

利用补偿电路设计并制作热敏电阻温度计

—— 温度计设计的一种新思路

姜 涛 周志明 于华民 孙 艳

(空军航空大学航空基础学院 吉林 长春 130012)

(收稿日期:2024-03-31)

摘要:利用 NTC 型热敏电阻,采用补偿法思想(补偿电路)设计了热敏电阻温度计,并进行测温验证了设计效果.补偿法设计温度计是一种完全区别于电桥法的温度计设计新思路,原理简单,实验设备要求低,可设计性强,特别适合于开发成新的设计性实验.

关键词:补偿法;热敏电阻温度计;设计性实验

1 引言

利用热敏电阻设计并制作温度计是很多院校开设的设计性实验项目^[1],各院校几乎都是采用电桥电路实现的温度计设计^[2].不可否认,电桥电路原理简单,设计难度不大,比较适合在大一或大二学生中开设此实验.为拓展实验设计思路,此设计性实验也可采用补偿法^[3]思想实现温度计的设计.补偿法设计温度计是一种与电桥法截然不同的新的温度计设计思路.其原理简单清晰,对实验设备的要求相对较低,可设计性强.因此,补偿法设计温度计特别适合于开发为新的设计性实验.

2 设计要求和设备条件

热敏电阻温度计测温范围为 30 ~ 80 °C,且要

求作为温度计用的微安表的全部测量范围均能有效利用,即 30 °C 时微安表指零,80 °C 时微安表指示为满刻度(50 μ A).温度计设计所使用的实验仪器有:DHT-2 型热学实验仪、NTC 热敏电阻(B 值约为 4 000)、直流稳压电源(电压调节范围 0 ~ 32 V)、电阻箱(阻值调节范围 0 ~ 99 999.9 Ω 、额定功率 0.25 W)、微安表(量程 50 μ A、内阻约 1 000 Ω)、万用表、导线等.

3 实验原理

3.1 热敏电阻伏安特性

热敏电阻温度计采用的是非电荷量的电测法,即将温度先转换为热敏电阻阻值变化,再转换为电流大小,所以需要了解热敏电阻的伏安特性.NTC 热敏电阻的伏安特性测量数据如表 1 所示.

表 1 NTC 热敏电阻伏安特性测量数据

电流 / mA	电压 / V	电流 / mA	电压 / V	电流 / mA	电压 / V
0.5	1.25	5.0	9.07	16.0	11.73
1.0	2.54	5.5	9.48	17.0	11.53
1.5	3.78	6.0	9.76	18.0	11.42
2.0	4.90	7.0	10.57	19.0	11.41
2.5	5.84	8.0	10.90	20.0	11.35
3.0	6.90	9.0	11.11	24.0	11.10
3.2	7.14	10.0	11.27	26.0	10.88
3.5	7.64	11.0	11.45	28.0	10.69
3.8	8.09	12.0	11.53	30.0	10.53
4.0	8.25	13.5	11.61		
4.5	8.67	14.0	11.66		

NTC 热敏电阻的伏安特性曲线如图 1 所示.

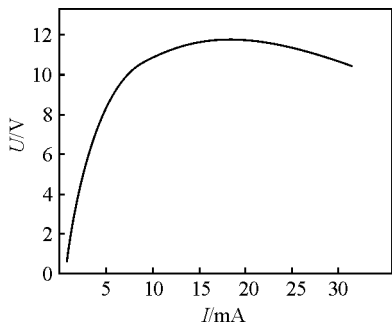


图 1 NTC 热敏电阻的伏安特性

在曲线的起始部分,曲线接近线性,这是因为电流较小时在热敏电阻上消耗的功率不足以显著地改变热敏电阻的温度,因而符合欧姆定律.此时,热敏电阻的阻值主要与外界温度有关,电流热效应的影响可以忽略不计.根据数据和曲线可以看出,要确保所用热敏电阻自身基本不发热,其通过的电流要小于 4 mA.

3.2 电路设计

基于补偿法设计的电路如图 2 所示.其中 R_T 为热敏电阻.在回路 ① 中设计电阻 R_P ,并尽量取大值,其目的是使得在热敏电阻变温过程中,回路 ①

中的电流 I_0 变化不太显著;在回路 ② 中设计电阻 R ,是为了确保在热敏电阻变温过程中,回路 ② 中的电流可以在 $0 \sim 50 \mu\text{A}$ 之间变化,且保证在温度为 80°C 时, $I = 50 \mu\text{A}$.

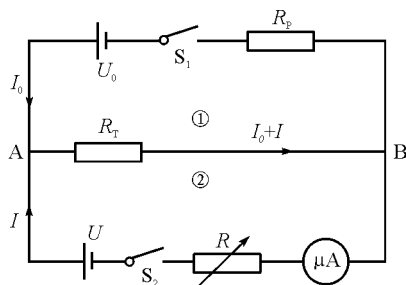


图 2 补偿法电路

3.3 电路参数设计

3.3.1 准备工作

(1) 微安表内阻测量

在实验中,采用惠斯通电桥电路测量了微安表的内阻^[4-5],其阻值为 $R_G = 1\ 030.00 \Omega$.

(2) NTC 型热敏电阻阻值测量

采用数字万用表对 NTC 型热敏电阻的阻值进行测量,结果如表 2 所示,根据此表中的数据完成电路参数设计并标定温度计.

表 2 NTC 热敏电阻阻值随温度变化测量数据

温度 / $^\circ\text{C}$	阻值 / Ω	温度 / $^\circ\text{C}$	阻值 / Ω	温度 / $^\circ\text{C}$	阻值 / Ω	温度 / $^\circ\text{C}$	阻值 / Ω
30	2 120	44	1 190	58	707	72	435
32	1 930	46	1 100	60	665	74	406
34	1 760	48	1 020	62	613	76	383
36	1 621	50	945	64	572	78	357
38	1 524	52	877	66	543	80	335
40	1 395	54	815	68	497		
42	1 288	56	759	70	469		

3.3.2 采用近似处理设计参数

由于热敏电阻可通过的最大电流为 4 mA,微安表流过的最大电流为 $50 \mu\text{A}$,所以在设计参数时可考虑 $I_0 \gg I$,忽略 I 的出现对 I_0 的影响,即认为 I 没有引起回路 ① 任何变化.为此,使 I_0 值尽量大一些,本实验选定 I_0 最大值 $I_{0\text{max}}$ 为 3.5 mA,如此选定是考虑确保在 I 也流过 R_T 时候,流过热敏电阻的电流小于 4 mA,依然不发热.

考虑到 R_P 尽量选大值,对回路 ① 通过欧姆定

律分析可知, U_0 应尽量选大值,所以基于仪器的电压可调范围,选定 $U_0 = 30 \text{ V}$.继而可以计算出

$$R_P = \frac{U_0}{I_{0\text{max}}} - R_{T_2} = \frac{30 \text{ V}}{3.5 \times 10^{-3} \text{ A}} - 335 \Omega \approx 8\ 236 \Omega \quad (1)$$

其中 R_{T_2} 是热敏电阻在 80°C 时的阻值.如果用 R_{T_1} (热敏电阻在 30°C 时的阻值) 计算,当 $R_T = R_{T_2}$ 时, $I_0 > 4 \text{ mA}$,热敏电阻会发热.

确定了回路①的参数后,可根据补偿状态分析确定出 U ,即

$$U = I_{0\min} R_{T1} = \frac{U_0}{R_P + R_{T1}} R_{T1} = \frac{30 \text{ V}}{8\,236 \Omega + 2\,120 \Omega} \cdot 2\,120 \Omega \approx 6.14 \text{ V} \quad (2)$$

其中 $I_{0\min}$ 为回路①中流过的最小电流(对应 R_T 最大时),忽略 I 的引入对回路①产生的一切影响,设微安表内阻为 R_G ,根据欧姆定律对回路②分析得

$$I = \frac{U - I_0 R_T}{R_T + R + R_G} = \frac{U - \frac{U_0}{R_P + R_T} R_T}{R_T + R + R_G} \quad (3)$$

上式为流过微安表的电流 I 随 R_T 变化的关系式.当温度为 80°C 时 $R_T = R_{T2}$, $I = 50 \mu\text{A}$,带入上式可得

$$50 \mu\text{A} = \frac{U - I_{0\max} R_{T2}}{R_{T2} + R + R_G} = \frac{U - \frac{U_0}{R_P + R_{T2}} R_{T2}}{R_{T2} + R + R_G} \quad (4)$$

代入数据,解出 $R = 97\,985 \Omega$.至此,整体参数设计完成.

在上述参数设计中采用了近似处理,即忽略了 I 的引入对回路①造成的一切影响,这种处理方法必然会带来系统误差.为了审查近似处理的合理性,并分析出系统误差的大小,下面将利用基尔霍夫方程组对电路参数做严格设计.

3.3.3 电路参数的严格设计

与前述内容相同,依然选 $I_{0\max} = 3.5 \text{ mA}$, $U_0 = 30 \text{ V}$,算得 $R_P = 8\,236 \Omega$, $U = 6.14 \text{ V}$.差别主要在于 R 值的不同上.

当回路②中有电流 I 时,由基尔霍夫方程组可得如下方程.对回路①有

$$U_0 - (I_0 + I)R_T - I_0 R_P = 0 \quad (5)$$

对回路②有

$$U - (I_0 + I)R_T - IR - IR_G = 0 \quad (6)$$

由方程(5)可得

$$I_0 = \frac{U_0 - IR_T}{R_T + R_P} \quad (7)$$

将式(7)带入方程(6),经简单推导可得

$$I = \frac{U - \frac{U_0 R_T}{R_T + R_P}}{R_T + R + R_G - \frac{R_T^2}{R_T + R_P}} \quad (8)$$

此式即为 I 随 R_T 变化的关系式.由此式可知,当 $I = 0$ 时(补偿状态),必然要求

$$U = \frac{U_0 R_{T1}}{R_{T1} + R_P} \quad (9)$$

这与前边的分析结果一致.代入参数可以解出 $R = 97\,997 \Omega$.

3.3.4 由于近似所引起的误差分析

由于本实验所设计的温度计是用微安表读数表示温度,所以分析近似所引起的误差主要就是看近似对 I 带来的影响.即考查

$$\Delta I = \frac{U - \frac{U_0}{R_P + R_T} R_T}{R_T + R + R_G} - \frac{U - \frac{U_0 R_T}{R_T + R_P}}{R_T + R + R_G - \frac{R_T^2}{R_T + R_P}} \quad (10)$$

将本实验选定参数带入式(10),计算可知 ΔI 最大值为 $3.4 \times 10^{-8} \text{ A}$,与微安表中通过电流 I 相比,大约相差3个数量级,所以,考虑到用基尔霍夫方程组求解参数的复杂性,通常情况下,采用近似方法设计温度计即可.

4 实验步骤及数据处理

4.1 温度计标定

在本实验中,首先用电阻箱代替 R_T 来实现温度计的标定. U 的值调整到比设计值 6.14 V 稍大(可定为 7 V),目的是确保回路②接通时, I 不会反向流动损坏电源.先接通回路①,再接通回路②.先从 7 V 开始调小 U 的值,使微安表指零,而后保持 U 一直不变.再将电阻箱由 $2\,120 \Omega$ (30°C 阻值)调整到 335Ω (80°C 阻值),记录微安表的读数变化.当阻值为 335Ω 时,如果 $I \neq 50 \mu\text{A}$,可微调 R 的阻值,使得 $I = 50 \mu\text{A}$.

按照表2,每隔 2°C 调整一次电阻箱阻值,读取对应的微安表电流值,设计表格记录 $T - R_T - I$ 数据,如表3所示.

表3 温度计标定数据

序号	温度 $T/^\circ\text{C}$	阻值 R_T/Ω	电流 $I/\mu\text{A}$	序号	温度 $T/^\circ\text{C}$	阻值 R_T/Ω	电流 $I/\mu\text{A}$
1	30	2 120	0.0	14	56	759	36.2
2	32	1 930	4.3	15	58	707	37.9
3	34	1 760	8.5	16	60	665	39.3
4	36	1 621	12.0	17	62	613	41.0
5	38	1 524	14.6	18	64	572	42.3
6	40	1 395	18.0	19	66	543	43.2
7	42	1 288	20.9	20	68	497	44.7
8	44	1 190	23.6	21	70	469	45.6
9	46	1 100	26.1	22	72	435	46.8
10	48	1 020	28.4	23	74	406	47.8
11	50	945	30.6	24	76	383	48.6
12	52	877	32.7	25	78	357	49.5
13	54	815	34.6	26	80	335	50.0

按表3绘制温度计定标曲线,如图3所示。

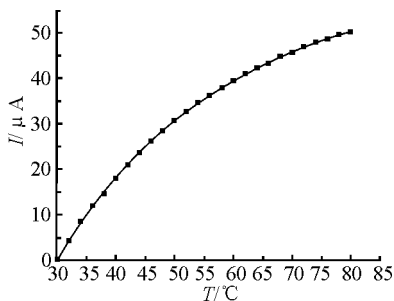


图3 温度计定标曲线

从图3中可以看出,电流与温度呈现的是非线性关系。

4.2 测温验证

将电阻箱换成热敏电阻,用智能加热器给热敏电阻加热,分别在30,40,50,60,70,80 $^\circ\text{C}$ 时读取微安表读数,与加热器显示温度进行比较,验证温度计设计是否成功,并分析误差的大小。对比数据如表4所示。

表4 温度计测温验证数据

序号	温度 $/^\circ\text{C}$	阻值 R_T/Ω	标定电流 $/\mu\text{A}$	测温验证电流 $/\mu\text{A}$	电流差值 $/\mu\text{A}$
1	30	2 120	0.0	0.1	-0.1
2	40	1 395	18.0	18.1	-0.1
3	50	945	30.6	30.0	0.6
4	60	665	39.3	39.2	0.1
5	70	469	45.6	45.5	0.1
6	80	335	50.0	49.9	0.1

从表4可以看出,除了50 $^\circ\text{C}$ 时的电流差值稍大外,其余差值都很小,从而可以确认温度计设计成功。

5 实验结果分析

5.1 电桥法数据与补偿法数据对比

为比较电桥法和补偿法设计温度计的优劣,同时采用电桥法设计了温度计。两种方法的电流温度变化曲线对比如图4所示。

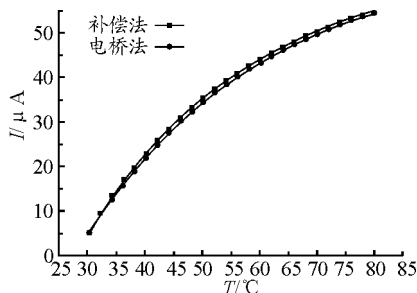


图4 电桥法与补偿法定标曲线对比

从曲线中可以看出,两种方法设计的温度计,电流随温度的变化都呈现非线性规律,两种方法效果相近,但补偿法更加简单,这证明了补偿法设计温度计的优越性.

5.2 实验误差来源分析

综合分析实验全过程,可以发现如下误差来源.

(1) 理论误差. 在参数设计过程中,由于忽略了 I 的引入对回路①电流的影响,进行了近似设计,这必然带来系统误差.

(2) 参数取近似带来的误差. 在参数设计过程中,按照不同原则对参数进行了有效位数的取舍,这也将带来误差,这里面包含系统误差和随机误差.

(3) 微安表存在仪器误差.

(4) 读数时存在估读误差.

(5) 电阻箱存在仪器误差.

(6) 直流稳压电源的电压波动带来的误差.

(7) 热敏电阻阻值的测量存在误差.

6 实验总结与改进建议

本实验提出了一种设计温度计的全新思路. 从实验原理、实验设计到实验结果全过程分析可以看出,该实验原理清晰,设备简单,内容丰富,数据准确,误差很小,可供学生设计发挥的空间很大,总体难度适中,特别适合于开发成一个3学时的设计性实验.

补偿法设计温度计有以下两点可改进之处:一是 $I-T$ 变化是非线性关系,这不利于测温使用,应

考虑进行线性化设计^[6-7];二是从微安表表盘读出温度(且 $I-T$ 显非线性关系)不太方便,应进一步将电流 I 数字化^[8-9],从数显仪表^[10-11]直接读出温度 T .

参考文献

- [1] 徐景刚. 探讨热敏电阻温度计的制作及其要领[J]. 物理通报,2001(2):35-36.
- [2] 王贵生,雷宇,邓金祥,等. 微安表内阻值对热敏电阻温度计设计的影响[J]. 物理与工程,2020,30(1):98-100,108.
- [3] 熊泽本. 补偿法在物理学中的应用[J]. 实验室科学,2019,22(5):20-25.
- [4] 吴泳华,霍剑青,浦其荣. 大学物理实验[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2005:11.
- [5] 王江新,杨丽,姜建刚,等. 基于惠斯通电桥探究热敏电阻与温度之间的关系[J]. 大学物理实验,2023,36(6):45-48.
- [6] 杨守庚. 具有线性刻度的热敏电阻温度计的设计[J]. 电子技术应用,1977(1):32-36.
- [7] 周娴,齐建英,汪洁. 热敏电阻温度计的线性化设计[J]. 大学物理实验,2013,26(2):45-47.
- [8] 林上金,胡澄,李延标,等. 热敏电阻数字温度计设计制作实验的线性化方案探究[J]. 大学物理实验,2011,24(1):23-25.
- [9] 庄杏芬,沈兰荪. 热敏电阻测温与智能化温度计的设计[J]. 仪表材料,1987(6):328-335.
- [10] 覃艳,周厚兵,覃嘉良,等. 一种简易数显温度计的设计与制作[J]. 广西物理,2023,44(2):34-38.
- [11] 汪小会. 数字显示温度计教学课题的设计[J]. 电气电子教学学报,2012,34(5):89-90,93.

Design and Manufacture Thermistor Thermometers Using Compensation Circuits

—A New Approach to Thermometer Design

JIANG Tao ZHOU Zhiming YU Huamin SUN Yan

(Aviation Foundation College, Air Force Aviation University, Changchun, Jilin 130012)

Abstract: A thermistor thermometer was designed using NTC type thermistors with compensation method (compensation circuit), and the design effect was verified through temperature measurement. The compensation method for designing thermometers is a new approach that is completely different from the bridge method. The principle is simple, the experimental equipment requirements are low, and the designability is strong, making it particularly suitable for developing new design experiments.

Key words: compensation method; thermistor thermometer; design experiments