

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.009

一种盘式磁滞张力器控制器设计

崔明浩,张昊,焦洋浩,王彦博,熊剑

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘 要:设计一种盘式磁滞张力器的控制器,包括张力控制、断纱检测和主控制 3 个模块。张力控制模块利用可调 BOOST 电路输出不同电流来控制张力器输出不同张力;断纱检测模块利用光电对管检测走纱时不同电压信号判断是否断纱;主控制模块利用单片机输出不同占空比的脉冲宽度调制(PWM)波控制张力控制模块,接收并处理走纱信号。试验对张力控制模块 PWM 波的占空比与张力进行了标定,并探究不同材质纱线对张力的影响;对走纱信号的电压进行检测,验证了断纱检测功能的可实现性。试验结果表明:张力器控制器设计符合张力器的工作要求。

关键词:纺织机械;纱线张力器;BOOST 电路;单片机;断纱检测;脉冲宽度调制

中图分类号:TS103.7 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)06-0050-06

Design of Controller for Disk Hysteresis Tensioner

CUI Minghao,ZHANG Hao,JIAO Yanghao,WANG Yanbo,XIONG Jian

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:This paper designs a controller for a disc hysteresis tensioner, which includes three modules like tension control, yarn breakage detection and main control. The tension control based on the PWM control BOOST circuit controls the tensioner to output different tensions, yarn breakage detection uses a photoelectric tube to detect different voltage signals during yarn running, and main control module utilizes single chip microcomputer to output PWM waves with different duty cycles controlling the tension, receiving and processing yarn running signal. The test was conducted to calibrate the PWM duty cycle and tension of the tension control module, and the influence of yarns of different materials on the tension was explored. And the yarn breakage detection voltage signal was detected verifying the feasibility of yarn breakage detection. The test results show that the controller designing meets the working requirements of the tensioner.

Keywords:textile machinery; yarn tensioner; BOOST circuit; single chip microcomputer; yarn break detection; PWM

0 引言

在现代纺织品织造工艺中整经阶段尤为重要,它要求每一根纱线的张力恒定一致,否则容易引起纱线断头或者粗纱冒纱等现象^[1-2]。纱线张力的控制是通过张力器来实现的,张力器的张力控制装置大都是依靠纱线与装置之间的动摩擦来为纱线提供张力,对纱线的磨损非常大。不同材质的纱线摩擦因数不同,张力装置产生的摩擦力不同,产生的张力也不同,纱线的张力很难控制^[3]。因此新式纱线张力器以及控制方式的设计具有十分重要的意义。

韩帅等^[4]设计了一种基于 STM32 的嵌入式纱线张力控制系统,采用主动退绕式结构,通过控制收卷电机和放卷电机两个直流无刷电机之间的转速差间接控制纱线张力,提高纱线张力的稳定性。石钢^[5]开发了电磁式磁滞纱线张力器,该张

力器利用电磁线圈产生的开路磁场,纱线通过线轮旋转带动转子上的磁滞耗能元件产生磁滞,旋转消耗磁能引起纱线张力。肖卫兵等^[6]利用单片机控制整经电机实现变频调速,进而控制纱线的张力。王藩^[7]设计了一个纱线恒张力控制系统,该系统通过霍尔传感器监测并调节桶槽的速度来调节纱线的张力。

本文开发了盘式磁滞张力器的控制器。在纱线整经过程中,张力器控制器通过利用 BOOST 升压电路对盘式磁滞张力器输入不同电流,使张力器产生不同的转矩进而产生不同的张力。同时张力器控制器还能够识别是否发生断纱,实现张力控制与断纱检测。

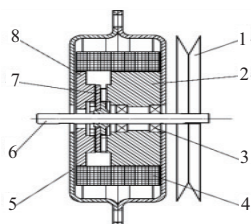
1 张力器结构原理

1.1 盘式磁滞张力器结构

图 1 为盘式磁滞式张力器结构。抱线轮 1 与

第一作者简介:崔明浩(1999—),男,辽宁朝阳人,硕士,研究方向为智能机电系统,1270228448@qq.com。

轴6连接,磁滞转子7与轴6连接,磁芯2、磁芯8与外壳5连接。线圈4通电产生磁场,纱线卷绕在抱线轮上,纱线运动带动抱线轮转动,进而带动转子转动,消耗磁场能量,产生磁滞转矩,阻碍转子向转动方向转动,进而阻碍纱线运动,产生张力^[8-9]。



1—抱线轮;2—磁芯 1;3—轴承;4—线圈;
5—外壳;6—轴;7—转子;8—磁芯 2。

图1 盘式磁滞式张力器结构图

1.2 盘式磁滞张力器张力产生原理

图2为盘式磁滞张力器的转矩产生原理图^[10],当转子经过磁芯上的一对磁极时,转子磁化并产生磁滞损耗^[11]。

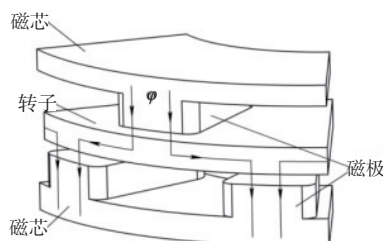


图2 盘式磁滞式张力器转矩产生原理图

盘式磁滞张力器的转矩公式为

$$M = \int_0^{\pi D_i} dM_x = cNVBH \quad (1)$$

式中: N 为磁极对数; V 为转子有效体积; B 为磁通密度; H 为磁场强度; c 为常数项。

假定抱线轮的半径为 R ,则抱线轮与纱线接触位置的切向力即为纱线提供的张力。

$$F = \frac{M}{R} = \frac{cNVBH}{R} \quad (2)$$

式中:磁通密度 B 与磁极转角、定转子之间的气隙和磁极高度有关;磁场强度与此纱线的张力与磁场强度 H 有关;磁场强度 H 与线圈和电流有关;转子有效体积 V 与转子内外径及厚度有关^[12-13]。本设计选用的盘式磁滞张力器参数如表1所示。

表1 盘式磁滞张力器的结构参数表

参数	数值
转子外径/mm	15.75
转子内径/mm	4.00
转子厚度/mm	1.4
气隙大小/mm	0.4
磁极高度/mm	1.7
磁极数量/个	8
磁极转角/(°)	7
安匝数/匝	342

在确定表1的数据之后,张力的影响因素只有输入电流的大小,输入张力器的电流越大,张力器给纱线提供的张力越大。

2 盘式磁滞张力器控制器设计

2.1 盘式磁滞张力器控制器总体结构

本文采用模块化设计,其总体结构如图3所示。

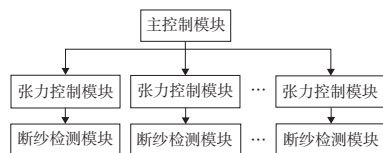


图3 盘式磁滞张力器控制器总体结构

结构由张力控制、断纱检测和主控制3个模块组成。张力控制模块主要实现张力器张力控制;断纱检测模块主要实现判断纱线是否发生断纱;主控制模块主要实现向张力控制模块提供控制信号以及接收并处理断纱检测信号。断纱检测模块连接到张力控制模块,张力控制模块连接到主控制模块上。一个主控制模块可以连接多个张力控制模块,本设计在主控制模块上设计了4个接口连接控制模块。

2.2 张力控制模块设计

张力控制模块主要使用BOOST电路输出不同电流给张力器实现张力控制。BOOST电路是开关直流升压电路,可以将输入电压提升到最多5倍^[14]。

本设计使用的盘式磁滞张力器的工作参数如表1所示。由表2可推出张力器的工作电压为24~120 V。

表 2 盘式磁滞张力器的工作参数表

参数	数值
线圈电阻/k Ω	1
工作电流/mA	24~120

张力控制模块为硬件电路,主要是 PWM 控制的 BOOST 升压电路^[15-16]。对直流升压,其升压范围一般不超过输入电压值的 5 倍。本设计最小电压为 24 V,最大电压为 120 V,输出电流调整率为 $\pm 5\%$ 。电路的控制信号投单片机提供,信号的频率为 80 kHz。设计基于 BOOST 电路驱动电路原理如图 4 所示,电路主要由盘式磁滞张力器 BOOST 驱动电路和开关管控制电路组成。

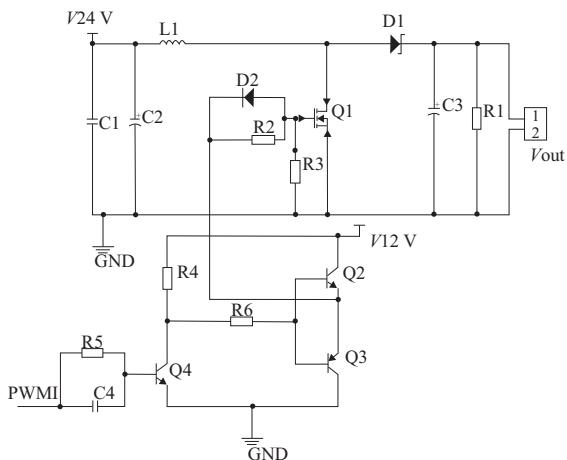


图 4 BOOST 驱动电路原理

为了提高 BOOST 电路的稳定性,本设计在输出位置添加了一个假负载,假负载需要满足功率要求;为了防止突然断电后下一次 MOSFET 管上电时栅极电容产生很大的漏源电流损坏 MOSFET 管,在栅极电和地之间添加一个电阻,形成的放电回路,保护 MOSFET 管;为了实现在 MOSFET 管关断时能够迅速地将栅极和源极之间的定容电荷释放掉,添加了二极管 D_2 ; Q_4 为放大三极管; Q_2 、 Q_3 组成图腾柱电路,图腾柱电路外接电源能够提高电流提供能力;本设计控制信号属于高频信号,为了避免在高频电路中出现信号延迟,添加加速电阻 C_4 。

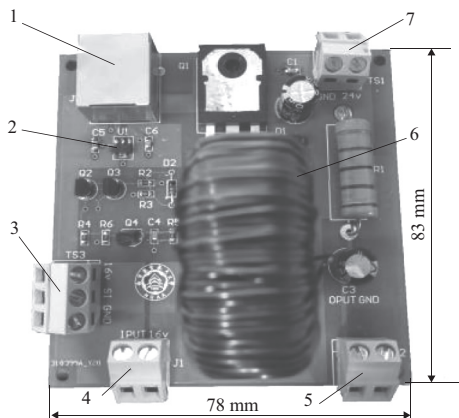
张力控制模块的电路板实物如图 5 所示。

2.3 断纱检测模块设计

断纱检测模块主要利用光电对管来实现断纱监测的功能。纱线穿过光电对管,遮挡住发射管发射的红外光,光敏三极管接收端产生微弱的电

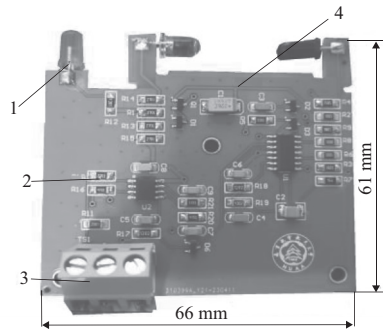
压变化,变化的信号经过运算放大器放大,然后经过由一对运算放大器组成的窗口比较器,通过设定窗口的上限值和下限值,将处于窗口内的电压信号处理为固定值的电压信号。利用这个原理就可以将纱线走纱信号和断纱信号分别设置为高电平和低电平,这样就可以利用单片机来区分断纱信号和走纱信号。

断纱检测模块的电路板实物如图 6 所示。



1—主控制模块接线座;2—电压转换电路;3—断纱检测模块接线座;
4—备用外接 16 V 接线座;5—张力器接线座;
6—BOOST 升压驱动电路;7—外接 24 V 接线座。

图 5 张力控制模块电路板

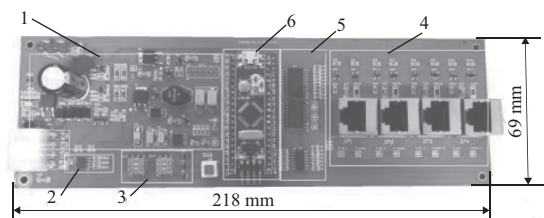


1—信号指示灯;2—模数转换电路;
3—张力控制模块接线座;4—信号采集模块。

图 6 断纱检测实物

2.4 主控制模块设计

主控制模块如图 7 所示,主要由电源模块、RS485 通信模块、控制板地址模块、单片机模块、信号处理模块和张力控制连接模块组成。每个主控制模块可分别控制 4 组张力控制和断纱检测模块。主控制模块使用 STM32F103C8T6 主控制芯片,使用 C 语言编程,移植 freeRTOS 实时操作系统实现软件层面的编写。



1—电源模块;2—485 通信模块;3—控制板地址模块;
4—张力控制连接模块;5—信号处理模块;6—单片机模块。

图7 主控制模块实物

主控制板外接 24 V 交流电源,电源模块 1 经过整流、降压,得到为单片机、为张力控制模块和断纱检测模块供电电压。

张力器控制器需要接入到张力控制系统中进行工作,因此主控制模块 RS485 与控制系统进行通信,接收系统传来的张力控制命令,将断纱检测信号发送给系统。主控制模块还有一根断纱信号线,这根线直接连接到系统中,一旦发生断纱,信号线点位拉高,系统识别后立刻停止卷绕电机并报警。

张力控制系统使用多个张力器控制器同时工作,为了实现每根纱线张力精准控制以及定位断纱检测的位置,每个张力器控制器需要一个独一无二的地址以便系统识别。主控制模块中利用两个旋转编码开关为张力器控制器设置地址。

主控制模块使用 STM32 单片机作为主控芯片,主控芯片通过输出不同占空比的 PWM 波为张力控制模块信号来接收处理好的断纱检测信号。

主控制模块接收到断纱检测模块的走纱信号不是标准 TTL 电平信号,并且信号还有抖动。因此信号先经过施密特触发器,将信号的电压变成清晰无抖动的标准电平信号,然后经过三态缓冲器,由单片机控制是否读取断纱信号,以便在单片机不需要读信号时其 IO 口可以复用为其他功能。

张力控制连接模块时主控制模块与张力控制模块供电通信的接口。模块中控制电路使单片机可以控制是否与该张力控制和断纱检测模块组进行供电通信,实现可以独立控制每个模块组的功能。

主控制模块的软件设计是基于 freeRTOS 实时操作系统来实现的,系统主要通过创建 485 信息发送任务和断纱检测任务实现主控制板的功能,程序执行流程如图 8 所示。

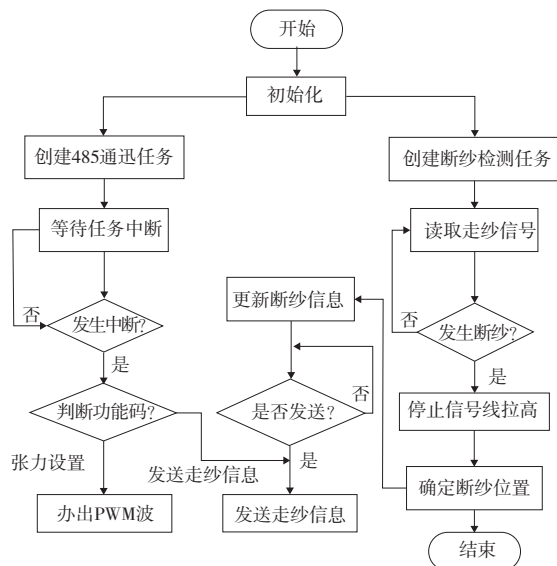


图8 主控制模块程序执行流程图

3 试验

3.1 张力控制器试验平台

试验平台如图 9 所示,试验平台主要由送线轮、张力控制模块、外接电源、主控制模块、张力器、电流表组成。试验使用手持式德国施密特 ZD2-100 张力计测量张力。

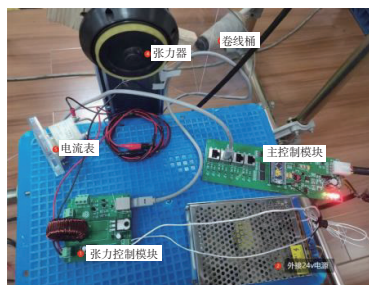


图9 张力控制与断纱检测试验平台

3.2 张力控制模块 PWM 占空比与张力标定试验

试验主要内容为对主控制模块单片机输出给张力控制模块的 PWM 波占空比和纱线张力标定并探究不同材质的纱线对张力的影响。本设计要求的纱线张力范围是 10~70 cN。因为磁滞张力器磁滞转矩在连续升高和下降时遵循磁滞回线的特性^[17],因此试验^[18]中需要分别测量正向增值和反向减值。试验使用手持张力测量仪,为减小误差,现进行 5 组试验,并取其平均数。经试验初步测量 PWM 占空比在 48%之前张力过小无法进行精确测量,因此试验不进行过小张力的测

量^[19]。具体的试验步骤如下:

- 1) 试验测量输入占空比范围为 48%~80%,以 2%为间距,共有 33 个测量点,纱线为棉线;
- 2) 占空比从 48%开始增加,分别测量 17 个占空比对应的张力;然后占空比从 80%开始减少,分别测量 16 个占空比对应的张力;
- 3) 重复步骤 2)4 次得到 5 组数据;
- 4) 换涤纶纤维线,重复步骤 2)一步骤 3) 试验,得到的数据如表 3、表 4 所示,并绘制得到曲线如图 10、图 11 所示。

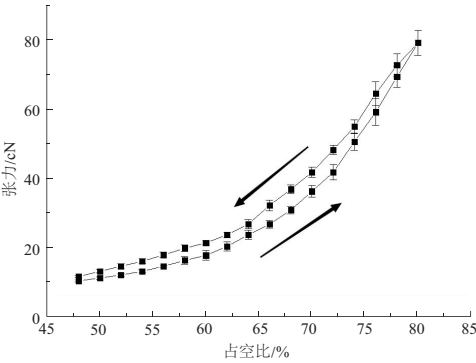


图 10 占空比与棉线张力曲线图

表 3 不同占空比下棉线张力

占空比/%	张力/cN				
	1	2	3	4	5
48	10.1	10.3	10.3	10.7	10.9
50	11.0	10.8	11.5	11.7	11.4
52	11.8	11.8	12.3	12.3	12.6
54	13.0	13.0	13.1	13.1	14.0
56	14.0	14.5	14.8	14.9	15.0
58	15.7	15.5	15.7	17.1	17.8
60	16.2	17.1	17.3	19.2	19.3
62	18.5	20.5	21.0	20.0	22.0
64	22.2	23.3	24.2	23.1	25.8
66	24.9	26.9	27.1	27.2	27.8
68	29.0	30.9	31.5	31.0	32.0
70	33.8	35.8	36.0	37.6	38.0
72	38.0	42.3	42.5	42.0	44.0
74	47.1	50.1	51.4	50.1	53.9
76	53.0	60.5	61.0	58.0	63.0
78	64.8	69.0	69.3	69.8	73.2
80	73.4	78.0	80.0	81.0	82.7
78	68.1	71.0	72.3	75.2	76.3
76	60.0	63.3	64.3	65.0	69.5
74	54.2	56.1	52.4	54.1	57.6
72	48.7	47.8	46.5	48.0	50.0
70	41.0	41.7	40.0	44.0	42.1
68	38.0	37.7	35.0	36.2	37.4
66	32.8	32.3	33.1	29.5	33.2
64	25.2	26.9	26.0	27.9	28.3
62	23.4	23.0	23.3	24.0	25.0
60	21.8	20.8	20.7	21.7	22.1
58	20.9	19.2	19.0	19.2	21.0
56	18.5	17.4	17.8	17.0	19.0
54	16.8	15.1	15.9	15.8	16.9
52	15.1	13.8	14.5	14.2	15.7
50	13.3	12.4	13.5	13.5	13.5
48	12.0	11.5	11.7	11.4	12.0

表 4 不同占空比下弹性纤维线张力

占空比/%	张力/cN				
	1	2	3	4	5
48	10.1	10.2	9.5	10.5	10.0
50	10.7	11.5	10.5	10.8	10.9
52	11.3	12.1	11.4	11.6	12.1
54	12.0	13.4	12.0	12.8	13.2
56	13.6	14.2	13.7	13.6	14.1
58	15.0	15.4	14.8	15.0	15.3
60	16.6	17.2	16.1	16.8	17.0
62	19.2	19.8	18.6	19.6	19.0
64	22.2	23.3	21.8	22.1	23.2
66	25.1	26.0	25.0	25.0	25.9
68	29.0	30.1	29.0	29.2	29.6
70	34.0	35.0	33.2	33.4	34.5
72	40.1	41.3	40.1	42.1	41.0
74	48.8	49.5	48.0	49.5	51.2
76	57.0	58.0	56.2	56.3	57.5
78	65.0	65.6	63.4	64.4	64.5
80	72.0	77.0	74.0	74.0	73.5
78	68.0	70.0	65.0	65.0	68.5
76	61.4	64.0	60.0	60.0	62.0
74	53.0	53.0	53.0	53.1	53.0
72	46.3	47.1	45.0	46.3	46.1
70	39.0	40.0	39.0	40.5	41.5
68	35.7	35.7	36.8	34.0	35.0
66	28.8	31.5	30.1	30.1	30.5
64	24.4	25.5	25.0	26.3	25.3
62	21.5	22.5	22.1	21.5	21.2
60	19.0	21.0	19.3	19.6	19.5
58	17.5	18.3	17.9	17.4	17.8
56	15.7	16.0	15.4	15.3	15.7
54	14.0	14.7	14.3	14.0	14.4
52	12.9	13.2	13.0	13.0	13.2
50	11.9	12.4	12.0	12.2	12.1
48	10.8	11.3	11.1	11.1	11.2

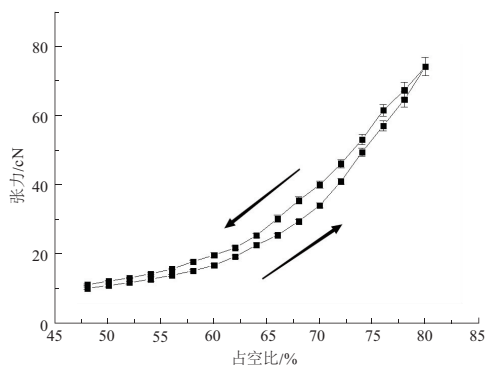


图 11 占空比与涤纶纤维线张力曲线图

由图 10、图 11 可知,张力控制模块的输入占空比和纱线张力呈非线性分布,占空比越大电流增长得越快。由于磁滞回线的存在,张力器在正向增值时产生的张力要比反向减值产生的张力小,并且在占空比为 68% 时相差最大。

对比表 3 和表 4 中的数据可知,棉线和弹性纤维线产生的张力并不相同,弹性纤维线的张力比棉线的张力小。

本设计张力范围满足设计要求。在得到 PWM 占空比和纱线张力的关系后,可将两者的标定值表输入到张力控制系统中,使张力系统可以精确地调节张力器输出给纱线的张力。

3.3 断纱信号检测试验

本试验主要对断纱检测模块输出的走纱信号电压和主控制模块处理后的走纱信号电压进行检测,验证设计是否满足要求。

断纱检测模块输入 16 V 电源,对正常走纱时和断纱时的电压进行测量,重复 10 次,得到的数据如表 5 所示。

表 5 断纱检测模块正常走纱信号与断纱信号电压值

序号	走纱信号电压/mV	断纱信号电压/V
1	880.8	6.480
2	881.0	6.476
3	880.3	6.452
4	881.2	6.473
5	880.3	6.478
6	880.1	6.477
7	879.8	6.475
8	879.5	6.472
9	879.8	6.479
10	880.6	6.463

由表 5 可得断纱检测模块在正常走纱时的信

号与发生断纱时信号的电压值有明显的区别,并且其电压值稳定,满足设计需求。

信号由断纱检测模块输出到主控制模块,主控制模块对走纱信号进行反转并转换成标准的电平信号以便单片机识别。试验对输入到单片机的信号进行测量,得到正常走纱信号与断纱信号电压如表 6 所示。

表 6 单片机接收的正常走纱信号与断纱信号电压值

序号	断纱信号电压/mV	走纱信号电压/V
1	352.5	3.651
2	339.4	3.671
3	334.2	3.663
4	363.3	3.657
5	351.2	3.660
6	330.1	3.665
7	335.3	3.658
8	336.8	3.656
9	352.5	3.644
10	335.2	3.664

由表 6 可得,走纱信号完成反转,走纱信号稳定,电压值在 0~5 V 之间,可以被单片机识别判断,满足设计要求。

4 结语

本文主要针对一种盘式磁滞张力器设计了张力器控制器,实现了纱线张力控制与断纱检测功能。设计主要包括张力控制模块、断纱检测模块和主控制模块的软硬件设计,并进行试验标定了张力控制输入 PWM 波占空比与纱线的关系,试验满足设计要求。试验还探究了不同材质纱线对张力的影响,验证了所设计的控制器满足断纱检测要求。

参考文献:

- [1] WU X G, YU C, ZHU L. Reliability analysis of yarn tension control system based on FTA in jacquard loom[C]//2010 International Symposium on Intelligence Information Processing and Trusted Computing. Huanggang, China: IEEE, 2010: 29-32.
- [2] MA G M, LI C R, JIANG J, et al. A novel Fiber Bragg Grating tension sensor for ground conductor[C]//2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2010: 240-243.

(下转第 66 页)

- strength and wear-resistance β -Ti alloy via oxygen-charging[J]. *Acta Materialia*, 2022, 227:117686.
- [10] SHEN X J, SHUKLA P, SHARMA D, et al. On restructuring the microstructure of Ti-6Al-7Nb alloy before surface engineering [J]. *Materials Characterization*, 2020, 169:110629.
- [11] LI H B, CUI Z D, LI Z Y, et al. Surface modification by gas nitriding for improving cavitation erosion resistance of CP-Ti [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 298:164-170.
- [12] LIU F J, LI A D, SHEN Z K, et al. Microstructure and corrosion behavior of Al-Ti-TiC-CNTs/AZ31 magnesium matrix composites prepared using laser cladding and high speed friction stir processing [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 152:108078.
- [13] 权秀敏, 陆玉兵, 黄红兵, 等. 激光熔覆 TiB-TiC/Co 基复合涂层宏观形貌研究[J]. *西昌学院学报(自然科学版)*, 2022, 36(2):55-59.
- [14] 李天澍, 邓德伟, 李振华, 等. 激光功率对 Fe-TiC 复合涂层组织及硬度的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(19):1914002.
- [15] 曹甫洋, 郝展良, 王浩权, 等. 激光功率对铁基合金熔覆层组织及性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2024, 45(3):184-194.
- [16] 康忠明, 彭秋波, 代明江, 等. 铝合金化学镀 Ni-P-B 的研究[J]. *电镀与涂饰*, 2005, 24(2):11-14.
- [17] 王志华, 王涛, 马超. 化学镀 Ni-P-B 合金在液压立柱上的应用[J]. *煤矿机械*, 2008, 29(12):162-164.
- [18] 石建华, 王钰蓉, 王文昌, 等. 铜基化学镀 Ni-P-B 合金工艺及镀层性能研究[J]. *电镀与精饰*, 2012, 34(2):1-5, 16.
- [19] LI H L, YANG Z H, CAI D L, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of selective laser melted bulk-form titanium matrix nanocomposites with minor B₄C additions [J]. *Materials & Design*, 2020, 185:108245.
- [20] LI Y L, SONG P, WANG W Q, et al. Microstructure and wear resistance of a Ni-WC composite coating on titanium grade 2 obtained by electroplating and electron beam remelting [J]. *Materials Characterization*, 2020, 170:110674.
- [21] JIANG L P, CUI X F, JIN G, et al. Design and characterization of in situ TiB reinforced TiB/Ti₅₀Zr₂₅Al₁₅Cu₁₀ non-equiatom medium-entropy alloy composite coating on magnesium alloy by laser cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 156:108494.
- [22] LI Y L, WU Y Y, WANG W Q, et al. Microstructure and mechanical properties of the Ni-B-Ti composite coating on TA2 prepared by pre-plating and laser remelting[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 405:126567.

收稿日期:2025-02-10

(上接第 55 页)

- [3] 李伟, 张涛, 陈静. 电磁式磁滞张力器在高速整经中的应用研究[J]. *现代纺织技术*, 2024(2):33-38.
- [4] 韩帅, 狄士春, 杨俊杰. 嵌入式纱线张力控制系统设计[J]. *机械设计与制造*, 2015(8):140-142, 146.
- [5] 石钢. 电磁式磁滞纱线张力器的研究与开发[J]. *现代纺织技术*, 2009, 17(6):1-3.
- [6] 肖卫兵, 吴宜珍. 变频调速整经机恒张力控制系统[J]. *山东纺织科技*, 2001, 42(1):33-35.
- [7] 王藩. 基于无刷直流电机的纱线恒张力控制系统设计[J]. *纺织科技进展*, 2022(12):23-26.
- [8] SHI G, LV M, HUANG Y L, et al. Analysis of the electromagnetic characteristics and study on measuring the hysteresis torque experiment for the yarn tensioner[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 347/348/349/350/351/352/353:22-26.
- [9] [美] 约翰逊. 现代纺织控制技术[M]. 3 版. 李强, 译. 北京:机械工业出版社, 2022:120-125.
- [10] 石钢, 吕明. 磁滞卷绕张力器设计原理[J]. *轻纺工业与技术*, 2016, 45(4):1-4, 64.
- [11] 王庆东. 一种电磁式纱线张力器的研究与开发[D]. 南京:南京航空航天大学, 2021.
- [12] ZHANG Y, LI H, WANG L. Intelligent tension control system based on hysteresis loop optimization[C]//2023 International Conference on Advanced Textile Engineering, [S.I.]:IEEE, 2023:112-117.
- [13] 吴昊. 电磁式磁滞张力器多物理场耦合分析与控制[D]. 上海:东华大学, 2023.
- [14] [美] 普利斯曼. 比利斯. 莫瑞. 开关电源设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2010.
- [15] 赵凯, 孙萌. 基于 PWM 调制的磁滞张力器动态特性分析[J]. *机电工程与自动化*, 2023(6):45-49.
- [16] 周敏. 基于 PWM 调制的磁滞张力系统非线性建模[D]. 杭州:浙江大学, 2024.
- [17] 陈晓峰, 王丽娟, 刘洋. 基于磁滞回线调控的智能张力控制系统设计[J]. *纺织科学与工程*, 2023(4):56-62.
- [18] 郑勐, 李言, 尚军, 等. 一种微型精密磁滞张力器的设计开发[J]. *机械科学与技术*, 2011, 30(9):1431-1434.
- [19] GB/T 38542-2023 磁滞式纱线张力器性能测试方法[S].

收稿日期:2023-11-22