

弹性系统振动干扰脉冲风洞测力的理论研究

孟宝清, 韩桂来, 姜宗林

(中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京海淀区 100190)

摘要 气动力测量技术是激波风洞关键技术之一。风洞起动过程气动力冲击引起测力系统的振动, 真实气动力信号受到振动信号的干扰。本文将测力系统简化为等截面悬臂梁, 应用振动理论方法, 通过对其自由、强迫振动特性分析得到气动力干扰量的分布规律。自由振动对单个振型气动力干扰量分布规律进行了研究, 分析得到并非所有振型对气动力有干扰。进一步得到加速度惯性补偿可能存在该补偿的振型无法补偿、不需补偿的振型却进行了补偿的问题。强迫振动对振型之间气动力干扰量分布规律进行了研究, 分析表明其与截面位置、载荷作用位置、载荷类型有关, 进一步可得到气动力干扰量主要来源。

关键词 激波风洞, 气动力, 振动干扰, 理论求解, 干扰量剥离

引言

气动力测量技术是激波风洞关键技术之一。JF-12 风洞能够开展全尺度或近全尺度模型实验, 飞行器的受力接近真实情况, 因此气动力测量系统可能承受高达 1.2 吨量级的冲击载荷, 对测力系统的结构、测力元件的设计都提出了极高的要求。现面临问题之一是: 风洞起动过程的冲击载荷造成飞行器模型和测力系统的振动, 由于激波风洞属于脉冲型风洞, 实验时间较短, 飞行器模型和测力系统的振动不能及时衰减, 测力天平所获得的飞行器气动力信号受到振动信号的干扰。因此激波风洞测力需要突破的关键技术之一就是天平采集的信号中分离振动信号, 从而获得真正的气动力信号。剥离惯性振动信号的前提是把握气动力测量系统的振动特性。针对 JF-12 风洞尾撑式测力结构, 本文将飞行器模型、内式应变天平、模型支杆简化为等截面悬臂梁, 通过振动力学理论对其自由及强迫振动特性进行定性分析, 得到振动引起的气动力干扰量分布规律。在以上讨论基础上, 对振动信号剥离方法及依据进行了初步讨论。

1 测力系统简化模型建立及研究方法

测力结构由弯刀、模型支杆、内式应变天平、飞行器模型组成。考虑到实际结构弯刀刚

度远大于其他部分, 理论分析中可将弯刀与模型支杆相接处视作固定端, 将测力系统的飞行器模型、内式应变天平、模型支杆简化为等截面悬臂梁, 天平简化为梁上的某一截面。实验过程中模型长度以及重量在变化, 因此简化模型中天平对应截面相对于根部位置在变化。悬臂梁轴向为 x , 法向为 y 。由于振动干扰对法向力以及俯仰力矩测量影响尤为突出, 本文主要对悬臂梁的横向振动进行了详细讨论。讨论的主要假设有:

(1) 线弹性: 理论分析均在线性以及弹性范围内;

(2) 无阻尼: 罗^[1]等人指出脉冲型风洞由于实验时间短以及阻尼力较小, 振动方程中可不包含阻尼项;

(3) 微振幅: 振幅很小, 气动力与结构振动耦合作用可以忽略;

(4) 伯努利-欧拉梁: 由于实际结构(支杆、天平、模型)长细比大于 5, 固采用伯努利-欧拉梁模型。

选取基本参考量为特征长度 L , 特征弹性模量 E_c , 特征密度 ρ_c , 梁无量纲化后横向自由振动方程为:

$$EJ \frac{\partial^4 \bar{y}(\bar{x}, \bar{t})}{\partial \bar{x}^4} + \rho A \frac{\partial^2 \bar{y}(\bar{x}, \bar{t})}{\partial \bar{t}^2} = 0 \quad (1)$$

其中相关的无量纲参数：几何尺度， $\bar{x} = x/L, \bar{y} = y/L, \bar{A} = A/L^2, \bar{J} = J/L^4$ ；密度， $\bar{\rho} = \rho/\rho_c$ ；弹性模量， $\bar{E} = E/E_c$ ；时间， $\bar{t} = t/T_c$ ，其中 $T_c = \sqrt{\rho_c L^2 / E_c}$ ；振动方程解^[2]：

$$\bar{y}_{(\bar{x}, \bar{t})} = \bar{Y}_{(\bar{x})} \bar{T}_{(\bar{t})} \quad (2)$$

其中：

$$\bar{Y}_{i(\bar{x})} = \bar{C}_i \{ \cos(\bar{\beta}_i \bar{x}) - ch(\bar{\beta}_i \bar{x}) + \bar{r}_i [\sin(\bar{\beta}_i \bar{x}) - sh(\bar{\beta}_i \bar{x})] \} \quad (3)$$

$$\bar{T}_{(\bar{t})} = \bar{b} \sin(\bar{\omega} \bar{t} + \bar{\phi}) \quad (4)$$

对于梁横向强迫振动，选取同样的基本参考量，得到无量纲化后方程：

$$\bar{E} \bar{I} \frac{\partial^4 \bar{y}_{(x,t)}}{\partial \bar{x}^4} + \bar{\rho} \bar{A} \frac{\partial^2 \bar{y}_{(x,t)}}{\partial \bar{t}^2} = \bar{P}_{(x,t)} \bar{\delta}_{(x-1)} \quad (5)$$

相关无量纲参量：

$$\bar{P}_{(x,t)} = P_{(x,t)} / E_c L^2, \quad \bar{\delta}_{(x-1)} = L \delta_{(x-1)}$$

振动方程解^[2]：

$$\bar{y}_{(\bar{x}, \bar{t})} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\bar{C}_i}{\bar{\omega}_i} \bar{W}_{i(\bar{x})} \int_0^{\bar{t}} \bar{q}_{i(\tau)} \sin[\bar{\omega}_i (\bar{t} - \bar{\tau})] d\bar{\tau} \quad (6)$$

$$\bar{W}_{i(\bar{x})} = \cos(\bar{\beta}_i) - ch(\bar{\beta}_i) + r_i [\sin(\bar{\beta}_i) - sh(\bar{\beta}_i)] \quad (7)$$

由振动方程解进一步得到俯仰力矩干扰量及法向力干扰量：

$$\bar{M}_{(\bar{x}, \bar{t})} = \bar{E} \bar{J} \frac{\partial^2 \bar{y}_{(\bar{x}, \bar{t})}}{\partial \bar{x}^2} \quad (8)$$

$$\bar{Q}_{(\bar{x}, \bar{t})} = \bar{E} \bar{J} \frac{\partial^3 \bar{y}_{(\bar{x}, \bar{t})}}{\partial \bar{x}^3} \quad (9)$$

为书写方便，本文后续分析中将统一省去各物理量上横线。以此理论推导为基础，进行振动特性分析。

2 气动力干扰量分析

由第 1 部分讨论得到，俯仰力矩干扰量表式如下：

$$M_{(x,t)} = \sum_{i=1}^{\infty} A_i^M(x) \sin(\omega_i t + \phi_i) \quad (10)$$

$M_{(x,t)}$ 由各阶干扰量线性叠加得到，以下将分别讨论单个振型气动力干扰量分布规律以及振型之间干扰量分布规律。

2.1 单个振型气动力干扰量分析

单个振型气动力干扰量分布规律可以通过自由振动特性分析得到。以下将以俯仰力矩干扰量为例进行说明。单个振型俯仰力矩干扰量幅值为：

$$A_{i(x)}^M = EJb_i C_i \beta_i^3 [-\cos(\beta_i x) - ch(\beta_i x) - r_i (\sin(\beta_i x) + sh(\beta_i x))] \quad (11)$$

若干扰量幅值较小，则振动对真实气动力干扰较小，若幅值很大，则振动引起的气动力干扰信号可能完全覆盖真实气动力信号。因此，干扰量幅值代表了振动信号对气动力信号的干扰程度，通过对幅值大小分布的研究可以得到俯仰力矩干扰量分布规律。

由式(11)得到，幅值大小与阶数 i 以及截面位置 x 有关，因此可分别研究各阶振型幅值分布规律。由于自由振动各振型之间气动力干扰量不具有可比性，令：

$$m_{(x)} = -\cos(\beta_i x) - ch(\beta_i x) - r_i (\sin(\beta_i x) + sh(\beta_i x)) \quad (12)$$

以下将分别给出具有代表性的第 1、2 阶振型对应 m_x 图像，分别图 1、2 所示。对于各阶振动均令根部 $m_{(0)}=1$ 。

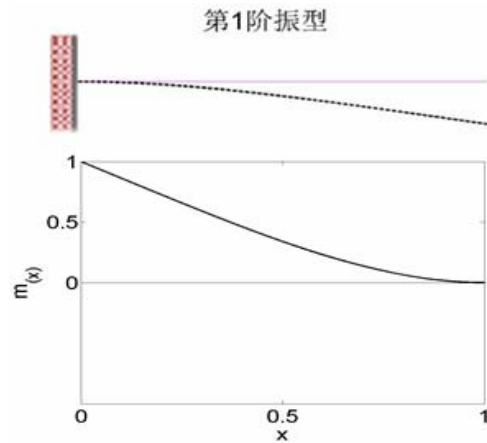


图 1 第 1 阶振型及 m_x 图像

经分析可得到：

(1) 若天平截面处在某阶振型局部变形较小的位置，则该阶振型对气动力干扰量较小。以第 1 阶振型为例，在靠近悬臂梁自由端位置处 m_x 较小，这是由于第 1 阶振型靠近自由端局部弯曲变形较小所致，这一结论对于其它阶振型同样适用。

(2) 若天平处于干扰量幅值为 0 位置处，该阶振动对气动力无干扰。以第 2 阶振动为例，

出现比较特殊的位置 x_1 ，在此处 $m_x=0$ ，干扰量幅值为 0，即俯仰力矩干扰量恒为 0，不随时间变化。这说明，若天平处于 x_1 处，第 2 阶振动对气动力无干扰。

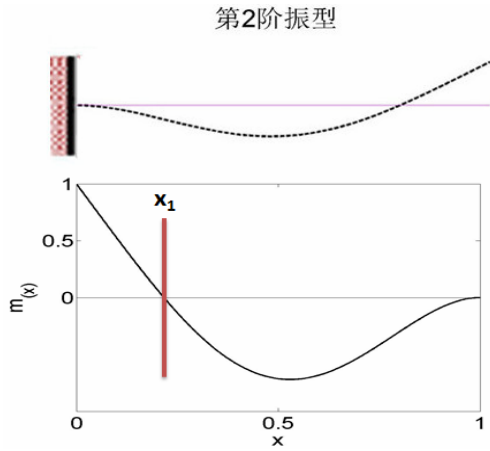


图 2 第 2 阶振型及 m_x 图像

若天平在 x_1 附近，则第 2 阶振动对气动力干扰较小。推广得到，对于 n 阶振动，存在 $(n-1)$ 个零点。类似的零点对于第 2 阶加速度也存在。加速度幅值表达式：

$$a_{(x)} = \cos(\beta_1 x) - ch(\beta_1 x) + r_1 (\sin(\beta_1 x) - sh(\beta_1 x)) \quad (13)$$

其图像如图 3 中虚线所示。在 x_2 位置处，第 2 阶加速度恒为 0，若加速度计布置在该位置，其无法感知第 2 阶加速度。

(3) 传统加速度惯性补偿可能存在如下问题：该补偿的振型无法进行补偿，不应补偿的振型却进行了补偿。对结论(2)进一步分析，如图 3 所示，在 x_1 位置处，第 2 阶振动对气动力无干扰，但却用加速度计测出第 2 阶振动对其天平测量信号进行补偿；在 x_2 位置处，第 2 阶

振动对气动力有干扰，而加速度计却无法感知到第 2 阶振动，无法进行补偿。

综合自由振动的分析得到，并非所有振型对气动力有干扰。对于法向力干扰量，分析方法及结论类似，有所差异的是由于第 1 阶振型靠近自由端的局部剪切变形较小，导致靠近自由端法向力干扰量较小。

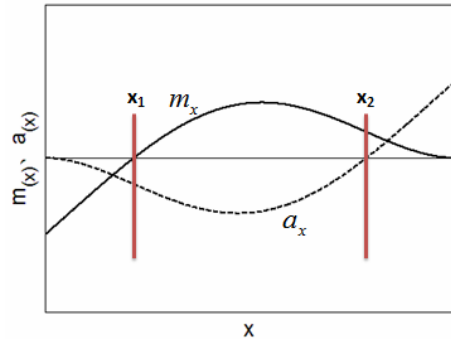


图 3 第 2 阶振动 m_x 、 a_x 图像

2.2 振型间气动力干扰量相对大小分析

振型之间气动力干扰量分析可以通过强迫振动特性分析得到。强迫振动中载荷形式主要研究了以下三种可能与实际情况相接近的载荷形式：简谐载荷、脉冲 δ 载荷、单个矩形脉冲载荷。如图 4 所示。简谐载荷频率 $\omega = \omega_1 + \Delta(\omega_2 - \omega_1)$ ， Δ 取 0.2, 0.5, 0.8，其中， ω_1 、 ω_2 为梁横向振动第 1、2 阶频率。

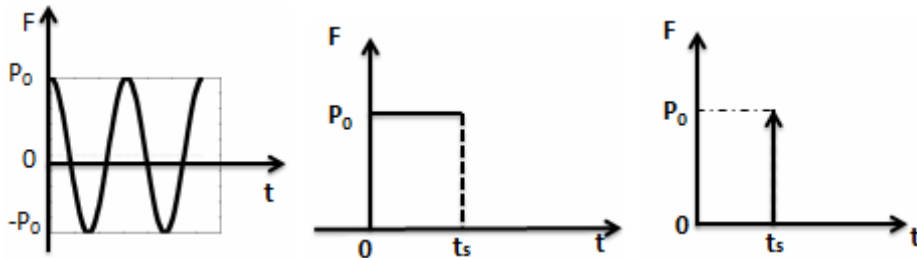


图 4 简谐、单个矩形脉冲、脉冲 δ 载荷图像

本部分侧重讨论振型之间的干扰量相对大小。令：

$$A_{i(x)}^{M'} = |A_{i(x)}^M| / \left| \sum_{i=1}^{\infty} |A_{i(x)}^M| \right| \quad (14)$$

该参数反应同一位置处各阶振动干扰量幅值百分比，可说明各振型间干扰量相对大小。总体上来讲，13 阶之后振动干扰量幅值小于被激发振型幅值 1%（脉冲 δ 载荷除外），因此选取前 12 阶振动代替整个振动。研究表明，在强迫振动过程中，干扰量相对大小与以下因素有关。

(1) 截面位置不同，干扰量主要来源不同。

以简谐载荷 ($\Delta=0.2$, 端部加载) 俯仰力矩干扰量为例进行说明。俯仰力矩干扰量幅值如式(15)所示。如图 5, 给出前 4 阶振动干扰量幅值相对大小。靠近悬臂梁根部位置, 干扰量主要来自 1、2 阶, 第 1 阶影响大于第 2 阶; 在 $x>0.5$ 时, 第 2 阶的影响超越了第 1 阶; 在靠近自由端位置处, 3、4 阶以及较高阶影响与 1、2 阶可比。天平处在不同位置处, 干扰量主要来源不同。

$$A_{i(x)}^M = EJP_0 \frac{C_i^2 W_i(1) \beta_i^2}{(\omega^2 - \omega_i^2)} \{-\cos(\beta_i x) - ch(\beta_i x) + r_i[-\sin(\beta_i x) - sh(\beta_i x)]\} \quad (15)$$

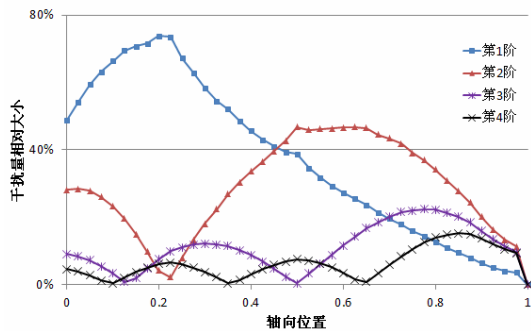


图 5 简谐载荷 ($\Delta=0.2$) 前 4 阶俯仰力矩干扰量相对大小

(2) 若载荷作用在某阶振型节点位置 (附近), 该俯仰力矩干扰量为 0 (较小)。

以单个矩形脉冲载荷为例, 作用在任意位置 x_0 位置处的载荷, 俯仰力矩干扰量表达式如式 (16)。图 6 及图 7 给出了两种载荷位置作用情况以及对应的第 3 阶俯仰力矩干扰量。由于 $x_0=0.5$ 位置较靠近第 3 阶振型节点, 在整个梁轴向上, 第 3 阶振动引起干扰量几乎处处为零。而 $x_0=1$ 情况下, 第 3 阶振动对于气动力干扰相对比较明显。

$$A_{i(x)}^M = \frac{\rho A P_0 C_i^2 W_i(x_0)}{\beta_i^2} \{-\cos(\beta_i x) - ch(\beta_i x) + r_i[-\sin(\beta_i x) - sh(\beta_i x)]\} \quad (16)$$

(3) 载荷类型不同, 干扰量主要来源不同。

表 1 给出了不同载荷作用下俯仰力矩干扰量主要来源。从表中得到, 不同类型载荷干扰量主要来源不同。即使是同类型的简谐载荷, 由于载荷的频率不同, 干扰量主要来源不同。

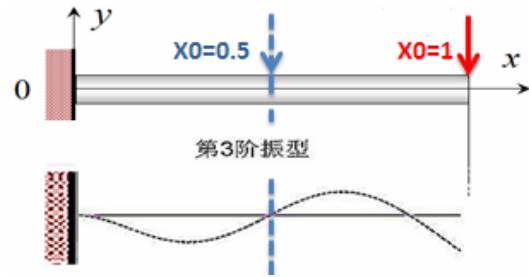


图 6 载荷作用位置 $x_0=0.5$ 及 $x_0=1$

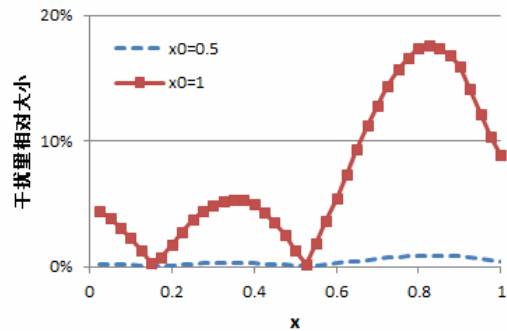


图 7 $x_0=0.5$ 及 $x_0=1$ 第 3 阶干扰量相对大小

(4) 相对俯仰力矩干扰量来讲, 阶数对法向力干扰量的影响更大。

对比表 1 及表 2, 以三种简谐载荷为例, 总体上来讲, 3、4 阶振动对俯仰力矩干扰量基本均可以忽略, 而对于法向力干扰量, 3、4 阶影响与 1、2 阶可相比。

3 结论

本文运用振动力学理论对测力系统简化模型的自由及强迫振动特性进行了分析, 进一步得到单个振型气动力干扰量及振型间气动力干扰量相对大小的分布规律。得到的主要结论如下:

(1) 并非所有振型对气动力有干扰。若天平所在截面局部变形小或天平处于干扰量幅值为零的位置，该阶振型对气动力干扰较小。

(2) 传统的加速度惯性补偿可能存在如下问题：该补偿振型无法补偿，不该补偿振型却进行了补偿。

(3) 振型之间气动力干扰量相对大小与天平截面位置、载荷作用位置、载荷类型有关。

(4) 相对俯仰力矩干扰量来讲，阶数对法向力干扰量的影响更大。

表 1 不同载荷作用下俯仰力矩干扰量主要来源

载荷形式 (端部加载)	1 阶	2 阶	3 阶
简谐载荷 ($\Delta=0.2$)	√ (↗↘)	√ (↗)	
简谐载荷 ($\Delta=0.5$)	√ (↗)	√ (↗↘)	
简谐载荷 ($\Delta=0.8$)		√	
单个矩形脉冲载荷	√		
脉冲 δ 载荷			各阶均有所贡献

表 2 不同载荷作用下法向力干扰量主要来源

载荷形式 (端部加载)	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
简谐载荷 ($\Delta=0.2$)	√ (↗)	√ (↗↘)	√ (↗)	√ (↗)
简谐载荷 ($\Delta=0.5$)		√ (↗↘)	√ (↗)	
简谐载荷 ($\Delta=0.8$)		√ (↗↘↗)	√ (↗)	
单个矩形脉冲载荷	√ (↗↘)	√ (↗)		
脉冲 δ 载荷				各阶均有所贡献

参考文献

1 罗也凡, 毕志献. 脉冲型风洞用加速度计测力天平[J]. 气动实验与测量控制, 1996, 3(10): 59-64.

2 倪振华. 振动力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989: 6-422.

Theoretical Study on Force Measurement Interfered by Vibrations of Elastic System in the Impulse Wind Tunnel

MENG Baoqing HAN Guilai JIANG Zonglin

(Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)

Abstract Aerodynamic measurement is one of the key techniques of shock tunnel. The impulse forces during the startup process will cause the vibrations of dynamometric system, so vibration signals will distort aerodynamic signals. This paper simplifies the dynamometric system to a uniform cantilever beam. Based on free and forced vibration properties of systems, dynamometric interference distribution caused by vibration has been studied by vibration theory. Studies of free vibration focus on dynamometric interference distribution of the single mode. Results show that not all modes will cause disturbance to dynamometric signals. Future studies show that there may be some problems for acceleration compensated method, for instance, modes that should be compensated may be ignored and vice versa. Studies of forced vibration focus on dynamometric interference distribution among modes. Analysis shows that it is related with section's location, types of loads, load position.

Key words shock tunnel, aerodynamic forces, vibration interference, vibration theory, interferential signal separation