DOI:10.11918/202506042

一种基于新型增敏结构的高强螺栓紧固力监测智能垫圈

韩 坤[1,2],张东昱[1,2],李 惠[1,2],倪 莉[1,2]

(1.哈尔滨工业大学 土木工程学院,哈尔滨 150090;
2.交通基础设施智能监测与预警工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学),哈尔滨 150090)

摘 要:高强螺栓连接广泛应用于各类工程结构,螺栓紧固力衰减导致连接松动可能会对结构安全服役构成严重威胁。压力垫圈是监测螺栓紧固力常用传感器,然而对于大荷载高强螺栓,传统压力垫圈存在传感器尺寸大、测量精度易受荷载偏心及传感器与结构表面摩擦等因素影响的缺点,难以满足工程应用需求。为此,提出一种具有新型增敏结构的高强螺栓紧固力监测智能垫圈传感器。与传统压力垫圈采用单一圆环形结构不同,本研究提出的智能垫圈由3层环形结构叠合构成,中间测量单元与上/下部传力单元之间接触面为向内倾斜环形。这种独创的增敏结构将智能垫圈所受的螺栓竖向压力转化为中间测量单元水平环向膨胀变形,不仅大幅增加智能垫圈测量灵敏度,还消除了智能垫圈与结构接触表面摩擦力对测量精度的不利影响。通过理论分析和数值模拟,研究了智能垫圈设计参数对其灵敏度、量程等关键测量指标的影响规律,并提出一种智能垫圈加卸载全过程分段测量模型,解决了倾斜接触表面间摩擦力导致智能垫圈加卸载过程测量结果不一致问题,进一步提升了测量精度。最后,研制了一个量程700 kN智能垫圈传感器并开展检测实验,结果表明,传感器平均测量误差仅为3 kN。提出的智能垫圈传感器具有体积小、量程大和精度高等优点,具有广阔工程应用前景。

关键词:垫圈传感器;新型增敏结构;螺栓紧固力监测;结构健康监测
中图分类号:TP212 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)10-0072-10

A smart washer sensor based on a novel sensitivity-enhanced structure for monitoring tightening force of high-strength bolts

Han Kun[1,2], Zhang Dongyu[1,2], Li Hui[1,2], Ni Li[1,2]

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Monitoring and Early Warning of Transportation Infrastructure (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: High-strength bolted connections are widely used in various engineering structures, and connection loosening caused by the attenuation of bolt tightening force may pose a serious threat to structural safety. Pressure washers are commonly used sensors for monitoring bolt tightening force. However, for high-strength bolts subjected to large loads, traditional pressure washers have drawbacks such as large sensor size and measurement accuracy that is easily affected by factors including load eccentricity and friction between the sensor and the structural surface, making it difficult to meet the requirements of engineering applications. To address this issue, this paper proposed a smart washer sensor with a novel sensitivity-enhanced structure for monitoring the tightening force of high-strength bolts. Different from traditional pressure washers using a single ring-shaped structure, the proposed smart washer consists of three layers of stacked ring-shaped structures, and the contact surfaces between the middle measuring unit and the upper/lower force transmission units are inwardly tilted annular surfaces. This original sensitivity-enhanced structure converts the vertical bolt pressure on the smart washer into horizontal circumferential expansion deformation of the middle measuring unit, which not only significantly increases the measurement sensitivity of the smart washer but also eliminates the adverse effects of friction between the smart washer and the structural contact surface on measurement accuracy. Through theoretical analysis and numerical simulation, the influence rules of the design parameters of the smart washer on its key measurement indicators such as sensitivity and measurement range were investigated, and a segmented measurement model for the entire loading and unloading processes of the smart washer was proposed. This model solved the problem of inconsistent measurement results during the loading and unloading processes of the smart washer caused by friction between the tilted contact surfaces and further improved

收稿日期:2025-06-18;**录用日期**:2025-08-03;**网络首发日期**:2025-09-17
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250917.1507.009
基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3706704);国家自然科学基金(U2239253)
作者简介:韩 坤(2000—),男,博士研究生;张东昱(1974—),男,教授,博士生导师
通信作者:张东昱,dongyu.zhang@hit.edu.cn

the measurement accuracy. Finally, a smart washer sensor with a measurement range of 700 kN was fabricated and tested. The experimental results indicate that the average measurement error of the sensor is only 3 kN. The proposed smart washer sensor has the advantages of small volume, large measurement range, and high accuracy, which has broad engineering application prospects.

Keywords: washer sensor; novel sensitivity-enhanced structure; bolt tightening force monitoring; structural health monitoring

高强螺栓广泛应用于各类大型结构关键部件连接[1]，然而在长期服役过程中，由于振动、温度变化和材料应力松弛等复杂因素耦合作用，高强螺栓紧固力往往会逐渐降低，导致螺栓连接松动[2-4]。如果这种松动未被及时发现，可能对结构安全服役埋下重大安全隐患。

为了解决这一问题，学者们研究了各种螺栓紧固力测量方法，主要包括扭矩法、电阻应变片法、超声波法和压力垫圈等。扭矩法[5-6]通过检测螺母扭矩值来间接推算螺栓紧固力，尽管该方法操作方便，但扭矩大小受螺母与结构接触面摩擦影响较大，现实应用中难以准确标定摩擦力影响，因此，扭矩法很难测得准确的螺栓紧固力；应变测量法[7-8]是通过测量螺栓应变来计算螺栓紧固力，该方法需要对螺栓进行打孔或改造，增加了施工和维护的复杂性；超声波法[9-12]是利用超声波在螺栓中传播速度与应力相关的声弹性原理，通过测量超声波在螺栓中传播时间来反推螺栓应力变化，但超声波法需要进行复杂的提前标定，且测量精度易受环境温度等因素干扰，实际测量精度有限。

相比以上几种方法，压力垫圈直接安装在螺母与结构之间（如图 1 所示），无需对螺栓或周边结构进行改造，安装简便且适应于狭小空间；此外，基于光纤光栅（FBG）制成的压力垫圈具有灵敏度高、耐腐蚀、抗电磁干扰能力强等优势[13-14]。按照测量单元在载荷作用下变形方式，压力垫圈可分为测量平行荷载方向传感器轴向压缩变形或者测量垂直荷载方向传感器水平环向变形的两大类。对于第一类压力垫圈，郭永兴等[15]在圆柱环状弹性体上设置 3 组回字梁，提高了传感器的测量灵敏度；Li 等[16]采用一种上下表面凸台式结构，将荷载传递分布集中于粘贴应变片的部位，从而提高了测量精度；朱觉文等[17]设计了一种组合式压力环，为了减小偏心荷载的影响，传感器四周设置多个应变测量单元，进一步增大了传感器结构自身尺寸和复杂程度。通过上述分析可见，为了减小偏心荷载导致的传感器内应力（应变）不均匀的影响，第一类压力垫圈往往需要在测量单元周边沿轴向布设多个应变计，这大大增加了传感器的厚度和结构复杂性。对于第二类压力垫圈，Chen 等[18]利用材料泊松效应，将 FBG 应变计横向粘结于传感器外侧，通过传感器在荷载作用下的环向膨胀来测量螺栓紧固力；Yeager 等[19]设计一种复合材料测力垫圈，利用外荷载导致的光栅布拉格反射峰一半处的带宽改变来实现螺栓预紧力变化的监测。由于第二类压力垫圈沿水平方向布设应变计，传感器厚度可大幅缩减。然而由弹性力学分析可知，压力垫圈与结构及螺母接触表面摩擦因数对传感器环向膨胀变形测量结果影响巨大；而实际应用中难以准确标定上述摩擦因数，导致此类压力垫圈在实际工程中测量精度不高。综上，现有压力垫圈传感器存在体积偏大、测量精度易受荷载偏心以及传感器与结构之间摩擦影响等问题，难以满足高强螺栓紧固力实时监测的工程需求。

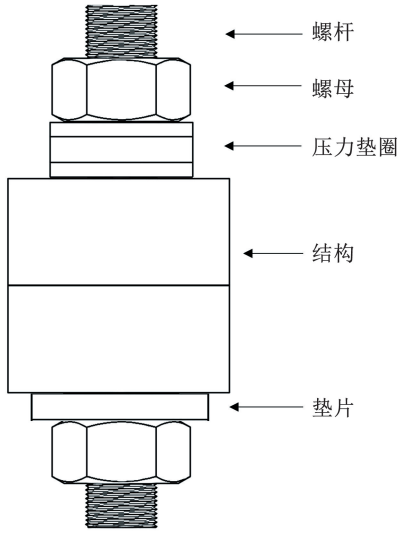


图 1　压力垫圈传感器安装方式

Fig. 1　Installation of pressure washer sensor

为此，提出了一种基于新型增敏结构的高强螺栓紧固力监测智能垫圈传感器。传感器由 3 层结构构成，中间测量单元与上下单元之间设置向内倾斜环形接触面，将传感器所受竖向压力转换成测量单元水平环向膨胀变形，再利用 FBG 应变计进行测量。这种全新增敏结构可以在保持传感器较小厚度的条件下，大幅增加传感器测量灵敏度，且测量结果不受传感器与外部结构接触表面摩擦力影响，显著提升了传感器在实际应用中测量精度。此外，为了解决传感器内部中间测量单元与上下单元接触面摩擦力导致的传感器加卸载测量结果不一致的问题，

提出了传感器加卸载分段测量模型,进一步大幅提升了传感器测量精度。

1 传感器结构与工作原理

本研究提出的基于新型增敏结构的高强螺栓紧固力监测智能垫圈传感器主要由竖向紧密堆叠的 3 层同心圆环结构构成,上下两层为传力单元,中间一层为测量单元。图 2 展示了传感器通过中心的竖向剖面图。传感器上部和下部传力单元分别与螺母和结构相接触,测量单元上下表面为内凹的圆环面,与上部传力单元下表面和下部传力单元上表面外凸的圆环面紧密贴合接触。当传感器承受螺栓传递的压力时,上下传力单元会通过接触面将荷载传递给中间测量单元;由于接触面是向内倾斜的,测量单元所受荷载具有水平径向分力F_h,该分力可以显著增加中间测量单元环向膨胀变形。在测量单元外侧沿环向粘贴光纤光栅应变计(FBG),通过 FBG 应变数据可以反推得到传感器所受竖向压力荷载。

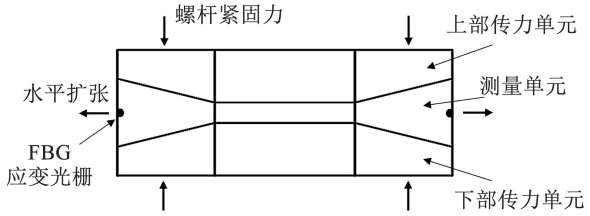


图 2 智能垫圈传感器竖向剖面

Fig. 2 Vertical cross-section of smart washer sensor

2 测量灵敏度分析

测量灵敏度是影响传感器测量精度的关键因素。针对提出的基于新型增敏结构的高强螺栓紧固力监测智能垫圈,开展了传感器灵敏度分析。

由于压力垫圈传感器是一个中心轴对称结构,沿传感器环向截取一个薄片单元作为分析模型(如图 3 所示)。为了方便分析,传感器上部/下部传力单元采用对称结构。图 4(a)给出了分析模型竖向受力分析图,k_1和k_2分别代表了传力单元与测量单元在水平方向变形的刚度。上部传力单元竖向力学平衡方程如下:

$$F = p\cos\theta + f\sin\theta \tag{1}$$

式中:F 为螺母传递给压力垫圈的压力,p 和 f 分别为传力单元与测量单元接触面上的正压力和摩擦力,θ 为接触面倾角。由于传力单元与测量单元接触面是向内倾斜的,传力单元对测量单元施加合力的水平分量F_h可表示为

$$F_h = 2p\sin\theta - 2f\cos\theta \tag{2}$$

在加载过程中,传力单元与测量单元在接触面上产生相对滑动,此时摩擦力 f 可以表示为

$$f = \mu_1 p \tag{3}$$

式中:μ_1为接触面的滑动摩擦因数。将式(3)代入式(1)和(2),可得

$$F_h = \frac{2(\sin\theta - \mu_1\cos\theta)}{(\cos\theta + \mu_1\sin\theta)}F \tag{4}$$

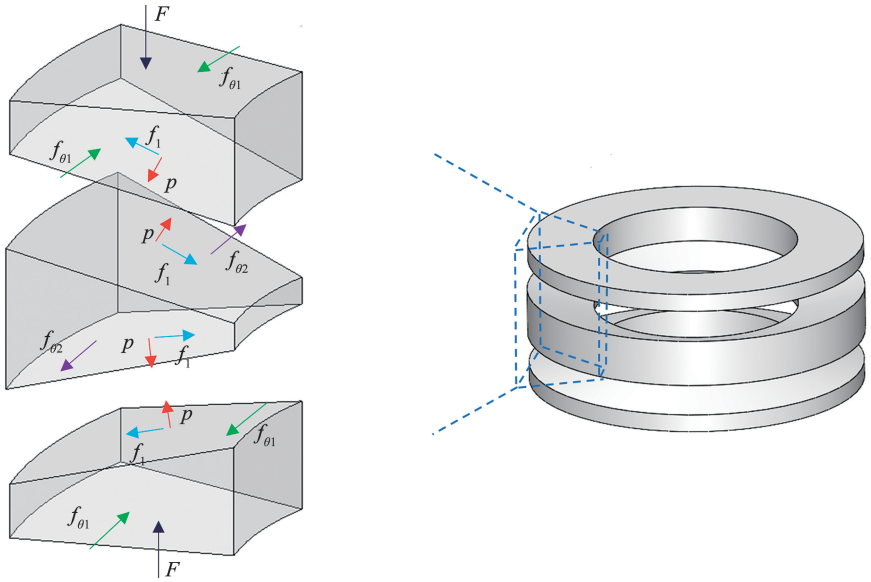


图 3 传感器测量灵敏度分析模型单元

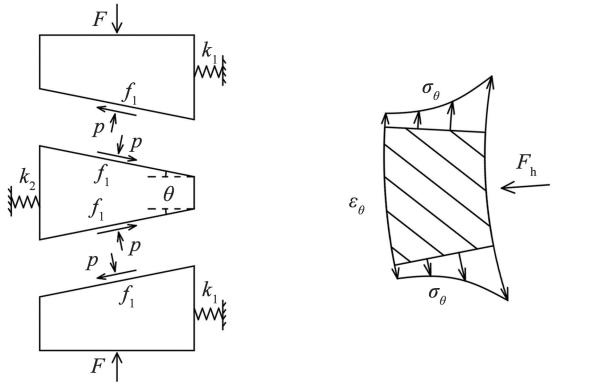
Fig. 3 Analysis model unit for measurement sensitivity of sensor

图 4(b)给出了测量单元在水平方向上的力学平衡状态。传力单元与测量单元之间作用合力的水平分量F_h,引起测量单元环向应变增加,ε_θ为由 FBG 测量的测量单元外侧环向应变。由弹性力学

分析可知，ε_θ 与 F_h 成正比关系，与测量单元水平变形刚度 k_2 成反比关系。因此，可以得到 FBG 测量应变 ε_θ 与传感器所受压力荷载 F 的关系为

$$\varepsilon_\theta \propto \frac{F_h}{k_2} = \frac{2}{k_2}\frac{(\sin\theta - \mu_1\cos\theta)}{(\cos\theta + \mu_1\sin\theta)}F \tag{5}$$

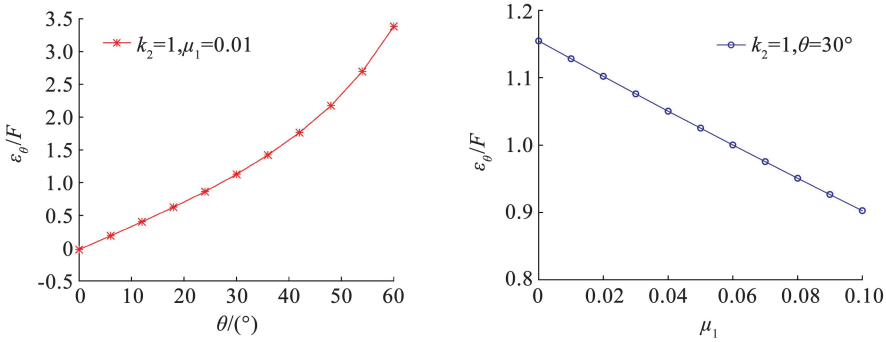
根据式(5)结果可以得到，传感器测量灵敏度(ε_θ/F)不仅与测量单元水平变形刚度 k_2 有关，还和传力单元与测量单元之间接触面的倾角 θ 和摩擦因数 μ_1 紧密相关。显然，测量单元刚度 k_2 越小，传感器测量灵敏度越大。此外，图 5 给出了传感器测量灵敏度随倾角 θ 和摩擦因数 μ_1 变化的关系，可以看出，通过调整传感器的设计参数(增大倾角 θ 和减小摩擦因数 μ_1)，同样可以实现提升传感器测量灵敏度的目的。



(a) 竖向受力分析　　(b) 中间测量单元横向受力分析

图 4　传感器灵敏度分析模型受力状态分析

Fig. 4　Force state analysis of sensitivity analysis model for sensor



(a) 灵敏度随倾角θ变化　　(b) 灵敏度随摩擦因数μ_1变化

图 5　传感器灵敏度与倾角 θ 和摩擦因数 μ_1 关系

Fig. 5　Relationship of sensor sensitivity with tilt angle θ and friction coefficient μ_1

3　智能垫圈加卸载全过程分段测量模型

当高强螺栓由加载过程转换到卸载过程时，传力单元与测量单元之间在接触面上不再产生相对滑动，两者之间摩擦由滑动摩擦转化为静摩擦，静摩擦力 f 和正压力 p 之间关系也不再满足式(3)，因而传感器所受荷载 F 与 FBG 光栅测量应变 ε_θ 关系也将随之改变。图 6 给出了传感器在加卸载全过程中，荷载 F 与应变 ε_θ 关系的变化。在卸载过程中，传力单元与测量单元之间的摩擦状态将经历两阶段。第一阶段为转换阶段，在此阶段中传力单元与测量单元之间不再相互滑动，两者间的静摩擦力逐渐由 $\mu_1 p$ 转变为 $-\mu_1 p$。第二阶段为卸载滑动阶段，在此阶段中传力单元与测量单元之间开始反向相对滑动，此时两者间摩擦力为 $-\mu_1 p$。从图 6 可以看出，由于传力单元与测量单元之间摩擦力在传感器卸载过程中数值与方向的改变，传感器荷载 F 与 FBG 光栅测量应变 ε_θ 不再保持一个简单的线性关系。为了提升传感器在加卸载全过程中的荷载测量精度，提出了一个分段线性模型，如式(6)所示。这里假设模型参数 m 对于不同幅值的加卸载过程都保持不变，该参数可以通过模拟或实验数据拟合得到。

$$\begin{aligned} &\text{加载：} F = a_0\varepsilon_\theta + b_0,\ \varepsilon_\theta \in [0, \varepsilon_{\theta,\max}] \\ &\text{卸载：} F = \begin{cases} a_1\varepsilon_\theta + b_1,\ \varepsilon_\theta \in [0, m\varepsilon_{\theta,\max}] \\ a_2\varepsilon_\theta + b_2,\ \varepsilon_\theta \in (m\varepsilon_{\theta,\max}, \varepsilon_{\theta,\max}] \end{cases} \end{aligned} \tag{6}$$

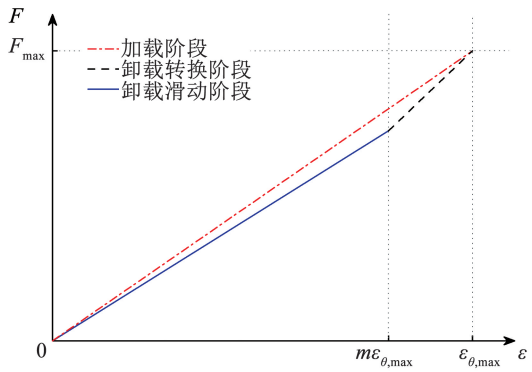


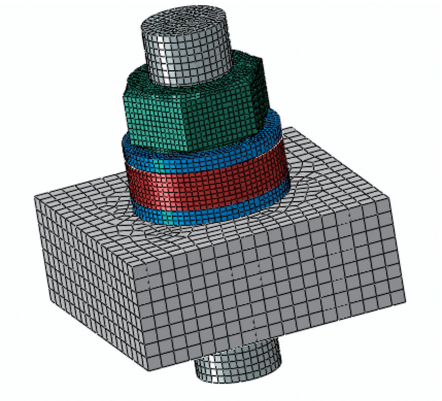
图 6　加卸载全过程传感器荷载 F 与 FBG 光栅应变 ε_θ 关系

Fig. 6　Relationship between sensor load F and FBG grating strain ε_θ during entire loading and unloading processes

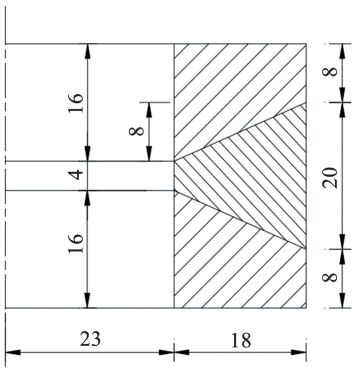
4　智能垫圈工作状态数值模拟

为进一步研究传感器在螺栓紧固作用下的受力状态以及其测量原理的可行性，在有限元分析软件中建立传感器分析简化模型，如图 7 所示。模型由螺杆、螺母、垫圈传感器、结构组成，所有部件均采用 C3D8R 单元类型，在不同部位划分不同的网格大小

以保证分析效率和精度。传感器材料属性为:弹性模量 E = 209 GPa, 泊松比 ν = 0.27, 密度 ρ = 7 830 kg/m^3。螺杆与螺母接触面间采用绑定约束,其余各构件间的接触界面采用面 – 面接触单元进行建模,切向摩擦行为通过罚函数算法模拟,法向相互作用则定义为禁止穿透的硬接触,测量单元与传力单元间接触面的摩擦因数μ_1选取为 0.01。在分析过程中,结构底面被完全约束,施加不同大小的力在螺杆底部模拟不同的螺栓紧固力。



(a) 有限元模型



单位: mm

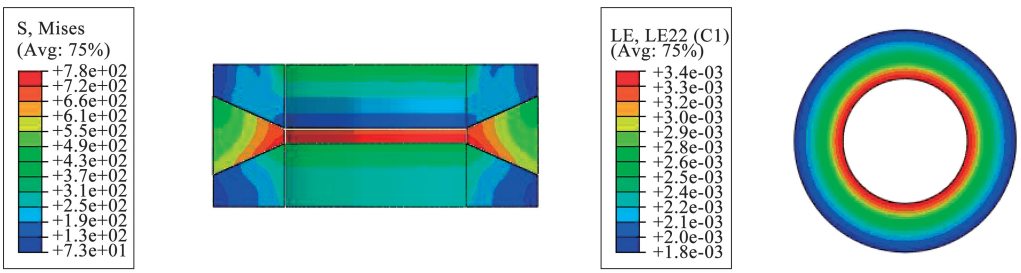
(b) 传感器结构尺寸

图 7 有限元分析模型及传感器结构尺寸

Fig. 7 Finite element analysis model and structural dimensions of sensor

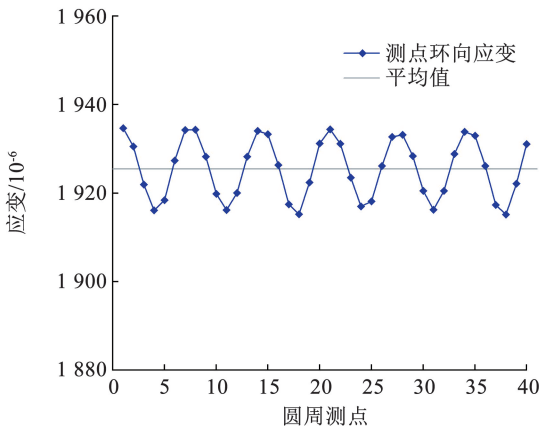
4.1 智能垫圈应力与变形

不考虑偏心荷载的影响,施加 700 kN 螺栓紧固力,图 8(a)和 8(b)分别给出了传感器竖向剖面 Mises 应力与中间测量单元水平环向应变的分布云图。可以看出,测量单元 Mises 应力由内侧向外侧递减,最大应力出现在测量单元内表面,因此,测量单元内表面最大 Mises 应力大小决定了传感器不出现破坏条件下的最大量程。此外,正如前述理论分析,在传力单元与测量单元向内倾斜接触面压力作用下,传感器测量单元产生了较大水平环向膨胀应变。图 8(c)给出了测量单元外表面中点环形应变沿周长的变化,可以看出,应变分布十分均匀(最大偏差仅为 0.6%),因此,在不考虑偏心荷载情况下,仅需布设一个 FBG 应变光栅对测量单元环向应变进行测量。这里需要指出,由于给传感器施加荷载的螺母为六角形,并非理想的轴对称结构,这是测量单元外侧环向应变沿周长方向出现微小波动的主要原因。



(a) 传感器竖向剖面Mises应力

(b) 测量单元水平环向应变



(c) 测量单元外表面中点环向应变沿周长变化

图 8 传感器应力与变形特点

Fig. 8 Stress and deformation characteristics of sensor

4.2　智能垫圈与结构/螺母之间摩擦对测量结果影响

传统基于横向变形的压力垫圈传感器存在一个重要技术短板，即传感器测量结果受到其与螺母/结构之间的摩擦因数影响。为了检验提出的新型压力垫圈传感器是否依然受到上述摩擦因素影响，在数值模拟中传感器与螺母/结构之间摩擦因数μ_2分别选取了 3 种工况（μ_2 =0.05，0.1，0.15）。图 9 给出了在上述 3 种工况下，测量单元外侧环向应变与荷载变化关系。可以看出，在不同摩擦因数μ_2条件下，环向应变与荷载关系曲线完全重合，说明传感器测量结果与螺母或结构接触面摩擦无关。这一特性使得传感器在实际应用中无需进行复杂的现场标定，大幅提高了传感器实用性。

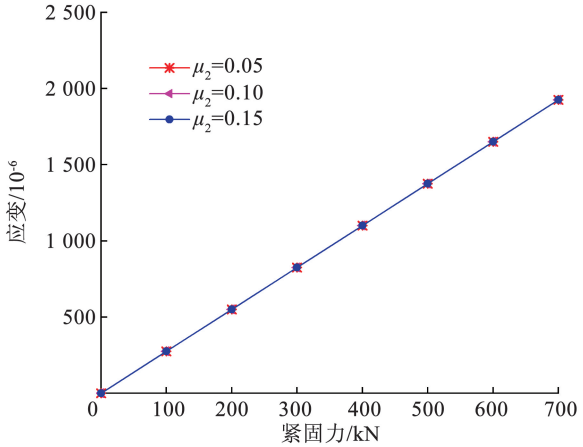


图 9　不同摩擦因数μ_2下测量单元环向应变 – 紧固力关系

Fig. 9　Relationship between circumferential strain of measuring unit and tightening force under different friction coefficients μ_2

4.3　智能垫圈偏心受荷分析

在实际应用中，传感器与螺母/结构间接触面不平整，导致压力垫圈传感器往往承受偏心荷载。为了评估偏心受荷对传感器测量精度影响，研究了不同偏心程度加载条件下的应变分布变化。首先，在测量单元外侧圆周上等间距设置 40 个应变测点，测点编号为 1 ~ 40。其次，使 700 kN 载荷中心沿 11 号测点径向方向分别产生 0.4、0.7、1.0 mm 的偏心位移，如图 10 所示。图 11 给出了在无荷载偏心和有不同程度荷载偏心的情况下，测量单元外侧 40 个测点应变分布情况。可以看出，随着偏心位移增加，测量单元环向应变沿周长波动明显增大。当偏心 1 mm时，测量应变偏离均值最大可达 3.15%。因此，偏心荷载情况下，无法仅使用 1 个 FBG 应变计来反映测量单元环向应变整体情况。为了解决这一问题，提出在测量单元对称位置布设两个 FBG 应变计，采用两个应变平均值代表测量单元实际环向应变的大小。图 12 给出了对称平均后应变沿圆周分布结果，可见对称平均后应变波动大幅下降，最大的偏离平均值仅为 0.88%，且与荷载无偏心时幅度大致相同。上述结果表明，在传感器测量单元外侧任意选择两个对称位置设置应变测点，无论荷载偏心方向与两个应变测点连线方向成何种角度，两个应变取平均值后都可以有效降低荷载偏心引起的应变波动，大幅提升传感器在偏心荷载下的螺栓紧固力测量精度。

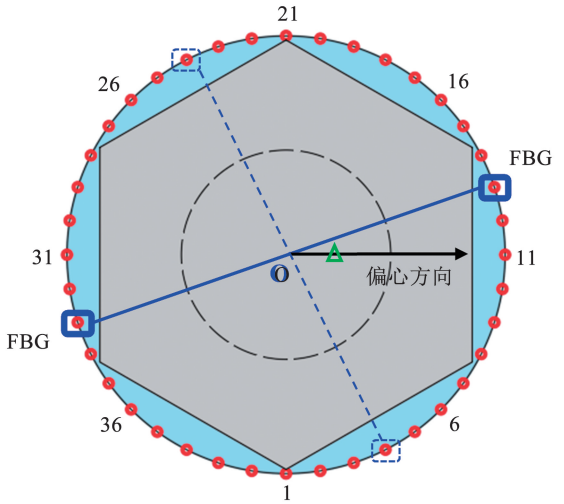


图 10　FBG 安装测点位置编号与偏心方向

Fig. 10　Location numbers of FBG installation measuring points and eccentricity direction

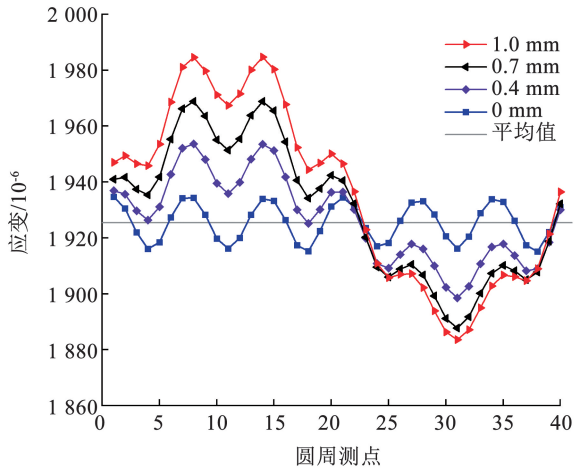


图 11　偏心受力下环向应变分布

Fig. 11　Circumferential strain distribution under eccentric loading

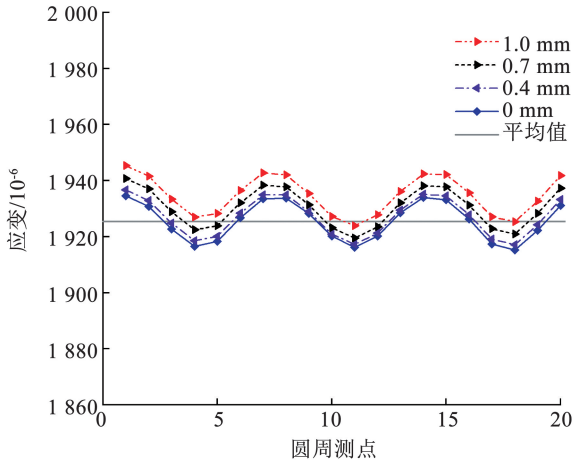


图 12　对称位置平均后环向应变分布

Fig. 12　Circumferential strain distribution after averaging at symmetrical positions

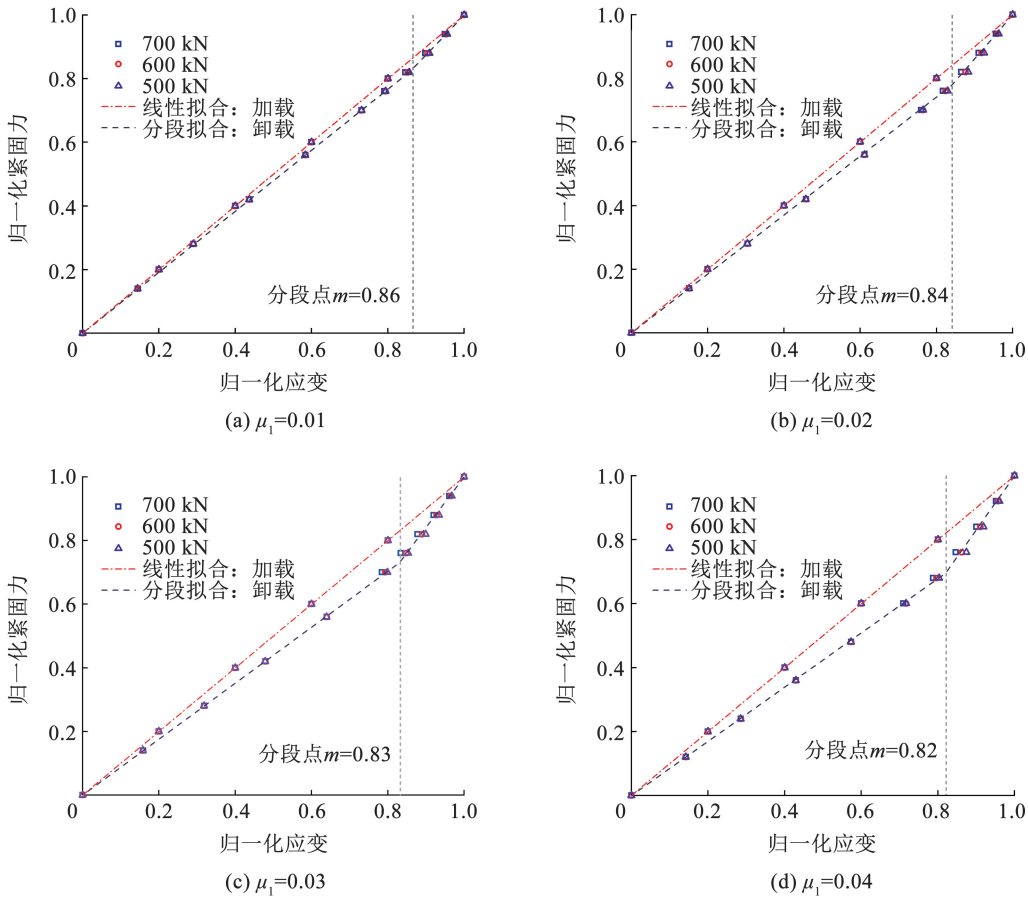
4.4 分段加卸载测量模型验证

为了验证第 3 节中提出的传感器分段加卸载全过程测量模型的有效性，通过有限元模拟了 3 组峰值荷载分别为 500、600、700 kN 的传感器加卸载全过程。再将 3 组荷载与传感器应变数据按照各自的峰值数据进行归一化处理，绘制在同一坐标系内（图 13(a)），利用最小二乘回归分析方法得到传感器分段加卸载测量模型参数 m。

采用决定系数 R^2 评估回归模型拟合优度，其表达式为

$$R^2 = 1 - \frac{S_{\text{res}}}{S_{\text{tot}}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \tag{7}$$

式中：S_{res} 为残差平方和，S_{tot} 为总平方和，n 为样本容量（$n=48$），y_i 为第 i 个归一化应变真实值，$\hat{y}_i$ 为第 i 个归一化应变拟合值，$\bar{y}$ 为归一化应变真实值的平均值。



(a) μ_1=0.01　(b) μ_1=0.02　(c) μ_1=0.03　(d) μ_1=0.04

图 13　不同摩擦因数μ_1下应变－紧固力归一化曲线

Fig. 13　Normalization curves of strain and tightening force under different friction coefficients μ_1

表 1 给出了上述分段加卸载测量模型的决定系数、最大绝对误差和平均绝对误差值。可以看出，分段加卸载测量模型可以很准确地预测传感器所受荷载：模型拟合优度决定系数 R^2 为 0.999，模型最大绝对误差和平均绝对误差分别为 4.32、1.16 kN，分别占峰值紧固力（700 kN）的 0.62% 和 0.16%。

此外，为了验证在不同接触摩擦因数μ_1条件下，分段加卸载测量模型的适用性，将有限元模型中测量单元与传力单元之间接触摩擦因数μ_1分别增加到 0.02、0.03 和 0.04。重复前述分析步骤，获得在不同摩擦因数μ_1条件下的分段加卸载测量模型。图 13(b)～(d)给出了在这 3 种摩擦因数条件下，归一化后的传感器荷载与测量应变之间的关系。可以看出，随着摩擦因数μ_1的增加，传感器在加载和卸载过程的差异大幅增加。

表 1　不同摩擦因数μ_1下分段模型拟合优度

Tab. 1　Goodness-of-fit of segmented model under different friction coefficients μ_1

摩擦因数μ_1	决定系数 R^2	最大绝对误差/kN	平均绝对误差/kN
0.01	0.999	4.32	1.16
0.02	0.999	7.85	2.12
0.03	0.998	12.72	3.25
0.04	0.997	16.64	3.79

表 1 给出了 3 种摩擦因数工况下，分段加卸载测量模型的决定系数、最大绝对误差和平均绝对误差值。可以看出，即使测量单元与传力单元间接触面摩擦因数大幅增加，分段加卸载测量模型仍然可准确地对传感器所受荷载进行预测，验证了模型的广泛适用性。

5　智能垫圈实验验证

5.1　实验装置

为了验证提出的基于新型增敏结构的高强螺栓紧固力监测智能垫圈传感器的有效性，研发了一个量程 700 kN 的传感器样品，如图 14。为了检验传感器样品测量精度，搭建了一套如图 15 所示的实验装置。该装置包括一根螺杆、两个 M45 螺母、两个挡板、智能垫圈传感器、环形压力传感器和液压螺栓拉伸器。实验过程中，智能垫圈安装在一侧的螺母和挡板之间，在另一侧利用液压螺栓拉伸器拉伸螺杆，产生紧固力传递到智能垫圈传感器，并通过中间的环形压力传感器实时记录施加的螺栓紧固力。在智能垫圈的中间测量单元外侧关于传感器中心对称的位置粘贴了两个应变光栅。为了消除环境温度变化对应变光栅测量结果的影响，在传感器内部增设了一个温度补偿光栅。传感器测量单元中应变测量光栅通过跳线接入光纤解调仪，实时读取传感器内应变测量光栅的波长偏移，并利用传感器内部的温度补偿光栅对环境温度进行补偿，进而根据测量模型计算得到传感器所受荷载。

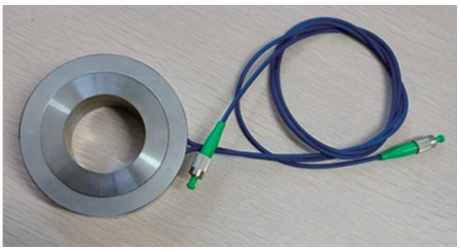


图 14　700 kN 智能垫圈传感器样品

Fig. 14　Sample of 700 kN smart washer sensor

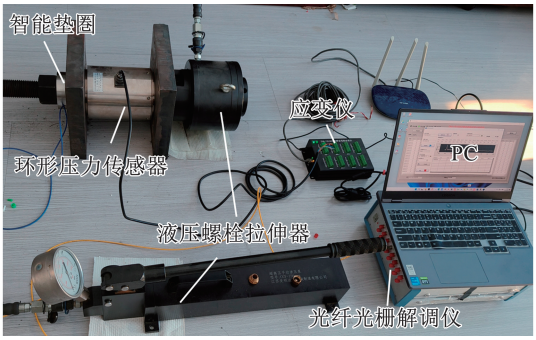


图 15　实验设备与装置

Fig. 15　Experimental equipment and setup

5.2　实验过程

手动控制螺栓拉伸器进行加载，每级 100 kN，逐级加载至 700 kN。为了避免荷载滞后和螺杆的回弹变形导致的螺栓紧固力不稳定，每级加载后持荷 40 s 左右，然后逐级卸载至 0 kN。在相同的环境温度和实验条件下重复 3 次加卸载过程，保证实验数据的可靠性和准确性。图 16 展示了传感器 3 次循环加卸载条件下两组应变测量光栅的实时波长响应平均值。可以看出，在 3 次加卸载情况下，传感器响应具有良好的重复性，且在持荷阶段，应变光栅波长信号保持稳定。另外，从图 16 可以观察到，受传感器测量单元和传力单元接触面间摩擦力的影响，传感器加卸载过程的响应并非完全对称，卸载时光栅波长偏移略大于加载的值，因此，仅考虑单一过程建立的模型会存在误差。

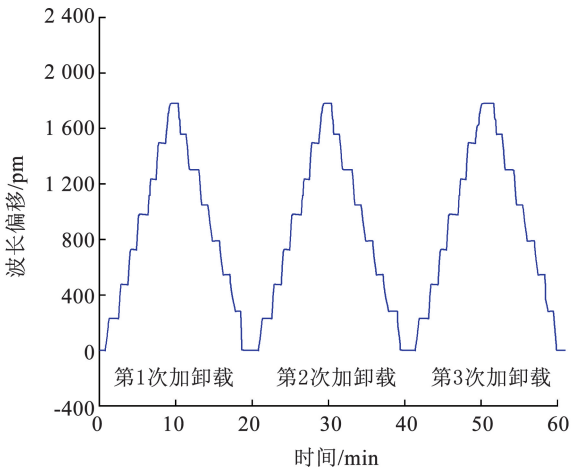


图 16　波长实时响应

Fig. 16　Real-time response of wavelength

为进一步提高传感器的测量精度，将采用第 3 节中式(6)给出的分段加卸载测量模型进行螺栓紧固力估计。图 17 展示了螺栓紧固力与光栅波长偏移平均值之间的关系及线性拟合结果。

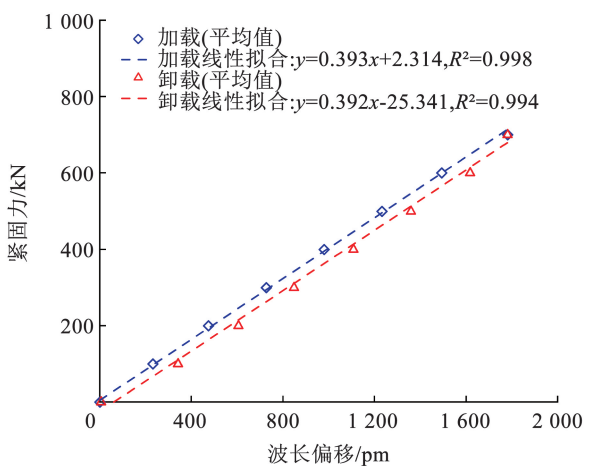


图 17　波长偏移 – 紧固力关系

Fig. 17　Relationship between wavelength shift and tightening force

由图 17 可以看出,应变测量光栅的波长偏移随着螺栓紧固力的变化而改变,二者呈现良好的线性关系,传感器在加载和卸载阶段的灵敏度分别为 2.54、2.55 pm/kN;同时,加载和卸载阶段的线性拟合结果之间存在一定的差异,在相同的螺栓紧固力作用下,卸载阶段的波长偏移略大于加载阶段的偏移量,这一结果与理论分析和数值模拟的结论一致。

5.3 分段加卸载模型验证

为验证建立的传感器测量模型的准确性,设置环形压力传感器的应变仪和光纤解调仪相同的采样频率(1 Hz),通过液压螺栓拉伸器分别加载至 500、600、700 kN 后再完全卸载,获取加卸载过程中光栅波长偏移和螺栓紧固力。不同螺栓紧固力下光栅波长偏移与紧固力归一化结果如图 18 所示。可以明显看出,3 次加卸载实验归一化结果分布基本一致。在加载过程中,紧固力与波长偏移之间几乎完全线性,而卸载阶段二者具有分段特征。该现象与有限元模拟的结果相符,应是加载到卸载过程中传力单元与测量单元接触面摩擦力变向以及摩擦状态的改变造成的。通过对实验数据进行拟合,最终得到分段加卸载测量模型。该模型的拟合优度 $R^2>0.99$,最大绝对误差为 8.27 kN,平均绝对误差约为 3 kN,仅占满量程的 0.43%,具有良好的测量精度,可以有效地对高强螺栓紧固力进行实时监测。

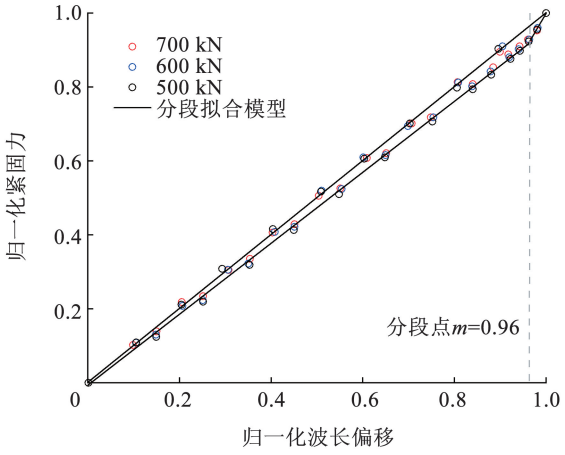


图 18 波长偏移与紧固力归一化结果

Fig. 18 Normalization results of wavelength shift and tightening force

上述实验结果说明本研究设计的高强螺栓紧固力监测智能垫圈传感器具有高灵敏度、高精度和大量程的优势,可以实现对螺栓紧固力很好的监测效果。

6 结 论

1)智能垫圈采用了一种独创的新型增敏结构,由 3 层环形结构叠合构成,通过上/下传力单元与中间测量单元间的环形倾斜接触面,将螺栓轴向荷载转换为测量单元环向变形,大幅提升了智能垫圈的测量灵敏度和精度;通过智能垫圈力学分析,揭示了智能垫圈灵敏度增敏机理和规律,即减小测量单元环向刚度、增加接触面倾角或降低内部摩擦因数,可显著提升测量灵敏度。

2)针对传力单元与测量单元之间摩擦力引起的智能垫圈加卸载过程测量结果不一致的问题,提出了智能垫圈加卸载全过程分段测量模型,进一步显著提升了智能垫圈加卸载全过程的螺栓紧固力测量精度。

3)有限元模拟研究验证了智能垫圈测量精度不受其与外部接触面摩擦状态以及螺栓荷载偏心影响的特性。

4)设计并制作一个量程为 700 kN 智能垫圈传感器样品,实验结果表明,智能垫圈加卸载全过程平均测量误差仅为 3 kN(<0.5% F. S.),可以准确监测高强螺栓紧固力变化。

参考文献

[1]姚志东, 陈志华, 刘红波, 等. 钢结构工程高强度螺栓微小松动视觉检测方法研究[J]. 中国公路学报, 2024, 37(2): 126
Yao Zhidong, Chen Zhihua, Liu Hongbo, et al. Visual detection method of small loosening of high-strength bolts in steel structure engineering[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(2): 126. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.02.011

[2]Gao Daiyang, Yao Weixing, Wu Tao. Failure analysis on the axial-connected bolts of the thin-walled cylinder under random vibration loading[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 105: 756. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.06.043

[3]Kodur V, Kand S, Khaliq W. Effect of temperature on thermal and mechanical properties of steel bolts[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(6): 765. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000445

[4]周勇军, 贾利强, 杨帆, 等. 考虑主缆镀锌层蠕变的索夹螺栓紧固力损失预测[J]. 中国公路学报, 2024, 37(7): 158
Zhou Yongjun, Jia Liqiang, Yang Fan, et al. Research on preload loss prediction of clamp bolt considering cable creep of galvanized layer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(7): 158. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.07.013

[5]王建国, 赵亚军, 康琳琦. 影响扭矩扳手准确性的因素分析[J]. 科技创新与应用, 2020(24): 66
Wang Jianguo, Zhao Yajun, Kang Linqi. Analysis of factors affecting the accuracy of torque wrenches[J]. Technology Innovation and Application, 2020(24): 66

[6]Wang Zifu, Zhang Zhijing, Cui Can. Measurement and control method for miniature fastener tension in precision instrument[J]. Procedia CIRP, 2018, 76: 111. DOI: 10.1016/j.procir.2018.01.018

[7]师琪，任亮，尤润州，等. 基于光纤光栅传感器的智能螺栓开发及应用[J]. 仪表技术与传感器，2020(12)：11
Shi Qi，Ren Liang，You Runzhou，et al. Development and application of smart bolt based on FBG sensors[J]. Instrument Technique and Sensor，2020(12)：11. DOI：10.3969/j.issn.1002－1841.2020.12.003

[8]赵强，曹佳丽，陈柳，等. 水泵水轮机顶盖螺栓应力实测分析[J]. 水力发电学报，2023，42(9)：81
Zhao Qiang，Cao Jiali，Chen Liu，et al. Measured stress analysis of water pump turbine head cover bolts[J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2023，42(9)：81. DOI：10.11660/slfdxb.20230908

[9]Chaki S，Bourse G. Guided ultrasonic waves for non-destructive monitoring of the stress levels in prestressed steel strands[J]. Ultrasonics，2009，49(2)：163. DOI:10.1016/j.ultras.2008.07.009

[10]伊建军，彭旭民，王波，等. 悬索桥索夹螺杆轴力超声检测技术[J]. 桥梁建设，2019，49(增刊1)：69
Yi Jianjun，Peng Xumin，Wang Bo，et al. Ultrasonic inspection technique for axial forces of bolts in cable clamps of suspension bridge[J]. Bridge Construction，2019，49(S1)：69

[11]蔡依花，陶思雨，郑晓东，等. 超声纵波法测量索夹螺杆轴力的误差分析[J]. 公路，2023，68(1)：142
Cai Yihua，Tao Siyu，Zheng Xiaodong，et al. Error analysis of ultrasonic longitudinal wave method for measuring the axial force of cable clamp bolt[J]. Highway，2023，68(1)：142

[12]Chen Dongdong，Huo Linsheng，Fu Ruili，et al. Multi-resolution bolt preload monitoring based on the acoustoelastic effect of ultrasonic guided waves[J]. Smart Structures and Systems，An International Journal，2022，30(5)：514. DOI：10.12989/sss.2022.30.5.513

[13]Lu Ping，Lalam N，Badar M，et al. Distributed optical fiber sensing：review and perspective[J]. Applied Physics Reviews，2019，6(4)：041302. DOI：10.1063/1.5113955

[14]廖光萌，何建新，朱玉琴，等. 光纤光栅传感器及其应用[J]. 装备环境工程，2022，19(11)：142
Liao Guangyin，He Jianxin，Zhu Yuqin，et al. Fiber grating sensor and application[J]. Equipment Environmental Engineering，2022，19(11)：142. DOI：10.7643/issn.1672－9242.2022.11.019

[15]郭永兴，李志雄. 增敏型光纤布拉格光栅锚索测力传感器[J]. 激光与光电子学进展，2023，60(5)：79
Guo Yongxing，Li Zhixiong. Sensitized fiber Bragg grating anchor cable force sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2023，60(5)：79. DOI：10.3788/LOP213245

[16]Li Xingxin，Ren Weixin，Bi Kaiming. FBG force-testing ring for bridge cable force monitoring and temperature compensation[J]. Sensors and Actuators A：Physical，2015，223：107. DOI：10.1016/j.sna.2015.01.003

[17]朱觉文，王长海，梁才，等. 基于光纤光栅的抗偏载压力环传感研究及其工程应用[J]. 传感技术学报，2024，37(10)：1702
Zhu Juewen，Wang Changhai，Liang Cai，et al. Research and engineering application of anti-bias load pressure ring sensing based on fiber bragg grating[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators，2024，37(10)：1702. DOI：10.3969/j.issn.1004－1699.2024.10.006

[18]Chen Dongdong，Huo Linsheng，Li Hongnan，et al. A fiber bragg grating (FBG)-enabled smart washer for bolt pre-load measurement：design，analysis，calibration，and experimental validation[J]. Sensors，2018，18(8)：2586. DOI：10.3390/s18082586

[19]Yeager M，Whitaker A，Todd M. A method for monitoring bolt torque in a composite connection using an embedded fiber Bragg grating sensor[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures，2018，29(3)：338. DOI：10.1177/1045389X17705217

（**编辑**　刘　彤）

封面图片说明

封面图片来自本期论文“一种基于新型增敏结构的高强螺栓紧固力监测智能垫圈”，是增敏型智能垫圈安装于高强螺栓连接中的结构形式及紧固力感知原理示意图。从结构上看，智能垫圈由竖向叠合的三层同心环形结构单元构成，三层单元之间通过向内倾斜的环形接触面实现荷载传递；从增敏机理看，高强螺栓产生的轴向紧固力经倾斜接触面传递后形成水平径向分力，将传统的轴向压缩变形转化为中间单元的水平环向膨胀变形，从而实现对螺栓紧固力的结构增敏；在信号感知方面，布置于中间单元外侧的光纤光栅(FBG)通过测量环向应变引起的波长偏移，实现高强螺栓紧固力的监测。在保持小型化的同时，智能垫圈的结构形式可显著提高测量灵敏度，并降低外部接触面摩擦及偏心荷载对测量结果的影响；结合加卸载全过程分段测量模型，实现高强螺栓紧固力的高精度监测。

（图文提供：韩坤，张东昱，李惠，倪莉。哈尔滨工业大学土木工程学院）