

金马大桥抖振响应的时域分析*

黄海新, 张哲, 韩立中

(大连理工大学 桥梁研究所, 辽宁 大连 116023)

摘要:金马大桥是一座独塔斜拉桥与两侧 T 构相连接的大跨度协作体系桥梁, 该桥结构形式新颖且桥位处于台风多发区, 因此, 对该桥进行抖振响应分析是非常必要的。首先利用谐波合成法将脉动风速模拟为多个互相关的随机过程, 接着给出抖振力和自激力的时域表达式, 据此对金马大桥进行了抖振响应分析。结果表明, 尽管该协作体系斜拉桥采用抗扭能力较差的边主梁形式, 但其抗风能力是有保证的。

关键词:斜拉桥; 协作体系; 抖振; 时域

中图分类号: TU352.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7329(2006)01-0063-04

Time Domain Analysis on Buffeting of Jinma Bridge

HUANG Hai-xin, ZHANG Zhe, HAN Li-zhong

(Bridge Institute, Dalian University of Technology, Liaoning, Dalian 116023, P. R. China)

Abstract: Jinma bridge is a long span cooperative-system cable-stayed bridge with one tower cooperated with T frames on both sides. Owing to artistic form and lying in typhoon-prone area, it is essential to process the buffeting analysis. In this paper, the turbulent wind velocity was first simulated with cosine wave superposition method as multi-correlated random processes; then, the time domain expressions for the buffeting and self-excited forces were given. On this basis, the buffeting analysis of Jinma Bridge was made. The results show that the anti-wind capacity of the cooperative-system cable-stayed bridge is ensured although the torsional resistibility of the main girders of this bridge is not good.

Keywords: cable-stayed bridge; cooperative system; buffeting; time-domain

金马大桥位于广东省广肇高速公路, 全长 1 912.6 m, 其中主桥为 566 m, 采用斜拉桥与 T 构的协作体系, 如图 1 所示。斜拉桥采用双索面布置, 主梁标准断面由两侧的实体边主梁和横隔梁组成梁格体系。该桥

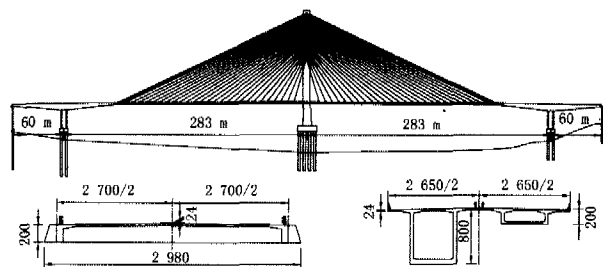


图 1 金马大桥总体布置图

283 m 的主跨是世界上最大跨径的独塔混凝土斜拉桥^[7]。该桥一经建成, 其新颖独特的结构形式就引起了工程界的极大兴趣, 鉴于桥址处于台风多发区, 故对

该桥的抗风能力进行研究具十分重要的意义。

抖振是桥梁风激振动中的一种, 由于其发振风速较低, 在施工和运营期间容易发生, 长时间的抖振将对结构的疲劳、行车的平稳性等产生影响, 因此已引起人们的重视。与频域分析不同的是, 时域分析^[1-4]能够计及结构非线性的影响, 且能观察到结构动力响应的整个过程。首先利用谐波合成法对脉动风速时程进行了模拟, 接着给出了抖振力和自激力的时域表达式, 继而对金马大桥这种协作体系斜拉桥在随机风荷载下的抖振响应进行了分析, 所得结果对今后同类桥梁的设计具有一定的参考价值。

1 风场的模拟

风场的模拟是指对自然风中的紊流成分形成的脉动风速进行模拟。鉴于现场实测的困难, 工程上常将

* 收稿日期: 2005-08-05

作者简介: 黄海新(1976-), 男, 黑龙江青冈人, 博士生, 主要从事现代化桥梁设计理论及动力行为研究。

风场看作是一个空间分布的多维多变量互相关平稳高斯随机过程加以模拟。目前,脉动风速模拟的方法主要有线性滤波(AR)法和谐波合成(WAWS)法。线性滤波法是将均值为零的白噪声随机序列通过滤波器输出为具有指定谱特征的随机过程,该方法速度快,但精度差。谐波合成法是利用谱分解和三角级数叠加来模拟随机过程的方法,其首先对 n 个具有零均值的平稳高斯随机过程,由给定的风速谱密度和空间相干函数得到互谱密度矩阵:

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(\omega) & \cdots & S_{1n}(\omega) \\ S_{21}(\omega) & S_{22}(\omega) & \cdots & S_{2n}(\omega) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2}(\omega) & \cdots & S_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

然后,对 $S(\omega)$ 进行 Cholesky 分解,得:

$$S(\omega) = H(\omega) \cdot H^*(\omega)^T \quad (2)$$

其中, $H(\omega)$ 为下三角矩阵, $H^*(\omega)^T$ 为 $H(\omega)$ 的共轭转置。

Shinozuka 已证明,对具有功率谱密度矩阵 $S(\omega)$ 的随机过程样本可以用三角级数叠加的方法模拟,故第 j 点脉动风速样本可表达为:

$$v_j(t) = \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^N |H_{jm}(w_l)| \sqrt{2\Delta w} \cos[w_l t + \psi_{jm}(w_l) + \theta_{ml}] \quad (3)$$

式中: N 为频率间隔数, $\Delta w = (w_u - w_0)/2$, $w_l = w_0 + (l - 1/2)\Delta w$, w_u 为频率上限, θ_{ml} 为介于 0 和 2π 之间均匀分布的随机相位角, $\psi_{jm}(w_l)$ 为两个不同作用点之间的相位角, $H_{jm}(w_l)$ 为 $S(w)$ 的 Cholesky 分解矩阵中的元素。水平和竖向脉动风速谱分别取与风洞实验拟合较好的 Simiu 谱和 Panofsky 谱。

2 气动力的时域化

作用于桥梁上的风荷载一般可分为静力、抖振力和自激力三部分,如图 2 所示。

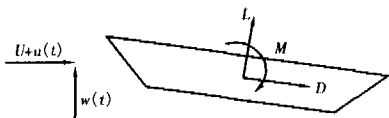


图 2 作用于横截面上的气动力

静力是由平均风速引起的,使结构处于一个新的静平衡位置。抖振力是脉动风速引起的强迫力,使结构产生随机振动。自激力是考虑气流和结构运动间耦合的气动弹性而产生的一种非常复杂的气动力。

2.1 抖振力的时域表达

根据准定常理论, A. G. Davenport 提出抖振力的时域表达式为:

$$\begin{cases} D_b(x, t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[2 \frac{A}{B} C_D(\alpha_0) \frac{u(x, t)}{U} \right] \\ L_b(x, t) = -\frac{1}{2} \rho U^2 B \left\{ 2 C_L(\alpha_0) \frac{u(x, t)}{U} + \left[C'_L(\alpha_0) + \frac{A}{B} C_D(\alpha_0) \right] \frac{w(x, t)}{U} \right\} \\ M_b(x, t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[2 C_M(\alpha_0) \frac{u(x, t)}{U} + C'_M(\alpha_0) \frac{w(x, t)}{U} \right] \end{cases} \quad (4)$$

式中: ρ 为空气密度, U 为平均风速, u 和 w 为水平和竖向脉动风速, C_D 、 C_L 、 C_M 及 C'_L 、 C'_M 分别为气动阻力、升力、力矩系数及其斜率,其值通过风洞试验确定。 A 为桥面单位长度横风向投影面积, B 为桥面宽度。

2.2 自激力的时域表达

基于线性机理假设的基础上, Scanlan 首先以气动导数的形式给出了自激力的频域表达式^[5]。要进行时域分析,必须寻找自激力的时域表达式。在前人工作的基础上, Y. K. Lin 提出自激力可以合理的以脉冲响应函数和桥面运动卷积的形式来表达:

$$\begin{cases} M_{se}(t) = \int_{-\infty}^t f_{Mh}(t-\tau) h(\tau) d\tau + \int_{-\infty}^t f_{Ma}(t-\tau) \alpha(\tau) d\tau \\ L_{se}(t) = \int_{-\infty}^t f_{Lh}(t-\tau) h(\tau) d\tau + \int_{-\infty}^t f_{La}(t-\tau) \alpha(\tau) d\tau \end{cases} \quad (5)$$

式中: $f_{Mh}(t-\tau)$ 、 $f_{Ma}(t-\tau)$ 、 $f_{Lh}(t-\tau)$ 和 $f_{La}(t-\tau)$ 分别为相应自由度方向的单位脉冲响应函数, h 、 α 分别为桥面的竖向位移、扭转角。

对(5)式进行 Fourier 变换,即得体系的传递函数,根据其以与气动导数表达的自激力的频域表达式相等价的关系,可以获得传递函数和气动导数间的关系^[1]。根据经典的薄翼理论,传递函数可以用线性滤波函数近似表达,以 f_{Ma} 的传递函数 F_{Ma} 为例,表达式为:

$$F_{Ma}(v) = \rho B^2 U^2 \left[C_1 + i \frac{2\pi C_2}{v} + \sum_{k=3}^n C_k \frac{4\pi^2 + i2\pi d_k v}{d_k^2 v^2 + 4\pi^2} \right] \quad (6)$$

式中: $v (= 2\pi U/\omega B)$ 为折算风速, C_1 、 C_2 、 C_k 、 d_k 为待定系数,其与气动导数的关系为:

$$\begin{cases} C_\alpha^*(v) = \frac{C_1 v^2}{4\pi^2} + \sum_{k=3}^n \frac{C_k v^2}{d_k^2 v^2 + 4\pi^2} \\ C_b^*(v) = \frac{C_2 v^2}{2\pi} + \sum_{k=3}^n \frac{C_k d_k v^3}{2\pi d_k^2 v^2 + 4\pi^3} \end{cases} \quad (7)$$

其中, C_a^* 、 C_b^* 为实验获得的气动导数。通过非线性最小二乘拟合,即可获得待定系数的近似值(一般取 $k = 4$)。将其代入传递函数表达式,然后对传递函数进行逆 Fourier 变换后代入式(5)就可以获得自激力的时域表达式^[4],例如,对(6)式进行逆 Fourier 变换得脉冲响应函数 $f_{M\alpha}$ 的表达式为:

$$f_{M\alpha}(t) = \rho U^2 B^2 \left\{ C_1 \delta(t) + \frac{C_2 B}{U} \delta(t) + \delta(t) \sum_{k=3}^n C_k - \sum_{k=3}^n C_k d_k \frac{U}{B} \exp\left(-\frac{d_k U}{B} t\right) \right\} \quad (8)$$

将(8)式代入(5)式并考虑到 $t \leq 0$ 时,位移、速度和加速度均为 0,有:

$$\int_{-\infty}^t f_{M\alpha}(t - \tau) \alpha(\tau) d\tau = \rho U^2 B^2 \left\{ C_1 \alpha(t) + \sum_{k=3}^n C_k \alpha(t) + \frac{C_2 B}{U} \alpha(t) - \sum_{k=3}^n C_k d_k \frac{U}{B} \int_0^t \exp\left[-\frac{d_k U}{B}(t - \tau)\right] \alpha(\tau) d\tau \right\} \quad (9)$$

对(9)式进一步简化即得自激力 $M_{se}(t)$ 式中第二项的时域表达式:

$$\int_{-\infty}^t f_{M\alpha}(t - \tau) \alpha(\tau) d\tau = \rho U^2 B^2 \left\{ C_1 \alpha(t) + \frac{C_2 B}{U} \alpha(t) + C_{3M\alpha} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{d_3 U}{B}(t - \tau)\right] \alpha(\tau) d\tau + c_4 \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{d_4 U}{B}(t - \tau)\right] \alpha(\tau) d\tau \right\} \quad (10)$$

同理,可得(5)式中其余各项的时域表达式。

3 金马大桥抖振响应分析

3.1 计算模型

采用单脊梁模式的有限元模型,计算模型见图 3。其中,主梁、横隔梁、塔柱及墩桩等采用空间梁单元,承台采用板单元,斜拉索简化为空间杆单元,桩周围土抗力的影响用土弹簧单元模拟。利用该模型首先计算结构在静风荷载作用下的静平衡位置,然后在此基础上求解抖振响应的运动微分方程:

$$[M][\ddot{U}] + [C][\dot{U}] + \{[K_e] + [K_g]\}[U] = [P_b] + [P_{se}] \quad (11)$$

式中: $[U]$ 为结构位移矩阵, $[M]$ 为结构总质量和质量惯性矩矩阵, $[C]$ 为结构的阻尼矩阵, $[K_e]$ 、 $[K_g]$ 分别为结构弹性刚度矩阵和几何刚度矩阵, $[P_b]$ 、 $[P_{se}]$ 分别为风荷载的抖振力和自激力。计算中计及了结构初始刚度及斜拉索垂度的影响。

将作用于桥面上的风场沿跨度方向离散为 162 个点,利用第 2 节中所述的方法,采用 Simiu 谱和 Panof-

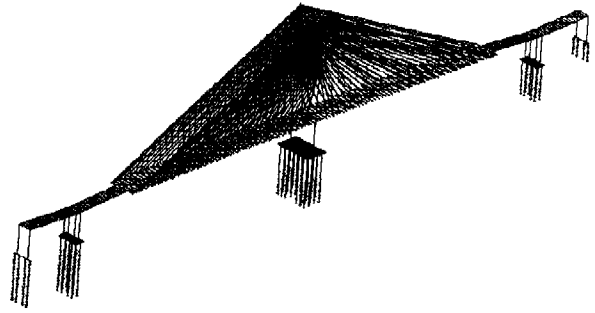


图 3 金马大桥有限元计算模型

sky 谱,对金马大桥桥面沿跨度方向的水平及竖向脉动风速进行了模拟。相干函数采用 Davenport 所建议的公式,其中衰减系数 C_y 取 7。根据相关资料,桥位处为 II 类地表粗糙度,地面粗糙高度为 0.05 m,桥面平均高度 30 m,桥面处平均风速 33 m/s。模拟过程中,频率下限 0.01 Hz,频率上限 2 Hz,频率段数 1 024,模拟时间 300 s,时间步长为 0.3 s。将模拟得到的脉动风速样本代入抖振力表达式(4),即可获得作用于桥面上的抖振力。图 4 和图 5 给出了桥面主跨跨中节点横向抖振力和扭矩时程曲线。

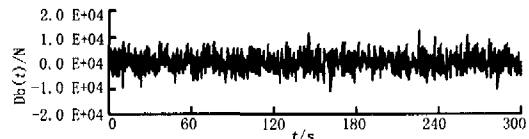


图 4 跨中点横向抖振力时程

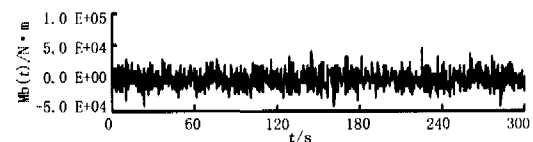


图 5 跨中点扭矩时程

其中,气动力表达式中静力三分力系数及其斜率以及气动导数取自节段模型风洞实验^[6]。

3.2 计算结果

对金马大桥在初始攻角为 0° 条件下进行了抖振响应分析, 0° 攻角下主梁静力三分力系数及其导数见表 1。图 6 给出了最具代表性的主梁跨中节点的抖振响应分析结果。为清晰起见,仅给出前 60 s 的抖振响应时程。从图 6(b)中可以看出,由于桥面较宽,主梁侧向刚度较大,使得主梁横向响应较小。图 6(c)中主梁扭转响应也很小,这解释为虽然本桥采用抗扭能力较差的边主梁形式,但由于设计成双斜索面及梁、塔、墩固结的方式,使得体系本身具有较大的抗扭刚度。同时,从总体布置图 1 可以看出,斜拉桥部分在方便挂篮施工的同时,为改善气动特性边主梁又设计成倾斜的梯形形式,使得本桥的气动响应能力得到进一步提

高。图6表明金马大桥的抖振响应主要来自竖向弯曲振型的贡献。

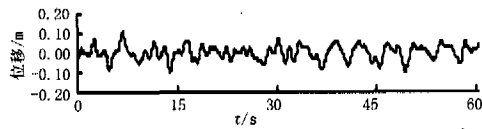


图6(a) 跨中点竖向位移时程

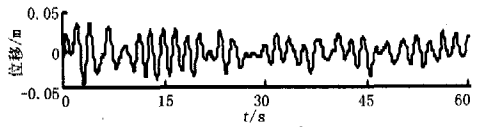


图6(b) 跨中点横向位移时程

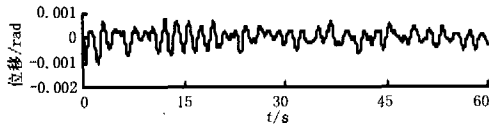


图6(c) 跨中点扭转位移时程

表1 主梁静力三分力系数及其斜率($\alpha=0^\circ$)

C_D	C_L	C_M	$dC_L/d\alpha$	$dC_M/d\alpha$
1.380	0.001	0.011	0.104	0.058

为进一步分析金马大桥的抖振响应对车辆及行人造成的影响,采用狄克曼舒适度指标 K 来判定。 K 的计算公式为:

对于横向振动 $f < 2$ Hz 时, $K = 2Af^2$;

对于竖向振动 $f < 5$ Hz 时, $K = Af^2$ 。

其中, A 为振幅, mm; f 为频率, Hz。

由文献[7]可知金马大桥一阶侧向弯曲和一阶竖向弯曲的频率分别为 0.354 Hz 和 0.243 Hz, 结合上述抖振响应的计算结果, 计算得金马大桥在横向和竖向的狄克曼舒适度指标分别为 9.0 和 6.4, 由判定标准 ($K=0.1$, 人体能感到振动的下限; $K=1.0$, 能忍受任何长时间的振动; $K=10$, 能忍受短期振动; $K=100$, 一般人对振动过分疲劳的上限) 可知, 虽然 K 大于 1.0,

但小于 10, 故对车辆及行人的影响是可以接受的。

4 结论

1) 利用谐波合成法模拟得到了具有空间相关性的脉动风荷载样本, 继而对金马大桥进行了抖振响应分析, 较全面的获得了结构在整个抖振过程中的动力行为, 比频域分析方法更全面而直观, 便于工程设计人员使用。

2) 首次对金马大桥这种协作体系斜拉桥进行了抖振响应分析, 获得了其受力及变形方面的特性, 为今后该类桥型的设计提供了一定的参考。

3) 金马大桥虽然采用抗扭能力较差的边主梁形式, 但由于采用双斜索面及梁、塔、墩固结的方式, 使得体系本身具有较大的抗扭刚度, 扭转响应很小。

参考文献:

- [1] 韩大建, 谭学民, 颜全盛, 等. 香港汀九大桥抖阵响应时程分析[J]. 华南理工大学学报, 1999, 27(11): 44-50.
- [2] Lin Y K, Li Q C. New stochastic theory for bridge stability in turbulent flow[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119(1): 113-127.
- [3] 刘春华, 项海帆, 顾明. 大跨度桥梁抖振响应的空间非线性时程分析方法[J]. 同济大学学报, 1996, 24(4): 380-385.
- [4] Q. Ding, P. K. K. Lee and S. H. Lo. Time domain buffeting analysis of suspension bridges subjected to turbulent wind with effective attack angle[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 233(2): 311-327.
- [5] Simiu E, Scanlan R H. Wind effects on structures[M]. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [6] 北京大学力学与工程科学系. 金马大桥节段模型风洞试验报告[R]. 1997.
- [7] 颜娟, 张哲, 黄才良. 广东金马大桥动力分析[J]. 公路交通科技, 2003, 20(1): 71-73.