

基于液态金属柔性纤维传感器的力电耦合性能仿真研究

康瑛楠^{1,2}, 王若馨^{1,2}, 李楠^{1,2,3*}

(1. 西北工业大学自动化学院西安 710129; 2. 西北工业大学深圳研究院深圳 518057;
3. 西安电子科技大学高性能装备机电集成制造全国重点实验室西安 710071)

*Email: nan.li@hotmail.co.uk

摘要: 为了深入理解不同结构柔性纤维传感器在多物理场作用下的性能表现, 为其在实际应用中的优化提供科学依据。本文

利用 Comsol Multiphysics 对液态金属柔性纤维传感器进行有限元仿真研究。首先, 建立三维模型, 在流固耦合多物理场下对

液态金属柔性纤维传感器进行轴向拉伸和径向压缩变形分析; 然后, 引入静电场, 分析固体力学-层流多场耦合下液态金属柔

性纤维传感器阻抗的变化, 分析其电特性和机械性能之间的相互影响。

关键词: 柔性纤维传感器; 液态金属; 无损检测技术; 有限元仿真

1、研究背景

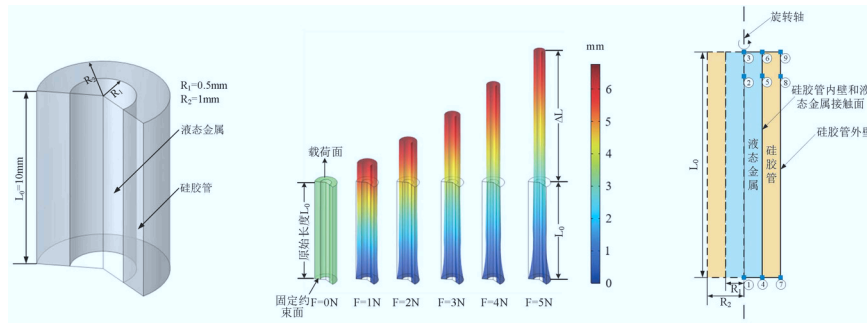
液态金属 (LM) 是一类在室温或接近室温时保持液态的金属。液态金属本身是一种可变形导体, 能够自由流动而不影响其导电性。这种独特的特性允许其与柔性基底材料无缝集成 [1]。因此, 液态金属是已知材料中导电性和变形性最好的结合, 基于液态金属的柔性传感器具有巨大的应用和发展潜力 [2]。

本文以基于液态金属的柔性纤维传感器为研究对象, 通过 COMSOL 软件进行了液态金属柔性纤维传感器的有限元仿真研究。首先在流固耦合多物理场下对传感器进行轴向拉伸、径向压缩变形分析, 再添加静电场, 分析传感器在变形时的阻抗变化。

2、研究内容

2.1 轴向拉伸仿真

利用 Comsol Multiphysics 进行了液态金属柔性纤维传感器的轴向拉伸仿真研究。建立的三维模型如图 1(a) 所示。中间是液态金属, 半径 R_1 为 0.5mm, 液态金属外是硅胶管包覆层, 管壁厚度 ΔR 为 0.5mm, 所以 R_2 为 1mm, 原始长度 L_0 为 10mm。



(a) 三维模型图

(b) 结果图

图 1 轴向拉伸图

在进行轴向拉伸仿真时，我们采用了流固耦合多物理场，在力学部分仿真中，我们对传感器的一端进行固定约束，在传感器的另一端施加边界载荷，利用参数化扫描将固定载荷从 0N 递增到 30N，扫描步长为 1N，可得到如图 1(b) 所示的结果图。图中清晰展示了在逐渐增加的载荷的作用下，传感器的形变参数的变化过程。

在轴向拉伸过程中，液态金属柔性纤维传感器的轴向长度不断增加，液态金属的半径 R_1 和管壁厚度 ΔR 呈现持续减小的趋势，这一动态变化过程如图 2 所示。

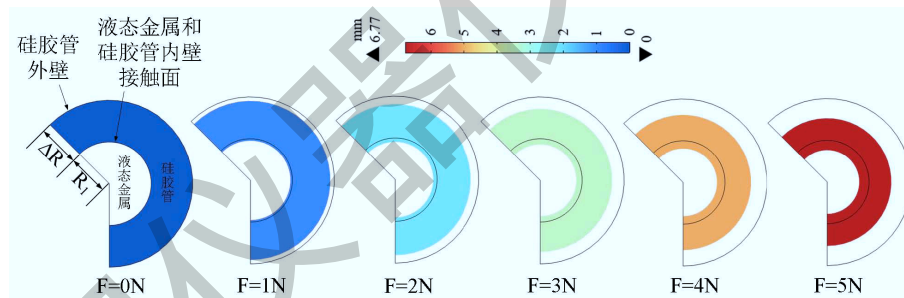


图 2 轴向载荷下的径向截面变化结果图

在仿真过程中，建立二维轴对称模型，如图 3(a) 所示，液态金属和硅胶管绕对称轴旋转一周，即可得到如图 1(a) 所示的模型。分别选取了 9 个点，并在拉伸结束后得到了这 9 个点的位移，如图 3(b) 所示。

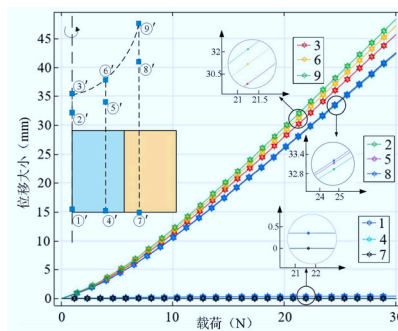
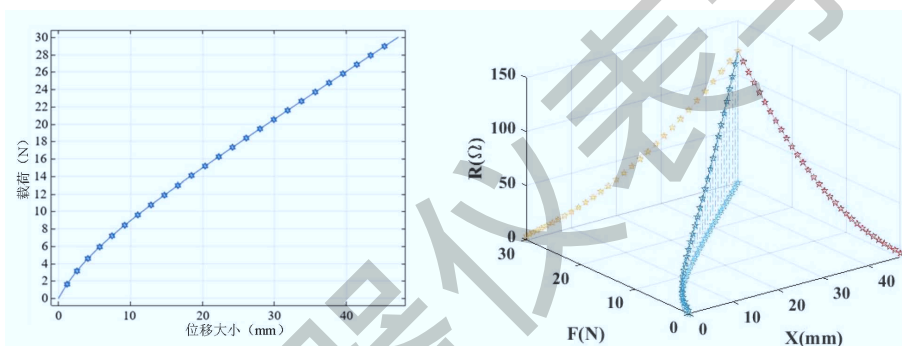


图 3 取 9 个点的位移图

由于在固体力学模块中设置了一端固定约束，所以 1、4、7 号点几乎没有位移； 2、5、8 三个点接近顶端，其位移几乎保持一致，但是由于边界载荷施加在硅胶管上，所以 8 号点位移最大；另外， 3、6、9 三个点在顶端，其中， 9 号点位移最大， 6 号点次之， 3 号点位移最小。可见，在拉伸过程中，由于液态金属和硅胶管管壁之间的摩擦，硅胶管被拉伸之后液态金属也会随之发生位移，但是液态金属的位移量相较于硅胶管较少，而且越靠近顶端，液态金属和硅胶管的位移差越大。所以，在硅胶管被拉伸到极限情况下，液态金属可能会断开，从而导致传感器发生断路。

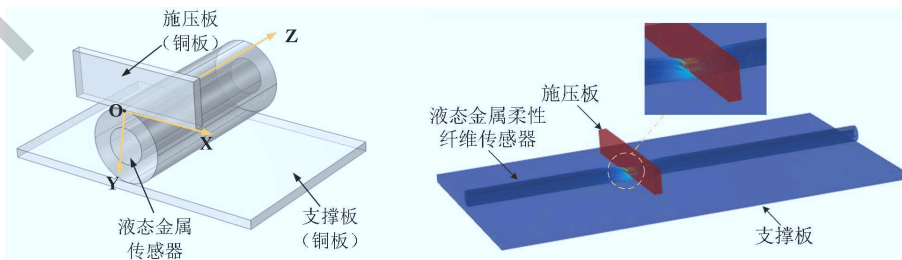
图 4(a) 所示为液态金属柔性纤维传感器在轴向拉伸过程中的载荷 - 位移曲线图，随着载荷不断增加，位移也在不断增加，但在初始阶段，硅胶管具有较高的刚度，即材料的刚性程度较大，硅胶管受到的拉伸应力可能无法克服材料的刚度，从而导致位移较小。图 4(b) 展示了在不同载荷作用下，传感器的位移如何随之变化，并同时考虑了其电阻的响应。这三者之间的关系图揭示其电特性和机械性能之间的相互影响。



(a) 载荷 - 位移关系图 (b) 位移 - 载荷 - 电阻关系图图 4 轴向拉伸曲线图

2.2 径向压缩仿真

首先建立三维模型，如图 5(a) 所示。模型的底部是支撑板，上方是施压板，这两个材料设置都是铜（从库中添加材料，采用默认参数），在模型的中央位置，我们置入了所研究的液态金属传感器。坐标原点 0 固定于图 5(a) 中纤维侧面与铜板相接触的点， X 轴沿铜板底端， Y 轴沿截面直径方向向下， Z 轴沿纤维表面沿伸以此建立坐标系。

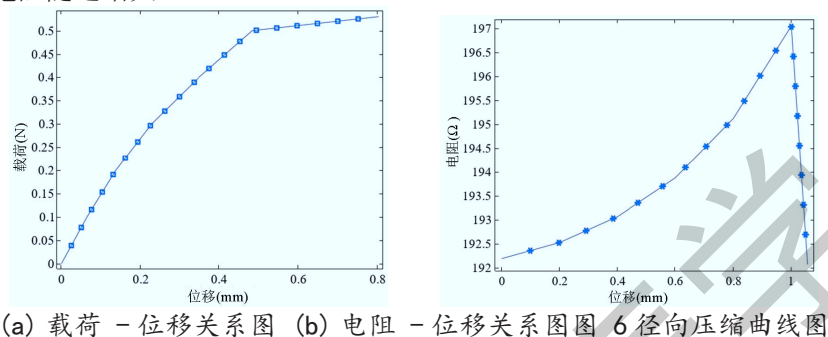


(a) 三维模型图 (b) 结果图图 5 径向压缩图

在进行径向压缩仿真时，利用参数化扫描功能将上方的施压板沿 Y 轴方向垂直向下进行指定

位移, 从 0mm 递增到 1mm, 扫描步长为 0.1mm, 液态金属柔性纤维传感器持续受到挤压作用, 得到如图 5(b) 所示结果图。

图 6(a) 所示为液态金属柔性纤维传感器在径向压缩过程中的载荷 - 位移曲线图, 图 6(b) 展示了施压板在向下施压过程中电阻 - 位移曲线图, 液态金属柔性纤维传感器不断受到挤压, 这一挤压导致了传感器内部微观结构的变化, 特别是液态金属的分布发生了调整。受挤压处导体横截面积减小, 电阻随之增大。



(a) 载荷 - 位移关系图 (b) 电阻 - 位移关系图 图 6 径向压缩曲线图

3、结论

本研究得出的结论如下:

(1) 随轴向拉伸载荷的增加, 液态金属柔性纤维传感器的长度最大可变形至原始长度的 675%, 纤维壁在轴向拉伸过程中均匀的沿径向施加压缩载荷, 进而导致其电学性能 (电阻) 发生变化。传感器在轴向方向被拉伸越长, 电阻越大。

(2) 在径向压缩时, 随着液态金属柔性纤维传感器不断受到挤压, 受挤压处导体横截面积减小, 电阻随之增大。

基金资助:

国家自然科学基金面上项目 52275545; 陕西省科技厅 重点产业创新链 (群)- 工业领域 (2023-ZDLGY-41); 广东省基础与应用基础研究基金 (2023B1515120080)

参考文献

- [1] Choi Y Y, Ho D H and Cho J H, Self-healable hydrogel-liquid metal composite platform enabled by a 3D printed stamp for a multimodular sensor system[J]. ACS applied materials & interfaces, 2020, 12(8): 9824-9832.
- [2] Kim J H, Kim S, Kim H, et al. Imbibition-induced selective wetting of liquid metal[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 4763.