

基于FPGA的非接触式张力监测系统的设计

夏港东,秦浩杰,王庆东,周文聪,张昊
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对目前张力测量装置存在附加摩擦力、无法实现片纱张力检测等不足,基于轴向运动弦理论,设计一种基于FPGA的非接触式张力监测系统。结合机械结构和电路设计CAD方法,设计其机械结构和外围硬件电路。使用自顶向下和模块化的设计方法,采用FPGA完成多路信号的采集,完成软件程序的设计。经系统实际张力监测试验表明:纱线振动频率的平方与纱线张力近似呈线性关系,拟合优度在0.97以上;系统相对测量误差为±1.8%,基本实现了对纱线张力一致性的监测。

关键词:片纱张力监测;弦振动;非接触式测量;FPGA;多通道信号处理

中图分类号:TS103.7 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)02-0195-04

Design of Non-contact Tension Monitoring System Based on FPGA

XIA Gangdong, QIN Haojie, WANG Qingdong, ZHOU Wencong, ZHANG Hao

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

Abstract: Aimed at the shortcomings of current tension measurement devices such as additional friction and failure in yarn sheet tension monitoring, a non-contact tension monitoring system based on FPGA was designed based on the axial movement string theory. By combining the CAD method of mechanical structure and circuit, the design of mechanical structure and peripheral hardware circuit was completed. Top-down and modular design methods was applied to complete multi-channel signal acquisition by FPGA, and the software program was designed. The actual tension monitoring test results prove that the square of the yarn vibration frequency is approximately linear with the yarn tension with goodness of fit above 0.97, and the relative measurement error of the system is 1.8%, which basically realizes the monitoring of yarn tension consistency.

Keywords: yarn sheet tension monitoring; string vibration; non-contact detection; FPGA; multi-channel signal processing

0 引言

在纺织加工过程中,纱线张力是一个十分重要的参数,张力的大小和稳定直接关系到产品质量、生产效率以及后续加工的顺利进行。因此对纱线张力的测试和控制一直是人们十分关注的问题^[1]。

随着传感器技术的不断发展,非接触式测量相比较接触式测量来说,具有对纱线不会产生附加的压力和变形、可以最大程度地减少对纱线运行的影响、测量精度更高的优点,所以国内外对非接触式纱线张力测量技术也愈加重视。XU Q等^[2]开发了一种基于CCD技术的非接触式纱线张力测量系统。MEI S Q等^[3]基于图像处理技术开发了一种非接触式测量纱线动态气圈张力的技术。曾光奇^[4]提出了一种新型的由固态图像传感器和微处理器构成的,用于非接触式测量纱线张力的测试装置,通过平行光源照射,检测纱线直径,经计算机处理后获取纱线张力大小或纱线张力变化。北京机械工业学院的肖小涛提出了一种基于MEMS传感器的非接触式测量张力的装置,将测量张力转化为测量振动,并用数据采集卡采集振动信号,通过Labview GUI界面进行数据分析和处理^[5]。

传统的非接触式测量系统往往只能检测单根纱线的张力,且效率和精度较低。本文运用FPGA(field programmable gate array)具有开发周期短、升级空间大、可并发执行和灵活可重构等优势^[6],通过对纱线振动频率监测,开发一种高效率、高精度的片纱张力监测系统。

1 系统检测原理和总体设计

在纺织工程的纺、络、并、捻、浆等工序中,纱线大多以轴向运动为主体完成相应的工序。从力学模型看,此类状况的纱线可近似作为一定张力下的轴向运动弦处理^[7]。

根据相关国内外研究,运动弦线谐振频率与张力在理想状态下的关系如下^[8-10]:

$$f_n = \frac{n}{2l} \left(1 - \frac{\rho A}{T} v^2 \right) \sqrt{\frac{T}{\rho A}} \quad (1)$$

式中: l 为弦线长度,m; ρ 为弦线线密度, kg/m^3 ; A 为截面积, m^2 ; T 为弦线张力,N; v 为弦线轴向运动速度, m/s ; $n=1,2,3,\dots$,本系统取 $n=1$ 。由式(1)可知,在理想状态下,弦线振动频率平方与弦线张力近似呈线性关系。

风荷载作用下轴向行进弦的横向振动属于自激振

动^[11]。本文采用风致纱线振动的方法,通过空压机,得到稳定的空气气流柱,使纱线在行进过程中产生自激振动。通过光电二极管采集振动信号。由于FPGA只识别数字信号,因此通过调理电路,将采集到的模拟信号规整为能被芯片I/O口识别的数字信号。在芯片内部,完成滤波、计频、数据缓存、串口发送和电机控制功能。最后由PC机进行显示和存储。系统设计方案框图如图1所示。

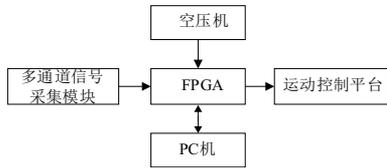


图1 系统设计框图

2 系统硬件设计

2.1 系统硬件的总体说明

本张力监测系统总体包括机械结构、FPGA控制器和上位机三部分。其中机械结构主要进行纱线张力巡检,控制器及外围电路通过光电传感器检测行进纱线的振动信号,并进行多通道纱线振动频率的实时采集,使用UART串口进行FPGA与上位机的通信,并通过人机交互界面的开发实现数据的存储和显示,最后通过数据对比得到纱线张力,并对张力存在异常的纱线进行报警。

1) 信号采集和调理电路

基于红外光电对管,通过搭建信号采集和信号调理电路^[12],将纱线振动信号规整为适合芯片I/O口输入的电平标准。为了满足系统设计的要求,经过初步的逻辑资源消耗分析和选用的I/O数量进行芯片选型,本文选用Altera公司的Cyclone IV系列芯片EP4CE10E22C8N。

2) 外围电路设计

FPGA运行时需要对应的外围电路,包括程序下载电路、外部时钟、电源电路、复位电路等。其控制电路框图如图2所示。

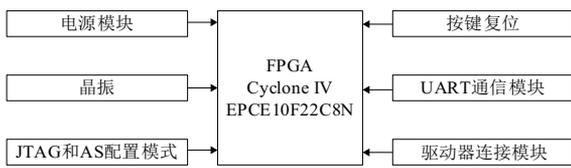
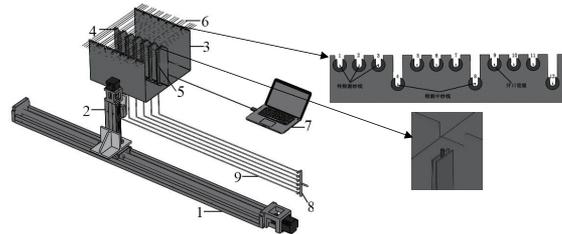


图2 控制电路框图

2.2 系统机械结构设计

为了满足系统要求,机械结构必须具备的条件是:确定合理的纱线支撑距离,即式(1)中的 l ;使纱线在稳定气流柱下起振,振幅超出传感器感光区域以得到周期性变化的数字信号。鉴于本装置是用于监测片纱张力,在实际生产环境中,相邻纱线之间的距离受瓷眼间距影响,而采用的光电传感器虽然感光性能优越,但是受限于传感器大小、位置等问题,因此同时采集相邻纱线的振动频率存在困难;将用于采集纱线振动频率的控制电路板、电源和驱动器固定在指定的位置;能够实现 x 、 z 向的往复直线运

动,且具有较高的定位精度。对上述条件进行分析后,在三维软件Solidworks中设计的机械结构三维图及局部放大图如图3所示。



1— x 向行走机构;2— z 向行走机构;3—承载装置;
4—集成控制电路板;5—气管固定装置;6—纱线;
7—上位机;8—分气器;9—导气管。

图3 机械结构三维图及局部放大图

系统使用开孔瓷眼。如果对纱线进行编号,1、2、3、5、6、7、9、10、11即为待检测纱线,4、8、12即为检测中纱线,待检测纱线和正在检测的纱线支承端的开口瓷眼之间存在一定高度差。在检测过程中,纱线达到传感器感光区域的平衡位置后,无需检测的纱线由传动装置驱动平台继续抬升,直到本次检测中无需检测的纱线与待检测纱线在垂直位置上满足设计的高度差,此时,系统开始本次张力检测。

3 系统软件设计及仿真

3.1 系统工作总体流程

系统软件部分主要在Altera公司的Quartus II平台上完成,波形仿真在Modelsim软件内进行。采用Verilog HDL硬件设计语言作为开发语言。使用自顶向下的设计思想和模块化的设计方法,将系统软件部分设计计划分为滤波模块、计频模块、数据缓存模块、串口发送模块和步进电机控制模块。系统工作流程图如图4所示。

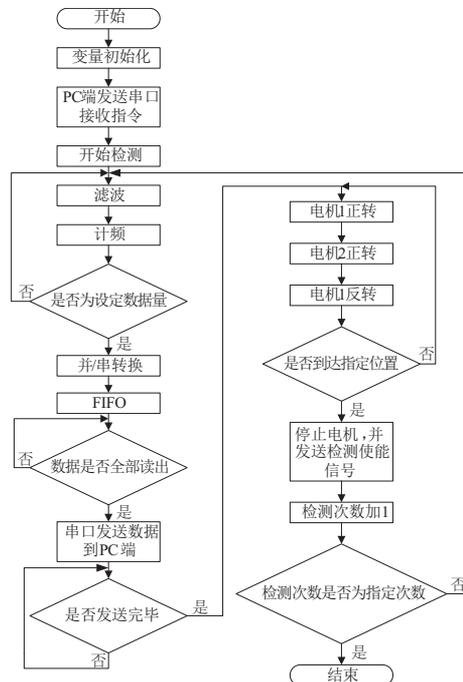


图4 系统工作流程图

3.2 系统关键模块设计及仿真

a) 滤波模块设计

采集调理电路输出信号,使用的示波器型号为RIGOL MSO1104,输出波形如图5所示。

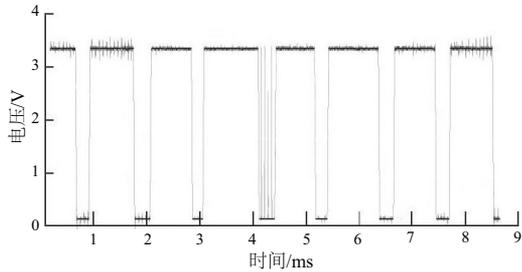


图5 信号调理电路的输出波形

图5表明进入FPGA的方波信号仍存在脉冲干扰信

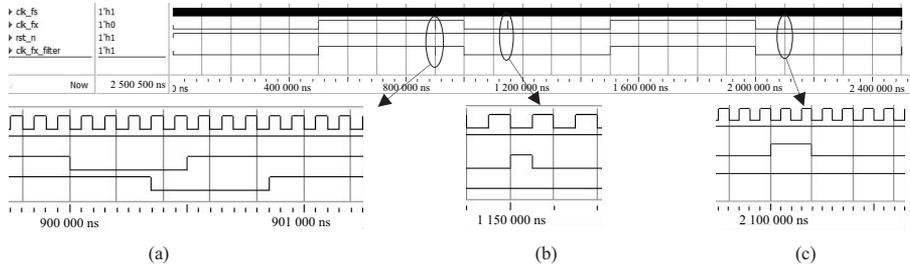


图6 滤波模块仿真波形图及局部放大图

b) 计频模块设计

常见的信号频率测量方法有直接测频法、测周法和等精度测频法^[13]。相比较直接测频法和测周法,等精度测频法通过设置闸门信号,将被测信号和闸门信号进行同步处理,避免了直接测频法和测周法会产生±1的相对误差,使系统测频具有更高的准确度和精度。

c) 数据缓存模块设计

系统一次性对多根纱线的振动频率进行同步测量,若某根纱线张力发生变化,根据式(1),其振动频率会随之改变。在计频模块中,对多根纱线的频率计数是并行进行的,考虑极端情况,如果多根纱线的张力出现差异,则计频得到的数据在时钟域不同的时间内锁存,不利于串口发送和上位机的数据整合,所以对数据进行了规整和并串转换。

FIFO(先进先出缓存器)是一种常见的用于数据缓存的器件。使用异步FIFO可以完成数据的跨时钟传输和数据位宽转换。在Cyclone IV系列芯片内部集成了基于FIFO的IP核。

通过对读写信号、读满、空满信号的控制,完成数据传输和位宽转换。

d) 步进电机控制模块设计

步进电机可以将输入的脉冲信号转变为相应位移,每输入一个脉冲信号,转子就转动一个固定角度。系统使用联轴器与滚珠丝杠联接。系统采用四相八拍步进电机,通过对输入端口的逻辑控制,使电机正转和反转,从而达到系统巡检的目的。使用计数器对输出端口输出的脉冲数

号。为确保系统对纱线振动信号的采集和测量的准确性,更好地体现实际张力值,在此采用阈值滤波的方式对调理电路的输出信号进一步进行滤波处理。将需要滤除的最大脉冲宽度设为临界值,与输入信号的高低电平脉冲宽度作比较,高于此阈值的保留对应电平信号,低于此阈值则判定为干扰信号,进行滤波处理。系统采用的阈值为3个时钟脉冲宽度,记为3,以下同理。仿真设置如下:

1) 基准时钟频率为1 MHz,被测信号频率为1 kHz,其中被测信号共产生2.5个周期的波形;

2) 分别在900.5 ms、1 150.05 ms、2 100.2 ms处加入了脉冲宽度分别为5、1、2.5的毛刺信号,分别记为1、2、3号毛刺。

滤波仿真结果如图6所示,图中clk_fx_filter即为滤波后产生的仿真波形。由仿真结果可知,2、3号毛刺被过滤掉,1号毛刺由于毛刺宽度大于滤波宽度,所以被当做真实信号保留下来。

进行计数,以控制丝杠行程。

4 张力监测试验及结果分析

4.1 滤波试验

为了测试滤波模块的可行性,在Quartus II中对滤波模块进行工程建立,使用示波器采集输出波形如图7所示。由此可见,相比图5毛刺信号得到了有效处理。

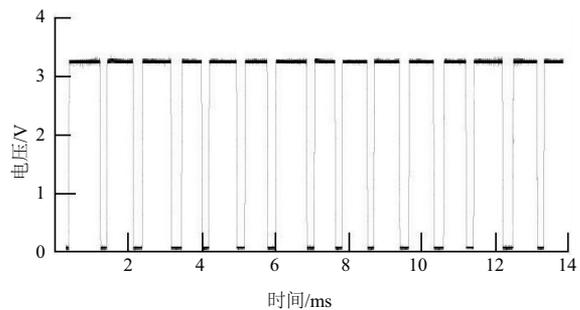


图7 滤波模块输出波形

4.2 张力监测试验

为验证系统可行性,在由开发的高精度电磁式张力器^[14]组成的整经机样机上搭建如图8所示的试验装置。

试验使用纱线张力控制系统给纱线施加不同张力,通过张力监测系统监测纱线张力。试验中,进行6根纱线的

张力监测试验,编号为1、2、3、4、5、6,纱线为棉纱,线密度为14.6 tex(40英支),纱线行进速度为200 m/min,支撑距离 l 取0.1 m,使用德国施密特ZD2-100张力计标定运行时纱线的张力,该张力计精度可达到 ± 1 cN。某一次试验不同张力下各纱线振动频率值见表1,各纱线自激振动频率与张力关系图见图9。

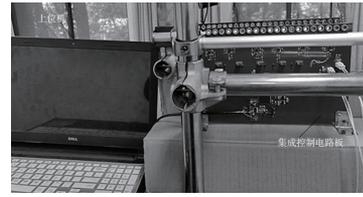


图8 测试试验装置

表1 某一次试验不同张力下各纱线振动频率值

张力/cN	频率/Hz						均值/Hz	相对误差/%
	编号1	编号2	编号3	编号4	编号5	编号6		
20	1 250.0	1 267.0	1 250.0	1 237.0	1 238.0	1 248.0	1 248.3	1.5
35	1 334.0	1 352.0	1 334.0	1 332.0	1 355.0	1 331.0	1 339.7	1.1
30	1 418.0	1 425.0	1 427.0	1 419.0	1 412.0	1 425.0	1 421.0	0.4
35	1 506.0	1 496.0	1 502.0	1 496.0	1 498.0	1 512.0	1 501.7	0.7
40	1 540.0	1 535.0	1 541.0	1 544.0	1 574.0	1 541.0	1 545.8	1.8
45	1 635.0	1 630.0	1 616.0	1 621.0	1 639.0	1 642.0	1 630.5	0.9
50	1 749.0	1 755.0	1 745.0	1 733.0	1 730.0	1 746.0	1 743.0	0.7

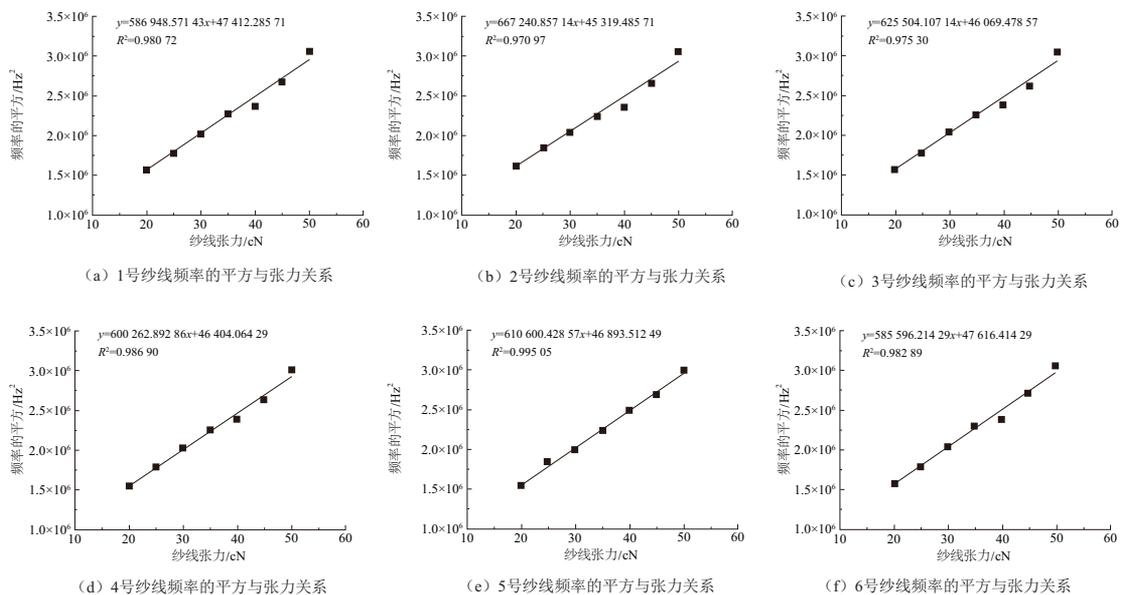


图9 各纱线振动频率与张力关系图

由表1和图9可以验证式(1)关于纱线频率和张力的关系描述:纱线振动频率的平方与张力近似呈线性关系。由表1可以看出,本系统在纱线施加不同张力情况下,相对测量误差为 $\pm 1.8\%$,有效反映了系统的稳定性和纱线张力的一致性。

5 结语

系统基于弦理论,通过软硬件设计,完成了一种基于FPGA的非接触式纱线张力监测系统。试验表明,系统可以实现对纱线张力一致性的监测,且具有较高精度和稳定性。通过对整体机械结构设计,可以实现纱线张力的

巡检。

参考文献:

- [1] 庾在海,吴文英,陈瑞琪. 纺织过程中的纱线张力测试方法[J]. 传感器世界,2004,10(1):27-29.
- [2] XU Q, MEI S Q, ZHANG Z M. Measurement method of yarn tension based on CCD technology [J]. Advanced Materials Research, 2011, 230/231/232: 89-93.
- [3] MEI S Q, SONG Z F, ZHANG Z M. Method and system for measuring spinning yarn tension using image measuring technique[J]. Journal of Shanghai University (English Edition), 2004, 8(A2): 153-157.

(下转第222页)

存储到数据库中。与图 11CATIA 环境中的三维模型比
对,显然,OCC 环境下的可视化功能更加丰富,能直观、清

晰地显示测量数据,且易与三维模型比对,缓解了数据管理
的枯燥无味且便于后期溯源与质量控制。

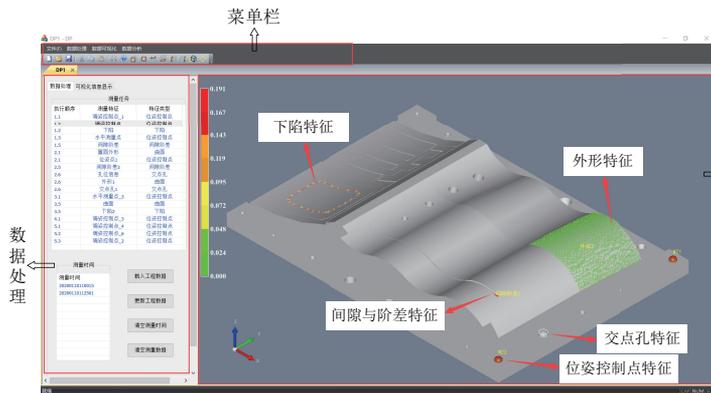


图 10 数据处理与可视化分析系统界面

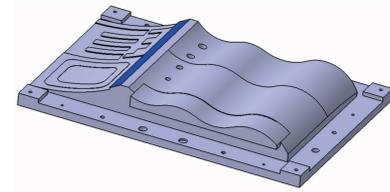


图 11 CATIA 三维环境下的三维模型

4 结语

本文针对飞机装配检测的数据分析与可视化展开了
分析,将飞机装配检测特征分成常见的 5 种类型特征,并
构建了其相对应的三维可视化模型及数据存储形式。通过
绘制图表分析同一特征多组测量数据的变化趋势来验证
数据的置信度,且搭建由数据管理、数据可视化及数据
分析模块构成的软件平台,并以某三维模型测试其软件性
能,结果表明所提出的三维可视化方法能直观、清晰地显
示数据,提高了数据的交互性、置信度。

参考文献:

[1] ZHAO D P,WANG G F,GUO W,et al. An integrated framework for aircraft digital assembly coordination design and simulation [J]. Procedia CIRP, 2019, 83: 330-334.

[2] 刘志先. 基于智能医疗的诊断大数据自动分析系统研究[J]. 现代电子技术, 2020, 43(10): 184-186.

[3] 陶凯,代春平,张煜,等. 铁路基础设施检测数据处理分析中心深化研究[J]. 中国铁路, 2018(6): 85-92.

[4] 张鑫,曹蕾,韩基良. 基于 Python 气象数据处理与可视化分

析[J]. 气象灾害防御, 2020, 27(1): 29-33.

[5] 冷喜武,陈国平,蒋宇,等. 智能电网监控运行大数据分析系统的数据规范和数据处理[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 169-176.

[6] DRAGAN D,PETROVIC V,GAJIC D,et al. An empirical study of data visualization techniques in PACS design [J]. Computer Science and Information Systems, 2019, 16(1): 247-271.

[7] GREGG N, LEVENTHAL B C. Digital module 17: data visualizations: effective evidence - based practices [J]. Educational Measurement: Issues and Practice, 2020, 39(3): 139-140.

[8] BEDAKA A K, LIN C Y. CAD-based robot path planning and simulation using Open Cascade[J]. Procedia Computer Science, 2018, 133: 779-785.

[9] 李栋,李龙泉,李琦,等. 基于激光扫描的飞机蒙皮下陷特征点提取[J]. 航空制造技术, 2018, 61(9): 96-101.

[10] 邢宏文,刘思仁,邱磊,等. 基于点云数据的对接间隙自动化检测方法[J]. 航空精密制造技术, 2020, 56(3): 6-9, 58.

收稿日期:2020-12-24

(上接第 198 页)

[4] 曾光奇. 纱线张力测试装置的改进[J]. 苧麻纺织科技, 1996, 19(1): 36-39.

[5] 肖小涛. 基于 MEMS 传感器纱线张力传感器模块的研究[D]. 北京:北京信息科技大学, 2007.

[6] 杨海钢,孙嘉斌,王慰. FPGA 器件设计技术发展综述[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 714-727.

[7] 冯志华,朱晓东,兰向军. 轴向运动纱线非线性动力学[J]. 苏州大学学报(工科版), 2004, 24(5): 23-26.

[8] 周泰. 用谐振频率测量纺丝张力的研究[J]. 自动化仪表, 1987, 8(9): 12-15, 36.

[9] SKUTSCH R. Ueber die bewegung eines gespannten fadens, welcher gezwungen ist, durch zwei feste punkte mit einer constanten geschwindigkeit zu gehen, und zwischen denselben in transversalschwingungen von geringer amplitude versetzt

wird[J]. Annalen Der Physik Und Chemie, 1897, 297(5): 190-195.

[10] BANITALEBI H, RAFEEYAN M. A new approach for non contact measuring of tension in fixed and moving wires [J]. International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, 2012, 5(4): 51.

[11] 吕乐丰. 轴向行进弦及索的非线性振动和稳定性分析[D]. 大连:大连理工大学, 2010.

[12] 缪宇轩,孟祥益,夏港东,等. 非接触式纱线张力监测系统的研制与开发[J]. 毛纺科技, 2020, 48(5): 71-76.

[13] 李伟. 手持式高精度频率计数器研究及设计[D]. 重庆:重庆大学, 2017.

[14] 尹铭泽,张昊,缪宇轩,等. 电磁式张力器的结构设计和张力测试[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(2): 178-181, 187.

收稿日期:2021-01-25