

文章编号: 1001 - 2486(2003)05 - 0022 - 04

# 强迫振动法大跨度桥梁节段模型气动导数辨识\*

程忠宇<sup>1</sup>, 张琦<sup>1</sup>, 陈政清<sup>2</sup>, 于向东<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 中南大学土木学院, 湖南长沙 410075)

**摘要:** 研制了桥梁节段模型颤振导数测定的二维强迫振动实验装置, 采用变频调速技术实现对振动频率的控制, 模型惯性力、气动力的测量采用了特殊设计的测力元件, 模型运动用压电式加速度计进行测量。实验时, 模型分别作单自由度的竖弯或扭转的简谐运动, 通过测量模型所受到的气动力及模型位移, 应用谱分析方法和非线性曲线拟合算法实现了对八个颤振气动导数的辨识, 并通过平板模型实验数据与 Theodorsen 理想平板数据及国外文献数据对比对实验装置及辨识算法进行了检验。

**关键词:** 强迫振动; 节段模型; 颤振导数; 参数辨识; 风洞实验

中图分类号: V211.74 文献标识码: A

## Identification of Flutter Derivatives of Long Span Bridge Section Model from Forced Vibration Datas

CHENG Zhong-yu, ZANG qi, CHEN Zheng-qing, YU Xiang-dong

(1. College of Aerospace and Materials Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Institute of Constructions, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** A 2-D forced-vibration driver for ADs identification of long-span bridge section-model has been developed, by which the section-model is forced to perform 1-D or coupled torsional vertical sinusoidal motion. In each test, lift force and torsional moment are both measured by force balances, the motions of the model are measured by accelerators, then the eight ADs are obtained by a hybrid method of spectrum analysis and non-linear optimization. The results of a flat plate sectional model obtained in wind tunnel tests by this driver are compared with the solutions of Theodorsen flat plate and other published datas, the comparison shows that all of the datas share the same trends.

**Key words:** forced vibration; section-model; Flutter derivatives; parameter identification; Wind tunnel tests

通过节段模型风洞实验手段准确提取颤振导数对于可靠预测全桥气动弹性稳定性至关重要。影响颤振气动导数辨识精度的因素有多方面, 其中相似准则的模拟、实验方法和辨识算法无疑是主要的影响因素。颤振导数测定风洞实验方法主要有两种: 自由振动方法<sup>[1,2]</sup> 和强迫振动方法<sup>[3,4]</sup>。

自由振动方法是将节段模型弹性悬挂于风洞流场中, 给模型以初始激励, 通过测定模型自由振动响应来辨识模型气动导数。自由振动法由于实验装置简单而被广为应用。但自由振动法存在以下不足之处: 首先是当系统某一模态阻尼较大时, 模型振动位移衰减很快, 可获得数据量非常少<sup>[5]</sup>, 特别是在耦合情况下, 严重时甚至无法完成气动导数辨识; 其次超过临界风速后, 由于模型扭转振动发散, 自由振动法不再适用; 此外多模态耦合情况下, 模型任一自由度位移包含所有模态频率, 导致气动导数辨识的不确定性<sup>[6]</sup>, 采取近似方法给气动导数测定带来误差。

强迫振动法采用驱动装置使模型在气流中作单自由度或耦合简谐强迫运动, 直接或间接测量模型所受气动自激力获取气动导数。系统阻尼的变化只会导致驱动力幅值和相位的变化, 可由天平测量得到。因此采用强迫振动方法进行气动导数辨识可以克服以上缺点。但此方法也存在以下难点: 首先是模型强迫振动时, 模型惯性力远远大于模型所受气动自激力, 导致气动力测量困难, 风洞实验尤其如此; 其

\* 收稿日期: 2003 - 05 - 19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59778043)

作者简介: 程忠宇(1970—), 男, 讲师, 在职博士生。

次, 需要设计频率、振幅均可调的多自由度强迫振动装置, 且装置横跨风洞实验段, 结构复杂、庞大, 设计制作成本高; 此外, 强迫振动驱动系统引入的强烈的电磁干扰和振动对风洞测试系统的干扰也是一个较为头疼的问题。由于这些原因, 目前我国尚未开展桥梁节段模型气动导数强迫振动方法方面的研究。

## 1 强迫振动方法气动导数辨识基本原理

模型弯、扭两自由度运动方程如下:

$$\begin{cases} m(\dot{h} + 2\zeta_h\omega_h\dot{h} + \omega_h^2h) = L_{se} + L_{sa} + F_d \\ I(\ddot{\alpha} + 2\zeta_\alpha\omega_\alpha\dot{\alpha} + \omega_\alpha^2\alpha) = m_* + M_{sa} + M_d \end{cases} \quad (1)$$

式中  $m$ 、 $I$  分别为模型单位长度质量和惯性矩,  $h$  和  $\alpha$  分别为模型竖向和扭转位移,  $L_{se}$  和  $M_{se}$  是模型与气流作用的自激升力和力矩,  $L_{sa}$  和  $M_{sa}$  是模型静态气动力和力矩,  $F_d$  和  $M_d$  是模型驱动力和力矩。在小扰动线性化假设下 Scanlan 教授提出了桥梁在风载作用下自激升力和力矩表达式<sup>[1]</sup>:

$$\begin{cases} L_{se} = \rho U^2 B [kH_1^*(k) \frac{h}{U} + kH_2^*(k) \frac{B\alpha}{U} + k^2H_3^*(k)\alpha + k^2H_4^*(k) \frac{h}{B}] \\ M_{se} = \rho U^2 B^2 [kA_1^*(k) \frac{h}{U} + kA_2^*(k) \frac{B\alpha}{U} + k^2A_3^*(k)\alpha + k^2A_4^*(k) \frac{h}{B}] \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\rho$  是空气密度,  $U$  是风速,  $B$  为模型宽度, 折算频率  $k = \omega B / U$  ( $U/fB$  为折算风速),  $H_i^*$  和  $A_i^*$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 即为待辨识的气动导数, 它是  $k$  的无量纲函数, 与桥梁段面的具体形状有关, 一般通过风洞实验来测定。以颤振导数测定为主要目的的风洞实验主要模拟的相似律包括几何相似、风特性相似和折算频率  $k$  相似。大量实验表明, 由于桥梁断面多为非流线型,  $Re$  对气动特性的影响基本上可以忽略<sup>[7]</sup>。

由于模型做简谐运动, 由(1)式可得模型静态气动力即为天平测得驱动力之平均值:

$$\begin{cases} L_{sa} = -\overline{F_d} \\ M_{sa} = -\overline{M_d} \end{cases} \quad (3)$$

(1)式左端为惯性力、阻尼力和弹性力部分, 主要与模型、驱动机构及模型运动状态有关, 而与来流速度无关。在零风速下, 自激力(矩)和静态气动力(矩)均为零, 因此左端部分可以在零风速下由天平测量得到:

$$\begin{cases} m(\dot{h} + 2\zeta_h\omega_h\dot{h} + \omega_h^2h) = F_{d0} \\ I(\ddot{\alpha} + 2\zeta_\alpha\omega_\alpha\dot{\alpha} + \omega_\alpha^2\alpha) = M_{d0} \end{cases} \quad (4)$$

来流速度不为零时, 可得:

$$\begin{cases} L_{se} = -F_d + F_{d0} - L_{sa} \\ M_{se} = -M_d + M_{d0} - M_{sa} \end{cases} \quad (5)$$

耦合状态下, 不妨设弯、扭两自由度强迫运动位移分别为

$$\begin{cases} h(t) = H e^{i\omega t} \\ \alpha(t) = A e^{i\omega t} \end{cases} \quad (6)$$

代入(2)式, 对比系数可得 8 个无量纲颤振导数分别为

$$\begin{cases} H_1^* = \frac{1}{\rho U^2 H k_h^2} \text{Im}[L_{se}(\omega_h)] & A_1^* = \frac{1}{\rho U^2 B H k_h^2} \text{Im}[M_{se}(\omega_h)] \\ H_2^* = \frac{1}{\rho U^2 B A k_\alpha^2} \text{Im}[L_{se}(\omega_\alpha)] & A_2^* = \frac{1}{\rho U^2 B^2 A k_\alpha^2} \text{Im}[M_{se}(\omega_\alpha)] \\ H_3^* = \frac{1}{\rho U^2 B A k_\alpha^2} \text{Re}[L_{se}(\omega_\alpha)] & A_3^* = \frac{1}{\rho U^2 B^2 A k_\alpha^2} \text{Re}[M_{se}(\omega_\alpha)] \\ H_4^* = \frac{1}{\rho U^2 H k_h^2} \text{Re}[L_{se}(\omega_h)] & A_4^* = \frac{1}{\rho U^2 B H k_h^2} \text{Re}[M_{se}(\omega_h)] \end{cases}$$

强迫振动法与自由振动法一样也分为分状态实验法和耦合实验法。分状态实验每次实验均做单自由度强迫振动, 一次可获得与该自由度相关的 4 个气动导数; 耦合实验法每次实验让模型做两自由度强

迫振动,且各自由度振动频率不同,因此一次实验可获得所有8个气动导数,实验效率较高,但对驱动装置要求也高。

为克服前述自激气动力测量上的困难,文献[3]采用了水洞实验方法,由于水的密度大,实验雷诺数大,自激力也较大,有利于流动的模拟和自激力的测量,同时水洞易于进行流动显示,驱动力的测量采用测量悬挂弹簧变形间接得到。文献[4]采用了风洞实验方法,但气动力的测量采用了表面压力分布测量再积分的间接测量方法,显然气动力测量精度有限。风洞实验中,能否通过测力元件的合理设计与布局,实现对模型自激力的准确直接测量,从而获得准确的气动导数,是一条值得探索的途径。为在强迫振动法桥梁气动导数辨识方面作一些探索,先在KD-03风洞开展了二维强迫振动装置和相应辨识方法方面的研究,为三维耦合型实验装置设计及数据处理方法研究作准备。

## 2 实验装置简介

KD-03风洞是一座闭口直流式低速风洞,实验段截面形状为截角矩形,长2m,宽1m,高0.8m。实验装置设计采用了二维分状态方案,装置原理如图1所示,装置横跨风洞实验段顶部。圆盘1与圆盘2直径相等,转速同步。两个圆盘上有多组偏心孔,控制偏心孔的偏心距可以调节模型振幅。

模型做竖向振动时,两摇臂与同相位、同偏心距的偏心孔圆盘铰接,与圆盘一起运动。导杆由固定在洞体上两个直线轴承支撑,摇臂1带动导杆做竖向运动,摇臂2直接与模型铰接,从而限制了模型横向的自由度,使得模型可作竖向平动。模型做扭转振动时,拆掉摇臂1,固定导杆,模型由摇臂2驱动做纯扭转振动。安装时,调节导杆和摇臂2长度可以调节模型攻角。模型振动频率由交流变频调速系统控制,调节范围0.2~5Hz。模型振幅调节范围:竖向2~20mm,扭转0~5°。为减小模型惯性力,模型设计采用优质木框架和桐木薄板蒙皮处理,既保证了模型刚度,又大大减轻了模型重量,为气动力的准确测量创造了条件。

模型驱动力由布置于导杆和摇臂2末端的4个单分量轴向测力元件测量。由于模型自激力非常小,同时模型除受到升力和扭转力矩外,还受到阻力等横向力的作用,因此不仅要求测力元件具有较高的测量精度,同时还应具有很强的抗横向力干扰的能力,希望测力元件只对轴向作用力敏感。为达到这一要求,测力元件采用了典型的杆式气动力天平阻力元件的结构形式,通过对元件前后支撑片和测量片结构参数的优化设计,既保证了抗干扰能力,同时使元件具有较高的灵敏度。模型振动加速度由布置在与模型固连的横杆上的4个加速度计测量。

## 3 实验数据处理

强迫振动法实验数据处理相对自由振动法而言要简单一些。强迫振动法测量得到模型驱动力和力矩信号以及模型振动加速度信号,对于分状态实验方法,这些信号均是单一频率的简谐信号,只要能够获得信号幅值、频率和相位,即可按(3)、(5)式对实验数据进行处理,得到模型静态气动力和无量纲气动导数。因此简谐信号参数的辨识是强迫振动法实验数据处理的关键。辨识方法有多种,包括时域和频域方法。这里采用了频域谱分析与时域非线性拟合结合的处理方法。谱分析是一种频域辨识方法,具有抗干扰能力强的特点,可以稳定、快速捕捉信号参数,但辨识精度较低;非线性最小均方差优化算法辨识精度高,抗干扰能力也较强,但初值不合适时,易收敛到局部极小。综合两种方法,可以取长补短,用谱分析方法得到结果作为非线性拟合的初值,不仅可以保证算法的鲁棒性,还可以获得高精度的辨识结果。

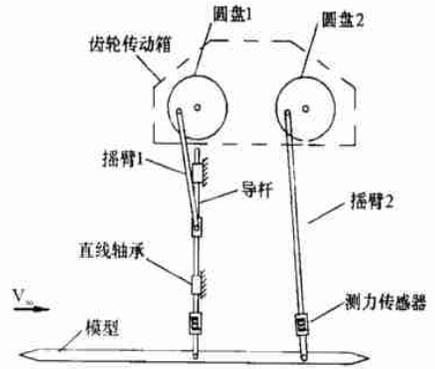


图1 实验装置示意图

Fig.1 Sketch of forced vibration driver

## 4 实验结果及结论

为检验实验装置, 设计了宽高比为 20 的平板模型, 对其气动导数进行了测定, 并将实验结果与 Theodorsen 理想平板解以及文献[3]、[4] 实验结果进行了对比, 模型横截面形状如图 2 所示, 对比结果如图 3 所示。实验结果和理论解以及国外实验结果吻合很好, 而且实验结果重复性很好, 表明实验装置和辨识算法设计是成功的, 进而证明了在风洞实验中通过直接测量模型自激气动力获取模型颤振导数的方法是可行的。这一结论为下一步开展三自由度耦合型强迫振动装置的研制奠定了基础。

该装置不仅要能够实现模型竖向、水平和扭转单自由度或耦合强迫振动, 测定节段模型 18 个颤振导数, 同时还要实现耦合振动状态下, 各自由度相位的控制, 以研究相位差对颤振导数的影响。

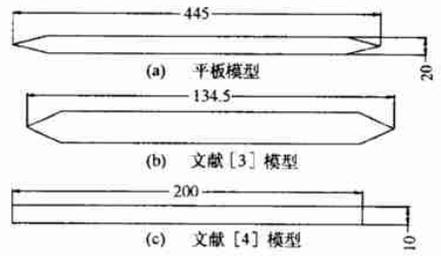


图 2 桥梁模型截面形状

Fig. 2 Cross section of bridge-deck models

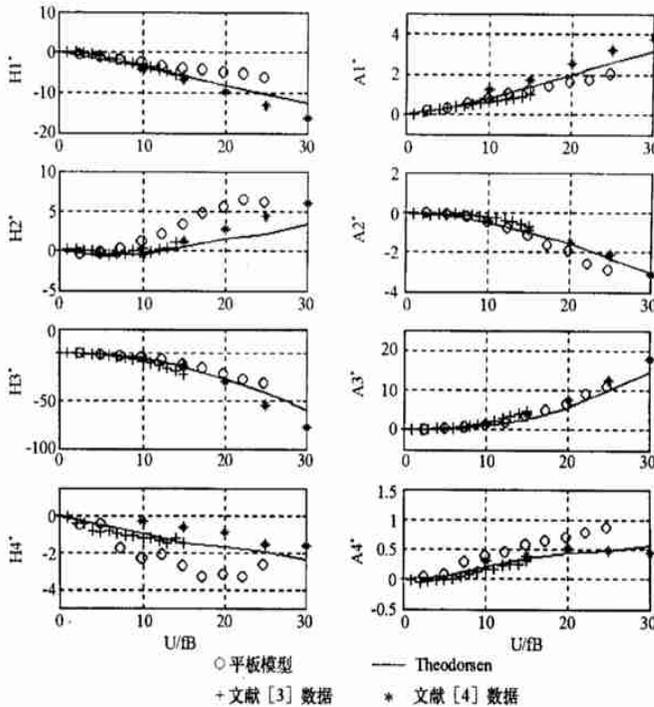


图 3 平板模型气动导数

Fig. 3 Aerodynamic derivatives for flat plate model

## 参考文献:

- [1] Partha P S, Nicholas P J, Robert H S. System Identification for Estimation of Flutter Derivatives[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41/44: 1243-1254, 1992.
- [2] Partha P S, Nicholas P J, Robert H S. Identification of Aeroelastic Parameters of Flexible Bridges[J]. Journal of Engineering Mechanics, 120(8), 1994.
- [3] Q. C. Li. Measuring Flutter Derivatives For Bridge Sectional Models In Water Channel[J]. Journal of Engineering Mechanics, 121(1), 1995.
- [4] Matsumoto M, Shiraishi N, Shirato H, et al. Aerodynamic Derivatives of Coupled Hybrid Flutter of Fundamental Structural Sections[J]. Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics, 49: 575-584, 1993.
- [5] 顾明, 张若雪, 巩海帆. 桥梁气动导数的识别及模型参数对气动导数的影响[J]. 振动工程学报, 10(4), 1997.
- [6] Iwamoto M, Fujino Y. Identification of Flutter Derivatives from Free Response Data[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 54/55: 55-63, 1995.
- [7] 王勋年. 低速风洞实验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.