DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210618

# 镓基液态金属柔性应变传感器的设计优化与实验验证*

孙 英[1,2],汪忠晟[1,2],韩智昊[1,2],刘卫朋[1,2]
(1.河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300401;
2.河北工业大学河北省电磁场与电器可靠性重点实验室 天津 300401)

**摘 要**:为了描述传感器微通道结构对传感器输出特性的影响,本文引入传感器横纵微通道长度关系的参数横纵比,综合考虑传感器中垂直和平行于应变方向的微通道中液态金属在应变下的电阻变化规律,建立了镓基液态金属柔性应变传感器数学模型。根据建立的数学模型,优化设计并制备了 5 种应变传感器样品,在 40%应变范围内进行实验。结果表明本文建立的数学模型可以良好地预测不同微通道结构传感器的输出,并为设计优化高灵敏度传感器提供了方向。实验测试结果表明设计的应变传感器在 40%应变时的灵敏度为 2.01、滞后度为 5.1%,且重复性和输出稳定性较高。将设计的传感器用于手指、手肘的关节运动检测,探索了镓基液态金属柔性应变传感器在关节运动检测方面的应用。本文为镓基液态金属柔性应变传感器在可穿戴领域中的应用提供了理论支持。

**关键词**:柔性应变传感器;镓基液态金属;数学模型;可穿戴
**中图分类号**:TP212 TH702 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:510.99

# Design optimization and experimental validation of the gallium-based liquid metal flexible strain sensor

Sun Ying[1,2], Wang Zhongsheng[1,2], Han Zhihao[1,2], Liu Weipeng[1,2]
(*1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China*)

**Abstract**: To describe the influence of the sensor microchannel structure on the output characteristics of the sensor, the relationship parameter of the sensor transverse and longitudinal microchannel length is introduced in this article. A mathematical model of gallium-based liquid metal flexible strain sensor is formulated by comprehensively considering the resistance change law of the liquid metal in the microchannels which are parallel and perpendicular to the strain direction in the sensor. According to the developed mathematical model, five strain sensor samples are optimized and prepared to perform the experiments within 40% strain range. The results show that the mathematical model developed in this article can well predict the output of sensors with different microchannel structures, and provide directions for the design and optimization of high sensitivity sensors. Experimental tests show that the designed strain sensor has a sensitivity of 2.01, a hysteresis of 5.1% at 40% strain, and a high reproducibility and output stability. The designed sensor is used for joint motion detection in the finger and elbow, exploring the application of gallium-based liquid metal flexible strain sensor in joint motion detection. This article provides theoretical support for the application of gallium-based liquid metal flexible strain sensors in the wearable field.

**Keywords**: flexible strain sensor; gallium-based liquid metal; mathematical model; wearable

收稿日期:2022-10-23 Received Date: 2022-10-23
*基金项目:国家自然科学基金(62073118)、河北省省级科技计划(E2017202035)、河北省省级科技计划(E2022202067)项目资助

## 0　引　　言

柔性应变传感器凭借优良的可拉伸性能,可以良好地覆盖在不规则的物体表面,因此在可穿戴传感[1-2]、人体运动监测[3-4]、人机交互[5]等领域具有广阔的应用潜力,得到了研究者们的广泛关注。

研究者们将新型柔性材料,如碳纳米管、石墨烯、镓基液态金属、银纳米线和金属纳米颗粒等,应用于柔性应变传感器的研究中[6-8]。其中,镓基液态金属凭借良好的可变形性、低毒性、高电导率和可回收等优越性能,引起了研究者们的浓厚兴趣[9-12]。利用镓基液态金属良好的可变形性制备柔性应变传感器[13-15],其传感原理为电阻式,即将镓基液态金属封装在弹性基底微通道中,对弹性基底施加应变时,微通道随之发生应变,微通道中的液态金属将产生电阻变化,以反映传感器所受应变。

在柔性应变传感器的研究中,传感器的数学模型能够反映传感器的输入输出特性及各参数对传感器的性能影响,对传感器的设计及优化具有指导意义[16]。因此,对镓基液态金属柔性应变传感器的数学模型进行研究非常必要。

对镓基液态金属柔性应变传感器的数学模型研究,有些研究者采用参数拟合的方法。如 2013 年哈佛大学 Mengüç 等[17]对穿戴式运动传感服装中的镓基液态金属应变传感器进行研究,对实验数据进行线性拟合得到了数学模型;2021 年西安交通大学 Liu 等[18]对制备的可用于检测大应变范围的镓基液态金属应变传感器使用二次多项式拟合实验数据,得到了传感器输出特性曲线来表征传感器的数学模型。上述研究采用参数拟合方法得到的数学模型虽然准确,但仅对特定传感器有效,并且该方法滞后于传感器设计,不能用于预测传感器输出和指导传感器设计[17-18]。

有些研究者采用理论分析的方法,将传感器微通道结构简化为平行于应变方向的微通道,分析其中液态金属在应变下的电阻变化规律,建立传感器的数学模型[19-20]。如 2014 年哈佛大学 Mengüç 等[21]利用镓基液态金属应变传感器设计了一种用于人体步态测量的穿戴式运动传感服装;2017 年高丽大学 Jeong 等[22]将应变传感器与近场通信结合,开发了由镓基液态金属制成的无线人体运动监测系统;2021 年苏州大学刘会聪等[23]制备了基于液态金属微通道的应变传感器,用于人手的手势检测;2021 年宁波大学 Wu 等[24]制备了具有超低检测极限的液态金属应变传感器,用于监测人体活动。上述研究中,均通过分析传感器中平行于应变方向的微通道中液态金属在应变下的电阻变化规律,对镓基液态金属应变传感器建立数学模型。该方法简化了传感器微通道结构,得到的数学模型形式简单,使用方便[21-24],但建模方法未能良好反映传感器微通道结构的影响。因为传感器微通道结构对传感器输出特性具有较大影响[25],因此,需要分别考虑传感器微通道结构中平行和垂直于应变方向的微通道中液态金属在应变下不同的电阻变化规律,分析其对传感器输出特性的影响,对镓基液态金属应变传感器数学模型进行进一步研究,使其能够更好地表征传感器微通道结构的影响。

本文引入传感器横纵微通道长度关系的参数横纵比,综合考虑传感器中垂直和平行于应变方向的微通道中液态金属在应变下的电阻变化,建立镓基液态金属应变传感器的数学模型。根据建立的数学模型,优化设计并制备五种不同微通道结构的传感器样品,在传感器不会损坏的范围内(40% 应变)进行实验测试,验证建立的数学模型的准确性。对制备的传感器进行灵敏度、迟滞性、重复性和输出稳定性测试。将镓基液态金属柔性应变传感器用于检测手指、手肘的人体关节运动,实验结果表明设计和制备的传感器具有良好的性能,在可穿戴领域具有较大的潜在应用。

## 1　镓基液态金属应变传感器数学模型研究

### 1.1　应变传感器结构分析

应变传感器结构示意图如图 1 所示,镓基液态金属被封装在柔性材料,如聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane,PDMS),基底的微通道中。根据传感器微通道与应变方向的相对关系,其微通道结构可以分为纵向微通道,即平行于应变方向的微通道;横向微通道,即垂直于应变方向的微通道。两种微通道在施加应变后具有不同的电阻变化规律[20,26]。因此,为了准确地描述镓基液态金属应变传感器的输出,需要首先对两种不同类型的微通道中液态金属在应变下的电阻变化规律分别进行讨论。

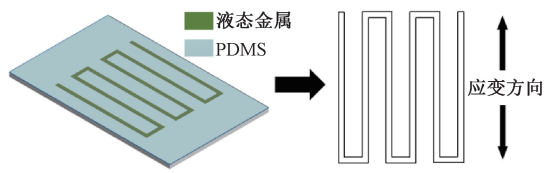



图 1　应变传感器的结构示意图

Fig. 1　Diagram of the strain sensor structure

### 1.2　应变传感器两种微通道应变下电阻变化规律

1)对于纵向微通道,即施加应变方向与微通道方向平行,微通道长度变长,横截面积变小,示意图如图 2 所示。

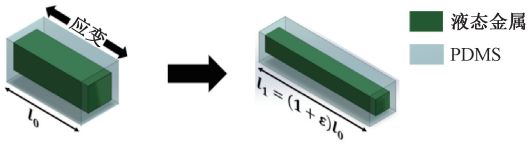



图 2 应变方向与微通道方向平行示意图

Fig. 2 Diagram of strain direction parallel to microchannel direction

施加应变后微通道中液态金属电阻 $R_1$ 与施加应变前微通道中液态金属电阻 $R_0$ 之比为：

$$\frac{R_1}{R_0}=\frac{\rho\dfrac{l_1}{S_1}}{\rho\dfrac{l_0}{S_0}}=\frac{l_1S_0}{l_0S_1} \tag{1}$$

式中：$\rho$ 为液态金属的电阻率，$l_0$ 为微通道的初始长度，$S_0$ 为微通道的初始截面积，$l_1$ 为施加应变后的微通道长度，$S_1$ 为施加应变后的微通道截面积。

由于微通道内充满不可压缩的液体（如液态金属），微通道在应变下的变形受等体积条件约束，即保持体积不变[20]。该约束可表示为施加应变前后微通道内液态金属体积保持不变，即：

$$V_0=V_1 \tag{2}$$

$$l_0S_0=l_1S_1 \tag{3}$$

式中：$V_0$ 为液态金属的初始体积，$V_1$ 为施加应变后液态金属的体积。

将式(3)代入式(1)，得：

$$\frac{R_1}{R_0}=\frac{(l_1)^2}{(l_0)^2} \tag{4}$$

由应变 $\varepsilon$ 的定义 $\varepsilon=(l_1-l_0)/l_0$，得：

$$l_1=(1+\varepsilon)l_0 \tag{5}$$

将式(5)代入式(4)，得：

$$\frac{R_1}{R_0}=(1+\varepsilon)^2 \tag{6}$$

由式(6)可知[20]，当施加应变方向与微通道方向平行时，微通道中液态金属的电阻在施加应变后变大。

2）对于横向微通道，即施加应变方向与微通道方向垂直，微通道长度变短，横截面积变大，示意图如图 3 所示。

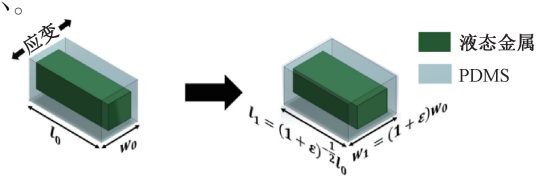



图 3 应变方向与微通道方向垂直示意图

Fig. 3 Diagram of strain direction perpendicular to microchannel direction

施加应变后微通道中液态金属电阻 $R_1$ 与施加应变前微通道中液态金属电阻 $R_0$ 之比为：

$$\frac{R_1}{R_0}=\frac{\rho\dfrac{l_1}{w_1h_1}}{\rho\dfrac{l_0}{w_0h_0}}=\frac{l_1w_0h_0}{l_0w_1h_1} \tag{7}$$

式中：$w_0$ 为微通道的初始宽度，$h_0$ 为微通道的初始高度。$w_1$ 为施加应变后微通道的宽度，$h_1$ 为施加应变后微通道的高度。

液态金属在施加应变前后体积不变，则：

$$l_0w_0h_0=l_1w_1h_1 \tag{8}$$

微通道的宽度方向与施加应变方向平行，则：

$$w_1=(1+\varepsilon)w_0 \tag{9}$$

微通道的长度、高度方向与施加应变方向垂直，则长度、高度方向的应变相同，由式(8)和(9)得：

$$l_1=(1+\varepsilon)^{-\frac{1}{2}}l_0 \tag{10}$$

$$h_1=(1+\varepsilon)^{-\frac{1}{2}}h_0 \tag{11}$$

将式(9)~(11)代入式(7)得：

$$\frac{R_1}{R_0}=\frac{1}{(1+\varepsilon)} \tag{12}$$

由式(12)可知[26]，当施加应变方向与微通道方向垂直时，微通道中液态金属的电阻在施加应变后变小。

由式(6)和(12)可知，在建立液态金属应变传感器数学模型时，需要整体考虑传感器微通道结构，表征两种不同微通道中液态金属的电阻变化。

### 1.3 考虑传感器微通道结构的数学模型构建

将应变传感器微通道划分为平行于应变方向的部分和垂直于应变方向的部分，采用下标 $p$ 和下标 $v$ 来区分，如图 4 所示。$L_p$ 为平行于应变方向的微通道长度，$L_v$ 为垂直于应变方向的微通道长度，则微通道总长度 $L_0=L_p+L_v$。$L$ 为应变传感器整体长度，$D$ 为应变传感器整体宽度。

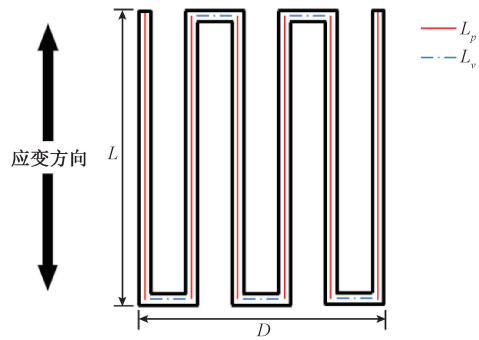



图 4 应变传感器的微通道划分示意图

Fig. 4 Diagram of microchannel division of the strain sensor

应变传感器液态金属初始总电阻 $R_0$ 为:

$$R_0 = R_{p0} + R_{v0} = \rho \frac{L_{p0}}{S_0} + \rho \frac{L_{v0}}{S_0} \tag{13}$$

式中:$R_{p0}$ 为平行于应变方向的微通道中液态金属初始电阻,$R_{v0}$ 为垂直于应变方向的微通道中液态金属初始电阻。$L_{p0}$ 为平行于应变方向的微通道初始长度,$L_{v0}$ 为垂直于应变方向的微通道初始长度。

对应变传感器施加应变后,应变传感器液态金属总电阻 $R_1$ 为:

$$R_1 = R_{p1} + R_{v1} = (1+\varepsilon)^2 R_{p0} + \frac{1}{(1+\varepsilon)} R_{v0} \tag{14}$$

式中:$R_{p1}$ 为施加应变后平行于应变方向的微通道中液态金属电阻,$R_{v1}$ 为施加应变后垂直于应变方向的微通道中液态金属电阻。$R_{p0}$ 在施加应变后增大为 $R_{p1}$,$R_{v0}$ 在施加应变后减小为 $R_{v1}$。由式(14)可知,传感器中 $R_{p0}$ 与 $R_{v0}$ 的比例关系影响了传感器施加应变之后的电阻 $R_1$。

本文将垂直于应变方向的微通道初始长度和平行于应变方向的微通道初始长度的比例关系,即横纵微通道长度关系定义为横纵比,用 $A$ 表示。

$$A = \frac{L_{v0}}{L_{p0}} = \frac{\rho \dfrac{L_{v0}}{S_0}}{\rho \dfrac{L_{p0}}{S_0}} = \frac{R_{v0}}{R_{p0}} \tag{15}$$

横纵比 $A$ 为无量纲,与传感器微通道结构有关。则应变传感器液态金属初始总电阻 $R_0$ 和施加应变后液态金属总电阻 $R_1$ 可表示为:

$$R_0 = (A+1) R_{p0} \tag{16}$$

$$R_1 = (1+\varepsilon)^2 R_{p0} + \frac{A}{(1+\varepsilon)} R_{p0} \tag{17}$$

施加应变后传感器液态金属总电阻 $R_1$ 与施加应变前传感器液态金属总电阻 $R_0$ 之比为:

$$\frac{R_1}{R_0} = \frac{(1+\varepsilon)^2 + \dfrac{A}{(1+\varepsilon)}}{1+A} = \frac{\varepsilon^3 + 3\varepsilon^2 + 3\varepsilon}{(1+A)(1+\varepsilon)} + \frac{1}{1+\varepsilon} \tag{18}$$

式(18)为施加应变后,应变传感器微通道中液态金属电阻的变化规律。在实际制备的液态金属应变传感器中,封装在微通道内的液态金属需要使用两根金属导线引出,才能与外部电路进行连接。因此,引出导线的电阻值也应进行考虑。

$$R_0' = R_0 + R_w \tag{19}$$

式中:$R_0'$ 为考虑引出导线的应变传感器初始电阻值,$R_0$ 为应变传感器微通道中液态金属初始电阻值,$R_w$ 为引出导线的电阻值。

由式(18)可得施加应变后应变传感器微通道中液态金属电阻 $R_1$:

$$R_1 = \left( \frac{\varepsilon^3 + 3\varepsilon^2 + 3\varepsilon}{(1+A)(1+\varepsilon)} + \frac{1}{1+\varepsilon} \right) R_0 \tag{20}$$

考虑引出导线的应变传感器,施加应变后的电阻值 $R_1'$ 为:

$$R_1' = \left( \frac{\varepsilon^3 + 3\varepsilon^2 + 3\varepsilon}{(1+A)(1+\varepsilon)} + \frac{1}{1+\varepsilon} \right) R_0 + R_w \tag{21}$$

考虑引出导线的应变传感器施加应变后的电阻变化率为:

$$\frac{\Delta R}{R_0'} = \frac{R_1' - R_0'}{R_0'} = \left( \frac{\varepsilon^3 + 3\varepsilon^2 + 3\varepsilon}{(1+A)(1+\varepsilon)} - \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} \right) \frac{R_0}{R_0 + R_w} \tag{22}$$

式(22)即为考虑传感器微通道结构的镓基液态金属应变传感器数学模型。传感器在输入应变 $\varepsilon$ 作用下,输出为电阻变化率,其与横纵比 $A$、传感器的液态金属初始电阻 $R_0$、引出导线电阻 $R_w$ 有关。由式(22)可知,在 $R_0$、$R_w$ 相等的情况下,传感器在相同 $\varepsilon$ 下,其输出电阻变化率与横纵比 $A$ 成反比。

可利用式(22)推导得出灵敏度($GF$):

$$GF = \left( \frac{\Delta R}{R_0'} \right) \varepsilon^{-1} = \left( \frac{\varepsilon^2 + 3\varepsilon + 3}{(1+A)(1+\varepsilon)} - \frac{1}{1+\varepsilon} \right) \frac{R_0}{R_0 + R_w} \tag{23}$$

灵敏度($GF$)是传感器的重要性能指标,为传感器输出变化量与输入变化量之比。对于镓基液态金属柔性应变传感器,输入量应变相同,输出量电阻变化率越大,传感器灵敏度就越大。由式(23)可知,传感器灵敏度与横纵比 $A$ 成反比,与 $R_0/(R_0+R_w)$ 成正比。

## 2　镓基液态金属应变传感器设计与制备

本文设计了 5 种不同微通道结构的应变传感器。传感器的微通道宽度 $w$ 和微通道高度 $h$ 相同,均为 0.5 mm。样品 1 ~ 3 的传感器微通道总长度 $L_0$ 为 130.5 mm。样品 4 的微通道总长度 $L_0$ 为 301.5 mm,样品 5 的微通道总长度 $L_0$ 为 360.5 mm。传感器样品 1~5 的结构参数如表 1 所示。施加应变方向与应变传感器微通道相对关系如图 5 所示。

基于课题组之前镓基液态金属柔性 NFC 天线的制备方法[27],对镓基液态金属应变传感器进行制备,实物如图 6(a)所示。传感器具有良好的柔性和可拉伸性,能够承受较大程度的拉伸、弯曲和应变,如图 6(b)所示。

设计、制备应变传感器时,相关参数如下:传感器使用两根铜材质引出线,长度均为 9 cm,因此传感器引出导

**表 1 传感器几何结构参数**

**Table 1 Configuration parameters of the sensors**

| 编号 | $L_0$/mm | $L_p$/mm | $L_v$/mm | 横纵比 $A$ | $L$/mm | $D$/mm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 样品 1 | 130.5 | 27.0 | 103.5 | 3.142 9 | 32 | 12 |
| 样品 2 | 130.5 | 94.5 | 36.0 | 0.381 0 | 11 | 41 |
| 样品 3 | 130.5 | 112.5 | 18.0 | 0.160 0 | 13 | 23 |
| 样品 4 | 301.5 | 283.5 | 18.0 | 0.063 5 | 32 | 23 |
| 样品 5 | 360.5 | 346.5 | 14.0 | 0.040 4 | 50 | 18 |

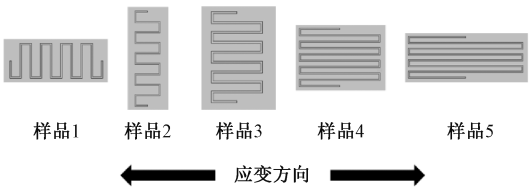
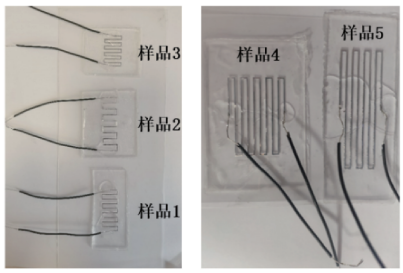


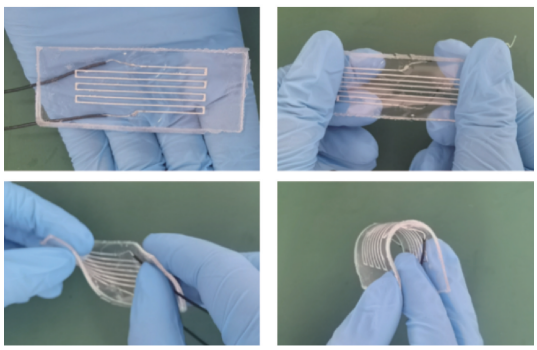

图 5 5 种不同微通道结构的应变传感器

Fig. 5 Strain sensors with 5 different microchannel structures




(a) 传感器实物

(a) Physical object of sensors



(b) 传感器柔性展示

(b) Flexible display of sensors

图 6 传感器实物展示

Fig. 6 Physical display of sensors

线电阻 $R_w$ 为 0.040 1 Ω(基于厂家给出的导线电阻率 227 Ω/km 得到)。使用的镓基液态金属为镓铟合金 EGaIn(75%Ga,25%In),电阻率 $\rho$ 为 $29.4\times10^{-6}$ Ω·cm[20]。由传感器实物可以得到传感器初始电阻 $R_0'$ 的实测值,如表 2 所示。由表 2 可知,根据设计参数得到的计算值与实测值,电阻误差最大为 2.80%,较小的误差表明计算得到的传感器电阻基本准确,证明了数学模型计算的准确性。因此传感器设计完成后,基于建立的数学模型可以先于传感器制备与实验测试得到传感器输出。

**表 2 传感器样品初始电阻**

**Table 2 Initial resistance of the sensor samples**

| 编号 | $R_0$/Ω | 初始电阻 $R_0'$/Ω | | 误差/% |
|---|---|---|---|---|
| | | 计算值 | 实测值 | |
| 样品 1 | 0.153 5 | 0.193 6 | 0.190 5 | 1.60 |
| 样品 2 | 0.153 5 | 0.193 6 | 0.192 0 | 0.83 |
| 样品 3 | 0.153 5 | 0.193 6 | 0.191 2 | 1.24 |
| 样品 4 | 0.354 6 | 0.394 7 | 0.386 2 | 2.15 |
| 样品 5 | 0.423 9 | 0.464 0 | 0.451 0 | 2.80 |

传感器柔性基底采用 PDMS 制备。根据课题组以往研究[27]中的实验结果,为防止传感器柔性基底 PDMS 在施加过大应变时损坏,本文施加应变最大为 40%。根据式(23)可知,横纵比 $A$ 为影响传感器灵敏度的主要因素。因此由式(23),及传感器的相关设计参数,计算得到 40%应变下灵敏度与横纵比的关系曲线,如图 7 所示。

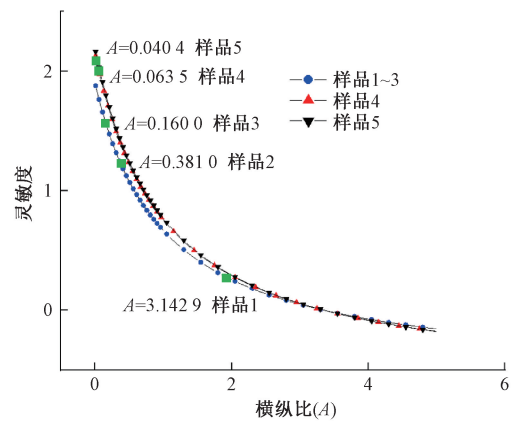



图 7 样品 1~5 的灵敏度与横纵比的关系曲线

Fig. 7 Relationship between sensitivity and aspect ratio of samples 1~5

根据图 7 选择传感器样品 1~5 的横纵比。由图 7 可知,在传感器的其他参数相等的情况下,灵敏度与横纵比成反比;若设计高灵敏度的传感器,应选择较小的横纵比。因此,样品 1~3 选择了由大到小的横纵比 $A$,分别为 3.142 9、0.381 0、0.160 0。根据数学模型计算可得,样品 1~3 在 40% 应变时的灵敏度分别为 0.03、1.22、1.56。

根据式(23)可知,增大微通道总长度 $L_0$,也可提高传感器的灵敏度。故设计高灵敏度传感器样品 4,选择 $L_0$ 为 301.5 mm,横纵比 $A$ 为 0.063 5。计算可得样品 4 在 40% 应变时的灵敏度为 1.99,灵敏度较样品 1~3 有较大提升。

考虑用于手指、手肘的关节运动检测场景,需要将传感器尺寸设计得细且长,易于固定,且保证传感器的高灵敏度。因此样品 5 的传感器微通道总长度 $L_0$ 为最长,360.5 mm;横纵比 A 选择为最小,0.040 4。根据数学模型计算样品 5 在 40% 应变时的灵敏度为 2.08。此时传感器整体长度为 50 mm,整体宽度为 18 mm,尺寸适合固定在手指、手肘进行关节运动检测。

## 3　数学模型验证

采用如图 8 所示的应变实验系统对传感器进行实验测试。实验系统通过步进电机控制滑台移动,对固定在滑台上的应变传感器施加应变。采用恒流电源对传感器供电,采用示波器测量应变传感器两端的电压变化。应变传感器流过的电流恒定,则施加应变之后传感器两端电压的变化即可反映传感器电阻的变化。

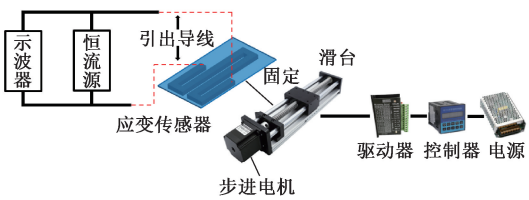



图 8　应变实验系统示意图

Fig. 8　Diagram of the strain experiment system

使用应变实验系统对样品进行测试,设置电机速度为 2 mm/s,施加应变为 40%。样品 1~3 的实验结果与本文建立的数学模型的计算结果如图 9 所示。样品 1~3 在施加应变后电阻变化率均为正。其中,样品 2 和 3 的电阻增大明显,且样品 3 的电阻变化率比样品 2 大。其中,样品 1 在施加应变后,在最大 40% 应变时,电阻变化率仅有 3.15%,其原因为样品 1 的横纵比 $A$ 为 3.142 9,过大的横纵比使传感器在相同应变下电阻变化率下降。

根据本文建立的数学模型对实验结果进行分析,在传感器液态金属初始电阻 $R_0$、引线电阻 $R_w$ 相等的情况下,传感器灵敏度与横纵比 $A$ 成反比。$R_0$、$R_w$ 相等的样品 1~3 中,横纵比 $A$ 最小的样品 3 在 40% 应变下电阻变化率最大,即灵敏度最大,为 1.46;横纵比 $A$ 居中的样品 2 在 40% 应变下电阻变化率居中,灵敏度为 1.14;横纵比 $A$ 最大的样品 1 在 40% 应变下电阻变化率最小,灵敏度最小,为 0.079。实验结果与本文建立的数学模型分析结果趋势一致。

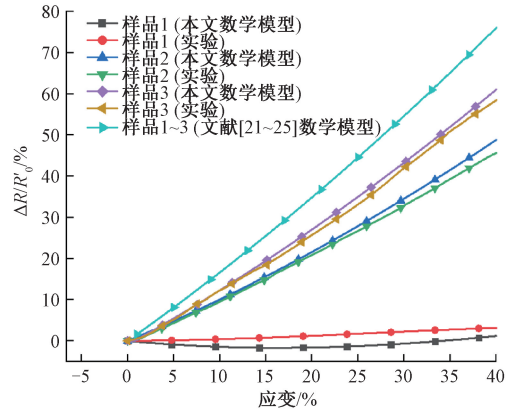



图 9　样品 1~3 的输出特性

Fig. 9　Output characteristics of samples 1~3

本文同时依据文献[21-25],计算了只考虑平行于应变方向微通道情况时,应变($\varepsilon$)与电阻变化率($\Delta R/R_0'$)之间的关系曲线,即图 9 中最上方的曲线。由图 9 可知,只考虑平行于应变方向微通道情况时,样品 1~3 的数学模型计算结果与实验结果严重不符。其原因为只考虑平行于应变方向的微通道,未考虑垂直于应变方向的微通道,数学模型不能反映传感器微通道结构中平行和垂直于应变方向的微通道中液态金属在应变下不同的电阻变化规律,误差较大。而本文建立的数学模型,通过引入与传感器微通道结构有关的参数横纵比 $A$,将传感器中两种微通道对输出的影响进行表征。由图 9 可知,本文建立的数学模型可以对样品 1~3 分别进行描述,且与实验结果吻合较好。

样品 4~5 的实验结果与本文建立的数学模型计算结果如图 10 所示。虽然样品 4 和 5 在整体尺寸上有较大不同,但两者具有相近的输出特性曲线,且在 40% 应变时,电阻变化率均比样品 1~3 大。由实验结果图 10 可知,样品 4~5 在 40% 应变下获得了比样品 3 均更大的电阻变化率,样品 4 的灵敏度为 1.99,相比样品 3 增大了 36.3%;样品 5 的灵敏度为 2.01,相比样品 3 增大了 37.67%。

根据本文建立的数学模型(如式(22)所示)对实验结果进行分析,在传感器设计时增大传感器液态金属初始电阻 $R_0$,减小横纵比 $A$,可以得到更高灵敏度的传感器。由图 10 可知,样品 4~5 的实验结果与分析结果趋

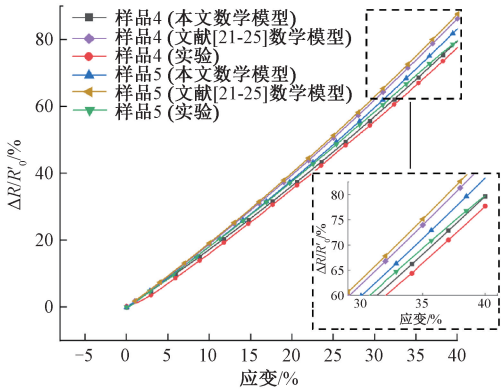



图 10 样品 4~5 的输出特性

Fig. 10 Output characteristics of samples 4~5

势一致,表明本文建立的数学模型(如式(22)所示)对高灵敏度传感器设计具有指导作用。同时由图 10 可知,本文建立的数学模型与样品 4~5 实验结果的吻合程度好于文献[21-25]的数学模型。

为分析图 9、10 中的模型计算结果与实验结果,采用实验测试结果与数学模型计算结果的平均相对误差和最大绝对误差来描述两种数学模型与实验结果的吻合程度,如表 3 所示。

**表 3 不同传感器样品的误差**

**Table 3 Error of different sensor samples** %

| 编号 | 本文建立的数学模型 | | 只考虑平行于应变方向微通道的数学模型 | |
|---|---|---|---|---|
| | 平均相对误差 | 最大绝对误差 | 平均相对误差 | 最大绝对误差 |
| 样品 1 | 267.97 | 3.00 | 3 039.43 | 73.00 |
| 样品 2 | 5.89 | 3.20 | 70.92 | 30.46 |
| 样品 3 | 3.81 | 2.57 | 35.79 | 17.60 |
| 样品 4 | 6.56 | 1.98 | 16.16 | 8.63 |
| 样品 5 | 2.87 | 3.55 | 8.72 | 7.96 |

由表 3 可知,采用本文建立的数学模型进行建模,样品 1~5 的最大绝对误差均小于 4%,样品 2~5 的平均相对误差均小于 7%。样品 1 的最大绝对误差较小,但平均相对误差较大,其原因是由于电阻变化率过小,导致平均相对误差较大。通过误差分析可知,本文建立的数学模型与实验结果吻合良好,准确性得到了验证,误差均小于只考虑平行于应变方向微通道的数学模型。

综合可知,本文建立的数学模型可以良好地预测样品 1~5 的实验结果。在建立的数学模型中引入描述传感器微通道结构的参数横纵比,在描述不同微通道结构的传感器时数学模型误差较小。同时,参数横纵比为设计高灵敏度传感器提供了方向,在设计传感器时,可以减小横纵比,增大传感器微通道总长度,获得高灵敏度的传感器,在高灵敏度传感器设计中具有良好的实际应用价值。

## 4 传感器实验测试

样品 5 的尺寸可以更方便地安装在人体上,对手指、手肘的关节运动进行检测。因此,对样品 5 进行了灵敏度、迟滞性、重复性、输出稳定性测试,并将其用于手指、手肘的人体关节运动检测实验。

### 4.1 样品 5 的灵敏度测试与分析

将实验得到的样品 5 的灵敏度与根据式(23)计算得到的灵敏度进行对比,如图 11 所示,由于传感器具有二次型特性,传感器灵敏度随应变增大而增大。在 40% 应变下,传感器的灵敏度理论计算值为 2.08,实验结果为 2.01,平均相对误差为 1.48%。传感器灵敏度理论计算值与实验结果吻合良好。这表明根据数学模型设计的传感器具有可靠的传感性能。

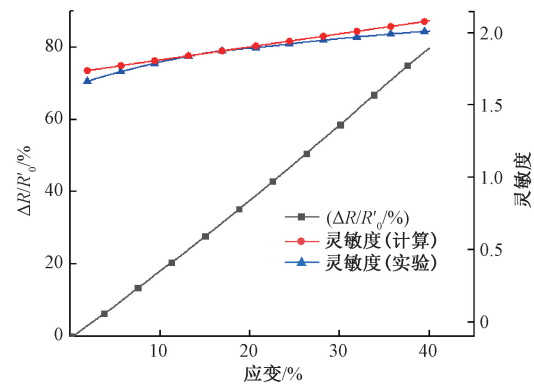



图 11 样品 5 的灵敏度

Fig. 11 Sensitivity of sample 5

### 4.2 样品 5 的迟滞性测试与分析

应变传感器的迟滞大小可以用滞后度(*DH*)来表示[24],如式(24)所示。

$$DH = \frac{A_{loading} - A_{unloading}}{A_{loading}} \times 100\% \tag{24}$$

其中,$A_{loading}$ 为应变加载过程中传感器的输出特性曲线与横坐标轴所围成的面积,$A_{unloading}$ 为应变卸载过程中传感器的输出特性曲线与横坐标轴所围成的面积。

对样品 5 进行应变加载、卸载实验。设置电机速度为 2 mm/s,施加应变为 40%,样品 5 的迟滞性测试结果如图 12 所示。通过式(25)计算得传感器的滞后度 *DH* 约为 5.1%,与文献[21](7.8%)和文献[24](7%)相比,传感器迟滞性较小。

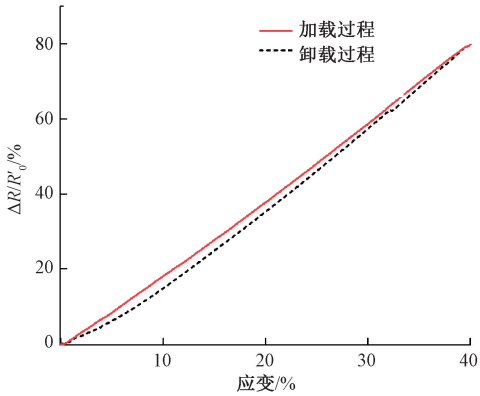
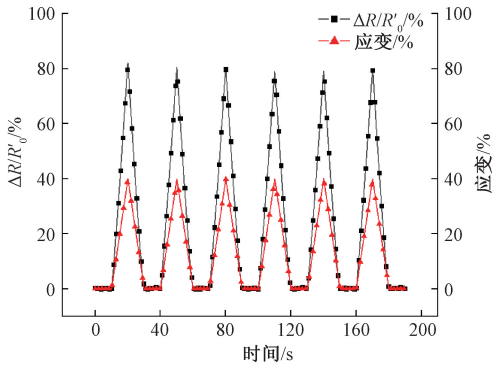



图 12　样品 5 的迟滞性

Fig. 12　Hysteresis of sample 5

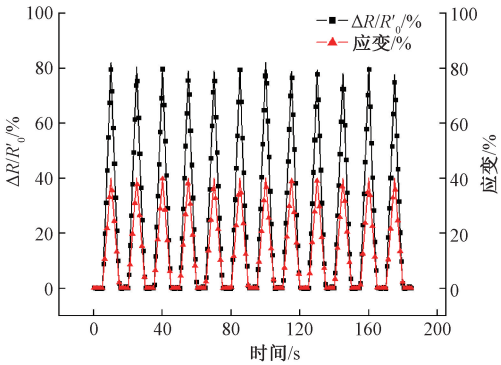
## 4.3　样品 5 的重复性测试与分析

对样品 5 进行应变重复加载实验。设置电机速度为 2 mm/s,连续施加 6 次 40% 应变,样品 5 的重复性测试结果如图 13(a)所示。在连续 6 次 40% 应变施加过程中,传感器的输出特性曲线可以良好地跟随施加的应变变化,且在每次应变施加过程中,传感器的输出特性曲线几乎重合。同时,6 次测量中,施加应变达到最大值时,传感器对应输出值保持稳定,可复现,没有发生剧烈变化,表明传感器具有良好的重复性,在进行连续多次测量时,每一次的测量结果均准确可靠。




(a) 电机速度2 mm/s

(a) Motor speed 2 mm/s




(b) 电机速度4 mm/s

(b) Motor speed 4 mm/s

图 13　样品 5 的重复性

Fig. 13　Repeatability of sample 5

当设置电机速度为 4 mm/s,即施加应变频率加倍时,传感器的输出特性曲线随施加应变以相同频率快速变化。如图 13(b)所示,在连续 12 次快速循环中,施加应变达到最大值时,传感器对应输出值没有发生剧烈变化,这表明传感器在应变快速变化的应用场合也可良好工作。

## 4.4　样品 5 的输出稳定性测试与分析

对样品 5 进行输出稳定性实验。设置电机速度为 2 mm/s,对传感器依次施加 10%、20%、30% 和 40% 的应变,并在达到该应变值时保持 10 s,样品 5 的输出稳定性测试结果如图 14 所示。由实验结果可知,传感器输出特性曲线可以准确地与应变变化保持一致。在应变保持状态下,传感器输出十分稳定,在 10%、20% 和 30% 应变下保持 10 s,几乎没有产生输出衰减。在 40% 应变下保持 10 s,传感器输出仅产生了 0.64% 的衰减,可以忽略不计,这表明传感器在应变持续保持的情况下仍可准确输出。

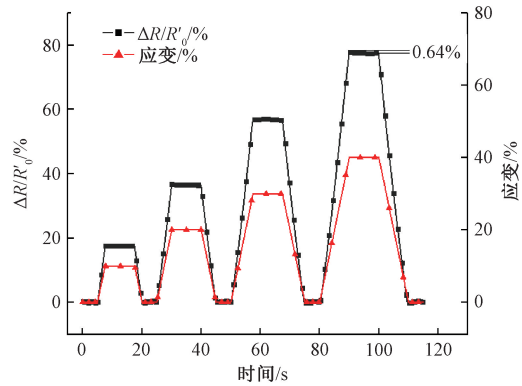



图 14　样品 5 的输出稳定性

Fig. 14　Output stability of sample 5

## 4.5　样品 5 的可穿戴应用研究

镓基液态金属柔性应变传感器具有良好的柔性,可以与人体皮肤良好地贴合,在可穿戴应用方面具有很大的潜力。因此,将传感器样品 5 固定在手指、手肘的人体关节处进行可穿戴应用运动检测。

1)镓基液态金属柔性应变传感器可应用于手指运动检测。将传感器固定在被测者的食指上,被测者食指随机进行如图 15 中②、③、④幅度的弯曲和如①的伸展,食指伸展、弯曲时传感器的输出曲线如图 15 所示。令食指每次弯曲后保持一段时间,方便观察传感器响应。例如在 0~20 s 内,被测者食指伸展到如①幅度→弯曲如③幅度→弯曲到如②幅度→伸展到如①幅度,完成一次食指

的运动检测。由图 15 的实验结果可知,传感器可以清晰地区分被测者食指的状态。当食指弯曲幅度相近,如图中②、③时,传感器输出可以将手指的状态区分出来,且传感器响应迅速、输出稳定。实验结果表明镓基液态金属柔性应变传感器在手指弯曲检测与手势识别领域具有较大应用潜力。

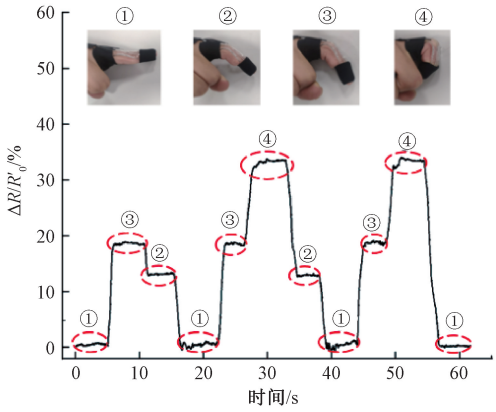



图 15 手指运动时传感器响应

Fig. 15 Sensor response during finger movement

2)镓基液态金属柔性应变传感器可应用于肘部运动监测。将传感器固定在被测者的肘部,令肘部分别进行两次小弯曲、两次中等弯曲和两次大弯曲,实验结果如图 16 所示。图 16 的实验结果表明,传感器可以检测到被测者手肘的弯曲,弯曲程度越大,传感器输出越大;传感器输出对不同程度的肘部弯曲明显不同,可以清晰地区分。实验结果表明镓基液态金属柔性应变传感器在人体手肘关节运动监测领域也具有较大应用潜力。

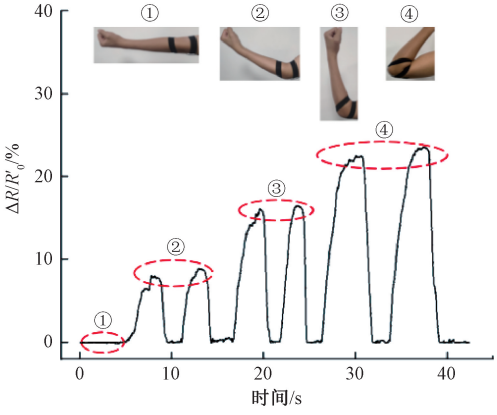



图 16 手肘运动时传感器响应

Fig. 16 Sensor response during elbow movement

## 5 结 论

本文构建了镓基液态金属柔性应变传感器数学模型,可以良好预测镓基液态金属柔性应变传感器的输出,也可用于指导高灵敏度传感器的优化设计,具有实际应用价值。在数学模型中引入描述传感器横纵微通道长度关系的参数横纵比,综合反映传感器中垂直和平行于应变方向的微通道中液态金属在应变下对传感器输出的影响规律,有效表征了传感器微通道结构对传感器输出特性的影响。

在 40% 应变范围内对设计制备的 5 种不同微通道结构传感器样品进行实验测试,验证了建立的数学模型的准确性。实验结果与数学模型分析均表明,横纵比与传感器灵敏度成反比,为优化设计高灵敏度传感器提供了方向。在设计制备的传感器样品 1~5 中,具有最小横纵比的样品 5 在 40% 应变时的灵敏度最高,为 2.01。样品 5 的滞后度为 5.1%,且具有较高的重复性和输出稳定性。利用样品 5 可以实现手指、手肘的人体关节运动检测。

由于制备的传感器样品施加过大应变时有损坏的风险,故本文仅进行了 40% 应变范围内的实验测试。在后续的研究中,还需研制能够承受更大应变的传感器。总之,本文建立的镓基液态金属柔性应变传感器数学模型在优化设计高灵敏度传感器方面具有实际价值,设计的镓基液态金属柔性应变传感器在可穿戴应用领域具有较大的应用潜力。

## 参考文献

[1] LIU J, LIU M, BAI Y, et al. Recent progress in flexible wearable sensors for vital sign monitoring[J]. Sensors, 2020, 20(14): 4009.

[2] GAO W, OTA H, KIRIYA D, et al. Flexible electronics toward wearable sensing[J]. Accounts of Chemical Research, 2019, 52(3): 523-533.

[3] MATSUZAKI R, TABAYASHI K. Highly stretchable, global, and distributed local strain sensing line using gainsn electrodes for wearable electronics[J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25(25): 3806-3813.

[4] CHOI D Y, KIM M H, OH Y S, et al. Highly stretchable, hysteresis-free ionic liquid-based strain sensor for precise human motion monitoring[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(2): 1770-1780.

[5] MENCARINI E, RAPP A, TIRABENI L, et al. Designing wearable systems for sports: A review of trends and opportunities in human-computer interaction[J].

IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2019, 49(4): 314-325.

[6] 李法利,李晟斌,曹晋玮,等. 弹性敏感材料与传感器件[J]. 材料导报,2020,34(1):1059-1068.
LI F L, LI SH B, CAO J W, et al. Elastic sensitive materials and sensors[J]. Materials Reports, 2020, 34(1): 1059-1068.

[7] LIU H, LI Q, ZHANG S, et al. Electrically conductive polymer composites for smart flexible strain sensors: A critical review[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(45): 12121-12141.

[8] YEE M J, MUBARAK N M, ABDULLAH E C, et al. Carbon nanomaterials based films for strain sensing application—A review[J]. Nano-Structures & Nano-Objects, 2019, 18: 100312.

[9] CHIECHI R C, WEISS E A, DICKEY M D, et al. Eutectic gallium-indium (EGaIn): A moldable liquid metal for electrical characterization of self-assembled monolayers[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2008, 47(1): 142-144.

[10] DICKEY M D, CHIECHI R C, LARSEN R J, et al. Eutectic gallium-indium (EGaIn): A liquid metal alloy for the formation of stable structures in microchannels at room temperature[J]. Advanced Functional Materials, 2008, 18(7): 1097-1104.

[11] LIU T, SEN P, KIM C. Characterization of nontoxic liquid-metal alloy galinstan for applications in microdevices[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21(2): 443-450.

[12] TENG L, YE S, HANDSCHUH-WANG S, et al. Liquid metal-based transient circuits for flexible and recyclable electronics[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(11): 1808739.

[13] 姚建涛, 陈俊涛, 陈新博,等. 可嵌入式多维柔性力/位传感器[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 184-192.
YAO J T, CHEN J T, CHEN X B, et al. Embedded flexible multi-dimensional displacement and force sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10): 184-192.

[14] WON P, JEONG S, MAJIDI C, et al. Recent advances in liquid-metal-based wearable electronics and materials[J]. Iscience, 2021, 24(7): 102698.

[15] BAHARFAR M, KALANTAR-ZADEH K. Emerging role of liquid metals in sensing[J]. ACS Sensors, 2022, 7(2): 386-408.

[16] 徐科军,马文. 传感器数学模型的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),1990(1):82-89.
XU K J, MA W. Research of mathematical model of transducer[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 1990(1): 82-89.

[17] MENGÜÇ Y, PARK Y L, MARTINEZ-VILLALPANDO E, et al. Soft wearable motion sensing suit for lower limb biomechanics measurements[C]. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2013: 5309-5316.

[18] LIU J, LEI B, JIANG W, et al. A novel intrinsically strain sensor for large strain detection[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 332: 113081.

[19] WHITE E L, CASE J C, KRAMER R K. Multi-mode strain and curvature sensors for soft robotic applications[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 253: 188-197.

[20] KIM S, OH J, JEONG D, et al. Consistent and reproducible direct ink writing of eutectic gallium-indium for high-quality soft sensors[J]. Soft Robotics, 2018, 5(5): 601-612.

[21] MENGÜÇ Y, PARK Y L, PEI H, et al. Wearable soft sensing suit for human gait measurement[J]. The International Journal of Robotics Research, 2014, 33(14): 1748-1764.

[22] JEONG Y R, KIM J, XIE Z, et al. A skin-attachable, stretchable integrated system based on liquid GaInSn for wireless human motion monitoring with multi-site sensing capabilities[J]. NPG Asia Materials, 2017, 9(10): e443-e443.

[23] 刘会聪,杨梦柯,袁鑫,等. 液态金属柔性感知的人机交互软体机械手[J]. 中国机械工程,2021,32(12):1470-1478.
LIU H C, YANG M K, YUAN X, et al. Liquid metal based flexible sensors for soft manipulator towards human-machine interaction[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(12): 1470-1478.

[24] WU Y, ZHOU Y, ASGHAR W, et al. Liquid metal - based strain sensor with ultralow detection limit for human-machine interface applications [J]. Advanced Intelligent Systems, 2021, 3(10): 2000235.

[25] CHEN J, ZHANG J, LUO Z, et al. Superelastic, sensitive, and low hysteresis flexible strain sensor based on wave-patterned liquid metal for human activity monitoring[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(19): 22200-22211.

[26] MICHAUD H O, TEIXIDOR J, LACOUR S P. Soft metal constructs for large strain sensor membrane[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(3): 035020.

[27] 孙英,刘乃源,翁玲,等. 基于镓基液态金属的高带宽柔性 NFC 标签天线设计及特性测试[J]. 仪器仪表学报,2021,42(7):216-225.
SUN Y, LIU N Y, WENG L, et al. Design and characteristic of high bandwidth flexible NFC tag antenna based on gallium-based liquid metal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 216-225.

## 作者简介

**孙英**(通信作者),分别于 1994 年、2001 年和 2008 年于河北工业大学获得学士、硕士、博士学位,现为河北工业大学教授、研究生导师,主要研究方向为智能材料与器件。
E-mail: sunying@hebut.edu.cn

**Sun Ying** (Corresponding author) received her B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Hebei University of Technology in 1994, 2001, and 2008, respectively. She is currently a professor and a master advisor at Hebei University of Technology. Her main research interest is intelligent materials and devices.

**汪忠晟**,2018 年于天津大学获得学士学位,现为河北工业大学硕士研究生,主要研究方向为智能材料与器件。
E-mail: wangzs1996@qq.com

**Wang Zhongsheng** received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2018. He is currently a master student at Hebei University of Technology. His main research interest is intelligent materials and devices.