

# 高强度螺纹联接防松用传感器功能化

## 弹性垫圈的研究

白科研, 沈小燕, 李东升

(中国计量大学 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 针对建筑物或塔类结构用高强度螺纹联接松动或失效的故障诊断问题, 设计了一种可动态监测螺纹联接预紧力的传感器功能化弹性垫圈。首先, 对传感器功能化弹性垫圈进行工作原理的分析和结构设计。其次, 通过 ANSYS Workbench Static Structural 仿真软件验证了所设计鞍形弹性垫圈凹处的变形量最大, 并计算出该部位能承受的最大微应变为  $1.875 \times 10^{-2}$ , 低于电阻应变片式传感器的最大微应变  $2 \times 10^{-2}$ , 证明在该部位可集成电阻应变片式传感器。最后, 加工了鞍形弹性垫圈并粘贴电阻应变片式传感器, 对该传感器功能化弹性垫圈进行 0~240 000 N 预紧力的加、卸载试验, 试验所得预紧力-输出电压曲线呈线性关系, 计算得到输出电压的最大回程误差为 6.0%。试验结果验证了将所设计的传感器功能化弹性垫圈用于设备塔或建筑物螺栓防松现场监测的合理性和可行性, 具有较广阔的工程应用前景。

**关键词:** 螺纹联接;预紧力;传感器功能化弹性垫圈;螺纹防松

## Study on sensor functional elastic washer for anti-loosening of high strength thread connection

Bai Keyan , Shen Xiaoyan, Li Dongsheng

(College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China )

**Abstract :** Aiming at the fault diagnosis of looseness or failure of high-strength threaded connection for buildings or towers, a sensor functional elastic washer elastic washer which can dynamically monitor the preload of threaded connection was designed. Firstly, the working principle analysis and structural design of the sensor functional elastic washer were carried out. Secondly, through the ANSYS Workbench Static Structural simulation software, it is verified that the deformation of the concave part of the designed saddle elastic washer is the largest, and the maximum micro strain that this part can bear is  $18750 \mu\epsilon$ , less than the maximum micro strain of  $20\ 000 \mu\epsilon$  of resistance strain gauge sensor. It is proved that resistance strain gauge sensor can be

integrated in this part. Finally, the saddle elastic washer was processed and the resistance strain gauge sensors were pasted, and the loading and unloading test of 0 ~ 240 000 N preload were carried out. The preload-output voltage curve obtained from the experiment is linear, and the maximum return error calculated is 6.0 %. The experiment results verify the rationality and feasibility of using the designed sensor functional elastic washer for on-site monitoring of bolt looseness prevention of equipment tower or building, and has a broad engineering application prospect.

**Keywords:** treaded connection; peload; sensor functional eastic washer; tread locking

## 1 传感器设计背景与应用价值

### (1) 设计背景

螺纹联接运用于各行各业,其中机械制造行业中螺纹联接大约占有所有联接方式的68%<sup>[1]</sup>。螺纹联接在使用时为防止其松动,通常采用增加防松垫圈的方式。现有的防松垫圈仅具有防松功能,而不具备集成功能<sup>[2]</sup>。一旦防松垫圈失效,因其导致的重大事故的破坏程度将无法预估。

针对目前检测螺纹联接松动没有普适性测量方法的现状,本文设计出一种传感器功能化弹性垫圈,可动态监测螺纹联接的预紧力,并且根据不同的螺栓规格,可设计出尺寸相匹配的传感器功能化弹性垫圈。

### (2) 应用价值

本文所设计的传感器功能化弹性垫圈可满足实际应用需求,为监测螺纹联接松动、失效问题开辟了一种工程化应用的新途径,具有十分广泛的应用前景。

## 2 创新点与优势

(1) 将电阻应变片式传感器粘贴在所设计的马鞍状鞍形弹性垫圈上,可获得螺纹联接预紧力的动态数据,后续可与微型集成电路、无线通信模块等相结合,达到实时监测预紧力、及时报警维修的目的,形成一种集防松、传感功能于一体的传感器功能化弹性垫圈。

(2) 鞍形弹性垫圈结构简单,易于加工,电阻应变片式传感器具有灵敏系数高、电阻率高、稳定性好、抗氧化和耐腐蚀的优点,且相比于其他传感器,价格适中,因此,本文所设计的传感器功能化弹性垫圈具有较好的普适性。

## 3 实现方案简介

### 3.1 设计原理

将电阻应变片式传感器粘贴于鞍形弹性垫圈，依据螺纹联接松动时，轴向预紧力减小使鞍形弹性垫圈发生变形，致使电阻应变片式传感器感应到弹性垫圈的形变，再通过集成在弹性垫圈上的微型信号放大电路和无线通信模块把螺纹联接松动的信号远程传输到接收端，即可实现螺纹联接松动信号的报警，达到实时监测螺纹联接轴向预紧力的目的，以便及时维修，减少或避免严重事故带来的损失。

### 3.2 设计方法

#### 3.2.1 弹性垫圈结构设计

现有防松用弹性垫圈主要以鞍形弹性垫圈、球形弹性垫圈及蝶形弹性垫圈为主<sup>[2]</sup>。本文考虑到鞍形弹性垫圈具有易发生形变，结构易集成应变技术的特点，自主设计出一种鞍形弹性垫圈，不但保留了其防松功能，而且在其结构上设计出了电阻应变片式传感器所粘贴的位置、引线槽以及用于安装微型集成放大电路及无线通信模块的凹槽，图1所示即为本文所设计的马鞍形弹性垫圈三维结构示意图。

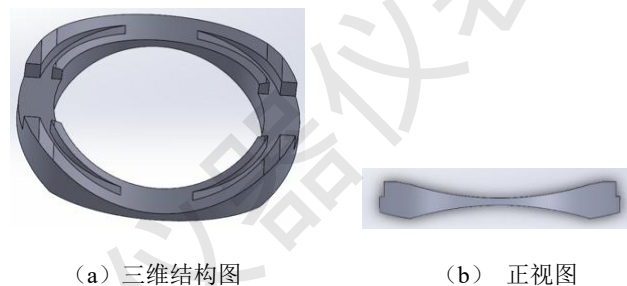
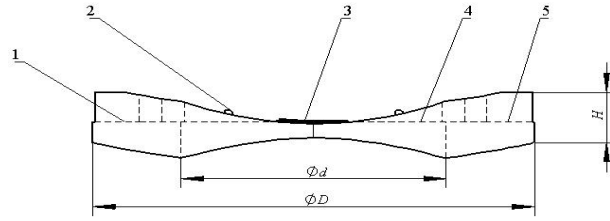
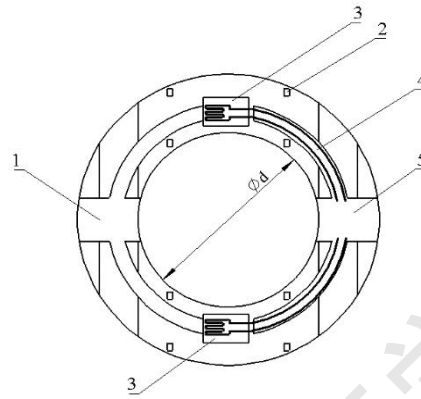


图1 马鞍形弹性垫圈三维结构示意图

图2所示为本文鞍形弹性垫圈二维结构图样，图中 $d$ 为垫圈的内径， $D$ 为垫圈的外径， $H$ 为垫圈的厚度。电阻应变片式传感器粘贴在鞍形弹性垫圈的最凹处，传感器引出线经引线槽连接到两侧凹槽处的微型信号放大电路和无线通信模块。当弹性垫圈形变过大时，鞍形弹性垫圈上镶嵌的小支撑件用来保护电阻应变片式传感器不受破坏。本文所设计的鞍形弹性垫圈及其上开设的凹槽和引线槽加工精度要求不高，与现有检测螺纹联接预紧力的垫圈结构相比，本文所设计弹性垫圈的结构更加简单，容易加工，且方便电阻应变片式传感器的粘贴。



(a) 正视图



(b) 俯视图

1、5.凹槽 2.支撑件 3.电阻应变片式传感器 4.引线槽

图2 鞍形弹性垫圈二维结构图样

### 3.2.2 弹性垫圈结构设计合理性验证

为验证本文所设计弹性垫圈结构的合理性，采用 ANSYS Workbench Static Structural 仿真软件进行验证。考虑到后续加工实物及试验需求，根据机械设计基础手册中鞍形弹性垫圈的设计原则<sup>[3]</sup>，本文选取的鞍形弹性垫圈的外径  $D=75\text{ mm}$ ，内径  $d=50\text{ mm}$ ，厚度  $H=10.5\text{ mm}$ 。所选弹性垫圈规格可与 M48 的高强度螺栓进行装配。

根据预紧力计算公式<sup>[4]</sup>：

$$F = (0.5 \sim 0.6) \sigma S \quad (1)$$

式中：F 为预紧力； $\sigma$  为材料的屈服强度；S 为螺栓截面面积。

螺栓直径  $a=48\text{ mm}$ ，螺栓截面面积  $S=1.81 \times 10^{-3}\text{ m}^2$ ，材料为 65Mn 弹簧钢，材料的弹性模量  $E=200\text{ Gpa}$ ，泊松比  $\nu=0.26$ ，材料的屈服强度  $\sigma=235\text{ Mpa}$ 。

根据式 (1) 计算得出本文所研究螺栓的预紧力为  $212\ 675\text{ N} \sim 255\ 000\text{ N}$ ，通常使用时其轴向预紧力应不超过  $260\ 000\text{ N}$ 。对所设计鞍形弹性垫圈进行边界条件设置，划分网格，求解后处理得到弹性垫圈受力仿真分析结果，如图 3 所示。

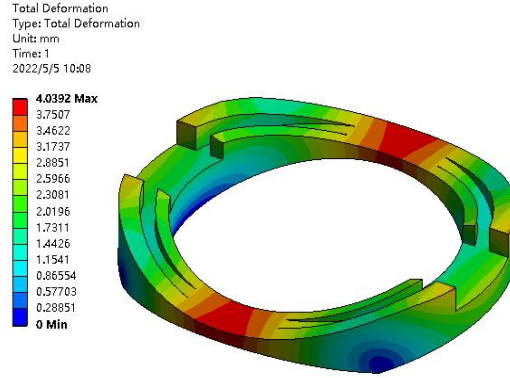


图3 弹性垫圈受力仿真分析结果

对鞍形弹性垫圈施加轴向预紧力，鞍形弹性垫圈受力发生变形，弹性垫圈凹处产生的变形量最大。由图3所示受力仿真分析可知，鞍形弹性垫圈凹处的最大变形量约为0.15 mm，鞍形弹性垫圈凹处的长度约为8 mm，根据应变计算公式<sup>[5]</sup>：

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

式中： $\varepsilon$ 为应变； $\Delta L$ 为变形量； $L$ 为鞍形垫圈凹处长度。

根据式(1)计算得出鞍形弹性垫圈凹处能承受的最大微应变为 $18\ 750\ \mu\varepsilon$ ，又得知电阻应变片式传感器最大能感应的微应变为 $2 \times 10^2$ <sup>[6]</sup>，由此验证了本文将电阻应变片式传感器粘贴在鞍形弹性垫圈最凹处是可行的。并且由弹性垫圈的受力仿真分析结果可知随着预紧力的增大，垫圈产生的形变也逐渐增大<sup>[14]</sup>。

### 3.2.3 预紧力-输出电压关系分析

为提高电阻应变片式传感器测量的灵敏度，并对温度进行补偿，本文采用4个电阻应变片式传感器组成四臂差动电桥，电桥输出的电压<sup>[7]</sup>为：

$$U_0 = U \frac{\Delta R}{R} = Uk\varepsilon = Uk \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

式中： $U_0$ 为电桥电路输出电压； $U$ 为电路电源电压； $R$ 为电阻应变片电阻值； $\Delta R$ 为电阻应变片电阻变化值； $k$ 为应变式传感器的灵敏度，一般取 $k=2$ 。

由本文第1.2节仿真分析可知，随着螺纹联接轴向预紧力的增大，弹性垫圈的变形量 $\Delta L$ 也随之增大。由式(3)中可知， $U$ 、 $k$ 、 $L$ 为恒定不变量，输出电压 $U_0$ 也随着预紧力的增大而增大，故螺纹联接的轴向预紧力与输出电压呈线性关系。

### 3.2.4 测控系统分析

当粘贴在弹性垫圈凹处的电阻应变片式传感器感应到因预紧力变化而导致弹性垫圈的形变时，电阻应变片式传感器的电阻值发生变化。该电阻值信号经引线传输至凹槽处的微型

集成电路进行放大、滤波等处理，再经无线通信模块，将形变信号进行远程传输至接收端，接收端对接收到的信号进行处理，可自行根据实际情况设定报警阈值，进一步决定是否检查维修，从而实现了传感器功能化弹性垫圈防松、预紧力动态监测功能的一体化。

#### 4.1 实验验证过程

对弹性垫圈采用钎焊和线切割的加工方式进行加工，所加工鞍形弹性垫圈实物照片如图 4 所示。



图 4 鞍形弹性垫圈实物照片

将 4 个电阻应变片式传感器粘贴在鞍形弹性垫圈的凹处，依次对其进行固化、接线、温漂检测以及零漂检测等操作，检测合格后的传感器功能化弹性垫圈实物照片如图 5 所示。



图 5 传感器功能化弹性垫圈实物照片

图 6 所示为本文传感器功能化弹性垫圈试验装置，主要采用液压试验机和 CLY-2008 型力机精密控制仪对传感器功能化弹性垫圈进行试验。

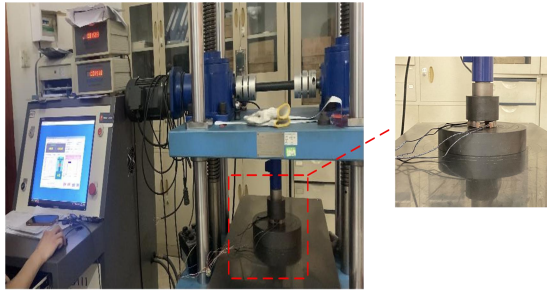


图6 传感器功能化弹性垫圈试验装置

试验时依次增加、减小数控表上的预紧力数值，驱动液压试验机对鞍形弹性垫圈在轴向进行预紧力的加载和卸载。电阻应变片式传感器的引出线与 CLY-2008 型力机精密控制仪连接，由 CLY-2008 型力机精密控制仪读出电阻应变片式传感器组成全桥电路输出电压的试验值，由此得到预紧力-输出电压的试验数据如表 1 所示。

表1 预紧力-输出电压的试验数据

预紧力 $F/\text{kN}$	加载试验输出电压值	卸载试验输出电压值
	$U_0/\text{V}$	$U_0/\text{V}$
1	0.802 5	0.744 3
5	3.88 9	3.669 5
10	7.897 6	7.665 6
30	23.266 7	21.366 4
50	41.490 4	39.481 2
80	65.436 6	63.557 8
100	81.879 5	79.989 3
130	106.539 4	104.434 9
150	126.673 4	123.643 4
180	148.786 9	146.648 3
200	164.489 4	162.476 5
220	180.125 9	178.258 7
240	192.478 7	190.478 7

由本文预紧力-输出电压关系分析可知，螺纹联接预紧力与输出电压呈线性关系，可采用最小二乘法对表 1 所示试验数据进行拟合，绘制出电阻应变片式传感器输出电压-预紧力关系曲线，如图 7 所示。

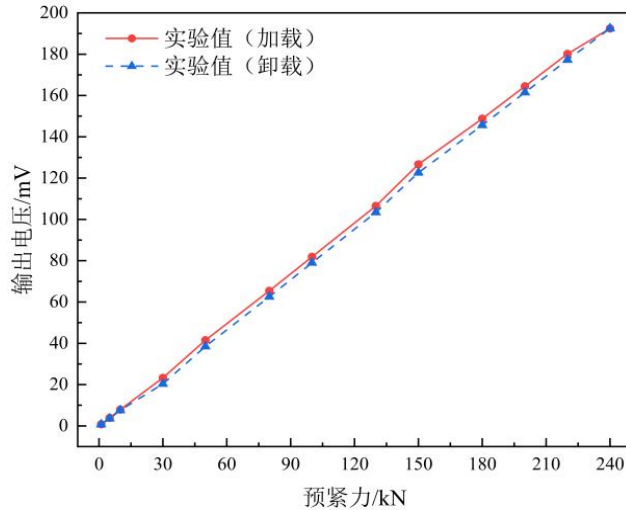


图7 电阻应变片式传感器输出电压-预紧力关系曲线

从图7中可以看出，试验测得的输出电压曲线的开始部分增长较快，中间部分基本呈线性增长，末端部分略微趋于平缓，这主要是由于液压试验机在开始加载时属于加速状态，结束阶段近乎达到鞍形弹性垫圈的屈服极限；试验卸载曲线略低于试验加载曲线，两者都近乎线性且重合度非常高，验证了本文第3.2.3节理论分析所得出的输出电压与预紧力呈线性关系的正确性。

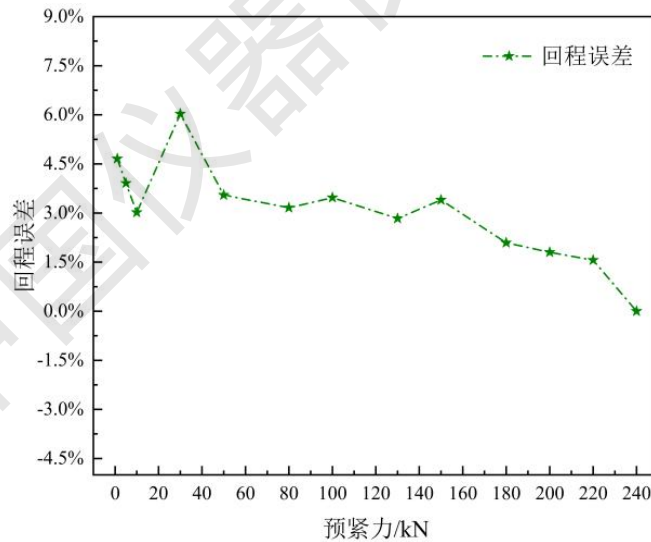


图8 预紧力与回程误差关系曲线

回程误差是判断曲线线性关系的重要指标之一，最大回程误差越小，代表所得关系曲线的线性程度越高。在图7所示预紧力区间内计算试验测得的输出电压的回程误差（即迟滞误差）[7]，绘制出预紧力与回程误差关系曲线，如图8所示。由图8可知，最大回程误差 $\gamma_H=6.0\%$ ，实际工程中可接受的最大回程误差为10%，证明了本文所设计传感器功能化弹性垫圈输出



电压的最大回程误差可以满足工程化应用的要求。

**参考文献:**

- [1] 宋莎.微小零件精密装配中的螺纹副联接技术研究[D].大连: 大连理工大学, 2009.
- [2] 陆健亮.螺纹拧紧力矩控制技术研究[D].杭州: 浙江大学, 2019.
- [3] 成大先, 机械设计手册[M].第六版.北京.化学工业出版社, 2016: 160-162.
- [4] 李扬, 张彬, 李星亮.一种检测螺栓预紧力的智能垫圈研究[J].航空精密制造技术, 2020: 59-61.
- [5] 张玉叶.基于应变全桥的铁质悬臂梁传感器的设计与实现[J].电子设计工程, 2018(16): 125-129.
- [6] 郭志君.弹性垫圈力学行为及设计方法研究 [D].南京: 南京工业大学, 2016.
- [7] 周真, 苑惠娟.传感器原理与应用[M].北京: 机械工业出版社, 2011.