

基于自抗扰控制的内燃机车低恒速系统

黄志武, 张水文

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 内燃机车结构复杂, 而且在货场装载货物时负载不断变化, 所以实现低恒速运行难度很大。本文首先建立了内燃机车电力传动系统的数学模型, 并且对列车负载特性也进行了估算与分析; 然后, 依据数学模型设计了自抗扰控制器, 通过调节主发电机励磁回路 PWM 占空比来实现对励磁电流大小调节, 解决了由于系统参数时变导致的鲁棒性差以及调节时间过长和超调过大等问题。仿真分析以及实际应用表明本文提出的方法的有效性。

关键词: 内燃机车; 低恒速控制; 鲁棒性; 自抗扰控制

中图分类号: U 260.421 文献标识码: B 文章编号: 1003-7241(2010)05-0017-04

Low Constant Speed Control System of Diesel Locomotives Based on Active Disturbance Rejection Control

HUANG Zhi-wu, ZHANG Shui-wen

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410075 China)

Abstract: Structure of diesel locomotives are complex, also loads of the cargo are continuous changing in the freight yard, so it is difficult to run on a low constant speed. In this paper, a mathematical model of diesel electric drive system is established, also the load characteristics of the train is carried out to estimate and analysis; and then auto disturbance rejection controller based on mathematical model is designed. Excitation current can be modified through adjusting the PWM duty cycle of the main generator excitation circuit, so the problems such as poor robustness as well as regulation time too long and the overshoot too large due to the time-varying system parameter can be resolved. Simulation analysis and practical application show that the effectiveness of the method proposed in this paper is valid.

Key words: diesel locomotive; low constant speed control; robustness; ADRC

1 引言

目前, 全国各个煤矿及港口的货物运输大多采用传送带传输或定点装载传输, 如果机车能够以低速平稳运行, 那么从传送点到车厢间的货物传输将会因减少许多操作而变得更加便捷, 工作效率也将得到提高。内燃机车^[1]拉着负载运行时受到多种因素的影响, 比如风速、坡度变化、负荷变化等。传统 PI 控制方式^[2]控制参数固定, 当对象参数或结构变化时难以达到预期的控制目标。本文建立了列车行驶速度控制对象的数学模型^[3], 基于自抗扰控制技术^[4-7]设计了智能控制算法。通过调整内燃机车发电机励磁电流以改变主发电流, 最终改变

牵引电动机的转速, 然后通过机械装置以改变列车速度, 克服了对象不确定性及非线性等因素的影响。对主发电机励磁电流的控制采用 PWM 方式, 通过系统反馈回的速度进行运算, 改变 PWM 的占空比来实现对励磁电流的大小改变。

2 机车低恒速控制系统被控对象数学模型

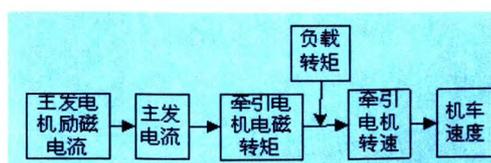


图1 机车行驶速度控制对象

机车行驶速度控制系统被控对象主要是机车及所拉车辆,被控对象结构框图如图1所示。

2.1 内燃机车的电力传动系统数学模型

以DF4B型内燃机车为例。内燃机车电力传动系统主要包括1台主发电机和6台牵引电动机。主发电机为同步发电机,牵引电动机为串励电动机,主发电机所发电流经过整流后直接供给6台牵引电动机。主发电机励磁方式为他励,调节发电机励磁电流即可实现对主发电流的调节,最终实现对牵引电机转速调节。在图1中大致表示了内燃机车电力传动系统。

发电机输出功率方程可表示成:

$$P_e = \frac{E_q V_t}{x_d} \sin \delta + \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{V_t^2}{2} \quad (1)$$

上式中的 x_q 和 x_d 发电机的q轴、d轴的电抗,而 δ 为功率角。

根据发电机励磁绕组电压及电流正方向的规定可写出励磁绕组电压方程为:

$$V_f = r_f I_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \quad (2)$$

上式中, V_f 为励磁绕组电压, I_f 为励磁电流, Ψ_f 为励磁绕组总磁链, r_f 为励磁绕组电阻。(2)式就是描述发电机励磁绕组的电磁过渡方程。

牵引电动机电磁转矩方程为:

$$T_t = \frac{pNV_q}{2\pi a x_d} \varphi \tan \delta \quad (3)$$

式中, p 为磁极对数, a 为电枢绕组中的并联之路对数, φ 为每极磁通量, I 为电枢电流(由于是串励电动机所以也就是励磁电流), T_t 为电磁转矩。

2.2 机车纵向运动数学模型

确定机车的动力性能,即确定机车沿行驶方向的运动情况。通过分析作用于沿机车行驶方向的各种外力,即行驶驱动力和行驶阻力来描述,建立了机车行驶的数学模型如下。

机车行驶方程式为:

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (4)$$

式中 机车驱动力 $F_t = T_t \eta_T i_g i_0 / r$

滚动阻力 $F_f = T_f / r$

空气阻力 $F_w = C_D A \rho v_s^2 / 2$

坡度阻力 $F_i = mg \sin \alpha$

$$\text{加速阻力 } F_j = \delta m \frac{dv_s}{dt}$$

式中 T_t 为作用于驱动轮上的转矩; i_g 为变速器传动比; i_0 为主减速器传动比; η_T 为传动系机械效率; r 为车轮半径; T_f 为滚动阻力矩; C_D 为空气阻力系数; ρ 为空气密度; A 为迎风面积; $\sin \alpha$ 为道路坡度; δ 为机车旋转质量换算系数; m 为机车质量; $\frac{dv_s}{dt}$ 为行驶加速度。

机车起步,保持行驶必须有加速能力。根据机车行驶方程式应为:

$$\delta m \frac{dv_s}{dt} = F_t - (F_f + F_w + F_i) \geq 0 \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{dv_s}{dt} = \frac{1}{\delta m} [F_t - (F_f + F_w + F_i)] \quad (6)$$

车轮的速度方程式为:

$$v_a = v_s (1 - \varphi) \quad (7)$$

式中 v_a 为车轮速度; v_s 机车行驶速度; φ 为车轮附着系数。

由上述分析可以得出机车驱动转矩(即牵引电机的电磁转矩)必须满足的方程:

$$T_t \geq \delta m (1 - \varphi) \frac{dv_a}{dt} + (F_f + F_w + F_i) \quad (8)$$

最后,可以得到牵引电机与负载转动惯量之和:

$$J = \frac{T_t - B\omega}{T_t} \quad (9)$$

其中 B 为牵引电机的粘滞摩擦系数。

2.3 被控对象状态方程

通过上述分析,可以得到如(10)的状态方程。

式中, L_d 、 L_q 为d-q坐标系上的定子等效电感,由于为面装式同步发电机 $L_d = L_q = L$; R_s 为定子电阻。

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s/L & p\omega & 0 \\ -p\omega & -R_s/L & i_q \\ 0 & p\Psi_f & -B/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_d/L \\ u_q/L \\ -T_t/J \end{bmatrix} \quad (10)$$

3 机车行驶速度自抗扰控制

3.1 自抗扰控制器的简介

自抗扰控制技术是一种不依赖系统模型的新型数字控制技术,其算法简单,快速无超调,辨识精度高,有极强的跟踪能力和抗参数扰动能力能实时估计并补偿

系统各种外扰及系统机理本身决定的内扰,结合特殊非线性反馈结构可实现良好的控制品质。

自抗扰控制器由三部分组成,跟踪微分器TD、扩张状态观测器ESO和非线性状态误差反馈控制律NLSEF。下图阐述了自抗扰控制器的内部构造。

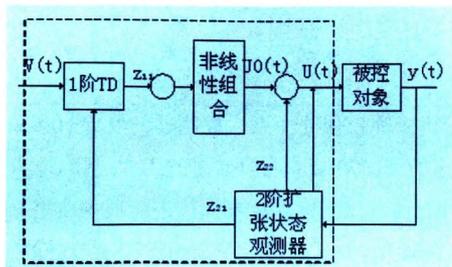


图2 1阶系统的自抗扰控制器

3.2 机车行驶速度自抗扰控制

首先得到牵引电机角速度的输出方程

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= \frac{p\Psi_f}{J} i_q - \frac{B\omega}{J} - \frac{T_L}{J} \\ &= f(\omega, T_L) + bi_q \\ &= f(\hat{\omega}, \hat{T}_L) + \left[f(\omega, T_L) - f(\hat{\omega}, \hat{T}_L) \right] + bi_q \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $\hat{\omega}$ 为速度观测值, \hat{T}_L 为负载观测; $f(\hat{\omega}, \hat{T}_L)$ 为利用速度和负载转矩的观测值得到的部分模型, 其中

$$f(\omega, T_L) = -\frac{B\omega}{J} - \frac{T_L}{J}; b = \frac{p\Psi_f}{J}。对应的1阶自抗扰$$

控制器为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - 2p(z_1 - \omega) + b_0 u + \left(-\hat{B}z_1 / \hat{J} - \hat{T}_L / \hat{J} \right) \\ \dot{z}_2 = -p^2(z_1 - \omega) \\ u = k_p(\omega^* - z_1) - \left(z_2 - -\hat{B}z_1 / \hat{J} - \hat{T}_L / \hat{J} \right) / b_0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, $-p$ 为ESO的闭环期望极点,在1阶自抗扰中 z_2 的估计是:

$$\begin{aligned} z_2 &\approx a(t) = f(\omega, T_L) + (b - b_0)i_q \\ &= -\frac{B\omega}{J} - \frac{T_L}{J} + (b - b_0)i_q \end{aligned} \quad (13)$$

在突加负载时该扰动想是幅度变化很大的量,让去跟踪变化剧烈的扰动量,实际上是对 ESO 提出了过高的要求。

按模型补偿自抗扰控制器的设计方法,可以得到内

燃机车调速系统的模型补偿自抗扰控制器(没用到跟踪微分器)为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - 2p(z_1 - \omega) + b_0 u + \left(-\hat{B}z_1 / \hat{J} - \hat{T}_L / \hat{J} \right) \\ \dot{z}_2 = -p^2(z_1 - \omega) \\ u = k_p(\omega^* - z_1) - \left(z_2 - -\hat{B}z_1 / \hat{J} - \hat{T}_L / \hat{J} \right) / b_0 \end{cases} \quad (14)$$

可见,只要估计出部分模型中 $-\hat{B}z_1 / \hat{J} - \hat{T}_L / \hat{J}$ 的 \hat{J} 、 \hat{B} 以及负载力矩 \hat{T}_L , 那么这部分模型就能补偿到ADRC中去, z_2 要估计的是:

$$\begin{aligned} z_2 &\approx a(t) = f(\omega, T_L) + f(\hat{\omega}, \hat{T}_L) + (b - b_0)i_q \\ &= b \neq b_0 - \frac{B\omega}{J} - \frac{T_L}{J} + (b - b_0)i_q - \frac{\hat{B}\hat{\omega}}{\hat{J}} - \frac{\hat{T}_L}{\hat{J}} \end{aligned} \quad (15)$$

在 ESO 能使速度 z_1 跟踪好 ω , 而 \hat{J} 、 \hat{B} 以及负载力矩 \hat{T}_L 又估计准的情况下, $b = b_0$ 时要估计的扰动项基本上为 0; 即使 $b \neq b_0$, z_2 要估计的扰动为, 与式(13)的扰动项相比也小很多, 让 ESO 去估计幅度小的扰动, 不仅能减轻 ESO 的估计负担, 而且估计精度也能得到保证。

内燃机车低恒速控制系统的框图如图3所示。

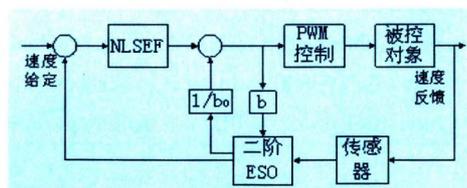


图3 内燃机车低恒速的自抗扰控制

4 仿真结果及实际应用效果

为了检验采用自抗扰控制器后的异步电机控制系统的性能,为此进行了仿真分析与研究。仿真参数采用DF4B型内燃机车参数。图4、图5分别是自抗扰控制器系统和PID控制系统在转速为300 r/min稳定运行时,突加负载12000N·m时转速的响应曲线。从仿真波形来看,自抗扰控制器系统比PID控制系统的转速降落和调整时间上明显减小。自抗扰控制器实现的PWM励磁调速系统完全满足调速系统的性能指标,图5说明自

(下转第32页)

5 结束语

论文构建了基于工控机的工件表面粗糙度预报硬件平台,完成了自动检测和预报软件的分析与设计,论文提出利用神经网络进行高速铣削表面粗糙度预报的方法,给出了BP网络的学习算法,构建了四层BP网络,并有效的通过灵敏度剪枝算法克服了网络隐层难以确定的问题,仿真结果表明所构建预报模型稳定收敛,采用神经网络进行粗糙度预报具有较高的精度,算法效率较高,对高速加工切削参数的选择和表面质量控制具有指导意义。

参考文献:

- [1] 方沂,李凤泉.基于神经网络的高速加工表面粗糙度预测模型[J].工具技术,2006,(11):78-80.
- [2] 王丹民,李华德,周建龙等.热轧带钢力学性能预测模型

(上接第19页)

抗扰控制器实现的感应电机变频调速系统的参数鲁棒性强,解决了一般PWM励磁调速系统存在的参数鲁棒性差这一难题。

此系统在朔黄铁路使用一年,运行状态良好。系统能够实现装车时列车的极低的恒速控制,且负载突变以及上下坡时,速度都不会有很大起伏,且调节时间很短,完全可以满足货场装卸作业要求。

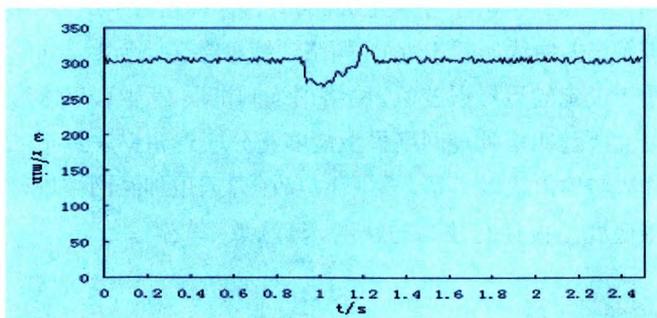


图4 系统突加负载时PID控制速度响应

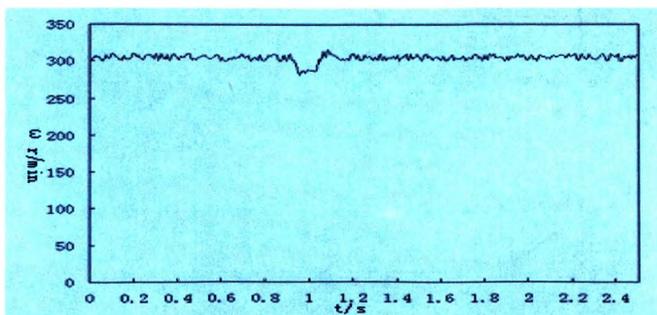


图5 系统突加负载时自抗扰控制速度响应

及其应用[J].北京科技大学学报,2006,(7):687-690.

- [3] 田美丽,李占杰,阎兵.基于神经网络的高速加工表面粗糙度预测模型[J].工具技术,2008,(42):35-37.
- [4] 王武,张元敏,贾石峰.基于神经网络的齿轮质量检测应用研究[J].机械设计与制造,2008,(5):60-62.
- [5] 魏海坤.神经网络结构设计的理论与方法[M].北京:国防工业出版社,2005,2.
- [6] 焦李成.神经网络计算[M].西安:西安电子科技大学出版社,1995.
- [7] 李国勇.智能控制及其MATLAB实现[M].北京:电子工业出版社,2005.
- [8] 闻新等.MATLAB神经网络仿真与应用[M].北京:科学出版社,2003.120-140.

作者简介:吴泽(1982-),男,助教,研究生,主要从事计算机应用网络通信方向的研究。

5 结束语

在自抗扰控制理论和建模技术的支持下,建立了机车行驶速度模糊控制仿真系统,仿真了机车负载突变时系统的运行状况。从仿真效果来看,自抗扰控制系统克服了一般PWM调速系统参数鲁棒性差的缺欠,并且动态性能有一定改善。此系统经过在朔黄铁路实际应用表明较好地适应机车行驶运动的非线性、时变性。

参考文献:

- [1] 王佳玉.东风4B形内燃机车[M].大连:大连理工大学出版社,1989.
- [2] 周静洁.低恒速控制在机车上的应用[J].内燃机车,2006,392,(10):1-2.
- [3] 威鲁麦特.李宁译.孙逢春审校.机车动力学模拟及其方法[M].北京:北京理工大学出版社,1998.
- [4] 黄一,张文革.自抗扰控制器的发展[J].控制理论与应用,2005,19(4):485-492.
- [5] HUANG SUNAN,REN WEI.VEHICLE longitudinal control using throttles and brakes[J].Robotics and Autonomous Systems,1999,(26):241-253.
- [6] C.CARUANA,G.M.ASHER,K.J.BRADLEY,et al. Flux position estimation in cage induction machines using synchronous HF injection and Kalman filtering[J].IEEE Trans.on IA,2006,39(5):1372-1378.
- [7] 苏位峰,孙旭东,李发海.基于自抗扰控制器的异步电机矢量控制[J].清华大学学报(自然科学版),2004,44(10):1329-1332.

作者简介:黄志武,(1966-),男,教授,主要从事智能控制、故障诊断、机车传动与控制方面的研究。