

## 四 温度与热导率的测量

第一部分：

### 动态法测定良导体的热导率

#### 【实验简介】

导热系数是表征物质热传导性质的物理量。材料结构的变化与所含杂质对导热系数值都有明显的影响，因此材料的导热系数常常需要由实验具体测定。测量导热系数的方法一般分为两类：一类是稳态法；一类是动态法。

在测量热导率的实验中，最普遍采用的方法是稳态法，即在保持被测样品各点温度不随时间变化的情况下测量热流，然后求出热导率，这种方法实验条件要求严格不易测准。而动态法就将难于测准的热学量的测量转变为容易测准的长度测量，从而显著降低测量误差。而且，由于学生对机械波、电磁波比较熟悉，而对热波接触甚少，故本实验可使学生产生新鲜感，也拓宽了他们对波动理论的认识。另外，本实验用微机实现对整个系统的控制、数据的采集、记录和绘图，使学生更好地了解了微机在物理实验中的应用过程。

#### 【实验目的】

1. 通过实验学会一种测量热导率的方法。
2. 解动态法的特点和优越性。
3. 认识热波，加强对波动理论的理解。

#### 【实验仪器与用具】

仪器主机由用绝热材料紧裹侧表面的圆棒状样品（本实验取铜和铝两种样品）、热电偶列阵（传感器）、实现边界条件的脉动热源及冷却装置组成，见示意图 1。样品中热量将只沿轴向传播，在任意一个垂直于棒轴的截面上各点的温度是相同的，于是，只要测量轴线上各点温度分布，就可确定整个棒体上的温度分布。温度的测量采用热电偶列阵，将热电偶偶端均匀插在棒内轴线处，两个相邻偶间距离均为 2cm，为保持棒尾的温度  $T_0$  恒定，以防止整个棒温起伏，用冷却水冷却。

本实验仪器结构框图见图 2，该仪器包括样品单元，控制单元和记录单元三大部分。本仪器由两种工作方式：手动和程控。他们都含样品单元和控制单元，不同的只是记录单元。前者用

高精度  $x$ - $y$  记录仪，后者用微机实现对整个系统的控制、数据的采集、记录和绘图，学生自行数据处理。

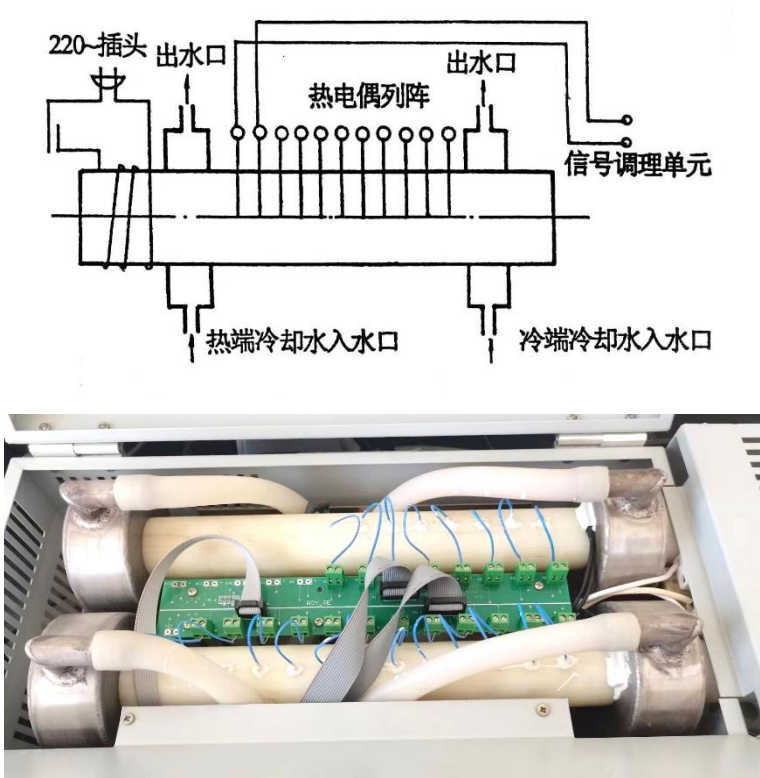


图 1 主机结构示意图（上）与内部照片（下）

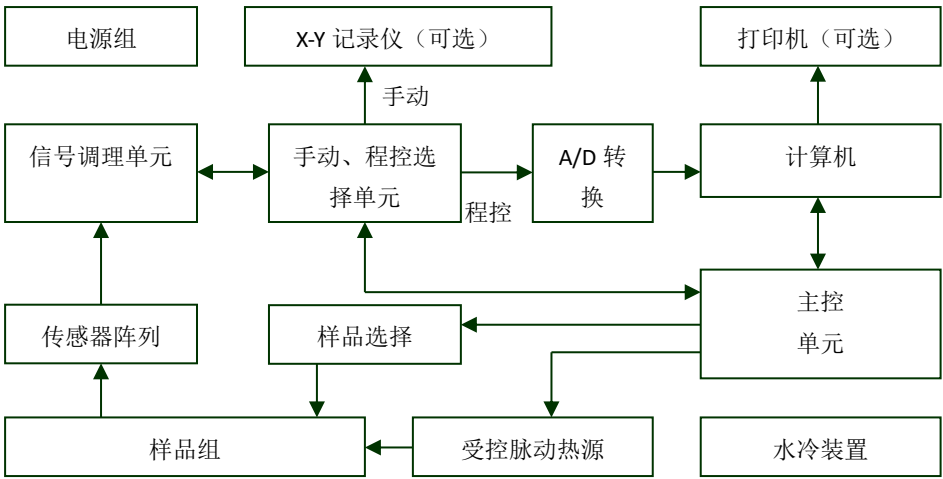


图 2 热导率动态测量以结构框图

**【实验原理】**

为使问题简化，令热量沿一维传播，故将样品制成棒状，周边隔热。取一小段样品如图 3。根据热传导定律，单位时间内流过某垂直于传播方向上面积  $A$  的热量，即热流为

$$\frac{dq}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

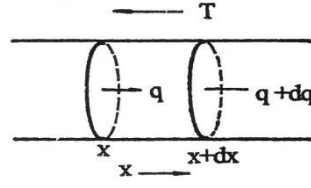


图 3 棒元

其中  $k$  为待测材料的热导率,  $A$  为截面积, 文中  $\frac{dT}{dx}$  是温度对坐标  $x$  的梯度。将式 (1) 两边对坐标取微分有

$$d \frac{dq}{dt} = -kA \frac{d^2T}{dx^2} dx \quad (2)$$

据能量守恒定律, 任一时刻棒元的热平衡方程为

$$C\rho A dx \frac{dT}{dt} = d \frac{dq}{dt} = -kA \frac{d^2T}{dx^2} dx \quad (3)$$

其中  $C$ ,  $\rho$  分别为材料的比热容与密度, 由此可得热流方程

$$\frac{dT}{dt} = D \frac{d^2T}{dx^2} \quad (4)$$

其中  $D = \frac{k}{C\rho}$ , 称为热扩散系数。

式 (4) 的解将把各点的温度随时间的变化表示出来, 具体形式取决于边界条件, 若令热端的温度按简谐变化, 即

$$T = T_0 + T_m \sin \omega t \quad (5)$$

另一端用冷水冷却, 保持恒定低温  $T_0$ , 则式 (5) 的解也就是棒中各点的温度为

$$T = T_0 - \alpha x + T_m e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2D}}x} \cdot \sin(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2D}}x) \quad (6)$$

其中  $T_0$  是直流成分,  $\alpha$  是线性成分的斜率, 从式 (6) 中可以看出:

a 热端( $x=0$ )处温度按简谐方式变化时, 这种变化将以衰减波的形式在棒内向冷端传播, 称为热波。

$$b \text{ 热波波速: } V = \sqrt{2D\omega} \quad (7)$$

$$c \text{ 热波波长: } \lambda = 2\pi\sqrt{\frac{2D}{\omega}} \quad (8)$$

因此在热端温度变化的角频率已知的情况下，只要测出波速或波长就可以计算出  $D$ 。然后

再由  $D = \frac{k}{C\rho}$  计算出材料的热导率  $k$ 。本实验采用式 (7) 可得

$$V^2 = 2\frac{k}{C\rho}\omega \quad \text{则 } k = \frac{V^2 C\rho}{4\pi f} = \frac{V^2 C\rho}{4\pi} T \quad (9)$$

其中,  $f$ 、 $T$  分别为热端温度按简谐变化的频率和周期。实现上述测量的关键是: a 热量在样品中一维传播, b 热端温度按简谐变化。

## 【实验内容】

测量铜棒和铝棒的导热率。(先测铜棒后测铝棒)

实验前检查各处连接管路是否有堵塞,而后才能打开水源。开始实验前需将仪器的盖子打开,并仔细阅读上面的注意事项。

### 1. 打开水源,从出水口观察流量,要求水流稳定(将阀门稍微打开即可)

1) 热端水流量较小时,待测材料内温度较高,水流较大时,温度波动较大。因此热端水流要保持一个合适的流速,阀门开至 1/3 开度即可。

2) 冷端水流量要求不高,只要保持固定的室温即可。

3) 调节水流的方法是保持电脑操作软件的数据显示曲线幅度和形状较好为好。

4) 两端冷却水管在两个样品中是串连的,水流先走铝后走铜。一般先测铜样品,后测铝样品,以免冷却水变热。

5) 实际上不用冷端冷却水也能实验,只是需要很长时间样品温度才能动态平衡。而且环境温度变化会影响测量。

### 2. 打开电源开关,主机进入工作状态

### 3. “程控”工作方式

1) 完成前述实验步骤,调节好合适的水流量。因进水电磁阀初始为关闭状态,需要在测量开始后加热器停止加热的半周期内才调整和观察热端流速。

2) 打开操作软件。操作软件使用方法参见实验桌内的“[实验指导](#)”中“[操作软件使用](#)”部分说明。(注意:实验结束后请勿将该资料带回)

3) 接通电源。

4) 在控制软件中设置热源周期  $T$  ( $T$  一般为 180s)。选择铜样品或铝样品进行测量。测量顺序最好先铜后铝。

5) 设置  $x, y$  轴单位坐标。 $x$  方向为时间，单位是秒， $y$  方向是信号强度，单位为毫伏(与温度对应)。

6) 在“选择测量点”栏中选择一个或某几个测量点。

7) 按下“操作”栏中“测量”按钮，仪器开始测量工作，在电脑屏幕上画出  $T \sim t$  曲线簇，如下图所示。上述步骤进行 40 分钟后，系统进入动态平衡，样品内温度动态稳定。此时按下“暂停”，可选择打印出曲线，或在界面顶部“文件”菜单中选择对应的保存功能，将对应的数据存储下来，供数据测量所用。“平滑”功能尽量不要按，防止信号失真。

8) 实验结束后，按顺序先关闭测量仪器，然后关闭自来水，最后关闭电脑。这样可以防止因加热时无水冷却导致仪器损坏。

### 【数据处理】

图 4 中，记录的曲线表示温度和时间关系曲线  $T=f(t)$ ，计算机将该数据保存好后进行数据处理，将鼠标指向曲线上的任意位置便可给出该位置的坐标数据，即时间和温度。从测量曲线上我们可以很容易判别峰值位置，那么用鼠标指向该点即可得该点对应时刻  $t_k$ ，进而得出两个峰值时值  $\Delta t$ 。进而可得热导率，具体实验数据如下。

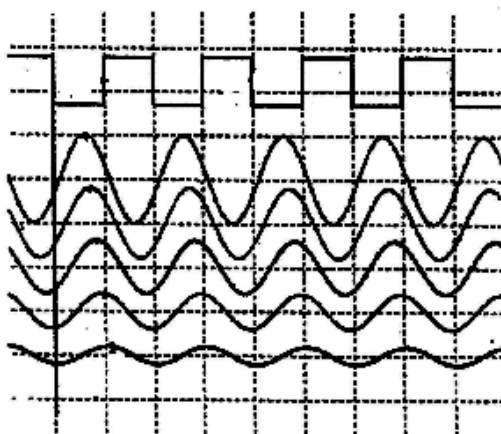


图 4 各测量点的测量曲线

数据处理方法一：

直接在电脑上读取数据进行数据处理（这种方式会由于人眼的视觉效果不同而产生相应的误差）

本软件提供了游标工具。移动游标可以得到每个测点的  $T-t$  曲线上的波峰时刻，将波峰时刻

记录在表 1 中。已知相邻热电偶间距  $l_0$  为 2cm，则波速  $V = l_0 / (t_{n+1} - t_n)$ ， $n$  为测量点的位置坐标。将计算得到的  $V$  代入公式（8）即可得到导热系数值。

表 1 实验数据记录表

测 量 点	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$
对应峰值时间(秒)					

数据处理方法二：

由于直接用鼠标取值可能存在较大的人为操作误差，因此要求同学将软件所记录的数据保存，然后拷贝出来，课后进行数据处理，获得时间间隔以及相应的导热系数值。

样品比热数据。铜：0.385J/gK；铝：0.9J/gK；

样品密度数据。铜：8.92g/cm<sup>3</sup>；铝：2.7g/cm<sup>3</sup>；

### 【注意事项】

1. 为防止因加热时无水冷却导致仪器损坏，实验前要首先打开冷热端进水龙头，实验结束时要先关闭测量仪器，然后关闭自来水，最后关闭电脑（详细信息见“热导率动态测量仪使用说明书”）。
2. 实验中尽量保持热端水流稳定，以免水流波动导致系统无法达到动态平衡，从而影响测量结果。
3. 测量过程中，无法更改样品类型和热源周期，暂停时候可以更改加热周期。实验前选好热源加热周期，周期一般取 180s。实验中尽量不要变动热源周期，以免破坏系统的动态平衡。
4. 实验中一次测量中超过最大时间长度 9000s 后，系统将自动停止测量。如果需要继续测量，请先保存当前数据后在“新建”新的数据文件进行测量。
5. 选择工具栏“刷新”功能，将按照当前操作软件设置刷新数据显示。
6. 按下“暂停”按钮后，加热器暂停加热，热端开始进水。暂停期间系统暂停测量数据。按下“测量”恢复运行时，当前时刻与暂停前时刻之间数据显示的一条直线表示暂停期间没有数据测量。
7. 按下“平滑”按钮平滑数据时，将覆盖当前数据。如果要保留当前数据，请在平滑前进行保存。
8. 为了避免残余高次谐波对测量的影响，在数据处理前最好先对数据曲线进行滤波处理。按下“滤波”按钮将对当前数据显示区内数据进行处理，处理结果中只保留当前显示区内的数据。

如果需要保留其他数据，请在滤波处理前保存。

9. “滤波”处理时，要保证数据显示区内至少有 2 个完整周期的以上数据，否则将造成处理结果不理想。

10. 按下“计算”按钮进入“数据处理”窗口系统认为本次测量结束，将自动停止测量。如果需要继续测量时，请关闭“数据处理”窗口后，重新建立一个数据文件，然后在开始测量。

11. 按下“计算”按钮进入“数据处理”窗口时，系统把当前数据显示区的加热周期作为数据处理的加热周期。为了避免计算错误，数据来源的显示区内加热周期不要有变化。

### 【思考题】

1. 如果想知道某一时刻  $t$  时材料棒上的热波，即  $T \sim x$  曲线，将如何做？
2. 为什么较后面测量点的  $T \sim t$  曲线振幅越来越小？
3. 为什么实验中铝棒的测温点才 8 个，而铜棒的测温点达到 12 个？
4. 实验中误差的来源有哪些？

## 第二部分：

# 温度的测量和温度计的设计

### 【实验简介】

温度是七个基本物理量之一，几乎所有的物理量都随温度变化，所有的生命现象，物质运动，化学反应都和温度有关。不管是在工业生产，还是在科研实验中，对温度的控制都是至关重要的，温度对产品的影响也不容忽视的。温度的区间很大，低至毫开，高至几千摄氏度，使用环境，要求也不相同，因此温度计的种类繁多，测试方法也各不相同。本实验的目的就是让学生熟悉常用的热电偶，金属丝，半导体等科研生产过程中常用的温度计，以及常用的温度计的标定、测量等方法。让学生在实践上对温度的测量，有更深入的认识和了解。

### 【实验目的】

1. 用电位差计测热电偶的温差电动势。
2. 用平衡电桥测热敏电阻和铜电阻的温度特性曲线。
3. 设计非平衡电桥实现对热敏电阻的实时测量。

### 【实验仪器与用具】

本实验采用 DHT-2 型热学实验仪进行温度计的控温，里面装有热电偶温度计，铜电阻温度计，热敏电阻温度计，通过加热丝升温，通过风扇降温，可以用来测试不同类型温度计的温度特性曲线，确定温度系数等。

热电偶的电压通过 UJ36a 型携带式直流电位差计进行测量。电阻型温度计的电阻通过电桥进行测量，实验中所用的 DHQJ-5 型教学用多功能电桥具有开放式电桥，双臂电桥、单臂电桥、功率电桥及非平衡使用的单臂电桥等功能，可以用平衡电桥测温度计的电阻，用非平衡电桥对温度计进行实时测量。

实验装置实物图如图 5 所示。中间是 DHT-2 型热学实验仪，下面是温控仪，上面是加热炉，温度计装在加热炉中。左边是电桥，用来测温度计的电阻值；右边是电位差计，用来测热电偶的电势；保温瓶中装的是冰水混合物，用作热电偶的低温端。

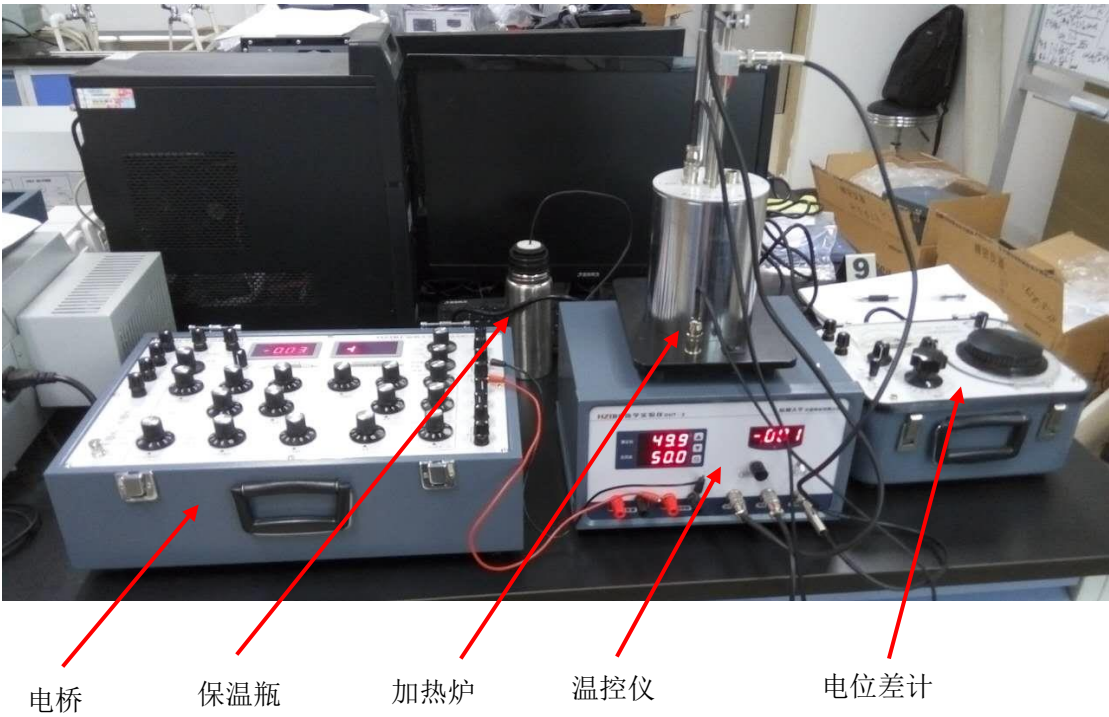


图 5 温度测量装置实物图

### 1. DHT-2 热学实验装置温控仪

控温仪前面板如图 6 所示。

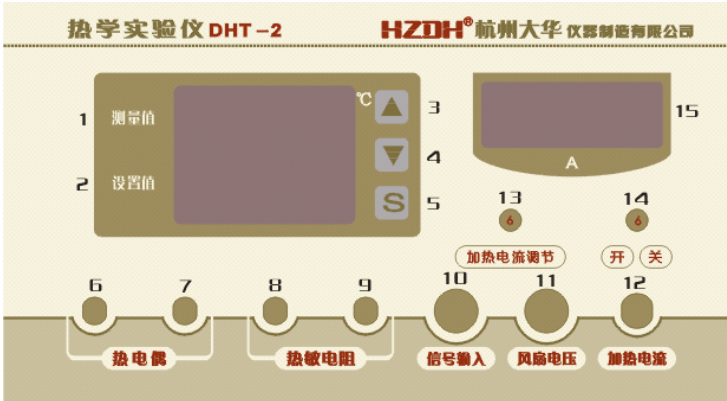




图 6 温控仪前面板

温控仪各接口定义如下：

- 1、测量值：显示器(绿)
- 2、设定值：显示器(红)
- 3、加数键(▲)：在温度设定时，作加数键。
- 4、减数键(▼)：在温度设定时，作减数键。
- 5、设定键(S)：设定值：按设定键(S)，SV 显示器一位数码管闪烁，则该位进入修改状态，再按 S 键，闪烁位向左移一位，不按设定键(S)8 秒(即数码管闪烁 8 秒)自动停止闪烁并返回至正常显示设定值。
- 5-3、设定键(S)+加数键(▲)：组合键设定 PID 参数。
- 5-4、设定键(S)+减数键(▼)：组合键设定 PID 参数。
- 6-7、热电偶输出端子。
- 8-9、热敏电阻输出端子(NTC)
- 10、加热电流输出插座
- 11、风扇电压输出插座
- 12、加热炉信号输入插座
- 13、加热电流调节电位器
- 14、加热电流输出控制开关
- 15、加热电流显示表。

使用时依次将“信号输入”、“风扇电压”、“加热电流”依次与上面的加热炉上面的接口相连，然后插好电源线，打开电源开关。

按设定键（S）选择温度的位数，按上下键加减数值，不按设定键（S）8 秒，自动停止闪烁并返回至正常显示设定值。设定好加热温度后，将面板上的加热电流开关打开，加热炉座上的电风扇的电源开关关断。设定的温度低于 60℃时，加热电流最好小于 1A，设定的温度高于 100℃时，加热电流最好调到最大。

实验做完，或者需要降温时，首先设置所需温度，将加热炉的支撑杆向上抬升，打开风扇，待温度降至室温或者设定值时，关闭风扇，降下支撑杆。

## 2、UJ36a 型便携式直流电位差计

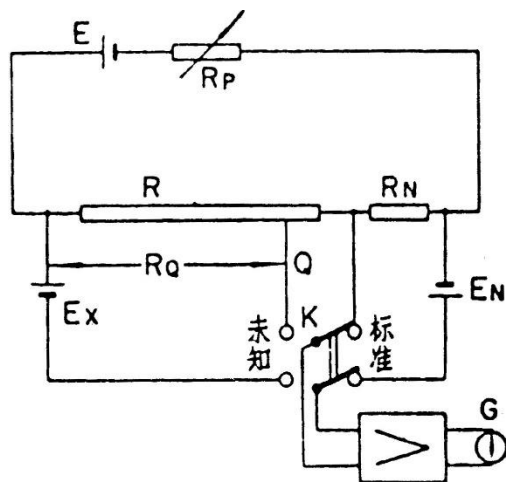


图 7 电位差计补偿法电路图

- |                             |                          |
|-----------------------------|--------------------------|
| E—工作电源                      | E <sub>N</sub> —标准电池的电动势 |
| E <sub>x</sub> —被测电动势(或电压)  | G—检流计                    |
| R <sub>P</sub> —工作电流调节电阻    | R—被测量电动势的补偿电阻            |
| R <sub>N</sub> —标准电池电动势补偿电阻 | K—转换开关                   |

UJ36a 型携带式直流电位差计，可以在实验室、车间现场和野外工作，能很方便地以补偿法原理，测量直流电压(或电动势)和对各种直流毫伏表及电子电位差计进行刻度校正。仪器另一主要用途，是配合各种测量温度的热电偶，能快速而准确地检测温度。补偿法的电路图如图 7 所示。



图 8 电位差计操作面板

操作面板定义如下：

- (1)、未知电压测量接线柱      (2)、倍率开关      (3)、步进盘(规盘)

- (4)、电键开关                      (5)、检流计                      (6)、检流计调零  
(7)、工作电流调节变阻器        (8)、滑线盘

将 K 扳向标准位置，调节 R<sub>p</sub>，使检流计指零，这时标准电池的电动势由电阻 R<sub>N</sub> 上的电压降补偿。

$$E_N = I R_N \quad (10)$$

式中：I 是流过 R<sub>N</sub> 和 R 的电流，称之为电位差计的工作电流由 (10) 式可得：

$$I = E_N / R_N \quad (11)$$

工作电流调节好以后，将 K 扳向“未知”位置，同时移动 Q 触头，再次使检流计指零，此时触头 Q 在 R 上的读数为 R<sub>Q</sub>，这时被测量的电动势或电压由电阻 R<sub>Q</sub> 上的电压降补偿。

$$\therefore E_X = I R_Q \quad (12)$$

将 (11) 带入 (12) 得：

$$E_X = \frac{R_Q}{R_N} E_N \quad (13)$$

UJ36a 型携带式直流电位差计的面板如图 8 所示。

在实际的调节过程中，R<sub>Q</sub> 的调节用步进盘进行粗调，用滑线盘进行细调，为了读数方便，进行换算后直接标示电压值，而不是电阻值。

将待测电压接入后，将倍率开关拨到“X1”或者“X0.2”，调节“调零”旋钮将检流计调零；将“电键开关”拨到“标准”，调节工作电流调节变阻器，使检流计指零；将“电键开关”拨到“未知”，调节步进读数盘和滑线读数盘使检流计再次指零。未知电压读数为：

$$U_X = (\text{步进盘读数} + \text{滑线盘读数}) \times \text{倍率}$$

### 3、DHQJ-5 型教学用多功能电桥

单臂电桥的电路原理图如图 9 所示。

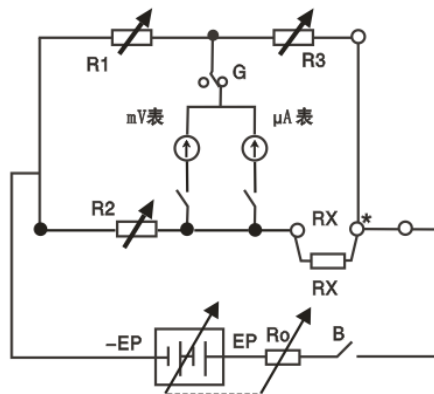


图 9 单臂电桥原理电路图

表 2 单臂电桥技术参数和设定参考值

量程倍率	有效量程( $\Omega$ )	R1 ( $\Omega$ )	R2 ( $\Omega$ )	工作电压
$\times 10^{-3}$	1~11.111	10000	10	3V
$\times 10^{-2}$	10~111.11	10000	100	
$\times 10^{-1}$	100~1111.1	10000	1000	
$\times 1$	1K~11.111K	1000	1000	
$\times 10$	10K~111.11K	1000	10000	
$\times 10^2$	100K~1111.1K	100	10000	12V
$\times 10^3$	1M~11.111M	10	10000	

平衡时检流计中的电流和电压均为 0，待测电阻值为：

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} \cdot R_3 \quad (14)$$

单臂电桥的技术参数和设定值如表 2 所示，本实验中平衡电桥所用的倍率为“ $\times 1$ ”档， $R_1$  和  $R_2$  的电阻值可以取 1000 欧，电压取 3V。

电桥的面板如图 10 所示。




图 10 多功能电桥操作

平衡电桥测量步骤如下：

- (1) 标准电阻  $R_N$  选择开关选择“单桥”档；
- (2) 工作方式开关选择“单桥”档；
- (3) 电源选择开关建议按表 2 有效量程选择工作电源电压；
- (4)  $G$  开关选择“ $G$  内接”；
- (5) 根据  $R_X$  值估计值，按表 2 选择量程倍率，设置好  $R_1$ 、 $R_2$  值和  $R_3$  值，将未知电阻  $R_X$  接入  $R_X$  接线端子。  
(注意  $R_X$  端子上方短接片应接好)
- (6) 打开仪器市电开关、面板指示灯亮；
- (7) 建议选择毫伏表作为仪器检流计，释放“接入”按键，量程置“20mV”档，调节“调零”电位器，将数显表调零。调零后将量程转入 200mV 量程，按下“接入”按键，也可以选择微安表作检流计。
- (8) 调节  $R_3$  各盘电阻，粗平衡后，可以选择 200mV 或 20mV 档，细调  $R_3$  位，使电桥平衡。

由此可见，用平衡电桥测电阻时每步都需要调节  $R_3$  使检流计指零，适合测量温度计稳定后的电阻值，不能实时测量，动态反应温度的变化。

非平衡电桥是单臂电桥在非平衡状态下的一种工程应用，当外界温度、压力等物理量发生变化时，相应的电阻性传感器电阻值发生变化，电桥就从平衡状态（预调平衡）变成不平衡状态，检流计测量的电压变化表征电阻传感器电阻值变化，从而间接测量出相应物理变化。

DHQJ-5 在非平衡使用时，其操作步骤基本同单臂电桥，但测量目的和测量方法有很大差异，在本实验中将使用非平衡电桥电压的变化线性表示热敏电阻温度计温度的变化。

## 【实验原理】

### 1、用电位差计测热电偶的温差电动势

热电偶亦称温差电偶，是由 A、B 两种不同材料的金属丝的端点彼此紧密接触而组成的。当两个接点处于不同温度时(如图 11)，在回路中就有直流电动势产生，该电动势称温差电动势或热电动势，测试电路如图 13 所示。当组成热电偶的材料一定时，温差电动势  $E_x$  仅与两接点处的温度有关，并且两接点的温差在一定的温度范围内有如下近似关系式：

$$E_x \approx \alpha(t - t_0) \quad (15)$$

式中  $\alpha$  称为温差电系数，对于不同金属组成的热电偶， $\alpha$  是不同的，其数值上等于两接点温度差为  $1^\circ\text{C}$  时所产生的电动势。

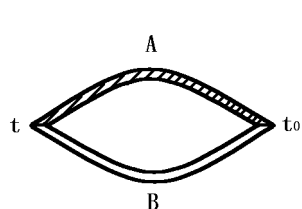


图 11

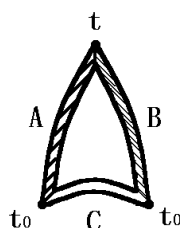


图 12

为了测量温差电动势，就需要在图 11 的回路中接入电位差计，但测量仪器的引入不能影响热电偶原来的性质，例如不影响它在一定的温差  $t-t_0$  下应有的电动势  $E_x$  值。要做到这一点，实验时应保证一定的条件。根据伏打定律，即在 A、B 两种金属之间插入第三种金属 C 时，若它与 A、B 的两连接点处于同一温度  $t_0$ (图 12)，则该闭合回路的温差电动势与上述只有 A、B 两种金属组成回路时的数值完全相同。所以，我们把 A、B 两根不同化学成份的金属丝的一端焊在一起，构成热电偶的热端(工作端)。将另两端各与铜引线(即第三种金属 C)焊接，构成两个同温度( $t_0$ )的冷端(自由端)。

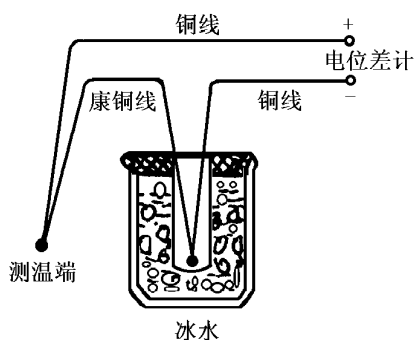


图 13 热电偶温度计测温原理

铜引线 with 电位差计相连，这样就组成一个热电偶温度计。通常将冷端置于冰水混合物中，保持  $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，将热端置于待测温度处，即可测得相应的温差电动势，再根据事先校正好的曲线或数据来求出温度  $t$ 。热电偶温度计的优点是热容量小，灵敏度高，反应迅速，测温范围广，还能直接把非电学量温度转换成电学量。因此，在自动测温、自动控温等系统中得到广泛应用。

## 2、用平衡电桥测电阻的温度特性曲线

### 2.1 金属电阻温度计

一般来说，金属的电阻随温度的变化，可用下式描述：

$$R_x = R_{x0} (1 + \alpha t + \beta t^2) \quad (16)$$

如铜电阻传感器  $R_{x0} = 50\Omega$  ( $t = 0^{\circ}\text{C}$  时的电阻值)

$$\alpha = 4.289 \times 10^{-3} / ^{\circ}\text{C} \quad \beta = -2.133 \times 10^{-7} / ^{\circ}\text{C} \quad (17)$$

一般分析时，在温度不是很高的情况下，忽略温度二次项  $\beta t^2$ ，可将金属的电阻值随温度变化视为线性变化即

$$R_x = R_{x0} (1 + \alpha t) = R_{x0} + \alpha t R_{x0} \quad (18)$$

用控温仪将铜电阻的温度控制在一系列温度值上，待温度稳定后，用平衡电桥测出铜电阻的阻值，画出温度-阻值曲线，就可以得出铜电阻的温度特性曲线，进行线性拟合可以求出温度系数，这就是温度计的标定。进行标定后的铜电阻就可以当作温度计用于温度测量。

### 2.2 半导体热敏温度计

半导体热敏电阻 (NTC) 具有负的电阻温度系数，电阻值随温度升高而迅速下降，这是因为热敏电阻由一些金属氧化物如  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{MgCr}_2\text{O}_4$  等半导体制成，在这些半导体内部，自由电子数目随温度的升高增加得很快，导电能力很快增强；虽然原子振动也会加剧并阻碍电子的运动，但这种作用对导电性能的影响远小于电子被释放而改变导电性能的作用，所以温度上升会使电阻值迅速下降。通过改良，也可以设计出正温度系数的热敏电阻，简称 PTC。

热敏电阻的电阻温度特性可以用下述指数函数来描述：

$$R_T = A e^{\frac{B}{T}} \quad (19)$$

式中  $A$  是与材料性质的电阻器几何形状有关的常数。 $B$  为与材料半导体性质有关的常数， $T$  为绝对温度。

为了求得准确的  $A$  和  $B$ ，可将式 (19) 两边取对数

$$\ln R_T = \ln A + \frac{B}{T}$$

(20)

选取不同的温度  $T$ ，得到不同的  $R_T$ 。

根据 (20) 式，当  $T=T_1$  时有：

$$\ln R_{T1} = \ln A + B/T_1; \quad (21)$$

$T=T_2$  时有：

$$\ln R_{T2} = \ln A + B/T_2 \quad (22)$$

将上两式相减后得到

$$B = \frac{\ln R_{T1} - \ln R_{T2}}{1/T_1 - 1/T_2} \quad (23)$$

将 (23) 代入 (20) 可得

$$A = R_{T1} e^{-\frac{B}{T_1}} \quad (24)$$

常用半导体热敏电阻的  $B$  值约为 1500~5000K 之间。

用控温仪将热敏电阻温度控制在一系列温度点上，用平衡电桥测出对应的电阻，根据式 (20) 进行线性拟合，可以求出热敏电阻的温度系数  $A$  和  $B$ 。只测两个温度点，可以通过式 (23) 和 (24) 求出  $A$  和  $B$ 。

金属电阻和热敏电阻特性曲线示意图如图 14 所示。

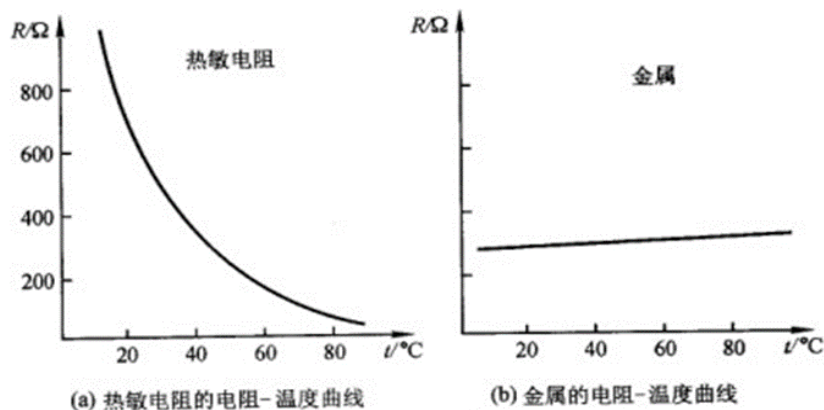


图 14 热敏电阻和金属电阻特性曲线

### 3、设计非平衡电桥实现对热敏电阻的实时测量

非平衡电桥的电路图同平衡电桥一样，如图 9 所示，简化后如图 15 所示。测试步骤也是一样的，只是选用电压表测两端电压，认为电压表内阻无穷大，忽略流过电压表的电流。平衡时电桥电压为 0，非平衡时电桥电压  $U_0$  随  $R_x$  实时变化，通过计算选取合适的  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  以



及 E，让测试电压  $U_0$  随温度  $t$  线性变化，就可以对温度进行实时测量了。

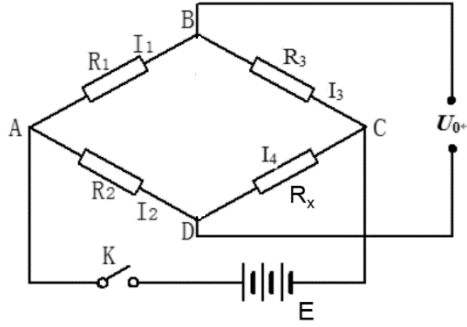


图 15：非平衡电桥电路图

认为电压表内阻无穷大，忽略流过电压表的电流，可以求得  $U_0$  为：

$$U_0 = \left( \frac{R_x}{R_2 + R_x} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) E \quad (25)$$

式中：

$$R_x = A e^{\frac{B}{T}} \quad (26)$$

A 和 B 的值利用平衡电桥测两个温度点对应的电阻值，然后根据式 (23)、(24) 求得。

将式 (26) 带入式 (25) 就得到  $U_0$  和 T 的函数关系。然后对  $U_0$  进行泰勒级数展开，保留至二阶项，忽略三阶及以上的高次项，可以得到：

$$U_0 = U_{01} + U_0'(T - T_1) + U_0''(T - T_1)^2 \quad (27)$$

$T_1$  为测试区间的中间值，比如我们要监测 30-50℃ 的温度区间， $T_1$  取 40℃。令  $U_0''=0$ ，可以得到：

$$R_x = A e^{\frac{B}{T}} = \frac{B + 2T}{B - 2T} R_2 \quad (28)$$

于是， $U_0$  可以表示成 T 的线性表达式。

$$U_0 = \lambda + m(t - t_1) \quad (29)$$

$$\lambda = \left( \frac{B + 2T_1}{2B} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) E \quad m = \left( \frac{4T_1^2 - B^2}{4BT_1^2} \right) E \quad (30)$$

式中： $\lambda = U_{01}$ ， $m = U_0'$ ，因为是温度差，绝对温度 T 可以换成摄氏温度 t。 $\lambda$  表示温度区间中间值（比如上面的 40℃）时，对应的  $U_0$  值，我们可以令  $\lambda = -400\text{mV}$ 。 $m$  表示灵敏度，可以令  $m = -10\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。例如测得  $U_0 = -450\text{mV}$ ，对应的温度就是  $t = 45^\circ\text{C}$ 。

根据我们选定的  $\lambda$  和  $m$  值，两个温度点求得的 A 和 B，以及令  $U_0''=0$  得到的表示式 (28)

可以计算出  $R_2$ ,  $R_1/R_3$ , 以及  $E$  的值, 具体表达式如下:

$$E = \left( \frac{4BT_1^2}{4T_1^2 - B^2} \right) m \quad (31)$$

$$R_2 = \frac{B - 2T}{B + 2T} R_{xT1} \quad (32)$$

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{2BE}{(B + 2T_1)E - 2B\lambda} - 1 \quad (33)$$

根据计算的  $E$ ,  $R_2$ ,  $R_1/R_3$  值设定非平衡电桥的参数, 将控温仪温度设在  $40^\circ\text{C}$ , 微调  $R_2$  的阻值, 必要时也可以微调  $R_1$  和  $R_3$  的阻值, 使电压表测得电压接近  $-400\text{mV}$ 。然后改变控温仪温度, 就可以检验测得的电压是否随温度线性变化, 换算之后的温度是否和设定的温度一致。

### 【实验过程】

#### 1、用电位差计测热电偶的温差电动势

首先测出室温时热电偶的电动势, 然后开启温控仪电源, 给热端加热, 在  $30^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$  区间, 每隔  $5^\circ\text{C}$  测一组  $(t, E_x)$ , 一定要等温度稳定后进行测试。绘制温度特性曲线, 通过线性拟合求温度系数。

#### 2、用平衡电桥测热敏电阻和铜电阻的电阻值

开启温控仪电源, 给热端加热, 在  $30^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$  区间, 每隔  $5^\circ\text{C}$  测一组  $(t, R_x)$ , 一定要等温度稳定后进行测试。绘制温度特性曲线, 通过线性拟合求温度系数。

#### 3、用非平衡电桥制作热敏电阻温度计

选定  $\lambda = -400\text{mV}$ ,  $m = -10\text{mV}/^\circ\text{C}$ ,  $t_1 = 40^\circ\text{C}$ , 根据  $30^\circ\text{C}$  和  $50^\circ\text{C}$  测得的热敏电阻值计算  $A$  和  $B$ , 然后根据式 (31) - (33) 计算的  $E$ ,  $R_2$ ,  $R_1/R_3$  值。

根据计算的  $E$ ,  $R_2$ ,  $R_1/R_3$  值设定非平衡电桥的参数, 将控温仪温度设在  $40^\circ\text{C}$ , 微调  $R_2$  的阻值, 必要时也可以微调  $R_1$  和  $R_3$  的阻值, 使电压表测得电压接近  $-400\text{mV}$ 。然后改变控温仪温度, 在  $30^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$  区间, 每隔  $5^\circ\text{C}$  测一组  $U_o$  和  $t$ , 观察自己制作的温度计测温的精度。

### 【注意事项】

- 1、实验完毕后, 将温控仪温度设置为  $000.0$ , 同时将面板上的加热电流开关关闭, 打开风扇使炉内的温度快速下降至常温, 然后关闭电源, 拨下电源插座。

- 2、加热炉在使用风扇降温时，须将支撑杆向上抬升，使空气形成对流，温度降到后再将支撑杆降下来。
- 3、仪器使用完毕，将电位差计的“倍率”开关旋向断位置，避免浪费电源，电键开关应放在中间位置，仪器长期搁置不用，应将干电池取出。
- 4、电桥在调电阻的过程中，不要过快、过猛地连续转动旋钮，以免损坏调节旋钮。

### 【思考题】

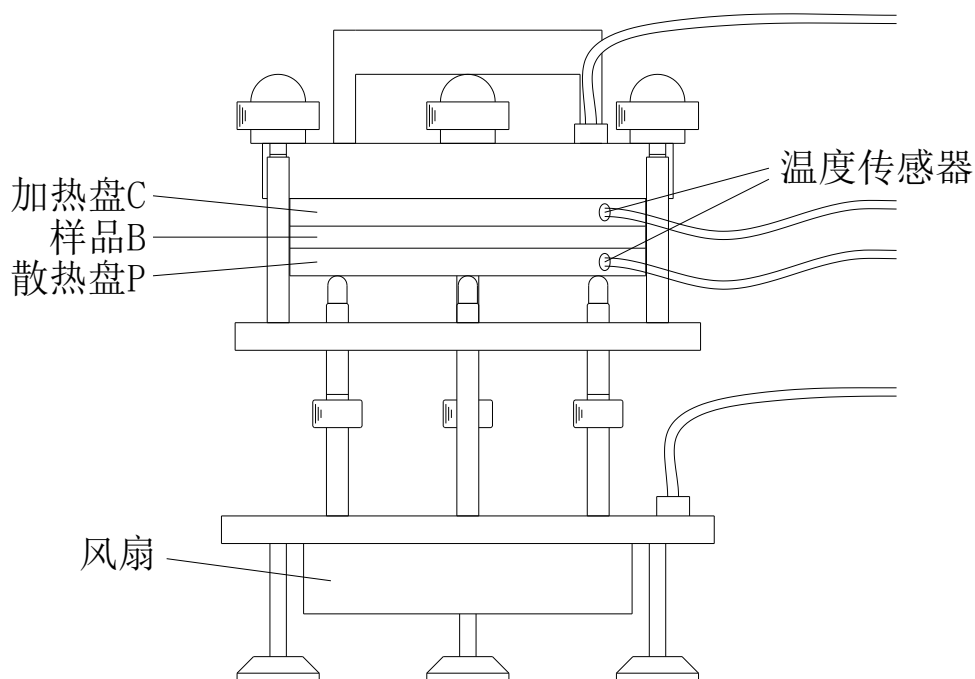
- 1、为什么在低温实验中常用四线式伏安法测温度，而工业仪表中常用非平衡电桥测温度？
- 2、工业仪表中使用的三线式非平衡电桥测温度是怎么消除引线电阻的？

### 【参考文献】

- [1] 大学物理实验讲义，南京大学物理系。
- [2] 吕斯骅，段家祗。新编基础物理实验，北京：高等教育出版社，2006。
- [3] 厂家说明书

### 【附录 1】稳态法测不良导体导热系数：FD-TC-C 不良导体导热系数测定仪

FD-TC-C 型不良导体导热系数测定仪是用稳态法测量不良导体导热系数的实验仪器。结构上，在不良导体圆盘的上下方使用良导热的铝盘紧密贴合，由单片机自适应控制加热盘的加热温度，散热盘的温度可由单片机每隔 10 秒自动记录并储存。



附录图 1\_1 不良导体导热系数测量实验装置

实验中，热源（加热盘）对样品加热，样品内部的温差使热量从高温处向低温处传导，样品内部各点的温度将随加热快慢和传热快慢的影响而变动；适当控制实验条件和实验参数可使加热和传热的过程达到平衡状态，则待测样品内部可能形成稳定的温度分布，根据这一温度分布就可以计算出导热系数。

当传热达到稳定状态时，样品上下表面的温度  $\theta_1$  和  $\theta_2$  不变，这时可以认为加热盘  $C$  通过样品传递的热量与散热盘  $P$  向周围环境散热量相等。因此可以通过散热盘  $P$  在稳定温度  $\theta_2$  时的散热速率来求出热流量  $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ 。

实验时，当测得稳态时的样品上下表面温度  $\theta_1$  和  $\theta_2$  后，将样品  $B$  抽去，让加热盘  $C$  与散热盘  $P$  接触，当散热盘的温度上升到高于稳态时的  $\theta_2$  值  $10^\circ\text{C}$ — $15^\circ\text{C}$  左右，移开加热盘，让散热盘自然冷却，记录散热盘温度  $\theta$  随时间  $t$  的下降情况，求出散热盘在  $\theta_2$  时的冷却速率

$\left. \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \right|_{\theta=\theta_2}$ ，则散热盘  $P$  在  $\theta_2$  时的散热速率为：

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = mc \left. \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \right|_{\theta=\theta_2} \quad (\text{附 1}_3)$$

其中  $m$  为散热盘  $P$  的质量， $c$  为其比热容。

在达到稳态的过程中， $P$  盘的上表面并未暴露在空气中，而物体的冷却速率与它的散热表面积成正比，为此，稳态时铝盘  $P$  的散热速率的表达式应作面积修正：

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = mc \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \bigg|_{\theta=\theta_2} \frac{(\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p)}{(2\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p)} \quad (\text{附 1}_4)$$

其中  $R_p$  为散热盘  $P$  的半径， $h_p$  为其厚度。

由（附 1\_2）式和（附 1\_4）式可得：

$$\lambda \frac{\theta_1 - \theta_2}{4h_B} \pi d_B^2 = mc \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \bigg|_{\theta=\theta_2} \frac{(\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p)}{(2\pi R_p^2 + 2\pi R_p h_p)} \quad (\text{附 1}_5)$$

所以样品的导热系数  $\lambda$  为：

$$\lambda = mc \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \bigg|_{\theta=\theta_2} \frac{(R_p + 2h_p)}{(2R_p + 2h_p)} \frac{4h_B}{(\theta_1 - \theta_2)} \frac{1}{\pi d_B^2}$$