

细丝拉丝机张力控制系统设计与仿真*

欧长劲, 洪尉尉, 彭宽栋

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要: 拉丝机卷绕张力是细丝拉丝生产过程中的重要因素。为解决钢丝拉丝过程中张力过大时易拉断、张力过小时卷绕效果差等问题,将基于PID控制算法的PLC技术应用到细丝拉丝机张力控制系统中,开展了张力产生原因及控制方法分析,建立了收卷速度与细丝拉力之间的关系及模型,提出了以PLC为核心控制器的张力控制方法;最后,基于Matlab Simulink对上述细丝张力控制系统进行了评价,并开展了相应的仿真试验。研究结果表明,该张力控制系统可以对拉丝机实现良好的控制效果,其响应快、超调小,具有较高的精度和稳定性。

关键词: 拉丝机; 张力控制系统; 比例-积分-微分; Matlab Simulink

中图分类号: TH39; TH69 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2012)10-1191-04

Design and simulation of tension control system of drawing machine

OU Chang-jing, HONG Wei-wei, PENG Kuan-dong

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The winding tension of the wire drawing machine is an important factor in the process of drawing. In order to solve the problems of controlling tension of drawing machine, the tension control system of drawing machine based on PLC and PID control algorithms was investigated. After the analysis of tension causes and control, the relationship between the winding speed and tension was established. A method was presented to tension control system of drawing machine based on PLC. The tension control system of drawing machine was evaluated and tested on the Matlab Simulink. The experimental results show that the tension control system of drawing machine can achieve good effect. It has fast response, small overshoot, high accuracy and stability.

Key words: drawing machine; tension control system; proportion-integral-derivative(PID); Matlab Simulink

0 引言

拉丝机的使用非常广泛,其卷绕张力大小的控制是拉丝生产过程中的重要环节,特别是对于特细的钢丝,张力的控制尤为重要^[1-2]。根据钢丝材料本身及直径的要求,缠绕过程中钢丝张力应稳定在30 N左右,且误差精度应控制在 $\pm 5\%$ 左右。传统的机械式自动控制、气动式自动控制以及液压传动控制虽然简单而易于实现,但无法满足该系统的高动态响应能力、高精度以及高稳定性要求^[3]。

本研究结合拉丝机绕卷过程中恒张力控制问题,采用PID控制算法,建立以PLC为核心的张力控制系

统,并应用Matlab进行仿真试验,取得良好的效果。

1 拉丝机工作原理

拉丝机工作原理图如图1所示,入线从入口进入拉丝部分,经过拉丝塔轮组及拉丝眼模后形成接近成品丝径的线,再经过出口与定速轮之间的拉线眼模修整后线径达到成品线径,最后经过定速轮到达收排线

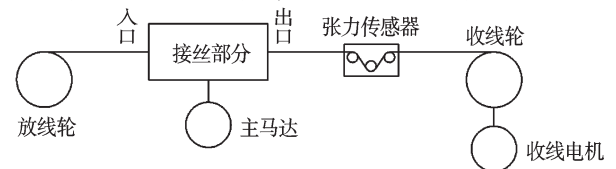


图1 拉丝机工作原理

收稿日期: 2012-05-17

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B12-02)

作者简介: 欧长劲(1956-),男,浙江杭州人,教授,硕士生导师,主要从事机电一体化方面的研究。E-mail: oucj@zjut.edu.cn

机构,将成品收在收线轴上。本研究在拉丝的过程中需要一定的张力来形成线与轮子之间的摩擦力,从而在拉丝眼模形成拉力,完成拉丝过程^[4]。

2 张力控制系统

2.1 张力的产生

张力的产生示意图如图2所示,根据图2,本研究忽略金属丝和各导向轮之间的摩擦力,并假设它们之间没有相对滑动,以收线段为例分析张力。线速度造成金属丝的拉伸量为:

$$\Delta l = \int (|v_1 - v_2|) dt \quad (1)$$

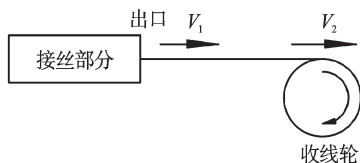


图2 张力的产生示意图

并由胡克定律得金属丝的张力^[5]为:

$$\begin{aligned} F &= \sigma \times S = \\ E \times \varepsilon \times A &= \\ E \times \frac{\Delta l}{l} \times A &= \\ \frac{E \pi d^2}{4l} \int (|v_1 - v_2|) dt & \end{aligned} \quad (2)$$

式中: E —材料的弹性模量, d —钢丝的直径, l —钢丝从卷绕部分的长度, v_1 —拉丝机出线速度, v_2 —收线轮上的线速度。

本研究取 $E=200 \text{ GPa}$, $d=0.1 \text{ mm}$, $l=1.2 \text{ m}$, 式(2)可化简为:

$$F = 1\,300 \int (|v_1 - v_2|) dt \quad (3)$$

2.2 速度差控制原理

根据以上分析可知,对于拉丝机来说,收/放线电机转速和拉丝机进/出线速度不同是产生张力的根本原因,保证收/放线电机转速和拉丝机进/出线速度相同,也就保证了金属丝张力的恒定,在拉丝部分主电机转速一定的情况下,本研究只需要根据金属丝张力变化来控制收/放线电机转速和拉丝机进/出线速度的同步,即可完全控制张力的变化^[6-7]。

2.3 张力控制系统

根据速度差控制原理,本研究建立了张力控制系统对收线速度进行控制。该控制系统分别控制拉丝机的卷绕运动和卷绕张力,其控制系统结构如图3所示。该系统包括以PLC为核心的张力控制器、张力传感器、伺服电机以及其他机械结构。在卷绕过程中,钢丝以恒定的速度从拉丝塔组出来后经过导向辊、张力传感器,最后缠绕到收线环盘上。钢丝卷绕过程中,由

张力传感器采集钢丝张力变化并且传输至控制器,控制器通过软件算法处理产生控制信号输出给伺服驱动器,以控制收线电机的转速,达到控制张力的目的。

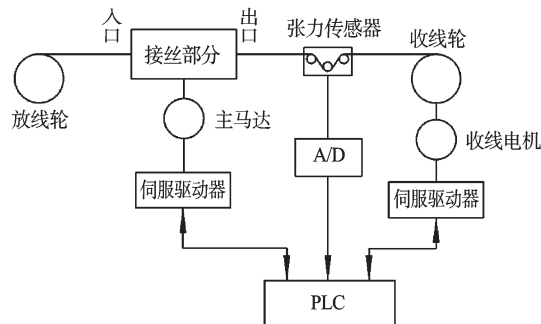


图3 拉丝机控制系统

根据张力控制方案的需要,核心控制器采用三菱PLC作为核心处理器。主轴电机和收线电机均用伺服电机作为执行元件。主轴电机选用三菱HA-LP15K2型,收线电机选用HC-SFS502型电机。主轴电机(HA-LP15K2),额定功率15 kW,额定转速为2 000 r/min,最大转速为2 000 r/min,转子惯量为 $220 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,额定电流为77 A,瞬时最大电流为231 A,转矩常数为0.82 N·m/A,机械时间常数为12.25 ms,电气时间常数为1.48 ms。

收线电机(HC-SFS502),额定功率5.0 kW,额定转速为2 000 r/min,最大转速为2 300 r/min,转子惯量为 $101 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,额定电流为28 A,瞬时最大电流为84 A,转矩常数为0.85 N·m/A,机械时间常数为11.95 ms,电气时间常数为1.25 ms。

张力传感器张力测量范围为0~100 N,输出采用Option Code A2:0~10 VDC。

3 控制系统模型的建立

3.1 伺服电机模型

根据电机矢量控制原理和 $d-q$ 变换原理,本研究对永磁同步交流伺服电机施加控制电流 I_m ,在负载力矩 T_l 的作用下,电机输出角速度为 ω ,经过计算可以得到交流伺服电机的传递函数^[8-9],根据传递函数可以得到电机的控制框图如图4所示。

将同步电动机及驱动模型用传递函数 $G(s)$ 表示:

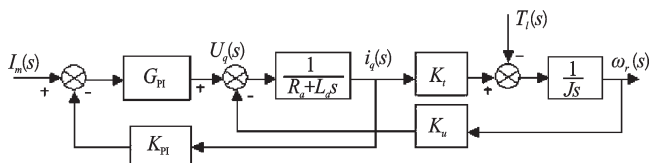


图4 PMSM及驱动控制框图

K_t —电机转矩常数; K_u —电机反电动势; B —电机阻尼系数; J —伺服电机惯性矩; G_{fi} —电流环增益; K_i —电流环反馈系数; L_s —电机电感; R_s —电机电阻; T_l —负载转矩

$$G(s) = \frac{\omega_r(s)}{I_m(s)} = \frac{\frac{K_i G_{PI}}{JL_a}}{s^2 + \frac{R_a + G_{PI} K_{PI}}{L_a} s + \frac{K_i k_u}{JL_a}} \quad (4)$$

将其转化成标准形:

$$G(s) = \frac{\omega_r(s)}{I_m(s)} = \frac{G_{PI}}{K_u} \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

式中: ω_n —自然振荡角频率, $\omega_n = K_i K_u / JL_a$; ξ —阻尼比, $\xi = J(R_a + G_{PI} K_{PI}) / 2\sqrt{JL_a K_i K_u}$ 。

由此可见,同步电动机及驱动为一个2阶振荡环节,对于伺服电机来说,只要是在伺服电机的额定负载以内,负载力矩对其输出转速并没有影响,所以笔者建立 Matlab 仿真模型时,忽略负载力矩 T_l 的影响。另外,由于电流环增益 G_{PI} 数值较大,电机输出基本上与输入电流成正比,可以将 K_{PI} 简化掉。

因此式(5)可以写成连乘的形式^[10]:

$$G(s) = \frac{\omega_r(s)}{I_m(s)} = \frac{K_M}{(T_L s + 1)(T_s s + 1)} \quad (6)$$

式中: K_M —电机的增益系数; T_L —电机的机械时间常数; T_s —电机的电气时间常数。

本研究设主电机瞬时角速度为 ω_1 ,主导轮直径为 r_1 (不考虑磨损,保持不变),输出的瞬时线速度为 v_1 ; 收线电机瞬时角速度为 ω_2 ,收线轮直径为 r_2 (随着排线的进行, r_2 慢慢变大),即可得 $v_1 = \omega_1 r_1$, $v_2 = \omega_2 r_2$ 。

3.2 传感器模型

传感器的数学模型:传感器通过测量钢丝的张力变化转化为电压的大小,可以把它当作比例环节,即传递函数^[11]为:

$$G_T(s) = K_T \quad (7)$$

3.3 PID控制器

PID控制是应用最广泛的一种控制规律。微分作用使控制器的输出与偏差变化的速度成比例,它可以克服对象的滞后;通过在比例的基础上加入微分作用可以增加系统的稳定性,再加上积分作用可以消除余差。常规PID控制的系统原理框图如图5所示,系统由PID控制器和被控对象组成。

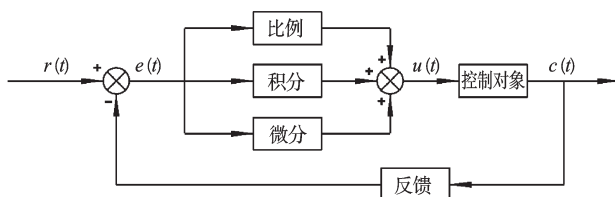


图5 常规PID控制器框图

3.4 张力控制系统模型框图

该张力控制器主要实现卷绕机构的张力控制,张力环动态结构如图6所示。

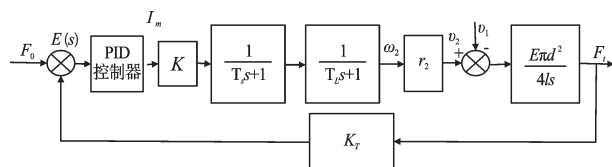


图6 系统张力控制系统模型框图

被控对象为收线辊,张力 F_i 经张力反馈后与设定值相比较后得 $E(s)$, 然后经PID控制器运算,得到电流 I_m , 经执行器件输出转速 ω_2 , 从而控制收线辊的转速,由速度差张力控制定理可知调节转速就相当于调节张力,直到张力与设定值相等为止。

4 仿真结果及分析

在收线轮不断收线过程中,线径 r_2 从初始值 0.071 4 m 开始,随着排线的进行,以钢丝直径 0.000 1 m 呈现阶梯式增长,因此本研究假设经过 5 s, 线径 r_2 增大 0.000 1 m。根据本研究建立的张力系统的传递函数模型, r_2 使用 Simulink 封装形式,在 Matlab 里的子系统封装如图7所示,其具体变化曲线如图8所示。

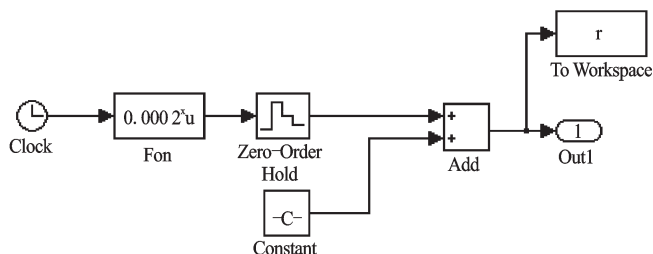


图7 r_2 发生器内部结构

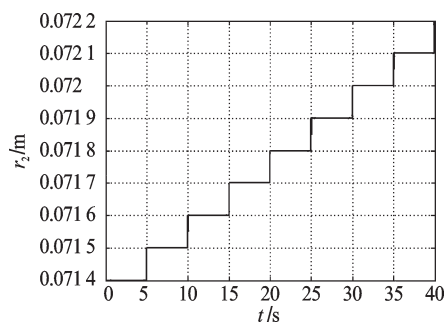


图8 r_2 变化曲线

本研究对PID控制器进行参数整定后,设定 $K_p = 6.5$, $K_i = 40$ 。据此建立的张力控制仿真模型如图9所示。

当给定一阶信号后,每过5 s,让 r_2 增加 0.000 1 m,

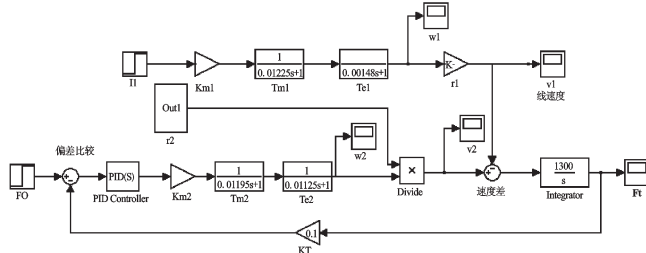


图9 张力控制仿真模型

得到的张力控制仿真曲线如图10所示,启动过程及波动过程放大图如图11、图12所示,从图中可以看出瞬间响应特性好,启动过程中无超调,运行过程中当 r_2 有变化时,系统实时完成自我调整,趋于设定值,实现了拉丝过程中的恒张力。

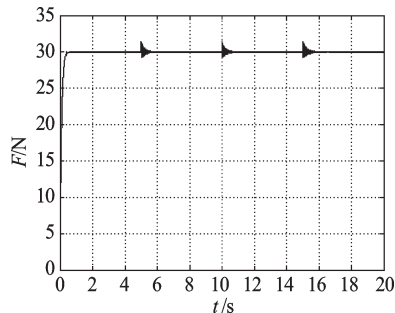


图10 张力控制过程

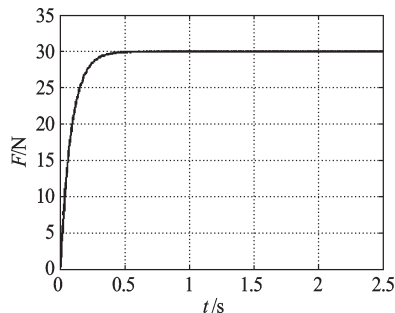


图11 启动过程张力曲线

5 结束语

本研究对拉丝机收放卷张力控制系统展开研究,设计了以PLC为核心的张力控制系统,建立了用PID算法的闭环张力控制模型。从仿真实验的结果来看,该控制系统具有较好的控制效果,其响应快、超调小,具有较高的精度和稳定性,能满足拉丝机对恒张力的要求。

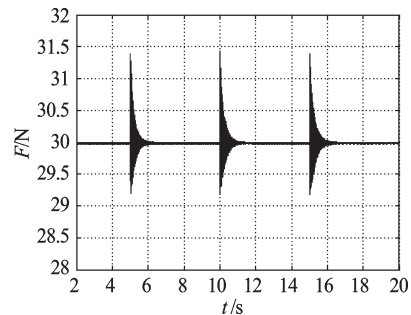


图12 r_2 增大时张力波动曲线

参考文献(References):

- [1] 杨建国. 直进式拉丝机变频调速系统设计[J]. 金属制品, 1999, 2(5): 11-15.
- [2] 曾 渭. 直进及直线调节器式拉丝机组电气控制述评[J]. 金属制品, 1997(2): 44-46.
- [3] 李兴根. 凹印机收放卷张力控制系统研究[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2003.
- [4] 夏桂书, 王 林. 基于PLC的拉丝机张力控制系统研究[J]. 中国测试技术, 2003, 7(4): 41-46.
- [5] 杨娅君, 陈德传. 收卷中的张力及其控制[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(5): 691-693.
- [6] 黄 洁. 多线切割机线张力控制系统的研究与开发[D]. 杭州: 浙江工业大学机械工程学院, 2010.
- [7] 何建文, 霍俊超, 郭钟宁, 等. 微细扁线材生产设备的收放线张力控制[J]. 机电工程技术, 2010, 39(11): 101-103.
- [8] 陈先锋, 舒志兵, 赵英凯. 基于PMSM伺服系统的数学模型及其性能分析[J]. 机械与电子, 2005(1): 41-43.
- [9] 李 琳. 机床交流伺服系统的设计与仿真[D]. 宜昌: 三峡大学机械与材料学院, 2006.
- [10] 欧长劲. 模糊神经网络张力控制系统[J]. 轻工机械, 2006, 24(4): 102-105.
- [11] 柯尊高. 纤维卷尺数字印刷机恒张力控制的研究[J]. 轻工机械, 2011, 29(3): 60-64.

[编辑: 李 辉]

(上接第1166页)

参考文献(References):

- [1] 周晓青, 孙立军, 颜 利. 路面平整度评价发展及趋势[J]. 公路交通科技, 2005, 22(10): 18-22.
- [2] 金睿臣, 宋 健. 路面不平度的模拟与汽车非线性随机振动的研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1999, 39(8): 76-79.
- [3] 马荣贵, 宋宏勋, 来旭光. 激光路面平整度检测系统[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(2): 38-41.
- [4] 周 波, 朱先祥, 孙 文. 车载式颠簸累积仪在路面平整度检测中的应用[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2004, 27(9): 1095-1098.
- [5] 贺安之, 徐友仁, 贺 宁. 高速公路路面状况的光学智能检测与信息处理[J]. 光电子·激光, 2002, 13(12):

1281-1284.

- [6] 李兴法, 尹冠飞. 数字式加速度传感器ADXL345的原理及应用[J]. 黑龙江科技信息, 2010, 36(2): 14.
- [7] XIONG Xiao-yan, WANG Zhao, WU Bing, et al. Design of Wireless Sensor Networks Node applied to Acquisition and Transmission of Vibration Signals [C]//2010 International Conference on Computational Aspects of Social Networks, 2010: 693-696.
- [8] 王 德. 蓝牙技术概述[J]. 家用电器, 2001(3): 2-3.
- [9] 张晓东, 曹 雷. 基于蓝牙技术的单片机与PC机无线数据通信[J]. 信息技术, 2009(1): 115-117.
- [10] 陈 杨, 王 茹, 林 辉. 在Matlab中用数据文件制作二维、三维图形[J]. 电脑学习, 2002(3): 36-37.

[编辑: 张 翔]