

四川师范大学本科毕业设计

基于导电墨水 对纸上电路工作性能的研究

学生姓名	张慧敏
院系名称	物理与电子工程学院
专业名称	物理学
班 级	2018 级 4 班
学 号	2018070443
指导教师	程 才
完成时间	2022 年 04 月 25 日

基于导电墨水对纸上电路工作性能的研究

物理学专业

学生姓名 张慧敏 指导教师 程 才

摘要：用笔刷蘸取导电墨水，在纸上画出来的线就能导电，且显示出优良的导电特性，可应用于纸上电路的制备。传统导线电路，虽在使用时工作性能稳定，但其繁复的导线连接会占据电子设备大部分空间，无法满足某些电子设备的便捷应用。现今市场上大量流行的柔性电路板，具有纸上电路的特点：轻薄，节省设备空间，具有弯折绕曲性，可用于三维空间连接安装，因此在手机市场、液晶荧幕及医疗设备等应用中，有着举足轻重的作用。考虑到导电墨水可通过渗透，沉积等方式在纸质基材上留下痕迹，本文构建了一种阻塞球体渗滤模型，用实验数据拟合模型中控制方程的各参数值。最后与有效介质理论对比，验证模型的准确性。

本文基于渗透理论，结合数值拟合与模型计算，通过阻塞球体渗滤模型研究导电墨水的相关参数对纸上电路导电性能的影响。得到结论如下，当采用铅笔代替导电墨水时，可从模型中的参数 ($x = 8.454, y = 1.953, z = 0.320, \alpha = 6.35 \times 10^9$) 看出，铅笔线的导电特性与普通导体(如 $x, y, z = 1$ 的导线)有很大的不同。而改变导电墨水的配比，即可实现对纸上电路从完全绝缘到可控绝缘的调节。

关键词：导电墨水 纸上电路 渗透理论 阻塞球体渗滤模型 有效介质理论

Research on paper circuit performance based on conductive ink

Specialty: Physics

Undergraduate:Huimin Zhang **Supervisor:**Cai Cheng

ABSTRACT: The lines drawn on paper by dipping the conductive ink with a brush can conduct electricity, and show excellent conductive properties, which can be applied to the preparation of paper circuits. Although the traditional conductor circuit has stable performance in use, its complicated conductor connection will occupy most space of electronic equipment, which can not meet the convenient application of some electronic equipment. A large number of popular flexible circuit boards in the market today have the characteristics of paper circuit: thin , saving equipment space, bending and winding, can be used for three-dimensional space connection and installation, so in the mobile phone market, LCD screen and medical equipment and other applications, has a pivotal role. Considering that conductive ink can leave traces on paper substrates through infiltration and deposition, this paper constructed a Jammed spheres percolation model, and fitted the parameters of the governing equation in the model with experimental data. Finally, the accuracy of the model is verified by comparing with the effective medium theory.

Based on percolation theory, numerical simulation and model calculation, the influence of the parameters of conductive ink on the electrical conductivity of paper circuit is studied by using the Jammed spheres percolation model. Conclude as following, when using pencil instead of conductive ink, it can be seen from the parameters in the model ($x=8.454$, $y=1.953$, $z=0.320$, $\alpha=6.35 \times 10^9$) The conductivity of pencil lines is quite different from that of ordinary conductors, such as $x, y, z=1$ wires. The paper circuit can be adjusted from complete insulation to controllable insulation by changing the ratio of conductive ink.

Keywords: Conductive ink, Paper circuit, Jammed spheres percolation model, Percolation theory, Effective medium theory

目 录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目录	
1. 绪论	1
1.1 导电墨水的研究背景	1
1.2 国内外柔性电路的研究发展文献综述	1
1.3 本文的主要工作和章节安排	2
2. 理论模型的构建与验证	3
2.1 渗透理论简介	3
2.2 堵塞球体渗滤模型的构建	4
2.3 有效介质理论简化	6
2.4 验证模型	9
3. 研究方法	10
3.1 实验设计	10
3.2 实验装置	10
3.3 实验步骤	11
3.4 实验结果	13
4. 实验创新与应用	16
4.1 引言	16
4.2 实物设计	16
4.3 创新与应用	17
5. 结语	18
5.1 研究结论	18
5.2 工作展望	18
参考文献	19
致谢	20

基于导电墨水对纸上电路工作性能的研究

1. 绪论

自古以来，石墨就是一种神奇的材料，可广泛应用于实际生活。而石墨烯良好的电学特性，表明石墨本身具有独特的电学性质。在石墨中加入其他物质而形成的半导体材料，不仅继承了石墨原来的优良特性，同时赋予了它更多奇妙的特点。通过对铅笔导线的导电特性深入探究，建立阻塞球体渗滤模型，利用实验数据，拟合得到模型中控制方程的各参数值，完善模型。基于实验数据，与有效介质理论对比，验证两个理论模型的准确性。

石墨良好的延展性，将实验平台从平面电路扩展至三维空间，可以适应更加多变的实验条件。本文基于阻塞球体渗滤模型，利用石墨-合金混合液体优良的导电特性，将其作为导电墨水，用不同混合比例的导电墨水在纸上画出导线。通过纸张和导电墨水，能构建一个纸上电路，节省实验空间，且有效运用于各种实验场景，满足各种实验要求。

1.1 导电墨水的研究背景

随着科技的不断发展，人们对柔性电子器件的需求越发强烈。相比于传统硅基材料，柔性电子器件可以通过印刷的方法制备。在文献中已探究得出结论，导电墨水是决定器件导电性能的关键环节。导电墨水中的导电填料一般为金属材料、高分子导电材料和碳材料，而碳材料因其耐腐蚀性强、导电性能好和无需过高温烧结等优势，具有极高的应用价值^[1]。

二维纳米碳材料石墨烯由于其独特的结构和突出的性能,可与传统金属或高聚物材料共同作为导电墨水主要导电组分。石墨烯作为片状纳米碳材料，独特的二维原子结构使其导电性能高于其他碳材料，使其在导电墨水领域有着巨大研究价值。以石墨烯为导电填料,使用十二烷基磺酸钠（SDS）为调节助剂,制备的石墨烯导电墨水,在研究该墨水性能的基础上,采用划线法制备纸基柔性电路,并展开研究墨水在纸基表面的状态及纸基电路的导电性能^[2]。

1.2 国内外柔性电路的研究发展文献综述

基于纸张的电子器件，被目前的研究员认为是一种极有潜力的柔性电路板。因为它们价格低廉，而且在世界范围内普遍可用于信息存储和包装。

近年来,“智能纸张”等纸质电子设备被应用于一次性医疗行业。纸质电子器件不能承受150℃以上的高温,因此在实际应用中,温度不宜过高。柔性电路作为纸基电子器件的重要组成部分之一,需要在低温下烧结。根据目前的研究结果,在室温下,可以形成导电网中的银纳米线^[3]。随着柔性电路的发展,纳米银线因其独特的物理和化学性质引起了广泛的关注,如优良的电导率和导热性、延展性和化学稳定性。值得注意的是,银纳米线可以形成具有更好的力学性能的柔性电路,促进了可折叠传感器的发展,其电路能够承受极小的弯曲半径,而不会影响导电性能。

要实现柔性电路的市场化和规模化,必须提高柔性电路的制造技术。导电油墨是实现柔性电路的关键。导电油墨通过丝印、喷墨印刷、喷涂、凹印等方式涂在织物、纸张、聚酰亚胺(PI)等柔性基材上,制成柔性电路或透明电路薄膜,再应用于智能穿戴、柔性显示和柔性触摸屏等电子领域^[4]。

1.3 本文的主要工作和章节安排

本论文的五个章节对纸上电路的研究背景、导电原理和理论模型的建立与验证,实验设计,创新应用进行了详细的介绍,具体内容如下:

第一章为绪论部分,首先对本文所研究内容的研究背景进行简单介绍,其中重点介绍基于导电墨水的柔性电路的应用。接着对柔性电路的国内外研究现状及进展展开讨论。

第二章分析了纸上电路的导电原理。基于渗透理论,建立了堵塞球体渗滤模型,并简化有效介质理论,得出验证模型的关键式。

第三章对实验测量纸上电路导线的电导的设计进行了介绍,并最终给出实验结论与分析。得出纸上电路的工作性能与哪些参数相关,如何相关。

第四章基于理论与实验结果,设计并提出了三种纸上电路的创新应用。

第五章对所作工作进行总结。

2. 理论模型的构建与验证

石墨导电原理简介：

石墨是元素碳的一种同素异形体，每个碳原子的周边连结着另外三个碳原子，排列方式呈蜂巢式的多个六边形。由于每个碳原子用3个电子与周围的C形成3个共价键，所以每个C都剩余1个电子，这些电子能够自由移动，因此石墨属于导体。（如图2.1所示）

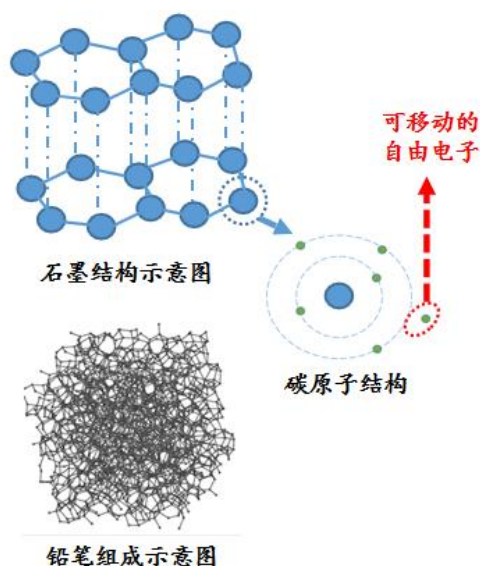


图2.1 石墨导电原理图

2.1 渗透理论简介

由文献^[5]中理论介绍及电镜下铅笔划线的粒子级视图（如图2.2所示），可简化纸质基材微观结构为阻塞球形粒子的三维晶格（如图2.3所示）；可简化导电墨水笔在纸上画出导线的微观结构为导电粒子散布在绝缘体之间（如图2.4所示）。

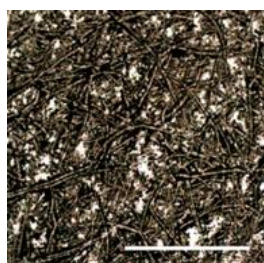


图2.2 铅笔线的粒子级视图



图2.3 纸质基材模型

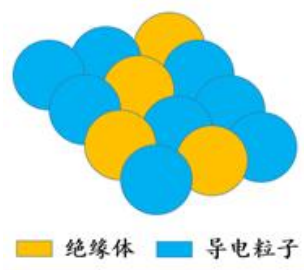


图2.4 导线模型

2.1.1 渗透理论:

找到只使用接触，导电粒子通过晶格的路径。路径的数量与线路的电导成正比；电子通过固体的方式越多，电阻就越小^[6,7]。如图2.5所示:

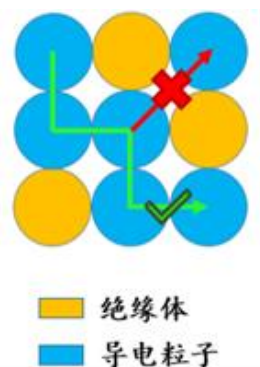


图2.5 渗透路径晶格示意图



图2.6 渗透路径导线示意图

2.1.2 理论其他说明:

- (1) 各渗透路径的长度不相等，且可以向任何方向移动，甚至向后移动，如图2.6所示。
- (2) 临界体积分数:线路中任何路径存在所必需的导体体积分数。

2.2 堵塞球体渗滤模型的构建

2.2.1 渗透路径的平均电阻:

渗透路径的平均电阻 (R_p) 取决于画出的导线长度 (L) 和横截面积 (A)。

- (1) 更长的线/更大的横截面积:更多的机会导电粒子相互接触，渗透路径可采取非线性轨迹。(如图2.7(b)所示)



图2.7 路径长度与导线形状的关系

- (2) 反之可推得：导线更短、更窄，其渗透路径都是更直、更短的。(如图2.7(a)图所示)。

因此可得出导线越短，越窄，其电阻值就越小,可用(1)式表示:

$$R_p = \rho_g \frac{l(A,L)}{a} \quad (1)$$

R_p : 一条渗透路径的平均电阻

ρ_g : 石墨电阻率

l : 路径平均长度

a : 粒子间接触面积 (渗透路径的横截面积)

2.2.2 渗透路径的数量:

(1) 当 $\varphi < \varphi_c$ 时, 相互接触的导电粒子不能顺利通过晶格, 无法形成渗透路径。

可知石墨颗粒浓度越高, 可能形成的路径就越多:

$$n \propto (\varphi - \varphi_c)^{x'}$$

(2) 当导线的横截面积 (A) 越大, 说明石墨在纸质基材上沉积越多, 则石墨颗粒就越多, 对形成渗透路径的限制越少。即当 A 越大, 可能形成的渗透路径就越多:

$$n \propto A^{y'}$$

(3) 当导线的长度 (L) 越长, 渗透路径的分支越多, 但也会增大出现路径阻断的可能, 导致渗透路径数量减少:

$$n \propto \frac{1}{L^{z'}}$$

综上所述, 可得渗透路径的数量 (n) 的表达式:

$$n = \frac{\alpha'(\varphi - \varphi_c)^{x'} A^{y'}}{L^{z'}} \quad (2)$$

n : 路径的数量 A : 导线的横截面积 L : 导线的长度

φ : 石墨的体积分数 φ_c : 临界体积分数 α', x', y', z' : 拟合常数

2.2.3 渗透理论的控制方程:

基于堵塞球体渗滤模型中的式 (1) (2), 可得纸上电路导线的电导 (G) 表达式:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{n}{R_p} = \frac{1}{R_p} \frac{\alpha'(\varphi - \varphi_c)^{x'} A^{y'}}{L^{z'}}$$

$$R_p = \rho_g \frac{l(A, L)}{a}$$

$$G = \frac{\alpha(\varphi - \varphi_c)^x A^y}{L^z} \quad (3)$$

n : 路径的数量 φ : 石墨的体积分数 φ_c : 临界体积分数 A : 导线的横截面积

a : 粒子间接触面积 (渗透路径的横截面) R_p : 一条渗透路径的平均电阻

L : 导线的长度 ρ_g : 石墨电阻率 l : 路径平均长度 α, x, y, z : 拟合常数

对于一根传统的实验室导线来说，式（3）中相关参数 x, y 和 z 应该等于1；且 $\alpha, \varphi, \varphi_c$ 均与导线制作材料的电阻率有关。传统导线的电导（G）：

$$G = \frac{A}{\rho L}$$

最后，用实验数据拟合，可得出控制方程中的各参数常数值，得到纸上电路的工作性能与哪些参数相关，如何相关，即完成了阻塞球体渗滤模型的构建。

2.3 有效介质理论简化

2.3.1 有效介质理论简介：

非均质系统的导电问题是一个古老而又困难的问题。各组分的电导率之比可以轻易地高达 10^2 ，而混合介质的电导率可以位于各组分电导率之间的任何位置，这取决于组分的体积分数和混合介质的形态。混合介质：例如由两个固体(如金属陶瓷),两种液体(乳剂)或固体和液体组成。该理论基于研究以空气作为绝缘质，压缩不同体积分数石墨粉的电导率函数而产生。原则上，分析结果可适用于其他粉末或任何二元混合介质。

Landauer从麦克斯韦早期有效介质理论出发，通过Clausius—Mossotti关系和Bruggeman对称和非对称介质理论，将非均匀介质中的电输运理论转变为更现代的渗滤理论。Coutts表明，大量金属绝缘体系统，包括Scarbrick，均服从连续渗流方程 $\sigma = (\varphi - \varphi_c)^t$ 。这里 φ 和 φ_c 是导电组分的体积分数和临界体积分数， t 是指数。 φ_c 是混合介质绝缘时的体积分数。

McLachlan提出的一个新的半唯象有效介质方程拟合。对于那些形态是Bruggeman-(Landauer)的对称和非对称介质的混合介质(或位于这两个极端之间)来说是成立的。(Bruggman的聚焦微结构理论)如图2.8所示：

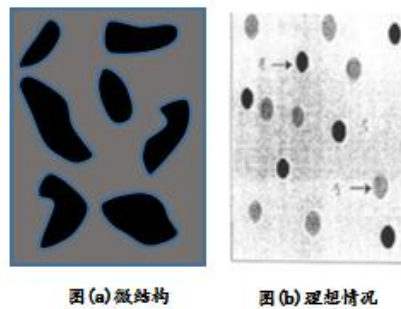


图2.8 Bruggman微结构理论

McLachlan提出的广义有效介质方程^[8]为：

$$\frac{f(\Sigma_1 - \Sigma_m)}{\Sigma_1 + [f_c / (1 - f_c)] \Sigma_m} + \frac{(1 - f)(\Sigma_h - \Sigma_m)}{\Sigma_h + [f_c / (1 - f_c)] \Sigma_m} = 0$$

其中:

$$\Sigma_m = \sigma_m^{\frac{1}{t}} \quad \Sigma_h = \sigma_h^{\frac{1}{t}} \quad \Sigma_1 = \sigma_1^{\frac{1}{t}}$$

f 为低电导组分的体积分数, f_c 为当高电导组分首次形成连续渗流路径时的低电导组分的临界体积分数。

2.3.2 有效介质理论简化:

2.3.2.1 基本假设 (针对阻值稳定的导线):

通过文献^[9]可知, 石墨粉的压实程度对导线的电导率有极大影响, 故假设导线样品均为严密压实在纸上, 在压力稳定时, 阻值不随涂抹次数而变化;

不考虑铅笔对纸的压力对导线样品中石墨的电导率造成影响;

不考虑室温的微小变化对导线的电阻产生的影响。

假设纸上电路导线样品的理论模型可简化为图2.9所示:

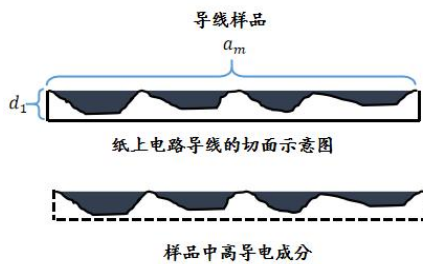


图2.9 导线的理论模型

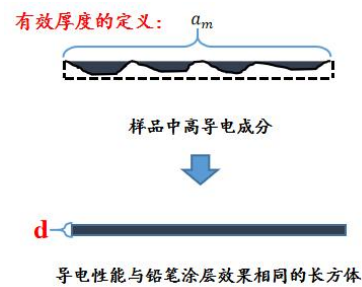


图2.10 定义有效厚度图示

2.3.2.2 建立理论模型:

(1)定义有效厚度 (d):

将表面凹凸不平的纸质基材上沉积的高电导组分, 简化为一条规则的长方体, 如图2.10所示。

(2)参量设置:

a_m : 导线样品的宽度(mm)

b_m : 导线样品的长度(m)

d_1 : 纸张厚度(mm)

d : 样品中高导电成分有效厚度(mm)

R_m : 导线样品的电阻值(Ω)

V_1 : 纸张的体积 (cm^3)

$\sigma_m(d)$: 导线样品的电导率 (S/m)

σ_h : 样品中高电导成分电导率 (参照文献^[10]可得各环境条件下石墨的电导率)

σ_1 : 样品中低电导成分电导率

f : 低电导成分的体积分数 (%)

f_c : 低电导成分临界体积分数 (%)

(3)简化有效介质方程:

由于纸质基材为绝缘体, 因此导线样品中的纸质基材: $\sigma_1 = 0$, 故式 (4) 可简化为:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_h} = \left(1 - \frac{f}{f_c}\right)^t$$

化解后可得:

$$f_c = \frac{f}{1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_h}\right)^{\frac{1}{t}}} \quad (5)$$

由于导线样品中的石墨晶粒在微观结构上, 属于随机定向的椭球颗粒, 故其形态参数 t 可用: $t = m f_c$ 表示;

(4) m 值遵循Archie定律:

1981年发现, 直流电导率可由阿尔奇定律给出:

$$\sigma = a \sigma_w \Phi^m$$

其中 σ_w 是水的电导率, Φ 为孔隙率, a 为常数。 m 指数落在观测范围内, 实际上接近于观测值的最小值。Jackson 等人对海砂的测量表明, m 值与颗粒形状有关, 球形颗粒的 m 值最低, 扁圆形颗粒的 m 值较大。从天然石墨粉颗粒的电镜图2.11可知, 导线样品中的大多石墨颗粒, 球度0.5, 参考文献^[11]可知, 其 $m=1.85$ 。

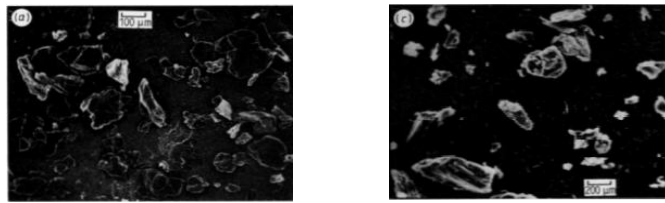


图2.11 天然石墨粉颗粒的电镜扫描图

当绝缘粒被高电导成分覆盖时:

$$f_c = 1$$

综合以上可得:

$$(1 - f)^m = \frac{\sigma_m(d)}{\sigma_h} \quad (6)$$

$$\text{其中: } f(d) = \frac{V_1}{V_1 + a_m b_m d} \quad \sigma_m(d) = \frac{b_m}{R_m a_m d}$$

2.4 验证模型

由于式（6）中 σ_m 与式（3）中的 G ，分别表示画出来的导线（混合介质）的电导率与电导，存在以下关系：

$$G = \sigma_m \frac{A}{L}$$

则可推导出以下方程：

$$\sigma_h = \frac{\alpha A^y L}{L^z A} \quad \text{即可表示为: } \sigma_h = \frac{\alpha A^m}{L^n} \quad (7)$$

已知式（7）满足电导率的公式，可近似认为阻塞球体渗滤模型的主控方程式（3）与有效介质方程式（6）从本质上是等价的。后文将基于实验数据拟合结果，证明该两个理论符合研究混合导体导电性能的实际应用。

3. 研究方法

3.1 实验设计

本文的试验工作基于控制变量法，分别改变铅笔导线的长度，横截面积，铅笔种类，导线形状，纸质基材种类，纸质基材发生形变程度这六个相关参数来达到以下目标：

(i)用实验数据拟合阻塞球体渗滤模型的主控方程式（3）每个指数常数，并代入式（7），与 σ_h 进行对比验证。

(ii)探究纸质基材的种类与发生形变程度对纸上电路的影响。

3.2 实验装置

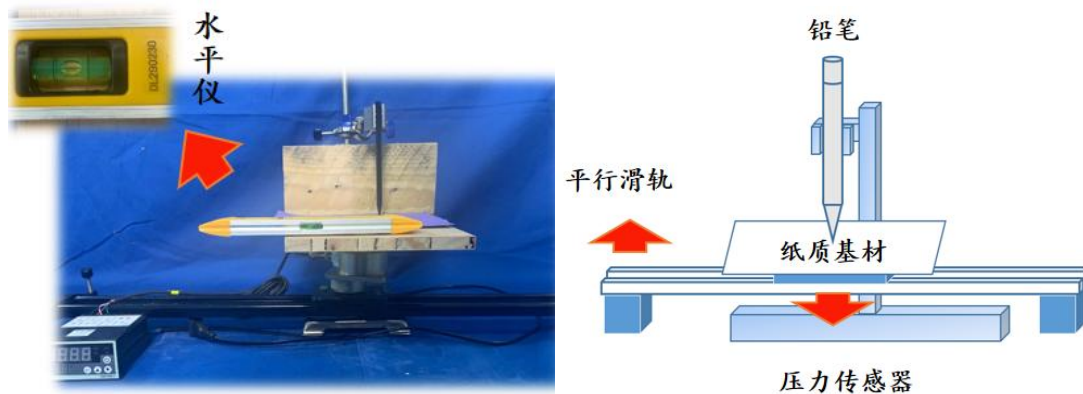


图3.1 画导线装置示意图



图3.2 测电阻装置示意图

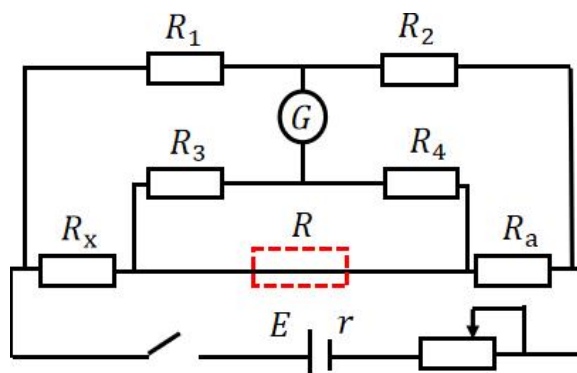


图3.3 双桥法测电阻示意图

通过图3.3所示双电桥式电路^[12]，可得：

$$\begin{aligned} I_1 R_1 &= I_a R_a + I_2 R_4 \\ I_1 R_2 &= I_a R_x + I_2 R_3 \\ (I_a - I_2)R &= I_2(R_3 + R_4) \end{aligned}$$

解之可得：

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_a + \frac{R R_2}{R + R_3 + R_4} \left(\frac{R_3}{R_1} - \frac{R_4}{R_2} \right)$$

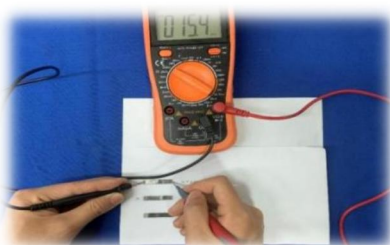
利用定值电阻满足当 $\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2}$ 时，可得：

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_a \quad (8)$$

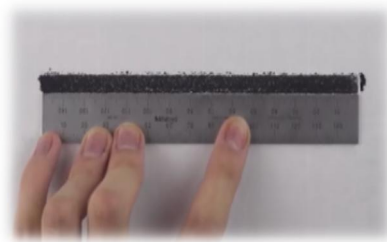
当电桥平衡时，可利用式（8）即可对纸上电路导线的电阻进行准确测量。

3.3 实验步骤

- (i) 如图 12 所示，在每次实验之前，用水平仪检测并调整使实验平台水平；
- (ii) 分别利用万用表欧姆档，双电桥式电路对铅笔导线进行测量，对照结果；



- (iii) 通过调节纸张在滑轨上的位移长度，画出不同长度的导线；

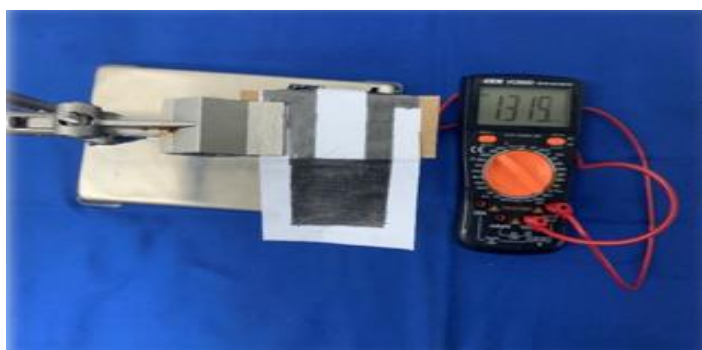
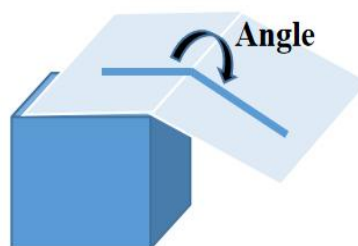
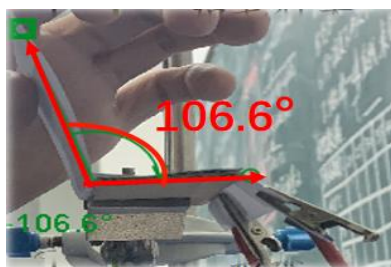


(iv) 利用压力传感器控制固定的压力，用同一只铅笔在纸张上，画出不同宽度的直线，得到不同横截面积的铅笔导线；

(v) 改变铅笔的种类：利用双桥式电路，直接测量铅笔笔芯两端的电阻，保证硬度的差异不会影响被测路径的电导；



(vi) 改变纸质基材的形变程度，可以探究其对铅笔导线导电性能的影响。



3.4 实验结果

(i) 万用表欧姆档测量与双电桥法测量对照:

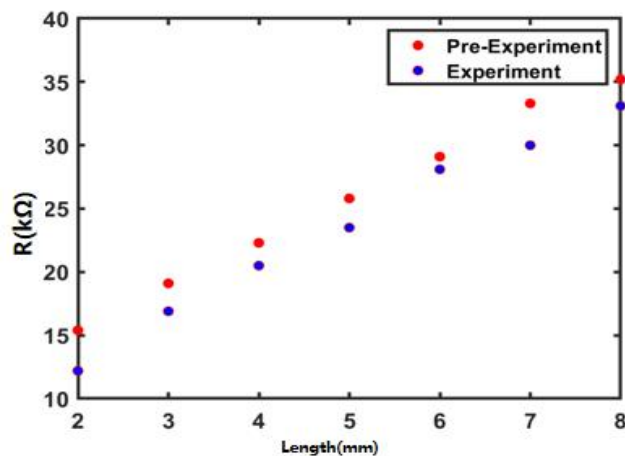


图3.4 万用表与双电桥法测值的差别

如图3.4所示，图中红点表示万用表预实验测量不同长度导线的电阻值，蓝点表示双电桥法测量结果；通过图中数据点的分布，可以看出：双电桥法测试更精确，消除了接触电阻和导线电阻的影响。

(ii) 如图3.5所示，改变导线的长度L，利用双电桥式电路分别测量不同长度的导线电阻，其倒数即下图纵坐标电导值。

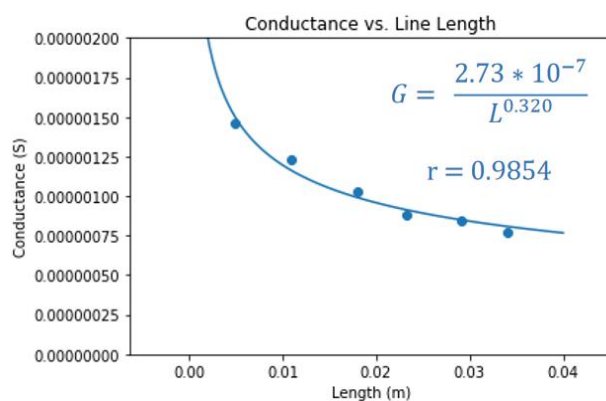


图3.5 导线电导随其长度的变化

1. 将测量结果代入Matlab拟合常数项，得到z的取值： $z = 0.320 < 1$ ，说明铅笔导线不是传统的导线；

2. 随着L的增大，电导越来越小：说明L越大，渗透路径的平均长度越大，电导越小；L越大，渗透路径分叉，阻断的可能越大，电导越小。

(iii) 如图3.6所示，改变导线的横截面积A，利用双电桥式电路分别测量不同横截面积的导线电阻，其倒数即下图纵坐标电导值。

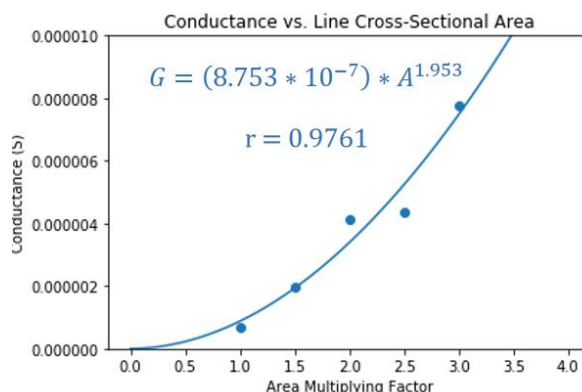


图3.6 导线电导随其横截面积的变化

1.将测量结果代入Matlab拟合常数项，得到y的取值： $y = 1.953 > 1$ ，说明铅笔导线不是传统导线；

2.随着A的增大，电导越来越大：说明A越大，单位长度导线中出现的石墨颗粒越多，电导就越大；A越大，渗透路径在导线中的分支越多，路径数量越大，电导越大。

(vi) 如图3.7所示，改变导线的石墨体积分数 φ ，利用双电桥式电路分别测量不同 φ 的笔芯电阻值，其倒数即下图纵坐标电导值。

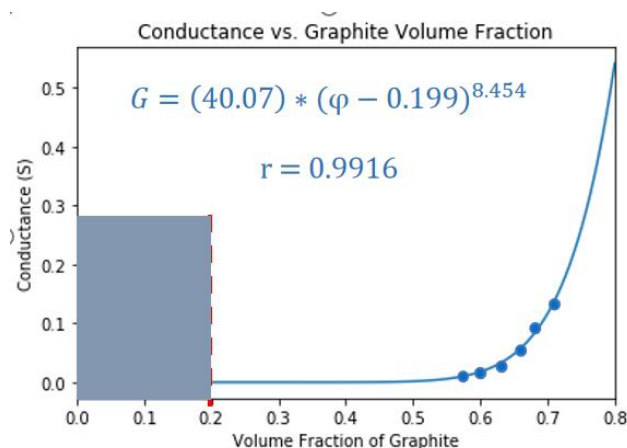


图3.7 导线电导随其石墨体积分数的变化

1.将测量结果代入Matlab拟合常数项，得到x的取值： $x = 8.454$ ，说明铅笔导线的电导高度依赖于 φ ；

2.随着 φ 的增大，电导越来越大：说明 φ 越大，单位长度导线中石墨颗粒越密集，导电颗粒之间接触的机会越多，形成的渗透路径的数量就越多，导线的电导就越大。

(v) 综合以上三个实验数据的拟合结果，可以发现 a 常数的拟合结果为： $a=6.35 \times 10^9$ 得到了阻塞球体渗滤模型模拟铅笔导线的电导表达式：

$$G = \frac{\alpha(\varphi - \varphi_c)^x A^y}{L^z}$$

φ : 石墨的体积分数 φ_c : 临界体积分数

A : 导线的横截面积 L : 导线的长度

$\alpha = 6.35 \times 10^9$; $x = 8.454$; $y = 1.953$; $z = 0.320$

(vi) 通过改变导线弯曲的角度，改变导线部分位置的压力。利用万用表分别测量不同弯曲角度的导线的电阻值，即下图纵坐标。如图3.8所示，可以发现纸上电路的铅笔导线具有压敏性，其阻值会随着其中部分位置的压力改变而改变。

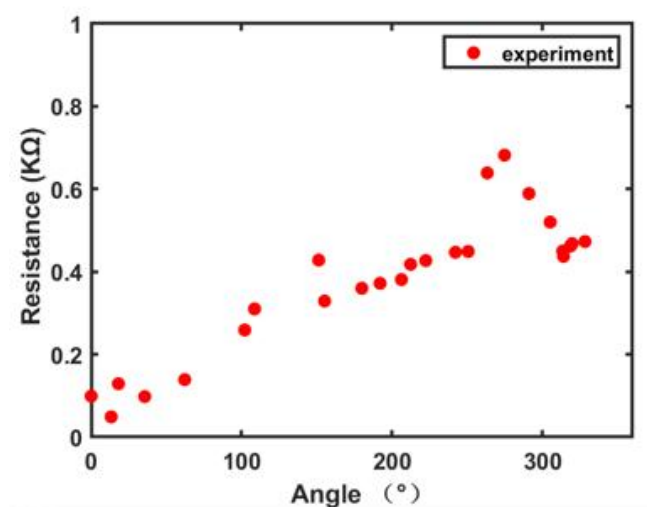


图3.8 纸上电路电阻随角度的变化

4. 实验创新与应用

4.1 引言

基于前文的理论推导与实验验证，可得到定量研究混合导体电导的模型。通过文献^[13]中对导电银墨水的深入探究，故在实验中加以创新，用石墨-合金混合液体替代铅笔。基于石墨-合金混合液体优良的导电特性，将其作为导电墨水，不同混合比例的导电墨水在纸上画出导线。通过文献^[14]中基于纸上电路的电阻性、电容性^[15]对电路的开发应用，分别做出纸折叠电路玩具，纸上钢琴及接近传感器装置。可将其用于日常玩具，教学设备等方面。

4.2 实物设计

(1)



图4.1 纸折叠电路玩具

(2)

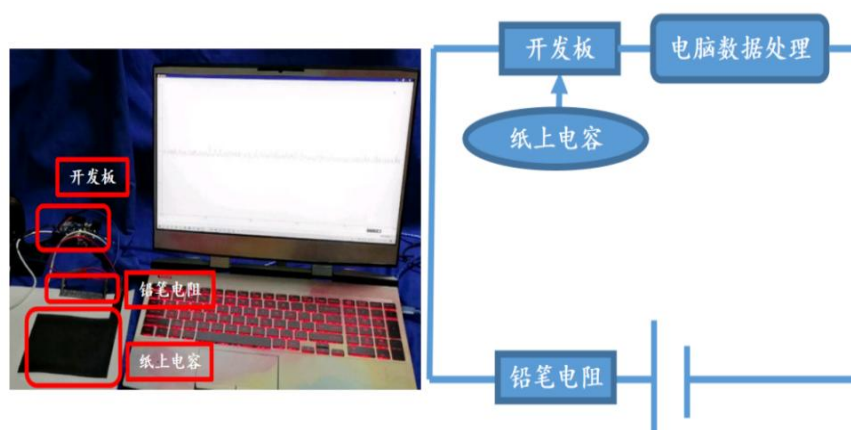


图4.2 电容式接近传感器

(3)

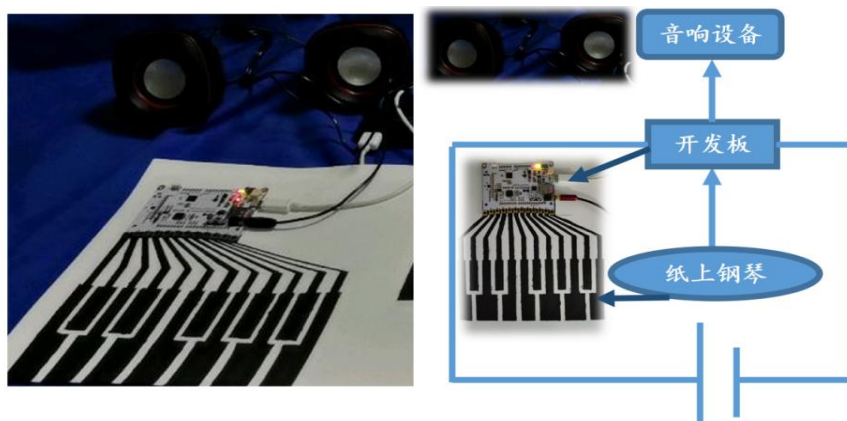


图4.3 纸上钢琴

4.3 创新与应用

- 1.通过纸张和一支导电墨水笔就能构建一个纸上电路，节省实验空间便宜实惠。
- 2.基于纸张与石墨良好的延展性，合金液体良好的导电性，制备的纸上电路将电子实验平台从平面扩展至三维，对电子设备的研发有着极大影响。
- 3.改变导电墨水的配比，可构建出适用于不同导电情况的纸上电路，并应用于生物医学设备的开发。

5.结语

5.1 研究结论

（1）阻塞球体渗滤模型与有效介质理论，均可用来模拟计算混合导体的电导，且两个理论的本质是等价的。

（2）通过实验数据，拟合得到阻塞球体渗滤模型主控方程的各个常数项，得到纸上电路的导电性能与导线的长度，横截面积，导电组分的体积分数，纸张曲折程度等参数有关。且验证了阻塞球体渗滤模型与简化的有效介质方程，对定量研究 L ， A ， φ 参数影响导线电导的准确性与可靠性。

（3）利用导电墨水，完成可折叠电路玩具，接近传感器，纸上钢琴的制作，简易完成对半导体电阻性与电容性的探究。

5.2 工作展望

通过该项目的施展，看到了导电墨水构成柔性电路的广泛用途。不仅可用于制作折叠电路、电容传感器，将来还能推广至生物医学方面，开发指纹传感器，可折叠平面电子产品等应用。

参考文献

- [1] 张宏伟, 谢鸿, 方志强, 刘映尧. 石墨烯导电墨水的制备及其纸基电路的导电性能[J]. 中国造纸, 2021, 40(03): 14-19.
- [2] 姜欣, 赵轩亮, 李晶, 林舒媛, 朱宏伟. 石墨烯导电墨水研究进展: 制备方法、印刷技术及应用[J]. 科学通报, 2017, 62(27): 3217-3235.
- [3] M. Pratiti, D. Ranabir, C. Suman. Electrokinetics with "paper-and-pencil" devices(Article)[J]. Lab on a chip, 2012, Vol.12(20): 4026-4028
- [4] 段莎莎, 张玲, 李春忠. 银纳米线基柔性导电材料的研究进展[J]. 中国材料进展, 2016, 35(07): 545-551.
- [5] J. H. Johnston, J. Moraes, T Borrmann. Conducting Polymers on Paper Fibres[J]. Synthetic Metals, 2005, 153(1-3): 65-68.
- [6] C. Lin, Z. Zhao, J. Kim, J. Huang. Pencil Drawn Strain Gauges and Chemiresistors on Paper[J]. Scientific Reports, 2014, Vol.4(1): 3812.
- [7] 张倩, 潘春跃, 戴潇燕, 高金环. 复合固体聚合物电解质导电增强机制与导电模型[J]. 材料导报, 2006, 285-289.
- [8] N Deprez, D S McLachlan. The analysis of the electrical conductivity of graphite conductivity of graphite powders during compaction[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 1988, Vol.21(1): 101-107.
- [9] S Rattanaweeranona, P Limsuwan, V Thongpool, V Piriawong, Asanithi. Influence of Bulk Graphite Density on Electrical Conductivity[J]. Procedia Engineering, 2012, Vol.32: 1100-1106.
- [10] 王常春, 孙蕾, 刘中伟, 马玉晓, 李东田. 石墨烯电导率及其影响因素研究[J]. 云南化工, 2020, 47(01): 68-70.
- [11] S. Kenneth, Mendelson, Morrel H Cohen. The effect of grain anisotropy on the electrical properties of sedimentary rocks[J]. Geophysics, 1982, Vol.47(2): 257 .
- [12] 卢曾贤, 赵志刚. 对双臂电桥消除接线电阻和接触电阻对被测电阻影响的分析[J]. 物理教学探讨, 2002(08): 40.
- [13] A. Russo, B. Y. Ahn, J. J. Adams, et al. Pen-on-paper flexible electronics[J]. Adv. Mater., 2011, Vol.23(30): 3426-3430.
- [14] N. Kurra, G. U. Kulkarni. Pencil-on-paper: electronic devices[J]. Lab on a Chip, 2013, Vol.13(15): 2866-2873.
- [15] N. Kurra, D. Dutta, G. U. Kulkarni. Field effect transistors and RC filters from pencil-trace on paper[J]. Phys. Chem. Chem. Phys., 2013, Vol.15(21): 8367-837.

致谢

光阴荏苒，不知不觉大学生涯就快结束了。在毕业论文完成之际，谨向四年来给予我关心、支持和帮助的良好师友致以最诚挚的谢意！

首先，我要向我的毕业论文指导老师程才老师表示由衷的感谢。对我来说，不管是毕业论文的指导，CUPT备赛时光的教导，大创项目课题开发的支持帮助，还是竞赛团队相关工作安排的带领，以及本科期间学习生活中遇到问题时的及时解惑，程老师给予了我耐心细致的指导和深刻的启发。还有我的本科生导师赵国平教授，在大学学习生活中给我的指导和帮助，让我认识了解到物理科研工作的严谨，同时也激发起了我对探究事物本质的热情与向往。同时我也感谢所有教过我的老师们，感谢你们多年来在学习和生活中孜孜不倦的教导，你们严谨的治学态度和渊博的知识使我终身受益匪浅。

大学这四年是充实的四年，入学不久在新生宣讲会中了解到学院 CUPT 团队，被学长学姐们扎实的理论功底、刻苦钻研的精神所折服，决心成为其中一员。大一下期的周末，都在实验室跟着学长学姐们学习，感谢舒薇倩学姐、张娴学姐、赵鑫宁学姐、韩志强学长等给予的帮助以及学习各类软件并动手操作实验的机会。大二到了我们这一届负责的时候，学习了Matlab、Mathematica、Origin、Tracker等软件的使用，科研水平和团队实力得到了极大的提升。在备赛过程中也曾经历长时间毫无进展，这使得我的心态得到了历练，之后面对相同情况更加冷静，更具有耐心。备赛过程中也遇到了很多困难，感谢程才老师和张原维老师以及谢林华老师的帮助和指导，感谢队友陈海月、夏卓、王乾、学弟学妹们的帮助、鼓励和陪伴。大三参加了北京市物理实验竞赛、全国大学生数学建模竞赛等其他竞赛，感谢刘科老师、吕王勇老师、感谢队友王琴，张豪杰，张钰奇，感谢那些和你们一起奋斗的日子。大三下期在乐山一中高中实习的时光也是难忘的一段记忆，在那里遇到了一位教学经验极丰富的物理老师，与一群可爱上进的学生。

感谢四年有你们相伴。