

伺服系统 Hammerstein 非线性模型及 参数辨识方法研究

刘栋¹, 陶涛¹, 梅雪松^{1,2}

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 在伺服系统建模中, 针对线性模型无法表达系统在低速、运动换向条件下摩擦与死区等非线性现象的问题, 采用包含静态非线性部分和动态线性系统的 Hammerstein 模型来代替线性模型对伺服系统进行了描述. 根据静态非线性模型逼近伺服系统的非线性特性, 非线性模型采用分段非对称多项式基函数来解决摩擦在运动中存在的非对称特性. 对于多频率正弦输入信号和伺服系统的速度输出信号, 由迭代最小二乘方法来估计模型的参数. 通过辨识实验中的线性模型和 Hammerstein 模型的输出, 说明采用 Hammerstein 模型方法能有效地对系统非线性部分建模, Hammerstein 模型的输出误差比线性模型的输出误差约减少 90%, 因此显著地提高了系统的模型精度, 实现了对系统非线性动态行为的精确预测.

关键词: 伺服系统; Hammerstein 模型; 非线性模型

中图分类号: TP271.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)03-0042-05

Nonlinear Hammerstein Model and Parameter Identification for Servo Drive System

LIU Dong¹, TAO Tao¹, MEI Xuesong^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at resolving the problem that linear models are not able to express the influence of the nonlinear phenomena in servo drive system, such as stick-slip friction, dead-zone etc, on condition of low-velocity or changing of directions, the Hammerstein model which contains static nonlinearity and dynamic linearity is adopted to describe servo system instead of linear model. The nonlinear characteristic of servo system is approximated by static nonlinearity, where two-segment polynomial is used to describe asymmetrical characteristics of friction. The recursive least square method is performed to estimate the parameters of model with multi-frequency sinusoidal input signal and velocity output signal of the servo system. The comparison of the model output between the linear model and the Hammerstein model in identification experiments indicates that the Hammerstein model can effectively represent the nonlinear characteristics of servo system, the error of the Hammerstein model output can be reduced by 90% of that of the linear model to greatly improving, the identification accuracy and precisely predicting the dynamic response of system in nonlinear states.

Keywords: servo system; Hammerstein model; nonlinear parameter identification

伺服驱动系统被广泛地应用于数控机床、定位工作台,以完成速度和轨迹的跟踪控制. 驱动系统的控制器设计依赖于系统模型,而解析建模和系统辨识建模是伺服系统建模的常用方法,这 2 种方法的基础都是通过动力学分析得到系统模型结构,但确定模型参数的条件则不同. 解析方法根据已知系统参数和测量参数通过计算得到具体的系统模型,但随着应用条件的变化,系统参数也会发生一定变化,所以由解析方法得到的模型很难完全反映实际系统. 辨识方法通过实验方法,对测试得到的输入输出数据进行分析,可得到具体的模型参数,由于辨识方法的准确性和实时性,因此已成为对伺服系统建模的主要方法.

现有的辨识方法主要通过线性模型来描述系统^[1-2],系统在低速、运动换向时,一些非线性现象,如摩擦爬行、死区、反向间隙等严重地影响了依照线性模型设计的控制器的精度^[3-4]. 因此,对这些非线性现象进行建模和精确辨识,已成为高精度控制系统设计的条件^[5]. 本文对伺服驱动系统的线性部分进行了建模,并对系统中出现的非线性特性进行分析,提出通过一种包含分段多项式基函数的 Hammerstein 模型结构来代替线性建模方法对系统进行描述,由分段多项式对系统的非线性部分进行建模. 采用迭代最小二乘方法对 Hammerstein 模型参数进行估计,并将 Hammerstein 模型的预测精度与线性模型的预测精度进行了对比.

1 伺服系统模型分析

1.1 系统线性模型分析

根据伺服电机的电枢电流平衡条件和传动轴的扭矩平衡条件,得到伺服电机的动力学方程组

$$\left. \begin{aligned} V(t) &= L_m \frac{di(t)}{dt} + R_m i(t) + K_b \omega_m(t) \\ V(t) &= K_a u(t) \\ T_m(t) &= K_t i(t) \\ J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} &= T_m(t) - B_m \omega_m(t) - T_s(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: t 表示时间; V 、 i 和 ω_m 分别代表电枢电压、电枢电流和电机角速度; L_m 和 R_m 分别为电机电枢的电感和电阻; K_b 是反电动势常数; u 为伺服放大器的控制输入电压; K_a 是伺服放大器增益倍数; K_t 为电机扭矩常数; T_m 为输出的电磁驱动扭矩; J_m 为电机转子转动惯量; B_m 为电机轴等效阻尼系数; T_s 为丝杠轴弹性扭矩.

考虑被驱动部件传动丝杠和负载平台扭矩平衡条件,可以得到传动丝杠和负载平台端的扭矩平衡方程

$$\left. \begin{aligned} T_s(t) &= k_s(\theta_m(t) - \theta_L(t)) + B_s(\omega_m(t) - \omega_L(t)) \\ J_L \frac{d\omega(t)}{dt} &= T_s(t) - B_L \omega(t) - T_d(t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $\theta_L(t)$ 和 $\omega_L(t)$ 分别代表负载端的角位置和角速度; $\theta_m(t)$ 为电机端的角位置; k_s 为丝杠刚度; B_s 为丝杠等效阻尼; J_L 为负载端等效转动惯量; B_L 为负载的等效阻尼; T_d 为扰动扭矩.

考虑到伺服放大器内的电压放大器包含一个对控制电流进行调节的比例控制器 K_{ip} , 即电流环,综合式(1)和式(2),可以得到图 1 所示的线性模型结构框图.

由于电流环具有较高的带宽和增益,在该环节的作用下,可将电机和伺服放大器整体等效为比例环节,因此式(1)可以简化为

$$\left. \begin{aligned} T_m(t) &= K_e u(t) \\ J_m \frac{d\omega(t)}{dt} &= T_m(t) - B_m \omega(t) - T_s(t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: K_e 为简化后的等效伺服扭矩常数. 综合式(2)和式(3),可以得到控制电压为输入、负载角速度为输出的系统线性模型(见图 2 和式(4)). 系统的阶次为 3 阶,即

$$\frac{\omega_L(s)}{u(s)} = [K_e B_s s + K_e k_s] / [J_m J_L s^3 + ((J_m (B_L + B_s) + B_m J_L) s^2) + ((J_m k_s + B_m (B_L + B_s)) s) + B_m k_s] \quad (4)$$

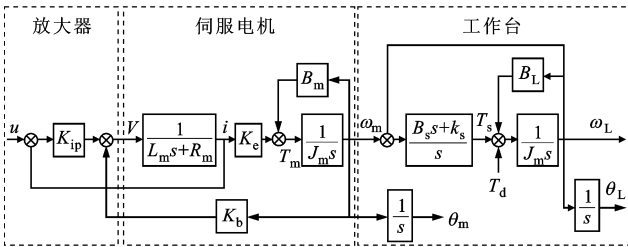


图 1 伺服系统线性模型结构

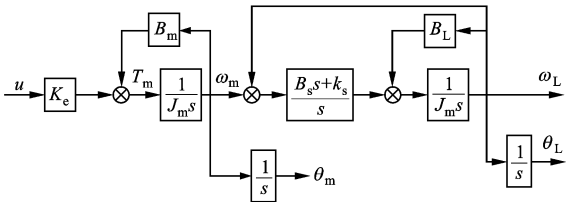


图 2 简化后的伺服系统线性模型结构

1.2 系统非线性模型分析

在实际系统中存在着非线性效应,如机械摩擦和功率驱动器件死区,这些现象将严重影响运动系统的跟踪性能,特别是在低速运动情况下.

Stribeck 曲线描述了摩擦力 F 和速度 v 的典型关系^[6],如图 3a 所示. 整个摩擦特性表现出继电器和死区的非线性特性,同时电机的功能驱动部件也包含死区效应,即系统在输入信号小于某阈值时会

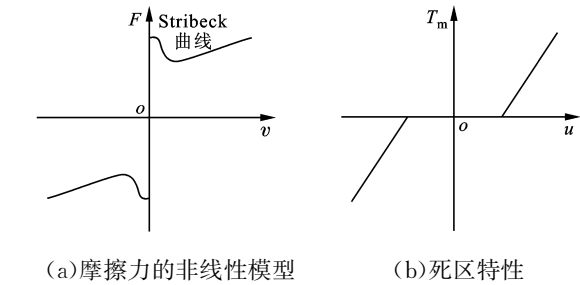


图 3 系统非线性特性

在图 2 所示的线性模型的基础上,加入非线性环节,得到了包含线性和非线性特性的整体控制对象模型(见图 4).

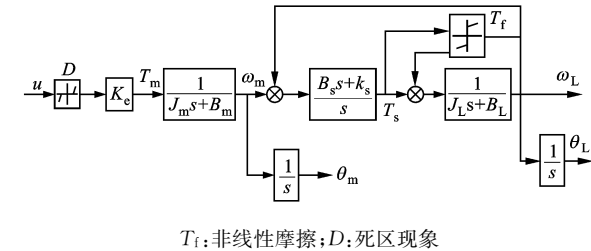


图 4 包含非线性和线性结构的系统模型

2 实验系统

图 5 描述了精密伺服运动控制系统的结构,系统由 PC 机、PCI 运动控制卡、伺服驱动系统和精密工作台组成. PC 机实现运动控制指令的发送功能;运动控制卡采用 Motorola 56303 DSP 板,通过调节 D/A 单元实现电压控制信号的输出,并对编码器的

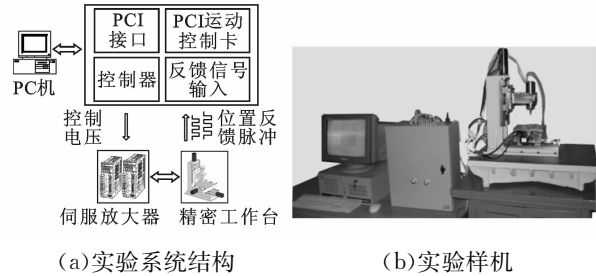


图 5 实验系统结构和实物

位置输出信号进行采样. 采用日本安川公司伺服驱动系统,电机通过高精度滚珠丝杠和工作台连接,系统的伺服扭矩常数 K_e 为 $0.0318 \text{ N} \cdot \text{m/V}$,编码器反馈分辨率为 $0.49 \mu\text{m}$,D/A 输出分辨率为 0.3 mV ,采样周期为 1 ms .

3 分段多项式 Hammerstein 模型的辨识过程

3.1 模型及辨识算法

Hammerstein 模型采用将静态非线性部分和动态线性系统组合的方式对系统进行描述,其系统结构如图 6 所示. 静态非线性部分 $N(\cdot)$ 以系统 $u(k)$ 为输入信号,以 $x(k)$ 为输出信号,动态线性部分 $G(z)$ 则以系统中间信号 $x(k)$ 为输入信号,以 $y(k)$ 为输出信号. 从图 4 的模型模块连接关系的角度中可以看出,伺服结构中既包含串联结构的非线性因素,又包含反馈结构的非线性因素,很难找到一种统一的模型结构来描述伺服系统. 从死区、摩擦力和线性动力学顺序结构上,可将伺服系统在结构上等效为静态非线性模块在前、线性模块在后的串联结构,这样就可以利用 Hammerstein 模型结构特性,通过中间信号来区分系统的线性和非线性特性,达到对线性和非线性模型进行解耦的目的.

Hammerstein 模型方法可以在不附加测试传感器的条件下,通过单一的输入和输出来完成对系统线性和非线性部分的解耦辨识. 采用 Hammerstein 模型的意义还在于可以利用辨识结果获得中间信号的输出,在伺服系统结构中可用于等效系统线性模型对应的速度输出信号,因此选择合适的性能指标,就可以有效地通过模型预测控制方法,实现在非线性条件下伺服系统的精密控制.

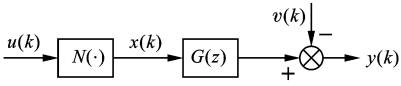


图 6 Hammerstein 模型结构

Hammerstein 模型中的线性部分采用离散自回归模型(ARM)来表示,即

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-n_b}B(z^{-1})x(k) + v(k) \quad (5)$$
$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \cdots + a_{n_a}z^{-n_a} \quad (6)$$
$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \cdots + b_{n_b}z^{-n_b} \quad (7)$$

$b_k(k = 0, 1, 2, \cdots, n_b); a_k(k = 1, 2, \cdots, n_a)$

式中: z^{-1} 为 z 变换的后向移动算子; a_k, b_k 表示线性

系数.

考虑到摩擦在运动中存在的非对称特性, Hammerstein 模型中的非线性部分采用两段不同的多项式函数^[7]来表示(见图 7). 非线性部分的输入输出关系为

$$x(k)=\begin{cases}f(u(k))=\sum_{k=1}^rf_ku^k(k)&u(k)\geqslant0\\g(u(k))=\sum_{k=1}^rg_ku^k(k)&u(k)<0\end{cases}\quad(8)$$

式中: f_k 、 g_k 为非线性系数; r 为多项式的阶次.

定义分段函数

$$h(m)=\begin{cases}0&m\geqslant0\\1&m<0\end{cases}\quad(9)$$

中间信号 $x(t)$ 可以写为

$$x(k)=f(u(k))+\{g(u(k))-f(u(k))\}h(u(k))=\sum_{k=1}^rf_ku^k(k)+\sum_{k=1}^r(g_k-f_k)u^k(k)h(u(k))\quad(10)$$

不失一般性, 可将式(7)写成 b_0 为 1 的多项式. 根据 z 的变换平移性质, 系统整体的模型输出可以写为

$$y(k)=\sum_{k=1}^rf_ku^k(k-n_k)+\sum_{k=1}^r(g_k-f_k)u^k(k-n_k)+(B(z^{-1})-1)x(k-n_k)+(1-A(z^{-1}))y(k)+v(k)\quad(11)$$

将式(11)写成线性回归形式

$$y(k)=\boldsymbol{\varphi}^T(k)\boldsymbol{\theta}+v(k)\quad(12)$$

定义回归向量 $\boldsymbol{\varphi}^T$ 和待估参数向量 $\boldsymbol{\theta}$ 如下

$$\boldsymbol{\varphi}^T=(u(k-n_k),u^2(k-n_k),\cdots,u^r(k-n_k),u(k-n_k)h(u(k-n_k)),u^2(k)h(u(k-n_k)),\cdots,u^r(k-n_k)h(u(k-n_k)),x(k-1-n_k),\cdots,x(k-n_b-n_k),-y(k-1),\cdots,-y(k-n_a))\quad(13)$$

$$\boldsymbol{\theta}=(f_1,f_2,\cdots,f_r,g_1,g_2,\cdots,g_r,b_1,\cdots,b_{n_b},a_1,\cdots,a_{n_a})\quad(14)$$

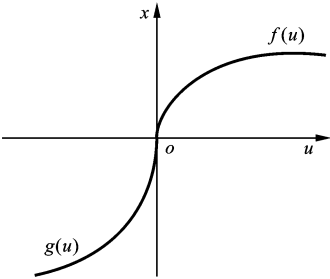


图 7 分段非线性输入特性

$\boldsymbol{\varphi}^T$ 的中间输入变量 $x(k)$ 是不可测量的值, 需要通过式(15)在迭代过程中进行估计, 即

$$x(k)=\sum_{k=1}^rf_ku^k(k)+\sum_{k=1}^r(g_k-f_k)u^k(k)h(k)\quad(15)$$

3.2 系统实验过程和结果

为了观察系统在低速换向条件下的非线性特性, 采用低幅值组合正弦信号作为激励信号(见图 8), 可使系统产生多次换向的低转速输出信号, 并通过编码器位置信号的差分计算得到了转速输出信号值. 取 Hammerstein 模型结构中的线性阶次 $n_a=3$, $n_b=1$, $n_k=1$. 为了计算简便, 取非线性部分的多项式阶次 $r=3$, 当模型的阶次确定后, 可通过辨识算法对系统进行辨识. 取线性阶次一致的 ARX 模型进行对比, 说明 Hammerstein 模型具有更高的辨识精度.

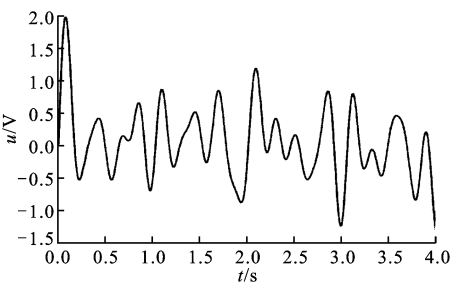


图 8 系统的激励输入

通过最小二乘迭代算法, 可以得出 Hammerstein 模型线性部分和 ARX 模型的参数估计值(见表 1). 从图 9 中可以看出, 非线性辨识实现了比线性辨识更高的辨识精度. 通过计算模型的转速输出误差均方根 δ , 得到了 2 种模型的辨识精度(见表 2), 可以看出 Hammerstein 模型的输出误差远小于线性 ARX 模型的输出误差, 能显著表达系统非线性特性下的动态行为.

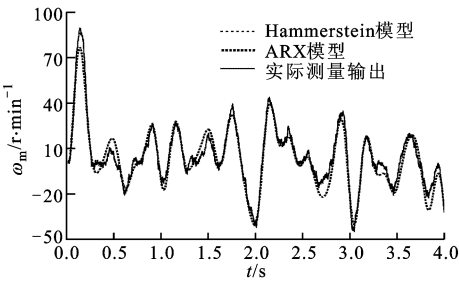
表 1 Hammerstein 模型和 ARX 模型的参数估计值

模型	估计值				
	a_1	a_2	a_3	b_0	b_1
Hammerstein	-0.925 1	-0.039 3	-0.022 6	1.000 0	-0.005 7
ARX	-0.929	-0.038	-0.018	0.682	-1.110

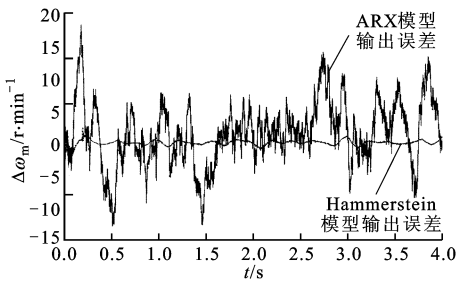
模型	估计值					
	f_1	f_2	f_3	g_1	g_2	g_3
Hammerstein	0.341 3	0.057 2	-0.003 0	0.032 7	0.001 0	0.042 5

表2 模型输出误差的均方根值

模型类型	Hammerstein	ARX
$\delta/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	2.218 0	23.733 9



(a)输出对比



(b)误差对比

图9 输出和输出误差对比曲线

4 结 论

本文针对伺服进给机构中的线性部分和非线性摩擦特性,分别进行了建模和分析,根据伺服系统包含线性动力学和非线性特性的特点,提出了通过基于分段多项式基函数的 Hammerstein 模型来等效伺服系统的结构,将系统线性和非线性特性进行解耦,并采用迭代最小二乘方法对非线性模型参数进行了估计.实验结果表明,与线性辨识方法相比,采用 Hammerstein 模型的非线性辨识方法可显著提高系统的辨识精度,从而为高精度控制器的设计提供了可靠依据.

参考文献:

[1] 郭宇婕,黄立培,邱阳. 交流伺服系统的转动惯量辨识及调节器参数自整定 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(9):1180-1183.

GUO Yujie, HUANG Lipai, QIU Yang. Inertia and auto-tuning of speed controllers for AC servo systems [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 42(9):1180-1183.

[2] ERKORKMAZ K, ALTINTAS Y. High speed CNC system design, part II: modeling and identification of feed drives [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(10): 1487-1509.

[3] 梅雪松,陶涛,堤正臣,等. 高速、高精度数控伺服工作台磨擦误差的研究 [J]. 机械工程学报, 2001, 37(6): 76-81.

MEI Xuesong, TAO Tao, MASAOMI Tsutsumi, et al. Study on friction error of high-speed high-precision NC servo table [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(6): 76-81.

[4] NORDIN M, GUTMAN P O. Controlling mechanical systems with backlash — a survey [J]. Automatica, 2002, 38(10): 1633-1649.

[5] KARA T, EKER I. Nonlinear closed-loop direct identification of a DC motor with load for low speed two-directional operation [J]. Electrical Engineering, 2004, 86(2): 87-96.

[6] ARMSTRONG B, DUPONT P, DEWIT C. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction [J]. Automatica, 1994, 30(7): 1083-1138.

[7] VOROS J. Iterative algorithm for parameter identification of Hammerstein systems with two-segment nonlinearities [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(11): 2145-2149.

[本刊相关文献链接]

交流伺服系统脉冲序列位置控制研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 35-39.

大范围视觉伺服方法在空间机器人上的应用. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 85-89.

基于反步控制的被动力伺服系统全状态反馈控制. 西安交通大学学报, 2008, 42(1): 82-86.

遗传算法在直流伺服系统摩擦补偿中的应用. 西安交通大学学报, 2007, 41(8): 944-948.

单级悬浮工作台平面运动测量系统对准误差分析. 西安交通大学学报, 2010, 44(1): 51-55.

(编辑 管咏梅)