

超精密金刚石车床伺服进给数学模型^{*}

解旭辉 廖德志 李圣怡

(国防科技大学机电工程与仪器系 长沙 410073)

摘要 首先分析了车床进给系统各环节的传递函数,在此基础上采用频域估计建模和时域建模方法建立了车床伺服进给系统的 S 域和 Z 域模型。

关键词 超精密车床, 伺服进给系统, 建模

分类号 TM 921.54

The Research on the Mathmatical Model of Servo Feed System Ultra-precision Diamond Lathe

Xie Xuhui Liao Dezhi Li Shenyi

(Department of Machtronics Engineering and Instrumentation, NU DT, Changsha, 410073)

Abstract In this paper, the transfer function of the servo feed system is analyzed. Based on this, the frequency domain modeling and time domain modeling methods are adopted to build the servo feed system frequency domain and time domain models.

Key words ultra-precision machine, servo feed system, modeling

超精密机床伺服进给系统是一个电气环节与机械环节交差在一起的耦合系统,是保证机床加工质量的关键部分,其性能优劣直接影响机床的加工精度、稳定性和动态特性品质。赵砚江等运用综合分析法对数控机床、加工中心的伺服进给系统各环节进行了深入的分析并在此基础上建立了其传递函数数学模型,为系统仿真计算、参数优化提供了依据^[1]。Y. Honezawa 分析了直流伺服电机与滚珠丝杠副构成的高精度伺服进给系统的动力学结构,并运用综合分析与系统仿真法建立了系统的数学模型,在此基础之上实现了精密工作台的高精度高速度定位控制^[2]。

本文以自研双轴 T 型结构的超精密金刚石车床的伺服进给系统为研究对象,采用综合分析与系统辨识相结合的方法建立了系统的 S 域和 Z 域的实时模型,为系统控制设计与分析提供了依据。

* 1996年3月15日收稿

1 超精密金刚石车床伺服进给系统数学模型分析

超精密金刚石车床伺服进给系统由高精度交流矢量控制器+ AC 电机，滚珠丝杠副，气浮导轨+ 工作台组成。

1.1 伺服驱动机构数学模型

三相交流永磁同步伺服电机采用三相交流供电，其数学模型具有多变量、强耦合以及非线性等特点。本文采用矢量变换并进行解耦控制，使永磁同步伺服电机具有了高性能的控制特性。在我们研制的超精密金刚石车床伺服进给系统中，采用了一种高精度矢量控制器+ AC 伺服电机驱动系统，其数学模型结构如图1所示。

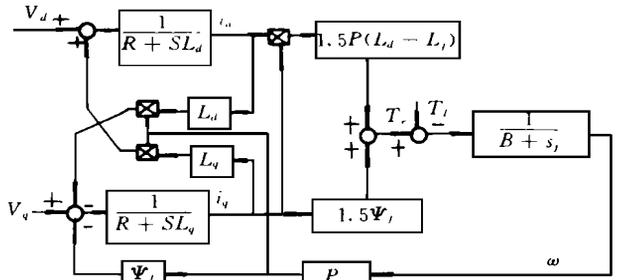


图1 交流永磁同步电机数学模型

图中， V_d 、 V_q 均是以是经过三相 abc 到两相 dq 变换后等效电压， J 是电机的转动惯量， B 是等效阻尼系数， T_l 是负载力矩， R 是等效电阻， i_d 是等效电流， L_d 与 L_q 分别是转子与定子的等效感抗， Ψ_f 与 P 是常量。显然，系统是非线性的，如果强迫 $i_d = 0$ ，则电磁转矩可写为

$$T_e = 1.5P\Psi_f i_q = K_t i_q \quad (1)$$

在此的条件下，电磁转矩仅与 i_q 成正比，只要控制 i_q 就可线性地控制转矩，获得和直流电机相同的控制性能，这就是交流电机矢量控制的目的。在 $i_d = 0$ 条件下，系统可简化成图1，得到矢量电机控制系统数学模型传递函数为

$$\frac{T_e(s)}{V_q(s)} = \frac{K_t(B + sJ)}{(B + sJ)(R + sL_q) + 0.667K_t^2} \quad (2)$$

1.2 机械传动机构数学模型

机械传动装置由伺服电机、联轴器、滚珠丝杠副、气浮导轨和工作台组成，其动力学模型如图2所示。

在该模型中，各部分之间由刚性元件与粘性元件连接，摩擦力与力矩在每个惯量元件之间相互作用，并满足如下的条件：

- (1) 滚珠螺母的质量，与工作台的质量相比可忽略不计；
- (2) 工作台位置的变化不影响刚度的变化。

忽略系统的 $stick/slip$ 摩擦和间隙等非线性因素，得到传动机构的传递函数框图如图3所示。

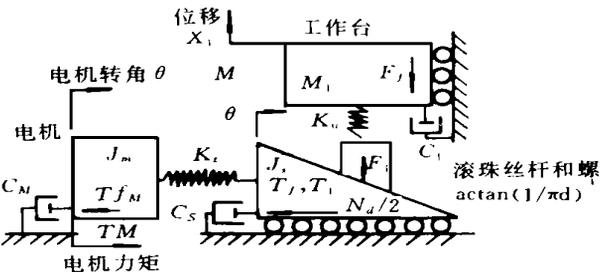
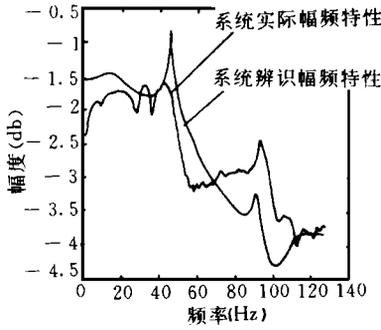
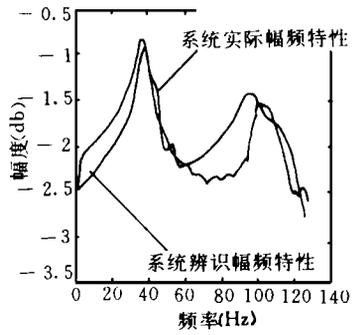


图2 传动机构动力学模型结构



(a) X 轴伺服进给系统幅频特性



(b) Z 轴伺服进给系统幅频特性

图 4 系统频域响应与辨识结果

2.2 时域建模

时序分析是典型的黑箱建模方法，其输入、输出之间的关系可以用(7)式 ARMA 模型来表示，其中 $y(i)$ 是输出， $x(i)$ 是输入， $\epsilon(k)$ 是服从正态分布的残差序列。

$$y(k) = a_0x(k) + a_1x(k-1) + \dots + a_nx(k-n) - b_1y(k-1) - b_2y(k-2) - \dots - b_my(k-m) + \epsilon(k) \quad (7)$$

采用广义最小二乘法来确定 ARMA 模型参数。将式(7)写成如下对称形式:

$$\sum_{i=0}^m b_i y(k-i) = \sum_{j=0}^n a_j x(k-j) \quad (8)$$

其中 $b_0=0$ 。引入算子 D ，上式简化为

$$A(D)y = B(D)x \quad (9)$$

如果时序 y 可逆，有: $B^{-1}(D)A(D)y = x$ (10)

上式表明 ARMA 模型是一个将相关时序化为独立时序的转化装置。令: $C(D) = B^{-1}(D)$ ， $B(D)$ 的阶次为 m ，确定 $C(D)$ 的阶次为 p ， $p < n+m$ 或 $p < 2n-1$ ，则有

$$C(D)A(D)y = x \quad (11)$$

$$\text{令: } A(D)y = \epsilon \quad (12)$$

此式并不是对 $A(D)y$ 的简单标记，它表示用 $A(D)$ 对 y 滤波， ϵ 为滤波值，式(12)称之为过程模型。根据此式，式(7)变为以下噪声模型

$$C(D)\epsilon = x \quad (13)$$

此式表示用 $C(D)$ 对 ϵ 滤波，滤波值是 x 。当 y 已知，序列 $\{\epsilon(k)\}$ 为白噪声时，式(12)为即 AR 模型。同理，当 ϵ 已知时，序列 $\{x(k)\}$ 为白噪声时，式(13)也为 AR 模型。根据上述推导，广义最小二乘的算法为

- (1) 设计一个通带为150Hz的低通滤波器对得到的时序信号滤波;
- (2) 对序列 $\{y(k)\}$ 拟合 AR 模型，求得 $A(D)$ ，如果模型残差序列 $\{\epsilon(k)\}$ 为白噪声，则模型为 AR(n) 模型，即 $m=0$ ，停止运算;
- (3) 否则对 $\{\epsilon(k)\}$ 拟合白噪声模型，得到 $C(D)$ 与新的模型残差序列 $\{\epsilon(k)\}$ ，如它为白噪声则停止运算，否则转(2)。

为了减少计算时的系统参数,降低系统阶数,在(7)式基础上引入延时 nk ,从而(7)式写为

$$y(k) + b_1y(k-1) + b_2y(k-2) + \dots + b_my(k-m) = a_0x(k-nk) + a_1x(k-nk-1) + \dots + a_nx(k-nk-n) + \epsilon(k)$$

系统阶数的确定应用 FPE 准则,即残差最小准则。

nk 用阶跃输入实验粗步确定;进一步的确定则通过改变 nk 的值,在同一输入下,比较系统实际输出曲线与辨识得到的系统输出曲线的差异,以其方差最小时的 nk 作为辨识结果。

系统时域辨识结果如下:

(1) X 轴伺服进给系统 Z 域模型

$$\frac{0.0011Z^5 - 0.00174Z^4 - 0.00194Z^3 - 0.00192Z^2 - 0.0013Z - 0.00068}{Z^5 - 3.676Z^4 + 5.256Z^3 - 3.461Z^2 + 0.8866Z} Z^{-20} \quad (14)$$

(2) Z 轴伺服进给系统 Z 域模型

$$\frac{0.0142Z^5 + 0.0093Z^4 + 0.0044Z^3 + 0.00113Z^2 + 0.0009Z + 0.00273}{Z^5 - 3.503Z^4 + 5.011Z^3 - 3.461Z^2 + 0.9749Z} Z^{-10} \quad (15)$$

采用以上时域模型可得到系统在采样率为 1kHz 时的延时分别为 20ms, 10ms。其实实验结果分别为: 24ms, 13ms; 可见两者基本吻合。系统时域模型的零极点图如图 5 所示,从图中可以看出系统具有开环不稳定性,这与频域辨识结果是一致的。

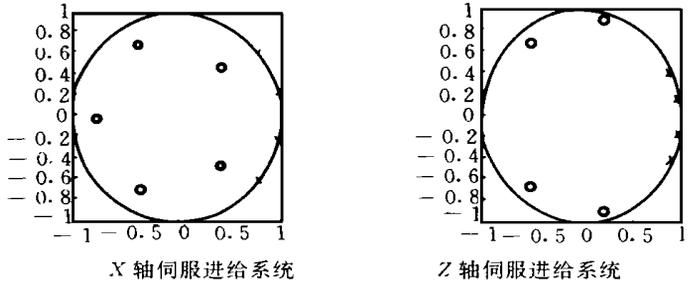


图 5 伺服进给系统零极点图

3 结 论

本文建立了车床进给系

统各环节的传递函数,在此基础上采用频域估计建模和时域建模方法建立了车床伺服进给系统的 S 域和 Z 域模型,为伺服进给系统控制设计提供数学模型。进一步实验表明辨识的数学模型具有较好的可信度。

参 考 文 献

- 1 赵砚江等. 数控算法进给系统数学模型的研究. 全国机械控制工程研究会第四届年会论文集, 西安: 1992
- 2 Yonezawa H, Hirata Y, Sasai H. Positioning Table with High Accuracy and High Speed. M otsubishiElectri. corp. Manufacturing Development Lab. Hyogo/Japan
- 3 周光英, 杨进. 动力学参数估计的频域方法. 清华大学学报, 1987, 27(5)
- 4 廖德志. 超精密车床性能测试与数控技术研究: [硕士论文]. 长沙: 国防科技大学, 1996

(责任编辑 卢天赋)