

# 电梯平衡链测长设备控制系统的设计与研究

史先传, 杭云龙, 徐镇冬, 苏胜辉

(常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 以 STM32F103 为主控制器, 威纶通 MT6103iq 为人机界面, 设计了一套完整的电梯平衡链测长设备控制系统; 读取直线位移传感器的电压信号来判断摩擦力变化范围, 结合模糊控制算法实现对伺服电机转速的实时调节, 补偿测量误差; 读取编码器的脉冲信号, 并通过公式将其转化成长度, 在触摸屏上实时显示; 测量误差被控制在 0.1% 之内。

**关键词:** 平衡链; 测长设备; 控制系统; 模糊控制; 测量误差

## Design and Study of Control System for Elevator Balance Chain Length Measuring Equipment

Shi Xianchuan, Hang Yunlong, Xu Zhendong, Su Shenghui

(Mechanical Engineering Department, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** A complete control system for the elevator balancing chain length measuring equipment was designed with STM32F103 as the main controller and Wirunton MT6103iq as the man-machine interface. The voltage signal of the linear displacement sensor was detected to judge the range of the friction force, and the speed of servo motor can be adjusted in real time with fuzzy control algorithm, then the measurement error can be compensated. The pulse signal of encoder was detected and transformed into length, and displayed on touch screen in real time. The measurement error was controlled within 0.1%.

**Keywords:** balance chain; length measuring equipment; control system; fuzzy control; measuring error

### 0 引言

电梯平衡链是用来平衡电梯轿厢和配重侧两端重量差的, 从而达到电梯平稳运行的目的<sup>[1]</sup>。由于电梯补偿链表面包裹了一层 PVC 复合材料, 不能直接利用普通电焊锚链的长度计算公式将长度算出来。现有的测长机构是类似于线缆计米器之类的装置, 不适用于平衡链这种链环与链环之间凹凸不平的设备, 测量误差偏大<sup>[2]</sup>。为提高测量精度, 本文设计了一种以 STM32F103RCT6 为主控制单元, 以触摸屏为上位机, 并基于模糊控制算法的自动测长控制系统, 大大提高测量效率的同时, 减小了测量误差。该方案设计可以给企业带来巨大的经济效益。

### 1 测长原理分析

整个测长设备如图 1 所示: 主要包括压紧机构, 牵引机构以及测长机构三个部分组成。压紧机构包括 2 个大压紧轮和三个小压紧轮, 通过气缸下降给链条足够的压力。牵引机拉动链条, 通过摩擦力带动下同步带运动, 由于链环与链环之间凹凸不平, 摩擦力会产生波动, 这时会发生打滑或者卡死的情况。当摩擦力变小时, 滑块会沿着导轨向前运动, 前直线位移传感器会检测到电压信号, 反馈给单片机, 增大电机转速, 使滑块回到原来位置。同理, 当摩擦力变大时, 滑块会向后移动, 后位移传感器会有电压

信号, 反馈给单片机, 减小电机转速。这就可以进行自动补偿由于摩擦力波动而产生的测量误差。通过伺服电机驱动主计量轮, 读取编码器旋转角度, 即可测得链条长度。

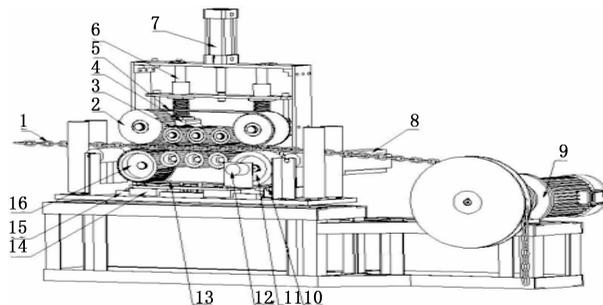


图 1 测长机构示意图

### 2 硬件设计

#### 2.1 总体硬件设计

控制系统总体框图如图 2 所示。包括单片机最小系统电路, 传感器信号接受电路, 伺服驱动电路, 编码器信号接收电路, 气缸驱动电路, 以及触摸屏与单片机通信电路等。

主控制器为基于 Cortex-M3 为核心的 STM32F103RCT6, 主频最高可以达到 72 MHz<sup>[3]</sup>, 片内存储空间为 256 Kb。单片机最小系统包括: 电源, 晶振以及复位三个模块。控制

收稿日期: 2018-11-01; 修回日期: 2018-12-19。

作者简介: 史先传(1972-), 男, 安徽合肥人, 副教授, 博士, 主要从事机电一体化产品的开发方向的研究。

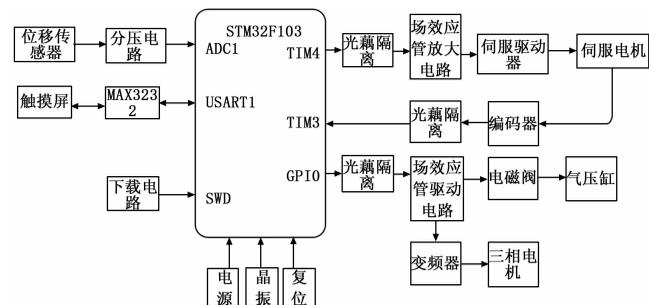


图 2 控制系统硬件原理图

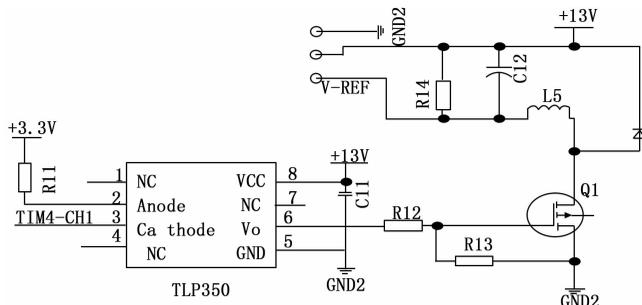


图 3 调压电路原理图

板外部接入输入电源 12 V 给电磁阀通电来控制气缸伸缩运动, 从而进行压紧或抬起压紧机构。同时通过降压芯片 7805 以及 lm1117-3.3 来输出 3.3 V 电压给单片机供电。为节约 I/O 端口资源, 下载方式采用 SWD 模式, 在高速模式下比 JTAG 模式更加可靠。触摸屏通过 MAX3232 和 STM32F103RCT6 的串口 1 即 PA9, PA10 两引脚相连, 用来控制整个测量设备的运动以及进行数据监测。因为位移传感器的输出电压范围为 0~10 V, 所以需要进行降压, 通过电阻分压的方式得到 0~3.3 V 的电压。当滑块靠近外移传感器时, 输出电压会减小, 远离时输出电压会增大。STM32 自带的 ADC 功能会读取电压值, 进行判定。为了防止输入输出信号干扰, 每个端口输出都采用了光耦隔离的方式。光耦是以光为媒介把输入端信号耦合到输出端, 实现电—光—电的转换, 输入输出完全绝缘, 抗干扰能力强, 效率高。

### 2.2 伺服驱动器控制电路设计

该方案驱动器型号为安川 SGDV-5R5A01A 系列, 有位置、速度和转矩三种控制方式<sup>[4]</sup>。位置方式是通过数字量方式控制, 而速度和转矩方式通过模拟电压控制。为了获得良好的控制性能, 伺服控制器一般会设计成一个具有电流环、速度环、位置环三闭环回路的复合控制系统<sup>[5]</sup>。本设计方案采用速度方式, 可以把位置环移动到控制器上, 减少驱动器工作量, 提高效率。通过 TIM4 通道一调节占空比, 经过光耦 TLP350 转换后驱动场效应管, 根据占空比大小来改变 MOS 管导通时间, 从而实现电源输出的改变。图中电感起到滤波和储能的作用, 二极管起到稳压的作用。二极管反接可以防止电流电压的突变, 起到保护场效应管的作用。具体电路图如图 3 所示。这样可以得到 0~12 V 的模拟电压, 符合伺服驱动器输入电压范围要求。将 V-REF 端子与伺服驱动器 CN1 的针号 5 相连, 针号 6 接地即可实现电机的旋转。

### 2.3 编码器信号电路设计

光电编码器主要有两种: 绝对型和增量型。增量型编码器在旋转过程中每转过单位角度就会发出一个脉冲信号, 并且 A、B 相位相差正负 90°, 根据信号先后判断电机是正转还是反转。本设计所用编码器为增量型 E6B2-CWZ6C, NPN 集电极输出, 每转一圈发送 2 000 个脉冲。如图 4 所示: 将 A、B 相信号经过光耦 HCPL2630 隔离后分别接入 STM32 的

TIM3 通道一和通道二。STM32 的通用定时器三自带编码器计数模式, 编码器输入信号 TI1, TI2 经过输入滤波, 边沿检测产生 TI1FP1, TI2FP2 接到编码器模块, 将他们设置成上升捕获模式, 并在中断中读取, 便可进行计数。

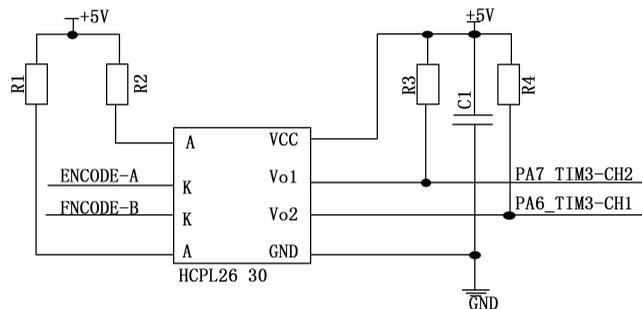


图 4 编码器信号接收原理图

### 2.4 通讯电路设计

单片机与触摸屏通讯接口电路如图 5 所示。因为单片机的输出电平和 RS-232 不一样, 因此需要芯片进行电平转换。相比于传统的 MAX232, 选择了功耗更小的 MAX3232 芯片, 该芯片采用专有低压差发送器输出级, 能够实现真正的 RS-232 性能, 外接 4 个 0.1 μF 的电容用于倍压和储能。将开发板 DB9 公头和触摸屏 RS232 公头的 2、3 口交叉连接, 5 直连, 便可实现通讯功能。

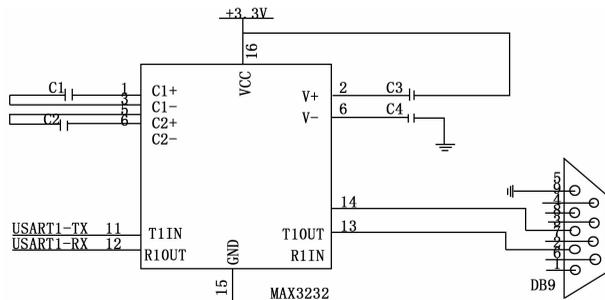


图 5 通讯接口电路

## 3 模糊控制系统设计

由于交流伺服系统存在参数时变、负载扰动以及伺服电动机自身和被控对象的严重非线性、强耦合性等不确定因素, 难以用传统的基于对象的模型控制方法来进行控制<sup>[6]</sup>。模糊控制以不依赖于被控对象的数学模型而被广泛的应用于工业生产中, 具有较强的鲁棒性。它是一种基于

语言规则与模糊推理建立在模糊集合上的控制理论<sup>[7]</sup>。将其用于伺服系统中可以很好的解决非线性、时变、耦合等等问题。因此设计了一个基于模糊控制的闭环控制系统。包括模糊控制器的设计以及想关规则的制定。

### 3.1 模糊控制器设计

模糊控制器的设计包括模糊化、建立模糊规则、清晰化等步骤。为此设计了一个双输入、单输出的二维模糊控制器，模糊控制系统框图如图 6 所示。

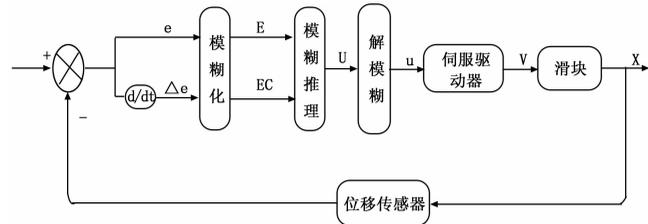


图 6 模糊控制器系统框图

模糊化：将精确的输入变量转化为模糊矢量。

模糊推理：包括数据库和规则库，提供数据，制定模糊规则并输出模糊量。

解模糊：将模糊量经过运算后再次转变成精确量用于控制被控对象。

以位移误差  $e$  和误差的变化率  $\Delta e$  作为输入，以控制伺服电机转速大小的模拟电压  $u$  为输出变量，语言变量对应为  $E$ 、 $EC$ 、以及  $U$ ，用“正大”( $PB$ )“正中”( $PM$ )，“正小”( $PS$ )，“零”( $O$ )，“负小”( $NS$ )，“负中”( $NM$ )，“负大”( $NB$ ) 七个语言变量来对这几个变量进行描述。

$E$  选取 7 个语言值：{ $PB, PM, PS, O, NS, NM, NB$ }； $EC$  选取 5 个语言值：{ $PB, PS, O, NS, NB$ }； $U$  选取 7 个语言值：{ $PB, PM, PS, O, NS, NM, NB$ }；根据经验和反复试验选择输入变量与输出变量的论域如下：

$E$  的论域  $X = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ；

$EC$  的论域  $Y = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ；

$U$  的论域  $Z = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

系统采用灵敏度强的三角形隶属度函数来描述语言变量论域上的模糊子集。借助 MATLAB/SIMULINK 中的模糊逻辑工具箱，得到如图 7 所示的输出隶属度函数图像。

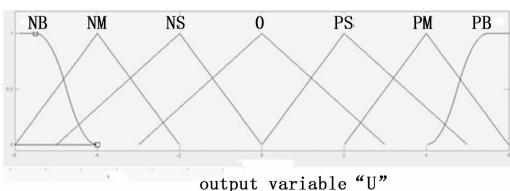


图 7 输出 U 的隶属度函数图像

### 3.2 模糊控制规则表建立

模糊控制规则是模糊控制器设计的核心<sup>[8]</sup>，在模糊逻

辑工具箱中进行模糊控制规则的设计<sup>[9]</sup>，系统所建立的是双输入单输出的模糊控制器，采用的模糊条件语句为：

if E and EC then U

在大量实验和调节之后，制定了 35 条模糊控制语句，并将其绘制成了表格。

建立的模糊控制规则表 1 所示。

表 1 系统模糊控制规则表

$E \backslash U$	$NB$	$NM$	$NS$	$O$	$PS$	$PM$	$PB$
$EC$							
$NB$	$PB$	$PB$	$PB$	$PS$	$NS$	$NM$	$NM$
$NS$	$PB$	$PB$	$PM$	$O$	$NS$	$NM$	$NM$
$O$	$PB$	$PM$	$PM$	$O$	$NM$	$NM$	$NB$
$PS$	$PM$	$PM$	$PS$	$O$	$NM$	$NB$	$NB$
$PB$	$PM$	$PM$	$PS$	$NS$	$NB$	$NB$	$NB$

### 3.3 解模糊方案设计

根据模糊规则表推理求出的是输出控制量的模糊控制集合，不能直接用来控制伺服驱动器，需要将模糊量转化为精确量。根据隶属度函数特性，采用加权平均法进行解模糊，其公式为：

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \mu_{U_i}(z_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{U_i}(z_i)} \quad (1)$$

式中， $Z_0$  为应用加权平均法求得的判决结果，也称为清晰值； $Z_i$  为输出量模糊集  $U_i$  中的元素； $\mu_{U_i}(z_i)$  为输出量模糊集  $U_i$  中各元素的隶属度函数。

在 MATLAB 的模糊逻辑工具箱中，对模糊推理过程进行了图形化处理，从中可以清晰得看出各模糊变量隶属度函数对系统输出量的影响。同时规则观测器可以针对系统输入量  $X$  和  $Y$  的不同组合计算出全部系统输出的精确量  $Z$ ，如图 8 所示。最终建立本系统的模糊控制查询表，如表 2 所示。

表 2 模糊控制查询表

$X \backslash Y$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	6	6	6	5	4	3	2	0	-1	-3	-3	-4	-4
-5	6	6	5	5	3	2	1	0	-1	-3	-3	-4	-4
-4	6	5	4	4	2	1	0	-1	-1	-3	-3	-4	-4
-3	5	5	4	4	2	1	0	-1	-1	-3	-3	-4	-4
-2	5	5	4	4	2	1	0	-1	-1	-3	-3	-4	-4
-1	5	4	4	4	2	1	0	-1	-2	-3	-3	-4	-4
0	5	4	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-4	-5
1	4	4	3	3	2	1	0	-1	-2	-4	-4	-4	-5
2	4	4	3	3	1	1	0	-1	-2	-4	-4	-5	-5
3	4	4	3	3	1	1	0	-1	-2	-4	-4	-5	-5
4	4	4	3	3	1	1	0	-1	-2	-4	-4	-5	-6
5	4	4	3	3	1	0	-1	-2	-3	-5	-5	-6	-6
6	4	4	3	3	1	0	-2	-3	-4	-5	-6	-6	-6

最后将模糊控制查询表存放于单片机寄存器中。通过程序编写, 使得控制器根据输入的偏差和偏差变化率信号, 由查询表自行计算出实际的输出控制量即输出电压大小。

### 4 软件设计

系统程序采用模块化设计, 包括主程序, 传感器电压采集子程序, 电机驱动子程序, 编码器计数子程序, 以及基于 MODBUS 的触摸屏与单片机通讯程序等。具体的控制流程图如图 8 所示。

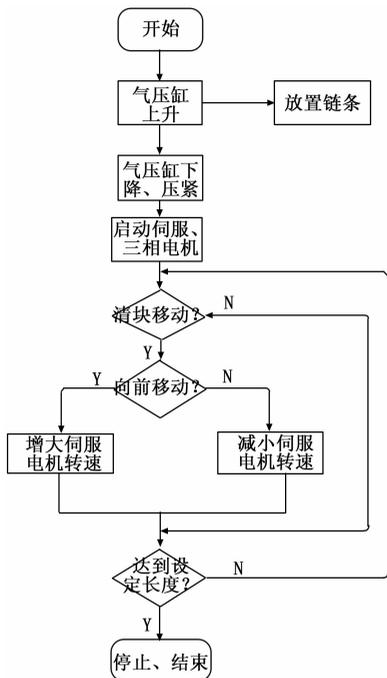


图 8 程序流程图

#### 4.1 电压采集程序设计

导轨前后各固定一个直线位移传感器, 通过 STM32 ADC1 的通道 10 和 11 分别读取经分压后的电压, 并经过 DMA 传输, 减少 CPU 负荷的同时增加采集速度。传感器的电压显示值和距离成线性关系。为了数据的准确性, 每组读取 100 个数据放入数组中, 并取平均值来作为速度调节的依据。DMA 的主要配置如下: 将 DMA1 通道 1 的外设基地址设为 (uint32\_t) (&(ADC1->DR)), 内存基地址设置成 (u32) &ADC1\_ConvertedValue, 并开启循环模式和中断。ADC 设置成连续转换, 右对齐, 通道个数两个, 并使用软件触发的模式。STM32 的 ADC 分辨率为 12 位, 可以求得模数转换值的取值范围为 0-4096, 电压量程为 0~3.3 V, 则传感器的读取电压值为模数转换值除以 4096 乘上 3.3 即:

$$V_m = ADC\_DR * \frac{3.3}{4096} \quad (2)$$

具体程序流程图如图 9 所示。

#### 4.2 PWM 调压程序设计

因摩擦力不断波动, 因此要对伺服电机的速度实时调节, 采取速度控制方式, 伺服驱动的速度控制方式为模拟

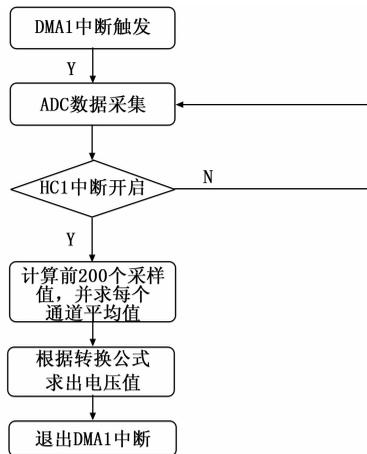


图 9 传感器电压读取流程图

电压控制, 采用 PWM 方式可以实现数字量对模拟电路的控制。根据电压采集数据集合模糊控制器的规则自动调节占空比, 将自动重装载器值设置为 249, 定时器预分频设置为 11, 可以得到 24 kHz 的 PWM 波。输出比较方式设置成 PWM2 模式, 向下计数模式。根据不同占空比可以获得不同电压值来驱动伺服驱动器, 继而可以实时调节伺服电机的转速来自动补偿测量误差。查阅安川电机手册可以发现速度控制模式下额定电压为 6 V, 额定转速为 2000 r/min, 则电机瞬时速如下:

$$V_m = 2000 * \frac{V_{REF}}{6} \quad (3)$$

式中,  $V_{REF}$  为伺服驱动电压, 单位 V,  $V_m$  为电机转速, 单位 r/min。

#### 4.3 编码器计数程序设计

STM32F103 通用定时器自带编码器模式, 编码器输入信号 TI1, TI2 经过输入滤波, 边沿检测产生 TI1FP1, TI2FP2 接到编码器模块, 通过配置编码器的工作模式, 即可以对编码器进行正向/反向计数。因 TIM3\_CNT 计数器是 16 位的, 最高计数为 65535, 而编码器旋转一圈的脉冲数为 2000, 旋转圈数过多时会溢出。故将自动重装载值 ARR 设置为 2000, 并使能中断进行溢出中断计数, 用  $j$  表示溢出的次数, 每旋转一圈,  $j$  的值加 1, 计数器重新计数。最后获得的总脉冲数为 2000 $j$  加上寄存器 TIM3->CCR1 的值, 用  $S$  表示。则测量的长度  $L$  为:

$$L = \pi * d * j + S * \frac{\pi * d}{2000} \quad (4)$$

式中,  $d$  为同步带外径, m。

#### 4.4 通讯程序设计

威纶通 MT6103iq 触摸屏和 STM32 之间采用基于 MODBUS 协议的 RTU 模式进行数据传输。触摸屏为主设备, STM32 为从设备<sup>[10]</sup>。使用循环冗余校验码 CRC16 进行校验。常用的 MODBUS 功能码包括 01: 读开关量状态, 03: 读保持型寄存器, 06: 写寄存器。通信过程包括串口配置, 报文接发, 报文处理三个方面。串口参数配置如下:

波特率 9600，数据位 8 位，停止位 1 位，无奇偶校验位。在进行基础的串口配置之后，还需要开启串口中断，在中断服务函数中对接收和发送的数据进行检测和处理。报文通过 8 位字符数组进行接收，再根据功能码进行数据处理。

### 5 实验结果分析

实验购买的链条为包塑性补偿链，截取 20.1 米长度来进行试验。将是否运用模糊控制算法将实验分成两组，在不同速度下分别进行 20 次实验。实验测量结果如表 3~4 所示。

表 3 没有设计模糊控制器下的各速度测量值

运行基本速度 (m/s)	测量平均长度 (m)	实际长度 (m)	测量误差 (m)	误差率
0.3	20.313	20.1	0.213	1.060%
0.4	20.322	20.1	0.222	1.104%
0.5	20.435	20.1	0.335	1.667%
0.5	20.461	20.1	0.361	1.796%
0.8	20.472	20.1	0.372	1.850%

表 4 模糊控制下的各速度测量值

运行基本速度 (m/s)	测量平均长度 (m)	实际长度 (m)	测量误差 (m)	误差率
0.3	20.025	20.1	-0.075	-0.373%
0.4	20.065	20.1	-0.035	-0.174%
0.5	20.123	20.1	0.023	0.114%
0.6	20.118	20.1	0.018	0.090%
0.8	20.122	20.1	0.022	0.109%

由以上两表可以看出，当没有设计模糊控制器的情况下，测量误差较大，且速度越大，误差越大，而在设计模糊控制器后误差明显减小，且在基本运行速度达到 0.6 m/s 时误差达到最小值。

通过调节速度控制扭矩，由传统被动送线方式转变为主动送线方式，保持张力稳定性。控制装置是张力控制核心，对于整个控制系统具有重大影响，通过接收来自张力传感器的反馈信号，根据时序图设计具体排线方案，通过调试确定惯性补偿系数，保证绕线能够平滑移动，改善惯性误差，最终实现绕线机张力稳定控制。通过研究结果可知，采用所研究的控制技术最高控制效率可达到 90%。自动化程度高、功能齐全、动力强劲，适用于矩形和椭圆形线圈的绕制，适合启动平稳、频繁点动、制动平稳及急停刹车的工作状态。

通过调节速度控制扭矩，由传统被动送线方式转变为主动送线方式，保持张力稳定性。控制装置是张力控制核心，对于整个控制系统具有重大影响，通过接收来自张力传感器的反馈信号，根据时序图设计具体排线方案，通过调试确定惯性补偿系数，保证绕线能够平滑移动，改善惯性误差，最终实现绕线机张力稳定控制。通过研究结果可知，采用所研究的控制技术最高控制效率可达到 90%。自动化程度高、功能齐全、动力强劲，适用于矩形和椭圆形线圈的绕制，适合启动平稳、频繁点动、制动平稳及急停刹车的工作状态。

### 参考文献:

[1] 胡红钱, 高奇峰, 刘健, 等. 一种全自动绕线机的设计 [J]. 上海纺织科技, 2017, 23 (3): 56-59.  
 [2] 张施令, 彭宗仁. 换流变压器出线装置非线性电场模拟及其绝缘结构优化 [J]. 高电压技术, 2018, 15 (6): 21-29.

### 6 结束语

控制系统解决了因摩擦力波动而造成测量误差的问题，以 STM32 为主控制器，线性位移传感器为探测器，配合模糊控制算法，实时调节伺服电机转速。系统高效稳定，测量基本速度达到 0.6 m/s。经大量实验后测得平均误差为 0.09%，符合预期值。

### 参考文献:

[1] Zhu W D, Ren H. A linear model of stationary elevator traveling and compensation cables [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332 (12): 3086-3097.  
 [2] 龙芹, 李勇, 王袁武. 浅谈线缆计米器 [J]. 计量工作者论坛, 2011, 21 (6): 57-59.  
 [3] 许琨, 许哲, 李飞飞. 基于 ARM 微控制器的飞行数据记录仪设计 [J]. 电子技术应用, 2018 (11): 57-60.  
 [4] 孙兴伟, 候广政, 王可, 等. 交流伺服电机速度控制模式实现方法的研究 [J]. 机床与液压, 2012 (8): 54-55.  
 [5] 魏明涛, 何平, 王志成, 等. 基于 STM32 的伺服控制器接口技术研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016 (5): 79-82.  
 [6] 罗进生, 袁喜林, 赵凯, 等. 模糊 PID 控制在伺服系统中的应用 [J]. 机械设计与制造, 2013 (5): 229-231.  
 [7] 夏国清, 陈华珍. 模糊理论和 PID 相融合的两轮自平衡机器人智能控制系统 [J]. 现代电子技术, 2018 (21): 177-120.  
 [8] 王朋朋, 黄海龙. 模糊 PID 在粮食烘干炉温度控制系统中的应用研究 [J]. 机械设计与制造, 2017 (2): 40-42.  
 [9] Saban, Cetin, Ali Volkan Akkaya. Simulation and hybrid fuzzy-PID control for positioning of a hydraulic system [J]. Nonlinear Dynamics, 2010, 61 (3): 469-470.  
 [10] 徐伟, 史先传, 钱磊, 等. 基于 STM32 的振动式循环脉冲电解控制系统设计 [J]. 机床与液压, 2016 (2): 172-174.  
 [3] 乔立军, 杨瑞峰, 张鹏, 等. 光纤环绕制中张力控制与高精度排线的研究 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (25): 272-277.  
 [4] 徐晶, 李健, 丁颂, 等. 基于自抗扰控制的放卷系统张力控制器设计 [J]. 包装工程, 2016, 14 (15): 150-155.  
 [5] 杜宇, 王琛, 杨涛, 等. 基于 PLC 的整经机恒张力控制系统设计 [J]. 毛纺科技, 2016, 44 (6): 58-61.  
 [6] 霍蛟飞, 马文明, 陈鑫. 复卷机张力控制系统的设计及应用 [J]. 中国造纸, 2018, 37 (5): 50-55.  
 [7] 朱其祥, 包冰映. 基于前馈控制的复卷机张力控制系统 [J]. 中国造纸, 2018, 37 (3): 52-57.  
 [8] 杨德伟, 张文源, 林炳宏, 等. 基于 FPGA 的图文打印机卷纸张力控制设计与实现 [J]. 电子设计工程, 2017, 25 (1): 110-113.  
 [9] 庄雷. 绕线机自动排线伺服控制系统的设计思路 [J]. 山东工业技术, 2014 (24): 46.  
 [10] 赵瑞林, 王宗哲. 基于转矩控制模式卷纸机收卷恒张力控制系统设计 [J]. 电子设计工程, 2017, 25 (12): 81-84.