

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.05.005

基于聚氨酯弹性体位移传感器的有限元分析及实验

祖洪飞, 李召兵, 彭来湖

(浙江理工大学 浙江省现代纺织装备技术重点实验室, 浙江 杭州 310018)

摘要:为揭示聚氨酯弹性体位移传感器固定端应变与运动端位移、扭转之间的关系,课题组基于橡胶类材料单轴拉伸实验得到的应力应变关系,通过数据拟合后确定最适合聚氨酯弹性体材料的 Ogden 本构模型及参数。用 ABAQUS 软件建立了聚氨酯弹性体位移传感器的非线性有限元模型,分析运动端位移和扭转情况下传感器的应力、应变和位移变化规律。研究表明:随着运动端位移和扭转的加载,固定端的应变随之增加,当位移达到 30 mm 时,最大应变出现在距离固定端 4 mm 处;当扭转达到 15° 时,最大切应变区域为整个弹性体发生扭转变形部分;此分布规律指导了传感器设计中应变片布置方案。将传感器仿真与测量实验数据对比,误差在 10% 以内,符合传感器要求。

关键词:聚氨酯弹性体位移传感器;有限元分析;Ogden 本构模型;ABAQUS 软件

中图分类号:TH145.4;TP212 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2021)05-0025-07

Finite Element Analysis and Experiment of Displacement Sensor Based on Polyurethane Elastomer

ZU Hongfei, LI Zhaobing, PENG Laihu

(Key Laboratory of Modern Textile Machinery & Technology of Zhejiang Province, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To reveal the relationship between the strain at the fixed end of the polyurethane elastomer displacement sensor and the position and torsion of the moving end, based on the stress-strain relationship obtained from the uniaxial tensile experiment of rubber materials, the most suitable Ogden constitutive model and material parameters were determined by data fitting. The non-linear finite element model of the polyurethane elastomer displacement sensor was established with ABAQUS software, and the stress, strain and displacement change laws of the sensor under the displacement and torsion of the moving end were analyzed. The study shows that the strain at the fixed end increases with the loading of displacement and torsion of the moving end. When the displacement reaches 30 mm, the maximum strain appears at a distance of 4 mm from the fixed end; when the torsion reaches 15°, the maximum shear strain area is in the entire elastic body deformation part. This distribution law guides the placement of the strain gauges in the sensor design. Comparing the sensor simulation with the experimental data, the error is within 10%, which meets the requirements of the sensor.

Keywords: polyurethane elastomer displacement sensor; FEA (Finite Element Analysis); Ogden constitutive model; ABAQUS software

近年来,越来越多的创新技术应用到位移传感器中,比如:光栅技术、磁栅技术、磁致伸缩技术、MTS 协调加载控制技术和光纤技术等^[1]。这些不同原理的

位移传感器被广泛应用于航空航天、半导体加工、机械手和生物医学等领域^[2]。

目前,国内外学者对位移传感器的研究取得了不

收稿日期:2021-05-10;修回日期:2021-07-23

基金项目:浙江省重点研发计划(2019C01038);浙江省自然科学基金资助项目(LQ20E050020);浙江理工大学科研启动基金项目(18022219-Y);浙江理工大学青年创新专项(20022119-Y);2020年度浙江省博士后科研择优资助项目(ZJ2020102)。

第一作者简介:祖洪飞(1985),男,山东临沂人,博士,副教授,主要从事压电传感器、机器人检测方面的研究。E-mail: 547501639@qq.com

少成果。Nie等^[3]通过将石墨烯网片粘贴在液晶聚合物基片上,并将其应用于机械振动学中。通过监测应变传感器中石墨烯网片的相对电阻变化,可以检测到结构微小位移引起的应变。Wang等^[4]根据电感线圈的磁耦合特性,设计了一种无线无源电路,推导了电阻应变传感器的电阻值与电路总输入阻抗相位的关系,从而实现非接触式的位移测量。Guo等^[5]采用直接油墨书写的多层复合结构高精度电阻应变传感器,可优化层平整度和界面强度。周宇等^[6]根据激光三角法原理设计了一种激光位移传感器用的收光镜头,实现了工作距离为100 mm,量程为 ± 25 mm的位移测量。张小蝶^[7]采用的是磁致伸缩效应和磁致伸缩逆效应均显著的铁磁材料作为敏感元件的位移传感器研究。慕雨松^[8]基于相位差滤波原理完成了对增量信号链路的设计和验证实现了ASIC光电芯片在高精度角位移传感器中的创新。上述位移传感器只能测量单一角位移或平面位移,那么可同时动态测量多自由度的位移传感器具有研究价值,尚江坤等^[9]通过多个压电陶瓷致动器和激光位移传感器组合设计了一种3自由度定位系统,实现了沿 X 轴和 Y 轴移动以及绕 Z 轴转动的位移测量。

多自由度位移传感器的测量原理主要有2类:一类是通过多个位移传感器组合实现多自由度位移测量,比如张佳炜^[10]分别对多个霍尔传感器及信号采集卡实现6自由度测量并进行实验验证,得出单自由度霍尔传感器在4 mm的量程内分辨力达到 $1 \mu\text{m}$,非线性度为1.23%;方国明等^[11]采用3个高精度的位移传感器获取待测目标平面3个不共线点的位移量,3个不共线点可以确定平面的法线,利用法线实现了平面的方位角、俯仰角以及轴向位移的测量。另一类是单个位移传感器实现多自由度位移测量,比如余建平^[12]提出了实现大量3自由度位移测量的电容式位移传感器设计方案,在线性位移4 mm内,保证了0.5%的线性度。Saito等^[13]采用光学方法实现了3自由度的角位移测量,使用衍射光栅代替平面镜作为目标反射镜,通过衍射光栅反射的3组不同衍射光波信号来完成3自由度角位移测量。在这些不同原理的多自由度位移传感器中,测量范围多是小量程的位移/扭转量,因此能实现大量程、高精度、低成本和多自由度测量的传感器具有研究价值。

课题组基于弹性体位移传感器原理,推导出传感器运动端 X, Y 和 Z 方向位移和绕 Z 轴扭转载荷与固定端 X, Y 和 Z 方向的正应变和切应变之间的关系矩

阵。在测试聚氨酯弹性体材料拉伸应力应变曲线的基础上,对比分析Mooney-Rivlin、Ogden、Yeoh和Neo-Hooke 4种常用弹性体本构模型,选择最适合聚氨酯弹性体变形行为的材料本构模型及参数。将最合适的本构模型及参数导入ABAQUS软件中,建立位移传感器非线性有限元模型,仿真分析了传感器位移和扭转实验,确定最大应变区域,为传感器中应变片粘贴位置及方式提供依据。

1 弹性体位移传感器

1.1 弹性体位移传感器原理

本研究提出的新型弹性体位移传感器具有精度高、量程大、多自由度测量、机构简单和成本低等特点。基于电阻应变式原理,传感器核心部件是一个能感知多维应力应变并具有低滞回、低蠕变、低阻尼和抗断裂特性的弹性元件。原理如图1所示:弹性感知元件的 A 端固定, B 端有位移、扭转和弯矩载荷。当 B 端受到载荷时,通过应变片或应变花测量出 A 端应变变化,确定应变感知元件与被驱动末端的空间位置和扭转角之间的数学模型。当弹性体传感器在空间运动时,通过测得的多个应变变量在预先建立的数学模型中转换成弹性体传感器运动端空间位置和扭转角度。 M_x, M_y 分别为 X, Y 方向的弯矩; T 为转矩; F_z 为 Z 方向的受力; $X/\beta, Y/\alpha$ 和 φ 为 X, Y 和 Z 方向的扭转角。

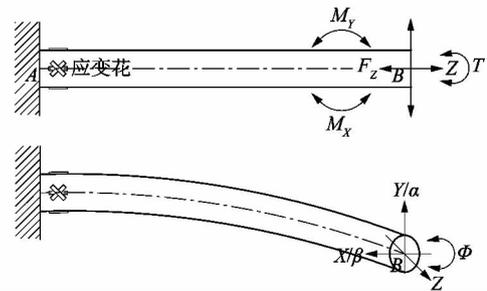


图1 位移传感器测量原理

Figure 1 Measuring principle of displacement sensor

1.2 弹性体位移传感器实验原理及数学模型

在弹性体位移传感器设计中,弹性体不易像悬臂梁模型一样施加载荷和约束,需要添加夹持部分,就需对弹性体传感器做出改良,如图2所示。在图中,两侧用法兰盘夹持圆柱弹性体位移传感器,左端固定,右端可向 X, Y 和 Z 轴方向平移和绕 Z 轴扭转,可用此弹性体传感器替代 X, Y 和 Z 方向上的3个位移传感器和绕 Z 轴的角位移传感器,实现4个自由度的测量。

定义 D 为弹性体的截面直径; L 为2法兰盘之间

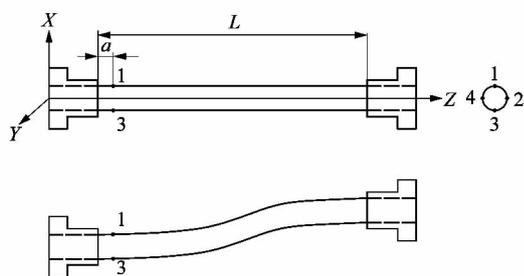


图2 弹性体位移传感器实验测量原理

Figure 2 Experimental measurement principle of elastomer displacement sensor

弹性体的长度; a 为距离固定端法兰盘的距离; x, y 和 z 为弹性体在 X, Y 和 Z 方向上的平移量; φ 为扭转角。推导出与固定端法兰盘距离为 a 的圆柱面上应变 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 和 γ 与右端 X, Y, Z 方向平移、绕 Z 轴扭转角之间的关系矩阵:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{L^3}{6D(L-2a)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{L^3}{6D(L-2a)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2L}{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.3 弹性体位移传感器实验

搭建弹性体位移传感器实验平台,如图3所示。在平台上进行位移传感器实验,将位移传感器一端固定在平台底座,另一端固定在机械手运动端,应变片贴片位置参考有限元分析结果中最大应变区域。通过驱动机械手,沿 Y 轴方向平移 30 mm 和扭转 15° 2 种情况进行 3 次实验,通过应变仪和测试分析系统得出 2 种情况下应变值并取平均值,得到固定端正应变与运动端位移的关系、切应变与扭转角的关系。弹性体位移传感器实验流程如图4所示。

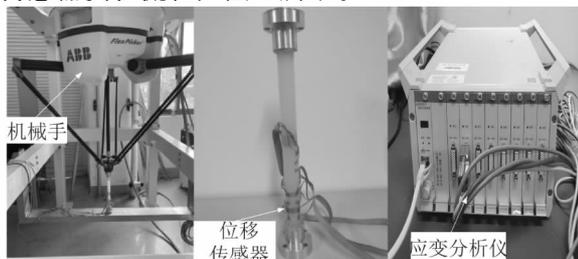


图3 弹性体位移传感器实验平台

Figure 3 Experimental platform of elastomer displacement sensor

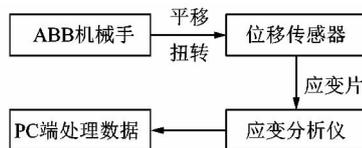


图4 弹性体位移传感器实验流程

Figure 4 Experimental process of elastomer displacement sensor

2 位移传感器中橡胶类超弹性材料模型

传感器所用的弹性体材料从以下 4 个方面选取:蠕变小、滞回小、阻尼小及抗断裂性能好。对硅橡胶、天然橡胶和聚氨酯弹性体的这 4 种性能参数进行对比,选取最适合本实验的是聚氨酯弹性体材料,其材料参数如表 1 所示。

聚氨酯等橡胶类的超弹性性能反映出其在发生重大变形后能够快速恢复原始状态的能力。因此,超弹性体的本构模型能够描述大应力下的非线性,并且在有限变形条件下具有充分的弹性。目前以应变能密度函数为基础发展出本构理论适用于超弹性材料的大弹性变形,该类变形可用于有限元仿真中。

表 1 弹性体材料参数

Table 1 Material parameters of elastomer

材料	蠕变/mm	滞回环面积/ (N·mm)	阻尼相位差 $\tan \varphi$	断裂强度/ MPa
聚氨酯	6.0	37 568	0.21	45.5
天然橡胶	32.3	82 541	0.27	39.7
硅橡胶	25.0	215 943	0.34	23.4

超弹性材料可表达为“应变势能” U 的形式,即在材料点上作为应变函数的每单位参考体积中储藏的应变能。在 ABAQUS 中,有很多种应变势能形式来近似模拟不同的弹性体,比如:Mooney-Rivlin 形式、Ogden 形式、Neo-Hooke 形式和 Yeoh 形式等。本实验中的聚氨酯弹性体材料经过单轴拉伸实验拟合出的应力-应变关系,得到最适合聚氨酯材料的本构模型是 Ogden 式^[14]。

Ogden 形式的应变势能关系是:

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i} \quad (2)$$

式中: U 是每单位参考体积的应变势能; λ_i 是拉伸偏量; N 是材料参数; J 是热膨胀中定义的弹性体积比; D_i, μ_i 和 α_i 是温度相关的材料参数。

Ogden 形式中初始剪切模量和体积模量的公式如下:

$$\left. \begin{aligned} \mu_0 &= \sum_{i=1}^N \mu_i ; \\ K_0 &= \frac{2}{D_i} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Ogden 形式在单轴拉伸、等双轴拉伸和剪切实验中都得到了验证。其中,不管是小变形还是大变形的情况下,Ogden 形式是能够准确描述材料应力应变关系的一种本构模型。课题组通过下一章节中的单轴拉伸实验数据与各个本构模型拟合曲线对比,选择最为接近的 Ogden 形式描述聚氨酯橡胶的本构模型。

3 传感器材料单轴拉伸实验与参数的确定

3.1 单轴拉伸实验

实验材料选用传感器所用的聚氨酯弹性体,基于 GB/T 528—2009 标准,聚氨酯橡胶试样使用厚度为 2 mm、宽为 6 mm、标距为 25 mm 的 I 型哑铃状试样^[15],如图 5 所示。

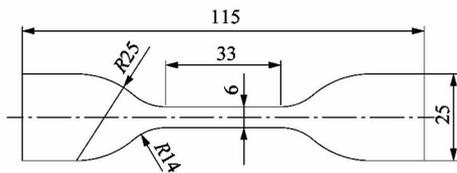


图 5 I 型哑铃状橡胶标准试件

Figure 5 Type 1 dumbbell rubber standard specimen

在万能拉伸压缩试验机上进行单轴拉伸实验,在保持原始状态下夹持聚氨酯橡胶试件以 500 mm/min 的速度进行拉伸,拉伸的初始位置和拉伸位置如图 6 ~ 7 所示。连续监测拉伸力和变形量的变化值,直到变形量达到 250% 为止。使用相同材料和尺寸的 3 组橡胶试样进行实验,并记录数据。



图 6 单轴拉伸实验初始位置

Figure 6 Initial position of uniaxial tensile test

3.2 实验数据处理

根据 GB/T 528—2009 中的方法,对单轴拉伸实验

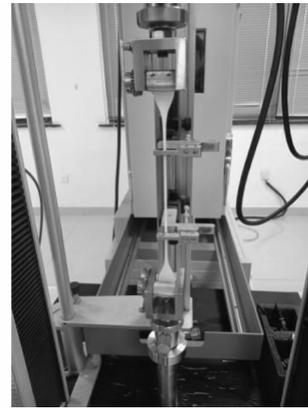


图 7 单轴拉伸实验拉伸位置

Figure 7 Tensile position of uniaxial tensile test 数据进行处理^[16]。该方法的理论基础是基于超材料的小变形理论。当材料受到轴向拉伸时,假设试样的横截面积不变或改变很小可忽略不计,其应力和应变为:

$$\sigma = \frac{P}{S_0}; \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (5)$$

式中: P 为施加在哑铃状试样上的轴向拉伸力, S_0 为试样拉伸部分的原始横截面积, ΔL 为试样的轴向拉伸的变形量, L_0 为试样拉伸部分的原始长度。

使用以上 2 个公式,对 3 组单轴拉伸实验得到的拉伸力与变形之间的关系进行处理,取平均值后,得到聚氨酯橡胶的应力-应变关系。

3.3 本构模型选取

在有限元分析的仿真中,橡胶类超弹性材料的本构模型选择直接关系到整个仿真的结果是否精确。本实验中选取适合单轴拉伸实验的 Mooney-Rivlin、Ogden、Yeoh 和 Neo-Hooke 4 种本构模型,将实验数据作为平均值,通过方差分析选取了与聚氨酯弹性体拟合度最好的本构模型。不同本构模型在单轴拉伸实验下拟合曲线如图 8 所示。因为实验数据都是离散的点,每个点横纵坐标并不相同,所以,通过 Origin 软件中差值外推法,得到在相同横坐标下,每条曲线的纵坐标值,再将得到的数据拟合曲线,如图 9 所示;不同本构模型方差如表 2 所示。

通过对比发现 Yeoh 本构模型的方差最小,Ogden 本构模型方差次之,但从本构模型拟合曲线趋势上看 Yeoh 本构模型拟合曲线中多次出现拐点,并不适合聚氨酯弹性体,同时,聚氨酯弹性体在传感器中应变范围在 0% ~ 100% 范围内,Ogden 本构模型拟合程度最好。

综上所述,最适合聚氨酯弹性体材料的本构模型是 Ogden 本构模型,其参数如表 3 所示。

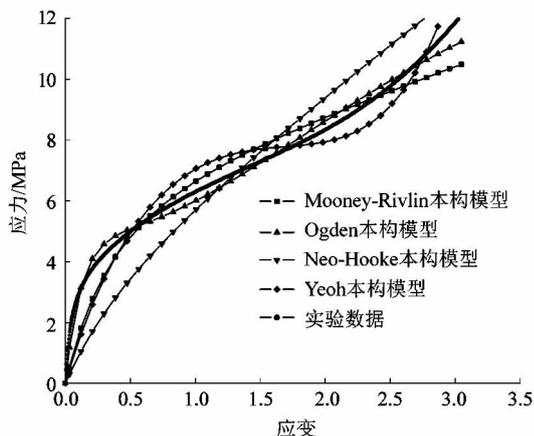


图 8 应力应变关系拟合曲线

Figure 8 Fitting curve of stress-strain relationship

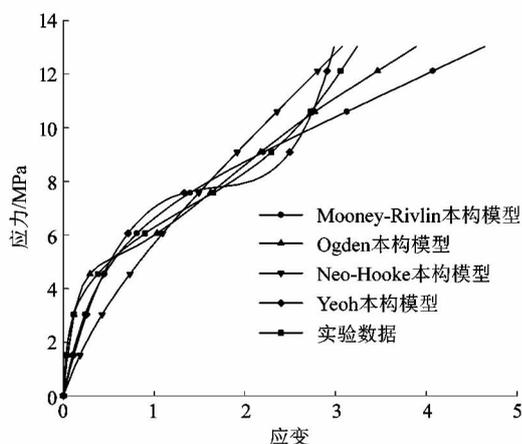


图 9 差值外推法拟合曲线

Figure 9 Curve fitting by difference extrapolation

表 2 不同本构模型拟合曲线的方差

Table 2 Variance of fitting curves for different constitutive models

本构模型	方差	本构模型	方差
Mooney-Rivlin	0.190 462 880	Neo-Hooke	0.075 662 150
Ogden	0.032 400 100	Yeoh	0.028 322 332

表 3 实验数据在 Ogden 模型下拟合参数

Table 3 Fitting parameters of experimental data under Ogden model

μ_1	μ_2	μ_3
-4.186 339 96	-5.274 235 69	23.547 311 40
α_1	α_2	α_3
3.034 209 10	3.043 093 58	-5.851 101 80

4 有限元分析计算结果

4.1 聚氨酯橡胶试件的有限元分析

将图 8 中应力应变实验数据导入超弹性材料模块,选取 Ogden 本构模型为聚氨酯材料模型。将 SolidWorks 中建立聚氨酯橡胶试样三维模型导入 ABAQUS 中进行分区域网格划分,为使分析结果更正确,其中真实拉伸区域网格划分更细,在 Hybrid formulation 中选择 C3D8RH 实体单元类型,采用单元形状为六面体、中性轴画法对网格进行划分,如图 10 所示。橡胶试件的单元数目为 41 832,节点数目为 38 957^[17]。



图 10 聚氨酯橡胶试件网格划分

Figure 10 Mesh generation of polyurethane rubber specimen

在分析步中一端添加夹持部分的固定约束,另一端添加位移载荷,模拟实验拉伸聚氨酯橡胶试件 80 mm,得出有限元仿真应力云图,如图 11 所示。为了确保所用本构模型对聚氨酯材料的准确性,又将不同本构模型导入橡胶试件的有限元仿真中,得出仿真与实验的误差,如表 4 所示。



图 11 单轴拉伸实验有限元仿真

Figure 11 Finite element simulation of uniaxial tensile test

表 4 单轴拉伸实验在不同本构模型下的误差

Table 4 Error of uniaxial tensile test under different constitutive models

本构模型	误差/%	本构模型	误差/%
Mooney-Rivlin	11.70	Neo-Hooke	23.10
Ogden	8.70	Yeoh	-31.50

从图 11 中可以看到在仿真结果中最大应力处位置在试件的拉伸部分中部边缘。将实验及数据处理后,仿真数据比实验数据大 8.70%。将实验结果与其他本构模型进行对比,发现 Ogden 本构模型是误差最小的,说明聚氨酯弹性体材料可以用 Ogden 本构模型来描述其特性。

4.2 位移传感器实验模型的有限元仿真

基于弹性体位移传感器,在 ABAQUS 实体单元中,建立位移传感器的橡胶棒与法兰盘模型,装配体如图 12 所示,网格划分如图 13 所示。其中聚氨酯弹性体节点数 144 120 个,单元数 123 600 个;单个法兰盘节点数 2 040 个,单元数 1 394 个^[18]。

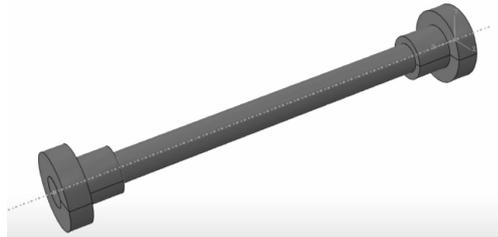


图 12 装配体模型
Figure 12 Assembly model

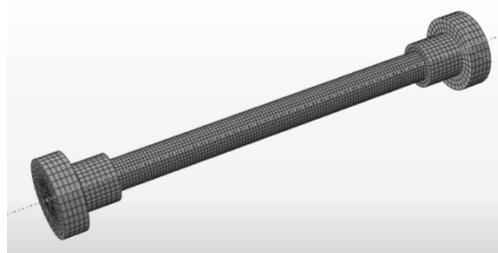


图 13 装配体网格划分
Figure 13 Assembly mesh generation

在 ABAQUS 中 Property 模块创建聚氨酯弹性体和法兰盘材料模型,将上一章单轴拉伸实验所得应力应变数据以 Ogden 本构模型导入,得到聚氨酯弹性体材料模型。法兰盘使用 6061 铝合金,将密度 2 810 kg/m³,弹性模量 69 000 MPa 和泊松比 0.3 导入法兰盘模型,此仿真的边界条件中法兰盘和弹性体胶合部分最为重要,将 3 个实体中胶结的相互结合面采用 surface-to-surface contact 的方式,导入实验所用的胶水参数,连接方式选用胶结方式建立胶结的边界条件。在 Load 模块添加约束和载荷,根据实验,将位移传感器一端对法兰盘添加固定约束,另一端对法兰盘施加位移 30 mm 和扭转角 15°的载荷,最后得到的有限元分析应变云图如图 14 ~ 15 所示。

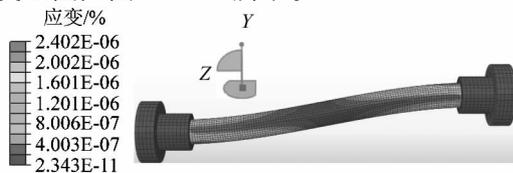


图 14 平移仿真云图
Figure 14 Cloud image of translation simulation



图 15 扭转仿真云图

Figure 15 Cloud image of torsion simulation

在沿 Y 轴正方向位移 30 mm 的平移仿真云图中可以看出,应变分布是对称的,最大应变值出现在与平移相反方向一侧且距离固定端法兰盘 4 mm 处,所以测量正应变的应变片应贴在距离固定端法兰盘 4 mm 处。贴片方向应平行于弹性体轴线,沿周向平均分布 4 个应变片以测量 X, Y 方向上的应变变化情况,如图 16 所示。

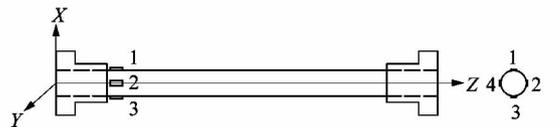


图 16 测量正应变的应变片贴片位置
Figure 16 Position of strain gauge for measuring positive strain

在绕 Z 轴扭转 15°的仿真云图中可以看出,在整个弹性体上的切应变都是一样的且为最大值,所以,测量切应变的应变片贴片方向选择垂直于弹性体轴线。为了不影响两侧应变片的添加,贴片位置选择在弹性体中部表面,如图 17 所示。

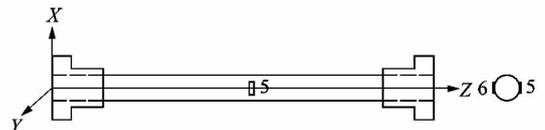


图 17 测量切应变的应变片贴片位置
Figure 17 Position of strain gauge for measuring shear strain

4.3 位移传感器有限元仿真结果与实验对比

在平移仿真中,导出 1 号应变片位移量与正应变的关系;在扭转仿真中,导出 5 号应变片扭转角度与切应变的关系。在实验中,分别驱动机械手位移 30 mm 和扭转 15°,重复 3 次取平均值得出 1 号应变片正应变与位移的关系,5 号应变片切应变与扭转角度的关系,如图 18 ~ 19 所示。

当传感器运动端是位移载荷时,仿真和实验结果的最大误差为 9.31%;当传感器运动端是扭转载荷时,仿真和实验结果最大误差是 8.75%。传感器的实验与仿真误差在 10% 以内,符合此传感器要求。

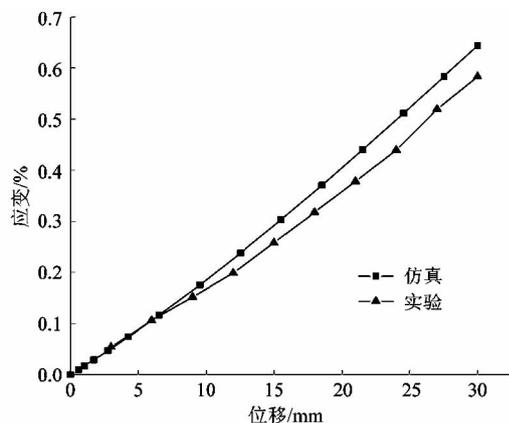


图 18 1号应变片正应变与位移关系

Figure 18 Relationship between normal strain and displacement of strain gauge No. 1

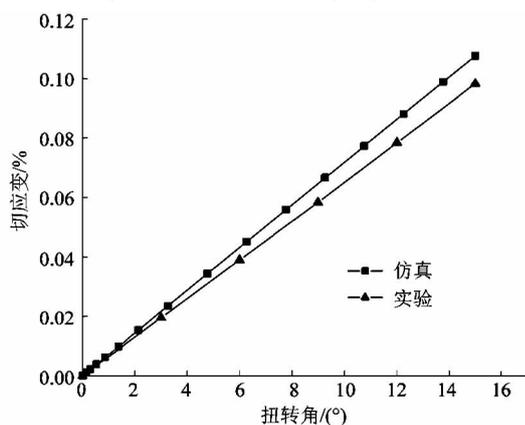


图 19 5号应变片切应变与扭转角度关系

Figure 19 Relationship between shear strain and torsion angle of strain gauge No. 5

5 结论

课题组通过聚氨酯弹性体国标试验片单轴拉伸实验获得聚氨酯橡胶的应力-应变关系,确定适合聚氨酯弹性体的本构模型及参数;并对聚氨酯弹性体传感器实验模型进行有限元分析,将传感器根部应变与端部位移、扭转之间关系的仿真结果与传感器实验结果对比分析。根据分析,可以得出如下结论:

1) 通过在弹性元件上粘贴应变片,测量分析弹性元件的应变与施加位移/扭转载荷之间的关系,实现传感器4个自由度位移/扭转的测量,推导出应变与载荷之间的关系矩阵。

2) 通过实验拟合出聚氨酯弹性体材料应力应变曲线得出拟合度最高的本构模型为 Ogden 本构模型,并得出相关参数值 $N = 3, \mu_1 = -4.186\ 339\ 96, \mu_2 = -5.274\ 235\ 69, \mu_3 = 23.547\ 311\ 40, \alpha_1 = 3.034\ 209\ 10, \alpha_2 = 3.043\ 093\ 58, \alpha_3 = -5.851\ 101\ 80, D = 0$ 。

3) 通过有限元仿真,确定传感器中应变片贴片位置及方向。测量正应变的应变片粘贴在距离固定端法兰盘4 mm处。贴片方向平行于弹性体轴线,且沿周向平均分布4个应变片;测量切应变的应变片贴片方向选择垂直于弹性体轴线,贴片位置选择在弹性体中部表面。

4) 通过位移和扭转2种工况的有限元分析与实验数据对比,当传感器运动端是位移载荷时,仿真和实验结果的最大误差为9.31%;当传感器运动端是扭转载荷时,仿真和实验结果最大误差是8.75%。传感器的实验与仿真误差在10%以内,符合此传感器要求。

参考文献:

- [1] 李钢锋. 工业机器人机械手的机电一体化设计[J]. 中国新技术新产品, 2020(15): 72-74.
- [2] YI Y, WANG B, BERMAK A. A low-cost strain gauge displacement sensor fabricated via shadow mask printing[J]. Sensors, 2019, 19(21): 1-9.
- [3] NIE M, XIA Y H, YANG H S. A flexible and highly sensitive graphene-based strain sensor for structural health monitoring[J]. Cluster computing, 2019, 22(9): 8217-8224.
- [4] WANG C, PU H. A high-precision pressure controller based on zigbee transmission[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 428(1): 1-6.
- [5] GUO Z Y, YU P S, LIU Y, et al. High-precision resistance strain sensors of multilayer composite structure via direct ink writing: optimized layer flatness and interfacial strength[J]. Composites Science and Technology, 2021, 201(1): 1-8.
- [6] 周宇, 李粤, 李维平, 等. 激光位移传感器设计与标定测试[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(11): 92-95.
- [7] 张小蝶. 基于磁致伸缩材料磁弹耦合扭转波位移传感器研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018: 1-7.
- [8] 慕雨松. 高精度角度位移传感器 ASIC 光电芯片研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 1-11.
- [9] 尚江坤, 杜兆才. 一种三自由度精密定位系统研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(22): 77-81.
- [10] 张佳炜. 微动台六自由度霍尔微位移测量系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 1-10.
- [11] 方国明, 彭起, 马浩统, 等. 基于平面法线向量的三自由度测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 256-263.
- [12] 余建平, 王文, 卢科青, 等. 新型大量程 X-Y-θ 三自由度栅式电容位移传感器设计[J]. 传感技术学报, 2015, 28(3): 357-362.
- [13] SAITO Y, ARAI Y, GAO W. Detection of three-axis angles by an optical sensor[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2008, 150(2): 175-183.
- [14] 桑建兵, 邢素芳, 刘宝会, 等. 基于 Ogden 模型 O 型橡胶密封圈的大变形接触分析[J]. 润滑与密封, 2014, 39(2): 38-42.
- [15] 张选利, 彭冬冬. 基于 ANSYS Workbench 的橡胶材料十字形试样的设计和有限元分析[J]. 橡胶工业, 2020, 67(4): 311-315.
- [16] 陈小敏. 橡胶单轴拉伸试验数据处理方法研究[J]. 世界橡胶工业, 2017, 44(10): 34-38.
- [17] 姚艳春, 王国权, 赵诚, 等. 基于 Mooney-Rivlin 本构模型橡胶防尘罩的非线性有限元分析[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2013, 28(4): 52-56.
- [18] 张俊, 刘国政, 凌雯, 等. 大型聚氨酯隔振件的实验研究和有限元分析[J]. 汽车实用技术, 2020(14): 103-106.