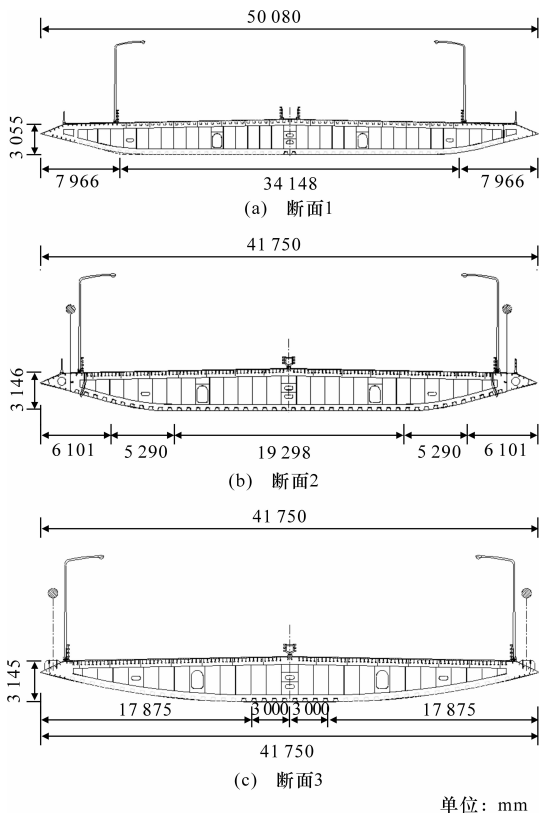


图3 流线型箱梁横截面

3种主梁断面的工程背景是某主跨为1 200 m的双塔悬索桥,采用ANSYS软件建立“鱼骨式”模型,计算得到3种不同断面的动力特性,结果见表1。

CFD计算模型取主梁施工状态,缩尺比为1:60。

表1 3种主梁断面的动力特性

断面类型	梁高 / m	梁宽 / m	频率 / Hz	关键阵型	等效质量 / (kg · m ⁻¹)	质量惯矩 / (kg · m ² · m ⁻¹)
断面1	3.51	50.08	0.134 7	一阶正对称竖弯	37 800	28 100 000
			0.245 5	一阶正对称扭转		
断面2	3.51	41.75	0.136 5	一阶正对称竖弯	32 200	7 660 000
			0.289 6	一阶正对称扭转		
断面3	3.51	41.75	0.135 7	一阶正对称竖弯	32 800	21 000 000
			0.230 7	一阶正对称扭转		

计算域采用非结构网格离散,近壁面网格加密,外侧网格逐渐变疏。主梁断面竖弯强迫运动频率 $f = 2$ Hz,振幅 $h_0 = 0.02$ m;扭转强迫运动频率 $f = 2$ Hz,振幅 $\alpha_0 = 4^\circ$ 。时间步长取0.01 s,通过改变风速得到不同折减风速下主梁断面的颤振导数。每个断面分别计算了 0° 和 $\pm 3^\circ$ 共3个风攻角。

下一页图4给出了断面3做扭转强迫运动时的压力等值线。图中, t 为时间, T 为周期。由图4可见:当断面处于平衡位置时($t = 0$),断面表面压力分布呈现对称状态;当扭转运动变化为负攻角时($t = T/4$),断面表面压力分布产生偏移;再次回到平衡位置时($t = T/2$),压力分布再次变为对称;当断面变为正攻角时,表面压力分布与负攻角状态呈对应关系。压力分布的这种周期性变化,产生了周期性的升力与升力矩。

下一页图5给出扭转运动时断面3的升力系数与升力矩系数时程曲线。

下一页图6给出了 0° 攻角下3种断面的8个颤振导数。通过对比可见:3种断面的颤振导数随折减风速增大的变化趋势基本一致;不同断面的颤振导数在低折减风速基本一致,随折减风速增大,变化趋势偏差变大;颤振导数 H_1^* 、 H_2^* 、 H_3^* 、 A_1^* 、 A_2^* 、 A_3^* 对断面形状改变不敏感, H_4^* 、 A_4^* 对断面形状较敏感,可能是由于主梁断面的变化导致竖向运动时所产生的气动力变化较大所致。断面1的 A_4^* 值斜率较缓,断面2的 A_4^* 下降斜率增大,断面3的 A_4^* 最大;3种断面的 A_4^* 值的趋势一致,断面1的 A_4^* 值比其他2个断面大,且斜率也大于其他2个断面,断面2的 A_4^* 呈现一开始下降、随后上升的趋势,数值变化较断面3的大。

表2给出了依据前述动力特性及颤振导数结果计算出的3种断面不同攻角下的颤振临界风速。断面1的临界风速在 -3° 最大, 3° 最小;断面2是 -3° 最安全, 0° 偏危险;断面3趋势变为 3° 最安全, -3° 偏危险,说明箱梁底板弧线的变化会改变不同攻角下流线型箱梁的颤振稳定性。从断面整体颤振稳定性看,各攻角下断面1的颤振临界风速最高,断面3的临界风速最小,说明增大主梁的宽高比可以提高主梁的颤振稳定性;宽高比相同时,主梁底板采用折线变化比采用弧线变化的颤振稳定性好。

表2 3种断面施工状态的颤振临界风速

断面形式	3种断面不同攻角($^\circ$)的颤振临界风速 / (m · s ⁻¹)		
	-3	0	3
断面1	97.74	97.02	96.39
断面2	89.64	88.56	88.83
断面3	82.98	83.34	85.50

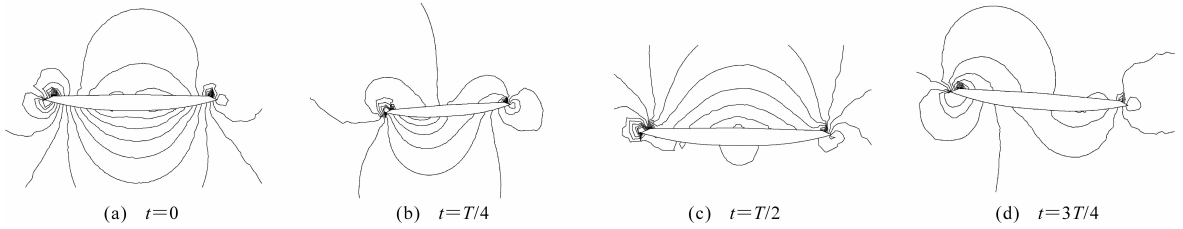


图 4 断面 3 的扭转运动压力等值线

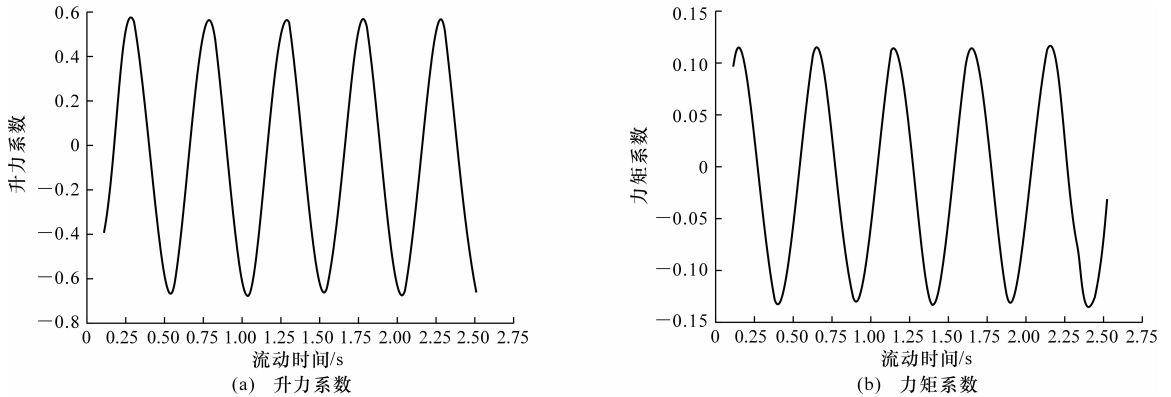


图 5 纯扭转运动气动力系数时程曲线

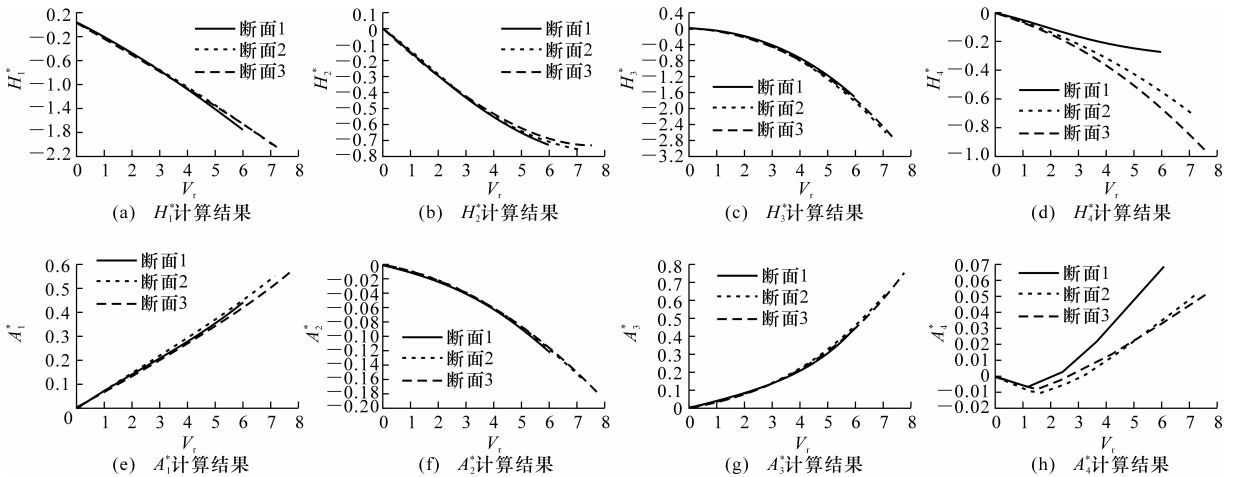


图 6 3 种断面的颤振导数

4 结 语

(1) 采用动网格实现分状态强迫振动法, 识别流线型断面颤振导数具有较高的精度。

(2) 增大主梁的宽高比, 可以提高主梁的颤振稳定性; 宽高比相同时, 主梁底板采用折线形状要比圆弧线颤振稳定性好。

(3) 主梁断面的 8 个颤振导数中 H_1^* 、 H_2^* 、 H_3^* 、 A_1^* 、 A_2^* 、 A_3^* 对断面形状的微小改变不敏感; H_4^* 、 A_4^* 对断面形状改变较敏感。

参考文献:

References:

[1] Walther J H. Discrete vortex method for two-dimen-

sional flow past bodies of arbitrary shape undergoing prescribed rotary and translational motion[D]. Lyngby: Technical University of Denmark, 1994.

[2] 周志勇, 陈艾荣, 项海帆. 涡方法用于桥梁断面气导数和颤振临界风速的数值计算[J]. 振动工程学报, 2002, 15(3): 327-331.

ZHOU Zhi-yong, CHEN Ai-rong, XIANG Hai-fan. Numerical assessment of aerodynamic derivatives and critical wind speed of flutter of bridge decks by discrete vortex method[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(3): 327-331.

[3] 曹丰产, 项海帆, 陈艾荣. 桥梁断面的气导数和颤振临界风速的数值计算[J]. 空气动力学学报, 2000, 18(1): 26-33.

CAO Feng-chan, XIANG Hai-fan, CHEN Ai-rong.

- Numerical assessment of aerodynamic derivatives and critical wind speed of flutter of bridge decks[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2000, 18(1): 26-33.
- [4] 祝志文, 陈政清, 陈伟芳. 用动网格法计算理想平板的颤振导数[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(3): 13-17.
ZHU Zhi-wen, CHEN Zheng-qing, CHEN Wei-fang. Assessment of aerodynamic derivatives of the ideal flat plate based on the moving grid method[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2002, 24(3): 13-17.
- [5] Scanlan R H, Tomko J J. Airfoil and bridge deck flutter derivatives[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1971, 97(6): 1171-11737.
- [6] 陈艾荣, 许福友, 胡晓伦. 平板颤振临界风速的参数灵敏度分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(7): 875-879.
CHEN Ai-rong, XU Fu-you, HU Xiao-lun. Parameters sensitivities analysis of flutter critical velocity of flat plates[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(7): 875-879.
- [7] 祝志文, 陈政清, 顾明. 理论平板及其中央开槽颤振特性的 CFD 研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2006, 33(5): 16-20.
ZHU Zhi-wen, CHEN Zheng-qing, GU Ming. Studies on flutter behaviors of ITP and slotted ITP by using CFD simulations[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2006, 33(5): 16-20.
- [8] 李永乐, 邸月龙, 赵彤, 等. 大跨高墩城市轨道交通斜拉桥动力特性及抗风性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(4): 19-24.
LI Yong-le, DI Yue-long, ZHAO Tong, et al. Dynamic characteristic and wind resistance behavior of high-pier long-span cable-stayed bridge for urban rail transit[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(4): 19-24.
- [9] 白桦, 李加武, 崔欣, 等. 流线型桥梁断面雷诺数效应[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(5): 17-22.
BAI Hua, LI Jia-wu, CUI Xin, et al. Reynolds number effect of streamlined bridge section[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(5): 17-22.

.....
(上接第 20 页)

(3) 静态试验标定荷载与传感器轴向的应变之间的关系为 $0.0387 \mu\epsilon/N$, 运用 ANSYS 仿真传感器静态试验与实测结果, 对传感器荷载与应变之间关系进行修正, 修正因子 $\eta=0.928$; 5 h 动态试验显示, 传感器监测结果能够反映沥青混凝土内部沿传感器轴向的应变变化趋势, 动态响应良好, 没有发生破坏。

参考文献:

References:

- [1] Schiessl P, Breit W, Raupach M. Sensor technology: monitoring corrosion risk in concrete structures[J]. German Engineering Journal, 1996, 26(11): 40-46.
- [2] Pierre P, Doré G, Prophète F. Characterization of the impact of tires on pavement behaviour[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004, 31(5): 860-869.
- [3] 李东生, 李宏男. 埋入式封装的光纤光栅传感器应变传递分析[J]. 力学学报, 2005, 37(4): 435-440.
LI Dong-sheng, LI Hong-nan. Buried packaged fiber grating sensor strain transfer analysis [J]. Mechanics, 2005, 37(4): 435-440.
- [4] 干伟忠, Raupach M, 金伟良, 等. 杭州湾跨海大桥混凝土结构耐久性原位监测预警系统 [J]. 中国公路学报, 2010, 23(2): 30-35.
GAN Wei-zhong, Raupach M, JIN Wei-liang, et al. In-situ monitoring and early warning system for durability of concrete structure of Hangzhou bay sea-crossing bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(2): 30-35.
- [5] WANG Jian-neng. Fiber Bragg grating sensors for use in pavement structural strain-temperature monitoring [J]. Smart Structures and Materials, 2006, 6174: 1-12.
- [6] 郭威, 刘凯, 黄永清. 等应力作用下光纤光栅 Bragg 波长调谐特性的研究[J]. 光电子·激光, 2000, 11(1): 23-25.
GUO Wei, LIU Kai, HUANG Yong-qing. Study on fiber grating's Bragg wavelength shift caused by strain [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2000, 11(1): 23-25.
- [7] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [8] 解建光, 刘树龙. 环氧树脂掺加增韧剂埋入式 FBG 封装技术研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(3): 22-24.
XIE Jian-guang, LIU Shu-long. Study on the embedment encapsulation technique of epoxy resin mixed with toughening agent of fiber Bragg grating [J]. Transducer and Microsystem Technology, 2011, 30(3): 22-24.
- [9] JTJ052—2000, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].