



# 半导体热敏电阻温度特性研究的改进策略

马骁宇 (71121117)

(东南大学, 南京 215000)

**摘要:** 本文基于大学物理选修实验“半导体热敏电阻的电阻温度特性的测量”, 针对实验相关内容进行课外研读, 并基于一些有关于热敏电阻温度特性测量的方法和一种描述半导体热敏电阻器 R-T 特性的数学模型, 提出了对现有实验方法与数据处理策略的改进措施。

**关键词:** 热敏电阻, R-T 特性, 测量方法, 回归分析

## The Improvement Strategy for the Study of Temperature Characteristics of Semiconductor Thermistors

Ma Xiaoyu

(Southeast University, Nanjing 215000)

**Abstract:** Based on the college physics elective experiment Measurement of Temperature Characteristics of Semiconductor Thermistors, this paper conducts extracurricular research on the related content of the experiment, and based on some methods of measuring the temperature characteristics of Thermistors and a mathematical model describing the R-T characteristics of semiconductor Thermistors, the improvement measures of the existing experimental methods and data processing strategies are proposed. At the same time, new experimental steps are creatively to cultivate students' exploration spirit.

**key words:** Thermistors; R-T characteristic; Measurement method; Regression analysis

半导体热敏电阻在生产生活中是一种极为重要的电子元件。在一定温度范围内, 极小的温度变化也能引起该元件阻值的显著变化, 具有体积小、寿命长、使用方便等特点。  
马骁宇 (2002 年 11 月 20 日), 男, 江苏淮安人, 东南大学软件学院软件工程专业 2021 级本科生, E-mail: 213211310@seu.edu.cn

作为常用温控、测温元件, R-T 特性是半导体热敏电阻最为重要的属性之一。本文回顾了半导体热敏电阻的电阻-温度特性; 运用万能电桥、改变加热媒质等方式改进半导体热敏电阻温度特性实验装置; 提出对该实验仿真软件的优化建议; 运用

回归分析

新数学模型改进数据的处理方法,更精确地测量半导体热敏电阻的 R-T 特性;同时创造性的提出让学生“探索最佳拟合公式”的实验步骤,尝试突破传统的验证式实验,培养探索精神;并设计开发配合本实验改进策略的软件工具。

## 1 课内实验原理与方法简析

### 1.1 半导体热敏电阻的电阻—温度特性

从总体上说,半导体热敏电阻的电阻—温度特性服从指数关系,这主要是由半导体的电导率与温度的关系决定的,如公式(1)

$$\rho_t = A_0 e^{\frac{B}{T}} \quad (1)$$

由于电阻率的变化,会导致整个半导体热敏电阻的变化,在本学期的课内实验中采用公式(2)进行计算。

$$R_T = R_\infty e^{\frac{B}{T}} \quad (2)$$

对(2)式两边求自然对数后可得到  $\ln R$  和  $\frac{1}{T}$  的线性关系式:

$$\ln R_T = \ln R_\infty + B \frac{1}{T} \quad (3)$$

热敏电阻对温度变化反应的灵敏度一般由电阻温度系数  $\alpha$  来表示。

根据定义,电阻温度系数由式(4)来决定:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT} \\ \Rightarrow \alpha &= -\frac{B}{T^2} \end{aligned} \quad (4)$$

半导体热敏电阻随温度的变化是非线性的,其 R-T 关系曲线为一条曲线,如图 1 所示:

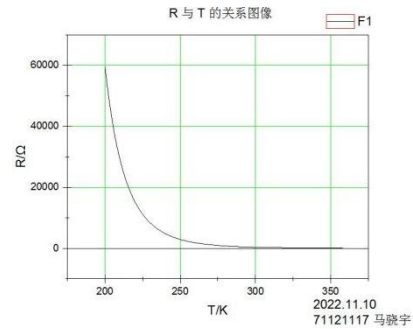


图 1 半导体热敏的温度曲线

### 1.2 仿真实验与惠斯通电桥

#### 1.2.1 方法简述

课本之中采用的实验思想是利用惠斯通电桥,如图 2:

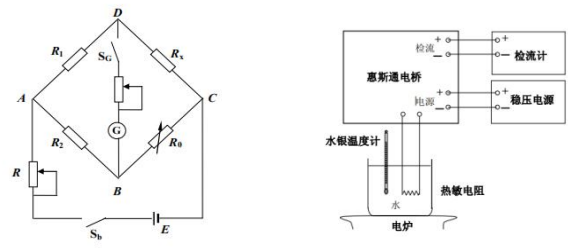


图 2 惠斯通电桥和实验原理图

当灵敏电流计中无电流通过时,电桥便达到了平衡。根据电路设计与电阻计算可知,平衡时有公式(5)成立:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0 \quad (5)$$

据此求出对应温度下的半导体热敏电阻阻值。

#### 1.2.2 传统实验方法的弊端

由于热敏电阻对于温度十分敏感,而外界环境变化造成的不可控因素太多,会让实验的准确性大大下降。

观察实验原理图可知,若采用传统实物实验方案,需要使用电炉对电阻进行水浴加热。整个过程相对较为缓慢,且在实验过程中需要几乎同时进行以下三项工作:

① 观察水银柱温度是否达到需要测量阻值的对应温度;



② 观察电流计指针指向（偏左或偏右）；  
③ 调整电阻箱阻值使电流计指针指向中央；  
电流计指针偏转、人工观察与读数均需要较长时间，而在这过程中电炉持续加热，电阻阻值随时发生变化，这些原因导致传统的实物操作与测量难度过大，实验数据准确性也会受极大影响，严重影响最终实验结论的得出。

### 1.2.3 仿真实验的优越性

仿真实验可以通过在屏幕上随时观察水银温度计温度刻度线、灵敏电流计示数盘来同步快速调节电阻箱，在实验操作上更为便捷；综合考虑电功率和散热因素，保证实验是在一个相对较为稳定的环境下进行的；仿真实验也可以达到节约实验资源的环保目的。

除此以外，东南大学半导体热敏电阻的电阻—温度特性（仿真）实验采用的仿真软件在温度上升、电流计偏转这两项功能上可能采用单线程设计（笔者据实验过程中的实验现象推测），因而在等待电流计偏转稳定以调节电阻箱时，电阻温度保持不变，即阻值也不会变化，如此设计大大提高了实验的准确度。

## 2 实验装置改进策略

### 2.1 现有实验装置

现有的实验装置如图 2，用水作为热媒介，采用水浴加热的方式提供给热敏电阻一个相对于稳定且温度上升缓慢的加热环境；实验电路用电阻箱、灵敏电流计连接成惠斯通电桥电路来实现对半导体热敏电阻的测量。

这种测量方法存在以下几个弊端：

① 水浴加热限制了电阻变化温度区间——即室温（约 20℃）~水的沸点以下（约 100℃）。但是半导体热敏电阻相对完整和精确的温度曲线不应局限在该温度区间，需要对该情况进行优化；

② 惠斯通电桥最佳的适用测量电阻是中值电阻，但在本实验中，由于半导体热敏电阻阻值变化较大，甚至在调节电阻箱阻值时需要适时更改电阻箱量程（温度较低时为×0.1，升温后更改为×0.01），惠斯通电桥并不能完全匹配该实验测量要求，有待优化；

③ 本实验仿真软件仅能够完成对于实验过程的仿真，其中的数据还是需要人为记录并处理的。实验者需要将实验数据重新录入 Excel 并进行数据初步处理，再将初步处理完的数据录入 Origin 数学软件进行曲线拟合，其中 Origin 软件使用难度较大，且在本实验中教学成本与使用价值不完全匹配导致数据处理难度发生不必要的加大。

### 2.2 实验装置改良及分析

针对当前实验装置与软件存在的问题，结合文献<sup>[1]</sup>与文献<sup>[3]</sup>中所述，提出以下改良措施：

① 改进加热媒质，用沸点相对较高的煤油作为加热媒质。煤油的熔点和沸点相差 350℃左右，用其代替水，扩大媒质温度变化范围，从而扩大半导体电阻温度变化范围（约 20℃~200℃）。更有利于实现对于半导体热敏电阻的对于温度的非线性关系的测量；

② 改进测量电路，用万能电桥（包括低值电阻的开尔文电桥电路，中值电阻的惠斯通电桥电路和高值电阻测量电路）代替惠斯通电桥电路。该改进不仅可以解决电路适用测量电阻阻值范围较小的问题，更可以简化实验步骤（原搭接电桥电路），突出实验重点核心内容；

③ 改进仿真实验软件。可以优化仿真软件中的数据记录功能，同时内连数据库直接存储实验所得数值，进而直接完成数据的收集。如此改进可以减少学生手动记录数据再输入电脑 Excel 表格这一重复且不必要的过程。

## 3 实验数据处理改进策略

### 3.1 数学模型比较分析

在本实验采用的原始数学模型，即公式（2），可以描述各种热敏电阻的一般基本变化趋势，但在部分高精度温度测量中发现，用该模型处理实验数据得出的误差大小不一，可见该模型的精确度有待修正。

在文献<sup>[2]</sup>中，作者基于各种热敏电阻器的 R-T 特性满足指数关系这一本质，提出了全新的数学模型：将电阻表示成温度的级数展开式，如（6）式：

$$R(T) = \sum_{i=1}^n d_i e^{f_i(T)} \quad (6)$$



其中  $d_i$  和  $C$  为不同常数。  $f_i(T)$  为温度  $T$  的函数，是  $R$ - $T$  关系的主要体现者。

对于所有的  $i$ , 令  $d_i=d$ , 并将其结合材料性质  $f_i(T)$  作级数展开后可以得到:

$$f_i(T) \equiv g_0 + \frac{g_1}{T} + \frac{g_2}{T^2} + \dots + \frac{g_n}{T^n} + \dots$$

$$= \sum_{j=0}^n \frac{g_j}{T^j} \quad (7)$$

将 (7) 代入 (6), 可以得到具体的半导体热敏电阻的  $R$ - $T$  特性描述公式:

$$R(T) = nd e^{\sum_{j=0}^m \frac{g_j}{T^j}} \quad (8)$$

比较发现公式 (8) 与公式 (2) 极为相似, 不同在于 (8) 式引入材料性质常数  $g_i$  和  $\frac{1}{T}$  的高阶项使得数据处理更为精确。

### 3.2 优化结果拟合准确度分析

在提出全新的数学模型后, 为了考察该数学模型的价值, 对改进后的数学模型的拟合准确度进行分析。

对 (8) 式等号两侧取自然对数可以得到:

$$\ln R = g_1' + \frac{g_2}{T} + \frac{g_3}{T^2} + \dots + \frac{g_{n+1}}{T^n} + \dots \quad (9)$$

$$g_1' = \ln(nd) + g_1$$

比较 (3) 式和 (9) 式可以看出由传统的描述  $R$ - $T$  特性的公式得到的  $\ln R$  只与  $\frac{1}{T}$  的一次项成正比, 而 (9) 式给出的更多高阶项对精度和  $R$ - $T$  关系来说, 起到一个补偿和微调的作用。这样由 (9) 式得到的  $R$ - $T$  特性的误差会远远小于基于现有公式处理数据得到的误差值。

在分析回归误差时采用均方误差 (MSE) 反映估计量与被估计量之间差异程度的一种度量。其计算公式如公式 (10) 所示。

$$MSE(\hat{\theta}) = E(\hat{\theta} - \theta)^2 \quad (10)$$

### 3.3 证明与结论

在课内实验中我一共获得了温度从  $20^\circ\text{C}$ —

$85^\circ\text{C}$  共 14 组数据。

采用随机划分的方式选择其中的 70% 作为训练集, 30% 作为测试集。考虑到样本数量较小且便于非计算机类专业同学学习, 采用回归分析的方法, 利用训练集得出回归方程并计算测试集基于回归方程的预测结果与真实结果的误差。

	训练集	测试集
占比	70%	30%
数目 (个)	9	5

表 1 数据集划分

在计算回归方程时为了提高效率采用 Python 编程实现, Python 源码附在附录 1 中。

对 9 组训练数据分别采用公式 (9) 进行 1-5 次展开 (回归), 得出回归方程。用均方误差来表征误差, 得出回归方程与误差如下:

#### A) 线性回归

$$\ln R = 3 \frac{1}{T} - 4.019$$

$$mse = 2.41 \times 10^{-5}$$

#### B) 二次多项式回归

$$\ln R = -0.011 \frac{1}{T^2} + 3.064 \frac{1}{T} - 4.118$$

$$mse = 2.11 \times 10^{-5}$$

#### C) 三次多项式回归

$$\ln R = 0.2346 \frac{1}{T^3} - 2.211 \frac{1}{T^2} + 9.933 \frac{1}{T} - 11.25$$

$$mse = 8.85 \times 10^{-6}$$

#### D) 四次多项式回归

$$\ln R = 0.3009 \frac{1}{T^4} - 3.517 \frac{1}{T^3} + 15.31 \frac{1}{T^2}$$

$$- 26.37 \frac{1}{T} + 16.91$$

$$mse = 1.15 \times 10^{-5}$$

...

绘制均方误差(MSE)与展开阶数(N)关系图如下:

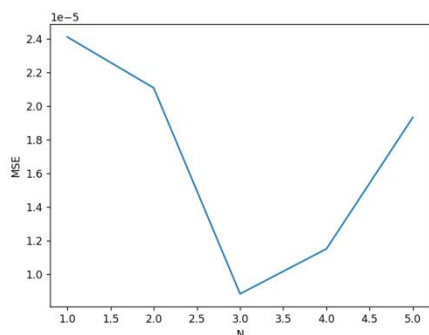


图3 不同取值下MSE-N折线图

观察可以发现,在当前数据集下,  $N=3$  时回归造成的误差最小,当  $N < 3$  时回归方程存在欠拟合情况而  $N > 3$  时存在过拟合现象。

结合当前图像分析可知,在课内采用的简单线性回归公式准确性尚可,但与  $N=3$  时拟合公式相比误差还存在数量级上的差距。考虑到本实验为仿真实验,在计算机辅助下计算成本极低,因此推荐使用更为精确的三次展开式作为拟合曲线去计算,同时本次模拟也证明了公式(6)的合理性。

## 5 创新实验设计

### 5.1 创新实验步骤

在当前的物理实验中,学生在处理数据等方面大多直接采用教师或书本上提供的公式,缺乏自我探索过程。但在现在的科研、实验中,往往需要我们根据数据选择最合适的拟合手段。以机器学习为例,不同规模、类型的数据集,我们往往需要选择不同的模型、调整参数以得到相对更优的结论,这样的比较探索实验能力是在我们实验课程中所需要培养的。

仿真实验具有利用计算机软件数据处理相对便捷的优点。计算机(编程)技术对于物理实验、数据处理也有着极大的优势。

综合考虑下,可以创新性的增加如下实验步骤:

学生根据自己测量的数据结果,利用公式(9)对高阶多项式回归方程进行拟合,同时绘制拟合阶数与误差的曲线图,选择最适合自己的数据集的

多项式阶数进行最终拟合与计算。

如此不仅可以帮助学生得出更为精确的结论,还能在实验中培养学生探索精神,更能体现物理实验的价值。

### 5.2 自研数据处理软件

考虑到不同专业同学对于 Python 语言开发等相关能力差异较大,为了便于学生在实验中针对不同的  $N$  进行回归计算,笔者针对该功能进行了简单的小工具以供使用。



图4 半导体热敏电阻温度特性研究实验自研辅助工具

如图4,在输入本次回归的拟合曲线最高幂次  $N$  (图中为3)后,点击“选择文件并计算”,选择数据表后稍等片刻即可得出实验相关数据,包括拟合曲线系数和误差等,具体使用流程见附件二。

## 6 总结与归纳

半导体热敏电阻在生活中有着极其广泛的运用,大则如国防检测、卫星测温,小则如农作物培育,家禽孵化。而这一切应用顺利进行的关键要求就是获得符合精确度要求的半导体热敏电阻的  $R-T$  特性测量结果。

在本学期的大学物理实验中,我因为对仿真实验的好奇选择了该实验并学习了半导体热敏电阻  $R-T$  特性的相关知识,在实验过程中我对该实验的原理以及为何采用如此特殊的实验方式产生了极大的兴趣,因此针对该实验进行了课外阅读与探索。

固然,仿真实验在实验环境上可以有效减少误差,但除了读数等操作造成的偶然误差外,该实验在设计原理、数据处理等方面是否存在一些可以减小的误差?该实验在操作上是否可以优化?

在经过资料的收集阅读、数学推演、与课内外实验比较后,本文所提出的关于加热媒质、测量电



路等实验装置的优化都是建立在大学物理知识基础上提出的；引入物质材料系数  $g$  以及  $\frac{1}{T}$  的高阶展开的数据处理方法是基于我们高等数学相关知识提出的。

除此以外，我还尝试结合自己所学专业相关内容——即计算机专业相关知识对仿真实验软件的现有功能评析且提出可能的功能优化。

本文的核心创新点在于：

① 针对高阶展开公式进行数据验证，证实了在个人实验数据情况下，一阶线性回归并不是最优解；

② 建议增设探索回归方程最佳展开阶数的实验流程，培养学生探索精神，进一步深化仿真实验的价值；

③ 考虑到不同专业同学在计算机编程方面的能力并不一致，于是对数据处理工具进行提前开发与打包，方便同学使用。

通过本次物理实验研学，我综合运用本专业多门理工类课程所学相关知识，以期减少不必要的实验时间浪费、突出实验重点、减小实验误差、培养探索精神，取得了较好的成效。

### 参考文献：

- [1] 罗志高, 苏丹.铜电阻和半导体热敏电阻温度特性测量实验设计与实现[J].大学物理实验, 2021, 34(03):59-63.
- [2] 邢爱堂, 战立欣.一种描述半导体热敏电阻器 R-T 特性的数学模型[J].传感器世界, 2000(03): 14-1
- [3] 李英.半导体热敏特性研究实验装置的改进[J].商洛师范专科学校学报, 2004(02):22-24
- [4] 唐艳妮, 李雪琴, 刘芯, 等.一种 NTC 热敏电阻特性与应用实验仪的改进[J].大学物理实验, 2020, 33(04):60-64
- [5] 王艳辉, 张佼, 王奇, 等.利用串并联电阻法实现 NTC 热敏电阻测温线性化的探究[J].物理与工程, 2017, 27(S1):256-259.



## 附录一：绘制 MSE 与 N 折线图源码

```
1. import numpy as np
2. import pandas as pd
3. from sklearn.model_selection import train_test_split
4. from sklearn.metrics import mean_squared_error
5. import matplotlib.pyplot as plt
6.
7. # 获取数据与数据集分割
8. df = pd.read_excel("1.xlsx", "Sheet1")
9. data = np.array(df)
10. X = data[:, 1]
11. y = data[:, 0]
12. X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.3, random_state=66)
13.
14. mse = []
15. Ns = range(1, 6)
16.
17. # 针对不同N 进行回归运算
18. for N in Ns:
19.     z = np.polyfit(X_train, y_train, N)
20.     p = np.poly1d(z)
21.     print("Equation of the curve: ", p)
22.     y_predict = p(X_test)
23.     mse.append(mean_squared_error(y_predict, y_test))
24.
25. # print(mse) 输出误差
26. # 绘制误差-N 图像
27. plt.plot(Ns, mse)
28. plt.xlabel("N")
29. plt.ylabel("MSE")
30. plt.show()
```



## 附录二：实验自研辅助工具使用流程

注：本工具已完成依赖打包，安装即可使用

1. 在收集数据并处理后得到数据表格式如下

	lnR	1/T
1		
2	6.215507694	3.411222923
3	6.045479135	3.354016435
4	5.877595716	3.298697015
5	5.713402718	3.245172805
6	5.559527119	3.193357816
7	5.412984442	3.14317146
8	5.265277512	3.09453814
9	5.125748101	3.047386866
10	4.987707789	3.001650908
11	4.851639563	2.957267485
12	4.726059503	2.914177473
13	4.596633855	2.872325147
14	4.473921899	2.831657936
15	4.347046916	2.792126204

2. 打开本工具后在空白栏输入本次工具所需的 N



3. 点击“选择文件并计算”选择需要计算的 excel 文件



4. 工具界面上会展示当前文件、阶数下的误差 MSE 与回归方程系数（按 X 降幂排列）





5. 若需计算其他阶数，更改 N 重复上序步骤即可