

# 导弹舵机 / 舵面系统模态试验方法研究

## Research on Modal Test Method for Missile Servo/Rudder System

中国空空导弹研究院 何 辉

**[摘要]** 针对导弹舵机 / 舵面系统非线性较强的特点,将“猝发随机法”和“纯模态法”相结合,得出准确测试舵机 / 舵面系统模态参数的模态试验方法。首先采用“猝发随机法”获取系统的频响函数估计,然后采用多参考最小二乘复频域(PolyMax)法进行模态参数识别,得到系统初步的模态参数,最后利用“纯模态法”剔除虚假模态,准确测试结构的模态参数。该方法提高了导弹舵机 / 舵面系统模态参数的识别质量和效率,为导弹颤振特性分析及气动伺服弹性分析提供了准确的动特性参数,具有重要的工程应用价值。

**关键词:** 舵机 / 舵面系统 猝发随机法 纯模态法 PolyMax 法 模态试验

**[ABSTRACT]** For the characteristic of strong nonlinearity of missile servo/rudder system, a modal test method for servo/rudder system is developed by combining burst random method and normal modal method to acquire accurate modal parameters. First, the frequency response function estimation of the system is obtained by burst random method. Second, the primary modal parameters are acquired by modal parameters identification with the Least Square Complex Frequency (PolyMax) method. Last, the accurate modal parameters are gained by eliminating unreal modal with normal modal method. This method improves the quality and efficiency for missile servo/rudder system modal parameters identification, which provides accurate dynamic parameters for missile flutter analysis and aeroservoelastic analysis and may be of significant value in engineering application.

**Keywords:** Servo/rudder system Burst Random method Normal Modal method PolyMax method Modal test

随着导弹设计水平的日益提高,导弹的飞行速度越来越快,气动弹性问题在导弹设计中越来越突出。导弹的模态参数是有限元模型修改、颤振特性分析及气动伺服弹性分析的依据,如何获得准确的模态参数并提高试验效率是非常重要的<sup>[1]</sup>。导弹的模态试验是通过振动响应测试获得导弹结构的动特性参数,主要包括导弹固有

频率、振型和阻尼。导弹在全弹状态时是一个细长结构,由于其长细比较大,模态呈现出梁结构模态的特点<sup>[2]</sup>,其模态参数可以很容易通过锤击法、猝发随机法等模态试验方法获得。导弹舵机 / 舵面系统具有伺服系统非线性较强的特点,这是由于刚度和阻尼的非线性引起的,如接头摩擦连接的滑动、受载界面上的间隙等,非线性因素常会使系统产生非常复杂的运动现象,并影响试验室内对系统模态的准确测试<sup>[3]</sup>。本文将“猝发随机法”和“纯模态法”相结合,得出准确测试导弹舵机 / 舵面系统模态参数的方法。首先采用“猝发随机法”获取系统的频响函数估计,然后采用多参考最小二乘复频域(PolyMax)法<sup>[4]</sup>进行模态参数识别,得到系统初步的模态参数,最后利用“纯模态法”剔除虚假模态,准确测试结构的模态参数。

## 1 模态试验理论

### 1.1 猝发随机法

结构频响函数是表征结构固有动态特性的非参数化数学模型,在线性、非时变的假设前提下,通过结构频响函数的模态展开式,关联了激励输入、响应输出和结构模态特性参数(固有频率、阻尼比和振型等)。根据激励输入和响应输出的测量数据,可以获得结构的频响函数估计,进而根据测定的频响函数估计与频响函数模态展开式模型之间的最小二乘拟合,可获得结构模态参数估计。大量的结构模态参数辨识算法依据频响函数的模态展开式模型,因而,频响函数估计的精确度和一致性会直接关系到模态参数辨识结果的有效性。

非线性结构的动态传递特性不能用复频域上的传递函数描述,而只能用频域上的频响函数描述。严格来讲,非线性结构不服从线性模型所具有的力学特性,如(1)叠加原理不适用,模态之间产生耦合,模态参数与激励输入的振级有关;(2)互易定理不成立,模态参数与激励点位置和方向有关;(3)频响函数畸变,与激励输入的类型有关;(4)响应输出数据不稳定、不复现。这种结构仍可采用线性模型去近似模拟,在非线性影响不严重的情况下结果是可接受的。非线性对结构动态特性影响在共振频率处最大,可能出现共振频率飘逸、频响函数不对称、相位颠倒和峰值分离等现象,这些都

与受力状态和初始条件有关。激励振级的选择没有严格的准则,要通过试验去探讨。一般认为,振级过低,信噪比低,背景噪声影响大,导致辨识结果的精确度降低;而振级过高,将造成结构非线性影响显著。

根据激励方式,工程上常用的模态试验方法主要有单点或多点自然随机、单点或多点伪随机、快速扫描正弦、瞬态冲击、多点稳态正弦等。“猝发随机法”采用猝发随机信号对试验件进行激励,而猝发随机信号可以减少“泄露”的影响,又保留了自然随机信号能消除结构非线性等影响的特点,具有较高的信噪比。它是时间观察窗内一个截断了的自然随机信号,而截断时间间隔的选取与所试验结构的阻尼特性有关,也就是与结构自由衰减时间有关,保证在截断的时间间隔内,结构的响应衰减到几乎为零。但时间间隔不能过大,还必须确保激励所需力的均方值<sup>[5]</sup>。

结构模态参数辨识方法包括时域法和频域法。其中,频域法是最常用的结构模态参数辨识算法,它根据模态试验得到频响函数估计与结构频响函数的数学模型之间留数的最小二乘拟合,分离模态,获得结构各阶模态的模态参数估计。多参考最小二乘复频域(PolyMax)法是一种创新的模态参数识别方法,该方法采用“矩阵分式”的数学模型对频响函数估计进行拟合,逐步求解结构模态参数,对线性结构和非线性系统都能够很容易实现准确的模态定阶,并获得准确的模态参数,分析结果比其他方法更加理想。

### 1.2 纯模态试验方法

纯模态试验方法是采用多点正弦激振方式,在结构的某阶固有频率附近,通过协调各点激振力,使结构按某阶固有模态方式振动,从而实现模态的物理分离,再直接进行响应试验获得模态参数。该方法的优点是振动测试的信噪比高、测试精度高、物理概念直观,尤其适用于非线性系统的模态测试;其缺点是要依靠人的工作经验反复调力,试验周期长,近频密集模态的识别精度较差,容易遗漏模态。

1个多个自由度系统在1组激振力作用下,其运动微分方程为:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f \quad (1)$$

式中,  $M$ 、 $C$ 、 $K$  分别为系统质量、阻尼和刚度矩阵,  $x$ 、 $\dot{x}$ 、 $\ddot{x}$ 、 $f$  分别为位移、速度、加速度和力矩阵。

令:

$$f = F \sin \omega t \quad (2)$$

则有响应输出位移矢量:

$$x = X \sin(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

式中,  $F$  为激振力,  $\omega$  为圆频率,  $t$  为时间,  $X$  为响应输出位移矢量,  $\varphi$  为滞后角。

将式(2)、(3)代入式(1),分离含有  $\sin \omega t$  及  $\cos \omega t$  各项,并分别组成等式:

$$\cos \varphi (K - \omega^2 M) X + \omega \sin \varphi C X = F \quad (4)$$

$$-\sin \varphi (K - \omega^2 M) X - \omega \cos \varphi C X = 0 \quad (5)$$

如果滞后角  $\varphi = \pi/2 + m\pi$  ( $m$  为整数),则有:

$$(K - \omega^2 M) X = 0 \quad (6)$$

$$\omega C X = F \quad (7)$$

上式的物理意义为:如果将激振力  $F$  适调至满足式(7),则所对应的圆频率  $\omega$  将满足式(6)。式(6)是式(1)的无阻尼同构方程,对应该方程的特征值及相应的解向量  $X$  分别为系统的无阻尼固有频率和特征矢量。

在试验时,对施加于被试系统的激振力进行适调,当圆频率  $\omega$  接近或达到系统某个共振频率,并且激振力与试验所布测点的位移响应或加速度响应之间的相位差接近或达到  $90^\circ$  时,则可获得被试系统的纯模态。

基于相位共振原理,由式(7)可得,激振力的个数等于系统的自由度,激振力的分布和阻尼力分布相一致。在实际应用中,要满足式(7)条件仅是一种近似,而且难以操作。随着测试技术不断发展,如果利用系统频响函数,激振力的适调方法将得到明显改进。

设系统频响函数矩阵为  $H(j\omega)$ ,在频域上激励输入矢量  $F(\omega)$  与响应输出位移矢量  $X(j\omega)$  的关系可写成下列形式:

$$X(j\omega) = H(j\omega)F(\omega) \quad (8)$$

结构相位共振时,滞后角  $\varphi = \pi/2$ ,响应输出位移矢量的实部  $X_R(\omega)$  对矢量的贡献最小,即:

$$\min \left( \frac{X_R^T(\omega) X_R(\omega)}{X_R^T(\omega) X_R(\omega) + X_I^T(\omega) X_I(\omega)} \right) \quad (9)$$

或

$$\min \left( \frac{F^T(\omega) \operatorname{Re} H^T(j\omega) \operatorname{Re} H(j\omega) F(\omega)}{F^T(\omega) (\operatorname{Re} H^T(j\omega) \operatorname{Re} H(j\omega) + \operatorname{Im} H^T(j\omega) \operatorname{Im} H(j\omega)) F(\omega)} \right) \quad (10)$$

式中,  $X_I(\omega)$  为响应输出位移矢量的虚部,  $j$  为单位虚数。式(10)可化为下列频响函数的本特征值问题:

$$A F = \lambda (A + B) F \quad (11)$$

式中:

$$A(\omega) = \operatorname{Re} H^T(j\omega) \operatorname{Re} H(j\omega) \quad (12)$$

$$B(\omega) = \operatorname{Im} H^T(j\omega) \operatorname{Im} H(j\omega) \quad (13)$$

式中,  $\lambda$  为本特征值,是圆频率  $\omega$  的函数。

因此,激振力  $F$  可按式(11)进行适调,并相应引入多变量模态指示函数(MIF)作为获取系统模态参数的一种可行的判据。模态指示函数(MIF)的判据为:

$$\text{MIF}(\omega) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \text{Re}H(j\omega) |H(j\omega)|}{\sum_{i=1}^n |H(j\omega)|^2}, \quad (12)$$

式中,  $n$  为响应测点数目。

当系统处于纯模态时, MIF 值接近于 1, 即式(12)中的分式取极小值。

## 2 舵机 / 舵面系统模态试验

### 2.1 试验原理及方法

模态测试的基本原理是给结构一定频率的激励信号同时利用粘接在结构上的加速度传感器测得响应信号, 通过软件对测得的信号进行分析计算以求得结构的模态参数。舵机 / 舵面系统模态试验原理见图 1。

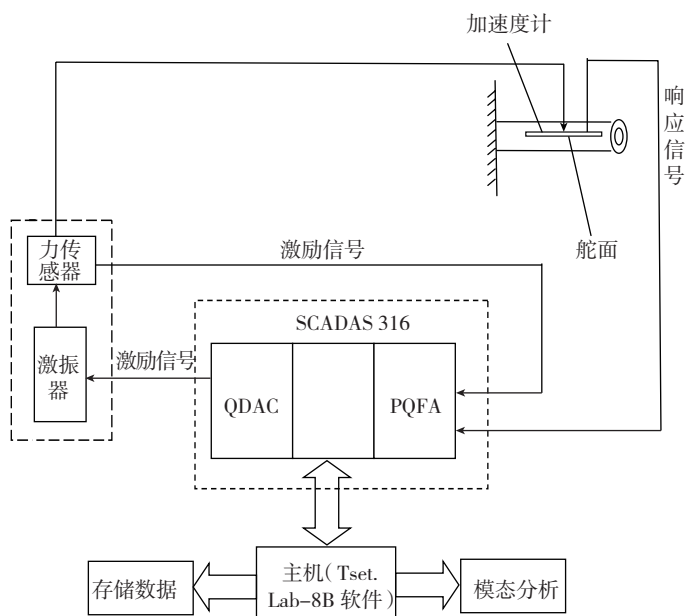


图1 舵机/舵面系统模态试验原理图

Fig.1 Modal test schematic diagram of servo/rudder system

将舵机通过夹具固支在钢梁上, 安装激振器和加速度传感器, 进行系统布置连接。试验方法采用“猝发随机法”和“纯模态法”, 利用 SCADAS 316 系统 QDAC 模块输出激励信号, 通过 PQFA 模块对所测数据进行采集。利用专用模态分析软件包 Test.Lab-8B 对所测数据进行分析处理, 给出所需的模态参数。

### 2.2 模态测试结果

对舵机 / 舵面系统的前两阶模态进行了试验分析。首先利用“猝发随机法”对舵机 / 舵面系统进行激励, 在传感器不过载的情况下尽量提高激振力以提高信噪比, 获得相干性较高的频响函数估计, 利用 PolyMax 模态参数识别方法对频响函数进行分析, 提取模态参数, 频响函数曲线和稳态图见图 2。频响函数曲线比较光滑, 稳态图清晰, 说明“猝发随机法”测试结果和 PolyMax 模

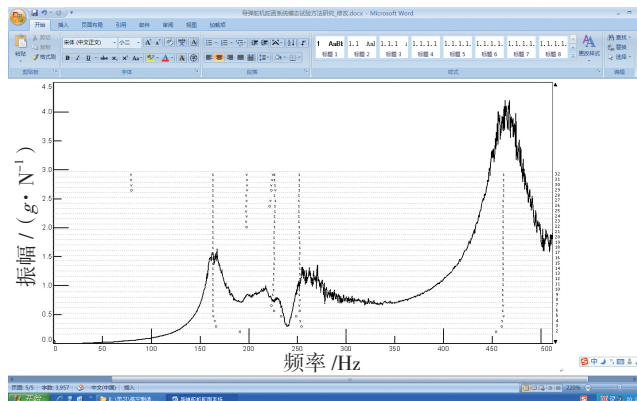


图2 舵机/舵面系统频响函数曲线及稳态图

Fig.2 Frequency response function of servo/rudder system and steady state diagram

表1 测试结果

“猝发随机法”测试 频率 / Hz	“纯模态法”测试 频率 / Hz	MIF 值	模态振型
163.5	164.0	0.95	弯曲振型
225.0	—	—	虚假模态
253.0	255.0	0.97	扭转振型

态参数识别效果很好。根据得到的各阶模态参数及振型确定合适的激励点, 利用“纯模态试验方法”对各阶模态进行准确测试, 结果见表 1。两种方法的测试结果一致性很好, “纯模态法”剔除了“猝发随机法”得到的虚假模态 225.0Hz, 测试各阶模态的 MIF 值均达到 0.9 以上, 说明“纯模态法”得到的模态纯度很高, 结果准确。

## 3 结论

针对导弹舵机 / 舵面系统非线性较强的特点, 将“猝发随机法”和“纯模态法”相结合, 得出准确测试舵机 / 舵面系统模态参数的模态试验方法, 提高了导弹舵机 / 舵面系统模态参数的识别质量和效率, 为导弹颤振特性分析及气动伺服弹性分析提供了准确的动特性参数, 具有重要的工程应用价值。

### 参考文献

- [1] 李晓东, 齐丕骞, 杨文岐. 相位共振 / 相位分离一体化技术在导弹模态试验中的应用. 强度与环境, 2011, 38 (3): 10-13.
- [2] 王建民. 根据导弹模态试验结果诊断其结构缺陷的方法. 强度与环境, 2005, 32(3): 14-18.
- [3] 张新华, 唐苗, 周红芳. 传动间隙对舵面颤振的影响分析. 战术导弹控制技术, 2009, 31(2): 24-27.
- [4] 何辉. 多参考最小二乘复频域法在飞行器模态参数识别中的应用. 航空兵器, 2010(6): 7-11.
- [5] 俞云书. 结构模态试验分析. 北京: 宇航出版社, 2000.

(责编 深蓝)