

应变式纱线张力传感器的优化设计及实验

余效奎*, 祖洪飞

浙江理工大学机械工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2022年12月7日; 录用日期: 2023年1月12日; 发布日期: 2023年1月19日

摘要

为了提高应变式纱线张力传感器的灵敏度和稳定性, 对传感器中的敏感元件进行优化, 利用ANSYS对其进行了静力结构分析, 优化后的敏感元件应变值比优化前提高了11.6%, 且形变量更小, 既保证了传感器的灵敏度和测量量程又保证了敏感元件在形变时能够处在弹性极限内。同时对优化前后的敏感元件和传感器进行了模态分析, 优化后的敏感元件比优化前一阶固有频率提高了313.24 Hz, 且传感器比优化后的敏感元件的一阶固有频率提高了7.96%, 保证了传感器的稳定性。将优化后的敏感元件制成的传感器与标定传感器进行对比实验, 两个传感器的输出误差在2%~5%, 验证了优化后的敏感元件具有良好的灵敏度和稳定性。

关键词

敏感元件, 结构优化, 应变式纱线张力传感器, ANSYS Workbench

Optimized Design and Experiment of Strain Gauge Yarn Tension Sensor

Xiaoluan Yu*, Hongfei Zu

School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: Dec. 7th, 2022; accepted: Jan. 12th, 2023; published: Jan. 19th, 2023

Abstract

In order to improve the sensitivity and stability of the strain gauge yarn tension sensor, the sensitive element in the sensor was optimized and the static structure analysis was carried out using ANSYS. The strain value of the optimized sensitive element was 11.6% higher than that before the optimization, and the deformation was smaller, which not only ensured the sensitivity and mea-

*通讯作者。

surement range of the sensor but also ensured that the sensitive element was within the elastic limit during deformation. The modal analysis of the sensitive element and sensor before and after the optimization was carried out, and the first-order inherent frequency of the optimized sensitive element was increased by 313.24 Hz compared with that before the optimization, and the first-order inherent frequency of the sensor was increased by 7.96% compared with that of the optimized sensitive element, which ensured the stability of the sensor. The optimized sensitive element is compared with the standard sensor, and the output error of the two sensors is 2%~5%, which verifies that the optimized sensitive element has good sensitivity and stability.

Keywords

Sensitive Elements, Structural Optimization, Strain Gauge Yarn Tension Sensors, ANSYS Workbench

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着时代的发展, 纺织技术也在不断创新, 实时监测技术也在纺织生产过程中得以应用。有了监测技术的应用, 能够有效的保证纺织品质量[1]。在纺织加工的过程当中, 有很多因素能够影响到纱线产品的质量、生产效率及产品能否顺利进行后续加工, 纱线张力是十分重要的一个参数, 直接影响着纱线张力大小和稳定[2]。由于纱线粗细、纱线速度等原因纱线张力大小不同, 纱线速度的增加会引起纱线张力相应的增加, 虽然纱线张力大容易检测, 张力过大会导致纱线延展, 改变纱线弹性, 甚至导致纱线断线, 需要停机检查接线, 严重影响生产效率; 纱线张力过小会导致纱线不成型而且不易检测, 特别是细纱; 纱线张力不稳定直接影响后续工序的进行[3][4]。国外最早研制出了高精度、小量程纱线张力传感器, 但由于售价过高, 价格均在万元以上, 很难广泛应用于我国中小纺织企业。其中接触式纱线张力传感器最广泛应用于市场, 接触式传感器中电阻应变式具有稳定性好、精度高、成本低、抗环境干扰性强等优点, 能够很好的满足我国很多企业纺纱、络筒、整经等单纱张力的测量[5]。

应变式纱线张力传感器技术成熟, 浙江大学龚金龙[6]和华东理工大学周永欣[7]等都采用电阻应变式检测纱线张力, 从电阻的变化得出张力的的大小。其中, 应变式纱线张力传感器的关键部件是其敏感元件, 刘九卿、游江辉等[8][9]利用有限元对弹性体(敏感元件)进行分析, 对弹性体进行裁剪等优化, 然后利用 ANSYS Workbench 对于优化后的模型进行有限元分析, 分析发现优化后的弹性体固有频率增大, 提高了传感器的稳定性。本文参考相关方法对传感器内部的敏感元件和传感器整体进行结构优化, 利用有限元分析进行静力结构分析和模态分析, 探究传感器的灵敏度和稳定性。

2. 原理分析

2.1. 电阻应变片工作原理

电阻应变片是检测纱线张力的关键, 粘贴在敏感元件上的电阻应变片受到外力作用时, 其电阻会发生相应的变化, 也称为“应变效应”。应变片工作原理是基于应变效应, 电阻应变片粘贴在敏感元件上, 敏感元件受到外力(纱线张力)时, 金属电阻丝随着敏感元件产生形变而形变, 导致电阻丝阻值发生变化。电阻应变片主体部分是由电阻丝、引出线、覆盖层和基片四部分组成, 其结构如图 1 所示, 其中 a 和 b

分别是应变片的工作宽度和标距, 应变片规格依据 $a \times b$ 而定, 查阅资料可知, 敏感元件材质均匀、应力梯度大, 应选择栅长小的应变片, 后文实验中选择规格较小的应变片。

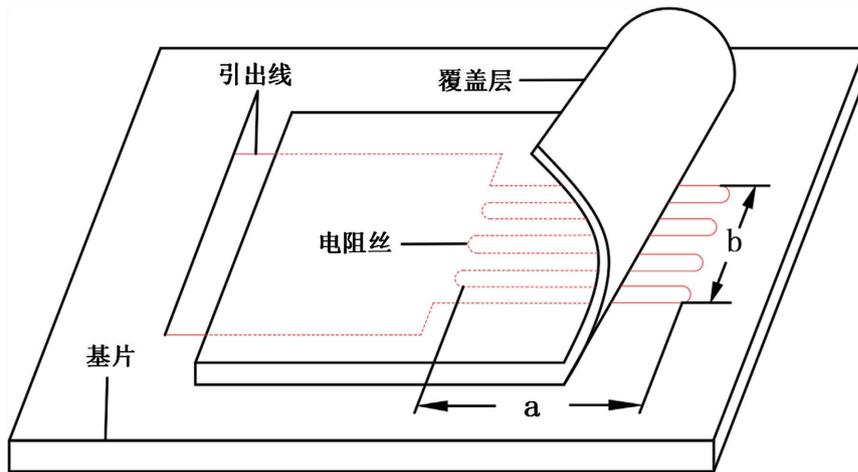


Figure 1. Schematic diagram of the structure of resistance strain gauge
图 1. 电阻应变片结构示意图

2.2. 应变式纱线张力传感器工作原理

应变式纱线张力传感器工作原理的简要概括: 纱线张力 F 作用在敏感元件上, 导致敏感元件发生形变, 与此同时, 粘贴在敏感元件上的应变片产生形变后阻值发生变化, 通过惠斯通半桥将阻值信号转变为电压信号, 电压信号经过放大电路放大一定倍数, 放大后的电压信号传输至上位机, 通过换算得到张力值, 其示意图如图 2 所示。依据应变式纱线张力传感器的工作原理可知, 敏感元件是检测纱线张力的关键部件, 也是提高传感器性能的着手点。

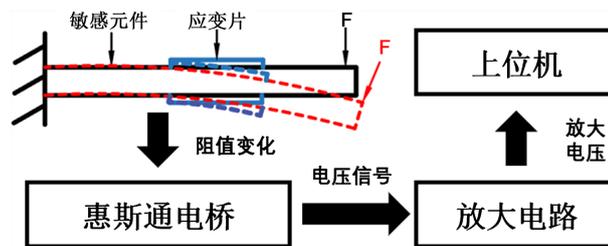


Figure 2. Principle diagram of strain gauge yarn tension sensor
图 2. 应变式纱线张力传感器原理图

3. 传感器优化设计

3.1. 敏感元件材料分析

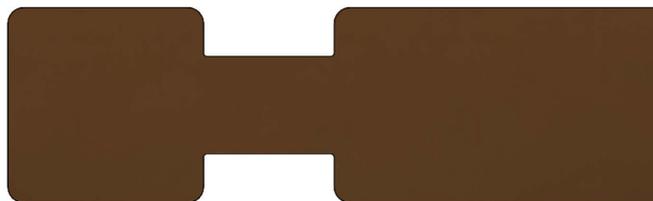
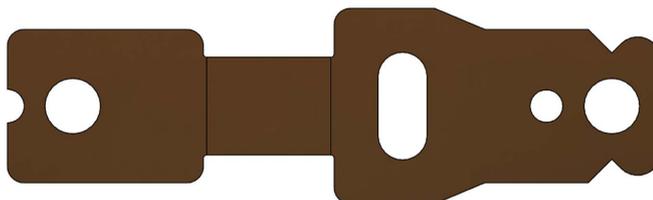
传感器敏感元件作为应变式纱线张力传感器的关键部件, 其起到了应力与电信号之间的传递作用, 为了可以真实的反映出应力与应变之间的线性关系, 敏感元件需具备的特性有[10]: 弹性极限高、弹性模量小、热膨胀系数小、材料均匀和导热性好等。在国外, 应用广泛且多使用马氏体沉淀硬化不锈钢[8], 但美国 Crucible 钢铁公司和台湾荣钢公司研究开发了更适合传感器敏感元件使用的 17-4PH 钢材料[11]。因此本文将 17-4PH 钢作为敏感元件的材料进行研究, 表 1 为这两种材料的性能表, 方便在后文进行仿真分析时设置模型的性能参数。

Table 1. 17-4PH steel material properties**表 1.** 17-4PH 钢材性能表

材料	性能	屈服强度 (MPa)	热导率 W/m·k20°C	热膨胀系数 (10 ⁻⁶ /°C)	弹性模量 (GPa)
17-4PH		1277	108	10.8	197

3.2. 模型建立及优化

参考意大利 B TSR 公司的 ULTRAFEEDER 系列产品, 在 Solidworks 中对敏感元件初步建模, 如图 3。郝永健等学者[12]通过对弹簧片进行边缘裁剪、在自由端挖孔等操作, 李耀杰等[13]通过对悬臂梁进行拓扑优化, 两者都对悬臂梁结构进行了修改, 发现对其结构的修改能够提高悬臂梁的固有频率, 从而有效避免产生共振, 提高悬臂梁的稳定性。纱线张力传感器的敏感元件可看做悬臂梁, 通过对初始模型进行挖孔, 边缘裁剪等操作得到优化后模型, 如图 4 所示。

**Figure 3.** Initial model of the sensitive element**图 3.** 敏感元件初始模型**Figure 4.** Optimized model of the sensitive element**图 4.** 敏感元件优化后模型

为了传感器更好的应用于实际以及探究其整体性能, 为敏感元件设计了安装壳体, 将其与敏感元件进行装配, 传感器模型图如图 5 所示。在设计时, 壳体宽度略宽于敏感元件的宽度, 以保证敏感元件的形变不受限制, 与此同时, 设计壳体时限制了敏感元件形变位移, 在保证测量量程的同时, 也保证了敏感元件在弹性极限范围内, 后文仿真分析结果符合设计要求, 表征了改模型设计的可行性。

3.3. 敏感元件静力结构分析

为了探究敏感元件优化前后的灵敏度, 对两个模型进行了静力结构仿真分析。将两个模型在 SolidWorks 中设置成“.x_t”文件格式, 导入 ANSYS Workbench 中进行静力结构分析, 材料均设置为 17-4PH, 约束和加载力一致。优化前后敏感元件划分网格节点数分别为 18,956 和 29,432, 在设置中打开 Mesh Metric 设置成 Element Quality, Average 值达到 0.7 才能保证网格划分质量, 优化前后模型的 Average 值分别为 0.78 和 0.77, 均达到分析标准。分析后的应变云图如图 6 所示, 由分析结果可知, 敏感元件优化前的平均应变值为 4.4531×10^{-4} , 敏感元件优化后的平均应变值为 4.9703×10^{-4} , 敏感元件优化后的应变值比优化前提高了 11.6%, 保证了传感器的灵敏度。

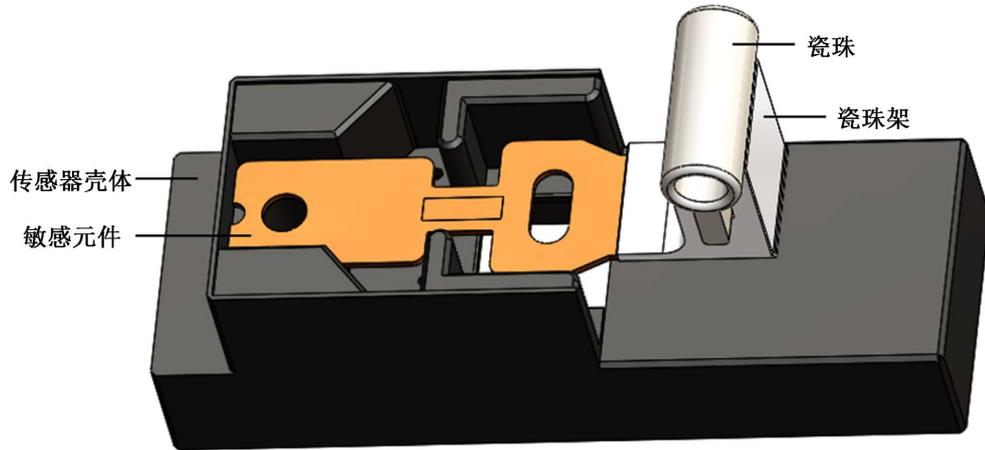


Figure 5. Sensor model diagram
图 5. 传感器模型图

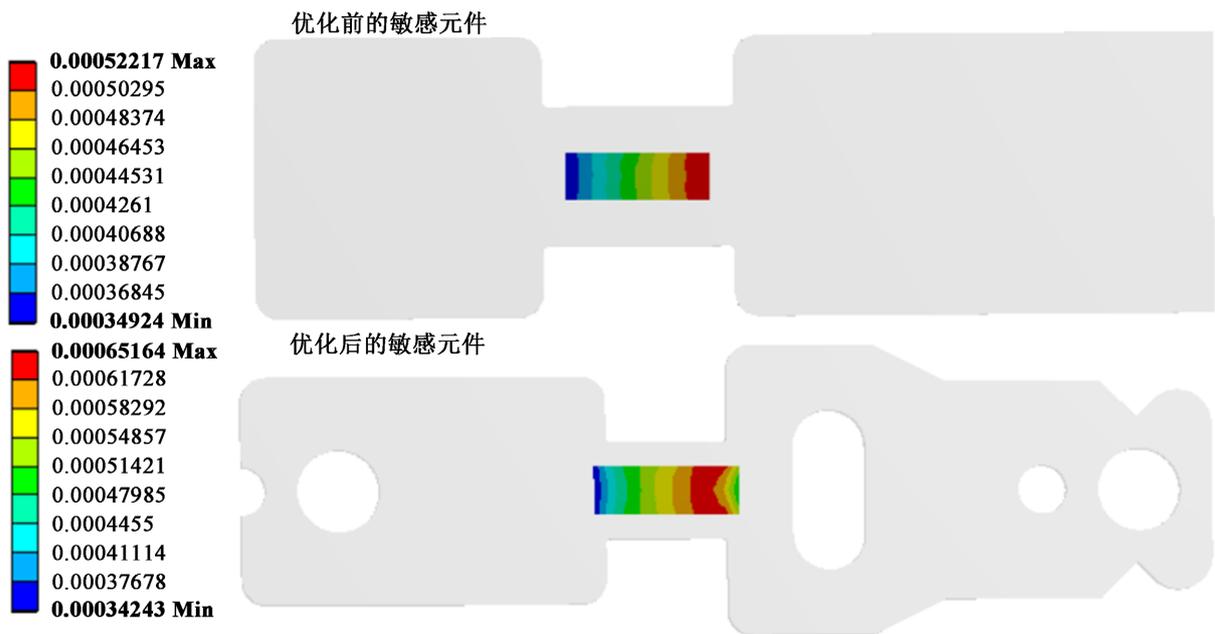


Figure 6. Strain clouds of sensitive elements before and after optimization
图 6. 优化前后的敏感元件应变云图

图 7 为优化前后敏感元件的最大位移云图, 结合图 6 分析结果, 由图 7 可知, 当受力一致时, 优化后的敏感元件能在较小的位移下产生较大的应变值, 这能够保证敏感元件在工作时处于弹性极限范围内, 且能够增大传感器的测量量程。

4. 传感器模态分析

模态分析方法是为了了解敏感元件在不同频率范围内的各阶主要模态的特性, 通过模态分析, 可以预测敏感元件在不同频段作用下产生的振动响应, 从而避免传感器在实际工况产生共振, 影响产品质量 [14]。分别对优化前后的敏感元件和传感器模型进行模态分析, 数据结果如图 8 所示。在实际工况中, 一阶固有频率对传感器的影响较大, 敏感元件进行结构优化后, 其一阶固有频率提高了 313.24 Hz。将优化后的敏感元件与壳体装配成传感器, 传感器的固有频率比优化后的敏感元件提高了 75.47 Hz, 提高了

7.96%。由分析结果可知, 优化后的传感器一阶固有频率大幅提高, 保证了传感器的稳定性。

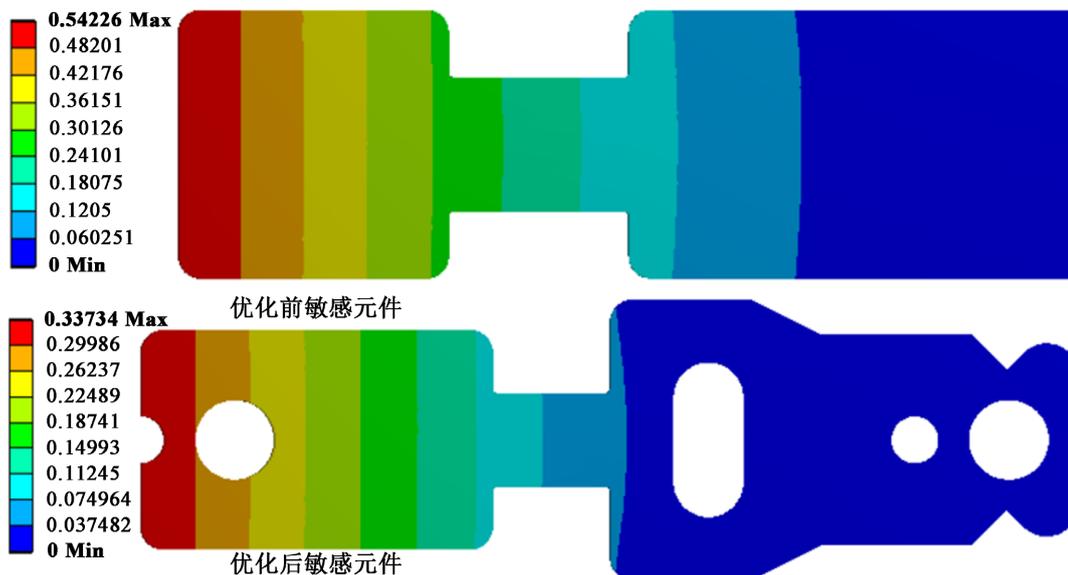


Figure 7. Maximum displacement clouds of sensitive elements before and after optimization

图 7. 优化前后敏感元件的最大位移云图

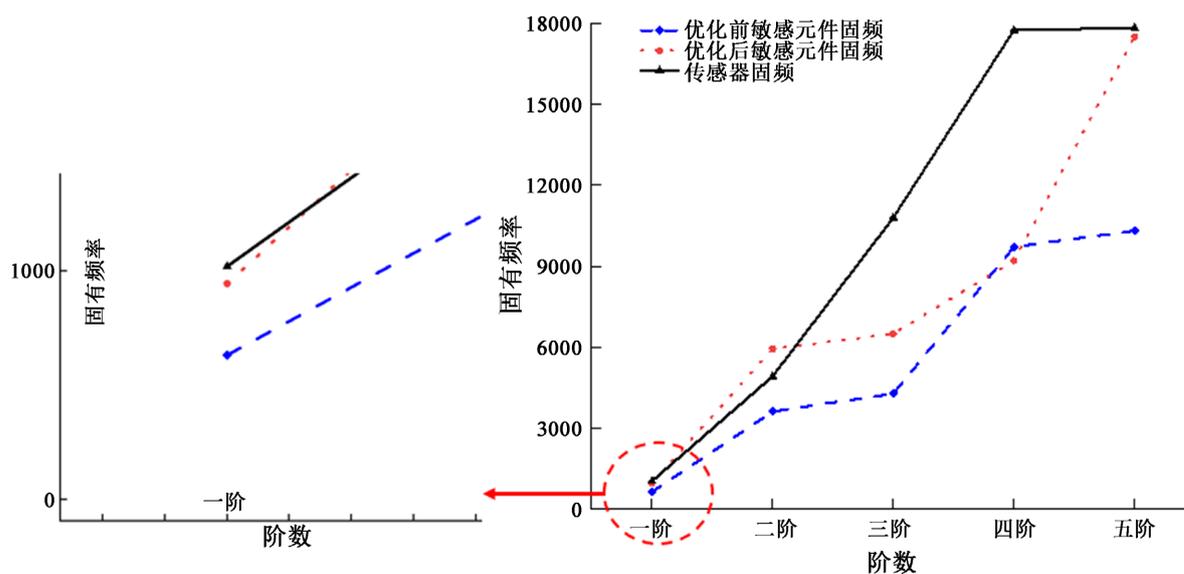


Figure 8. Sensitive element and sensor intrinsic frequency before and after optimization

图 8. 优化前后的敏感元件和传感器固有频率

由模态分析可知, 传感器的前五阶振型如图 9 所示。

5. 实验探究

5.1. 实验方案及流程

为了测试传感器在实际工况下的性能, 设计了实验方案及流程, 实验方案: 1) 电机转速设置为定速: $v = 100 \text{ r/s}$ 、 $v = 240 \text{ r/s}$ 、 $v = 380 \text{ r/s}$, 对比待测传感器与标定传感器的张力输出。2) 电机转速设置为变速

度, 对比待测传感器与标定传感器的张力输出。实验流程: 安装好待测传感器和标定传感器(BTSRUL-TRAFEEDEDER 2), 使得纱线同时作用在两个传感器上。首先利用上位机进行纱线张力监测, 记录纱线未运动时纱线张力大小; 然后设置好电机转速后, 开启电机, 试运行一段时间, 观察是否出现断纱现象(也可通过上位机监测, 若张力值为零, 则为断纱), 若纱线能正常运行, 清空上位机数据开始监测, 最终按照实验方案调节电机转速, 记录纱线张力值, 数据处理时去除纱线未运动时的初始张力值。

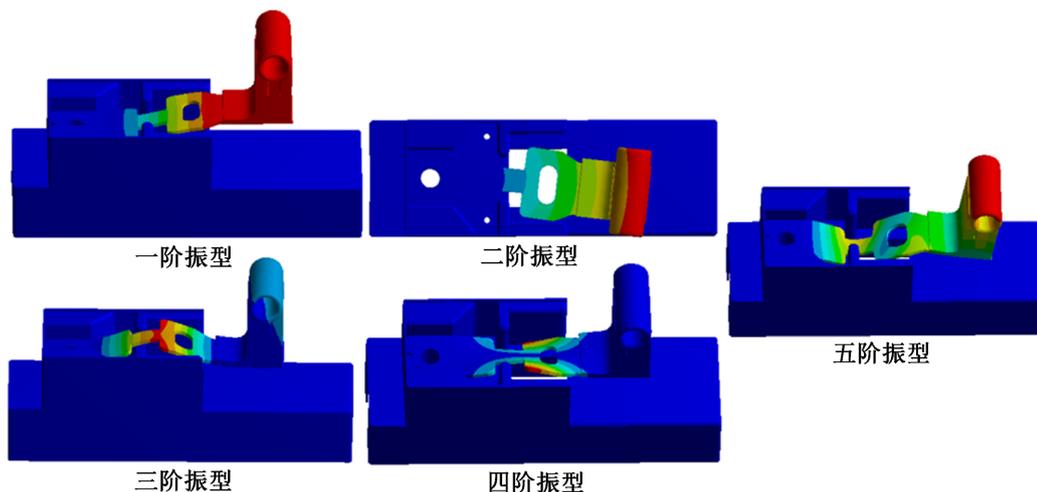


Figure 9. First five orders of transducer vibration pattern
图 9. 传感器前五阶振型图

5.2. 实验结果分析

当电机为定速时, 测量结果如图 10 中(a)~(c)所示, 由图 10 可知: 待测传感器与标定传感器测量结果十分接近, 表征待测传感器灵敏度好; 经过分析数据发现, 待测传感器存在一定的误差, 误差随着转速的增加而增加, 但误差在允许范围内, 误差为 2%~5%; 随着转速的增大, 纱线张力也在增大, 且纱线波动幅度增大; 电机刚启动时, 两个传感器都能监测到一个超调量, 在短时间内能趋于稳定, 表征待测传感器有良好的稳定性和响应快的特点。由图 11 可知, 随着转速的改变, 待测传感器能够稳定输出张力值, 与标定传感器对比, 存在一定误差, 误差在允许范围内; 在起始和结束阶段, 待测传感器误差稍大。

根据实验结果分析, 出现误差的原因可能是: 1) 设置原因, 待测传感器的放大倍数与标定传感器存在误差。2) 硬件原因, 待测传感器是通过单片机进行 AD 转换后利用串口传输数据。3) 安装位置不同, 虽然待测传感器与标定传感器安装位置在一条直线上, 理论上测量的张力大小一致, 但是实际上标定传感器安装位置更接近电机位置。4) 实验平台原因, 随着电机转速的增大, 实验平台振动越剧烈, 由于标定传感器更接近于电机, 其值略大于待测传感器。

6. 总结

本文介绍了应变片工作原理和应变式纱线张力传感器的工作原理, 了解到如何测得纱线张力。其中灵敏度和稳定性是评价应变式纱线张力传感器的重要指标, 为了提高传感器的灵敏度和稳定性, 对应变式纱线张力传感器进行了优化分析。首先, 通过分析纱线张力传感器应具有的特性选定了敏感元件的材料为 17-4PH 钢; 其次建立敏感元件的初始模型, 为了提高传感器的灵敏度, 对其进行边缘裁剪、自由端挖孔等操作得到优化后的模型。对优化前后的敏感元件进行了静力结构分析, 分析结果可知, 优化后的敏感元件的平均应变值比优化前提高了 11.6%, 且形变量更小, 既保证了传感器的灵敏度和测量量程又

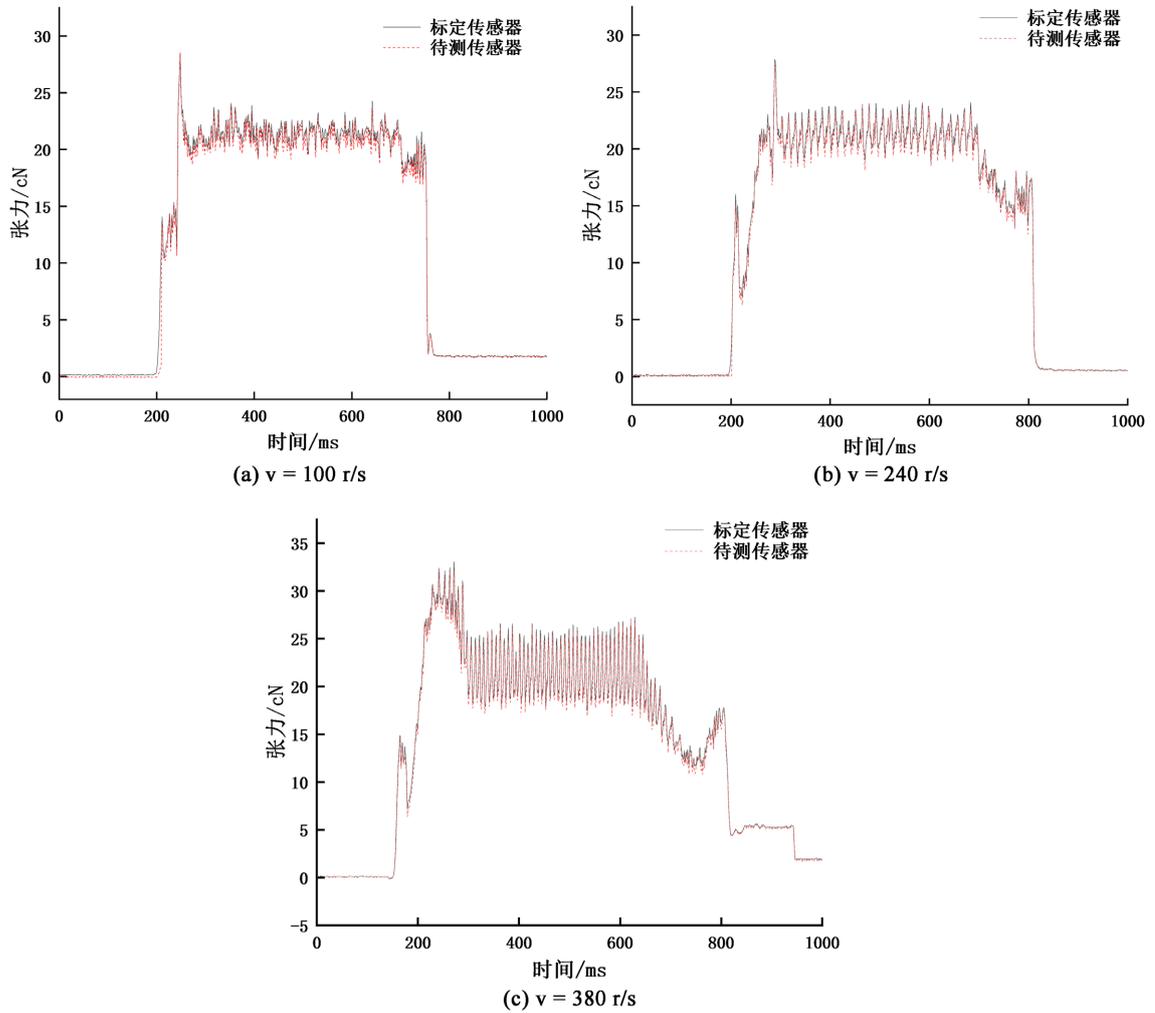


Figure 10. Motor rotation at constant speed
图 10. 电机定速转动

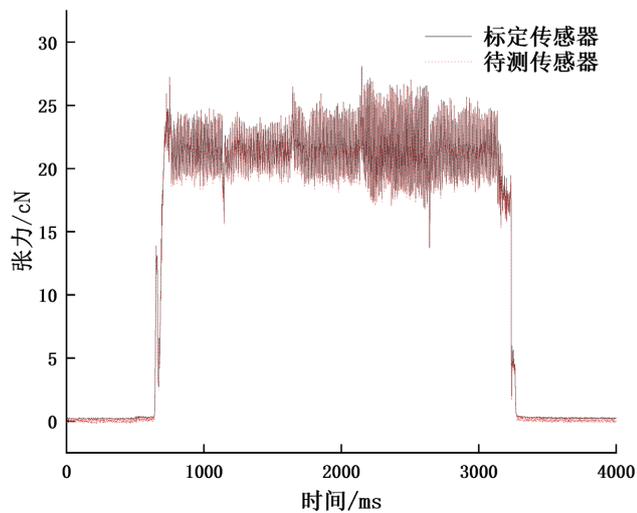


Figure 11. Motor with variable speed rotation
图 11. 电机变速转动

保证了敏感元件在形变时能够处在弹性极限内。为了提高传感器的稳定性,对优化前后的敏感元件和传感器整体进行了模态分析,由分析结果可知,敏感元件进行结构优化后,其一阶固有频率提高了 313.24 Hz;将优化后的敏感元件与壳体装配成传感器,发现传感器整体的固有频率比优化后的敏感元件提高了 7.96%,优化后的传感器一阶固有频率大幅提高,保证了传感器的稳定性。最终,使用标定传感器和此次设计的传感器(待测传感器)进行了对比实验,测试了待测传感器的性能。实验发现,待测传感器的输出与标定传感器的输出十分接近,误差在 2%~5%,在允许的误差范围内,表征优化后的传感器有良好的灵敏度和稳定性。

参考文献

- [1] 庾在海, 吴文英, 陈瑞琪. 纱线张力动态测试方法[J]. 自动化仪表, 2005(10): 36-38.
- [2] 韩帅. 纱线张力精密控制器的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [3] 曹飞, 熊和金. 基于 DSP 的纱线张力检测系统[J]. 电脑编程技巧与维护, 2008(11): 71-73.
- [4] 王鸿博. 纱线张力的控制与检测[J]. 北京纺织, 2001, 22(5): 17-20.
- [5] 刘行, 缪旭红, 赵帅权. 纱线张力测试方法研究进展[J]. 棉纺织技术, 2015, 43(1): 78-82.
- [6] 龚金龙. 全自动恒张力控制系统的研制[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [7] 周永欣. 纱线恒张力控制系统开发[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- [8] 刘九卿. 称重传感器弹性元件金属材料的分析与选择[C]//中国衡器协会. 第三届全国称重技术研讨会论文集. 中国衡器协会, 2001: 12.
- [9] 游江辉. 快速称重传感器弹性体结构参数优化及试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- [10] 尹福炎. 日本在称重传感器弹性体材料和加工方面的研究(上) [J]. 衡器, 2000, 29(1): 13-16.
- [11] 朱向群. 称重传感器弹性体材料关键技术研究及应用[D]: [博士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2010.
- [12] 郝永健, 张团善, 周文胜, 孙盟盟, 徐坤. 动态纱线张力传感器弹簧片的有限元模态分析[J]. 西安工程大学学报, 2015, 29(3): 358-361+368.
- [13] 李耀杰, 沈丹峰, 常革联, 王玉, 李靖宇. 悬臂梁式纬纱张力传感器结构优化[J]. 纺织科技进展, 2021(2): 33-37+40. <https://doi.org/10.19507/j.cnki.1673-0356.2021.02.009>
- [14] 崔可可, 宋春明. 称重传感器弹性元件的设计与研究[J]. 装备制造技术, 2016(1): 78-80.