

# 基于多谐差相信号的某型导弹舵机系统测试方法研究\*

张笑可,张胜修,王楠

(第二炮兵工程学院,西安 710025)

**摘要:**在较深入分析多谐差相信号测试技术特点的基础上,针对某型导弹舵机系统结构,建立了舵系统模型,运用多谐差相测试方法对舵系统性能进行了分析仿真,验证了方法的有效性,说明多谐差相法较传统单一频率激励或扫频方法,具有更高的辨识精度和更快的测试速度。多谐差相方法在舵机测试中有着很大的运用前景。

**关键词:**导弹舵机;PC/104总线;多谐差相信号

**中图分类号:**TJ760.35 **文献标志码:**A

## A Study on Test Method for Missile Control Actuator System Based on SPHS

ZHANG Xiaoke, ZHANG Shengxiu, WANG Nan

(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** The dynamic test method based on the SPHS signal was introduced in this paper. According to the structure of a certain missile control actuator, a model was built and predigested. With this predigested model and the Matlab program, the method was used for control actuator test. The advantages and disadvantages of the method were discussed in the paper. Then, the condition of the method was introduced in the conclusion of this paper. The SPHS signal is prosperous in control actuator test.

**Keywords:** missile acuator; PC/104 Bus; SPHS

### 0 引言

导弹的动态测试是导弹设计使用部门所面临的一个重要课题,它贯穿于导弹设计、使用、储存的整个生命周期。导弹舵机是导弹飞行控制系统的重要组成部分,也是导弹姿态控制系统的执行机构,其性能的好坏直接影响到导弹的飞行性能,因此对导弹舵系统测试精度有较高的要求。传统的人工舵机测试方法,工作效率低,测试精度不高。目前,在动态测试的工程运用上,单一频率的正、余弦动态测试法运用的最为广泛。其不足之处在于,它只能激发某一个频率的点上的模态。在测试中也常采用扫频方法,这增加了测试时间和难度等。相对于单一频率的正余弦动态测试和扫频方法而言,多谐差相信号能

够激励系统在各个频率点的模态,大大缩短测试时间,因此它有着广阔的运用前景。

### 1 多谐差相信号测试方法原理

多谐差相信号(SPHS)是一种特殊的多频信号,它采取调整组成该信号的各正(余)弦分量的初始相角来形成周期性多频信号<sup>[1-2]</sup>。多谐差相信号由若干个功率、周期和初相有一定关系的余弦波叠加而成,其数学表达式为:

$$x(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2P_k} \cos(2k\pi t/T + \theta_k) \quad (1)$$

其中: $N$ 为信号所含的谐波数; $P_k$ 为 $k$ 次谐波的功率, $T$ 为周期信号;总功率 $\sum_{k=1}^N P_k = P$ ; $\theta_k$ 为第 $k$ 次谐波的初相,其按下式计算:

\* 收稿日期:2008-05-22

作者简介:张笑可(1982-),男,河南新乡人,硕士研究生,研究方向:导航、制导与控制。

$$\theta_k = \pi \left[ \left[ \sum_{i=1}^{k-1} (k-i) P_i \right] \right], P_i = P_i / P \quad (2)$$

[[ · ]] 表示取整运算。当  $P_i = P/N (i = 1, 2, \dots, N)$  时,  $\theta_k = \pi \left[ \left[ k^2 / 2N \right] \right]$ 。

SPHS 为周期信号,系统的响应也是周期信号,作 FFT 时可以整周截断,避免了谱泄漏。同时它们的频谱是离散的,只在基频  $2\pi/T$  的整数倍上有能量,可以抑制大部分的噪声干扰。周期  $T$ 、谐波数  $N$ ,各次谐波功率  $P_k$  均可根据需要进行确定,可以很好地满足系统动态测试的要求。

SPHS 测试的原理如图 1 所示。

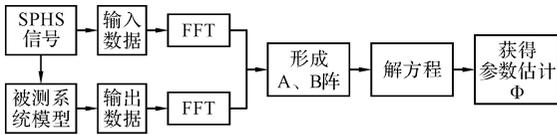


图 1 SPHS 信号测试原理图

一般情况可采用最小二乘法解正规方程组,但采用最小二乘法求解会遇到数字病态问题。当建模问题与测试相结合时,尤其是要求快速测试的场合,为满足精度和实时性要求,必须采用镜像映射法<sup>[3-4]</sup>直接求解矛盾方程组  $XA = Y$ 。此方法利用镜像映射矩阵<sup>[4]</sup>(Householder 矩阵)将系数矩阵  $X$  转变为上三角矩阵,既避免了数字病态问题,又方便了求解。

与单一频率的正弦波相比,它能同时激励系统在各个频率点的模式,从而可以缩短频率特性测试时间;具有低峰值因子(接近 1),类似调频信号的特点(通过调整各  $\theta_k$  的关系实现),对系统激励平稳、均匀,对惯性器件、伺服机构等设备测试尤为适合。

## 2 舵机系统原理

某型导弹舵机是一个高精度的位置伺服系统,由电动舵机和功率放大器组成,其结构如图 2 所示。电动舵机采用谐波减速技术,由永磁直流伺服电机、谐波齿轮减速器和锥齿轮减速器、位置反馈电位计和调零机构等组成。舵机系统的基本工作原理是,舵机控制器接收制导计算机给出的舵面偏角控制信号,据此来操纵导弹舵面的偏转,从而改变导弹的飞行姿态,以达到控制导弹按预定轨迹飞行的目的。

根据舵机系统的运行机制,可以建立如图 3

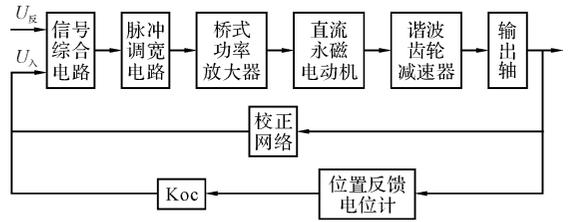


图 2 舵机系统原理图

所示的舵机模型。

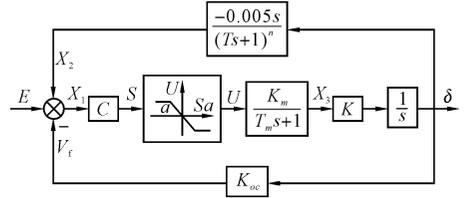


图 3 舵机模型

由对舵机模型的分析可知,舵机模型可简化为二阶传递函数形式,结果如下:

$$\varphi(s) = \frac{1/k}{T^2 s^2 + 2T\xi s + 1} \quad (3)$$

式中,反馈系数  $k = 0.5$ ,时间常数  $T = 0.017$ ,相对阻尼  $\xi = 0.852$ 。

## 3 仿真

根据舵机系统简化模型的传递函数,采用参数识别方法。设参数未知,可设舵机系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} \quad (4)$$

再由设激励信号为  $u(t) = \sum_{k=1}^{16} \cos(\pi k t + \theta_k)$ ,其中  $\theta_k = \pi \left[ \left[ \frac{k^2}{32} \right] \right]$ 。为模拟硬件实现,用每周 1024 个采样点得到  $u(t)$  两个周期的数据。再用 FFT 变换对激励信号和舵机系统的输出信号进行变换,得到的数据进行方程求解。其激励信号与舵机系统输出信号图形如图 4 所示。

将转为频域,即令  $s = j\omega$ ,有:

$$G(j\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{b_0}{(j\omega)^2 + a_1(j\omega) + a_0} \quad (5)$$

可得:

$$-\omega^2 Y(\omega) + j\omega Y(\omega) a_1 + Y(\omega) a_0 = X(\omega) b_0 \quad (6)$$

令  $X^r(\omega), X^i(\omega), Y^r(\omega), Y^i(\omega)$  分别代表

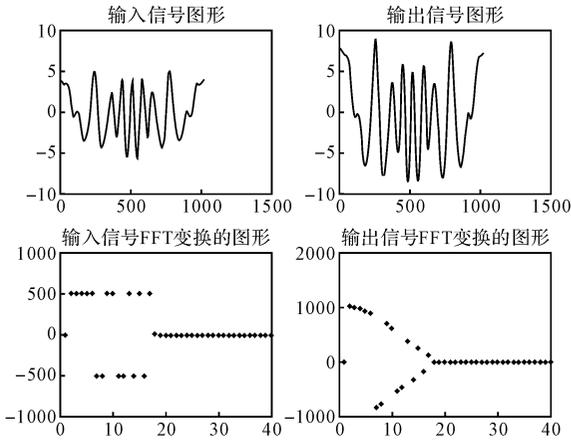


图 4 舵机系统的激励信号和输出信号图形

$X(\omega)$ 、 $Y(\omega)$  的实部和虚部。将上述方程的实部与虚部分离可得:

$$\begin{cases} -\omega^2 Y^r(\omega) - \omega Y^i(\omega)a_1 + Y^r(\omega)a_0 = X^r(\omega)b_0 \\ -\omega^2 Y^i(\omega) + \omega Y^r(\omega)a_1 + Y^i(\omega)a_0 = X^i(\omega)b_0 \end{cases} \quad (7)$$

选基角频率为  $\omega_0 = \pi(\text{rad/s})$ , 当  $\omega = k\omega_0 (k = 1, 2, \dots, 16)$  时, 有:

$$\begin{bmatrix} -\omega_0 Y^i(\omega_0) & Y^r(\omega_0) & -X^r(\omega_0) \\ \omega_0 Y^r(\omega_0) & Y^i(\omega_0) & -X^i(\omega_0) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -(k\omega_0) Y^i(\omega_0) & Y^r(k\omega_0) & -X^r(k\omega_0) \\ (k\omega_0) Y^r(\omega_0) & Y^i(k\omega_0) & -X^i(k\omega_0) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -(16\omega_0) Y^i(\omega_0) & Y^r(16\omega_0) & -X^r(16\omega_0) \\ (16\omega_0) Y^r(\omega_0) & Y^i(16\omega_0) & -X^i(16\omega_0) \end{bmatrix}_{32 \times 3}$$

$$= \begin{bmatrix} \omega_0^2 Y^r(\omega_0) \\ \omega_0^2 Y^i(\omega_0) \\ \vdots \\ (k\omega_0)^2 Y^r(\omega_0) \\ (k\omega_0)^2 Y^i(\omega_0) \\ \vdots \\ (16\omega_0)^2 Y^r(\omega_0) \\ (16\omega_0)^2 Y^i(\omega_0) \end{bmatrix}_{32 \times 1}$$

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_0 \\ b_0 \end{bmatrix}_{3 \times 1}$$

用矩阵表示为  $A\Phi = B$ , 其中  $A$  为  $32 \times 11$  矩阵,  $\Phi$  为  $11 \times 1$  矩阵,  $B$  为  $32 \times 1$  矩阵。如前所述, 考虑到若  $\phi = (A^T A)^{-1} A^T B$  为病态方程, 则辨识的误差很大, 这时可采用镜像影射变换 (Householder 变换) 进行变换求解。编写的 Matlab 镜像映射法程序如图 5 所示。

```

55 %H 变换
56 n=32;
57 H=eye(n,n);
58 for k=1:11;
59 s=zeros(n,1);
60 s([k:n],1)=x([k:n],k);
61 a=norm(s);
62 l=zeros(n,1);
63 i=eye(n,n);
64 l(k,1)=1;
65 p=zeros(n,1);
66 p=(s-a*l)/norm(s-a*l);
67 h=i-2*p*p';
68 H=h*H;
69 x=h*x;
70 end
71 y1=H*y;
    
```

图 5 镜像映射法程序

经测试, 所得的数据如表 1 所示。

表 1 参数估计与标准值比较

参数	理论值	参数估计值	相对误差/%
$a_1$	1.003460e2	1.003500e2	3.9862e-3
$a_0$	3.460208e3	3.460200e3	2.3107e-3
$b_0$	6.920415e3	6.920400e3	2.1675e-4
$J$		2.7794e-2	

从表中数据不难看出, 多谐差相信号测试方法的参数估计的精度较高, 更有利于对舵机系统的动态性能进行判断。

### 4 结论

多谐差相法解决了单一频率正、余弦信号只能激发被测系统单个频率模态的难题, 辨识精度高, 测试速度快, 有利于满足导弹测试快速性的要求。

#### 参考文献:

- [1] 郝炜亮. 多谐差相信号激励下的频域建模方法及 MATLAB 仿真[J]. 中国测试技术, 2005(6): 123-125.
- [2] 黄俊钦. 静、动态数学模型的实用建模方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [3] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 三版. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [4] 程云鹏. 矩阵论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1989.
- [5] 崔吉俊. 火箭导弹测试技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.