

面向航天回收装备的大变形柔性传感器研究与应用(二)——大应变传感器

刘浩¹ 李爽^{1,2} 刘国栋^{1,2} 贾贺^{3,4} 房冠辉^{3,4} 冯瑞^{3,4} 苏业旺^{1,2,*}

(1 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

(2 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

(3 北京空间机电研究所, 北京 100094)

(4 中国航天科技集团有限公司航天进入、减速与着陆技术实验室, 北京 100094)

摘要 在极端环境条件下, 受温度、压力、速度等因素影响, 具有柔性和大变形特征的航空航天装备极易发生故障, 因此研发相应的大变形柔性传感器以对其服役状态下的应变、曲率、气动外形等参数进行实时监测面临巨大的挑战。文章面向具有柔性和大变形特征的航天回收降落伞, 设计了大变形柔性应变传感器(简称大应变传感器), 研究表明该大应变传感器在高达35%的应变范围内保持了优异的线性度(拟合优度>0.999)。文章还进一步探索传感器在降落伞的伞衣、伞绳、径向带等部位的集成方案并进行系统性测试, 通过航天降落伞地面高塔投放试验和风洞试验的示范应用, 有效地获得降落伞的变形状态信息, 这对降落伞的结构设计优化与实时控制具有重要意义。

关键词 柔性 大变形 应变 传感器 航空航天

中图分类号: V19; TP212.9

文献标志码: A

文章编号: 1009-8518(2023)01-0059-11

DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2023.01.007

Research and Application of Sensors with Great Flexibility and Deformability for Aerospace Recycling Equipment (2) ——Stretchable Strain Sensor

LIU Hao¹ LI Shuang^{1,2} LIU Guodong^{1,2} JIA He^{3,4} FANG Guanhui^{3,4} FENG Rui^{3,4} SU Yewang^{1,2,*}

(1 State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

(4 Laboratory of Aerospace Entry, Descent and Landing Technology, CASC, Beijing 100094, China)

Abstract Under extreme environmental conditions, affected by temperature, pressure, velocity and other factors, the aerospace equipment with great flexibility and deformability is extremely prone to failure. It is a

收稿日期: 2022-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(12172359, 11772331); 北京市自然科学基金(2202066); 北京市科委怀柔科学城成果落地重大专项(Z191100002019010); 中科院基础前沿科学研究计划“从0到1”原始创新项目(ZDBS-LY-JSC014); 中科院创新交叉团队项目(JCTD-2020-03)

引用格式: 刘浩, 李爽, 刘国栋, 等. 面向航天回收装备的大变形柔性传感器研究与应用(二)——大应变传感器[J]. 航天返回与遥感, 2023, 44(1): 59-69.

LIU Hao, LI Shuang, LIU Guodong, et al. Research and Application of Sensors with Great Flexibility and Deformability for Aerospace Recycling Equipment (2)——Stretchable Strain Sensor[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2023, 44(1): 59-69. (in Chinese)

great challenge to develop the corresponding sensors with excellent flexibility and deformability to monitor the key parameters of the equipment in service real-time, such as strain, curvature and aerodynamic profile. For the aerospace recovery parachute with great flexibility and deformability, we research the design and performance of flexible strain sensor with great deformability (referred to as stretchable strain sensor), the sensor undergoes a large applied strain (35%), which guarantees high linearity (goodness-of-fit >0.999). We further explore the integration scheme of the sensors in parachute canopy, parachute ropes and radial belt, and conduct the systematic tests. Through the demonstration application of the dropping test of the parachute from a high tower and the wind tunnel test, the information of the deformation state of the parachute can be obtained effectively, which is of great significance for the optimization of the structural design and the real-time control of the parachute.

Keywords flexible; large deformation; strain; sensor; aerospace

0 引言

航空航天装备具有质量轻、发射体积小、折叠效率高、功能集成度高等特点,在面临力学、热学等极端复杂的工作环境时,为保证其正常工作,要求装备关键部件的结构刚度较低,且可以承受较大的拉伸(弯曲)变形,即具有“柔性”和“大变形”特征。利用传感器准确测量获得装备的拉、压、弯、扭等变形和表面流速、温度、压力等关键参数,对其结构设计和优化至关重要。复杂的环境特征和装备大幅度的变形特征为传感器的设计研发带来巨大挑战。

在最基本的测量拉伸变形的大应变传感器前沿研究方面,大量从事材料、化学等相关专业的学者从材料层次出发,研究了本身固有大变形能力的先进传感材料并制备传感器^[1-3],同时基于接触电阻原理,通过微结构接触关系的变化实现传感器在拉伸过程中的电阻变化。

大应变传感材料主要包括碳黑^[4-6]、石墨烯^[2,7-11]、碳纳米管^[3,12-15]、氧化锌纳米线^[16]、金属纳米线^[17-18]、金属纳米膜^[19-20]等先进材料,这些材料被制备成薄膜并与聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)硅胶弹性体薄膜、Ecoflex等弹性体材料复合之后具有很强的变形能力。Mattmann首先利用碳黑制备了用于测量纺织物变形的应变传感器,量程达到80%^[4];Muth利用嵌入式3D打印碳黑油墨的方法将量程提高到450%^[5];Boland采用石墨烯橡胶复合材料,其量程可达800%^[7];Tang制备了一种还原氧化石墨烯微米管—弹性体复合材料,其量程约为50%,灵敏系数高达630^[9];Ryu设计了一种基于定向碳纳米管纤维的应变传感器,量程高达900%^[13];王中林院士团队制备了一种基于氧化锌纳米线/聚苯乙烯复合薄膜的应变传感器,灵敏系数为116,量程为50%^[16];Amjadi制备了一种银纳米线弹性体纳米复合材料,量程为70%^[17],等等。

这些大应变传感器通常具有较大量程和较高灵敏系数,但其电信号响应的重复性和线性度有待提高^[1-2,12],主要是由于不稳定接触微结构导致:1)接触表面上复杂的滑移、摩擦和黏附关系;2)微结构的非线性变形;3)接触模式的转换。实际应用中,上述性能指标都非常重要^[17],所以需要沿着这一思路继续深入研究或另辟蹊径寻求不同的解决方案。

本文面向具有柔性和大变形特征的航天回收降落伞,研究大变形柔性应变传感器(简称大应变传感器)的设计和性能,探索传感器在降落伞的伞衣、伞绳、径向带等部位的集成方案并进行系统性测试,通过航天降落伞地面高塔投放试验和风洞试验的示范应用,有效地获得降落伞的变形信息,对降落伞结构设计优化与实时控制具有重要意义。

1 无接触电阻式大应变传感器研究

与之前的大量研究不同,本团队另辟蹊径,基于力学结构设计,研制了一种无接触电阻式大应变传感器^[21](见图1),该传感器包含一个偏轴蛇形叠层结构和两层弹性封装层,其中偏轴蛇形叠层结构包

括: 1) 偏离中性轴蛇形导电箔(康铜箔); 2) 一层厚的蛇形聚酰亚胺(Polyimide, PI)基底和一层薄的蛇形PI覆盖层。由于康铜的电阻温度系数较低, 因而被选用为传感材料, 这有助于减少环境温度的影响。

传感原理基于拉伸—弯曲—拉伸变换的机制, 示意如图2所示^[21]。图中, R_0 和 ΔR 分别表示偏轴蛇形叠层结构的初始电阻值和由施加应变引起的阻值增量。当传感器随被测物变形时, 其上的偏轴蛇形叠层结构发生整体的拉伸变形, 因PI基底的厚度比宽度大, 故偏轴蛇形叠层结构几乎只产生面内变形, 而不发生面外屈曲, 即由弧形段的面内弯曲和直线段的旋转主导偏轴蛇形叠层结构的变形。最大应变位于弧形段上, 而直线段的变形相对而言较小。因此, 相比于直线段使用较大宽度的尺寸设计来说, 康铜箔上的弧形段采用了较小宽度的偏轴设计, 以提高灵敏性。通过弧形段的弯曲, 传感器整体的拉伸应变被传递到了窄段偏轴康铜箔上, 引起康铜箔的拉伸变形, 最终反映在电阻变化上。

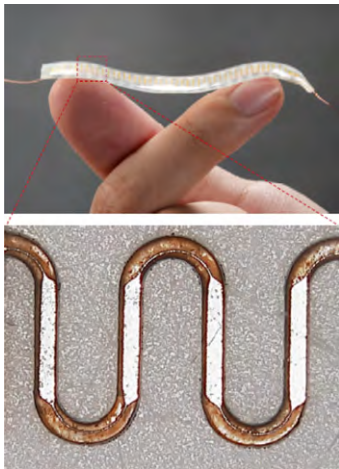


图1 大应变传感器实物图^[21]

Fig.1 Image of the stretchable strain sensor^[21]

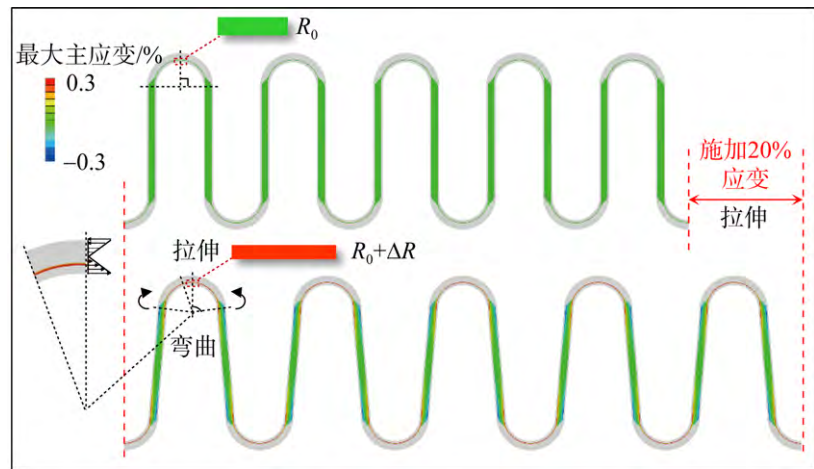


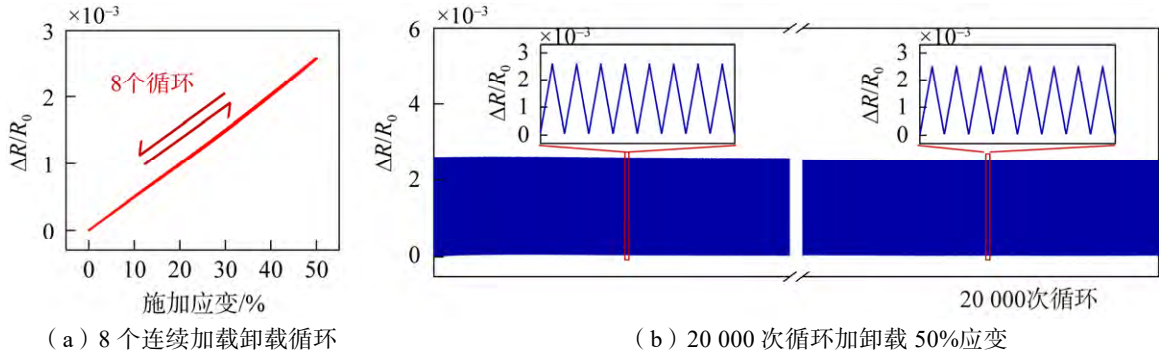
图2 传感器机理示意^[21]

Fig.2 Schematic illustration of the sensing mechanism^[21]

由于敏感材料康铜部分既不产生不稳定的接触电阻, 也不涉及非线性本构和几何关系, 因此该传感器实现了高重复性和高线性度。图3(a)为8个周期连续循环加载卸载下大应变传感器上的施加应变与其相对电阻变化 $\Delta R/R_0$ 的关系图。当施加应变为0~50%时, 施加应变与 $\Delta R/R_0$ 之间具有极高重复性(重复性误差 $\delta_r=1.58\%$)和线性度(8个加卸载周期下, 拟合优度落在0.999 11~0.999 64范围内)。理论分析、有限元模拟与实验测试的结果综合表明, 当偏轴蛇形叠层结构的圆弧段半径较大、聚酰亚胺基底宽度较窄、直线段较长及封装层较厚时, 可以获得较大且稳定的弹性传感范围(50%)^[21]。图3(b)为在20 000次循环加载卸载50%应变时的相对电阻变化。结果表明, 传感器在20 000次加卸载循环下仍然可以保持优异的性能, 具有较高的耐疲劳性能; 进一步地利用特殊设计的偏轴蛇形叠层结构和惠斯通电桥电路可以实现温度自补偿功能^[21]。

2 面向航天降落伞的大应变传感器设计

航天回收装备工作过程是航天器飞行任务的关键环节。降落伞作为航天器及武器装备回收着陆系统的核心装置, 在载人飞船、嫦娥五号、天问一号、战略战术武器等多个重大任务中扮演着重要角色。降落伞材料由柔性织物编制而成, 具有质量轻、包装体积小、展开面积大的特点。在降落伞的研究设计中, 通过对伞绳、伞衣、径向带变形情况进行测量, 可以获得降落伞各部件载荷分布情况, 从机理层面上研究受力关键环节与薄弱环节, 从而不断优化产品设计, 提高产品可靠性, 因此对航天降落伞系统进行变形监测意义重大。



(a) Eight consecutive loading-unloading cycles (b) Under repeated loading and unloading of 50% strain for 20,000 cycles
图3 相对电阻变化^[21]

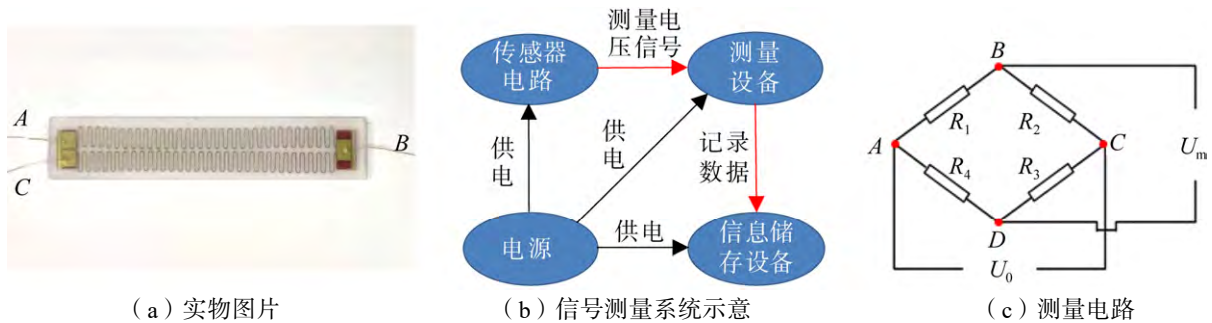
Fig.3 Relative resistance change^[21]

由于降落伞在工作过程中会经受高速气流等环境因素的影响，其柔性结构会产生较大变形，而传统的金属、半导体应变传感器往往刚度大且量程小，新型的接触电阻式大应变传感器性能不够稳定且测量易受温度影响，很难实际应用于降落伞变形的实时准确监测。基于无接触电阻式大应变传感器原理，本文设计、制备了一种面向航天回收装备的大应变传感器，并在航天降落伞上进行了系统性的应用实验。

本节所设计的传感器如图4(a)所示，长度为75mm，宽度为15mm，厚度为2mm。传感器可分为AB段线路和BC段线路，前者电阻变化率与应变正相关，后者电阻变化率与应变负相关。该传感器的测量系统主要由传感器电路、电源、测量设备和信息储存设备组成(图4(b))。测量电路为半桥电路，如图4(c)所示，其中 R_1 、 R_2 分别表示传感器AB段线路和BC段线路的阻值， R_3 、 R_4 分别表示标准电阻的阻值， U_0 为电源供电电压， U_m 为半桥电路的输出电压。若取 $R_3 = R_4$ ，则 U_m 为

$$U_m = \frac{1(R_1 + \Delta R_1) - (R_2 + \Delta R_2)}{2(R_1 + \Delta R_1) + (R_2 + \Delta R_2)} U_0 \approx \frac{1(R_1 - R_2) + (\Delta R_1 - \Delta R_2)}{2(R_1 + R_2)} U_0 \quad (1)$$

式中 ΔR_1 、 ΔR_2 分别表示传感器AB段和BC段随应变而产生的电阻增量，且二者均远小于初始电阻值。若 $R_1 = R_2$ ，则 $\Delta R_1 = -\Delta R_2$ ，式(1)可简化为 $\Delta U_m / U_0 \approx \Delta R_1 / (2R_1)$ ， ΔU_m 为半桥电路输出电压变化值，其值正比于施加应变。因此传感器经过标定后，贴合在被测物上，拉伸过程中测出其电压相对变化率后，即可推算出被测物的实际应变。

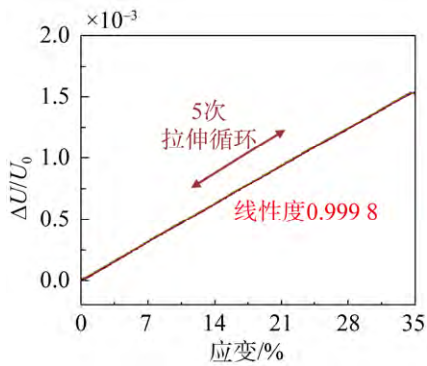


(a) Physical image (b) Schematic diagram of the signal measurement system (c) Measurement circuit
图4 大应变传感器设计及测量

Fig.4 Design and measurement of the stretchable strain sensor

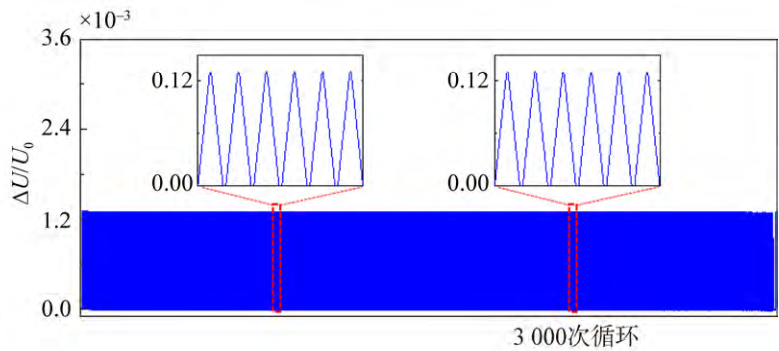
对该传感器的各项性能进行实验测试。1) 线性度和重复性：该传感器输出电压信号和待测应变具有良好的线性关系，线性度超过0.999；且在5次拉伸测试中均能回复到初始状态，加载曲线

和卸载曲线完全重合,具有良好的重复性。测试结果表明该传感器的弹性量程达到了35%,完全满足降落伞部件变形测量范围。5次连续加载-卸载循环结果如图5(a)所示,图中 ΔU 为输出电压变化值。2)循环性能:当传感器处于第一个循环周期时,谷值为0,峰值为0.13%,经过3000次的循环拉伸后,传感器的谷值和峰值依然无明显漂移。测试结果表明该传感器在30%应变、3000次循环加载工况下保持传感性能不变。试验结果如图5(b)所示。3)分辨率:采取逐级加载的方式开展测试实验,从0应变状态开始,每次加载0.05%应变,直至发生总0.25%应变。随着应变逐级增加,传感器的输出信号具有明显的区别,并且输出电压呈现阶梯状变化,每发生0.05%的应变时,传感器输出电压相对变化率增加0.00022%;发生0.25%的应变时,传感器输出电压相对变化率增加0.0011%。测试结果表明该传感器能够对0.05%的应变做出明显的响应,传感器的分辨率达到了0.05%的应变,如图5(c)所示。4)温度不敏感性能:传感器结构和测量电路理论上可以抵消温度变化对测量的影响,具有温度自补偿特性,经过实验测试,传感器的初始温度敏感系数为0.00023%/°C,以25%应变经过10万次加载之后,温度敏感系数为0.00016%/°C,都可满足温度敏感性需求。试验结果见图5(d)和图5(e)。



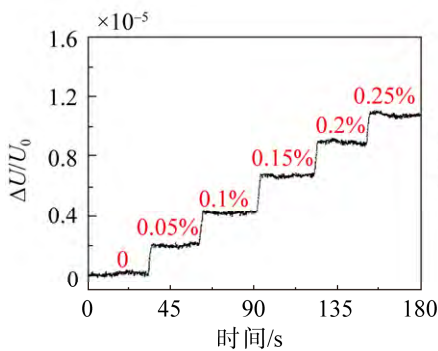
(a) 5次连续加载-卸载循环

(a) Five consecutive loading-unloading cycles



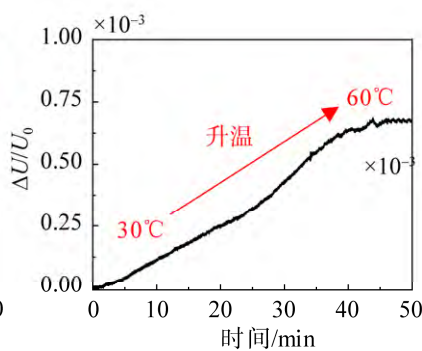
(b) 3000次循环加卸载30%应变

(b) Repeated loading and unloading of 30% strain for 3,000 cycles



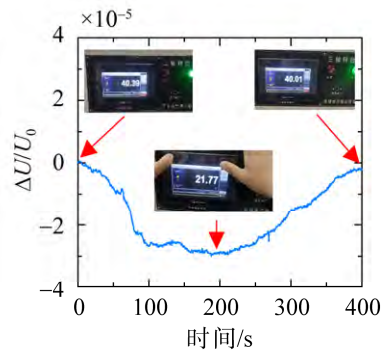
(c) 阶跃应变

(c) Step strain



(d) 30°C~60°C

(d) 30°C~60°C



(e) 1×10⁵次疲劳后再先降温再升温

(e) Cooling first and then heating for 1×10⁵ cycles

图5 输出电压相对变化

Fig.5 Relative change in output voltage

综上,该大应变传感器具有高线性度、高重复性、高分辨率、高循环性以及温度不敏感等特性,可以很好地应用在航天降落伞各部件的变形测量上。此外,传感器的尺寸和量程还可根据需求进行定制,从而满足不同回收装备的测量要求。

3 大应变传感器在降落伞系统测量中的验证

为验证大应变传感器在航天回收装备上集成应用的可行性,将传感器集成在降落伞伞绳、径向带等部位,通过拉伸实验、折叠压缩实验、高塔投放实验及风洞实验来论证该传感器在航天降落伞系统中的实用价值。

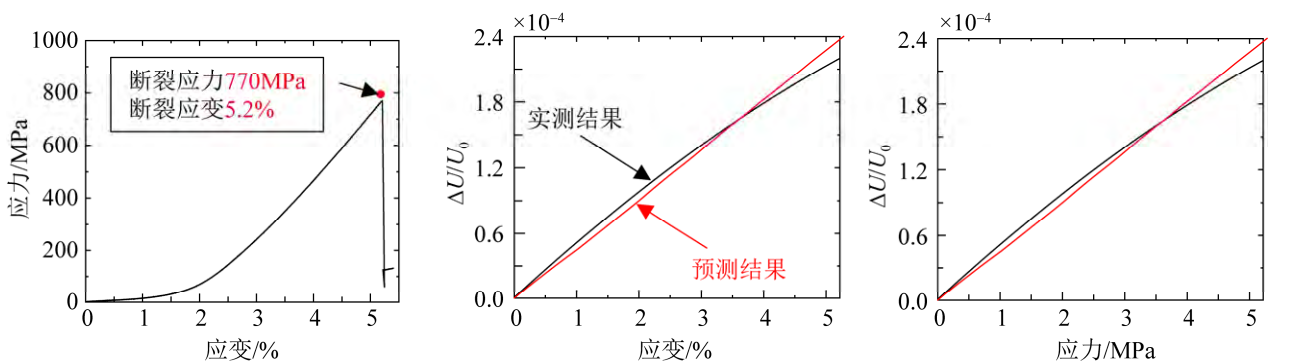
(1) 芳纶带静态拉伸实验

降落伞一般由纤维材料编织而成,选取代表性的芳纶试样集成传感器进行静态拉伸实验。选取芳纶试样规格为长度 100mm、宽度 15mm、厚度 0.2mm;拉伸试样夹持端规格为 2 组共 4 个铝片(长度 25mm、宽度 30mm、厚度 0.5mm,环氧树脂胶粘接固化);采用卡夫特胶水将大应变传感器粘贴于待测试样表面;将集成好传感器的芳纶试样夹持到拉伸机上,开展静态拉伸实验,先施加 10N 拉力预紧试样,之后匀速拉伸直至试样断裂,记录此过程中的拉力、位移、传感器输出电压等数据。实验结果见图 6。

试样的应力-应变曲线如图 6(a)所示,结果显示该试样的断裂应变为 5.2%;该试样的应力与应变关系为明显的非线性关系,随着应变的增加,试样的拉伸刚度也在逐渐增加。该非线性的本构关系主要由试样的编织结构造成,当应变较小时,试样主要发生编织结构的拉伸变形,因此该阶段拉伸刚度比较低,微小的拉力就可引起较大的变形;当应变较大时,试样的编织结构变形空间趋于密实,此时试样主要发生纤维的拉伸变形,故而该阶段拉伸刚度比较高,很大的拉力才能引起微小的变形。因此随着拉伸幅度的增加,试样的变形模式逐渐由纤维编织结构的拉伸变形模式转换为纤维材料自身的拉伸变形模式,试样的应力-应变曲线斜率也出现了相应的变化。

图 6(b)为传感器输出信号与试样应变之间的关系曲线,其中黑色曲线是拉伸过程中实测结果,红色曲线是基于传感器性能测试实验数据的预测结果。在试样断裂前,传感器信号正常输出,无异常波动;试样断裂时(断裂应变 5.2%),传感器的输出电压相对变化率为 0.024%;传感器输出电压相对变化率与应变近似为线性关系,实验测量结果与预测结果较为接近。

图 6(c)为拉伸过程中传感器输出电压相对变化率与试样应力之间的关系曲线。在试样断裂前,传感器信号正常输出,无异常波动;试样断裂时(断裂应力 770MPa),传感器的输出电压相对变化率为 0.024%;传感器输出电压相对变化率与应力为非线性关系;随着作用在试样上应力逐渐增加,传感器输出电压的相对变化率也随之增大,但曲线斜率减小。该大应变传感器可以准确监测芳纶试样断裂前应变与应力变化,初步证明了传感器集成方案的可行性。



(a) 试样拉伸应力-应变曲线

(a) Tensile stress-strain curve of the specimen

(b) 输出电压相对变化随应变的变化

(b) Curves of the relative change in output voltage versus strain

(c) 输出电压相对变化随应力的变化

(c) The curve of the relative change in output voltage versus stress.

图 6 芳纶带的静态拉伸实验

Fig.6 Static tensile test of aramid tape

(2) 伞衣径向带标定及折叠压缩实验

伞衣径向带标定实验主要是建立径向带材料变形与传感器输出信号之间的关联,通过径向带的静态拉伸,将采集到的电学信号转换为降落伞径向带的应变信号。伞衣径向带的标定及折叠压缩实验结果如图7所示。静态拉伸实验过程同芳纶带拉伸实验,标定实验结果如图7(a)所示。结果表明,传感器应变与输出电压变化率呈现线性关系,符合传感器设计理论;循环拉伸过程中,标定曲线几乎完全重合,重复性好,拟合直线斜率 $k \approx 0.006$,即 $\Delta U/U_0 \approx 0.006\varepsilon$ 。

考虑到降落伞在实际使用过程中,都需要被折叠压缩成块体,集成于伞衣上的大应变传感器也会相应地被压缩。为了模拟该过程,并研究压缩前后传感器性能是否发生改变、结构是否发生破坏,特设计并进行了集成有传感器的伞衣折叠压缩实验。该实验主要包括压缩前径向带的循环拉伸实验、径向带的逐级加压实验和压缩后径向带的循环拉伸实验三部分。其中,前后两次拉伸实验以匀速位移加载卸载的方式使径向带产生最大为5%的应变,循环5个周期,具体实验步骤与芳纶带拉伸实验相同;逐级加压实验通过将径向带折叠的方式模拟降落伞的折叠过程,并通过逐级加压的方式模拟降落伞的压缩过程,如图7(b)所示。实验中,有效的压缩面积为 $120\text{mm} \times 20\text{mm}$,施加最大压缩载荷为 $2\,500\text{N}$,相当于 $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ 的叠伞面积总共承受约 25t 的压缩载荷。压缩前,当径向带被拉伸5%应变时,传感器输出信号变化的幅度为0.037%;折叠压缩过程中,传感器信号出现波动;压缩后,当径向带被拉伸5%应变时,传感器输出信号变化的幅度为0.036%;压缩前后,相同应变状态下传感器信号幅值的相对偏差仅为2.7%,说明其性能未发生明显的改变,压缩后依然能够对应变进行准确测量。

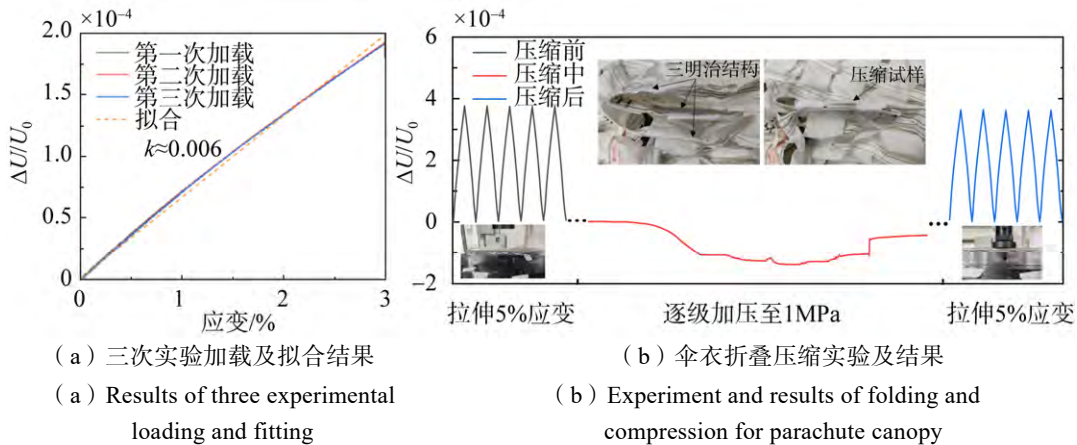


图7 伞衣径向带的标定及折叠压缩实验

Fig.7 Calibration and folding compression experiment of the radial belt of the parachute

(3) 降落伞高塔投放实验

降落伞高塔投放实验是降落伞设计过程中的一项重要环节,能够获取降落伞开伞数据以及相应的宏观状态量等信息。在高塔投放实验中,变形监测系统(大应变传感器、数据采集模块和导线等)经受的外界环境相对复杂,因此需要在系统装配集成时满足以下要求:1)不影响降落伞的正常展开和下落;2)可抵抗下落时高速气流的影响;3)可承受落地时的冲击作用。因此,需要合理地设计变形监测系统的装配位置和方式才能有效可靠地对目标位置的变形进行监测。

装配集成方案主要包括变形监测系统的装配位置和装配方式两部分:变形监测系统的装配位置如图8(a)所示^[21],根据降落伞的实际结构,4个传感器对称装配在径向带外侧,2个数据采集模块(如图8(b)所示,圆柱状,直径为 17mm ,母线长度为 130mm)对称装配在径向带端部的伞衣裙褶部位,导线装配在径向带内侧,一端连接传感器,一端连接数据采集模块,可以监测径向带的变形和受力^[21]。

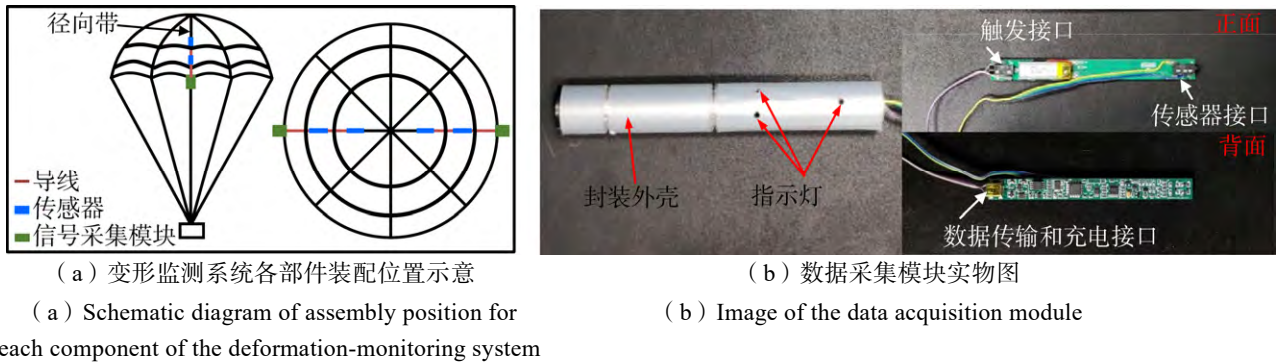


图8 变形监测系统在降落伞上的集成方案^[21]

Fig.8 Integration scheme of the deformation-monitoring system on the parachute^[21]

基于上述方案，在降落伞上装配变形监测系统，并开展 110m 的高塔投放实验，可以成功捕捉到降落伞下落过程中传感器的输出信号，得到径向带上靠近伞衣裙褶边缘对称特征点的变形，进而反推出降落伞下落过程中的局部变形特征。实验通过塔吊将降落伞以及相应配质量抬升到目标高度，然后激活释放装置，使得配质量从悬挂点脱离，最终牵引降落伞一起下落。传感器有效地监测了降落伞高塔投放过程中开伞、稳定下落以及落地三个阶段的变形：1) 开伞阶段。这一阶段，伞衣还未出现明显的竖直位移，而是经历了剧烈和复杂的变形。激活释放装置后，配质量在重力下迅速下落，并促使降落伞依次发生伞衣伞绳绷直（此时数据采集模块开始工作，100ms 调零后开始记录传感器信号）、悬挂细绳绷直被扯断和开伞三个动作。相应的传感器信号也呈现三种变化：先是伞绳绷直，数据采集模块被激活开始记录数据，传感器信号调零并稳定极短时间；之后径向带绷紧承力产生拉伸变形直至悬挂细绳被扯断，传感器信号抖动着上升；最后伞衣忽然张开，传感器信号再次出现阶跃上升。2) 稳定下落阶段。这一阶段，伞衣和重物一起下降，降落伞发生了明显的竖直位移，变形模式较为稳定。降落伞张开后和重物一起加速下降约 3.5s，相较 110m 对应的约 5s 的自由下落时间，可以看出降落伞为重物提供了明显的阻力，这也说明了降落伞正常工作达到了减小加速度的效果。此阶段降落伞径向带明显拉伸绷直，相应的传感器信号也较初始信号有了明显变化。同时由于降落伞几乎始终处于匀加速运动，径向带的张力稳定，因此传感器输出信号也相对稳定，无明显波动。3) 落地阶段。这一阶段，重物先落地，随后伞衣落地。降落伞从张开到几乎平铺到地面过程中经历了复杂的变形，相应的传感器也监测到了该阶段径向带状态的变化。4.5s 后配质量落地，降落伞失去了重物的牵引，加速度发生了突变，因此传感器信号也出现了突变；随后降落伞飘落，径向带张力振荡地卸载，因此传感器信号也振荡地减小；最后降落伞完全落地，径向带不再发生变形，因此传感器信号保持稳定。此外，降落伞落地后，径向带完全松弛且出现了局部褶皱，而初始状态下径向带绷直，因此完全落地时的信号和初始信号相比较小。降落伞的高塔投放跌落试验期间径向带变形信号如图 9 所示^[21]。

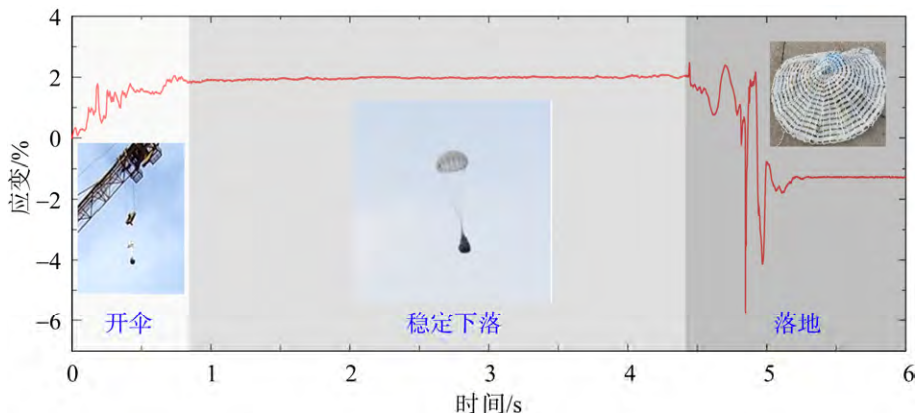


图9 降落伞的高塔投放跌落试验期间径向带变形的信号^[21]

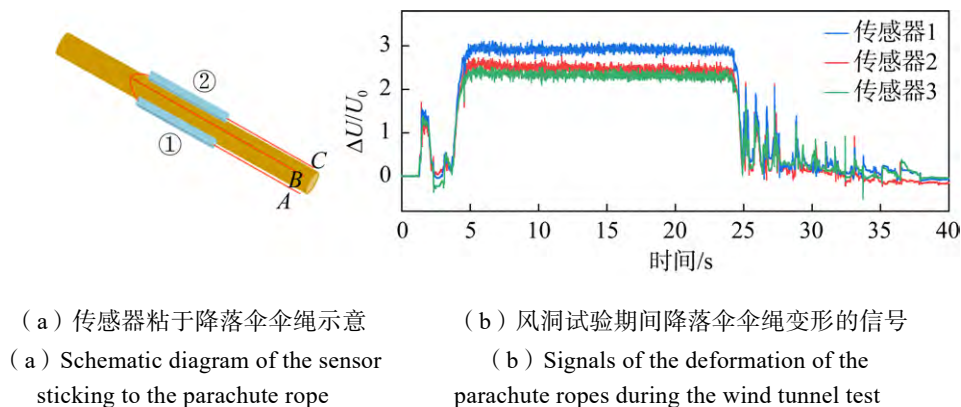
Fig.9 Signal of the deformation of the radial belt during the dropping test of the parachute from a high tower^[21]

(4) 降落伞风洞实验

降落伞的使用环境(力学、热学方面)十分恶劣,设计完成的降落伞需要在风洞中进行实际工况的模拟实验。由于风洞的气流速度较高,环境温度的变化剧烈,极端的实验环境给伞绳的变形测量带来巨大挑战。因此风洞实验所用的大应变传感器需要满足以下基本要求:1)温度敏感性低,测量方案在大温差下仍能正常执行;2)抗冲击能力强,所用设备能抵抗高超声速气流的冲击;3)柔性好,不影响伞绳的变形。

针对以上要求,实验采用的大应变传感器长度约70mm,宽度约2mm,厚度约1mm,实验测量结果表明,该传感器可以精确测量2.9%的线性应变,电阻变化率-应变关系的线性度高(超过0.999),加卸载迟滞小(响应时间<50ms);循环特性好(数万次加载);温度敏感度低(适用于-50℃~50℃)。测量伞绳静态拉伸变形的验证实验(包括伞绳的断裂拉伸实验和循环拉伸实验)表明:该传感器能在不影响伞绳变形的前提下实现精准测量;由于风洞中存在高速气流的作用,气温会下降几十至上百度,可采用基于半桥电路的温度补偿电路,使用两两一组的大应变传感器^[21](图10(a)),分别贴在伞绳表面的正反面,在靠近伞面的一端串联并引出一条线(B端),再从远离伞面的一端引出两条线(A端和C端),搭成半桥测量电路。图10(a)中①号和②号表示相互匹配的一对大应变传感器,前者电阻变化率和应变线性正相关,后者电阻变化率和应变线性负相关,且线性系数绝对值相等;为了保证传感器在高超声速冲击下的工作可靠性,本方案针对风洞实验设计了气动保护外壳。外壳使用聚乳酸高分子材料(Polylactic Acid, PLA)3D打印制备而成,其结构对称,由两个半壳组成。该气动保护外壳质量轻、强度高、气动性好、不影响伞绳的变形,并且可以保证传感器承受冲击载荷。

实验风洞为直流暂冲下吹式三声速风洞,其实验段尺寸为1.5m×1.6m,马赫数范围为0.3~2.25。伞衣半径为114mm,伞绳及连接带总长为1010mm。从图10(b)的实验结果可以看出各组传感器工作正常,电压变化均反映了降落伞变形的三个阶段:1)开车阶段,风洞开始吹风,降落伞展开,伞绳突然由松弛状态转为绷紧状态,因此电压值增大并出现几个尖峰。之后急剧增大风速,伞绳被拉伸,因此电压值急剧上升达到最大值;2)稳定阶段,风洞按照给定风速持续给风,伞绳维持被拉伸状态,因此电压保持最大值不变化,马赫数为1.79风速下(-65℃)各传感器最大电压都处于2.2~3.2mV的区间,马赫数为1.5风速下(-84.5℃)各传感器最大电压都处于1.8~2.5mV的区间,此阶段伞绳会有微振动的发生,因此该段电压信号也在最大电压附近振动变化;3)关车阶段,风洞停止给风,伞绳呈振动状态逐步恢复原长,因此传感器的电压值也伴随着伞绳的振动呈锯齿状态逐步恢复,由于部分伞绳发生了比较大的永久变形,因此有些传感器的电压值未恢复至零^[21]。



(a) 传感器粘于降落伞伞绳示意 (b) 风洞试验期间降落伞伞绳变形的信号
(a) Schematic diagram of the sensor sticking to the parachute rope (b) Signals of the deformation of the parachute ropes during the wind tunnel test

图10 降落伞风洞实验^[21]

Fig.10 Wind tunnel test of the parachute^[21]

4 结束语

极端（温度、压力、速度等）环境条件下，具有柔性和大变形特征的航空航天装备极易发生故障。研发相应的大变形柔性传感器以对其服役状态下的应变、曲率、气动外形等参数进行实时监测面临巨大的挑战。本文在无接触电阻式大应变传感器的基础上，面向具有柔性和大变形特征的航天回收降落伞，从设计和性能等方面研究适用于降落伞的伞衣、伞绳、径向带等不同部位的大应变传感器，探索集成方案并进行系统性实验测试，通过航天降落伞地面高塔投放试验和风洞试验的示范应用，有效地获得降落伞各个工作阶段的变形状态信息，测量结果分析可以进一步支撑降落伞设计，量化装备关键参数，避免航天任务的失败。

参考文献(References)

- [1] YAMADA T, HAYAMIZU Y, YAMAMOTO Y, et al. A Stretchable Carbon Nanotube Strain Sensor for Human-motion Detection[J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(5): 296-301.
- [2] CHENG Yin, WANG Ranran, SUN Jing, et al. A Stretchable and Highly Sensitive Graphene-based Fiber for Sensing Tensile Strain, Bending and Torsion[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(45): 7365-7371.
- [3] ARAROMI O, GRAULE M, DORSEY K, et al. Ultra-sensitive and Resilient Compliant Strain Gauges for Soft Machines[J]. *Nature*, 2020, 587(7833): 219-224.
- [4] MATTMANN C, CLEMENS F, TROSTER G. Sensor for Measuring Strain in Textile[J]. *Sensors*, 2008, 8(6): 3719-3732.
- [5] MUTH J, VOGT D, TRUBY R, et al. Embedded 3D Printing of Strain Sensors within Highly Stretchable Elastomers[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(36): 6307-6312.
- [6] WANG Chunya, LI Xiang, GAO Enlai, et al. Carbonized Silk Fabric for Ultrastretchable, Highly Sensitive, and Wearable Strain Sensors[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(31): 6640-6648.
- [7] BOLAND C, KHAN U, BACKES C, et al. Sensitive, High-strain, High-rate Bodily Motion Sensors Based on Graphene-rubber Composites[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(9): 8819-8830.
- [8] YAN C, WANG J, KANG W, et al. Highly Stretchable Piezoresistive Graphene-nanocellulose Nanopaper for Strain Sensors[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(13): 2022-2027.
- [9] TANG Yongchao, ZHAO Zongbin, HU Han, et al. Highly Stretchable and Ultrasensitive Strain Sensor Based on Reduced Graphene Oxide Microtubes-elastomer Composite[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(49): 27432-27439.
- [10] JEONG Y, PARK H, JIN S, et al. Highly Stretchable and Sensitive Strain Sensors Using Fragmentized Graphene Foam[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(27): 4228-4236.
- [11] QIN Yuyang, PENG Qingyu, DING Yujie, et al. Lightweight, Superelastic and Mechanically Flexible Graphene/Polyimide Nanocomposite Foam for Strain Sensor Application[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(9): 8933-8941.
- [12] LIPOMI D, VOSGUERITCHIAN M, TEE B, et al. Skin-like Pressure and Strain Sensors Based on Transparent Elastic Films of Carbon Nanotubes[J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(12): 788-792.
- [13] RYU S, LEE P, CHOU J, et al. Extremely Elastic Wearable Carbon Nanotube Fiber Strain Sensor for Monitoring of Human Motion[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(6): 5929-5936.
- [14] LIU Z, FANG S, MOURA F, et al. Hierarchically Buckled Sheath-core Fibers for Superelastic Electronics, Sensors, and Muscles[J]. *Science*, 2015, 349(6246): 400-404.
- [15] LI Lianhui, XIANG Hongyi, XIONG Yan, et al. Ultrastretchable Fiber Sensor with High Sensitivity in Whole Workable Range for Wearable Electronics and Implantable Medicine[J]. *Advanced Science*, 2018, 5(9): 1800558.
- [16] XIAO Xu, YUAN Longyan, ZHONG Junwen, et al. High-strain Sensors Based on ZnO Nanowire/Polystyrene Hybridized Flexible Films[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(45): 5440-5444.

- [17] AMJADI M, PICHITPAJONGKIT A, LEE S, et al. Highly Stretchable and Sensitive Strain Sensor Based on Silver Nanowire-elastomer Nanocomposite[J]. ACS Nano, 2014, 8(5): 5154-5163.
- [18] KIM K, HONG S, CHO H, et al. Highly Sensitive and Stretchable Multidimensional Strain Sensor with Prestrained Anisotropic Metal Nanowire Percolation Networks[J]. Nano Letters, 2015, 15(8): 5240-5247.
- [19] LEE J, KIM S, LEE J, et al. A Stretchable Strain Sensor Based on a Metal Nanoparticle Thin Film for Human Motion Detection[J]. Nanoscale, 2014, 6(20): 11932-11939.
- [20] YANG T, LI X, JIANG X, et al. Structural Engineering of Gold Thin Films with Channel Cracks for Ultrasensitive Strain Sensing[J]. Materials Horizons, 2016, 3(3): 248-255.
- [21] LI Shuang, LIU Guodong, LI Qinlan, et al. Contact-resistance-free Stretchable Strain Sensors with High Repeatability and Linearity[J]. ACS Nano, 2022, 16(1): 541-553.

作者简介

刘浩, 男, 1991年生, 2018年获北京航空航天大学航空工程专业硕士学位。主要研究方向为柔性结构与器件力学。

E-mail: liuhao110512@126.com。

通讯作者

苏业旺, 男, 1981年生, 2011年获清华大学工程力学专业博士学位, 研究员。主要研究方向为柔性结构与器件力学。

E-mail: yewangsu@imech.ac.cn。

(编辑: 陈艳霞)