

文章编号 1004-924X(2008)10-1971-06

# 电动舵机伺服系统的模型辨识及其校正

章家保<sup>1,2</sup>, 刘 慧<sup>1,2</sup>, 贾宏光<sup>1</sup>, 宣 明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**基于全数字化电动舵机的特点,提出了一种频率特性自动测试新方法,在此基础上对电动舵机系统的模型进行辨识,并对系统进行串联校正。使用数字控制器进行全过程自动测试并将数据上传计算机;然后,通过 Levy 法将测得的频率特性数据辨识为较高精度的传递函数,对辨识得到的数学模型仿真结果与频率特性测试数据进行比较。比较结果显示,在中低频段的幅值最大绝对误差 $<0.8$  dB,相位最大绝对误差 $<1.1^\circ$ 。在此基础上选用滞后超前校正器对系统进行校正,校正后系统带宽达到 138 rad/s,与对模型进行数值仿真得到的结果 124 rad/s 相比误差较小。实验结果表明:频率特性测试法比传统测试方法自动化水平高,传递函数辨识结果能较好地描述该系统特性,选择的校正方法使本伺服系统满足了预期的性能指标,为研制性能优良的电动舵机伺服系统提供了理论依据。

**关键词:**电动舵机;频率特性;系统辨识;Levy法;滞后超前校正

**中图分类号:**V241.5 **文献标识码:**A

## Model identification and corrector design for servo system of electromechanical actuator

ZHANG Jia-bao<sup>1,2</sup>, LIU Hui<sup>1,2</sup>, JIA Hong-guang<sup>1</sup>, XUAN Ming<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** A new automatically test method for frequency characteristic was proposed based on the digitization characteristics of a electromechanical actuator, the system model of electromechanical actuator was identified, and a series-wound corrector was designed to correct the system. A digital processing controller was used to automatically test the entire process and tested data were uploaded to a PC. Then, these tested frequency characteristic data were identified to the high precision transfer function by using the Levy method. By combination of the simulated results with the tested data, it is shown that the maximal absolute error of magnitude between identified data and tested data is less than 0.8 dB and the maximal absolute error of phase is less than  $1.1^\circ$  in the low and intermediate frequency. On the basis of transfer function, a lag-lead corrector was designed for the system, corrected results show that the bandwidth of the corrected system is 138 rad/s, which is closed to the numerical simulation

收稿日期:2008-08-07;修订日期:2008-09-03.

基金项目:吉林省杰出青年基金资助项目(No. 20060115);中国科学院“三期创新”平台资助项目

results of 124 rad/s based on the system mathematical model. The corresponding experiments were carried out, and the results show that the frequency characteristic test method has increased the level of automation as compared with traditional testing methods; the identified transfer function can better describe the characteristics of proposed system and the selected lag-lead corrector can meet the expected indicators of the system. The research provides theoretical basis and engineering practice reference for the development of servo system of high-performance electromechanical actuator.

**Key words:** electromechanical actuator; frequency characteristic; Levy identification; lag-lead correction

## 1 引言

目前电动舵机伺服控制系统的设计基本上是基于理论模型的数学推导<sup>[1-2]</sup>,由于受元件实际特性的影响,理论设计和实际应用的控制算法存在较大的差异,因此获得精确的电动舵机伺服系统模型的传递函数十分必要。

获取传递函数的方法有时域法和频域法<sup>[3]</sup>,从精度和获得系统特性信息上来看,频域法优于时域法。

本文针对电动舵机全数字化这一特点,充分利用其自身设备,提出了一种数字式测试方法,该方法能完成全程数据的自动测试,测试时间短,成本较低。

利用测得的系统频率特性数据对传递函数进行辨识,并根据辨识的结果对系统进行校正,使其达到了预期的性能指标。

## 2 频率特性测试原理

舵机是机、电一体化的高精度位置伺服系统,对其进行频率特性测试,普遍采用的方式如图 1 所示<sup>[4]</sup>。测试系统由测试计算机、功率放大器和信号调理电路组成,其中测试计算机包括信号发生器卡、高速采集卡和数据处理算法。

在频率特性测试过程中,信号发生器卡产生的激励信号需经过功率放大器后输入被测舵机,控制舵机运动,而激励信号和响应信号也需经过信号调理(整形、滤波和放大)环节,再被高速采集卡采集。

全数字式电动舵机系统的结构如图 2 所示。系统采用高速 DSP 作为主控制器,位置传感器和速度传感器选用高精度的编码器,通过串行口来收发控制指令。对电动舵机进行频率特性测试

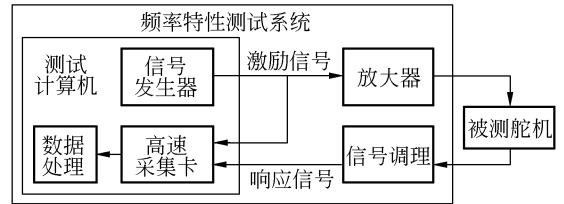


图 1 频率特性测试系统原理框图

Fig. 1 Principle of testing system for frequency response

时,DSP 产生离散的正弦波激励信号,使电机及减速器做正弦摆动,同时对激励信号和响应信号进行采样并通过串行口上传给计算机,利用 Matlab 对收到的数据进行数据处理,进而绘制出系统的开环波特图并辨识出系统的传递函数。其中 DSP 所起的作用与图 1 中的信号发生器卡、高速采集卡和信号调理环节相似。与图 1 相比较,针对全数字式电动舵机所采用的频率特性测试方法省去了较多的外围测试硬件,测试成本有较大的降低。

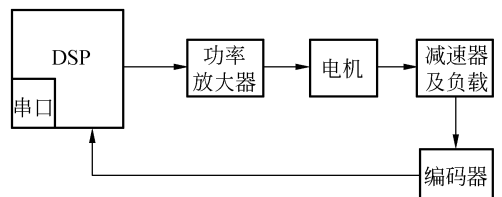


图 2 电动舵机系统结构图

Fig. 2 Structure of electromechanical actuator

## 3 自动测试与数据处理

### 3.1 测试信号的产生和数据采集

正弦信号的获得有两种方式:第一种方式通过计算机产生,经过串口发送给 DSP。第二种方式由在 DSP 内部编写运算算法来产生。鉴于 DSP 有着高的运算能力,在 DSP 中编写一个自动

测试程序,设置完扫频的初始频率、初始幅值和扫频点个数后,程序将自动产生正弦信号、步进频率并上传测试数据,同时运行在计算机中编写的程序接收并保存测试数据,直至扫频结束。全过程实现无人干预的自动测试。为获得更精确的测试数据,自动测试程序中还采用了如下几种措施:

- (1)在激励正弦信号的第五个周期开始记录数据,以避免记录系统尚未稳定时的数据影响测量精度。
- (2)随着频率的增大,激励正弦信号的幅值也逐渐递增,防止因衰减过大导致输出信号不明显。
- (3)为方便后面的数据处理,上传给计算机的测试数据采用固定字节的帧方式,每帧中包含帧头、频率、测试数据的序号、激励正弦信号的幅值和实测数据的幅值等信息。
- (4)因电机进行频繁的换向操作,其温升较快,为避免温升对测量结果的影响,在每个频率点测试完之后延迟一段时间再进行下一个点的测试。

### 3.2 数据处理与系统辨识

自动测试结束后,利用 Matlab 对测试的数据进行解码、预处理、幅值相位计算、波特图绘制和传递函数辨识。

#### 3.2.1 数据解码以及预处理

因串行口传输的数据是以字节形式表示的,对于一些浮点数要将整数部分和小数部分分别转换为字节形式进行上传。在 Matlab 中,利用其强大的数据处理能力再将数据进行解码并恢复成浮点数。

由于各种干扰因素存在,可能导致测试数据中某些点的值产生错误。在 Matlab 中利用相邻三点之间的偏差大小来判断是否有错误数据产生,若有,则将错误点的值用前后两个数据的平均值来代替。理论上正弦波数据应严格对称,为避免直流分量对测试数据的影响,对测试数据进行了中值滤波,将直流分量滤除。

#### 3.2.2 幅值相位计算与波特图绘制

要得到被测系统的传递函数,首先要获得的关键数据是每个点的频率、输入和输出信号的幅值及二者的相位差。其中每个点的频率和输入信号的幅值都是已知参数,关键是要测量出输出信号的幅值和输入输出信号的相位差。

幅值和相位差的测量主要有两种方法:FFT 谱分析法和相关分析法。由于 FFT 谱分析法进行相位差测量时误差较大,需对其进行修正,因此本文采用相关分析法计算幅值和相位差<sup>[5]</sup>。

相关分析法原理如下:

设两被测信号:

$$x(t) = A \sin 2\pi ft + N_{x(t)}, \quad (1)$$

$$y(t) = B \sin(2\pi ft + \phi) + N_{y(t)}, \quad (2)$$

式中: $A$ 、 $B$ 分别为  $x(t)$ 、 $y(t)$  信号的幅值,  $N_{x(t)}$ 、 $N_{y(t)}$  分别为  $x(t)$ 、 $y(t)$  信号上的噪声。

对  $x(t)$ 、 $y(t)$  进行相关运算,有:

$$\hat{R}_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt = \frac{1}{T} \int_0^T [A \sin 2\pi ft + N_{x(t)}] \cdot [B \sin(2\pi f(t+\tau) + \phi) + N_{y(t+\tau)}] dt, \quad (3)$$

当  $\tau=0$  时

$$\hat{R}_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T [A \sin 2\pi ft + N_{x(t)}] \cdot [B \sin(2\pi ft + \phi) + N_{y(t)}] dt. \quad (4)$$

由于噪声和信号不相关,且噪声之间也不相关,积分后得:

$$\hat{R}_{xy}(0) = \frac{AB}{2} \cos \phi, \quad (5)$$

所以,相位差  $\phi$  可通过式(6)求得:

$$\phi = \arccos \left[ \frac{2\hat{R}_{xy}(0)}{AB} \right]. \quad (6)$$

两信号的幅值  $A$ 、 $B$ , 可以通过自相关函数来确定。一般地,正弦信号可以表示为  $x(t) = A \sin(\omega t + \phi)$  其自相关函数为:

$$\hat{R}_x(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t)x(t+\tau)dt = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} A \sin(\omega t + \phi) A \sin[(\omega(t+\tau) + \phi)] dt, \quad (7)$$

令  $a = \omega t + \phi$ , 则  $dt = \frac{da}{\omega}$ , 式(7)可以写为:

$$\hat{R}_x(\tau) = \frac{A^2}{\omega} \int_{-\pi}^{\pi} \sin a \sin(a + \omega\tau) da = \frac{A^2}{2} \cos \omega\tau. \quad (8)$$

当  $\tau=0$  时,由上式可以得到  $\hat{R}_x(0) = \frac{A^2}{2}$ , 因此有  $A = \sqrt{2\hat{R}_x(0)}$ 。

实际处理的信号为采样后的离散点序列,相应的离散计算公式为:

$$\begin{cases} \hat{R}_{xy}(0) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x(i)y(i) \\ \hat{R}_x(0) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x(i)^2 \\ \hat{R}_y(0) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y(i)^2 \\ \phi = \arccos \left[ \frac{\hat{R}_{xy}(0)}{\sqrt{\hat{R}_x(0)\hat{R}_y(0)}} \right] \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $n$  为采样点数,  $i$  为第  $i$  个采样点,  $x(i), y(i)$  分别为信号在第  $i$  个采样点的值。

根据相关分析法计算出每个频率点对应的幅值比和相位差, 就可以进行系统开环频率特性曲线的绘制。

### 3.2.3 模型辨识

要获得被控对象的传递函数, 可以对各个频率点的数据进行曲线拟合。曲线拟合的方法有最小二乘法、参数递阶辨识和 Levy 法等。Levy 法根据修正的误差准则, 运用求极值的方法得到传递函数的参数, 当被辨识对象的传递函数的阶数较低时拟合算法简单、辨识精度较高<sup>[6]</sup>。

## 4 基于频域的系统校正

系统的传递函数通过 Levy 法辨识出来以后, 再基于频域的特征量对系统进行校正。对系统校正的方法有多种, 工程上较多采用的有串联校正和并联校正。串联校正又分超前校正、滞后校正和滞后超前校正<sup>[7]</sup>。

超前校正可以提高系统阶跃响应的快速性, 拓宽系统的频带, 从而改善闭环系统的动态性能<sup>[8]</sup>。

超前校正的传递函数为:

$$g_c(s) = \frac{T_D s + 1}{T_s + 1}, \quad (10)$$

令  $a = \frac{T_D}{T_s}$ , 则有最大超前角:

$$\phi_m = \arctan \frac{a-1}{2\sqrt{a}}. \quad (11)$$

$a$  值选得越大, 则超前网络的微分效应越强。为了保持较高的系统信噪比, 实际选用的值一般  $\leq 20$ 。

滞后校正的基本原理是利用滞后网络的高频幅值衰减特性, 使已校正系统截止频率下降, 从而

使系统获得足够的相角裕度。

滞后校正的传递函数为:

$$g_z(s) = \frac{T_E s + 1}{T_s + 1}, \quad (12)$$

令  $b = \frac{T_E}{T_s}$ , 则有最大滞后角:

$$\phi_n = -\arctan \frac{1-b}{2\sqrt{b}}. \quad (13)$$

工程上常采用的是滞后超前校正。滞后超前校正兼有滞后校正和超前校正的优点, 即已校正的系统响应速度快、超调量较小并且抑制高频噪声的性能也较好。

当系统的时域指标和频域指标都达到系统要求后, 表明已对系统完成校正。

## 5 实验测试及其校正

根据以上方法, 对某一型号的电动舵机原理样机进行了频率特性测试并对其进行校正。整个系统由 DSP 组成的伺服单元、功率放大器、无刷直流电机、减速器及负载和编码器组成。DSP 为伺服单元的主控制器, 用于运行自动测试程序, 增量式编码器用来测定实际输出速度。系统的采样周期为 1 ms, 测得系统频率特性如图 3 所示。

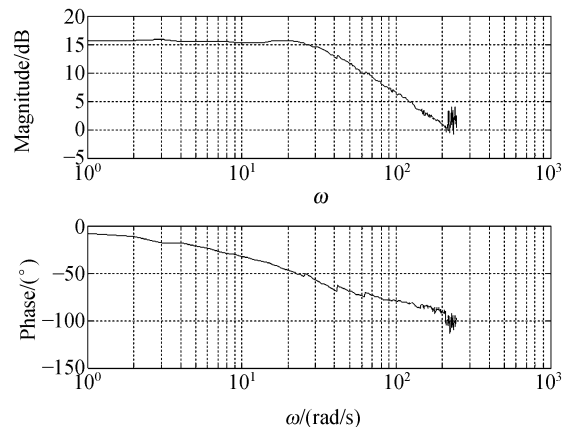


图 3 系统开环频率特性测试结果

Fig. 3 Measured frequency response of open-loop system

由图 3 可以看出, 在  $\omega = 30$  rad/s 左右处出现第一个频率转折点, 在  $\omega = 200$  rad/s 左右处出现第二个频率转折点, 系统在  $\omega = 210$  rad/s 以后出现剧烈的谐振。

利用 Levy 法拟合出系统的中低频环节的传

递函数为:

$$G(s) = \frac{6.8514}{(0.03035s+1)(0.00219s+1)} \cdot (14)$$

由于谐振剧烈,高频部分数据基本不可用来进行辨识,因此对此部分暂不做处理。

实测频率特性与辨识得传递函数的频率特性之间的误差如图 4 所示。

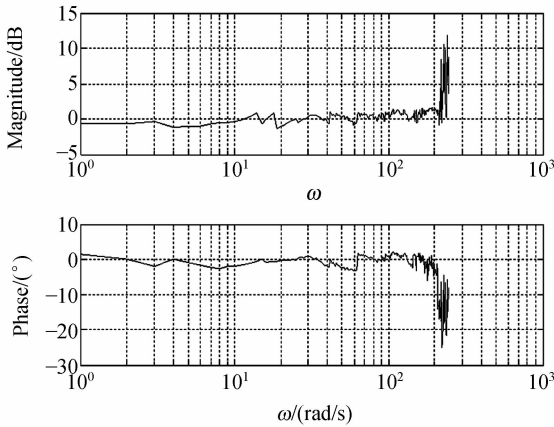


图 4 测试结果与辨识之间的误差

Fig. 4 Error between test data and identification

从曲线可以得出:对辨识得到的数学模型仿真结果与频率特性测试数据做比较,在中低频段幅频特性最大绝对误差 < 0.8 dB,相频特性最大绝对误差 < 1.1°,在实际工程应用中其误差在可接受范围之内,辨识得到的数学模型能良好地描述该伺服系统。其中部分频率点误差较大,是由于此点原始数据变化较大所致。整条幅频特性曲线和相频特性曲线都不是很光滑,初步分析是减速器存在非线性、正反转特性不一致、系统的摩擦力起阻碍作用等因素综合影响所致。

在已知系统的频率特性数据和传递函数的基础上对系统进行了校正,采用的滞后超前校正传递函数为:

$$G'(s) = 130 \frac{(0.03s+1)(0.00219s+1)}{(10s+1)(0.00555s+1)} \cdot (15)$$

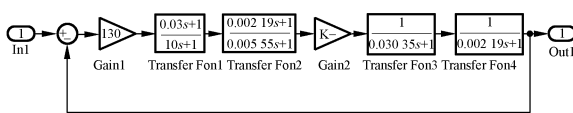


图 5 校正后电动舵机系统的数学模型

Fig. 5 Mathematical model of corrected system of electromechanical actuator

经校正后系统的数学模型如图 5 所示。使用 Matlab 的仿真功能对系统进行仿真,校正后系统的实测闭环频率特性和仿真结果如图 6 所示。

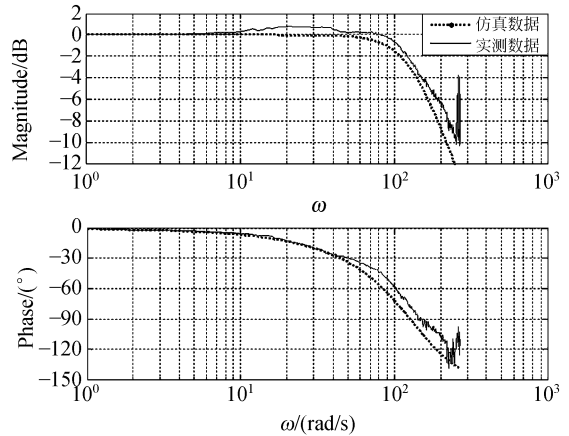


图 6 系统闭环频率特性仿真与实测结果

Fig. 6 Simulated and measured frequency responses of closed-loop system

从图中可以看出,仿真数据中系统带宽为 124 rad/s,实测系统带宽为 138 rad/s,仿真结果与实测数据误差较小,达到了校正的预期效果。由于机械谐振频率的存在,系统无法超越其频率,故在  $\omega = 210$  rad/s 后测试的数据幅值和相位产生了急剧的变化。

## 6 结 论

本文充分利用电动舵机系统本身的元件,提出了一种数字化系统频率特性自动测试;基于 Levy 法的传递函数辨识和利用滞后超前对系统进行校正的方法,为电动舵机伺服系统的设计和校正提供了理论依据,对工程实现具有借鉴意义。基于数字化电动舵机的频率特性测试方法较传统测试方法提高了其自动化水平、简单易操作、成本较低;相关分析法求取频率特性曲线的幅频值和相频值,有效地抑制了系统的噪声;利用 Levy 法对系统参数进行辨识,得到较精确的系统传递函数。在此基础上利用滞后超前校正法对系统进行校正,实测系统的带宽为 138 rad/s,与对系统数学模型进行数值仿真所得的 124 rad/s 相比误差较小。整个过程无需其他测试设备,具有良好的工程实践价值。

## 参考文献:

- [1] 汪和平. 高精度电动舵机技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.  
WANG H P. *The research on high-precision electromechanical actuator*[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University,2002. (in Chinese)
- [2] 魏欣. 电动比例舵机的控制系统设计与分析[D]. 南京:南京理工大学,2007.  
WEI X. *Design and analysis of control system in electromechanical actuation*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology,2007. (in Chinese)
- [3] 李鹏波,胡德文. 系统辨识基础[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.  
LI P B,HU D W. *The Foundation of System Identification*[M]. Beijing:China Water Conservancy and Water and Electricity Press,2006. (in Chinese)
- [4] 汪首坤,王军政. 舵机频率特性的测试误差分析与修正[J]. 北京理工大学学报,2007,27(1):34-37.  
WANG SH K, WANG J ZH. Error analysis and correction in the testing of frequency response for actuators[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*,2007,27(1):34-37. (in Chinese)
- [5] 吴俊清. 相位差的数字化测量研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2005,13(1):99-104.  
WU J Q. Research of digital measurement for phase difference[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2005,13(1):99-104. (in Chinese)
- [6] 吴珍明,陈义红. 电动液压舵机伺服回路传递函数辨识[J]. 战术导弹技术,1993,4:44-49.  
WU ZH M,CHEN Y H. Identification of transfer function of electrohydraulic vane mechanism servoloop[J]. *Tactical Missile Technology*,1993,4:44-49. (in Chinese)
- [7] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 3版. 北京:国防工业出版社,2000.  
HU SH S. *The Principle of Autocontrol*[M]. 3rd ed. Beijing:National Defense Industry Press,2000. (in Chinese)
- [8] 秦文甫. 基于 DSP 的数字化舵机系统设计与实现[D]. 北京:清华大学,2004.  
QIN W P. *The design&implementation of actuator-based DSP*[D]. Beijing:Tsinghua University,2004. (in Chinese)

作者简介:章家保(1981—),男,安徽安庆人,博士研究生,主要研究方向为电动舵机伺服系统设计与控制技术。E-mail: changjacob@163.com

(本栏目编辑 李树军)