

基于 CFD 仿真的平板非线性气动力系统特征研究^{*}

祝志文[†], 袁涛, 陈政清, 邓燕华

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为研究平板气动力系统的非线性特征,基于非定常雷诺时均 Navier-Stokes (RANS)方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型,数值模拟了在单位位移激励下平板非定常运动的绕流场,获得了作用在平板上的气动力时程,并基于 Volterra 理论开展了平板非线性气动力系统识别.研究表明,本文建立的平板非线性气动力模型能对一定频率带宽和一定幅值范围的激励产生合理的响应;在本文研究的强迫运动位移幅值和频率范围内,平板非线性气动力模型响应没有表现出对振动幅值和频率的明显相关性,且其气动力的非线性效应并不明显,因而可以认为小攻角下的平板绕流属于气动力弱非线性系统.本文研究证明了 CFD 模拟在桥梁主梁气动力系统识别上的明显优势.

关键词:气动力非线性;平板;Volterra 理论;CFD

中图分类号:U448.213

文献标志码:A

Investigation on Characteristics of Nonlinear Aerodynamic System of Thin Plate Based on CFD Simulations

ZHU Zhiwen[†], YUAN Tao, CHEN Zhengqing, DENG Yanhua

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to investigate the characteristics of nonlinear aerodynamic system of a thin plate, flow field around the thin plate under forced unit impulse excitation was simulated by the unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations and SST $k-\omega$ turbulent model, and time histories of aerodynamic force were obtained. The nonlinear aerodynamic system of the thin plate was then identified based on the Volterra theory. The investigation indicates that the present aerodynamic model can provide reasonable output under the excitation within the defined ranges of frequency band and amplitude. Moreover, under the present range of forced frequency and amplitude, no clear dependence of model response on the frequency and amplitude is observed. It is also found that the aerodynamic nonlinearity of the thin plate is not significant, and the flow around the thin plate can be considered as an aerodynamic system with weak nonlinearity. This study confirms that the CFD method is of remarkable advantage for the identification of aerodynamic system of bridge girders.

Key words: aerodynamic nonlinearity; thin plate; Volterra theory; CFD

^{*} 收稿日期:2016-01-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278191), National Natural Science Foundation of China(51278191); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB057701, 2015CB057702), National Program on Key Basic Research Project (973 Program) (2015CB057701, 2015CB057702)

作者简介:祝志文(1968-),男,湖南益阳人,湖南大学教授,博士,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: zwzhu@hnu.edu.cn

不断突破桥梁跨径记录的跨江跨海工程需求和新材料、新结构形式的应用,可能会使得大跨度桥梁的频率和阻尼不断降低,因而导致结构或其构件对风的敏感程度大大增加.合理评价大跨度桥梁气动性能,准确预测桥梁风致振动稳定性,对保障大跨度桥梁设计合理和运营安全具有深远意义.然而,现有桥梁抗风研究涉及的风荷载,均是建立在气动力的线性模型之上.以气弹分析广泛采用 Scanlan 自激力模型为例^[1],对二自由度桥梁断面而言,其气动自激力表达为位移、速度与颤振导数的线形组合形式,也即气弹自激力是通过线性叠加多项而得到,其中每一项与位移或速度有关,实际反映的是不同广义位移对应的相对攻角所产生的效应,这是一种典型的线性颤振理论.因此,Scanlan 这一桥梁颤振理论也是基于线性和小扰动理论,没有考虑桥梁气动外形对气流场可能产生的大扰动,以及大跨度桥梁大幅运动对气流场的强烈干扰,如流动分离、再附和涡系的相互作用.这些流动现象是桥梁气流场的非线性行为,将导致气动力响应呈现非线性特性,这在 Scanlan 的早期研究中就有阐述,后续研究者也有类似报导^[2].流动非线性对大跨度桥梁气弹响应和颤振稳定性的影响目前并不清楚.因此,对气动外形明显钝化的桥梁主梁,或大幅度振动的桥梁结构,研究气动力的非线性,有助于给出大跨度桥梁风致振动稳定性的合理评价.

近几十年来,CFD 模拟技术在桥梁风工程中得到了较快的发展.通过对不可压控制方程进行时间和空间离散,可得到描述桥梁流动问题的数值仿真结果^[3],还可以获得桥梁绕流的离散时间系统气动力特征;通过计算这一离散时间系统在某一输入下的响应,可建立描述研究对象的气动力输入-输出模型^[4],并可获得桥梁断面的颤振导数或气弹响应^[5].这一基于 CFD 的气动力系统识别方法,具有节段模型风洞试验无法比拟的优势.但目前,桥梁气动力模型的识别和相关应用仍然局限在线性范围,开展桥梁非线性气动力模型的识别和应用,以及非线性气动力特征和影响因素研究,对合理评价大跨度桥梁风致振动稳定性有重要意义.

1 Volterra 理论与非线性系统识别理论

Volterra 理论在 19 世纪 80 年代提出^[6],由于它是一种研究非线性特性的有力工具,在工程领域中得到了广泛的应用.该理论认为,非线性、时不变

系统对任意输入的响应可通过无限项多维卷积分的和来描述,即:

$$y(t) = h_0 + \int_0^{\infty} h_1(\tau_1)u(t - \tau_1)d\tau_1 + \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} h_2(\tau_1, \tau_2)u(t - \tau_1)u(t - \tau_2)d\tau_1 d\tau_2 + \dots \quad (1)$$

式中: $u(t)$ 和 $y(t)$ 分别为系统输入和输出;式中每一个卷积分代表一个 Volterra 序列,其中 h_i 称之为核,它代表了系统的响应特性,是系统固有属性,与输入无关. h_0 为系统的平均响应; h_1 为一阶核,而 h_2, \dots, h_i 等为高阶核; $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i$ 为延时.对一个稳定的非线性系统,非线性核将随着阶数的提高而趋近于零.显然,如果识别出了非线性系统的核,则该系统在任意输入下的响应均能通过上述卷积分得到.基于线性小扰动理论的气动力输入-输出系统,是假设小扰动产生的非线性影响可忽略不计,也即不考虑二阶以上非线性项,且将一阶核处理成线性核.

对离散系统而言,系统对任意输入序列 $u[k]$ 的响应输出序列 $w[k]$ 可表征为下式:

$$w[k] = h_0 + \sum_{k=0}^n h_1[n-k]u[k] + \sum_{k_1=0}^n \sum_{k_2=0}^n h_2[n-k_1, n-k_2]u[k_1]u[k_2] + \sum_{k_1=0}^n \sum_{k_2=0}^n \dots \sum_{k_m=0}^n h_m[n-k_1, n-k_2, \dots, n-k_m]u[k_1] \dots u[k_m] + \dots \quad (2)$$

式中: $n=1, 2, 3, \dots$ 是离散时间变量,此时 h_0 为定常状态值(或非稳态稳定值), $h_m[n-k_1, n-k_2, \dots, n-k_m]$ 是相关系统的 m 阶 Volterra 核.通过式(2)可看出,一旦所有的系统核被辨识出来,该系统对于任何输入 $u[k]$ 的响应 $w[k]$,都可通过离散卷积求得.

系统信息包含在核中,而该核特性又不受系统输入的影响,识别了核就能获得系统的输入-输出特性,因此核的识别是关键. h_1 反映的是系统在单位脉冲输入下的响应,其频域对应项是系统频率响应函数(FRF). $h_2(i, j)$ 反映系统在两个不同时刻分别作用两个单位脉冲下的响应,而这两个时刻之差对应的是输入延迟,因此延迟不一样,两个单位脉冲输入下的响应也不一样,因而 $h_2(i, j)$ 也不一样. $h_3(i, j, k)$ 反映的是系统在 3 个不同时刻分别作用 3 个单位脉冲下的响应,而这 3 个单位脉冲之间具有两个不同的输入延迟,而这两个输入延迟的变化也会带来系统响应的变化.高阶核含义依次类推.显然,同一

阶核,系统输入记录数 N 越大,脉冲间延迟变化就越多,因而需要计算的多脉冲响应数量就越大。

假设桥梁断面的气动力系统属于时不变系统,即桥梁断面气动特性是不随时间发生变化的。在任何时刻给予系统同一种激励,其响应是一致的。对桥梁非线性系统而言,Volterra 级数模型建立的关键是 Volterra 核辨识,本文采用下述的脉冲响应法来识别桥梁断面非线性气动力系统核^[7]。

因高阶核识别的复杂性,对大跨度桥梁常采用的扁平闭口钢箱梁,从首次研究的简化出发,可假设桥梁断面非线性气动力系统为弱非线性,此时建立断面非线性气动力模型只需一、二阶 Volterra 核,忽略二阶以上的 Volterra 核,此时式(2)可简写为:

$$\omega[k] = h_0 + \sum_{k=0}^n h_1[n-k]u[k] + \sum_{k_1=0}^n \sum_{k_2=0}^n h_2[n-k_1, n-k_2]u[k_1]u[k_2] \quad (3)$$

定义离散时间域内单位脉冲和二维单位位移激励如下:

$$u[k] = \begin{cases} 1, k = 0 \\ 0, k \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$u[k] = u(k-k_1) + u(k-k_2) \quad (0 \leq k_1 \leq k_2) \quad (5)$$

图 1 为离散时间域内的一维和二维单位脉冲示意图,其中二维单位脉冲示意图为分别在 $k=k_1$ 和 $k=k_2$ 时刻对桥梁断面施加位移激励,位移激励为单位 1。实际运用时,需要赋予单位脉冲具体的物理意义。

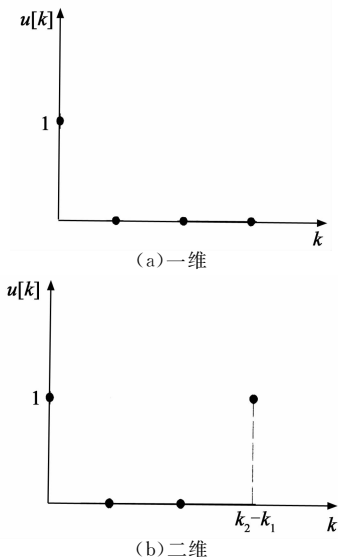


图 1 离散时间单位脉冲
Fig. 1 Unit impulse in discrete time

将式(4)定义的两中激励分别作用于式(3)所表

征的系统,二阶 Volterra 系统响应分别为:

$$\omega_0[n] = h_1[n] + h_2[n, n] \quad (6)$$

$$\omega_1[n] = h_1[n-k_1] + h_1[n-k_2] + h_2[n-k_1, n-k_1] + h_2[n-k_2, n-k_2] + 2h_2[n-k_1, n-k_2] = \omega_0[n-k_1] + \omega_0[n-k_2] + 2h_2[n-k_1, n-k_2] \quad (7)$$

联立方程(6)和(7)可以得到系统二阶核的表达式为:

$$h_2[n-k_1, n-k_2] = \frac{1}{2}(\omega_1[n] - \omega_0[n-k_1] - \omega_0[n-k_2]) \quad (8)$$

二阶 Volterra 核是时间 n 和时移 $k_1 - k_2$ 的二维函数序列,不同时移差 $k_1 - k_2$ 代表系统二阶核的不同分量,通过式(8)求解二阶 Volterra 核需要作用于不同时移 k_1, k_2 的双脉冲响应。因此,定义 $\omega_2[n]$ 为系统在双倍单位脉冲作用下的响应:

$$\omega_2[n] = 2h_1[n] + 4h_2[n, n] \quad (9)$$

联立方程(6)和(9)可得到系统的一阶核为:

$$h_1[n] = 2\omega_0[n] - \frac{1}{2}\omega_2[n] \quad (10)$$

可见系统的一阶 Volterra 核是离散时间 n 的一维函数,非线性系统的线性子系统的一阶 Volterra 核不是单位位移激励下的响应^[7],不同于线性系统的响应,这体现了线性系统与非线性系统的差别。图 2 是基于 CFD 模拟识别一阶核的流程图。

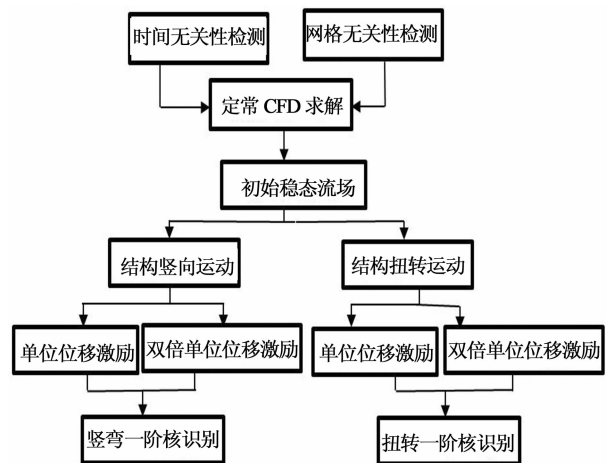


图 2 基于 CFD 模拟识别一阶核的流程图
Fig. 2 Flowchart of identification of first-order core based on CFD simulation

当系统为线性系统时,式(10)简化成下式:

$$h_1[n] = \omega_0[n] \quad (11)$$

2 气动力计算的 CFD 控制方程

桥梁风工程绕流属于不可压粘性流动,其雷诺时均 Navier-Stokes 方程可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} u_i = 0 \quad (12)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} u_i + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (13)$$

式中: u_j 和 u_j' ($j=1, 2$) 是直角坐标系 x_j 下空气流动的平均速度和脉动速度; ρ , μ 分别是空气密度和分子粘性; t 为时间; p 为压力; $\rho \overline{u_i' u_j'}$ 是雷诺应力,如采用涡粘模型封闭方程,雷诺应力可表示为:

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (14)$$

式中: $\mu_t = k/\omega$ 定义为湍流粘性; k 是流动湍动能和湍流粘性耗散率; $\omega = \epsilon/k$ 为湍流耗散率和湍动能的比. 低雷诺数 $k-\omega$ 湍流模型方程表示为:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho k \omega \quad (15)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \alpha \frac{\omega}{k} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \beta \rho \omega^2 \quad (16)$$

式中: α 和 β 为模型常数; σ_k 和 σ_ω 分别是 k 和 ω 的湍流 Prandtl 数. 本文采用 Menter 提出的改进 SST (Shear Stress Transport) $k-\omega$ 模型^[8-10],用于本文研究对象绕流场的 CFD 模拟.

3 平板主梁非线性气动力系统识别

3.1 研究对象

为考虑弱非线性情况下桥梁断面的非线性气动力特征,本文选取平板主梁为计算模型,如图 3 所示. 该平板主梁宽高比为 22.5,模型宽度 $B=450$ mm,模型前后缘设置尖风嘴^[11]. 本文计算只针对来流为 0° 攻角的情况,与钝体断面桥梁主梁相比,此时模型气动外形接近流线型.

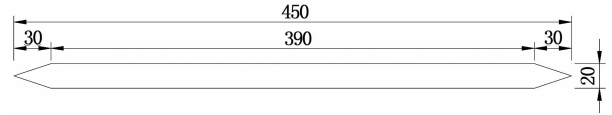


图 3 平板主梁横断面(单位:mm)
Fig. 3 Plate stiffening girder cross section(units: mm)

3.2 计算域网格及流动条件

包含平板主梁模型的计算域及分区如图 4 所示. 采用圆形计算域,计算域外圆到平面中心的距离均为 $16B$,对应的模型堵塞度不到 0.2% ,因此无需考虑模型堵塞度带来的影响. 采用计算域分区划分以控制网格的正交性和网格缩放比. 在平板模型外第一个分区为椭圆形“刚性网格区”,CFD 模拟模型运动时,该区域网格与模型刚性固定,在每一时间步上与模型同步运动. 该刚性网格区外边界为椭圆,对该区域作四边形结构网格划分. 计算域的绝大部分区域为“静止网格区”,该区域外边界是计算域外边界,内边界为离开刚性网格区外椭圆一定距离,且包围刚性网格区的圆形. 静止网格区采用四边形单元剖分,从内到外采用合适的网格放大比例. 静止网格区和刚性网格区在 CFD 模拟过程中一直使用计算开始时的网格系统. 在“静止网格区”和“刚性网格区”之间为“动网格区”,“动网格区”采用三角形单元剖分. 在每一时间步上,“动网格区”根据桥梁断面的运动位置并由设定的网格系统质量要求可能需重新进行网格划分. 紧靠桥梁断面的区域流场变量变化剧烈,特别是断面迎风侧和断面法向,因此网格划分适应流场变量的变化程度,并沿各个方向采用适度的网格放大率,实现与动网格区域网格的平顺过渡,如图 5 所示. 计算域的网格总数为 96 226.

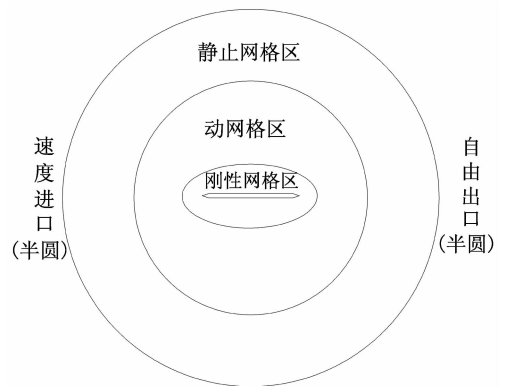


图 4 计算域分区示意
Fig. 4 Schematic plot of computational domain

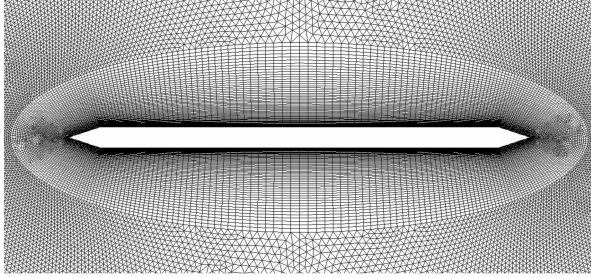


图5 模型周围网格划分

Fig. 5 Grid arrangement around model

边界条件设置为:计算域入口水平均匀速度边界,湍流度为零;下游出口施加流动出口边界条件;模型表面使用无滑移壁面条件;初始场采用入口速度初始化.数值计算采用非定常二阶隐式格式,采用速度-压力解耦的 SIMPLE 算法,二阶格式离散压力方程,动量、湍动能和湍流耗散率方程均采用二阶迎风格式,数值模拟的 $Re=3.08 \times 10^5$,本文所有数值模拟均基于 CFD 专用程序 Fluent 6.3.26 开展.

3.3 单位采样激励的实现

在 CFD 模拟中,连续型 Volterra 级数无法使用,需采用离散型的 Volterra 级数形式.对小攻角下平板模型,因其有较好的气动外形,气动力中的非线性可能并不显著.对此类弱非线性气动力系统,本文尝试识别其一阶核.

本文考虑桥梁竖向运动,计算由此产生的非线性气动力.根据本文公式(4)~(5)定义的离散时间域内的单位脉冲和二维单位脉冲信号,编制 UDF 程序实现单位位移激励.图6为单位采样函数,按照定义,作为位移量的 u_0 的值应该取1,也即为很短时间内强迫桥梁断面的竖向位移量.但当赋予单位采样函数实际物理意义时,本文将 u_0 取值为 $0.002B$.为了适应数值计算,定义在 τ 时刻给予计算模型单位采样激励,而在 $\tau + \Delta t$ 时刻回到初始位置,其中 Δt 为非定常 CFD 计算时间步长,本文为 0.005 s.由于单位位移激励作用的时间极短,这种极短的位移激励在现有的风洞试验条件下几乎无法实现,但这在 CFD 模拟中可以方便地实现,这表明了 CFD 模拟的巨大优势.

3.4 非线性气动力系统一阶核识别

分别定义二维平板气动升力 C_L 和扭矩系数 C_M 为:

$$C_L = L / (0.5\rho U^2 B), C_M = M / (0.5\rho U^2 B^2) \quad (17)$$

式中 L 和 M 分别为作用在平板上的升力和扭矩.

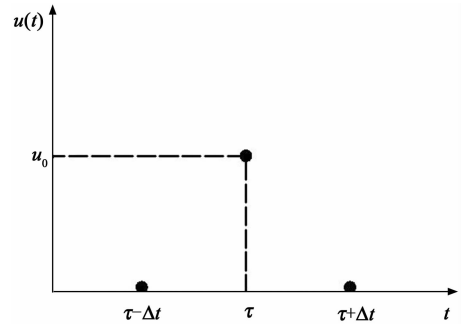


图6 单位采样函数

Fig. 6 Unit sampling function

系统的一阶核是时间的一维函数,一阶核表示非线性系统的线性子系统响应,它可以反映一定的非线性行为,与纯粹的线性系统响应是不一样的.由公式(10)可知,在识别系统的一阶核时,并不需要延时的激励作用. CFD 模拟时,强迫平板模型在很短的时间快速向上运动(为正),此时,模型将受到为负的气动升力作用.

图7为平板模型非线性气动升力系数的一阶核,前3个时间步出现波动,这是突加模型运动导致的气动力振荡.图8为平板模型非线性气动扭矩系数的一阶核,也在前两个时间步出现波动.这种剧烈的波动与 CFD 模拟的时间步长和运动幅值有较大关系,过小的时间步长和过大的运动幅值会加剧这种波动,可能引起 CFD 模拟的数值误差.因此,识别核时需要尽可能减少这种剧烈波动,本文选取了最佳的时间步长和运动幅值.从图7和图8时程的局部放大可知,一阶核很快就衰减,说明某一时间步的模型运动,仅对后续系统的气动力产生有限时间步的影响.

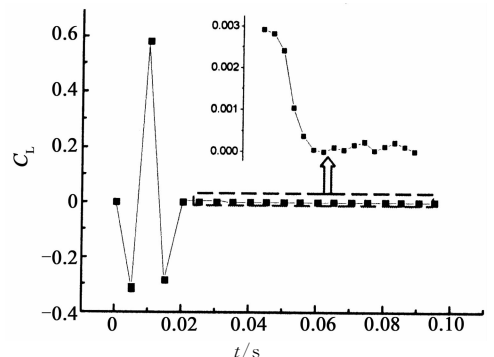


图7 升力系数系统一阶核

Fig. 7 First-order core of lift coefficients

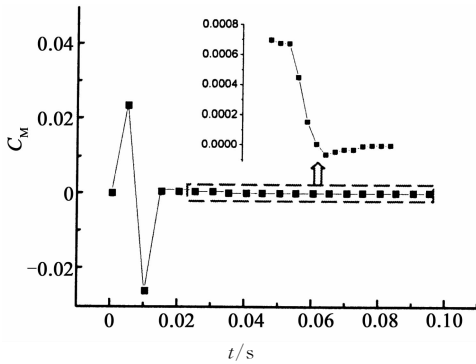


图 8 扭矩系数系统一阶核

Fig. 8 First-order core of moment coefficients

3.5 气动力模型仿真

设平板非线性气动力系统属于时不变系统. 对弱非线性气动力系统, 如不考虑二阶及以上核, 在获得了非线性系统的一阶核后, 就可建立对应的非线性气动力系统模型. 该系统对于任何输入 $u[t]$ 的响应 $w[t]$, 都可通过卷积公式(2)求得. 为验证本文非线性气动力模型的合理性, 可对气动力模型进入输入激励, 观察模型的气动力响应. 本文竖向运动激励采用正弦位移输入^[12]:

$$u(t) = h_0 \sin(2\pi f_h t) \quad (18)$$

式中 h_0 和 f_h 分别为正弦位移输入的幅值和频率.

为考虑平板模型运动幅值和频率的非线性特征, 本文位移输入的幅值考虑大幅和小幅情况, 对应的幅值分别为 $1 \times 10^{-2} B$ 和 $5 \times 10^{-2} B$, 本文分别称之为小幅运动和大幅运动状态; 模型运动的频率分别取 1 Hz 和 4 Hz, 也即对应低频运动和高频运动状态, 运动幅值和频率的组合分别称之为小幅低频运动和大幅高频运动. 显然, 后者可能比前者更容易激发出气动力的非线性特征.

气动力模型在小幅低频竖弯正弦位移激励下的气动升力和扭矩响应输出如图 9 和图 10 所示. 图 9 和图 10 同时给出了平板模型在同样竖弯位移激励下的 CFD 气动升力和扭矩计算结果, CFD 模拟同样采用动网格和强迫模型运动的形式^[8], 并采用前述完全相同的网格和边界条件. 对平板 CFD 数值模拟而言, 其计算获得的气动力可认为是作用在实际模型上的气动力, 为平板正弦位移强迫激励下的实际气动力输出. 从对比可见, 对同一位移输入, 除激励开始时刻出现的输出存在差别外, 气动升力模型的稳定的仿真结果无论是相位还是曲线幅值都吻合得很好; 扭矩系数的模型仿真幅值比 CFD 值小约 5%, 不过二者响应均表现出典型的正弦响应特征.

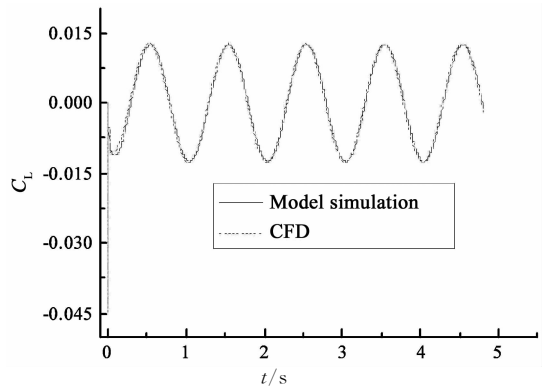


图 9 小幅运动升力系数模型仿真与 CFD 的对比
Fig. 9 Lift coefficient records of model simulation in comparison with CFD under small amplitude motion

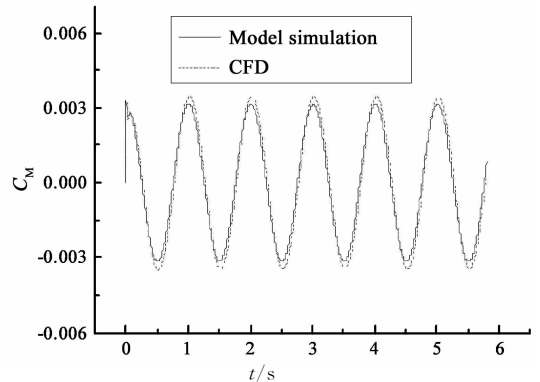


图 10 小幅运动扭矩系数模型输出与 CFD 的对比
Fig. 10 Moment coefficient records of model simulation in comparison with CFD under small amplitude motion

图 11 和图 12 是气动力模型在大幅高频竖弯正弦位移激励下的气动升力和扭矩响应输出, 同时也给出了平板模型在同样竖弯位移激励下的 CFD 气动升力和扭矩计算结果. 从对比可见, 气动升力模型的稳定的仿真结果无论相位还是幅值都吻合得很好. 对扭矩系数而言, 气动模型的仿真幅值稍大于 CFD 计算值约 2%, 且模型输出正弦响应特征与 CFD 计算的气动力时程完全一致.

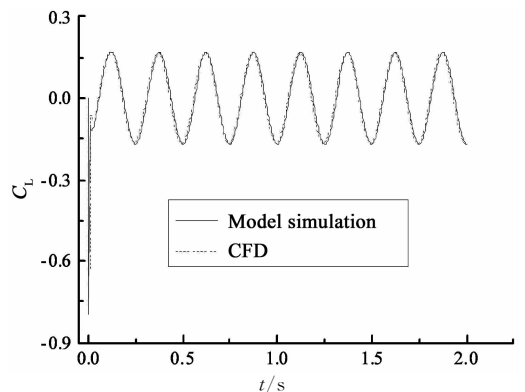


图 11 大幅运动升力系数模型输出与 CFD 的对比
Fig. 11 Lift coefficient records of model simulation in comparison with CFD under large amplitude motion

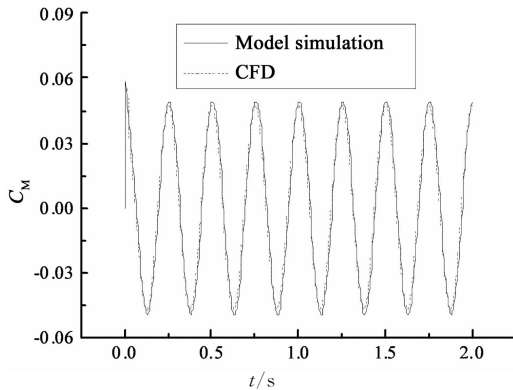


图12 大幅运动扭矩系数模型输出与CFD的对比
Fig.12 Moment coefficient records of model simulation in comparison with CFD under large amplitude motion

从小幅低频运动和大幅高频运动下的气动力输出对比可见,基于一阶核建立的平板非线性气动力模型,对竖弯单频激励和一定幅值范围的激励均具有较好的适用性.另外,在本文研究的强迫运动位移幅值和频率范围内,没有表现出对振动幅值和频率的相关性,且其气动力的非线性效应并不明显,这也证明,0°攻角下的平板绕流,属于气动力弱非线性系统.

4 结 论

本文尝试借助CFD模拟技术通过Volterra理论开展了平板非线性气动力系统识别,可得下述结论:

1)模拟时间极短的单位位移激励作用下的平板模型运动,这种复杂位移激励在现有的风洞试验条件下几乎无法实现,但在CFD模拟中可方便地实现,这表明了CFD模拟在桥梁气动力系统识别上的巨大优势.

2)平板气动系统的非线性模型,可基于Volterra理论并借助CFD模拟手段得到识别,本文识别了平板气动系统的非线性一阶核,由此建立的非线性模型能对竖弯单频激励和一定幅值范围的激励均具有较好的适用性;

3)在本文研究的强迫运动位移幅值和频率范围内,平板非线性气动力模型没有表现出对振动幅值和频率的相关性,且其气动力的非线性效应并不明显,也即0°攻角下的平板绕流,属于气动力弱非线性系统.

对钝化的桥梁断面和主梁大幅度运动情况,有待开展进一步的研究,以揭示实际桥梁主梁气动力系统的非线性特征.

参考文献

- [1] SCANLAN R H, TOMKO J J. Airfoil and bridge deck flutter derivatives [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1971, 97(6):1171-1737.
- [2] CHEN Z Q, YU X D, YANG G, *et al.* Wind-induced self-excited loads on bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(12):1783-1793.
- [3] ZHU Z W. LES prediction of aerodynamics and coherence analysis of fluctuating pressure on box girders of long-span bridges[J]. Computers and Fluids, 2015, 110: 169-180.
- [4] ZHU Z W, GU M, CHEN Z Q. Wind tunnel and CFD study on identification of flutter derivatives of a long-span self-anchored suspension bridge[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2007, 22:541-554.
- [5] ZHU Z W, GU M. Identification of flutter derivatives of bridge decks using CFD-based discrete-time aerodynamic models [J]. Wind and Structures, An International Journal, 2014, 18(3): 215-233.
- [6] VOLTERRA V. Theory of functionals and of integral and integro-differential equations [M]. New York: Dover Pubns, 2005:63-105.
- [7] SILVA W A. Discrete-time linear and nonlinear aerodynamic impulse responses for efficient CFD analyses [D]. Williamsburg, Virginia:College of William & Mary, 1997: 25-68.
- [8] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8):269-289.
- [9] 祝志文, 夏昌, 邓燕华. 钝体矩形断面绕流场机理与主分量分析 [J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2012, 39(7): 7-13.
ZHU Zhiwen, XIA Chang, DENG Yanhua. Flow mechanisms around bluff rectangular cylinders and its principle component analysis[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2012, 39(7): 7-13. (In Chinese)
- [10] ZHU Z W, CHEN Z Q, GU M. CFD based simulations of flutter characteristics of ideal thin plates with and without central slot [J]. Wind and Structures, 2009, 12(1):1-19.
- [11] GU M, ZHANG R X, XIANG H F. Identification of flutter derivatives of bridge decks [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 84(2):151-162.
- [12] 祝志文, 陈政清, 顾明. 薄平板气动导数的数值仿真技术 [J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2005, 32(5):11-15.
ZHU Zhiwen, CHEN Zhengqing, GU Ming. Evaluating flutter derivatives of the thin plate by applying the numerical simulation method[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2005, 32(5):11-15. (In Chinese)