

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.051

# 基于 NNFC 的数控机床进给驱动系统动态性能优化

杨勇<sup>1</sup> 张为民<sup>2</sup>

(1. 江苏科技大学机械工程学院, 镇江 212003; 2. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 考虑机械传动环节结构柔性对进给驱动系统整体动态性能的影响, 首先构建滚珠丝杠进给系统状态空间模型, 在此基础上, 基于数字化模块仿真, 进一步实现与伺服控制系统的集成建模, 并通过实验对集成模型进行了验证。在此基础上, 鉴于级联控制及其动态特性非线性特征下伺服控制参数最优值并不固定, 通过控制参数值优化选取对进给驱动整体动态性能进行优化具有一定的局限性, 提出神经网络自适应电流与速度前馈控制设计策略 (NNFC), 基于控制参数时变最优参数组合自适应调节与电流速度前馈, 对滚珠丝杠进给驱动动态响应性能进行优化, 优化后整体进给驱动系统跟随误差由 0.252 6 降为 0.111 5, 干扰峰值由 0.019 降为 0.007 0, 上升时间由原来的 0.128 3 s 减少为 0.107 5 s。

**关键词:** 数控机床; 滚珠丝杠进给驱动; 神经网络自适应; 电流速度前馈; 动态响应性能

**中图分类号:** TG659      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0376-08

## Dynamic Characteristic Optimization of Machine Tool Feed Drive System Based on NNFC

Yang Yong<sup>1</sup> Zhang Weimin<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China

2. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Considering the influence of the mechanical transmission flexibility on the servo control system and its control parameters, and the feed drive dynamic performance, the ball screw feed system state space model was firstly constructed in order to integrate to servo control system. Then, this state space model was integrated with servo control system model based on the digital module simulation method. And the correctness of this integration model was verified by experiment test. The test result showed that the error between experiment curve and the simulation curve was small, and the simulation result was 50.45 Hz, -1.78 dB in the first order natural frequency while the experiment result was 47.12 Hz, -4.46 dB in the first order natural frequency. In view of uncertainty of servo control parameter optimal value resulting from the nonlinear of cascade control and its dynamic characteristic, feed drive dynamic performance optimization was limited to some extent by the method of servo control parameter optimization choice. Hence, the neural network adaptive current and speed feed forward control design strategy was put forward. Based on this ball screw feed drive integration modeling, servo control parameter time-varying optimal selection as well as current and speed feed forward control strategy were combined to realize the ball screw feed drive dynamic response optimization. The following error decreased from 0.252 6 to 0.111 5, and interference peak decreased from 0.019 to 0.007 0, rising time decreased from 0.128 3 s to 0.107 5 s. It can be seen that the response speed of ball screw feed drive system was faster while the following error was smaller, and the system anti-interference ability was better at the same time. The

收稿日期: 2016-04-15 修回日期: 2016-05-12

基金项目: “十二五”国家科技重大专项(2012ZX04005-031)

作者简介: 杨勇(1985—), 男, 讲师, 博士, 主要从事数控机床动态性能研究, E-mail: yangyong5114360@163.com

通信作者: 张为民(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事制造系统及其自动化研究, E-mail: weiming\_zhang@hotmail.com

research of this paper provided the important theoretical basis and method guidance for the study of the overall dynamic performance and optimization of the ball screw feed drive system.

**Key words:** NC machine tool; ball screw feed drive; neural network adaptive; current and velocity feed forward; dynamic response property

## 引言

机床进给驱动系统的动态性能对整体机床的加工质量、加工效率具有重要影响,围绕机床进给驱动的动态性能研究与优化一直是国内外相关研究的重点和难点。在机床进给驱动整体建模与动态性能研究方面,文献[1-2]通过解析法构建机床进给轴分布-集中混合模型,研究不同进给率情况下的进给系统动态性能,在分析单个进给轴跟随精度和误差的基础上,进一步实现运动合成,实现圆柱体切削加工下的三轴合成运动研究及机床整体动态性能评价。文献[3]构建了包含滚珠丝杠集中参数模型在内的伺服控制系统仿真模型,对进给驱动系统电气控制参数进行研究,并对该伺服系统动态性能进行优化。文献[4-5]采用多体系统动力学建模软件,通过与控制系统仿真软件 Matlab 的数据交互接口建立滚珠丝杠副进给驱动系统机电联合仿真平台,借助动力学特性实验平台,通过控制算法仿真分析实现进给驱动动态性能的优化。文献[6]从理论分析和仿真的角度出发,对伺服控制系统与机械系统进行集成建模,探究高速高加速度对进给系统机电耦合的影响。文献[7]以某车铣复合机床进给轴模块为研究对象,基于多刚体动力学构建机械模块的动力学模型,并通过与伺服控制系统的集成建模,对机械结构与伺服控制系统共同作用下的机床整体进给驱动系统动态性能进行研究,并通过伺服控制参数整定对系统动态性能进行优化。

机床进给驱动系统动态性能的研究中为便于与伺服控制系统进行集成建模,多采用等效转动惯量模型或多体动力学模型等对机械传动环节进行建模,在考虑机械传动环节结构柔性影响下的进给驱动系统整体动态性能研究与优化方面尚存在不足。

部分学者通过不同的伺服控制策略与控制算法对进给驱动的动态性能进行优化<sup>[8-12]</sup>,但是仅通过一种控制策略或方法优化提高进给驱动的动态性能易造成该算法或策略的复杂性过高,计算量大。此外,亦可通过伺服控制参数整定对进给驱动系统的整体动态性能进行优化,依据整定方法的不同,可以将其分为基于近似模型解析的自整定方法和基于优化规则的自整定方法<sup>[13-14]</sup>,基于近似模型解析的自整定方法<sup>[8,15]</sup>通过整定规则解析推导确定伺服参数

最优值,该方法过程相对简单,但因采用近似简化,最终推导得出的伺服参数通常并非最优取值。基于优化规则的自整定方法<sup>[16-17]</sup>借助智能优化搜索算法实现控制参数整定优化,该方法计算成本相对较大,但优化整定效果较好。由于级联控制回路及其动态特性的非线性特征,该伺服控制参数的最优取值并不固定,因此通过控制参数值优化选取来实现进给驱动系统动态性能的最优化具有一定的局限性。

针对前述问题,本文考虑机械传动环节结构柔性对进给驱动系统整体动态性能的影响,首先构建滚珠丝杠进给系统状态空间模型,在此基础上,基于数字化模块仿真,进一步实现与伺服控制系统的集成建模。在此基础上,提出神经网络自适应电流与速度前馈综合控制(NNFFC)策略,基于神经网络的非线性与自适应学习,综合控制参数时变最优参数组合自适应调节与电流速度前馈,优化滚珠丝杠进给驱动系统的动态响应性能。

## 1 滚珠丝杠进给驱动系统集成建模与实验

滚珠丝杠进给驱动系统包含有伺服控制和滚珠丝杠进给系统(机械环节),伺服控制产生驱动输入到滚珠丝杠进给系统(机械环节),在床身的支撑下,电动机旋转运动经电动机轴、联轴器、丝杠轴等,最终转化为立柱(滑枕)等负载的平移运动。以往研究中为便于与伺服控制系统进行集成建模,多采用等效转动惯量模型或多体动力学模型等对滚珠丝杠进给系统(机械环节)进行建模,在考虑机械传动环节结构柔性影响下的进给驱动系统整体动态性能研究方面尚存在不足。

为实现与伺服控制系统的整体集成建模及整体动态特性优化,考虑机械传动环节结构柔性对进给驱动系统整体动态性能的影响,首先构建滚珠丝杠进给系统状态空间模型,在此基础上进一步构建与伺服控制系统的集成模型。

### 1.1 滚珠丝杠进给系统状态空间建模

滚珠丝杠进给系统的结构动力学普遍方程可写为

$$M_i \ddot{x}_i(t) + C_i \dot{x}_i(t) + K_i x_i(t) = Q_i(t) \quad (1)$$

式中  $x_i$ ——系统的位移矢量

$\dot{x}_i$ ——速度矢量

$\ddot{x}_i$ ——加速度矢量

$M_i$ ——质量矩阵       $C_i$ ——阻尼矩阵  
 $K_i$ ——刚度矩阵       $Q_i$ ——载荷矢量

令  $x_{i1} = x_i$ ,  $x_{i2} = \dot{x}_i$ , 可得

$$\dot{x}_{i1} = x_{i2} \quad (2)$$

将  $x_{i1} = x_i, x_{i2} = \dot{x}_i$  代入式(1)可得

$$M_i \dot{x}_{i2} + C_i \dot{x}_{i1} + K_i x_{i1} = Q_i(t) \quad (3)$$

将式(3)左乘  $M_i^{-1}$ , 整理得到

$$\dot{x}_{i2} = M_i^{-1} Q_i(t) - M_i^{-1} C_i \dot{x}_{i1} - M_i^{-1} K_i x_{i1} \quad (4)$$

令  $\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{i1} \\ \dot{x}_{i2} \end{bmatrix}$ , 联立公式(2)、(4), 将其写作矩阵

形式

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{i1} \\ \dot{x}_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_i^{-1} K_i & -M_i^{-1} C_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M_i^{-1} \end{bmatrix} Q_i \quad (5)$$

式中  $I$ ——单位矩阵

令  $y = x_{i1} = x_i$ , 将其写成矩阵形式可得

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

联立公式(5)、(6), 可以得到滚珠丝杠进给系统状态空间方程的基本形式

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (7)$$

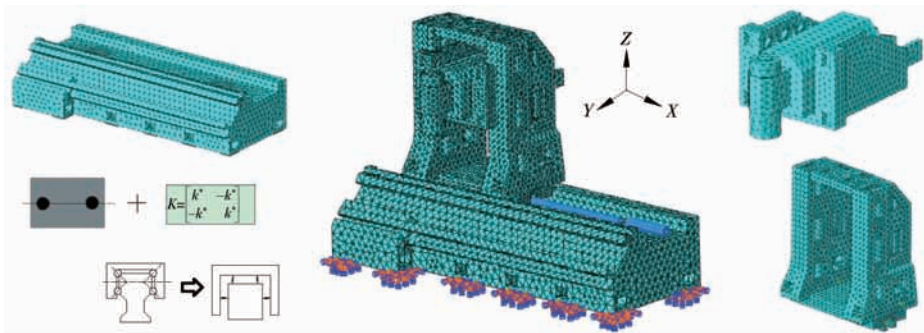


图1 滚珠丝杠进给系统多柔体动力学模型

Fig. 1 Multi flexible body dynamics model of ball screw feed system

基于上述滚珠丝杠有限元动力学模型, 借助有限元软件得到滚珠丝杠进给系统结构动力学模型系数矩阵, 代入公式(7), 最终得到滚珠丝杠进给系统状态空间模型。

## 1.2 滚珠丝杠进给驱动系统集成建模

滚珠丝杠进给驱动系统包含伺服控制模块和滚珠丝杠进给系统模块, 在前述滚珠丝杠进给系统状态空间建模的基础上, 基于数字化模块仿真<sup>[19]</sup>, 通过伺服控制模块和以状态空间模型表达的滚珠丝杠进给系统模块集成, 最终实现滚珠丝杠进给驱动系统集成建模(图2)。

本文所研究机床采用经典级联式控制器, 其包

其中  $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_i^{-1} K_i & -M_i^{-1} C_i \end{bmatrix}$   $B = \begin{bmatrix} 0 \\ M_i^{-1} \end{bmatrix}$

$$C = [1 \quad 0] \quad D = 0 \quad x = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix} \quad u = Q_i$$

式(1)所示的滚珠丝杠进给系统结构动力学模型可以采用集中质量法、分布质量法等进行构建, 为充分考虑结构柔性影响, 本文采用有限元方法构建滚珠丝杠进给系统结构动力学模型。本文所研究的机床有限元模型及相关技术参数见文献[18], 这里不再赘述, 其滚珠丝杠进给系统的多柔体有限元动力学模型见图1。其主要技术参数为: 联轴器扭转刚度为  $2.7 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ , 导轨滑块的竖直刚度和切向刚度分别为  $1.88 \times 10^9 \text{ N}/\text{m}$ 、 $1.25 \times 10^9 \text{ N}/\text{m}$ 。立柱、滑枕、床身等实体单元材料密度为  $7300 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 弹性模量为  $140 \text{ GPa}$ , 泊松比为  $0.26$ , 丝杠轴等的材料密度为  $7800 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 弹性模量为  $206 \text{ GPa}$ , 泊松比为  $0.3$ 。此外, 滚珠丝杠副的基本参数为: 丝杠的公称直径  $60 \text{ mm}$ , 滚珠直径  $9 \text{ mm}$ , 接触压力角  $45^\circ$ , 滚珠工作圈数  $8$ , 丝杠有效长度  $105 \text{ mm}$ , 滚珠丝杠副轴向刚度为  $k_1 = 1.65 \times 10^9 \text{ N}/\text{m}$ , 切向刚度  $k_2 = k_3 = 8.35 \times 10^8 \text{ N}/\text{m}$ , 扭转刚度  $k_4 = 9.4 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ , 弯曲刚度  $k_5 = k_6 = 1.73 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ , 耦合刚度  $k_c = 3.94 \times 10^6 \text{ N}/\text{rad}$ 。

含有电流环、速度环和位置环。电流环主要由电流调节器、伺服电机、逆变器组成, 其电流控制器为PI控制器, 其作用是使伺服电机电枢绕组电流能实时准确地跟踪电流指令。电流环控制器传递函数可表示为  $K_i [1 + 1/(T_i s)]$ , 其中  $K_i$  为电流环增益,  $T_i$  为电流环积分时间。根据控制相关理论<sup>[20]</sup> 可得伺服电机的电枢电路电枢电压与电枢电流传递函数模型为

$$\frac{i_q(s)}{u_q(s) - e_0(s)} = \frac{1}{L_a s + R_a} \quad (8)$$

式中  $e_0$ ——反电势

$i_q$ ——电枢电流

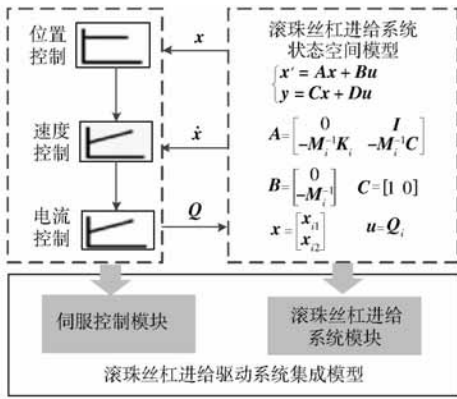


图 2 伺服控制模块和滚珠丝杠进给系统模块集成示意图

Fig.2 Schematic diagram of servo control module and ball screw feed system module

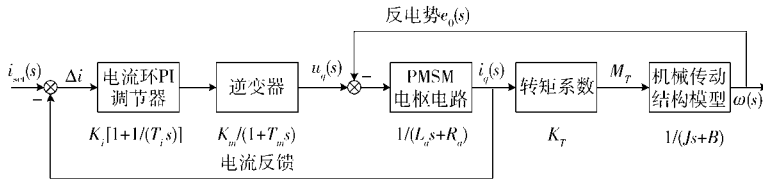


图 3 电流环传递函数框图

Fig.3 Block diagram of current loop transfer function

速度环同样采用 PI 控制器,其控制器用传递函数形式表示为  $K_p [1 + 1/(T_n s)]$ ,其中  $K_p$  为速度环增益,  $T_n$  为速度环积分时间。速度调节环主要由速度环控制器、电流闭环、负载对象等环节构成。位置环调节器采用 P 调节,用传递函数表示为  $K_v s$ ,  $K_v$  为位置环增益。基于数字化模块仿真,采用 Matlab 构建伺服控制模块和以状态空间模型表达的滚珠丝杠进给系统模块,最终实现滚珠丝杠进给驱动系统集

成建模,其模型示意图如图 4 所示,其中  $\phi_s$  为位移设定值,  $\phi_A$  为位移实际值。根据所研究机床对应的伺服控制系统及伺服电机型号,建模过程中采用技术参数:位置环增益  $K_v = 25 \text{ s}^{-1}$ ,速度环增益  $K_p = 27.3 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ ,速度环积分时间  $T_n = 60 \text{ ms}$ ,电流环增益  $K_i = 12.157 \text{ V}/\text{A}$ ,电流环积分时间  $T_i = 2 \text{ ms}$ ,电感系数  $L_a = 3.1 \text{ mH}$ ,电阻系数  $R_a = 0.075 \Omega$ ,反电势系数  $K_e = 1.67 \text{ V}/(\text{rad}/\text{s})$ ,转矩系数  $K_T = 2.72 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$ 。

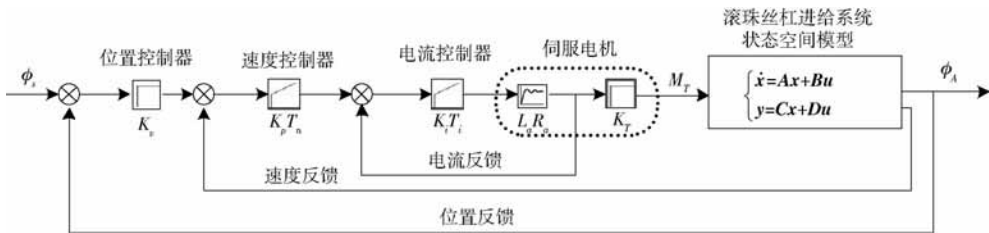


图 4 基于数字化模块仿真的滚珠丝杠进给驱动系统集成模型

Fig.4 Integrated model of ball screw feed drive system based on digital module simulation

基于前述滚珠丝进给驱动模型,采用 Matlab 对其响应曲线进行数值求解,通过实验测试,验证该状态空间模型的正确性。所研究机床采用西门子 840D 数控系统,西门子公司已经成功开发并集成了伺服控制响应测试软件与模块,并在实际中得到广泛应用<sup>[21-22]</sup>。本文基于西门子 840D 系统面板控制单元 PCU50 以及操作界面软件 HMI Advanced 的集成模块工具 Start-up tool (IBN-Tool)<sup>[22-23]</sup>,进行动力学响应实验测试。图 5 为测试界面参数设置。滚珠丝杠进给驱动系统速度频响曲线如图 6 所示,从图中可以看出,整体实验曲线与仿真曲线吻合较好,

$u_q$ ——电枢电压  $L_a$ ——电机电感

$R_a$ ——电机电阻

从式(8)可以看出伺服电机电枢电路可以看作是一个时间常数为  $L_a/R_a$  的一阶惯性环节。而逆变器可看成是一个放大系数为常数的一阶惯性环节。

伺服电机的转矩方程为

$$M_T = K_T i_q \quad (9)$$

式中  $K_T$ ——转矩系数

电流环为随动系统,根据给定电流和实际电流的反馈误差,实现其电流调节,综合前述各环节传递函数与方程可得电流环传递函数结构图如图 3 所示。

图 5 测试参数设置

Fig.5 Test parameters setting



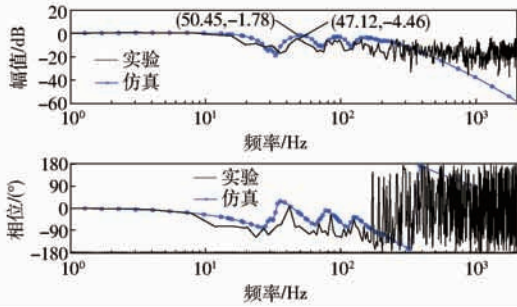


图6 滚珠丝杠进给驱动系统速度频响曲线

Fig.6 Speed frequency response curves of ball screw feed drive system

仿真计算与实验测试结果在一阶固有频率处分别为 50.45 Hz、-1.78 dB 和 47.12 Hz、-4.46 dB。

## 2 基于神经网络自适应电流与速度前馈控制的进给驱动系统动态特性优化

在滚珠丝杠进给驱动系统集成建模的基础上,提出神经网络自适应电流速度前馈综合控制策略,综合控制参数时变最优参数组合自适应调节与电

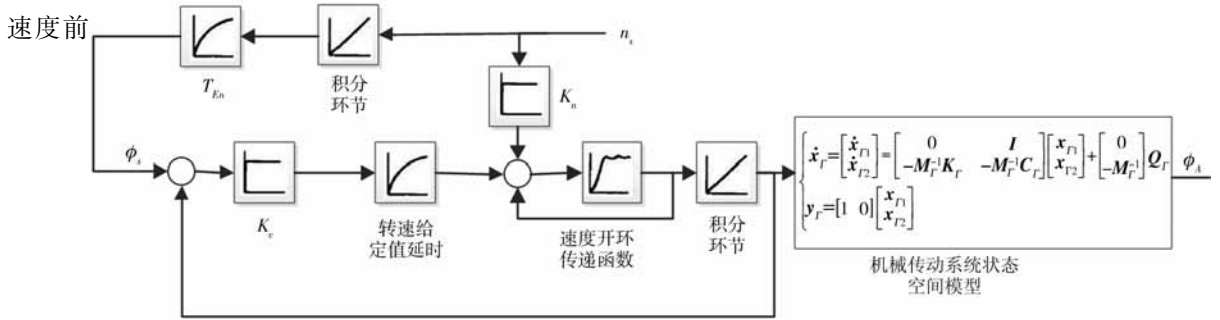


图7 前馈控制框图

Fig.7 Block diagram of feed forward control

### 2.2 神经网络自适应电流与速度前馈控制设计

仅通过一种控制策略或方法提高进给驱动的动态性能易造成该算法或策略的复杂性过高、计算量大等问题。因此在前述基础上,进一步提出神经网络自适应电流与速度前馈控制设计。以往多通过对级联控制回路的伺服控制参数进行优化整定实现进给驱动系统动态特性优化,由于级联控制回路及动态特性的非线性特征,该伺服控制参数的最优值并不固定,因此通过控制参数值优化选取对进给驱动整体动态性能进行优化具有一定的局限性。为了使三环 PI 环节中的增益和积分时间相互配合,控制取得好的控制效果,基于神经网络的非线性和自适应学习能力,建立参数  $K_v$ 、 $K_p$  和  $T_n$  自适应学习控制器,神经网络自适应前馈控制器见图 8,其基于控制参数时变最优参数组合自适应调节与电

流速度前馈,对进给驱动系统的动态性能进行优化。神经网络自适应电流速度前馈控制器设计有 3 层神经网络,示意图如图 9。

优化。

### 2.1 电流与速度前馈控制

对于常规 PI 控制而言,是用误差来控制误差,因此在系统运行过程中,必定会引入位置调节器的跟随误差。通常情况下,跟随误差为正值。当参与插补的轴速度放大系数不同时,就会引起轮廓误差,从而造成加工轨迹与设计轨迹不重合,引起偏差和畸变。跟随误差可以表示为

$$V_x = \frac{v_s}{K_v} \quad (10)$$

其中,  $v_s$  为控制器速度给定值。采用高进给速度时必然引起更大的跟随误差,将造成精度与效率不能同时保证的局面。本文在速度控制器和电流控制器上加入前馈值,使得在系统稳定运行时,跟随误差尽可能为零,从而实现前馈方式控制。图 7 为本文速度前馈控制框图,其中  $n_s$  为速度设定值,  $K_n$  为速度前馈控制器系数,  $T_{en}$  为等效速度调节回路延迟时间,同理可以实现对电流进行前馈控制设计。

输入层

$$\begin{cases} n_i(N) = x_i(N) \\ o_i^1(N) = f_i(n_i(N)) = \frac{1}{1 + e^{-n_i(N)}} \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (11)$$

式中  $x_i$ ——输入层中第  $i$  个节点的输入,选取电

流、速度和位置作为神经网络的输入

$f_i$ ——sigmoidal 激活函数

$N$ ——计算步数

隐含层

$$\begin{cases} m_j(N) = \sum_i w_{ji} o_i^1(N) \\ o_j^2(N) = f_j(m_j(N)) = \frac{1}{1 + e^{-m_j(N)}} \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, R_j) \quad (12)$$

式中  $w_{ji}$ ——输入层与隐含层之间的权系数

$R_j$ ——隐含层中的节点个数

$f_j$ ——sigmoidal 激活函数

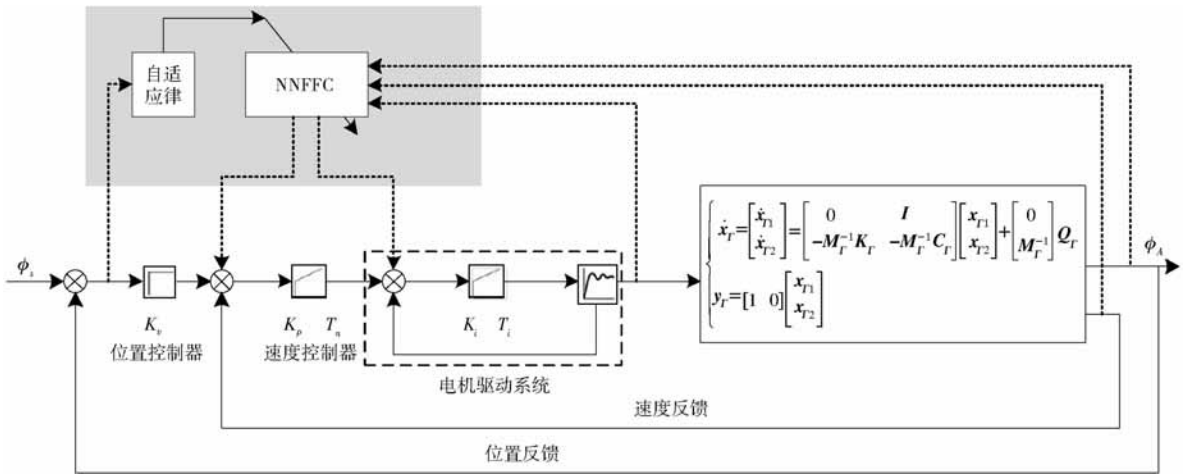


图 8 基于神经网络自适应电流速度前馈的进给驱动系统整体集成模型

Fig. 8 Integrated model of feed drive system based on neural network adaptive current velocity feed forward

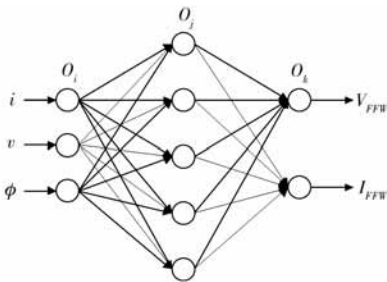


图 9 神经网络自适应前馈控制器原理图

Fig. 9 Principle diagram of neural network adaptive feed forward controller

输出层

$$\begin{cases} p_k(N) = \sum_j w_{kj} o_j^2(N) \\ o_k^3(N) = p_k(N) \end{cases} \quad (k=1,2) \quad (13)$$

式中  $w_{kj}$ ——隐含层和输出层之间的权系数  
 $k$ ——输出层的节点个数

神经网络输出为速度和电流控制器前馈输入量。

神经网络控制器自适应调整需要设定一个目标函数。由于位置调节回路不允许出现超调量,相比速度调节回路而言尤为重要。因此,对速度和位置两个回路所得出的误差赋予不同的权系数。

选取目标函数

$$E = \frac{1}{2} (\phi_M - \phi_s)^2 \times 0.8 + \frac{1}{2} (\omega_M - \omega_s)^2 \times 0.2 = \frac{1}{2} (0.8e_\phi^2 + 0.2e_\omega^2) \quad (14)$$

式中  $\phi_s$ ——输入位置指令  
 $\phi_M$ ——位置反馈值  
 $\omega_s$ ——输入速度指令  
 $\omega_M$ ——速度反馈值  
 $e_\phi$ ——位置跟随误差  
 $e_\omega$ ——速度跟随误差

采用误差反向传播算法自适应学习,即按照梯度下降的方法来搜索调整,修正神经网络的系数,以使误差尽快收敛。

$$\Delta w_{1j} = -\eta_{1j} \frac{\partial E}{\partial w_{1j}} = -\eta_{1j} \frac{\partial E}{\partial o_k^3} \frac{\partial o_k^3}{\partial w_{1j}} = 0.8 \eta_{1j} e_\phi \frac{\partial \phi_M}{\partial o_1^3} \frac{\partial o_1^3}{\partial w_{1j}} \quad (15)$$

$$\Delta w_{2j} = -\eta_{2j} \frac{\partial E}{\partial w_{2j}} = -\eta_{2j} \frac{\partial E}{\partial o_2^3} \frac{\partial o_2^3}{\partial w_{2j}} = 0.2 \eta_{2j} e_\omega \frac{\partial \omega_M}{\partial o_2^3} \frac{\partial o_2^3}{\partial w_{2j}} \quad (16)$$

式中,  $\frac{\partial o_k^3}{\partial w_{kj}} = o_j^2$ ,  $\eta_{kj}$ 为神经网络权值学习率。由于

$\frac{\partial \phi_M}{\partial o_k^3}$ 未知,近似用  $\text{sign}(\delta_k)$ 代替。可得

$$\delta_k = \frac{\Delta \phi_M}{\Delta o_k^3} = \sum_{n=N-1}^N \frac{\phi_M(n) - \phi_M(n-1)}{o_k^3(n) - o_k^3(n-1)} \quad (k=1,2) \quad (17)$$

取神经网络权值学习率:  $\eta_{kj} = 0.8 (k=1,2; j=1,2,3,4)$ 。

$$w_{kj}(N+1) = w_{kj}(N) + \Delta w_{kj}(N) \quad (18)$$

对于输入层,同样采用误差反向传播算法自适应学习

$$\Delta w_{ji} = -\eta_{ji} \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} = -\eta_{ji} \frac{\partial E}{\partial o_j^2} \frac{\partial o_j^2}{\partial w_{ji}} \quad (19)$$

其中  $\frac{\partial E}{\partial o_j^2} = \sum_{k=1}^2 0.8 e_\phi \delta_k w_{kj} + \sum_{k=2}^3 0.2 e_\omega \delta_k w_{kj} \quad (20)$

$$\frac{\partial o_j^2}{\partial w_{ji}} = f'_j(m_j(N)) o_i^1 = \frac{e^{-m_j(N)}}{(1 + e^{-m_j(N)})^2} o_i^1 \quad (21)$$

$\eta_{ji}$ 为神经网络权值学习率,同样取值为:  $\eta_{ji} = 0.8 (j=1,2,3,4; i=1,2,3)$ 。

$$w_{ji}(N+1) = w_{ji}(N) + \Delta w_{ji}(N) \quad (22)$$

对于伺服控制进给驱动系统,常采用上升时间、跟随误差、超调量等指标,表征其动态响应性能优

劣<sup>[24]</sup>。通过前述基于神经网络自适应电流速度前馈的进给驱动系统整体集成模型,基于 Matlab 数值软件对其响应特性进行求解,由于斜坡响应与伺服控制系统的实际使用情况更加符合,并且其亦可以看作是多个脉冲响应的累积,因此选取斜坡响应作为动态响应曲线。图 10 为神经网络自适应电流速度前馈控制下的动态响应曲线,以及常规级联方式下通过对控制参数值优化选取得到的动态响应曲线,从图 10a 的斜坡响应可以看出 NNFFC 控制方式下响应速度明显提高,跟随误差显著降低。从图 10b 的干扰响应曲线可以看出,NNFFC 控制下的进给驱动系统同样具有较好的抗干扰能力。优化前后,滚珠丝杠进给驱动系统的跟随误差由 0.252 6 降为

0.111 5,干扰峰值由 0.019 降为 0.007 0,上升时间由原来的 0.128 3 s 减少为 0.107 5 s,可以看出,优化后滚珠丝杠进给驱动系统在响应速度提高、跟随误差降低的同时其抗干扰性更好。

从响应曲线分析来看,NNFFC 控制方式下其响应跟随过程中具有自适应调节功能,在初始阶段其响应曲线斜率较大以尽量降低跟随误差,借助其自适应调节特性通过伺服控制参数的时变最优组合,后续响应过程中在保证不出现超调情况下尽可能地提高其响应速度,因此响应过程出现良性波动自适应调节。

### 3 结论

(1) 考虑机械传动环节结构柔性对进给驱动系统整体动态性能的影响,首先构建滚珠丝杠进给系统状态空间模型,在此基础上,基于数字化模块仿真,进一步与伺服控制系统进行集成,构建滚珠丝杠进给驱动系统集成模型,通过实验对该模型进行了验证。

(2) 鉴于级联控制回路及其动态特性非线性特征下伺服控制参数最优值并不固定,通过控制参数值优化选取对进给驱动系统动态性能进行优化具有一定的局限性,本文提出神经网络自适应电流与速度前馈控制设计策略,在进给驱动系统整体集成建模的基础上,基于控制参数时变最优参数组合自适应调节与电流速度前馈,对滚珠丝杠进给驱动动态性能进行优化,优化后跟随误差由 0.252 6 降为 0.111 5,干扰峰值由 0.019 降为 0.007 0,上升时间由原来的 0.128 3 s 减少为 0.107 5 s。可以看出,优化后滚珠丝杠进给驱动系统在响应速度提高、跟随误差降低的同时其抗干扰性更好。

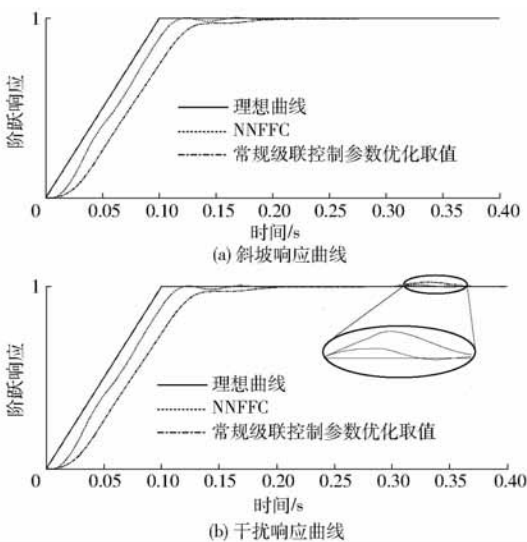


图 10 神经网络自适应电流速度前馈控制与常规级联控制参数优化下的动态响应曲线

Fig. 10 Dynamic response curves of neural network adaptive current speed feed forward control and conventional cascade control parameter optimization

### 参 考 文 献

- 1 WHALLEY R, ABDUL-AMEER A A, EBRAHIMI K M. The axes response and resonance identification for a machine tool[J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46(8): 1171 - 1192.
- 2 WHALLEY R, ABDUL-AMEER A A, EBRAHIMI M. Machine tool modelling and profile following performance[J]. Applied Mathematical Modelling, 2008, 32(11): 2290 - 2311.
- 3 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.
- 4 周勇,许学三,王国贤,等. 进给驱动机构轴向振动与滚珠丝杠滚振研究[J]. 中南大学学报:自然科学版,2013(10): 4069 - 4073. ZHOU Y, XU X S, WANG G X, et al. Research on axial vibration of feed drive mechanism and rolling vibration of ball screw[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013(10): 4069 - 4073. (in Chinese)
- 5 周勇. 高速进给驱动系统动态特性分析及其运动控制研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2008. ZHOU Y. Research on dynamic characteristics and motion control for high speed feed drive system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- 6 卢秉恒,赵万华,张俊,等. 高速高加速度下的进给系统机电耦合[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 2 - 11. LU B H, ZHAO W H, ZHANG J, et al. Electromechanical coupling in the feed system with high speed and high acceleration [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 2 - 11. (in Chinese)
- 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 - 197.

YAO Y F, LIU Q, WU W J. 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 - 197. (in Chinese)

- 8 KISSLING S, BLANC P, MYSZKOROWSKI P, et al. Application of iterative feedback tuning (IFT) to speed and position control of a servo drive[J]. *Control Engineering Practice*, 2009, 17(7): 834 - 840.
- 9 XIANG W, CHEN F. An adaptive sliding mode control scheme for a class of chaotic systems with mismatched perturbations and input nonlinearities[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2011, 16(1): 1 - 9.
- 10 ROOPAEI M, SAHRAEI B R, LIN T. Adaptive sliding mode control in a novel class of chaotic systems[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(12): 4158 - 4170.
- 11 高国琴, 郑海滨. 虚拟轴机床并联机构的自适应动态滑模运动控制[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(11): 119 - 125.  
GAO G Q, ZHENG H B. Adaptive dynamic sliding mode motion control for the parallel mechanism of virtual axis machine tool [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(11): 119 - 125. (in Chinese)
- 12 唐锐, 王少江, 侯力, 等. 并联机床伺服系统双自适应模糊滑模控制[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(10): 229 - 234.  
TANG R, WANG S J, HOU L, et al. Double adaptive fuzzy sliding mode control for hydraulic servo system of parallel machine [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(10): 229 - 234. (in Chinese)
- 13 王伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进整定方法综述[J]. *自动化学报*, 2000, 26(3): 347 - 355.  
WANG W, ZHANG J T, CHAI T Y. A survey of advanced PID parameter tuning methods [J]. *Acta Automatica Sinica Acta Autom Sin*, 2000, 26(3): 347 - 355. (in Chinese)
- 14 陈鹏展. 交流伺服系统控制参数自整定策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.  
CHEN P Z. Study on the self-tuning strategy of control parameters for AC servo system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- 15 MADHURANTHAKAM C R, ELKAMEL A, BUDMAN H. Optimal tuning of PID controllers for FOPTD, SOPTD and SOPTD with lead processes[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2008, 47(2): 251 - 264.
- 16 郝齐, 关立文, 王立平. 基于遗传算法并联机床电机伺服系统控制参数整定[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2010, 50(11): 1801 - 1806.  
HAO Q, GUAN L W, WANG L P. GA-based control parameter tuning of parallel machine tool motor servo systems[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2010, 50(11): 1801 - 1806. (in Chinese)
- 17 刘成颖, 刘龙飞, 孟凡伟, 等. 基于遗传算法的永磁直线同步电机伺服系统参数设计[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2012, 52(12): 1751 - 1757.  
LIU C Y, LIU L F, MENG F W, et al. Genetic algorithm based parameter selection of permanent magnet linear synchronous motor servo system design[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2012, 52(12): 1751 - 1757. (in Chinese)
- 18 杨勇, 张为民, 杨涛. 基于 Kriging 元模型的机床进给驱动系统动态特性优化[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(5): 288 - 293.  
YANG Y, ZHANG W M, YANG T. Dynamic characteristic optimization of feed system based on Kriging metamodel [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 288 - 293. (in Chinese)
- 19 黄忠霖. 自动控制原理的 Matlab 实现[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- 20 陈国强. 精密运动控制: 设计与实现[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- 21 陈先锋. 伺服控制技术自学手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- 22 胡国清, 张旭宇. 西门子 SINUMERIK840D sl/840Di sl 数控系统应用工程师手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- 23 陈先锋. SIEMENS 数控技术应用工程师[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- 24 胡寿松. 自动控制原理[M]. 修订本. 北京: 机械工业出版社, 2008.