

# Study on the Resistance Characteristics of Pencil on Paper and Its Influence Parameters

Yu Ge, Yan Long, Shucheng Liu\*

College of Physics, Guizhou University, Guiyang Guizhou  
Email: \*207314330@qq.com

Received: Mar. 11<sup>th</sup>, 2020; accepted: Mar. 25<sup>th</sup>, 2020; published: Apr. 1<sup>st</sup>, 2020

---

## Abstract

Pencil drawn wires can conduct electricity, and the resistance characteristics of the wires are affected by many parameters. In this paper, the influence parameters of pencil wire resistance characteristics are analyzed. It is concluded that the resistance characteristics of pencil wire are affected by the length, thickness, width, different graphite content and pressure of the wire, and verified by experiments.

## Keywords

Graphite Circuit, Resistance Characteristic, Paper Based Flexible Electronic Circuit

---

## 纸上铅笔电阻特性及其影响参数的研究

葛玉, 龙燕, 刘树成\*

贵州大学物理学院, 贵州 贵阳  
Email: \*207314330@qq.com

收稿日期: 2020年3月11日; 录用日期: 2020年3月25日; 发布日期: 2020年4月1日

---

## 摘要

铅笔画的导线可以导电, 导电线的电阻特性受到诸多参数的影响。本文分析了铅笔导线电阻特性影响参数, 得出铅笔导线的电阻特性受到导线的长度、厚度、宽度、不同石墨含量、压力的影响, 并进行了实验验证。

---

\*通讯作者。

## 关键词

石墨电路, 电阻特性, 纸基柔性电子电路

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着电子产品向轻量化、柔性化的方向发展, 传统的刚性电路板已经不能满足当前电子器件的需求, 而纸基电路重量轻、能生物降解、形成的电路易折叠等特点, 纸基电子技术发展迅速。纸基柔性电子电路作为一种低成本的柔性电子产品, 而用铅笔在纸上画画建立石墨电路是最简单和最容易的方法。用铅笔在纸上画线的石墨电路的研究, 该类问题从 20 世纪 80 年代被广泛研究。1988 年, N. Deprez 和 D. S. McLachlan 研究了石墨粉末压缩过程中导电性的分析[1]。Narendra Kurra 和 Giridhar U. Kulkarni 研究了传感器、微流体、能量存储、微分析设备、压电电阻器件以及场效应晶体管可以使用铅笔的痕迹实现[2]。Narendra Kurra, Dipanwita Dutta 和 Giridhar U. Kulkarni 研究了纸上铅笔痕迹, 纸上的铅笔痕迹包含具有许多边和边界的相互连接的石墨畴, 能量色散 x 射线谱显示石墨基体中存在以粘土形式存在的混合金属氧化物颗粒[3]。S. Rattanaweeranon 等人研究了体积密度和温度对石墨导电性的影响, 利用拉曼光谱研究了超声处理石墨的石墨特性[4]。Bernardo Marinho 等人用粉末压制法和成纸法研究了石墨的导电性[5]。

铅笔的笔芯是用石墨和粘土按一定的比例混合而成, 石墨是碳元素的一种同素异形体, 是一种灰色结晶的物质, 在每层原子中以较强的共价键连接, 在相同层内, 每个碳原子周边连接着另外三个碳原子, 以共价键结合, 排列方式成蜂巢式的多个六边形, 而各层间以弱的范德瓦尔斯连接。石墨的导电性比一般非金属矿高一百倍。导热性超过钢、铁、铅等金属材料, 石墨能够导电是因为石墨中每个碳原子与其它碳原子只形成 3 个共价键, 每个碳原子仍然保留 1 个自由电子来传输电荷每个碳原子均有一个可移动的自由电子, 从而使石墨成为电的良导体。石墨的导电、导热性能很好, 热膨胀系数小, 化学稳定性强, 可塑性高[2]。铅笔通过机械磨损形成了剥落的石墨颗粒, 导致黑色沉积物, 我们称之为铅笔痕迹。有趣的是, 铅笔芯的电阻远远大于铅笔痕迹。铅笔通过机械磨损而在纸表面留下黑色痕迹, 这意味着纸表面必须足够粗糙才能获得石墨电路。

目前, 对于纸基柔性电子电路的相关研究仍在继续, 然而对于纸上铅笔痕迹作为导线电阻, 其诸多参数的影响的研究仍然较少。该研究对于提高石墨电路的效率具备参考价值, 在实际生活中的应用也较为广泛, 可应用于压力传感器和各类元件的线路中, 因此具有一定的研究价值。本文通过实验所得实验数据, 探究了电路的电阻特性的影响参数, 验证模型的正确性。

## 2. 理论分析

我们知道导线的电阻公式为:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1)$$

其中电阻率:

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad (2)$$

电导率:

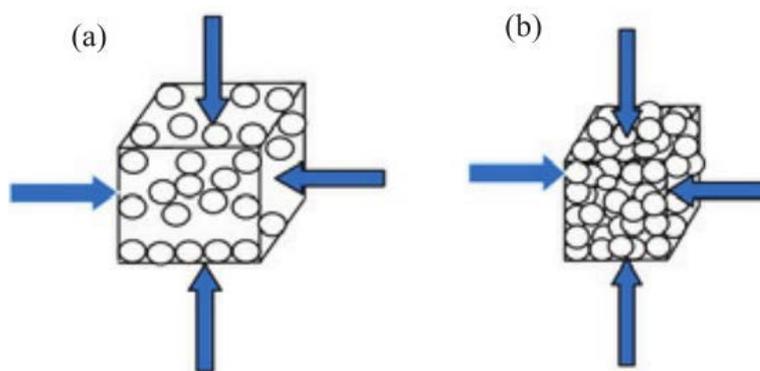
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

由以上三个公式, 我们可以知道导线的电阻与长度、横截面积、电导率有关。对于铅笔在纸上的痕迹, 其影响参数为痕迹的厚度、长度、宽度、电导率, 而温度影响石墨电路的电导率, 在一定温度范围电阻为:

$$R = R_0 (1 + \alpha T) \quad (4)$$

其中  $\alpha$  为电阻温度系数,  $R_0$  为  $0^\circ\text{C}$  时材料的电阻,  $T$  为温度,  $R$  为材料的电阻。温度升高, 原子实的热振动加强, 振动的幅度加大, 载流子浓度变大, 电导率变大。对石墨来说, 随着温度升高, 导热系数会降低, 在极高温下, 石墨会成为绝缘体。当温度升高到 400 至 600 摄氏度, 其电阻率会明显降低, 而超过这一温度范围时, 电阻率会略有增大。

关于压力和不同石墨含量, 我们做了相同石墨含量, 不同压力大小; 不同石墨含量是在相同压力下完成。根据图 1, 压力影响石墨粒子间的距离减小, 单位体积的碳原子增加, 大块石墨的密度变得更高, 导电率越高, 因为电子穿过它们的机会就越大, 所以电阻应该是随着压强的增大而减小。相比之下, 未压缩的铅笔痕迹具有大量的间隙(相邻石墨之间的空间), 这强烈降低了电子迁移率, 从而导致电路的导电率较低[4]。



**Figure 1.** Model describing effect of compression pressure on the space of the particles inside a bulk material (a) low density and (b) high density. The inside particles stay much denser for higher compression pressure

**图 1.** 描述压缩压力对铅笔痕迹的影响(a)低密度和(b)高密度内颗粒空间影响的模型。内部颗粒在更高的压缩压力下保持更高的密度

### 3. 实验探究

在做导线电阻及其特性的探究实验中, 我们的主要方法是控制变量法。为避免人为因数及用力不同引起的误差, 我们实验设计方案为: 在粉末压片机上粘上铅笔笔芯, 控制铅笔对纸的压力一定, 夹子夹住纸的一端, 将重物与夹子通过绳索连接, 绳索通过滑轮导轨, 不断调试粉末压片机的压强, 保证释放的重物可以运动, 这样纸带在相同的压力与拉力下运动, 铅笔对纸的压力可以控制不变。

#### 3.1. 探究不同铅笔的电阻值与导电线的长度

实验具体流程如下:

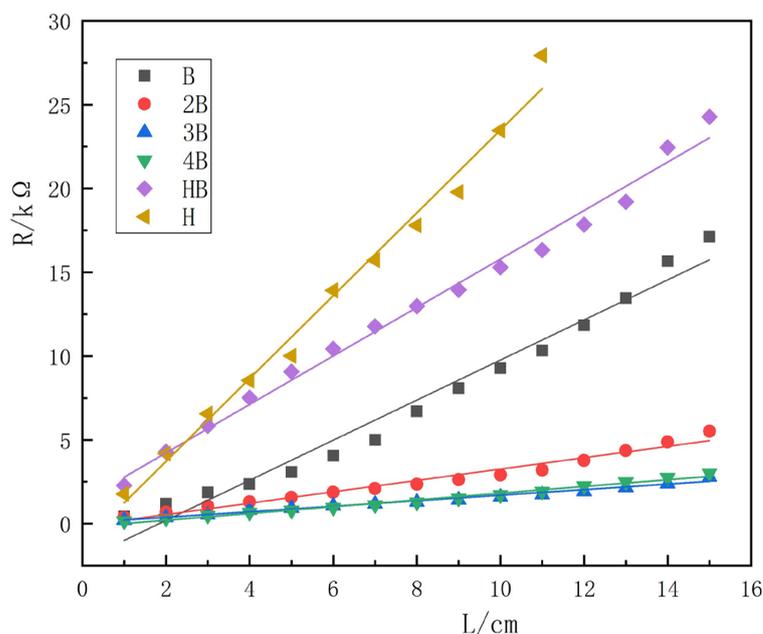
- 1) 电路板统一使用 A4 纸;
- 2) 对同一铅笔, 画的层数相同, 长度每次增加 1 cm;
- 3) 重复 1)、2) 步骤, 使用 6 种不同石墨含量的铅笔画导线。

见图 2 实验测量数据点基本分布在一条直线上, 六条拟合曲线拟合相关系数  $R$  平方都大于 0.97, 拟合程度都比较高, 我们可以发现, 电阻是随着导线长度的增加而增大的。同时发现, 在石墨与粘土的混合比例里见表 1, 石墨的比例越小, 电阻随长度的变化率越大, 实验现象符合石墨体积密度越高, 电导率越高。图 2 中拟合直线出现的截距是由于接触电阻的影响。

**Table 1.** Graphite content of different pencil models

**表 1.** 不同型号铅笔的石墨含量

	B	2B	3B	4B	HB	H
石墨比例	70%	78%	80%	84%	64%	49.5%



**Figure 2.** Diagram of the relationship between conductor resistance and length

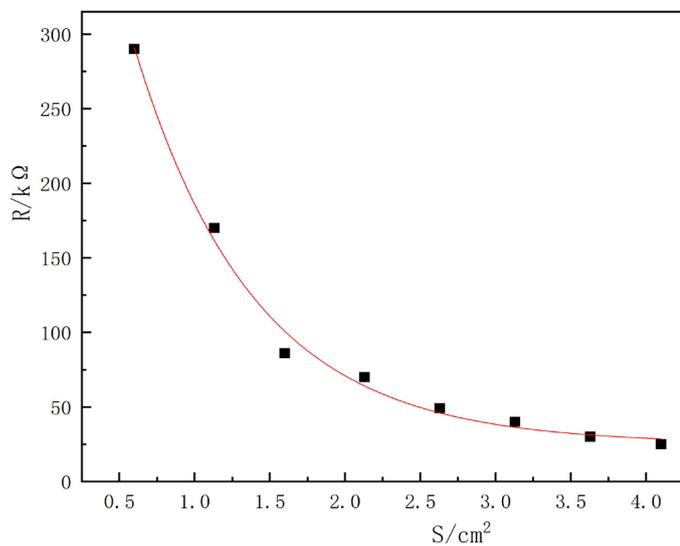
**图 2.** 导线电阻与长度的关系图

### 3.2. 探究横截面积对电阻阻值的影响

实验通过改变导线宽度改变横截面积, 由公式(1), 我们知道电阻与导线宽度成反比关系。根据图 3, 我们可以实验数据分布确实呈现为反比例曲线, 同时随着导线宽度变大, 测量的电阻值呈减少趋势, 验证了理论。

### 3.3. 探究温度对导电线电阻的影响

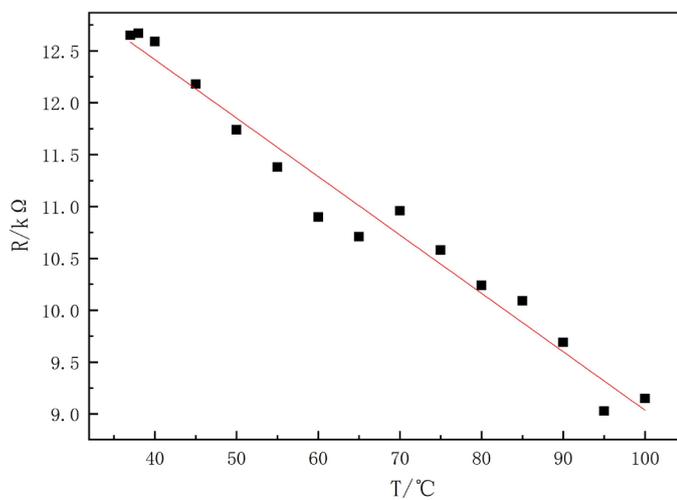
在实验过程中, 我们使用同一段铅笔导线, 用两根带线鳄鱼夹连接在铅笔导线的两侧, 通过读取万用表的读数来确定导线的电阻值。烘干箱的温度可以人为设置, 我们以 5 摄氏度为增加单位, 我们预设的实验范围是 30~110 摄氏度(见图 4)。



**Figure 3.** Diagram of relationship between conductor resistance and width  
**图 3.** 导线电阻与宽度的关系图



**Figure 4.** Experimental diagram of the influence of control temperature on resistance  
**图 4.** 控制温度对电阻的影响实验图



**Figure 5.** Diagram of the relationship between conductor resistance and temperature  
**图 5.** 导线电阻与温度的关系图

经过多次实验，我们发现在预设的温度范围内，导线电阻随着温度的升高而降低，如图 5 我们可以知道理论与实验是符合的，同时，我们对实验数据点进行了线性拟合，给出方程为  $R = 14.67 - 0.18 \times T$ ，为负温度系数。

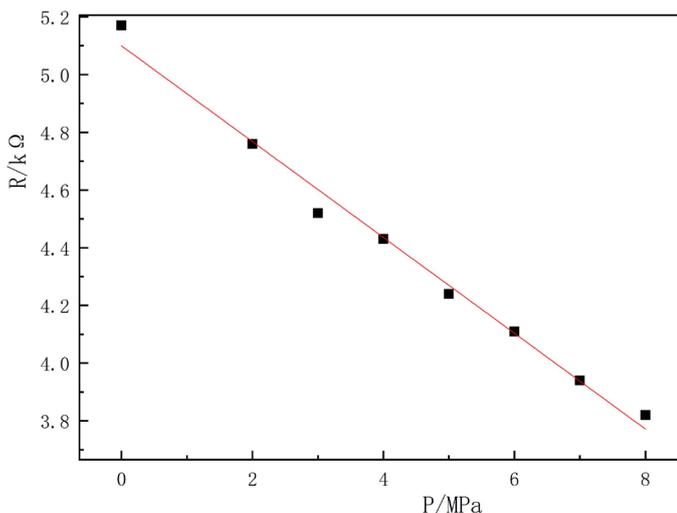
### 3.4. 探究压力对导电线电阻的影响

我们在实验中，通过粉末压片机对铅笔痕迹施加压力，我们在没有通过压片机施加压力的压强为 0 MPa，测得初始电阻为 13.13 K 欧姆(见图 6)。



**Figure 6.** Experimental diagram of the influence of control temperature on resistance

**图 6.** 控制温度对电阻的影响实验图



**Figure 7.** Diagram of relationship between conductor resistance and pressure

**图 7.** 导线电阻与压强的关系图

由图 7 我们可以看出，导线电阻确实随着压力的增加而减小，验证了理论，得到电阻和压强的线性拟合函数  $R = 12.96893 - 0.07893 \times P$ ，相关系数为 0.989。

### 3.5. 探究不同层数铅笔痕迹对电阻值的影响

对于不同石墨含量的探究，在相同环境下，我们主要是通过控制对同一支铅笔，画不同层数来实现的，以 10 层为增加单位。从图 8 中我们可以知道，导线电阻随石墨含量的增大而减小，同时我们还发现，当层数超过 50 层以后，电阻减小的趋势趋于 0，我们认为，由于石墨的润滑性很好，摩擦系数小，铅笔痕迹基本不在纸上沉淀，此时石墨含量趋于饱和。实验观察发现，当后面再涂石墨时，导线表面非常光滑，同时会有石墨粉末出现在上面，对电阻值影响较小。

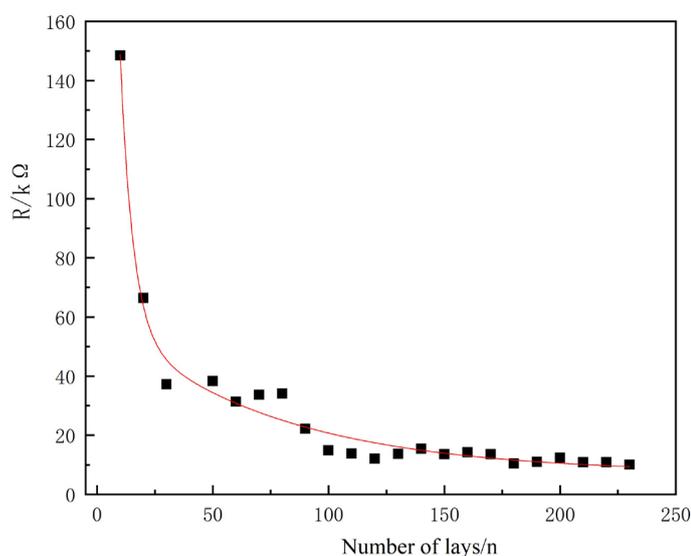


Figure 8. The relationship between the resistance of conductor and different graphite content

图 8. 导线电阻与不同石墨含量的关系图

## 4. 总结

研究用铅笔在纸上画出的导线的电阻特性，在实际操作中，由于接触方式的不同，对电阻的影响大小也不同，同时对不同的实验的影响也不同，所以经过粗略比较，我们主要使用以下两种接触方式：面接触和点接触。从理论和实验结果来看，我们可以验证导线长度与电阻呈线性正相关关系，而且随着铅笔笔芯里石墨与粘土中粘土比例越大，即铅笔的硬度越高，电阻随长度的变化就越明显。由公式(1)，我们知道导线截面越大，电阻值就越小，同时通过实验数据画出的曲线，我们可以直接看出来。压力主要是通过影响石墨粒子间的距离并使其减小，体积密度变大，电阻减小，结合实验数据，我们做了线性拟合，见图 7 发现压力和电阻之间存在负相关关系，相关系数在 0.8~1 之间，属于强相关关系。在研究电阻随温度的关系时，我们主要是通过查询资料，结合现有的实验条件，根据石墨的一些特性，即石墨在所受温度小于 600 摄氏度时，随着温度升高，电阻率会降低。在我们预设的 30~110 摄氏度范围内，实验结果表明电阻随温度升高而降低。通过阅读前人的一些论文，我们发现关于这个纸基电路还可以运用到柔性电子技术中，同时关于纸上铅笔痕迹，我们可以做一些电子器件，如电容[6]，场效应晶体管和 RC 滤波器等，同时在探究影响导线电阻的研究对象上，我们还可以做不同的纸、紫外线照射对电阻的影响等。并且在对压力的研究中，我们可以做一些改进，比如画出铅笔痕迹的拉曼光谱。

## 参考文献

- [1] Deprez, N. and Mclachlan, D.S. (1988) The Analysis of the Electrical Conductivity of Graphite Conductivity of Gra-

- phite Powders during Compaction. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **21**, 101-107.  
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/21/1/015>
- [2] Kurra, N. and Kulkarni, G.U. (2013) Pencil-on-Paper: Electronic Devices. *Lab on a Chip*, **13**, 2866-2873.  
<https://doi.org/10.1039/c3lc50406a>
- [3] Kurra, N., Dutta, D. and Kulkarni, G.U. (2013) Field Effect Transistors and RC Filters from Pencil-Trace on Paper. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **15**, 8367-8372. <https://doi.org/10.1039/c3cp50675d>
- [4] Rattanaweeranon, S., Limsuwana, P., Thongpool, V., Piriya Wong, V. and Asanithi, P. (2012) Influence of Bulk Graphite Density on Electrical Conductivity. *Procedia Engineering*, **32**, 1100-1106.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.02.061>
- [5] Marinho, B., Ghislandi, M., Tkalya, E., Koning, C.E. and de With, G. (2012) Electrical Conductivity of Compacts of Graphene, Multi-Wall Carbon Nanotubes, Carbon Black, and Graphite Powder. *Powder Technology*, **221**, 351-358.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.01.024>
- [6] 陈日雄, 于淑会, 孙蓉, 赵玉宝. 超级电容器用石墨烯的制备与性能研究[J]. 化工新型材料, 2012, 40(6): 66-68.