

## 轧机主传动系统自抗扰控制器设计与应用

张瑞成, 童朝南

(北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 轧钢过程中的负荷扰动容易激起机电振动, 这严重影响板带材的产量和质量. 为了抑制机电振动, 针对轧机主传动系统存在不确定外部扰动和未建模动态的特点, 首先建立了轧机主传动系统的模型, 将不确定性外扰和未建模动态视为一个综合扰动项, 然后利用扩张状态观测器对综合扰动项进行观测和补偿, 设计了一种不依赖于对象模型的轧机主传动系统鲁棒控制器. 仿真结果证明: 该控制器比外扰负荷观测器控制系统具有更好的抗扰动能力, 同时对系统内部参数如负载转动惯量、转矩常数等的摄动也具有较强的鲁棒性, 有效抑制了由于轧制负荷周期性变化和轧制负荷突变引起的机电振动. 首次将扩张状态观测器和自抗扰控制技术应用到轧机主传动系统机电振动控制中, 并通过实验证明了该方法的有效性和优越性.

**关键词:** 轧机主传动系统; 扩张状态观测器; 自抗扰控制器; 机电振动; 鲁棒性

**中图分类号:** TP273, TG333      **文献标识码:** A

## Design and application of active disturbance rejection controller for main drive system of rolling mill

ZHANG Rui-cheng, TONG Chao-nan

(Information Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The output and quality of metal plate and strip are heavily affected by electromechanical vibration in rolling process. To suppress electromechanical vibration, we aim at the characteristics of main drive system of rolling mill with uncertain external load disturbance and unmodelled dynamics. The model of main drive system of rolling mill is established, where uncertain external load disturbance and unmodelled dynamics are regarded as one integrated disturbance. Then, a new observer is proposed to observe and compensate this integrated disturbance, and a robust controller of main drive system of rolling mill is designed based on active disturbance rejection control (ADRC) technology. This controller has very strong robustness not only to external load disturbance, but also to unpredictable plant parameter variations such as inertia of load and coefficient of torque. The electromechanical vibration is effectively suppressed. It is the first time that extended states observer (ESO) is utilized in electromechanical vibration control for main drive system of rolling mill. Its effectiveness is verified by the simulated result.

**Key words:** main drive system of rolling mill; extended states observer (ESO); active disturbance rejection control (ADRC); electromechanical vibration; robustness

### 1 引言 (Introduction)

随着现代化工业的迅猛发展, 各行各业对冷轧薄带的需求量不断增加, 同时对其质量的要求也越来越高. 因此现代大型连轧机都装备了先进的计算机过程控制、钢板厚度自动控制、板形检测自动控制系统, 同时, 连轧机又对主传动系统提出了高精度和高动态响应的技术要求. 轧机传动系统涉及到轧钢机械、电机、自动控制技术以及电网等多个学科, 系统庞大, 当机电配合不好时容易产生机电振动现象.

轧钢过程中产生的机电振动一般分 3 类: 1) 电机与机械弹性联接产生机电共振现象; 2) 轧制过程中负荷周期性变化产生的振动; 3) 轧制过程负荷突变产生的激励振动. 在轧钢过程中机电振动将严重影响轧钢生产, 使活套、AGC、板形控制无法正常工作, 达不到自动控制的效果, 影响产品质量, 甚至发生断辊、断轴事故, 危及设备安全生产<sup>[1]</sup>.

文献[2]设计了轧机传动外扰负荷观测器控制系统, 有效消除了外扰对控制系统的影响. 文献[3]

设计了基于等效负载扰动观测器的轧机传动系统鲁棒控制,对外界扰动和系统参数变化具有很好的控制效果.然而,这些方法的负荷扰动观测器是基于对象模型已知的条件下设计的,而实际系统模型并不能精确得到.基于以上原因,用扩张状态观测器(ESO)来观测负荷扰动及模型参数的不确定项,基于自抗扰控制(ADRC)技术设计了一种既不依赖于对象模型,又具有较强鲁棒性的轧机传动控制系统.

自抗扰控制是韩京清研究员及其合作者经过十几年的研究,提出的一种非线性控制律.为了提高控制器的性能,ADRC采用了两项重要的发明:一是通过简单的非线性算法,对系统的状态以及状态的各阶微分进行跟踪控制;二是通过扩张状态观测器(ESO)观测出系统的状态和“综合扰动项”,得到广义状态误差并对扰动项进行前馈补偿.也就是说,ADRC既控制了系统的状态,又控制了状态的各阶微分,同时还兼顾了扰动的动态补偿,因此使控制系统在稳定性和鲁棒性方面都有显著提高<sup>[4-6]</sup>.

## 2 轧机主传动系统模型(Model of main drive system of rolling mill)

直流电气传动具有调速范围广、稳速精度高、控制方便等优点,因此被广泛应用于冶金、建材、印刷、机床等行业,在拖动领域中发挥着极其重要的作用.大型连轧机主传动系统中采用直流传动和采用矢量控制交流传动的机电系统传递函数结构都可以等效为速度和电流双闭环调节系统.为此,下面以直流电机为对象进行分析.

直流电气传动的某冷连轧机第4机架基本动态结构如图1所示,由此得到轧机主传动系统的微分方程如下:

$$\begin{cases} U = Ri + L \frac{di}{dt} + k_m \omega_m, \\ J_m \omega_m + B \omega_m = T_m - T_{sh}, \\ \dot{T}_{sh} = K_{sh}(\omega_m - \omega_L), \\ J_L \dot{\omega}_L = T_{sh} - T_L. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $i$  为电机的电枢电流,  $\omega_m$ ,  $\omega_L$  为电机和负载的角速度,  $U$  为电机的输入控制电压,  $R$  为电机的电枢电路总电阻,  $L$  为电机电枢回路总电感,  $J_m$ ,  $J_L$  分别为电机和负载的转动惯量,  $B$  为粘滞摩擦系数,  $K_{sh}$  为弹性轴刚度系数,  $T_m$ ,  $T_L$ ,  $T_{sh}$  分别为电磁转矩、负载阻力矩和弹性轴扭转力矩,  $T_m = k_m i$ ,  $k_m$  为电机转矩系数.

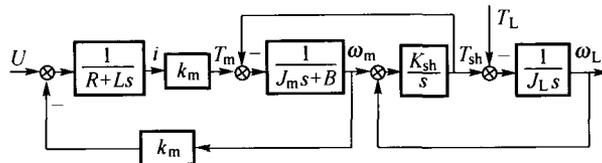


图1 轧机主传动系统动态结构图

Fig. 1 Dynamic configuration of main drive system of rolling mill

轧机主传动系统在运行时存在多种扰动,这些扰动是造成系统性能下降的主要因素,因此在设计控制系统时全面分析这些扰动,以便对其进行补偿抑制.根据扰动的性质,将其分为以下3种主要形式:轧制负荷扰动、转矩系数扰动和参数摄动.

### 1) 轧制负荷扰动.

齿轮传动间隙、联轴器间隙、轧辊偏心等传动部件在运行过程中产生的周期性振动会造成轧制负荷的周期性振动.为此考虑如下形式的轧制负荷

$$T_L = T_{L0} + T_{L1} \sin \omega_r t. \quad (2)$$

式中:  $T_L$  为轧制负载转矩,  $T_{L0}$  为额定轧制负载转矩,  $T_{L1}$  为扰动负载力矩幅值,  $\omega_r$  为扰动负载力矩频率.

### 2) 转矩系数扰动.

考虑实际存在电枢反应或者由于补偿绕组不能完全抵消电枢反应的直流电机非线性模型<sup>[7,8]</sup>,这种电枢反应引起的非线性不确定性为

$$k_m = C_m + di. \quad (3)$$

式中:  $C_m$  为无负载时电机转矩常数,  $d$  为一个未知的很小的负数, 约在  $[-0.0009, -0.0011]$  之间, 它表示电枢电流  $i$  对励磁电流的反作用系数.

### 3) 参数摄动.

轧机主传动系统参数摄动可分为机械参数的变化和电磁参数的变化,为了便于分析,将联接轴视为刚性联接,令  $J = J_m + J_L$ , 机械参数的变化主要体现在  $J$  和  $B$  的变化,电磁参数的变化主要是电阻性元件的阻值受温度影响的变化.其中转动惯量  $J$  的变化对系统运行性能影响较大.

综合以上分析,可将轧机主传动系统的状态空间方程写成

$$\dot{\omega} = (A_m + \Delta A)\omega + (B_m + \Delta B)i + C[-T_L + f(i)]. \quad (4)$$

式中:  $A_m = -B/J$ ,  $B_m = C_m/J$ ,  $C = 1/J$ ,  $f(i) = di^2$ ,  $\Delta A$  和  $\Delta B$  表示系统参数的变化,  $\omega$  为旋转角速度.

令

$$F_w = \Delta Ax + \Delta Bi + C[-T_L + f(i)], \quad (5)$$

则式(4)可改写为

$$\dot{\omega} = A_m \omega + B_m i + F_w. \quad (6)$$

将参数代入式(6),可得在扰动情况下轧机主传动系统速度环状态方程为

$$\dot{\omega} = -\frac{B}{J}\omega + \frac{C_m}{J}i + F_w. \quad (7)$$

### 3 轧机主传动系统机电振动控制器设计 (Design of electromechanical vibration controller of main drive system)

负荷状态观测器是状态观测器的推广,是一种特殊的一维状态观测器.从理论上构造的负荷观测器可以完全抵消负荷转矩扰动.其详细设计方法参见文献[2].下面设计基于扩张状态观测器的轧机主传动系统自抗扰控制器.

定义综合扰动项  $a(t)$  和参数项  $b$  分别为

$$a(t) = -\frac{B}{J}\omega + F_w, \quad (8)$$

$$b = \frac{C_m}{J}. \quad (9)$$

由式(7)可得

$$\dot{\omega} = a(t) + bi. \quad (10)$$

由式(10)可知,若能观测出综合扰动项  $a(t)$  并进行前馈补偿,轧机主传动系统就可变为一阶线性模型.利用自抗扰控制技术可以很好地解决这一问题,实现轧机主传动系统的速度控制,并有效的抑制各种干扰引起的轧机电机振动现象,其系统如图 2 所示.

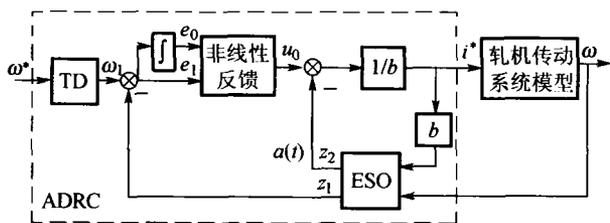


图 2 轧机主传动系统自抗扰控制系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of active disturbance rejection controller for main drive system of rolling mill

#### 3.1 非线性跟踪微分器 (Nonlinear tracking differentiator)

在实际工程问题中,如何由不连续或带随机噪声的量测信号合理地提取连续信号及微分信号直接关系到控制系统性能的好坏,实践中,往往通过向后差分法得到微分信号,但该方法得到的结果往往含有噪声,从而影响整个系统的性能.为此,韩等发展

了一种非线性跟踪-微分器.在图 2 中,TD 是一个一阶跟踪-微分器,其表达式为<sup>[9]</sup>

$$\begin{cases} e_0 = \omega_1 - \omega^*, \\ \dot{\omega}_1 = -r \cdot \text{fal}(e_0, \alpha_0, \delta_0). \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\omega^*$  为速度给定信号,  $\omega_1$  为速度跟踪信号,  $r$  为跟踪参数,  $\alpha_0, \delta_0$  为控制参数,  $\text{fal}$  函数的表达式为

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sgn}(e), & |e| > \delta, \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e| \leq \delta. \end{cases} \quad (12)$$

#### 3.2 扩张状态观测器 (Extended state observer)

扩张状态观测器作为自抗扰控制器的核心环节.负责观测系统状态项  $\omega$  和综合扰动项  $a(t)$ ,将  $a(t)$  扩展为系统的一个状态,则

$$\begin{cases} \dot{\omega} = v + bu(t), & v = a(t), \\ \dot{v} = h(t), \\ y = \omega. \end{cases} \quad (13)$$

式中  $h(t)$  为  $a(\cdot)$  的微分,是未知项.则下面的非线性观测器用来估计系统的状态和综合扰动项:

$$\begin{cases} e = z_1 - y, \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} \text{fal}(e, \alpha, \delta) + bu(t), \\ \dot{z}_2 = -\beta_{02} \text{fal}(e, \alpha, \delta). \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\beta_{01}, \beta_{02}$  为观测器的增益, ESO 有两个输出变量,其中  $z_1$  跟踪  $\omega$ , 并被作为速度控制器的反馈信号;  $z_2$  跟踪  $a(t)$ , 并被直接引到控制器的输出端,以便对系统的综合扰动进行前馈补偿.

#### 3.3 非线性控制律 (Nonlinear control law)

非线性反馈是一个非线性状态误差反馈控制器,有了非线性跟踪微分器 (TD) 和扩张状态观测器 (ESO) 后,其表达式为

$$\begin{cases} e_1 = \omega_1 - z_1, \\ \dot{z}_3 = \omega_1 - z_1, \\ e_0 = z_3, \\ u_0 = \beta_0 \text{fal}(e_0, \alpha_0, \delta_1) + \beta_1 \text{fal}(e_1, \alpha_1, \delta_1). \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $e_0$  为误差的变化率,  $e_1$  为误差项,  $u_0$  为 PI 的“非线性组合”,  $\beta_0, \beta_1$  为 PI 的增益系数,  $\alpha_0, \alpha_1$  为 fal 函数中非线性因子,  $\alpha_0 \leq \alpha_1, \delta_1$  为 fal 函数的参数.

则自抗扰控制器总的输出为

$$u(t) = \frac{1}{b} [u_0 - a(t)]. \quad (16)$$

由式(10)可知,  $u(t)$  为电流的给定值  $i^*$ .

### 4 仿真结果 (Simulation results)

某厂冷连轧机第 4 机架轧机主传动系统参数如

下:电动机额定功率 1500 kW,额定电流  $I = 1720$  A,电枢回路电阻  $R = 0.0314 \Omega$ ,电枢回路电感  $L = 0.0003$  H,电动机的转动惯量  $J_m = 1542 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,轧辊转动惯量  $J_L = 1552 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,粘滞摩擦系数  $B = 0.0064$ ,电机转矩常数  $C_m = 29 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$ .

为了验证所设计系统的控制性能,对以下 3 种运行状况进行仿真:

- 1)  $J = J_0$ , 负载扰动  $T_L = 14500 + 2910 \sin(3.14t)$  在  $t = 3$  s 时给出;
- 2)  $J = 10J_0$ ,  $T_L = 14500 + 2910 \sin(3.14t)$ ;
- 3)  $J = J_0$ ,  $k_m = C_m + di$ .

通过仿真确定扩张状态观测器的增益  $\beta_{01} = 35$ ,  $\beta_{02} = 700$ , PI 的增益系数  $\beta_0 = 35$ ,  $\beta_1 = 55$ ,  $\alpha_0 = 0.6$ ,  $\alpha_1 = 0.75$ ,  $\delta = 0.001$ ,  $\delta_1 = 0.001$ . 速度给定值  $\omega^* = 27.3 \text{ rad/s}$ , 负载扰动  $T_L = 14500 + 2910 \sin(3.14t) \text{ Nm}$  在  $t = 3$  s 时加入.

状况 1) 为模拟低速咬钢时的情况, 图 3 为速度响应曲线, 图 4 为负载扰动的实际值与估计值对比曲线, 其中实线为实际值, 虚线为估计值.

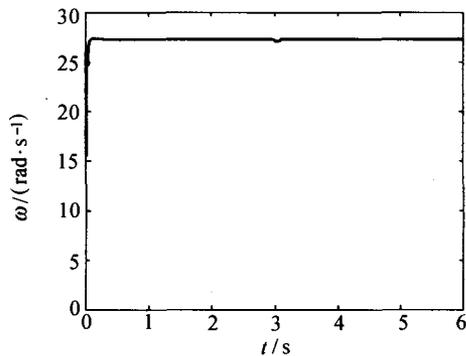


图 3 条件 1) 下采用 ADRC 的速度响应

Fig. 3 Speed response using ADRC under condition 1)

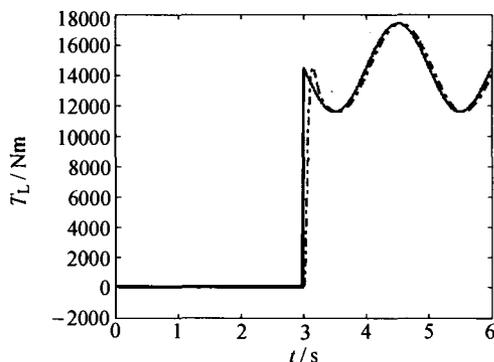


图 4 负载扰动的实际值与估计值

Fig. 4 Real and estimation values of load disturbance

状况 2) 为了考察系统对负载转动惯量变化的抗扰能力, 当  $J = 10J_0$  时, 不改变控制器的任何参数, 图 5 为负载扰动观测器控制系统 (虚线) 和本

所设计系统 (实线) 的速度响应曲线, 可见本文所设计系统具有更强的鲁棒性.

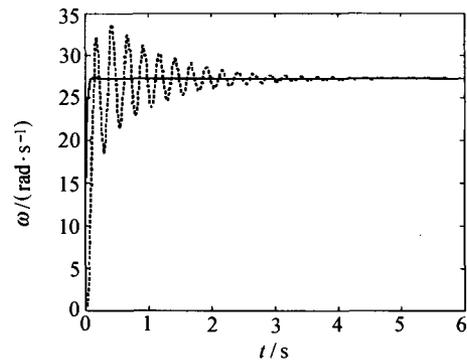


图 5 条件 2) 下 ADRC 和负载扰动观测器控制速度响应

Fig. 5 Speed response using ADRC and load observer under condition 2)

状况 3) 是为了考察系统对转矩参数变化的抗扰能力, 当参数  $d \in [-0.0009, -0.0011]$ , 系统的速度响应曲线基本不变, 由于篇幅所限, 在此不再给出.

图 6 为突加负荷扰动时系统动态速降的变化情况, 曲线 1 为本文控制结果, 曲线 2 为负载扰动观测器控制结果, 曲线 3 为双 PI 控制结果. 由图可见, 基于 ESO 的轧机主传动系统机电振动控制不仅减小了动态速降, 而且还减小了速度的波动.

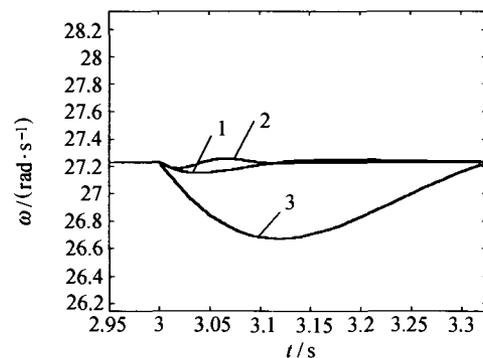


图 6 突加负荷扰动时动态速降对比

Fig. 6 Dynamic speed drop under load disturbance

## 5 结论 (Conclusion)

针对轧机主传动系统存在不确定的轧制负荷扰动和参数摄动问题, 运用扩张状态观测器 (ESO) 对系统的综合扰动项进行观测, 该观测器不需要系统精确的数学模型即能实现对系统扰动很好的观测, 避免了扰动负荷观测器对系统模型的依赖性; 并利用自抗扰控制 (ADRC) 技术设计了一种新型的控制装置. 仿真结果表明, 该控制系统对外界负载扰动和系统参数变化具有很好的鲁棒性, 且调节时间短、动态速降小、恢复迅速, 有效抑制了由于轧制负荷周期性

变化和轧制负荷突变引起的机电振动,为轧机主传动系统的机电振动控制提供了一种新的方法.

### 参考文献(References):

- [1] 王征,张卫,李崇坚.大型热连轧机主传动系统机电振荡的研究[J].冶金自动化,2001,25(1):30-34.  
(WANG Zheng, ZHANG Wei, LI Chongjian. Study on electromechanical vibration of main drive system of large hot rolling mill [J]. *Metallurgical Industry Automation*, 2001, 25(1): 30-34.)
- [2] 李崇坚,段巍.轧机传动交流调速机电振动控制[M].北京:冶金工业出版社,2003:168-177.  
(LI Chongjian, DUAN Wei. *Electromechanical Vibration Control of Drive of Rolling Mill AC Speed-Regulation* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003: 168-177.)
- [3] 方一鸣,王乐,王益群,等.基于等效负载扰动观测器的直流电机转速鲁棒控制[J].电机与控制学报,2002,6(4):297-300.  
(FANG Yiming, WANG Le, WANG Yiqun, et al. The robust speed control of DC motor based on the equivalent load observer [J]. *Electric Machines and Control*, 2002, 6(4): 297-300.)
- [4] 黄一,张文革.自抗扰控制器的发展[J].控制理论与应用,2002,19(4):485-492.  
(HUANG Yi, ZHANG Wenge. Development of active disturbance rejection controller [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(4): 485-492.)
- [5] HUANG Yi, HAN Jingqing. Analysis and design the second order nonlinear continuous extended states observer [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(21): 1938-1944.
- [6] 韩京清.从PID技术到“自抗扰控制”技术[J].控制工程,2002,9(3):13-18.  
(HAN Jingqing. From PID technique to active disturbance rejection control technique [J]. *Control Engineering of China*, 2002, 9(3): 13-18.)
- [7] HORNG J H. Neural adaptive tracking control of a DC motor [J]. *Information Science*, 1999, 118(1-4): 1-13.
- [8] IBBINI M S, ZAKARIA W S. Nonlinear control of DC motor [J]. *Electric Machines and Power Systems*, 1996, 24(1): 21-35.
- [9] 韩京清.非线性状态误差反馈控制律——NLSEF[J].控制与决策,1995,10(3):221-225.  
(HAN Jingqing. Nonlinear state error feedback control law—NLSEF [J]. *Control and Decision*, 1995, 10(3): 221-225.)

### 作者简介:

张瑞成 (1975—),男,北京科技大学博士研究生,主要研究方向为轧机电机振动控制、机电耦合系统动态特性分析与控制等, E-mail: rchzhang@sohu.com;

童朝南 (1955—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为生产过程智能控制、轧钢自动化等, E-mail: tcn@ies.ustb.edu.cn.