

DOI: 10.7652/xjtuxb201712001

一种数控滚齿机工作台动态特性建模方法及实验分析

申建广¹, 陶涛^{1,2}, 梅雪松^{1,2}, 刘星¹, 马星星¹, 杜志国¹

(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: 为了研究数控滚齿加工中滚刀轴转速波动引起的工件轴速度波动的动态响应特性,对数控滚齿机旋转工作台即工件轴的伺服控制问题进行了分析。首先根据电机学原理和机械动力学原理对伺服控制系统组成的各个环节进行了建模和分析,推导出旋转工作台的整体伺服控制系统模型,并考虑到伺服控制环节在动态响应过程中的摩擦因素,引入了非线性 Stribeck 黏性摩擦结构;然后利用 Simulink 建立了滚齿机旋转工作台的伺服系统仿真模型,并研究了不同的位置和速度指令频率变化对工件轴伺服动态响应影响效果;最后通过数控滚齿机工作台控制实验来验证工件轴的动态响应特性。仿真结果表明:旋转工作台伺服系统在低速运行时,位置跟踪存在“平顶”现象,速度跟踪存在“死区”现象;旋转工作台伺服系统位置和速度的跟随率随着指令频率的增大而减小,当指令频率增大到 31 Hz 时,速度跟随率不足 10%。在和仿真相同的指令频率变化条件下,进行滚齿机工件轴的转速控制实验,工件轴的响应曲线与仿真响应曲线基本吻合,验证了模型的有效性和可靠性。该模型可为数控回转工作台伺服进给系统设计、伺服控制方法研究及故障诊断等工作提供理论依据。

关键词: 数控滚齿机;动态特性;伺服模型;永磁交流伺服电机

中图分类号: TN772 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)12-0001-07

Modeling and Experimental Analysis for Worktable Dynamic Characteristics of CNC Gear Hobbing Machine

SHEN Jianguang¹, TAO Tao^{1,2}, MEI Xuesong^{1,2}, LIU Xing¹, MA Xingxing¹, DU Zhiguo¹

(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: To reveal the dynamic characteristics of worktable axle of CNC gear hobbing machine due to interrupted cutting, the servo control system of the worktable is analyzed. According to electromechanical principle and mechanical dynamic principle, every component model of the servo control system is constructed to derive an overall servo control system model of the rotary table. Considering the nonlinear Stribeck friction factor, a simulation model of the worktable servo system is established by Simulink. The effects of different position and speed command frequency variation on the dynamic response of the workpiece axis servo system are discussed and the servo dynamic characteristics reflecting the location and speed of the worktable axle are obtained. When the servo system of the rotary table runs at low speed, the “flat top” exists in

the position tracking, and the “dead zone” exists in the speed tracking. The position and speed following rate of the servo system of the rotary worktable decrease with the increasing given command frequency, especially when the instruction frequency increases to 31 Hz, the following rate is less than 10%. The model accuracy is verified by online test of the worktable, the experimental response curves coincide with the simulated ones well at the same command frequency.

Keywords: CNC gear hobbing machine; dynamic characteristics; servo model; permanent magnet synchronous motor

数控滚齿机是齿轮制造的主流设备,数控回转工作台是滚齿机实现滚齿展成运动的重要附件,用于各种齿轮加工以及实现高速、高精度的数控控制^[1]。滚齿加工精度的提高是一个系统工程,影响因素众多,其中伺服进给系统的动态特性扮演了非常重要的角色,因此对伺服系统建模和动态参数辨识是十分必要的^[2]。

针对数控进给系统中的典型部件,众多科研人员进行了建模研究,期望能够对进给系统的动态特性进行预测和解释。文献[3]用伺服仿真技术建立了伺服驱动系统的精确模型,并通过改变仿真参数来观测参数变化对伺服性能的影响。文献[4-5]建立了基于弹性变形的理论模型,用以分析滚珠丝杠的载荷分布,同时建立了一种考虑摩擦环节、进给系统刚度影响的高速、高精度进给伺服工作台的控制模型。文献[6]分析了数控伺服进给系统滚珠丝杠传动过程中的刚度因素,并定量分析了综合刚度对控制器的影响。

在永磁交流伺服电机(PMSM)的伺服控制方法研究方面,文献[7-9]在电机处于开环控制状态下实现了对工作台的动态参数辨识。

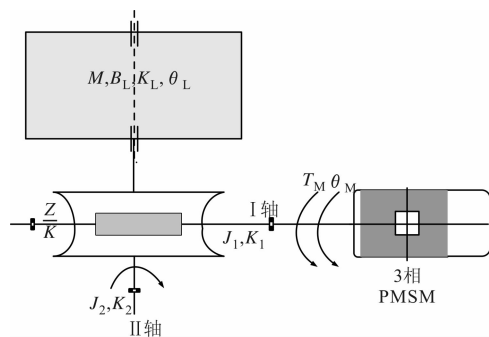
在数控机床回转工作台伺服建模特别是数控滚齿机伺服控制系统建模方面的研究文献甚少。准确的伺服系统模型与控制参数调节可以保证滚齿机工作台快速响应的精确度和稳定性。

本文通过对数控滚齿机旋转工作台伺服系统各个环节进行理论分析和研究,根据交流伺服电机控制原理和机械动力学原理,建立了脉冲序列控制的永磁交流伺服电机的数学模型和传动系统的数学模型,从而对交流伺服电机与传动链的整体模型进行简化,建立了数控滚齿机工作台伺服系统的控制模型。通过该模型对旋转工作台伺服响应动态特性进行了研究,旨在为数控机床回转工作台伺服进给系统的设计和参数优化提供理论方法,同时也为天望远镜、雷达、测试转台等具有伺服转台控制的工程应用提供理论指导。

1 数控滚齿机工件轴传动系统模型

本文基于 YKXM3132CNC3 数控滚齿机床对工件轴进行改造,把传统的机械传动改造成由交流伺服电机通过蜗轮蜗杆传动,驱动工件轴转动,通过自行研发的 GCN-1 型滚齿专用数控系统对其进行实验和研究。

滚齿机工件轴传动系统如图 1 所示,该系统由三菱交流伺服电动机通过蜗轮蜗杆传动,驱动工件轴转动。



$\theta_M(t)$ 、 $T_M(t)$ 分别为交流伺服电机输入转角和转矩; $\theta_L(t)$ 为工件轴输出转角; Z 和 K 分别为蜗轮的齿数和蜗杆的头数; J_1 为 I 轴和电动机转子构成的转动惯量; J_2 为 II 轴部件的转动惯量; K_1 、 K_2 分别为 I 轴和 II 轴的扭转刚度系数; K_M 为等效扭矩刚度系数; m 、 B_L 分别为工作台旋转部分质量和黏性阻尼系数

图 1 数控滚齿机工件轴传动模型

1.1 交流伺服电机驱动控制原理

在电机学理论中,永磁同步交流伺服电机的控制方法通常是通过矢量控制,将交流伺服电机模拟为直流电机,用对直流电机的控制方法来实现对交流伺服电机的控制^[10-15]。交流电动机的数学模型有如下几点特征。

(1)交流电机调速时需要进行电压和频率的协调控制,有电压和频率两种独立的输入变量。如果考虑电压为三相的,实际的输入变量数目还要多。在输入变量中,除了转速以外,磁通也是一个独立的输入变量,并且磁通的建立和转速的变化是同时进

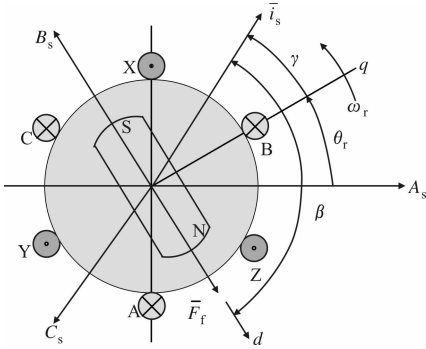
行的。因此,交流电动机是一个多变量(多输入多输出)系统,而电压、频率、磁通、转速之间又互相影响,所以是强耦合的多变量系统。

(2)由于在交流电机中,转矩等于磁通和电流的乘积,感应电势是转速和磁通的乘积,它们都是同时变化的,数学模型就含有两个变量的乘积项。这样一来,即使不考虑磁饱和等因素,数学模型也是非线性的。

(3)以永磁同步电动机为例,有三相定子绕组,就会有 3 个电磁惯性再加上运动系统的机电惯性。即使不考虑变频装置中的滞后因素,它至少也是一个四阶系统,异步电动机的阶数更高。

总的来说,交流电动机的数学模型是一个高阶、非线性、强耦合的多变量系统,在进行系统建模时通常需要做一定的简化或假设。对图 2 所示的二极 PMSM 交流伺服电机,若假设:

- (1)忽略铁心饱和;
- (2)不计涡流和磁滞损耗;
- (3)转子上没有阻尼绕组,永磁体没有阻尼作用;
- (4)反电动势是正弦的,可以推导出交流永磁同步伺服电动机在两相旋转坐标系(d - q 坐标系)下的数学模型^[11-12]。



A_s 、 B_s 、 C_s 为 A、B、C 相绕组轴线;A-X、B-Y、C-Z 为 A、B、C 相线圈

图 2 数控滚齿机工件轴传动模型

d - q 坐标系定子电压矢量方程

$$U_q = R_s i_q + p\psi_q + P_m \omega_r \psi_d \quad (1)$$

$$U_d = R_s i_d + p\psi_d - P_m \omega_r \psi_q \quad (2)$$

式中: U_d 、 U_q 为 d 、 q 轴电压; i_d 、 i_q 为 d 、 q 轴电流; R_s 为定子相电阻; ω_r 为转子角速度; P_m 为级对数。

磁链方程

$$\psi_q = L_q i_q \quad (3)$$

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f \quad (4)$$

式中: L_d 、 L_q 为 d 、 q 轴电感; ψ_f 为永磁体基波励磁磁链链过定子磁链 $\psi_f = L_f i_f$ 。

转矩方程

$$T_d = P_m (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (5)$$

$$T_d = P_m [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (6)$$

机械转矩方程

$$T_d = K_t' \Phi_f i_q = K_t i_q = T_l + B \omega_r + J p \omega_r \quad (7)$$

式中: p 为微分算子; Φ_f 为转子磁通; K_t 为马达转矩常数。

T_d 与 i_q 解耦,令 $i_q = 0$,有

$$T_d = P_m [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (8)$$

$$T_d = P_m [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] = P_m \psi_f i_q \quad (9)$$

$$P_m T_d = P_m P_m \psi_f i_q \quad (10)$$

假定永磁同步电机转子为圆筒形,有 $L_d = L_q = L_a$,状态方程为

$$\dot{i}_q = -\frac{R_s}{L} i_q - \frac{P_m \omega_r \psi_f}{L} + \frac{U_q}{L} \quad (11)$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{P_m T_d i_q}{J} - \frac{B \omega_r}{J} - \frac{T_l}{J} = \frac{K_t i_q}{J} - \frac{B \omega_r}{J} - \frac{T_l}{J} \quad (12)$$

即

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_a} & -\frac{P_m \psi_f}{L_a} \\ \frac{P_m P_m \psi_f}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U_q}{L_a} \\ -\frac{T_l}{J} \end{bmatrix} \quad (13)$$

在交流伺服电机的实际驱动电路中,一般采用闭环电流比例调节,设电流环增益为 K_e ,感应电动势为 K_u ,电流环反馈系数为 K_r ,可得永磁交流伺服电机的传递函数框图,如图 3 所示。

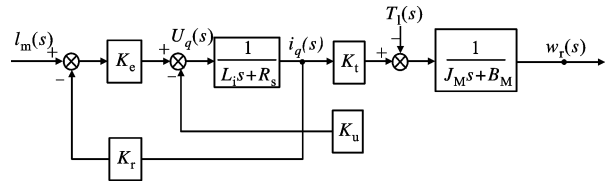


图 3 PMSM 传递函数框图

PMSM 的传递函数为

$$G_D(s) = \frac{\omega_r(s)}{I_m(s)} = \frac{K_t K_e}{J_M L_i} \left(s^2 + \left(\frac{R_s + K_e K_r}{L_i} + \frac{B}{J_M} \right) s + \frac{R_s + K_e K_r}{L_i} \frac{B}{J_M} + \frac{K_t K_u}{J_M L_i} \right)^{-1} \quad (14)$$

令

$$\alpha_0 = \frac{B R_s + B K_r K_e + K_t K_u}{K_t K_e} \quad (15)$$

$$\alpha_1 = \frac{J_M R_s + J_M K_r K_e + B L_i}{K_t K_e} \quad (16)$$

$$\alpha_2 = \frac{J_M L_i}{K_i K_e} \quad (17)$$

则

$$G_D(s) = \frac{1}{\alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0} \quad (18)$$

1.2 工件轴机械传动部分的数学模型

滚齿加工工件轴是一个旋转工作台,角度位置为输出的机械传动系统,其模型见图1。各传动变量之间的关系如下

$$\left. \begin{aligned} \theta_m &= \frac{T_m}{K_1} \\ \theta_L &= \frac{T_2}{K_L} = \frac{Z}{K} \frac{T_m}{K_L} = i \frac{T_m}{K_L} \\ \theta_\Sigma &= \theta_m + \frac{Z}{K} \theta_L = T_m \left(\frac{1}{K_1} + \frac{i^2}{K_L} \right) = \frac{T_m}{K_\Sigma} \\ K_\Sigma &= \left(\frac{1}{K_1} + \frac{i^2}{K_L} \right)^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

根据传动系统模型,可列方程

$$\left. \begin{aligned} K_M(\theta_M(t) - \frac{Z}{K} \theta_L(t)) &= J_1 \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{Z}{K} \theta_L(t) \right) + \frac{K}{Z} T(t) \\ T(s) &= (J_2 + J_L) \frac{d^2}{dt^2} \theta_L(t) + B_L \frac{d\theta_L(t)}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

将式(20)进行拉式变换,得

$$\left. \begin{aligned} K_M(\theta_M - \frac{Z}{K} \theta_L(s)) &= J_1 \frac{Z}{K} \theta_L(s) s^2 + \frac{K}{Z} T(s) \\ T(s) &= (J_2 + J_L) \theta_L(s) s^2 + B_L \theta_L(s) s \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

根据式(21),可求出系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{\theta_L(s)}{\theta_M(s)} = \frac{K_M \left(\left(\frac{Z}{K} J_1 + \frac{K}{Z} J_2 + \frac{K}{Z} J_L \right) s^2 + B_L s + \frac{Z}{K} K_M \right)^{-1}}{\quad} \quad (22)$$

J_Σ 为工件轴的转动惯量,公式为

$$J_\Sigma = \frac{Z}{K} J_1 + \frac{K}{Z} J_2 + \frac{K}{Z} J_C \quad (23)$$

式(22)可变形为

$$\begin{aligned} G_M(s) &= \frac{K_M}{J_\Sigma} \left(s^2 + \frac{B_L}{J_\Sigma} s + \frac{Z}{K J_\Sigma} K_M \right)^{-1} = \\ &= \frac{K}{Z} \omega_n^2 \left(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \right)^{-1} \quad (24) \\ \omega_n &= \left(\frac{Z K_M}{K J_\Sigma} \right)^{1/2}; \quad \xi = \left(\frac{K B_L^2}{4 Z J_\Sigma K_M} \right)^{1/2} \end{aligned}$$

式中: ω_n 为二阶环节的无阻尼固有频率; ξ 为二阶环节的阻尼比。由式(24)可知,数控滚齿机工件轴机械传动部分是二阶振荡环节。

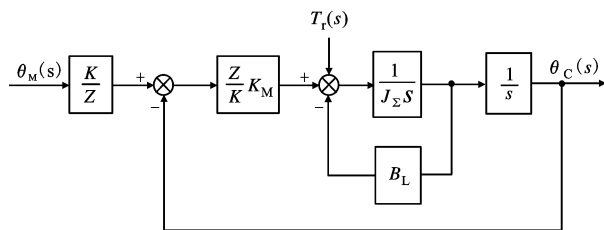
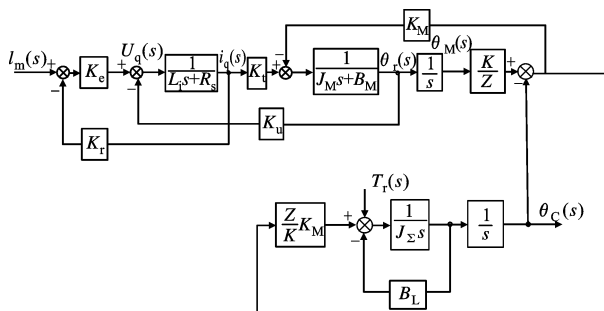


图4 简化后机械系统模型传递框图

1.3 工件轴数控伺服系统的数学模型

对上文提到的伺服电机模型和工件轴机械传动系统伺服模型进行简化,可得到工件轴数控伺服系统模型,框图如图5所示。



L_i : 电感系数; J_M : 转动惯量; B_M : 摩擦阻尼; K_v : 速度环增益;

K_p : 位置环比例增益系数; K_d : 单位角度的脉冲数

图5 滚齿机工件轴数控伺服系统模型

由式(18)和式(24),可得滚齿机工件轴数控系统伺服模型传递函数为

$$G(s) = \frac{K_p (K/Z) \omega_n^2}{s(\alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0)(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (25)$$

2 仿真及实验结果

2.1 仿真

根据上文分析可知,数控滚齿机工作台传动部分可以简化为二阶模型。由于 J_1 相对较小且已等效计入到 J_Σ 中,滚齿机工件轴的整体伺服模型简化为等效的双惯量伺服系统。根据上述描述,通过Matalab对伺服模型进行在线仿真,其Simulink仿真模型见图6。

为确保工件轴输出转角位置和速度的准确性和快速性,对伺服系统采用闭环的PID控制方法。伺服系统参数和控制参数如表1所示,选择速度环中的外加干扰 T_f 为黏性摩擦模型^[16-19]。该模型由静摩擦项、库伦摩擦项、黏滞摩擦和Stribeck项组成,摩擦力表达式如下

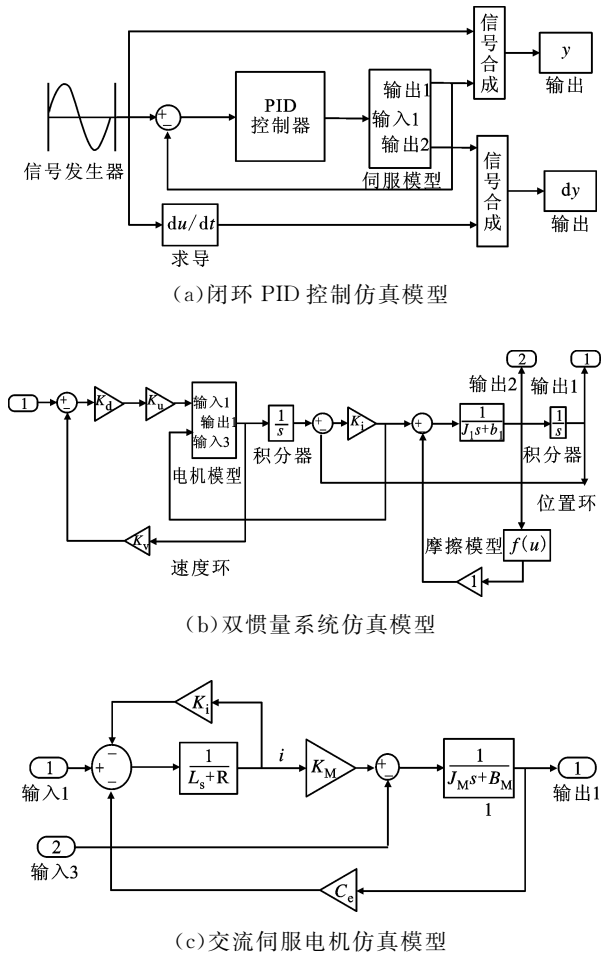


图 6 数控滚齿机工件轴伺服系统 Simulink 仿真模型

$$F(t) = F_c \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + \alpha \dot{\theta} + (F_s - F_c) \exp\left(-\left(\frac{\dot{\theta}}{\dot{\theta}_s}\right)^2\right) \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) \quad (26)$$

式中: F_c 为库伦摩擦力; σ 为黏滞摩擦系数; F_s 为静摩擦力; θ_s 为临界 Stribeck 速度。模型输出如图 7 所示,表明了在不同的摩擦阶段摩擦力矩与速度之间的关系,即 Stribeck 曲线。

输入指令为正弦的位置信号 $f(t) = A \sin(\omega 2 \pi t)$, 仿真参数设置如表 1 所示,仿真结果如图 8 所示。由于静摩擦的作用,在低速跟踪时,位置跟踪存在平

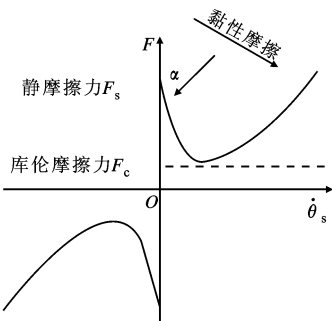


图 7 本文仿真模型的 Stribeck 曲线

顶现象,速度跟踪存在死区现象。

表 1 伺服系统参数

参数	数值	参数	数值
$J_m / \text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	0.001 37	K_{pp}	100
$B_m / \text{N} \cdot (\text{m}/\text{s})^{-1}$	0.01	$K_d / \text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$	6
R_s / Ω	1.05	$K_v / \text{V} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{rad}^{-1}$	2
L_a / H	0.37	$J_L / \text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.299 4
$K_i / \text{V} \cdot \text{A}^{-1}$	0.01	$B_L / \text{N} \cdot (\text{m}/\text{s})^{-1}$	8
K_l	5	i	72
$K_u / \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$	11	$F_c / \text{N} \cdot \text{m}$	15
$K_e / \text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$	1.18	$F_s / \text{N} \cdot \text{m}$	20
K_p	1.5	$\sigma / \text{N} \cdot \text{ms} \cdot \text{rad}^{-1}$	2.0
K_{dd}	50	α	0.001
K_{ii}	0.01		

注: L_a 为电机等效电感; K_{pp} 、 K_u 、 K_{dd} 为 PID 参数; B_L 为等效阻尼。

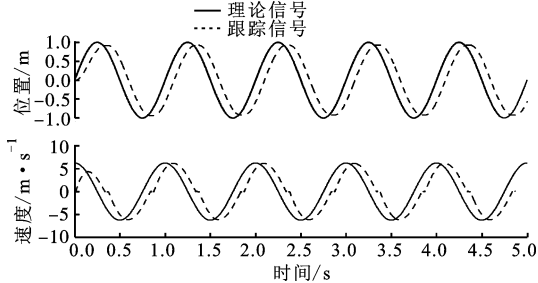
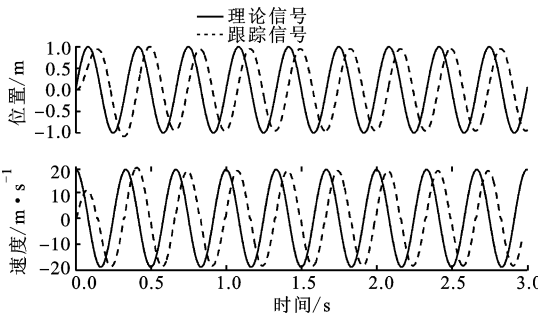


图 8 正弦位置和速度跟踪情况

2.2 实验结果

通过 PID 的参数整定控制,改变输入指令的正弦输入信号频率,仿真结果如图 9 所示。当正弦指令频率为 3 Hz 时,位置和速度的理论信号和跟随信号的误差较小;当正弦指令频率增大时,位置和速度跟踪误差增大;当指令频率上升到 31 Hz 时,跟随位置和跟随速度的动态响应速度和幅值均不明显。

实验装置如图 10 所示。该实验基于西安交通大学机械学院自主研发的 GCN-1 型数控系统(已经应用于数控滚齿机改造),通过对不同频率的 C 轴



(a) $\omega = 3 \text{ Hz}$

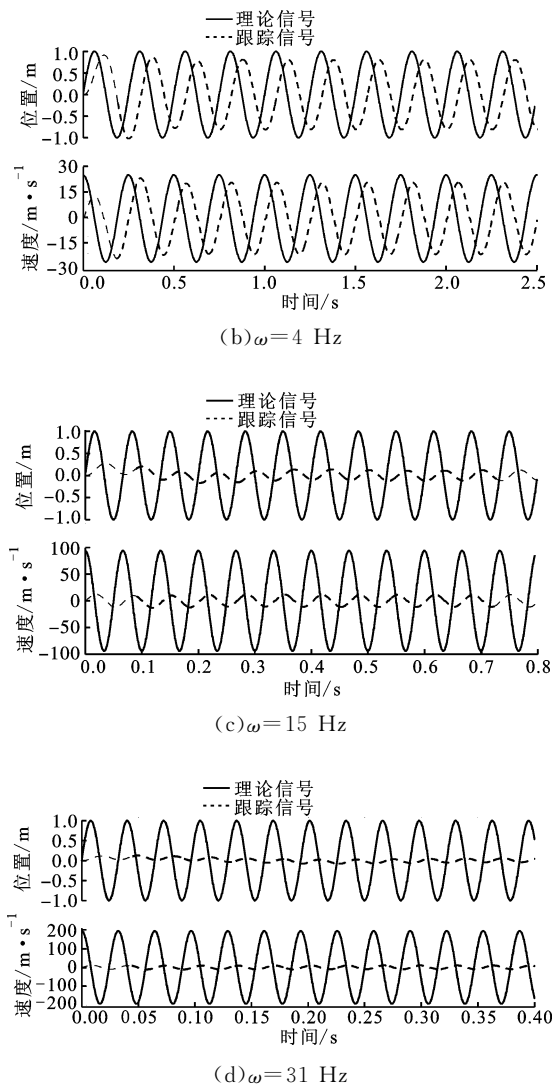


图 9 不同频率的位置和速度跟随仿真结果

指令速度的改变来观测跟随转速的动态响应状态。实验采用的是主滚刀转速为 288 r/min,此时加工 32 齿的齿轮时,工件轴的转速为 9 r/min,因此对工件轴电机在相对空载状态下施以常量为 9 r/min、幅值为 1 r/min 的正弦速度指令激励,实验结果如图 11 所示。



图 10 滚齿机 C 轴转速测试实验台

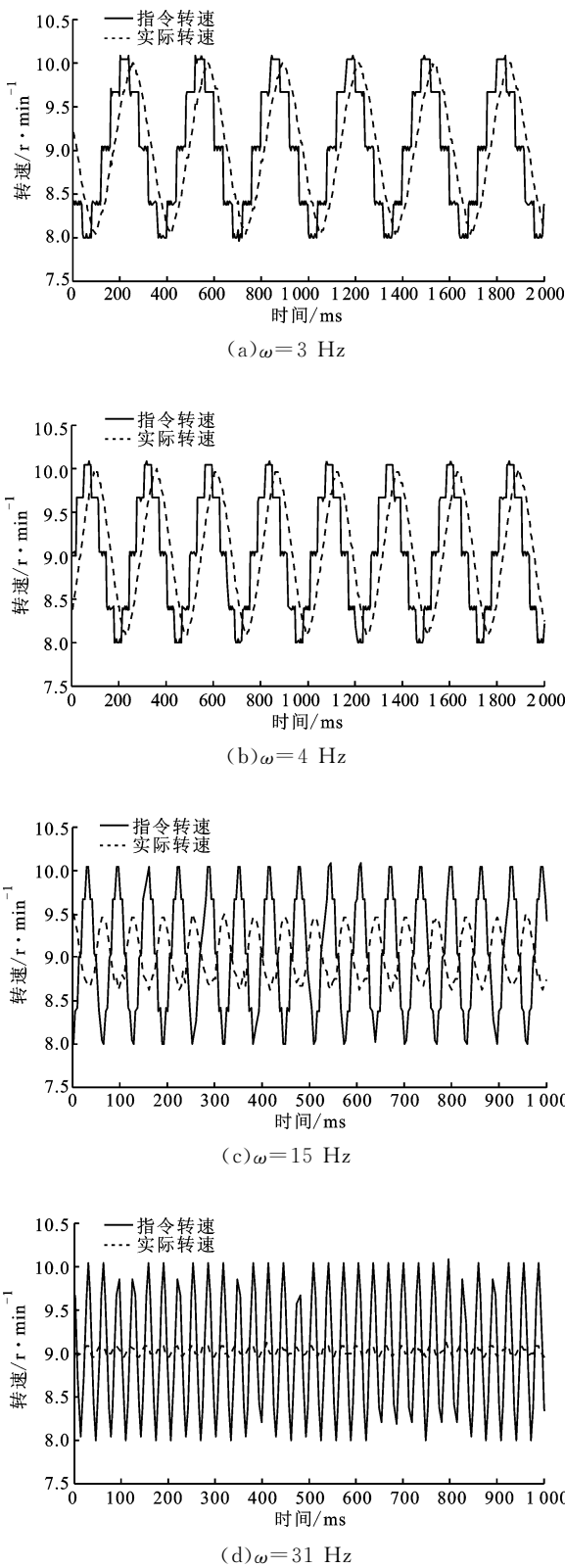


图 11 不同频率下工件轴转速跟随实验结果

根据实验结果可以发现:当 ω 为 3 Hz 时,工件轴实际转速可以很好地跟随指令转速;当 ω 为 4 Hz 时,转速跟随的幅值有所下降;当 ω 增大到 15 Hz 时,实际转速的跟随效果明显降低;当 ω 增大到 31 Hz 时,

工件轴实际转速已经不能跟随指令转速。实验进一步验证了图 9 的仿真效果和所建模型的可靠性。

3 结 论

本文通过对数控滚齿机工件轴的运动特性的分析,以及对永磁交流伺服电机的矢量控制原理进行研究,建立了五轴数控滚齿机工作台的伺服控制系统数学模型。该模型通过 Matlab 软件的动态仿真和实验检测结果高度契合,真实地反映出数控滚齿机工作台动态特性,充分证明了模型的实用性和正确性,为数控滚齿机及数控回转工作台伺服进给系统的设计及性能优化提供了理论依据。另外,除数控滚齿机工件轴的控制以外,本文模型同样适用于数控机床、天文望远镜、雷达、测试转台等具有伺服转台控制的工程应用领域,具有非常广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] YU C J, HUANG X D, FANG C G. Research on dynamic characteristics of NC rotary table considering leakage factors of its hydrostatic guideway [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2012, 226(C11): 2674-2685.
- [2] 王时龙, 杨永, 周杰, 等. 大型数控滚齿机热误差补偿建模 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(10): 3066-3072.
WANG Shilong, YANG Yong, ZHOU Jie, et al. Modeling of thermal error compensation of large-scale numerical control gear hobbing machine [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(10): 3066-3072.
- [3] YOUNKIN G W. Modeling machine tool feed servo drives using simulation techniques to predict performance [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1991, 27(2): 268-274.
- [4] 梅雪松, 陶涛, 堤正臣, 等. 高速、高精度数控伺服工作台摩擦误差研究 [J]. 机械工程学报, 2001, 37(6): 76-81.
MEI Xuesong, TAO Tao, DI Zhengchen, et al. Study of the friction error for high-speed high precision table [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(6): 76-81.
- [5] 陈光胜, 梅雪松, 陶涛. X-Y 工作台摩擦误差补偿方法的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(1): 69-73.
CHEN Guangsheng, MEI Xuesong, TAO Tao. Compensation of friction error for X-Y table [J]. Journal of

- Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(1): 69-73.
- [6] KIM M S, CHUNG S C. Integrated design methodology of ball-screw driven servomechanisms with discrete controllers: part I Modeling and performance analysis [J]. Mechatronics, 2006, 16(8): 491-502.
- [7] PANDILOV Z, MILECKI A, NOWAK A, et al. Virtual modelling and simulation of a CNC machine feed drive system [J]. Transactions of FAMENA, 2016, 39(4): 37-54.
- [8] PANDILOV Z, VLADIMIR D. Analytical determination of the CNC machines high-speed feed drives position loop gain [J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 555: 505-510.
- [9] ERKORKMAZ K, ALTINTAS Y. High speed CNC system design: part III High speed tracking and contouring control of feed drives [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(11): 1637-1658.
- [10] KAMAT S, JUNNURI R K. Model predictive control approaches for permanent magnet synchronous motor in virtual environment [C] // 2016 IEEE ICPEICES. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 4581-4592.
- [11] 宫玉琳. 永磁同步电动机伺服系统自适应逆控制策略研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2013: 10-27.
- [12] 陶涛. 高速高精度运动控制器的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2005: 39-61.
- [13] MORA A, ORELLANA A, JULIET J. Model predictive torque control for torque ripple compensation in variable-speed PMSMs [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4584-4592.
- [14] 孙环阳, 黄筱调, 洪荣晶, 等. 永磁同步电机矢量控制系统的仿真研究 [J]. 机械设计与制造, 2010(3): 122-124.
SUN Huanyang, HUANG Xiaotiao, HONG Rongjing, et al. Simulation research on vector control system of permanent magnet synchronous motor [J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(3): 122-124.
- [15] FUENTES E J, SILVA C A, YUZ J I. Predictive speed control of a two-mass system driven by a permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(7): 2840-2848.
- [16] LUKICHEV D V, DEMIDOVA G L. PID-type fuzzy adaptive control for two-mass servo-drive system: Design, simulation and experiment [C] // International Conference on Power Drives Systems (ICPDS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 1-5.

(下转第 75 页)