

# 复合张力模糊控制系统设计

张 鹏<sup>1,2</sup>, 杨瑞峰<sup>2</sup>, 张学良<sup>1</sup>, 郭晨霞<sup>2</sup>, 张 腾<sup>3</sup>

(1. 兰州理工大学 机电工程学院, 兰州 730050;

2. 中北大学 电子测试技术国防科技重点实验室, 太原 030051;

3. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

**摘要:** 张力控制是光纤弹性材料缠绕工艺中的一项关键技术, 它直接影响到缠绕制品的质量, 因此提出一种基于线速度差张力产生原理、交流伺服电机和微特直流力矩电机为施力机构的复合张力控制系统总体方案, 实现对张力的精密控制; 在对复合张力控制系统进行了建模分析基础上, 模拟真实光纤环缠绕环境, 采用模糊控制策略, 仿真实验验证了复合张力控制系统的控制效果, 表明复合张力模糊控制系统具有响应快、超调量小及精度高的优点。

**关键词:** 光纤缠绕; 复合张力控制; 模糊控制; 数学建模

## Design of Fuzzy Control System for Compound Tension

Zhang Peng<sup>1,2</sup>, Yang Rui feng<sup>2</sup>, Zhang Xue Liang<sup>1</sup>, Guo Chenxia<sup>2</sup>, Zhang Teng<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical & Electronic Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, North University of China,

Taiyuan 030051, China; 3. Beijing Aerospace Measurement & Control Corp., Beijing 100041, China)

**Abstract:** Tension control is a key technology in the process of fiber winding, which directly affect the quality of Fiber optic ring. The paper proposes a complex tension control system the overall program based on the principle of tension of the speed difference and with AC servo motor and micro DC motors as actuators to achieve precise control of tension. On the foundation of modeling and analysis for the compound tension control system and virtual reality Fiber optic ring winding environment, we use the method of fuzzy control strategy to reveal the effect of the compound tension control system. The simulation results show System has strong adaptability, fast response, small overshoot and with high accuracy, during the process of winding radius changes.

**Key words:** optical fiber winding; compound tension control; fuzzy control; mathematical modeling

## 0 引言

在光纤弹性材料缠绕过程中, 缠绕张力是一个极为重要的控制参数。张力选择不当或控制不稳定, 会导致光纤上应力分布不均匀, 出现匝间间隙过大、回叠及塌陷等现象, 影响光纤环缠绕质量, 降低制品抗冲击能力, 对光纤环产品的整体性能影响很大<sup>[1-3]</sup>。

张力控制系统存在参数时变、电机及被控对象的严重非线性等特点<sup>[4]</sup>。传统的 PID 控制器结构简单、鲁棒性较强, 但在跟踪设定值与抑制扰动能力之间存在矛盾, 使系统不能获得最佳的控制效果。本系统设计了模糊控制器, 将模糊控制规则和相关信息存入计算机知识库中作为经验知识, 计算机通过监测控制系统的实时响应状况, 运用模糊推理, 实现对张力的复合控制。既能体现模糊控制灵活且适应性强的特点, 又具有 PID 控制精度较高的特点。对张力控制系统的时滞、非线性、时变性具有一定的适应能力, 且鲁棒性能较好、响应快, 大大提高了张力控制系统的动静态特性。

## 1 复合张力控制系统

依据光纤环圈缠绕过程中对张力的控制要求, 设定系统的张力控制范围 10~30 g, 控制精度  $\pm 5$  g, 正常绕光纤环速度不低于 60 r/min。为提高系统的控制精度、响应速度及可靠性, 复合张力控制系统采用反馈式控制方式, 以工控机为上位机、PMAC 多轴运动控制卡作为控制核心, 张力传感器实时检测光纤张力, 直流力矩电机作为执行元件产生张力, 直接作用在光纤上构成直接张力控制系统。当由于外界干扰导致张力值发生较小波动时, 利用直流力矩电机的堵转特性和堵转力矩与其电枢电压成正比特点, 通过调节电枢电压实现对输出力矩的控制进而控制张力, 对张力进行微调。以 LYX 系列稀土永磁式直流力矩电动机为例其响应时间可达 0.1 ms 左右。

同时, 基于速度差的张力产生原理, 以交流伺服电机作为执行元件, 依据张力传感器实时检测光纤张力的大小, 张力控制器输出变化量控制 PMAC 多轴运动控制卡动态地修正激励电流, 控制交流变频调速电机的转速构成间接张力控制系统, 实现对张力进行粗调。以安川交流伺服  $\Sigma-V$  系列电机为例, 电机整定时间为 4 ms 左右。

张力的直接和间接共同控制组成了闭环复合张力控制系统, 系统结构如图 1 所示。张力设定值由上位工控机以 Ethernet 接口通讯方式发送给 PMAC 多轴运动控制卡, 缠绕张力信号实时反馈到 PMAC 多轴运动控制卡, 并与设定张力值进行

收稿日期: 2014-01-16; 修回日期: 2014-03-28。

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题 (20121420110003); 山西省国际科技合作项目 (2013081031)。

作者简介: 张 鹏 (1979-), 男, 山西运城人, 博士研究生, 讲师, 主要从事测控技术及仪器、机械设计制造及其自动化方向的研究。

比较。经上位计算机控制运算后, 由 PMAC 多轴卡输出控制信号到伺服电机驱动器或力矩电机驱动器, 控制交流变频调速电机的转速或经功率放大环节修正执行元件的输出力矩。复合张力控制系统具有响应时间快、张力粗调和微调结合、可靠性高的特点, 实现对光纤张力的实时精确控制。

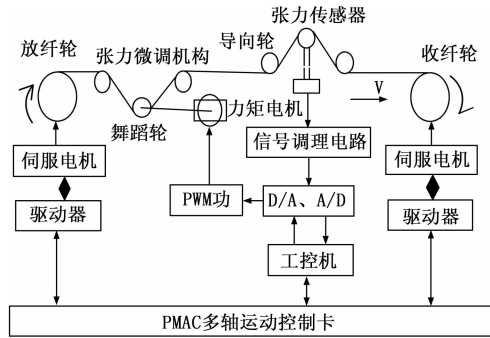


图 1 复合张力控制系统结构图

## 2 复合张力控制系统模型建立

### 2.1 伺服电机模型

永磁同步电机伺服系统是一个耦合性较强的非线性系统<sup>[5]</sup>, 为了能够对系统进行良好地控制, 必须从复杂的系统中抽象出其数学模型, 达到系统设计的要求。在实际的机械运动中, 考虑各种不同扰动的作用, 经过机理建模分析法得到交流伺服电机的传递函数<sup>[6]</sup>:

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

式中,  $K_m$  为电机的增益系数,  $T_L$  为电机的机械时间常数,  $T_s$  为电机的电气时间常数。

### 2.2 直流力矩电机模型

在实际控制系统中, 舞蹈轮和力矩电机是刚性连接, 因此取力矩电机为研究对象, 力矩电机堵转状态下, 系统从输入  $V_i(s)$  到输出  $T_d(s)$  开环传递函数为:

$$\frac{T_d(s)}{V_i(s)} = \frac{K_L K_M}{JLs^3 + (JR + BL)s^2 + (BR + LK_L + K_e K_M)s + K_L R} \quad (2)$$

式中,  $K_L$  为电机转矩与电机电枢角速度关系系数 ( $N \cdot \frac{m \cdot s}{rad}$ ),  $K_M$  为电磁转矩系数 ( $N \cdot \frac{m}{A}$ ),  $J$  为系统折算到电机轴的总转动惯量 ( $g \cdot cm \cdot s^2$ ),  $L$  为电机电枢回路总等效电感 (H),  $R$  为电机电枢回路总电阻 ( $\Omega$ ),  $B$  为机械系统的粘性阻尼比,  $K_e$  为反电势系数 ( $N \cdot \frac{m}{A}$ );

### 2.3 传感器模型

张力传感器将张力变化转化为电压的大小, 为线性传感器。用传递函数表示的数学模型为:  $G_T(s) = K_T$ , 可以把它当作比例环节。

### 2.4 复合张力控制系统模型框图

张力控制系统采用复合张力控制, 其系统结构如图 2 所示。

复合张力控制系统由张力间接控制部分和张力直接控制两

部分组成。张力间接控制是利用放纤线速度和收纤线速度之差产生张力, 实现光纤上张力的粗调。系统根据安装的旋转编码器采集的脉冲信号, 计算出实时速度, 通过速度环反馈到 PID 控制器, 调节实现指令速度与实时转速稳定; 张力传感器采集的实时张力的信号, 通过外环反馈到模糊控制策略随时调

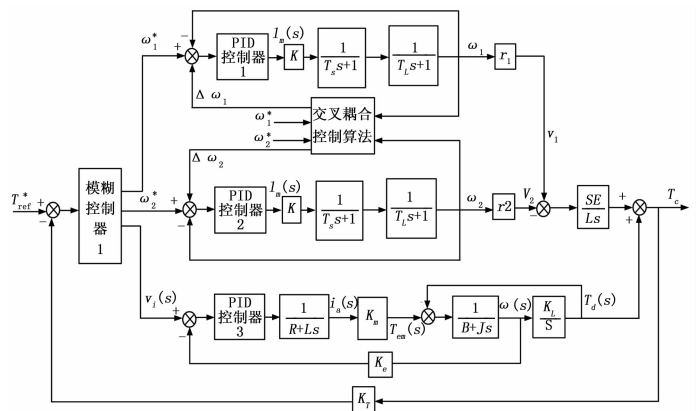


图 2 复合张力控制系统模型框图

整伺服电机控制电压调速, 进而间接控制光纤丝上的张力。张力直接控制以直流力矩电机为执行器, 利用直流力矩电机的堵转特性和堵转力矩与其电枢电压成正比特点, 通过调节电枢电压实现对输出力矩的控制进而控制光纤上的张力。

交叉耦合控制算法将收纤、放纤电机的速度信号进行比较, 从而得到一个差值作为附加的反馈信号。将这个附加的反馈信号作为跟踪信号, 使收纤、放纤电机获得良好的同步控制精度。

## 3 模糊控制器设计

复合张力控制系统为多输入、多输出控制系统<sup>[7]</sup>, 如图 3 所示。模糊控制器输入信号为: 张力的偏差  $e$  和偏差的变化率  $ec$  (见图 4), 输出信号为: 收纤电机指令转速  $\omega_1^*$ 、放纤电机指

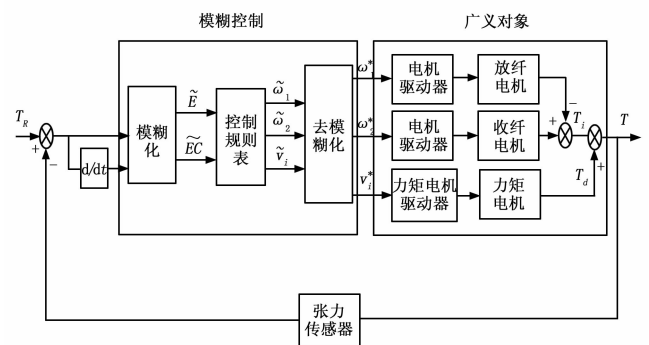


图 3 复合张力模糊控制框图

令转速  $\omega_2^*$ 、直流力矩电机控制电压  $v_i$ 。设张力的允许误差在  $\pm 10 g$ , 偏差  $e$  的论域为  $[-10, 10]$ , 偏差变化率  $ec$  的论域为  $[-1, 1]$ ,  $e$  和  $ec$  的语言变量都为  $[NB, NM, NS, ZERO, PS, PM, PB]$ , 分别表示为:  $\{$  负大, 负中, 负小, 0, 正小, 正中, 正大  $\}$ 。  $\omega_1^*$ 、 $\omega_2^*$  的论域为  $[-6, 6]$ 、 $v_i$  的论域为  $[-4, 4]$ ,  $\omega_1^*$ 、 $\omega_2^*$  和  $v_i$  的语言变量都为  $[NB, NS, ZERO,$

表 1 模糊控制规则表

	$e$	$e_c$	$\omega_1^*$	$\omega_2^*$	$v_i$		$e$	$e_c$	$\omega_1^*$	$\omega_2^*$	$v_i$
1	NB	NB	NB	PB	NONE	26	ZEROPS	ZERO	ZERO	PS	
2	NB	NM	NB	PS	NONE	27	ZERO	PM	ZERO	ZERO	PS
3	NB	NS	NB	ZERO	NONE	28	ZERO	PB	ZERO	ZERO	PB
4	NB	ZERO	NS	PS	NONE	29	PS	NB	ZERO	ZERO	PB
5	NB	PS	NS	ZERO	NONE	30	PS	NM	ZERO	ZERO	PS
6	NB	PM	ZERO	PB	NONE	31	PS	NS	ZERO	ZERO	PS
7	NB	PB	ZERO	PS	NONE	32	PS	ZERO	ZERO	ZERO	NS
8	NM	NB	NB	PB	NONE	33	PS	PS	ZERO	ZERO	NS
9	NM	NM	NB	PS	NONE	34	PS	PM	ZERO	ZERO	NS
10	NM	NS	NB	ZERO	NONE	35	PS	PB	ZERO	ZERO	NB
11	NM	ZERO	NS	PS	NONE	36	PM	NB	NB	NS	NONE
12	NM	PS	NS	ZERO	NONE	37	PM	NM	NB	ZERO	NONE
13	NM	PM	ZERO	PB	NONE	38	PM	NS	NS	ZERO	NONE
14	NM	PB	ZERO	PS	NONE	39	PM	ZERO	PS	ZERO	NONE
15	NS	NB	NS	ZERO	NB	40	PM	PS	PS	NS	NONE
16	NS	NM	NS	ZERO	NS	41	PM	PM	PS	NS	NONE
17	NS	NS	ZERO	ZERO	NS	42	PM	PB	PB	NS	NONE
18	NS	ZERO	ZERO	ZERO	NS	43	PB	NB	NB	PB	NONE
19	NS	PS	ZERO	ZERO	PS	44	PB	NM	NS	PS	NONE
20	NS	PM	ZERO	ZERO	PS	45	PB	NS	NS	ZERO	NONE
21	NS	PB	ZERO	ZERO	PB	46	PB	ZERO	PS	ZERO	NONE
22	ZERO	NB	ZERO	ZERO	NB	47	PB	PS	PS	NS	NONE
23	ZERO	NM	ZERO	ZERO	NS	48	PB	PM	PB	NS	NONE
24	ZERO	NS	ZERO	ZERO	NS	49	PB	PB	PB	NB	NONE
25	ZERO	ZERO	ZERO	ZERO	ZERO						

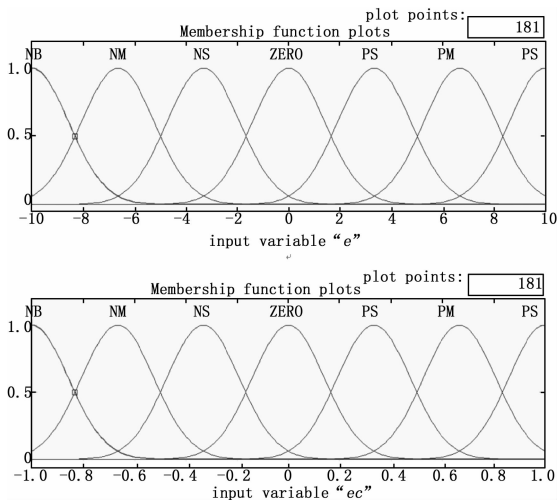


图 4  $e$  和  $e_c$  的隶属度函数曲线

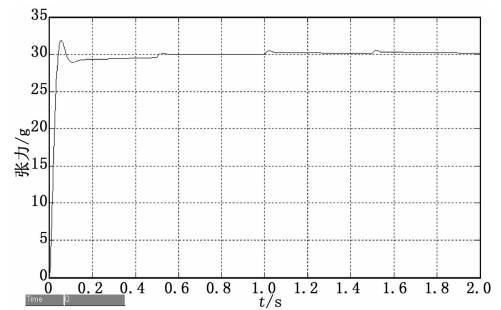


图 5 张力控制过程

$PS, PB]$ , 分别表示为: {负大, 负小, 0, 正小, 正大},  $e$  和  $e_c$  的隶属度函数选择高斯型。模糊控制规则, 如表 1 所示。

模糊控制规则, 如表 1 所示。

#### 4 复合张力控制系统仿真实验

该仿真实验是通过 Matlab 支持下的 Simulink 实现的, 模拟真实光纤环缠绕环境, 系统采用 PWM 控制结合 PID 闭环

控制的方法实现了对力矩电机堵转状态下转矩的控制。采用模糊控制器, 进行复合张力控制系统的仿真。参数设置如下: 交流伺服电机机械时间常数  $T_{L1} = 12.25 \text{ ms}$ ; 电机的电气时间常数  $T_{s1} = 1.48 \text{ ms}$ 。直流力矩电机电机转矩与电机电枢角速度关系系数  $K_L = 0.15 \text{ N} \cdot \frac{\text{m} \cdot \text{s}}{\text{rad}}$ , 电磁转矩系数  $K_M = 0.1 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{A}}$ , 电机轴的总转动惯量  $J = 44 \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$ ; 电机电枢回路总等效电感  $L = 0.00612 \text{ H}$ ;  $R$  为电机电枢回路总电阻  $R = 75 \Omega$ ;  $B$  为机械系统的粘性阻尼比; 反电势系数  $K_e = 0.014 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{A}}$ 。

仿真模拟实际光纤环缠绕过程中随着卷径的实时变化, 张力波动的变化情况。本系统中, 收线轮不断收线过程中, 放线

轮线径  $R1$  从初始值  $0.09\text{ m}$  开始, 以光纤外径  $125\ \mu\text{m}$  呈现阶梯式减小; 收线轮线径  $R2$  从初始值  $0.04\text{ m}$  开始, 以光纤外径  $125\ \mu\text{m}$  呈现阶梯式增加。研究中假设经过  $0.5\text{ s}$ , 放线轮线径  $R1$  减小  $125\ \mu\text{m}$ ; 经过  $0.5\text{ s}$  收线轮线径  $R2$  增大  $125\ \mu\text{m}$ 。

系统初始设定的恒定张力控制值为  $30\text{ g}$ , 张力控制效果随时间的变化规律如图 5 所示。张力控制过程曲线上升时间约为  $100\text{ ms}$ , 调节时间约为  $0.5\text{ s}$ , 超调量为  $(32.6 - 30) / 30 = 8.6\%$ , 达到系统要求的控制目标, 系统最后处于恒张力状态, 稳态误差为  $(30.5 - 30) / 30 = 1.67\%$ 。在  $0.5\text{ s}$  间隔收、放线轮卷径突变的情况下, 系统恢复到设定张力并达到稳定状态的调节时间约为  $5\text{ ms}$ , 张力控制精度在  $\pm 0.5\text{ g}$ , 满足系统设计的要求。

## 5 结束语

本文提出一种基于线速度差张力产生原理、交流伺服电机和微特力矩直流电机为施力机构的复合张力控制系统总体方案, 采用模糊控制策略实现光纤环缠绕过程中张力的精密控制。通过仿真分析证实了计算模型参数正确、合理, 能较好地反映生产线实际工作状况。结果表明复合张力控制系统的控制

效果良好, 可为系统的设计和调试提供理论参考。

## 参考文献:

- [1] Lefevre H C. 光纤陀螺仪 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] Sanders S J, Strandjord L K, Mead D. Fiber Optic Gyro Technology Trends—A Honeywell Perspective [A]. Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest [C]. 2002, 1 (15): 5–8.
- [3] Kessler G, Brandenburg G, Schlosser W, et al. Structure and control of systems with continuous moving elastic webs and multi-motor drives [J]. Regelungstechnik RT, 1984, 32 (8): 251–266.
- [4] 李广伟, 张鑫波. 免疫 PID 控制器在 H 型钢张力控制中的应用 [J]. 计算机仿真, 2006, 23 (12): 302–305.
- [5] 陆士林, 丁永生. 免疫 PID 算法在张力控制系统中的应用 [J]. 测控技术, 2005, 24 (2): 26–28.
- [6] Yeung M F, Falkner A H, Sgergely. the control of tension in textile filament winding [J]. Mechatronics, 1995, 5 (2): 117–131.
- [7] Jung J Y, Im Y T. Fuzzy control algorithm for the prediction of tension variations in hot rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, (96): 163–172.
- [7] Deng M, Inoue A, Edahiro K. Fault detection in a thermal process control system with input constraints using robust right coprime factorization approach [J]. Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2007, 221 (6): 819–831.
- [8] Deng M, Bi S. Operator-based robust nonlinear control system design for MIMO nonlinear plants with unknown coupling effects [J]. International Journal of Control, 2010, 83 (9): 1939–1946.
- [9] Deng M, Inoue A, Yanou A. Stable robust feedback control system design for unstable plants with input constraints using robust right coprime factorization [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2007, 17 (18): 1716–1733.
- [10] Chen G, Han Z. Robust right coprime factorization and robust stabilization of nonlinear feedback control systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1998, 43 (10): 1505–1509.
- [11] Deng M, Inoue A, Ishikawa K. Operator-based nonlinear feedback control design using robust right coprime factorization [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51 (4): 645–648.
- [12] Wang A, Deng M. Robust nonlinear control design to a manipulator based on operator based approach [J]. ICIC Express Letters, 2012, 6: 617–623.
- [13] Chen Y, Wang D, Wang P. Reference model output following control design for a direct current servo control system [A]. 2011 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICA-MechS) [C]. IEEE, 2011: 134–138.

(上接第 1765 页)

通过比较图 4 和图 5, 可以发现使用本文的控制方法, 伺服系统可以快速、准确地跟踪给定信号, 并对参数扰动和外部干扰具有很强的鲁棒性, 最终达到精确跟踪的控制目的。因此, 本文提出方法的有效性由仿真结果验证。

## 5 结论

通过运用鲁棒右互质分解方法, 本文设计一种含有不确定性的直流伺服系统的鲁棒精确跟踪控制系统。通过设计算子反馈控制系统, 未知的不确定模型被消除。为了提高直流伺服系统的快速响应能力, 推出了新的跟踪条件, 即所谓的通用条件。最后, 仿真结果验证了设计系统的有效性。

## 参考文献:

- [1] 李红江, 徐国顺. 直流伺服系统离散变结构控制设计 [J]. 中小型电机, 2005, 32 (4): 35–39.
- [2] 李晓秀, 章 兢. 滑模变结构控制及其在直流伺服系统中的应用 [J]. 湖南工程学院学报 (自然科学版), 2004, 3: 002.
- [3] 邵 晶, 王忠庆. 基于直流伺服系统的模糊自适应控制应用 [J]. 电子测试, 2010, 1: 008.
- [4] 董立红. 基于遗传算法的直流伺服系统参数辨识及摩擦补偿控制 [J]. 计算机工程与科学, 2011, 33 (12): 174.
- [5] 李木国, 刘于之, 张 群, 等. 电机伺服系统中的数字控制技术研究与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (5): 1082–1084.
- [6] 焦竹青, 屈百达, 徐保国. 遗传算法在直流伺服系统摩擦补偿中的应用 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41 (8): 944–948.