

激波风洞气动力信号分离的波系适配法

罗长童, 汪运鹏, 王春, 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 加速计惯性补偿是常用的应变天平气动力信号处理方法, 在以往的激波风洞测力中发挥了重要作用。然而, 该方法存在一些不可避免的问题。首先, 加速计采集的是整体位移速率信号, 但天平采集的是局部位移引起的应变信号, 两者的表现可能并不一致。另外, 加速计惯性补偿方法还存在相位差、所有分量补偿困难等问题。本文提出波系适配法, 该方法分析天平信号本身, 结合振动系统和流场环境, 利用全局优化方法, 将天平信号分解为气动力信号、振动信号和随机信号。长试验时间激波风洞 JF-12 的气动力试验数据分析结果表明, 该方法能有效分离振动信号, 获取所需的气动力信号。

关键词 激波风洞, 应变天平, 气动力测量, 惯性补偿, 信号分离

引言

激波风洞可以产生高总温、高总压气流, 能够更真实地模拟飞行条件, 是最具潜力的高超声速飞行器摇篮。然而, 激波风洞的气动力测量仍然面临很大的挑战^[1-3], 其结果可信度甚至也受到一定的质疑。事实上, 传统风洞试验时间仅为毫秒量级时, 在如此短的时间内, 发生了诸多干扰气动天平信号的非线性过程, 导致试验结果存在较大误差。

复现高超声速激波风洞 JF-12 的落成突破了毫秒级试验时间的瓶颈, 有效试验时间超过 100ms, 使得我们能够对天平信号的构成有更深刻的认识, 从而给出更精确可靠的气动力信号分析方法。

激波风洞测力主要有三种天平: 应变天平、加速计天平和应力波天平^[4], 本文仅考虑应变天平信号的分离。

1 波系适配法

1.1 基本思想

激波风洞的测力信号除了所需的气动力信号, 还不可避免地包含振动信号和随机干扰。将这些信号分离更有助于对气动规律的把握。但信号分离却非常困难: (1) 振动信号本身可能远比气动力信号强; (2) 振动频率不够高, 在有效试验时间内只能采集到少数周期; (3) 振动自由度不唯一, 可能存在多个频率

和振幅的振动。无论是传统的模拟惯性补偿, 还是后来发展的数字惯性补偿, 都利用加速计采集的辅助信号进行分析。然而, 利用加速计进行补偿存在不可避免的问题。首先, 加速计采集的是整体位移速率信号, 但天平采集的是局部位移引起的应变信号, 两者可能表现并不一致。另外, 加速度补偿方法还存在相位差、所有分量补偿困难等问题^[5-7]。

因而, 本文提出一种新的补偿方法——波系适配法, 该方法分析天平信号本身, 结合振动系统和流场环境分析, 利用全局优化方法, 将天平信号分解为气动力信号、振动信号和随机信号。

1.2 方法步骤

首先, 需要结合天平信号, 对振动系统进行分析。这里的振动系统包括测力模型、测力天平和支撑系统。分析其固有振动和对冲击的响应特性, 给出不同时段的主导波系结构。本文根据 JF-12 的测力信号特点, 对振动信号和系统进行分析后认为, 可以将天平信号分为三个时段进行处理: 5ms~15ms 的起始段; 15~25ms 的冲击振动段和 80~100ms 的周期振动段。值得说明的是, 不同风洞、不同模型和支撑系统, 都会影响不同时段的时间长短。

周期振动段是最稳定、最可靠的信号区。敲击实验的结果表明, 周期振动段的振动频率主要取决于系统的固有频率, 但也有区别, 即

并非所有的固有频率在测力信号中都有体现。在此时间段内，主导波系结构为：

天平信号 \approx 气动力信号+周期振动信号+随机干扰
如果落在此区域的信号最低频率振动能采集到一个以上的周期，其结果的精确度是完全能够达到测量需求的。

不规则冲击段是相对可用的信号区，在此区域内，主导波系结构为：

天平信号 \approx 气动力信号+冲击振动信号+随机干扰
要充分利用此区域的信号，需要对系统进行更深入的分析，包括冲击响应特性的分析，否则结果的精确度可能会产生较大误差。

起始段的信号可用性值得商榷。如果没有完整的系统分析，包括风洞启动过程、流场建立过程、激波扫过模型过程等一系列分析的综合，很难把握这一区段天平的波系结构。

在完成了振动系统分析后，接下来是数学模型建立和求解过程。对于周期振动段，如果考虑分离最低频率的两个信号，其数学模型可描述为：

$x(t) = f + A_1 \sin(2\pi\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\pi\omega_2 t + \varphi_2) + \varepsilon$
其中 f 为气动力信号，中间两项为两个低频振动项， ε 包括高阶振动和随机项。

值得注意的是，如何获得以上模型中的系数是波系适配法应用的关键环节。系数确定是一个非线性全局优化过程，本文采用低维单形进化算法(LDSE)^[8]，保证了算法的精确反演能力。

1.3 方法的反演能力测试

本小节利用人工信号进行算法的反演能力测试。构造的人工测试信号（图 1 所示）为：

$$x(t) = 3 + 12 \sin(2\pi t + \frac{\pi}{4}) + 5 \cos(2\pi 4t) - 1 + 2r$$

其中 $t \in [0, 1]$ ， $\Delta t = 0.005$ ， r 是 $0 \sim 1$ 之间的随机数。

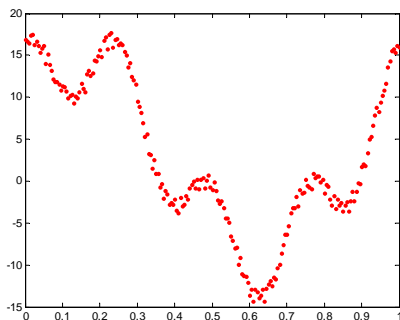


图 1 测试信号

首先，利用傅立叶变换，获得振动信号的大致频率信息。变换结果如图 2 所示，可见信号包含两个主要振动，频率分别为 1 和 4，其中频率为 1 的振动振幅较大。

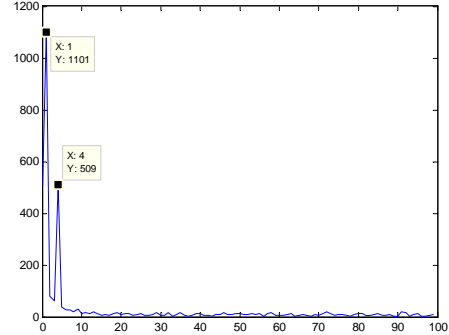


图 2 测试信号的幅值-频率曲线

因而，可以建立天平信号的非线性模型为：

$$x(t) = f + A_1 \sin(2\pi\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\pi\omega_2 t + \varphi_2) + \varepsilon$$

利用全局优化算法 LDSE 进行非线性拟合，获得气动力信号大小和振动信号振幅及初相位：

$$f = 2.9744, A_1 = 12.0048, \omega_1 = 0.7812, A_2 = 4.9711, \omega_2 = 1.5886$$

另外，我们还在没有随机干扰项（ $-1 + 2r$ ）的情况下进行了测试，发现算法能够几乎精确反演模型系数：

$$f = 3.0000, A_1 = 12.0000, \omega_1 = 0.7854, A_2 = 5.0000, \omega_2 = 1.5708$$

前面主要讨论了周期振动段天平信号的分离，如果这一段采集的信号足够，那么完全可以依据其分离结果，利用天平公式，获得可靠的气动力信息。然而，受有效试验时间的限制，可能采集到的规则周期振动信息不足，此时只能退而求其次，通过分析规则冲击段，获取气动力信息。

2 冲击振动段的探讨

相对于周期振动段，冲击振动段的分离更困难。首先就是冲击响应曲线类型的把握。事实上，冲击响应曲线类型与系统特性有关，也与系统输入有关，包括力的大小、加载方式、时间长短等等（如图 3 所示）。响应曲线的周期（非严格意义）取决于力和系统综合作用的结果。本文根据信号和系统分析结果，初步采用如下的近似模型进行测试：

$$x(t) = f + A_1 e^{-k_1 t} \sin(2\pi\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 e^{-k_2 t} \sin(2\pi\omega_2 t + \varphi_2) + \varepsilon$$

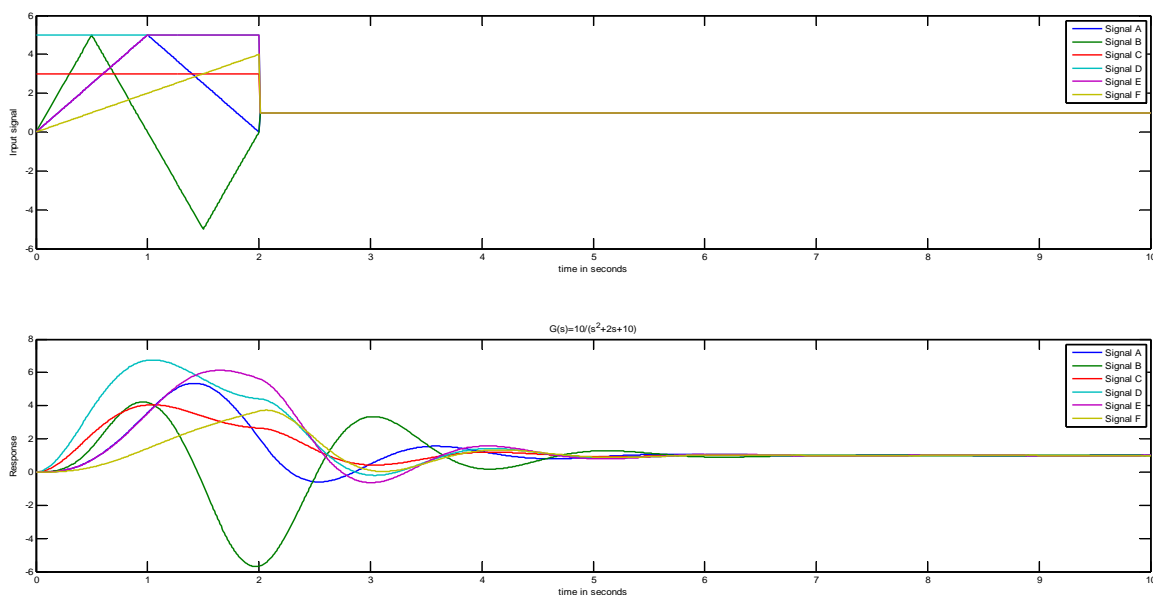


图3 同一系统对不同输入响应曲线

3 信号分离结果

3.1 规则周期段分离结果

下面给出 20121231#试验的俯仰力矩信号分离结果。本次实验的其他信号规律性很好，可以直观地看出冲击振动段、周期振动段，甚至可以看出低频振动周期，但周期振动段的俯仰力矩信号却不易直观发现其周期规律（图4

左上）。然而，通过本文的波系适配法，对天平信号分离后发现，其实存在两个振动频率接近的低频振动，叠加后形成类似共振的波形，主导了天平信号的波形。去掉其中的两个低频振动后，得到了比较规律的信号，可以作为气动力信号的（二阶）近似曲线。当然，我们可以反复利用波系适配法，去掉更高频的振动，获得更高阶的近似曲线，如图4所示。

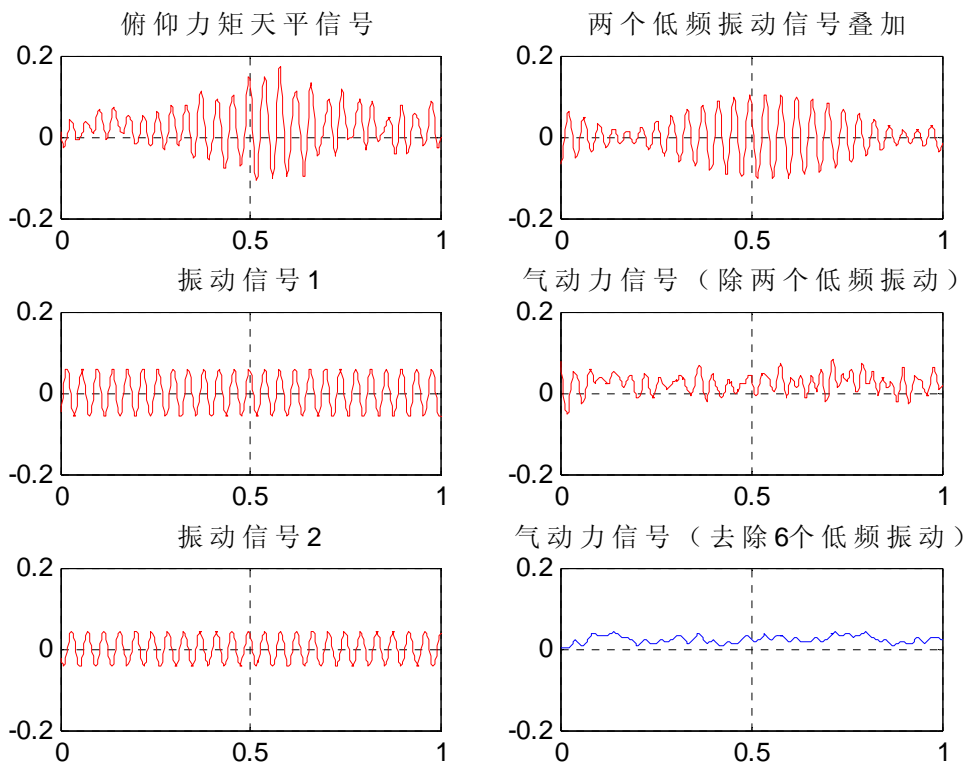


图4 俯仰力矩信号分离结果

3.2 冲击振动和周期振动段分离结果的对比

下面利用波系适配法分别分离冲击振动段和周期振动段的天平信号，将所得的气动力信号结果进行对比。分离结果包括 20130422#，20130427#，20130503#，20130506#，20130513#，20130515#，20130604#，20130607#等 8 次试验，考察的气动力信号包括法向力、轴向力、俯仰力矩。对比结果列于表 1。其中数学模型采用的是第 2 节中的近似冲击

响应模型。结果表明，仅利用冲击段，波系适配法也可以得到近似度比较好的气动力数据。如果将周期振动段的结果作为标准，那么仅利用冲击振动段得到的法向力、轴向力和俯仰力矩信号误差分别为[1.42%, 10.63], [3.69%, 21.46]和[2.25%, 18.68%]。这样的误差尚不能满足测力需要，表明所采用的冲击响应模型有待改进，以期获得满足实际需求的结果。

表 1 波系适配法应用于不同区段所得结果的对比

N	法向力			轴向力			俯仰力矩		
	冲击段	周期段	差异	冲击段	周期段	差异	冲击段	周期段	差异
1	0.04974	0.04496	10.63%	0.022163	0.023733	-6.62%	-0.1744	-0.18766	-7.07%
2	0.06003	0.05918	1.42%	0.021483	0.023418	-8.26%	-0.19205	-0.18697	2.72%
3	0.05889	0.06292	-6.40%	0.025383	0.032319	-21.46%	-0.23541	-0.22999	2.36%
4	0.06111	0.06338	-3.57%	0.03491	0.036433	-4.18%	-0.25492	-0.2493	2.25%
5	0.06552	0.05944	10.23%	0.038171	0.036272	5.24%	-0.3108	-0.26189	18.68%
6	0.05697	0.0583	-2.28%	0.034029	0.035334	-3.69%	-0.27633	-0.26012	6.23%
7	0.066	0.061	8.20%	0.034	0.029	17.24%	-0.24	-0.27	-11.11%
8	0.12351	0.13477	-8.35%	0.03674	0.041226	-10.88%	-0.47663	-0.5616	-15.13%

4 结 论

对于气动力测量，以往的激波风洞有效试验时间过短，主要落在起始段和冲击振动段，因而无法对振动过程产生全面的认识。JF-12 在试验时间上有了质的突破，冲击衰减后仍然提供一段高质量的周期振动试验数据，使得我们对激波风洞的振动规律有了更全面的把握。利用波系适配法，能够滤掉低频振动信号，获得更高精度的测力试验结果。

目前对冲击振动段的认识还不够深入，对起始段还缺乏把握，我们将结合 JF-12 测力系统的系统特性开展进一步的研究与分析。

参考文献

- 1 杨耀栋, 王复, 郭大华, 在高超声速脉冲风洞中使用的六分量天平测力系统和 10° 尖锥模型的气动力测量, 气动实验与测量控制, 1988, 1: 60-64.
- 2 程忠宇, 陈宏, 多加速计振动分离惯性补偿测力技术, 流体力学实验与测量, 1999, 13 (4): 57-61.
- 3 刘洪山, 齐学群, 吕治国, 徐翔, 于时恩, 姜华, 激波风洞重模型气动力试验研究, 2006, 24 (3): 319-324.

- 4 N. Sahoo, K. P. J. Reddy, Force Measurement Techniques for Hypersonic Flows in Shock Tunnels, International Journal of Hypersonics, 2010, 1(1):31-58.
- 5 W. Silver, C. V. Stahle, and C. G. Stouffer, Inertia-compensated balance for wind-tunnel buffet measurements, Journal of Spacecraft and Rockets, 1964, 1(6): 690-691.
- 6 D. Joshi, P. Vadassery, F. Lu, Acceleration compensation for force measurements in hypersonic shock tunnel, AIAA, 2013-1020.
- 7 E. Marineau, M. MacLean, E. Mundy, and M. Holden, Force Measurements in Hypervelocity Flows with an Acceleration Compensated Strain Gage Balance, Journal of Spacecraft and Rockets, 2012, 49(3): 474-482.
- 8 C.T. Luo and B. Yu, Low dimensional simplex evolution: a hybrid heuristic for global optimization, Journal of Global Optimization, 2012, 52(1):45-55.

A WAVE FITTING METHOD FOR THE SEPARATION OF AERODYNAMIC SIGNAL FROM SHOCK TUNNELS

Luo Changtong WANF Yunpeng WANG Chun JIANG Zonglin

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

Abstract Accelerometer inertia compensation is a commonly used method for aerodynamic signal processing, and it has played an important role in the force measurement of conventional shock tunnels. However, accelerometer inertia compensation has inherent problems. First, signals collected by accelerometers depend on global displacements, but the signals from the force balance reflect local strain gauges. The global displacements and local strain gauges are inconsistent in general. Besides that, the phase offset issue and partial compensation issues could also decrease the accuracy of force measurement. We propose a wave fitting method in this paper to overcome these difficulties. This method attempts to analyze the balance signal itself. The balance signal is decomposed into aerodynamic signal, vibration signals and random signal. The proposed method is applied to experimental data from shock tunnel JF-12. The results show that it can effectively separate vibration signals to get the desired aerodynamic signal.

Key words shock tunnels, strain gauge balance, aerodynamic force measurement, inertia compensation, signal separation