

基于光纤的扭矩传感器新型结构设计

张占鹏¹,白素平^{1,2},闫钰锋^{1,2*}

(1.长春理工大学 光电工程学院,长春 130022;2.长春理工大学 光电工程国家级实验教学示范中心,长春 130022)

摘要:为能够实现对扭矩的高精度测量,基于光纤应变测量扭矩的原理,提出了新型结构的扭矩测量传感器。该传感器采用轮辐式的结构,能够获得固定梁处参考光纤与传递梁处测量光纤之间的相位差,通过建立相位差与扭矩之间数学关系的方式,实现对扭矩的测量;同时,采用有限元分析方法进行仿真研究,进一步确定扭矩与相位差之间的数学关系,为新型结构的扭矩传感器提供理论模型。误差分析结果表明:由结构引起的扭矩测量误差为 $\pm 0.115\text{N}\cdot\text{m}$,证明该结构满足光纤的测量原理要求,能够实现扭矩测量。

关键词:光纤;传感器;扭矩测量;相位差;有限元分析;精度分析

中图分类号:TH82 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)03-0001-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.03.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



New structural design of torque sensor based on optical fiber

ZHANG Zhanpeng¹, BAI Suping^{1,2}, YAN Yufeng^{1,2*}

(1. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. National Demonstration Center for Experimental Opto-Electronic Engineering Education,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to achieve a high-precision measurement of torque, based on the principle of fiber strain measuring torque, a new type of torque measuring sensor is proposed. Using a spoke-type structural design, the phase difference between the reference fiber at the fixed beam and the measuring fiber at the transfer beam can be obtained. By establishing the mathematical relationship between phase difference and torque, the torque value can be calculated directly, so as to realize the measurement of torque. The finite element analysis method is adapted to carry out simulation research to further determine the mathematical relationship between torque and phase difference, and provide a theoretical model for the new structure of the torque sensor. The error analysis shows that the torque measurement error induced by the structure is about $\pm 0.115\text{N}\cdot\text{m}$, which proves that the structure meets the measurement principle requirements of the optical fiber and can realize the torque measurement.

Key words: optical fiber; sensor; torque measurement; phase aberration; finite element analysis; precision analysis

0 引言

扭矩是机械动力输出的重要参数,过去大量采用传统的电测传感技术很难实现多参数、在线动态监测。虽然目前采用定期和离线检修的方式能够避免一些事故的发生,但其安全隐患较多,无法防止这些设

备在运行过程中的突发性事故发生^[1]。这也使得扭矩测量成为多种机械产品监测和安全优化中非常重要的研究内容。常用的扭矩测量方法有电阻应变式扭矩测试^[2]、磁弹形测试^[3-5]和电容式扭矩传感器测试^[6]等。相比应变式扭矩测量,磁弹性扭矩测量等方法都存在摩擦阻力大和误差大等缺点。光纤传感技术由于具有灵敏度高、抗电磁干扰能力强、能够在恶劣环境下工作、能够实现非接触测量和趋于小型化发展等优点,在诸多力学参数的测量领域得到了较为广泛的应用。2002年,Zhang等人^[7]设计了一种不受温度影响的线性扭矩传感器,但由于强度原因,在实际应用中存在一定的困难。2004年,LO Y L等人^[8]提出了采用高双折射光纤传感探头实现对扭矩的测量,但易受到环境和

收稿日期:2018-08-24。

基金项目:吉林省科技厅重点科技研发项目(20180201016GX)资助。

作者简介:张占鹏(1994-),男,吉林长春人,硕士研究生,主要研究方向为精密仪器总体设计。参加吉林省科技厅重点科研项目、星间激光通信传输测试系统设计项目等。研究生期间多次获得奖学金和“优秀研究生”荣誉。

*通信作者:闫钰锋(E-mail:yanyufeng@cust.edu.cn)。



温度的影响。谢平等人^[9]设计了一种利用光纤缠绕式扭矩测量方法,但由于该方法中的细金属丝是由特种胶固定在轴上,金属丝的粘贴方式对扭矩测量会造成一定的影响。因此,本文采用光纤传感技术,并基于光纤应变效应提出一种新型结构的扭矩传感器。

1 基于光纤传感的扭矩测量系统

1.1 扭矩测量系统组成及原理

扭矩测量系统模型示意图,如图1所示。实验系统主要由3部分组成:伺服电机、扭矩传感器和负载。其中,负载固定在实验平台上,伺服电机通过电机座固定在实验平台上,为测量装置提供输出转矩。伺服电机通过联轴器与负载连接,将输出扭矩通过传动轴传递到联轴器上后,经联轴器作用于负载上,为测量系统提供稳定的扭矩输出。扭矩传感器设计成通用尺寸的联轴器,对伺服电机输出的扭矩进行测量。扭矩传感器原理流程图,如图2所示。

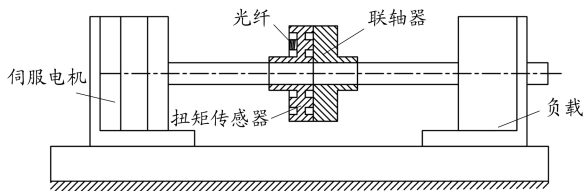


图1 实验系统模型示意图

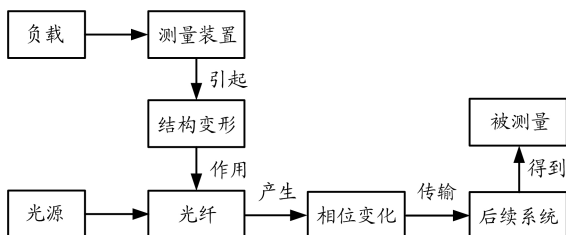


图2 扭矩传感器原理流程图

扭矩传感器采用差模测量原理,差模具有抗干扰能力强和传感器可自校准的优点。其中,扭矩传递梁与参考梁均缠绕光纤,传递梁和参考梁在扭矩的作用下产生变形,从而引起光纤的形变,最终使光纤中的光波产生相位变化。通过哈特曼波前传感器测量光束的相位变化后,采用无线传输方式将测量数据传输给信息处理单元,信息处理单元根据相位信息反演扭矩,从而实现扭矩测量。

1.2 扭矩测量理论计算

当光纤受到纵向或横向的机械应力作用时,光纤的长度、芯径和纤芯折射率都将发生变化,这些变化会导致光波产生相位变化^[10]。

当光波通过长度为 L 的光纤后,出射光波的相位表示为:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} L = \beta L \quad (1)$$

其中, β 为光波在光纤中的传播常数, λ 为光波在光纤中的传播波长, $\lambda = \lambda_0 / n$, n 为光纤的平均折射率, λ_0 为真空中的光源波长。

光纤长度变化主要是由被测件的应变或形变引起的,即被测件的应变 ε 引起光纤长度 L 的变化。二者关系为^[11]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

其中, ΔL 为光纤长度的变形量。

光源发出的光在缠绕在被测元件上的光纤中传输。当光纤发生形变后,其输出端的相位延迟为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n L \varepsilon}{\lambda_0} = \frac{2\pi n}{\lambda_0} \Delta L \quad (3)$$

在获得变形量与相位差之间的数学关系后,结合有限元分析的方法,确定变形量与扭矩之间的关系,即可间接获得扭矩与相位差之间的数学关系。

1.3 扭矩传感器结构设计

基于光纤应变效应的扭矩测量装置,其结构以通用联轴器结构为原型,结合等圆轴在扭转时的扭矩和应变关系。假定其工作温度范围为 $-32^\circ\text{C} \sim 32^\circ\text{C}$,在光纤允许的拉伸力范围内,并考虑光纤允许的最大弯曲半径来进行机械结构设计。

扭矩传感器机械结构的三维实体模型结构如图3所示。其结构采用轮辐式结构,分为固定梁和扭矩传递梁。可以看出,测量光纤沿扭矩传递梁的横截面缠绕在扭矩传递梁上,当扭矩传递梁在扭矩载荷的作用下发生变形,变形传递到测量光纤上,使光纤长度发生变化;由于固定梁在扭矩的作用下不会产生变形,参考光纤以同样的方式在固定梁上缠绕作为参考。对结构施加扭矩载荷时,采用哈特曼波前传感器对经测量光纤和参考光纤传输光束的相位信息进行测量,经过后续处理系统和基于双光纤的测量原理,再通过对参考光纤和测量光纤的输出光程差,实现对扭矩的测

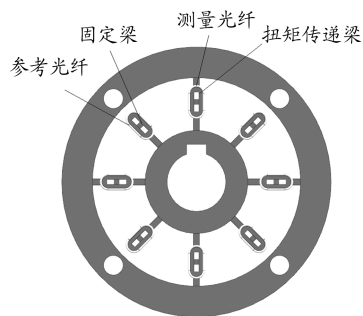


图3 机械结构三维实体模型示意图

量。此外,设计过程中考虑在联轴结构中缠绕多组光纤,能够起到抑制温度等因素产生的共模误差。

2 仿真研究

本文采用有限元分析的方法,通过在中间梁处施加不同的扭矩,可以得到固定梁和传递梁的变形量。由于光纤的伸长量与结构变形同步,因此结构的变形量即光纤伸长量,根据式(3)可计算得到光程差变化。首先,将所设计的传感器机械结构三维实体模型结构导入到有限元分析软件中;然后,根据对不同材料性能的分析,选定结构材料为 45Mn2,其抗拉强度 $\geq 885\text{MPa}$,屈服点 $\geq 735\text{MPa}$;最后,对传感器机械结构三维实体结构模型进行网格划分,网格选用四面体,划分的网格大小为 2mm,划分后网格的平均质量为 0.83937。网格划分模型如图 4 所示。

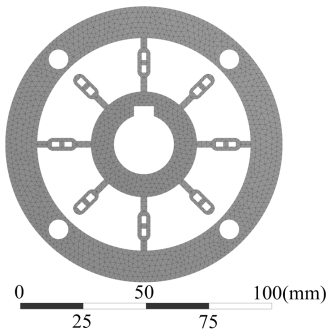
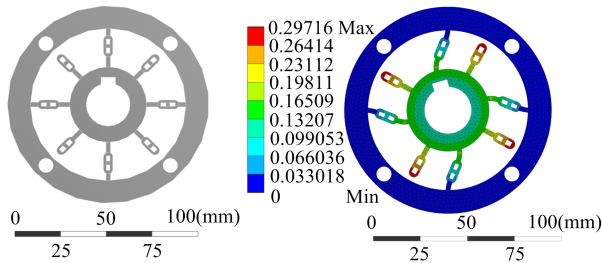


图 4 网格划分模型

当负载扭矩为 0 时, ΔL 为 0, 其对应的有限元模型如图 5(a) 所示;当负载扭矩不为 0 时,模型发生变形, ΔL 不为 0,对应的有限元应力云图如图 5(b) 所示。



(a) 负载扭矩为 0N·m (b) 负载扭矩不为 0N·m

图 5 有限元模型

本文对三维实体模型加载扭矩,从 0N·m 递增至 80N·m,间隔为 5N·m,可得到三维实体结构在不同扭矩下的 ΔL 。首先,对其数据进行整理,取一组固定梁和扭矩传递梁的节点编号如图 6 所示,A 为参考梁,与结构一端相连,缠绕光纤作为参考;B 为扭矩传递梁,与结构两端相连,其自身在扭矩载荷作用下产生变形。参考梁的周长在扭矩载荷作用下不会发生变化,扭矩传递梁在扭矩的作用下会发生变形。然后,对各节点的数据进行处理,得到在不同扭矩下 ΔL 的变化如表 1 所示。

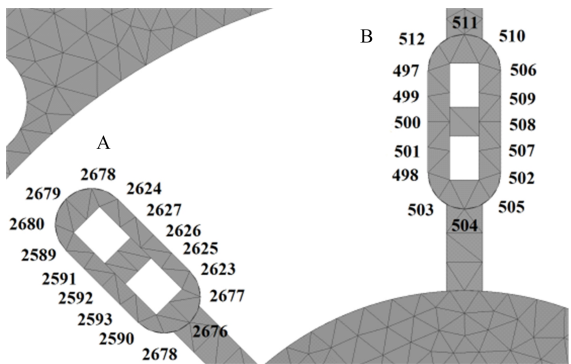


图 6 网格点的选取

表 1 扭矩与 ΔL 的对应关系

扭矩 (N·m)	$\Delta L(\mu\text{m})$	扭矩 (N·m)	$\Delta L(\mu\text{m})$
5	0.0060	10	0.0241
15	0.0537	20	0.0966
25	0.1507	30	0.2165
35	0.2953	40	0.3863
45	0.4887	50	0.6033
55	0.7297	60	0.8699
65	1.0206	70	1.1781
75	1.3597	80	1.5463

我们对表 1 的数据进行拟合,拟合出的曲线图如图 7 所示。由于拟合出扭矩 M 和 ΔL 的数学模型更加趋于二次曲线,故采用最小二乘法求得的数学模型为:

$$\Delta L = 2.4 \times 10^{-4} M^2 - 2.7 \times 10^{-5} M + 0.0001 \quad (4)$$

根据式(1)和式(4)联立可得到扭矩 M 和相位延迟的数学模型为:

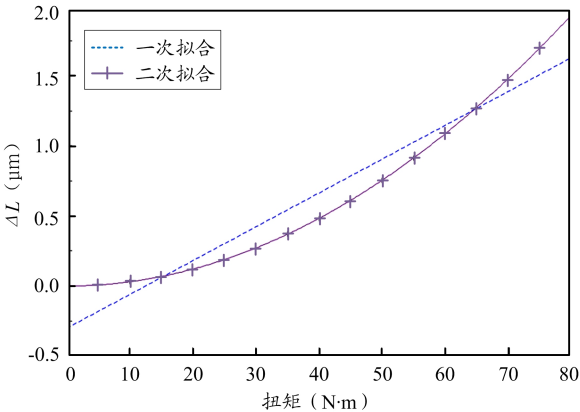


图 7 扭矩与 ΔL 关系曲线图

$$\Delta\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}(2.4\times10^{-4}M^2-2.7\times10^{-5}M+10^{-4}) \quad (5)$$

在不考虑温度的影响下,拟合出的曲线良好,符合光纤传感的工作原理,可作为光纤传感器中光纤调制的构件,从而达到提高测量精度的目的。

3 误差分析

由于误差来源主要为温度变化引起的材料变形,因此,本文对三维实体模型进行热力学分析,研究温度对 ΔL 变化的影响。选定的结构材料为 45Mn2,热膨胀系数为 $1.13\text{E-}05\text{Kelven}$,热导率为 $48\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ 。首先,对三维实体结构模型进行网格划分,网格选用四面体,划分的网格大小为 2mm ,划分后网格的平均质量为 0.83937 。然后,对三维实体模型施加温度载荷和约束,默认温度为 22°C ,对施加不同温度载荷下的 ΔL 和施加温度载荷进行分析,加载和求解后的三维实体结构的应力变形云图如图 8 所示。接着对不同温度载荷下的应力变形,选取与静力学分析相同的位置进行数据采集和分析,获得 ΔL 与温度变化的对应关系如图 9 所示。最后,对上述数据进行拟合,可获得温度与 ΔL 之间的数学关系:

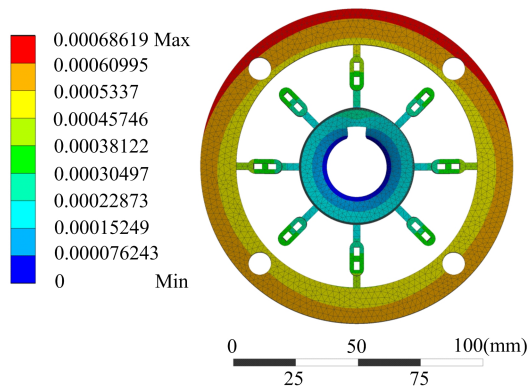


图 8 应力变形云图

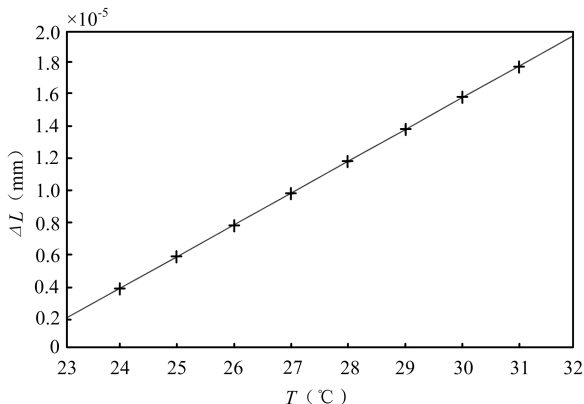


图 9 ΔL 与温度关系曲线图

$$\Delta L=1.9699\times10^{-6}T-4.335\times10^{-5} \quad (6)$$

其中, T 表示环境温度。 ΔL 会有 2 个因素对其造成干扰,即温度变化对扭矩测量的影响和系统自身对测量精度的影响。温度变化对扭矩测量造成的影响可由温度补偿来解决。经多次仿真拟合,并分析对比拟合结果,得到该扭矩测量系统的测量误差 $\leq \pm 0.115\text{N}\cdot\text{m}$ 。

4 结束语

本文基于光纤传感技术提出了一种新型结构的扭矩传感器。首先,通过建立光程差与扭矩之间的数学解析关系的方式,为扭矩测量提供理论依据。然后,采用有限元分析的方式,对新型结构进行仿真研究。仿真结果表明:在采用 45Mn2 材料的前提下,能够实现在 $0\sim 80\text{N}\cdot\text{m}$ 范围内扭矩的测量,测量误差 $\leq \pm 0.115\text{N}\cdot\text{m}$,验证了扭矩测量方法的可行性。最后,采用热力学分析的方式进行误差分析,并给出温度变化的补偿值。新型结构的扭矩传感器为后续进行扭矩测量实验时进行温度补偿提供了理论依据,实现了对扭矩的高精度测量。

参考文献:

- [1] 王岩,储江伟. 扭矩测量方法现状及发展趋势[J]. 林业机械与木工设备, 2010, 38(11): 14-18.
- [2] 杨文志,冯志斌,何维娜. 传动轴扭矩测量装置的结构设计及实验分析[J]. 中国测试, 2015, 41(1): 120-123.
- [3] 石延平,周庆贵,臧勇. 环形差动压磁式非接触动态扭矩传感器的研究与设计[J]. 中国机械工程, 2011, 22(17): 2026-2030.
- [4] 李多民. 磁力联轴器实际传递扭矩的实验测试 [J]. 流体工程, 1992, 20(10): 11-13.
- [5] RAGHUNATH G, FLATAU A B, PUREKAR A, et al. Non-Contact Torque Measurement Using Magnetostrictive Galfenol [C]// ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, September 16 -18, 2013, Utah, USA. New York: ASME, 2013: V001T04A013.
- [6] 徐铨晋. 分布式光纤传感系统的信号处理技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [7] ZHANG W G, KAI G Y, DONG X, et al. Temperature-independent FBG-type toesion sensor based on combinatorial torsion beam [J]. Photon. Technol. Lett. IEEE, 2002, 14(8): 1154-1156.
- [8] LO Y L, CHUE B R, XU S H. Fiber torsion sensor demodulated by a high-birefringence fiber Bragg grating [J]. Optics Communications, 2004, 230(4-6): 287-295.
- [9] 谢平,刘彬,王霄,等. 新型光纤扭矩测量方法[J]. 光电工程, 2006(2): 111-114.
- [10] MADNI A M, VUONG J B, YANG D C H, et al. A Differential Capacitive Torque Sensor With Optimal Kinematic Linearity [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(5): 800-807.
- [11] 赵新秋,郑绳植. 一种新型光纤应变传感器的设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2004(1): 41-48.