

doi:10.3785/j.issn.1006-754X.2019.03.011

# 基于状态空间模型的机床加工精度分析

黄 华<sup>1</sup>, 王庆文<sup>1</sup>, 郭润兰<sup>1</sup>, 刘晓健<sup>2</sup>, 张来喜<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730000;

2. 浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 伺服进给系统的机电耦合特性直接影响数控机床的加工精度, 单独针对伺服系统或机械系统建立的模型不足以准确分析系统参数对机床整机加工精度的影响。因此, 综合考虑机床伺服系统与机械结构之间的耦合关系, 建立伺服进给系统机电耦合动力学模型具有重要意义。首先, 为保证伺服进给系统建模精度, 利用状态空间法建立了机床机电耦合状态空间方程。其次, 建立了伺服进给系统机电耦合 Simulink 模型, 在此基础上采用复合控制提高系统的响应速度和加工精度。随后, 利用多体动力学软件建立机床进给系统的刚柔耦合动力学模型, 添加摩擦、阻尼等非线性因素, 并导入 Simulink 与伺服系统建立耦合关系。最终, 建立了卧式加工中心伺服进给系统的刚柔-机电耦合仿真加工平台, 通过模拟机床加工轨迹以验证机电耦合状态空间模型的可靠性。结果表明: 该状态空间模型能准确描述系统内部参数和系统输入输出的耦合关系; 采用复合控制结构能有效提高系统的响应速度和加工精度。研究结果为数控机床的仿真建模和提高加工精度提供理论依据, 为机床机电系统的设计提供有效指导。

**关键词:** 机电耦合; 状态空间模型; 复合控制; 伺服进给系统; 刚柔耦合

中图分类号: TP 391.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-754X (2019)03-0321-09

## Machining accuracy analysis of machine tool based on state space model

HUANG Hua<sup>1</sup>, WANG Qing-wen<sup>1</sup>, GUO Run-lan<sup>1</sup>, LIU Xiao-jian<sup>2</sup>, ZHANG Lai-xi<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The machining accuracy of the CNC (computer numerical control) machine tool is directly affected by the electromechanical coupling characteristics of the servo feed system, which means a model established for servo system or mechanical system alone is not sufficient to study the influence of system parameters on the machining accuracy exactly. Therefore, it is important to synthetically consider the coupling relationship between servo system and mechanical structure of machine tool and establish the electromechanical coupling dynamics model of the servo system. Firstly, in order to ensure the accuracy of servo feed system modeling, the mechanical and electromechanical coupling state space equations of machine tools were established by the state space method. Secondly, the electromechanical coupling Simulink model of servo feed system was established, and on this basis, the composite control was adopted to improve the responding speed and tracking accuracy of the system further. Subsequently, the rigid-flexible coupling dynamics model of machine tool feed system was established by using multi-body dynamics software, and the dynamics model was imported into Simulink and coupled with the servo control system after added the nonlinear factors such as friction and damping. Finally, the rigid-flex and electromechanical coupling simulation platform of the horizontal machining center servo feed system was established and the reliability of the state space model was verified by simulating the

收稿日期: 2018-11-22

本刊网址·在线期刊: <http://www.zjujournals.com/gcsjxb>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51565030, 51765031)

作者简介: 黄华(1978—), 男, 湖南长沙人, 副教授, 博士, 从事复杂机电系统的集成技术、机械装备结构动力学分析与控制等研究, E-mail: [hh318872@126.com](mailto:hh318872@126.com), <https://orcid.org/0000-0002-4945-5888>

machining path on the platform. The results showed that the coupling relationship between the internal parameters and the input and output parameters of the system was described more accurately by the state space model, and the performance of the system was improved greatly by the compound control structure. The research results can provide theoretical basis for theoretical modeling and improvement of machining accuracy of CNC machine tools, and provide effective guidance for the electromechanical system design of CNC machine tools.

**Key words:** electromechanical coupling; state space model; compound control; servo feed system; rigid-flexible coupling

现代制造业对切削加工效率和精度的要求在不断提高。然而在常规的切削加工中,机床动态误差限制了机床进给系统的响应速度,使得进给系统因无法实时跟踪快速变化的输入信号而产生运动延迟,从而降低了机床的加工精度。动态误差的大小主要由伺服控制参数与机械动力学特性之间的耦合关系决定。建立准确的数学模型,分析动态误差产生过程,提出高效的检测、辨识方法以及优化策略是研究机床动态精度的突破口<sup>[1]</sup>。因此,为了提高伺服系统的动态性能和机床加工精度,需要将机械系统和伺服系统耦合起来,通过建立准确的数学模型对整机加工精度进行分析。

目前,许多研究人员在利用机床机电耦合模型分析机床动态特性方面做了大量工作。李杰等<sup>[2]</sup>基于线性进给系统的柔性特征,建立了进给系统的机电-刚柔耦合动力学模型,分析了进给系统产生动态误差的原因以及多种复杂因素对动态误差产生的影响,结果表明该耦合模型能够较好地描述动态误差产生的机理。林利红等<sup>[3]</sup>综合考虑了机床控制部分和机械传动部分之间的耦合因素,建立了状态空间模型,分析了机电系统之间的复杂耦合关系。Lee等<sup>[4]</sup>提出了一种集成动力学模型,并将高速情况下的切削模拟结果和实测结果作比较,验证了预测模型的可靠性。Kim等<sup>[5-6]</sup>针对丝杠传动系统,建立了包含进给传动和伺服控制的机电耦合模型,结果表明进给传动系统和伺服控制系统设计参数间的耦合关系对整个伺服进给系统的性能产生了极大的影响。姚延凤等<sup>[7]</sup>在考虑刚柔耦合影响的基础上增加了对控制系统影响的研究,结果表明控制参数和机械结构共同对机床直线电机驱动系统的动态性能产生了影响。赵大兴等<sup>[8]</sup>根据多刚体动力学理论建立了机床进给驱动系统的数学模型,并利用 ADAMS、MATLAB/Simulink 实现了机床机电耦合联合仿真,最终实现了机电系统动态特性的优化。宁建荣等<sup>[9]</sup>针对直接驱动系统受机械部件弹性变形和控制参数共同影响的问题,利用 Lagrange-Maxwell 方程建立了机电耦合理论模型,并通过建立联合仿真模型研究了系统耦合

参数对其动力学特性的影响。邓昌奇等<sup>[10]</sup>利用前馈比例-积分的控制方法,实现了对位置环节的精准控制,所建控制系统信号跟踪性好且抗干扰性强。赵彤等<sup>[11]</sup>利用传递函数等效机械结构特性的机电联合仿真建模的方法,研究了机床各运动轴之间的耦合问题,并提出了控制参数的选择方法。

因限于模型误差、控制形式、控制器精度等多重因素的影响,上述研究未通过将控制器精度、控制形式和机械结构耦合起来建立伺服进给系统的状态空间模型,且未针对机床加工精度进行虚拟样机仿真加工研究。考虑到状态空间模型能够全面反映系统独立变量的特征,且适用于非线性系统的建模及分析,本文以某卧式加工中心三轴伺服进给系统(见图1)为研究对象,建立了加工中心的机电耦合状态空间模型并通过虚拟样机技术进行了加工仿真研究;同时,研究了伺服进给系统的动态特性对加工精度的影响,并提出了提高机床加工精度的改进措施,以期为机床机电系统的设计和优化提供参考。

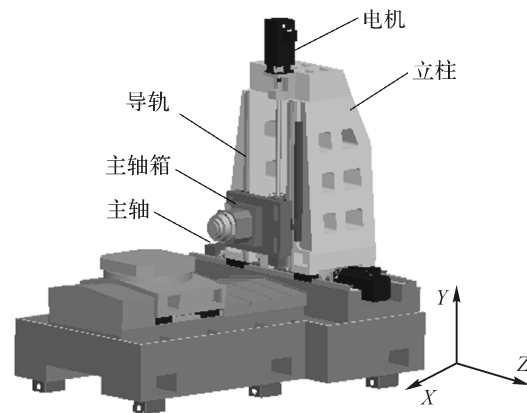


图1 卧式加工中心三轴伺服进给系统

Fig. 1 Three-axis servo feed system of horizontal machining center

## 1 伺服进给系统状态空间模型的建立

针对某型卧式加工中心伺服进给系统,根据文献[12]描述的机电耦合建模与求解方法建立其机电耦合模型,该加工中心单轴伺服进给系统结构如图2所示,其工作原理如图3所示。

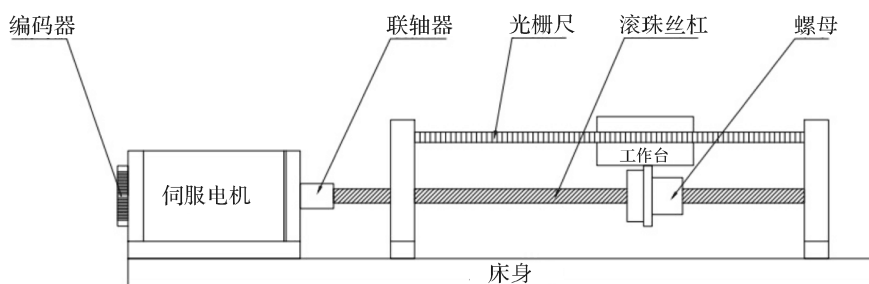


图2 卧式加工中心单轴伺服进给系统的结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of uniaxial servo feed system in horizontal machining center

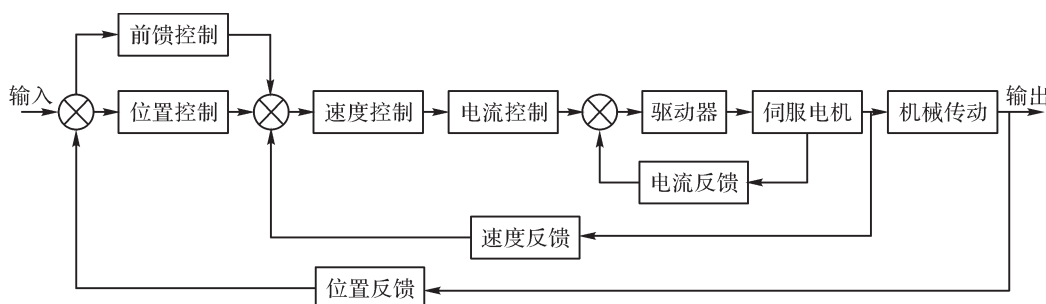


图3 卧式加工中心伺服进给系统的工作原理

Fig. 3 Working principle of servo feed system in horizontal machining center

伺服进给系统是一个多输入、多输出的强耦合机电系统。利用状态空间法建立伺服进给系统的数学模型,以更准确地描述系统内部状态和外部输入与输出变量之间的联系。该模型中包含了伺服电机模型,每个控制环都设置了控制器以保证控制精准;加入低通电流滤波器以防止系统产生震荡,还考虑了摩擦、延迟等非线性环节的影响。该伺服进给系统的控制环结构从内到外依次为电流环、速度环、位置环,系统的控制形式为复合控制形式。

### 1.1 控制系统数学模型

电流调节器和速度调节器均采用比例-积分(proportion integration, PI)控制,位置调节器采用比例控制。

电流滤波器为二阶低通滤波器,其传递函数为:

$$G(s) = \frac{\omega_d^2}{s^2 + 2\zeta\omega_d s + \zeta^2}$$

其中: $\omega_d$ 为零阻尼震荡频率,rad/s; $\zeta$ 为阻尼比。

驱动器采用正弦波脉宽调制(sine pulse width modulation, SPWM)并转化为惯性环节,取  $T_{pwm} = \frac{1}{2f_z}$ ,其中  $f_z$  为 SPWM 三角波载波频率,Hz。

SPWM 逆变器的放大系数  $k_{pwm} = \frac{\sqrt{2} u_d}{4A_z}$ ,其中  $u_d$  为逆变器输出电压幅值,  $A_z$  为三角波载波的幅值。

伺服电机采用永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM),并假设电机铁心不饱和,不计磁滞和涡流损耗,转子上无阻尼绕组,采用  $d$

轴电流  $i_d = 0$  A 的矢量控制方式。当永磁同步电机转子为圆筒形且  $L_d = L_q = L$  时,可得在  $d-q$  旋转坐标系上的永磁同步电机的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{\omega}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{2}{3} \frac{k_t}{L} \\ \frac{k_t}{J} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_q}{L} \\ -\frac{T_l}{J} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $R$ 为绕组的等效电阻, $\Omega$ ;  $L$ 是电枢电感,  $L_d$ 和  $L_q$  分别为  $d$ 轴与  $q$ 轴电感, H;  $k_t$ 为电机转矩系数,  $k_t = \frac{3}{2} P \Psi_f$ ,其中,  $P$ 为电机极对数,  $\Psi_f$ 为转子磁场的等效磁链;  $\omega_m$ 为转子角速度, rad/s;  $T_l$ 为折算到电机轴上的负载转矩, N·m;  $i_q$ 为  $q$ 轴电流, A;  $u_q$ 为  $q$ 轴电压, V;  $J$ 为折算到电机轴上的总转动惯量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

### 1.2 进给系统数学模型

以往针对进给系统的设计,一般是将进给系统的刚度、阻尼、惯量等都归算到一个整体上,但这种建模方法的精度较低。本文将进给系统拆分为几个相互独立的部分,考虑每部分之间的连接刚度,根据多体系统动力学进行系统建模。

将电机转子和联轴器轴套、丝杠和联轴器的另一个轴套分别视为一个整体,考虑丝杠螺母与丝杠间的连接刚度以及联轴器两轴套之间的扭转刚度,最终建立的进给系统的动力学模型如图4所示。

根据图4可知所建立的进给系统的动力学方程为:

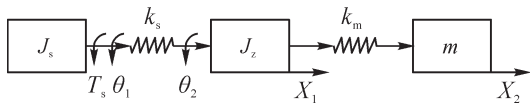


图 4 卧式加工中心进给系统动力学模型

Fig. 4 Dynamics model of feed system in horizontal machining center

$$\begin{cases} J_s \ddot{\theta}_1 = T_s - k_s(\theta_1 - \theta_2) \\ J_z \ddot{\theta}_2 = k_s(\theta_1 - \theta_2) - \frac{P_h}{2\pi} k_m(X_1 - X_2) \\ m \ddot{X}_2 = k_m(X_1 - X_2) \\ X_1 = \frac{P_h}{2\pi} \theta_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $J_s$ 为电机转子及轴套的总转动惯量， $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ； $T_s$ 为电机输出力矩， $\text{N}\cdot\text{m}$ ； $k_s$ 为联轴器两轴套间的扭转刚度， $\text{MN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}$ ； $\theta_1$ 为电机转子旋转角度， $\text{rad}$ ； $\theta_2$ 为丝杠转动角度， $\text{rad}$ ； $J_z$ 为丝杠与其轴套的总转动惯量， $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ； $X_1$ 为丝杠旋转角度按照导程 $P_h$ 折算出的位移， $\text{mm}$ ； $X_2$ 为工作台的直线位移， $\text{mm}$ ； $k_m$ 为螺母与丝杠间的连接刚度， $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ ； $m$ 为工作台质量， $\text{kg}$ 。

### 1.3 非线性环节数学模型

非线性因素主要考虑运动结合面的摩擦与控制环节的延迟特性。摩擦是机床产生动态误差和极限环的重要原因，会影响整机的加工精度。此外，由于各环节的控制器都具有响应延迟的特性，这会导致伺服进给系统仿真结果出现较大偏差。因此，需要考虑摩擦与延迟特性对整机加工精度的影响。在仿真平台中将延迟特性考虑为纯滞后环节，利用Simulink中的transport delay模块实现。

以图1所示的某卧式加工中心三轴伺服进给系统为研究对象，经计算，得到进给系统的摩擦模型参数的取值，如表1所示，在仿真模型中使用m语言按图3所示的伺服进给系统的工作原理建立摩擦模型。

丝杠处的等效摩擦力矩 $T_f$ 视为库伦摩擦力矩，

表 1 伺服进给系统摩擦模型参数

Table 1 Friction system parameters for servo feed system

参数	数值
静摩擦系数 $\mu_s$	0.041
库伦摩擦系数 $\mu_c$	0.04
鬃毛刚性系数 $\sigma_0$	$1 \times 10^5 \text{ N/m}$
运动阻尼系数 $\sigma_1$	$217 \text{ Ns/m}$
黏性摩擦系数 $\sigma_2$	$0.5 \text{ Ns/m}$
Stribeck速度 $v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.002
工作台质量 $m/\text{kg}$	2 000

表示为：

$$T_f = T_c \text{Sgn}(v) \quad (3)$$

式中： $T_c$ 为库伦摩擦力矩， $\text{N}\cdot\text{m}$ ； $v$ 是相对滑动速度， $\text{m/s}$ 。

工作台导轨处的摩擦视为Luger摩擦，由鬃毛挠曲产生，其总摩擦力为：

$$F_0 = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 v \quad (4)$$

式中： $z$ 为鬃毛平均变形量， $\dot{z} = v - \frac{\sigma_0}{g(v)} z |v|$ ， $\text{m}$ 。

$g(v)$ 为非线性函数且 $g(v) > 0$ ，由斯特里贝克(Stribeck)效应描述：

$$\begin{cases} g(v) = f_c + (f_s - f_c) e^{-\left(\frac{v}{v_s}\right)^2} \\ f_s = \mu_s mg \\ f_c = \mu_c mg \end{cases} \quad (5)$$

式中： $f_c$ 为库伦摩擦力， $\text{N}$ ； $f_s$ 为最大静摩擦力， $\text{N}$ 。

### 1.4 基于状态空间模型的机电耦合模型

联立上述数学模型，加入三环控制后，得到卧式加工中心伺服进给系统的动态结构图，如图5所示。取动态结构图中各积分器的输出 $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}\}$ 为状态变量，得到描述整个伺服进给系统动力学特性的微分方程组(6)。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{k_v}{J_z} x_6 - k_{p3} (k_p x_{11} + F) \\ \dot{x}_2 = \frac{k_{p2}}{\tau_2} x_1 + k_{p2} k_{p3} (F - x_8) - \frac{k_{p2}}{J_z} x_6 - \frac{x_4}{L} \\ \dot{x}_3 = \frac{k_z}{t_z} x_2 - \frac{k_i}{L} x_5 \\ \dot{x}_4 = -\frac{x_4}{T_{pwm}} + \frac{k_{p1}}{\tau_1} x_3 + \frac{k_{p1} k_z}{t_z} x_2 - \frac{k_{p1} k_i}{L} x_5 \\ \dot{x}_5 = \frac{k_{pwm}}{T_{pwm}} x_4 - \frac{R}{L} x_5 - \frac{k_c}{J_z} x_6 \\ \dot{x}_6 = \frac{k_i}{L} x_5 - k_s x_7 - \frac{k_s}{J_s} x_8 \\ \dot{x}_7 = \frac{x_6}{J_z} \\ \dot{x}_8 = k_s x_7 - \frac{k_s}{J_s} x_8 - \frac{P_h^2}{4\pi^2} k_m x_9 + \frac{P_h}{2\pi} k_m x_{11} - T_f \\ \dot{x}_9 = \frac{x_8}{J_s} \\ \dot{x}_{10} = \frac{P_h}{2\pi} k_m x_9 - k_m x_{11} - F_0 \\ \dot{x}_{11} = \frac{x_{10}}{m} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $F$ 为伺服进给系统的单位阶跃输入信号; $k_{p1}$ 为电流环增益, $k_{p2}$ 为速度环增益, $k_{p3}$ 为位置环增益,Hz; $k_p$ 为位置环反馈系数; $k_v$ 为速度环反馈系数; $k_i$ 为电流环反馈系数; $k_c$ 为整流放大系数; $\tau_1$ 为电流环积分时间常数, $\tau_2$ 速度环积分时间常数,ms; $t_z$ 为滞后时间,ms。

将方程组(6)写成矩阵形式,得到机电耦合状态空间方程(7):

$$\dot{x} = Ax + Bu + C \tag{7}$$

其中:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [\dot{x}_1 \dot{x}_2 \dot{x}_3 \dot{x}_4 \dot{x}_5 \dot{x}_6 \dot{x}_7 \dot{x}_8 \dot{x}_9 \dot{x}_{10} \dot{x}_{11}]^T \\ B &= [k_{p1} \ k_{p2} \ k_{p3} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ C &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ T_f \ 0 \ F_0 \ 0]^T \end{aligned}$$

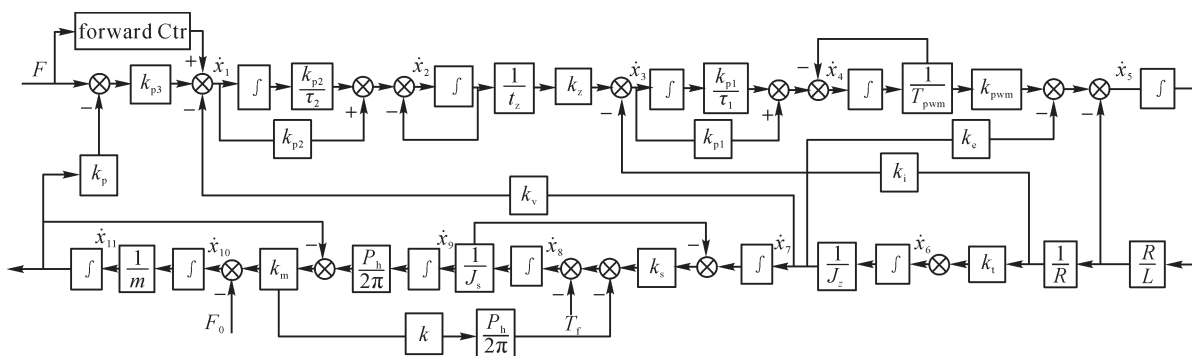


图5 卧式加工中心伺服进给系统动态结构图

Fig. 5 Dynamic structure diagram of servo feed system

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{k_v}{J_z} & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_p k_{p3} \\ \frac{k_{p2}}{\tau_2} & 0 & 0 & -\frac{1}{L} & 0 & -\frac{k_{p2}}{J_z} & 0 & -k_{p2} k_{p3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_z}{t_z} & 0 & 0 & -\frac{k_i}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_{p1} k_z}{t_z} & \frac{k_{p1}}{\tau_1} & -\frac{1}{T_{pwm}} & \frac{k_{p1} k_i}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k_{pwm}}{T_{pwm}} & -\frac{R}{L} & \frac{k_c}{J_z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_t}{L} & 0 & k_s & -\frac{k_s}{J_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_s & -\frac{k_s}{J_s} & \frac{P_h^2 k_m}{4\pi^2} & 0 & \frac{P_h k_m}{2\pi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{P_h k_m}{2\pi} & 0 & -k_m \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m} & 0 \end{bmatrix}$$

机电耦合状态空间方程考虑了伺服进给系统中各个子系统的动态特性,包括转动惯量,质量,摩擦、延迟等非线性因素,表明了伺服进给系统中电气控制与机械传动之间的深度耦合关系。该状态空间模型能够准确地分析参数变化对系统动态特性的影响,后期可通过优化系统参数来提高机床加工精度。

### 1.5 前馈控制器设计

前馈控制就是在输出响应出现偏差之前,通过对系统增加前馈函数,直接给出预知指令,从而使系统的响应在任何时刻都与激励信号完全相同。为减少前馈控制器对模型精度的依赖,采用前馈加反馈的复合控制结构,对位置环节进行改进。以X轴伺服进给系统机电耦合模型为例,得到的前馈控制器结构形

式为:

$$u_{FF}(t) = -\frac{1}{\eta} \ddot{\omega}_e + \frac{\zeta_1}{\eta} \dot{\omega}_e + \frac{\zeta_2}{\eta} \omega_e \quad (8)$$

式中:  $\omega_e$  为给定角速度值, rad/s;  $\eta = \frac{k_t}{JL}$ ;  $\zeta_1 = -\frac{k_t}{JL} \left( \frac{LC_b}{k_t} + \frac{RJ}{k_t} \right)$ ,  $\zeta_2 = -\frac{k_t}{JL} \left( k_e + \frac{RC_b}{k_t} \right)$ ,  $C_b$  为系统粘滞摩擦阻尼系数, Ns/m,  $k_e$  为反电势系数, Vs/rad。

## 2 伺服进给系统仿真模型的建立与分析

根据伺服进给系统机电耦合状态空间模型, 建立其 Simulink 模型, 如图 6 所示。该模型包含了根据系统响应特性设计的前馈控制器以及摩擦、延迟等非线性环节。伺服系统整定后的最终参数如表 2 所示。

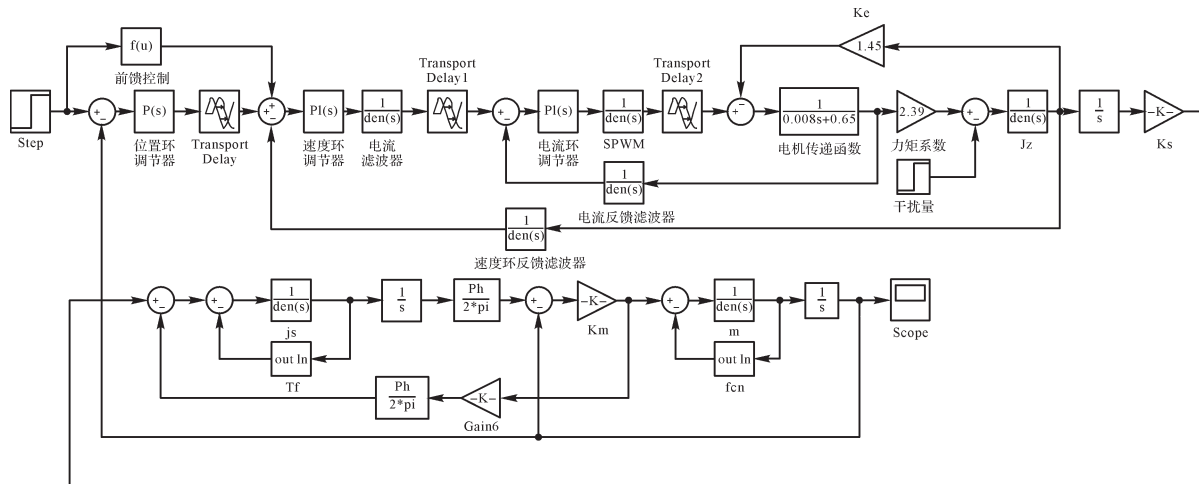


图 6 伺服进给系统机电耦合 Simulink 模型

Fig.6 Electromechanical coupling simulink model of servo feed system

表 2 伺服进给系统整定后的参数

Table 2 Parameters for the servo feed system after setting

控制参数	数值		
	X轴	Y轴	Z轴
位置环增益 $k_{p3}$ /Hz	11	21	17
速度环增益 $k_{p2}$ /Hz	150	60	60
电流环增益 $k_{p1}$ /Hz	80	80	80
电流环积分时间常数 $\tau_1$ /ms	16.4	14.7	15.5
速度环积分时间常数 $\tau_2$ /ms	98	87	94

通过添加单位阶跃信号来测试伺服进给系统机电耦合 Simulink 模型, 得到的经典三环控制与复合控制的系统响应曲线如图 7 所示。由响应曲线可以看出, 采用复合控制结构后的伺服进给系统无超调、响应快(滞后 40 ms)且稳定性高, 未出现系统震荡问题, 这说明该复合控制系统可以实现加工中心进给环节的快速定位, 保证切削加工的稳定性和精度。

## 3 刚柔-机电耦合仿真加工平台的建立

刚柔-机电耦合仿真加工平台由位置指令模块、伺服控制模块、进给驱动模块和显示模块组成。以 MATLAB/Simulink 为载体搭建仿真加工平台, 根据文献[13]的相关内容, 利用 ANSYS 将丝杠与螺母柔

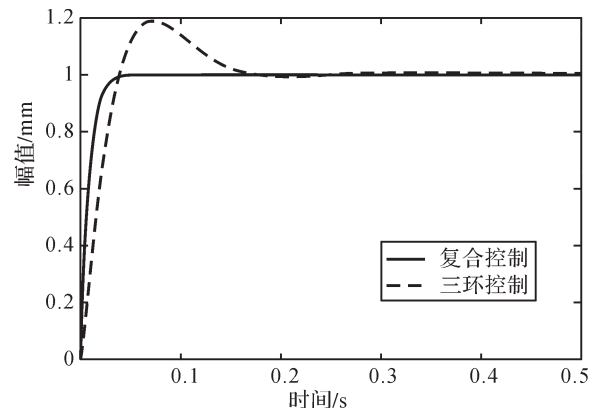


图 7 采用不同控制结构时系统响应比较

Fig.7 Comparison of system response with different control structures

性化并导入 ADAMS, 实现丝杠、螺母与机床整体的刚柔耦合, 然后通过 ADAMS/control 接口将整个刚柔耦合模型导入 Simulink 作为仿真加工的机械模块; 然后, 使用 S 函数编写位置指令信号实现机床的仿真加工, 分析显示模块采用 m 语言编写实现。经参数调整后得到的三轴刚柔-机电耦合仿真加工平台的结构如图 8 所示。

为实现对伺服进给系统机电耦合仿真模型的闭环反馈控制, 需建立机械系统与伺服系统之间的输入和输出状态变量与测量型参量的数据通信关系。模型中 ADAMS\_sub 的输入为电机的输出扭矩, 输出为

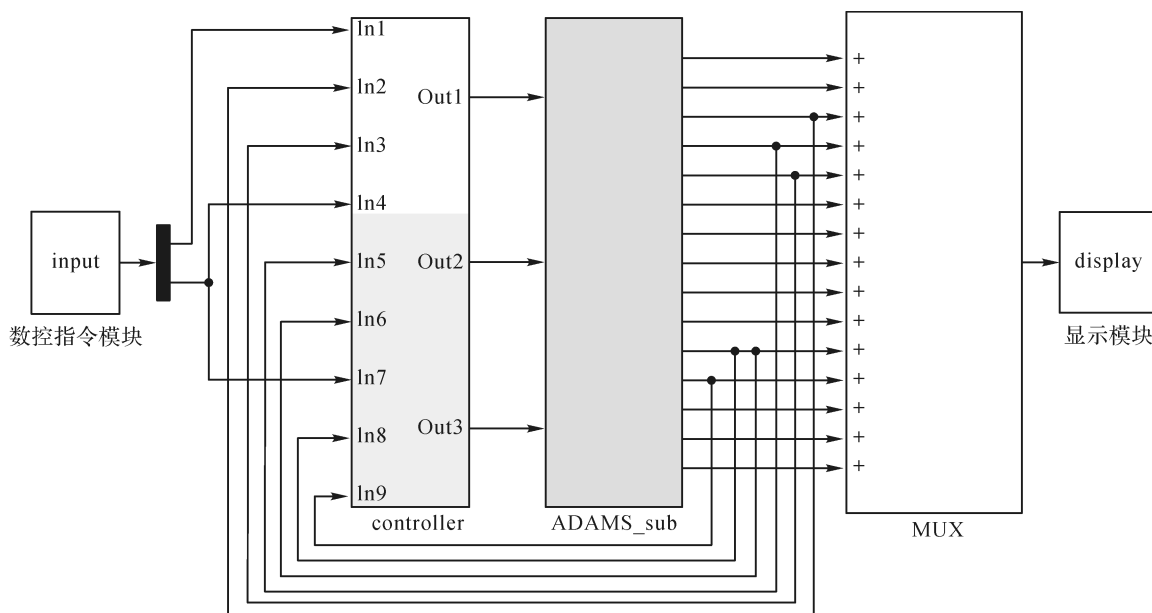


图8 伺服进给系统刚柔-机电耦合仿真加工平台的结构

Fig. 8 Structure of servo feed system rigid-flexible-electro mechanical coupling simulation platform

主轴箱、工作台以及立柱的位移、速度和加速度等,并将ADAMS\_sub输出信号反馈到伺服控制模块的输入端,形成加工中心三轴闭环反馈控制结构。

### 4 凸轮轮廓仿真加工误差分析

以平面凸轮与空间凸轮仿真加工为例,编写平面凸轮与空间凸轮的位置加工指令,在机电耦合仿真加工平台上分别给X、Y、Z三个运动轴输入进给驱动指令,然后进行联合仿真加工。仿真结束后,将各轴的响应曲线整合成加工轨迹,通过比较理论轮廓轨迹和仿真加工轨迹来分析仿真误差。

图9(a)与图10(a)分别是经典三环控制和复合控制下的平面凸轮仿真加工轨迹和空间凸轮仿真加工轨迹与理论轮廓轨迹的对比示意图,图9(b)是平面凸轮仿真加工轨迹的局部放大图,图10(b)是空间轨迹曲率较大处的仿真加工轨迹放大图。从图9(b)和图10(b)可以明显看出,复合控制下凸轮的仿真加工轨迹更贴近理论轮廓轨迹。以空间凸轮为例,选取图10(a)中曲率最大部位(B点)及其附近A、C两点为测试点,采集3个点的坐标值并计算空间距离,对比经典三环控制与复合控制下仿真平台的加工误差,所得结果如表3所示。

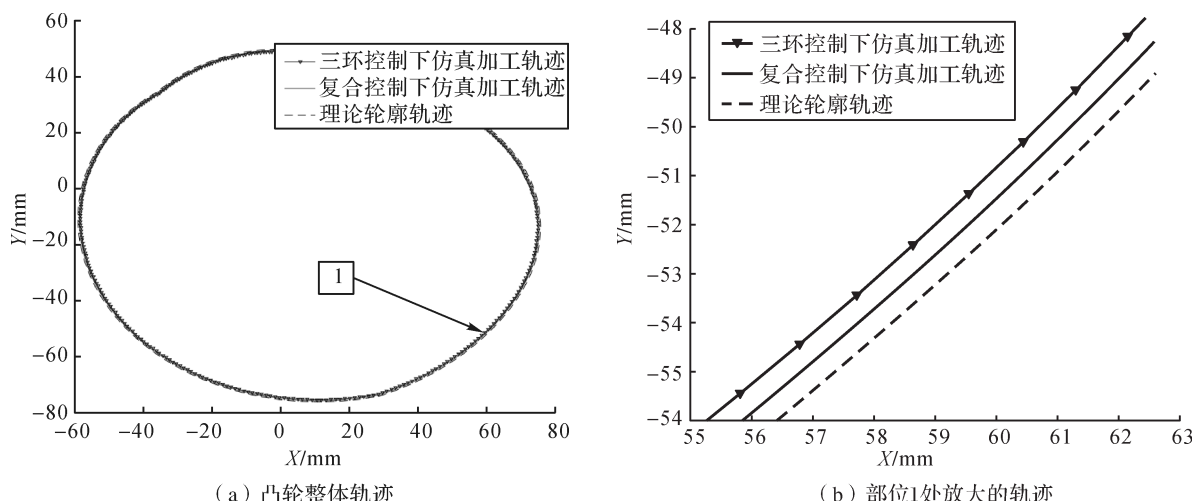


图9 平面凸轮仿真加工轨迹与理论轮廓轨迹比较

Fig. 9 Comparison of simulation processing trajectory and theoretical contour trajectory of planar cam

从表3可以看出,空间凸轮的不同部位具有不同的加工精度,在曲率较小的A、C点处加工轨迹的误差较小,而在曲率较大的B点处加工轨迹的误差较大。

这主要是因为加工曲率较大处时,机床丝杠轴的加速度变化较快,加工中心的响应速度滞后。针对该现象,可通过采用复合控制来有效解决这种不利情况。

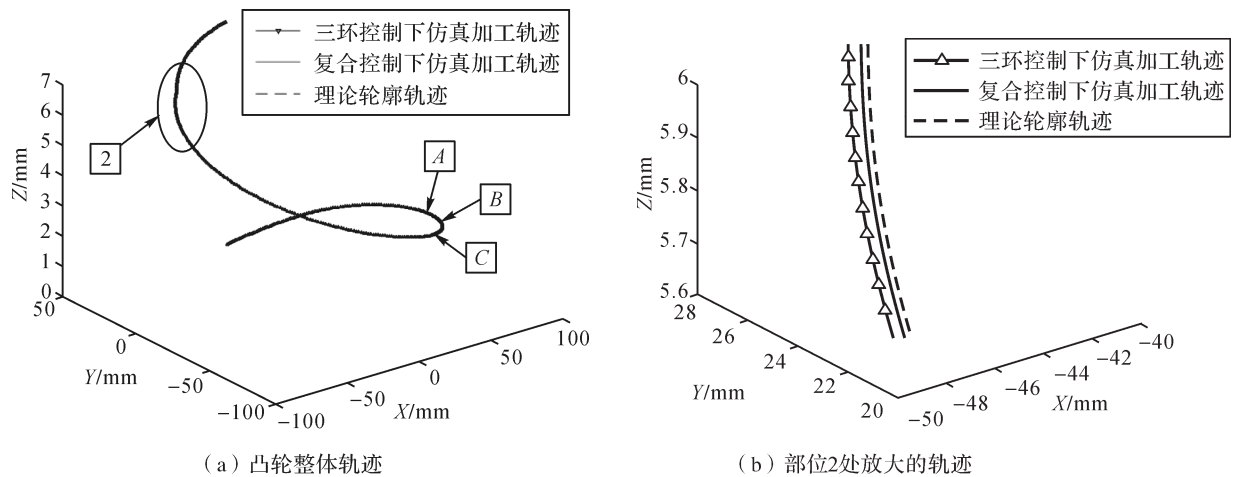


图 10 空间凸轮的仿真加工轨迹与理论轮廓轨迹比较

Fig. 10 Comparison of simulation processing trajectory and theoretical contour trajectory of spatial cam

表 3 不同控制下空间凸轮轮廓仿真加工误差

Table 3 Simulation machining errors of spatial cam contour under different controls

采集点	坐标/mm			加工误差/ $\mu\text{m}$	
	理论轮廓轨迹	三环控制下加工轨迹	复合控制下加工轨迹	三环控制	复合控制
A	(45.53, -41.72, 4.626)	(45.547, -41.711, 4.628)	(45.539, -41.719, 4.628)	19.30	9.27
B	(46.87, -43.25, 4.630)	(46.879, -43.267, 4.64)	(46.876, -43.254, 4.638)	21.67	10.77
C	(46.20, -45.07, 4.650)	(46.213, -45.081, 4.653)	(46.206, -45.076, 4.653)	19.40	9.0

从表 3 还可以得出,采用复合控制后,A、C点处的加工精度分别提高了 48% 和 46.3%, B 点处加工精度提高了 49.7%,且仿真加工轨迹与理论轮廓轨迹的拟合性好,验证了利用复合控制可提高机床三轴联动加工精度的可行性。

### 5 结 论

本文以某卧式加工中心伺服进给系统为研究对象,建立了伺服进给系统的状态空间模型,研究了刚柔-机电耦合动态性能对整机加工精度的影响,得到了影响机床加工精度的伺服控制方面的主要因素,得到的主要结论如下:

1) 考虑到状态空间模型描述系统独立变量变化的优势,利用状态空间法建立了卧式加工中心机电耦合状态空间模型,揭示了系统内部非线性因素与驱动轴的响应速度、传动误差等输出参数之间的耦合关系。

2) 系统响应速度延迟和丝杠的变化速率较快是影响机床整机加工精度的重要因素。通过改进伺服控制系统经典三环控制结构,加入前馈控制环节,建立了复合控制结构,有效地提升了系统的响应速度和稳定性。

3) 建立了卧式加工中心刚柔-机电耦合三轴联合仿真加工平台。仿真结果表明,复合控制结构有效地

提高了工件曲率较大处的加工精度。利用该仿真平台能够分析实际加工过程中具体物理参数对整个机床加工精度的影响,为优化机床加工参数和机电系统设计提供了理论依据。

### 参考文献:

[1] 李杰,谢福贵,刘辛军,等.五轴数控机床空间定位精度改善方法研究现状[J].机械工程学报,2017,53(7):113-128. doi:10.3901/JME.2017.07.113  
LI Jie, XIE Fu-gui, LIU Xin-jun, et al. Analysis on the research status of volumetric positioning accuracy improvement methods for five-axis NC machine tools [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7): 113-128.

[2] 李杰,谢福贵,刘辛军,等.机电-刚柔耦合特性作用下线性进给系统动力学分析[J].机械工程学报,2017,53(17):60-69. doi:10.3901/JME.2017.17.060  
LI Jie, XIE Fu-gui, LIU Xin-jun, et al. Dynamic modeling of a linear feed axis considering the characteristics of the electromechanical and rigid-flexible coupling [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(17): 60-69.

[3] 林利红,陈小安,周超群,等.精密传动系统的机电耦合建模及仿真分析[J].重庆大学学报(自然科学版),2007,30(11):14-18. doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2007.11.004  
LIN Li-hong, CHEN Xiao-an, ZHOU Chao-qun, et al. Modeling and simulation analysis of the electromechanical



- coupling facts about precision transmission system [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2007, 30(11):14-18.
- [4] LEE C H, YANG M Y, OH C W, et al. An integrated prediction model including the cutting process for virtual product development of machine tools [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 90: 29-43. doi:10.1016/j.ijmachtools.2014.12.003
- [5] KIM M S, CHUNG S C. Integrated design methodology of ball-screw driven servomechanisms with discrete controllers. Part I: Modelling and performance analysis [J]. Mechatronics, 2006, 16(8): 491-502. doi:10.1016/j.mechatronics.2006.01.008
- [6] KIM M S, CHUNG S C. Integrated design methodology of ball-screw driven servomechanisms with discrete controllers. Part II: Formulation and synthesis of the integrated design [J]. Mechatronics, 2006, 16(8): 503-512. doi:10.1016/j.mechatronics.2006.01.009
- [7] 姚延风, 刘强, 吴文镜. 基于刚柔-机电耦合的机床直线电机进给系统动态性能仿真研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(1): 191-196. doi:10.3969/j.issn.1000-3835.2011.01.043  
YAO Yan-feng, LIU Qiang, WU Wen-jing. Dynamic simulation of a linear motor feed drive system based on rigid-flexible & electrical-mechanical coupling [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(1): 191-196.
- [8] 赵大兴, 杨勇, 许万, 等. 基于ADAMS和MATLAB的数控机床进给驱动系统的机电联合仿真[J]. 机床与液压, 2014, 42(10): 28-31. doi:10.3969/j.issn.1001-3881.2014.10.008  
ZHAO Da-xing, YANG Yong, XU Wan, et al. Mechanical and electrical co-simulation for CNC machine tool feed drive system based on ADAMS and MATLAB [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014, 42(10): 28-31.
- [9] 宁建荣, 夏加宽, 于玲, 等. 永磁直线进给系统多柔性体机电耦合动力学特性分析[J]. 中国机械工程, 2014, 25(19): 2597-2602. doi:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.19.009  
NING Jian-rong, XIA Jia-kuan, YU Ling, et al. Flexible electromechanical coupling dynamic characteristics analysis on permanent magnet linear feed system [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(19): 2597-2602.
- [10] 邓昌奇, 廖辉. 基于前馈控制的交流伺服系统精确定位的研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(3): 405-408.  
DENG Chang-qi, LIAO Hui. Research on accurate positioning or AC servo system based on feed-forward control [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(3): 405-408.
- [11] 赵彤, 谢溢, 胡建. 基于机电建模的加工中心轴间耦合问题[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(2): 113-119. doi: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2017.22.001  
ZHAO Tong, XIE Yi, HU Jian. Multi-axis coupling of machining centers based on electromechanical modeling [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(2): 113-119.
- [12] 钟掘. 复杂机电系统耦合设计理论与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 18-24.  
ZHONG Jue. Coupling design theory and methods of complex electromechanical systems [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 18-24.
- [13] 陈峰华. ADAMS 2016 虚拟样机技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 161-163.  
CHEN Feng-hua. ADAMS 2016 virtual prototyping technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 161-163.

