

基础物理实验



绪论 二

苏卫锋

复旦大学物理教学实验中心

<http://phylab.fudan.edu.cn>



你将学习以下内容：

1. 为什么要进行数据处理
2. 有效数字及运算规则
3. 不确定度的评定
4. 作图
5. 最小二乘法
6. 用origin和excel作线性拟合
7. 下周课程安排

1. 为什么要进行数据处理

3

爱因斯坦
在致斯威泽(J.E.Switzer)的信中
谈到

科学的起源：

爱因斯坦在致斯威泽 (J.E.Switzer) 的 信中谈到科学的起源：

“西方科学的发展是以两个伟大的成就为基础的：希腊哲学家（在欧几里得几何学中）发明了形式逻辑体系，以及（在文艺复兴时期）发现通过系统的实验有可能找出因果关系。在我看来，人们不必对中国圣贤没能做出这些进步感到惊讶。这些发现竟然被做出来了才是令人惊讶的。”

“西方科学的发展是以两个伟大的成就为基础的：希腊哲学家（在欧几里得几何学中）发明了形式逻辑体系，以及（在文艺复兴时期）发现通过**系统的实验**有可能**找出因果关系**。在我看来，人们不必对中国圣贤没能做出这些进步感到惊讶。这些发现竟然被做出来了才是令人惊讶的。”

1. 为什么要进行数据处理

数据处理中要注意的事情

▶ 测量一个物体的厚度

2cm

2.0cm

2.00cm

2.000cm

这些表达式不一样

正确 **理解** 有效数字!

正确 **表示** 有效数字!

测量结果的有效数字

不确定度的有效数字

相对误差的有效数字

中间结果的有效数字

1. 为什么要进行数据处理

5

数据处理中要注意的事情

合理修约有效数字!

Rounding method 修约规则很重要

-- **very significant** effect on the result.

A famous instance: a new index the Vancouver Stock Exchange in 1982.

Initially -- **1000.000**; after 22 mo. ~ **520**
(but stock prices had generally increased)

Problem? rounded down 1000s times daily
rounding **errors accumulated.**

Recalculating -- with better rounding
→ **1098.892**

Nicholas J. Higham (2002). *Accuracy and stability of numerical algorithms*. p. 54. ISBN 978-0-89871-521-7, 转引自 Wikipedia: Rounding

1. 为什么要进行数据处理

6

数据处理中要注意的事情

学会估算，快速判断！

人大约有多少根头发？

- A. 1×10^3 根
- B. 1×10^4 根
- C. 1×10^5 根
- D. 1×10^6 根

抓住物理关系的本质

忽略次要因素

简化物理模型

简化有效数字

体现物理量的数量级

判断估算结果

1. 为什么要进行数据处理

7

数据处理中要注意的事情

给出物理量之间的关系

在研究一个电阻的阻值与温度之间的关系时，测得该电阻在不同温度下的阻值如下：

$\theta / ^\circ\text{C}$	19.10	25.10	30.10	36.00	40.00	45.10	50.10
R_θ / Ω	76.30	77.80	79.75	80.80	82.35	83.90	85.10

R_θ 与 θ 之间是什么关系？你有哪些方法？

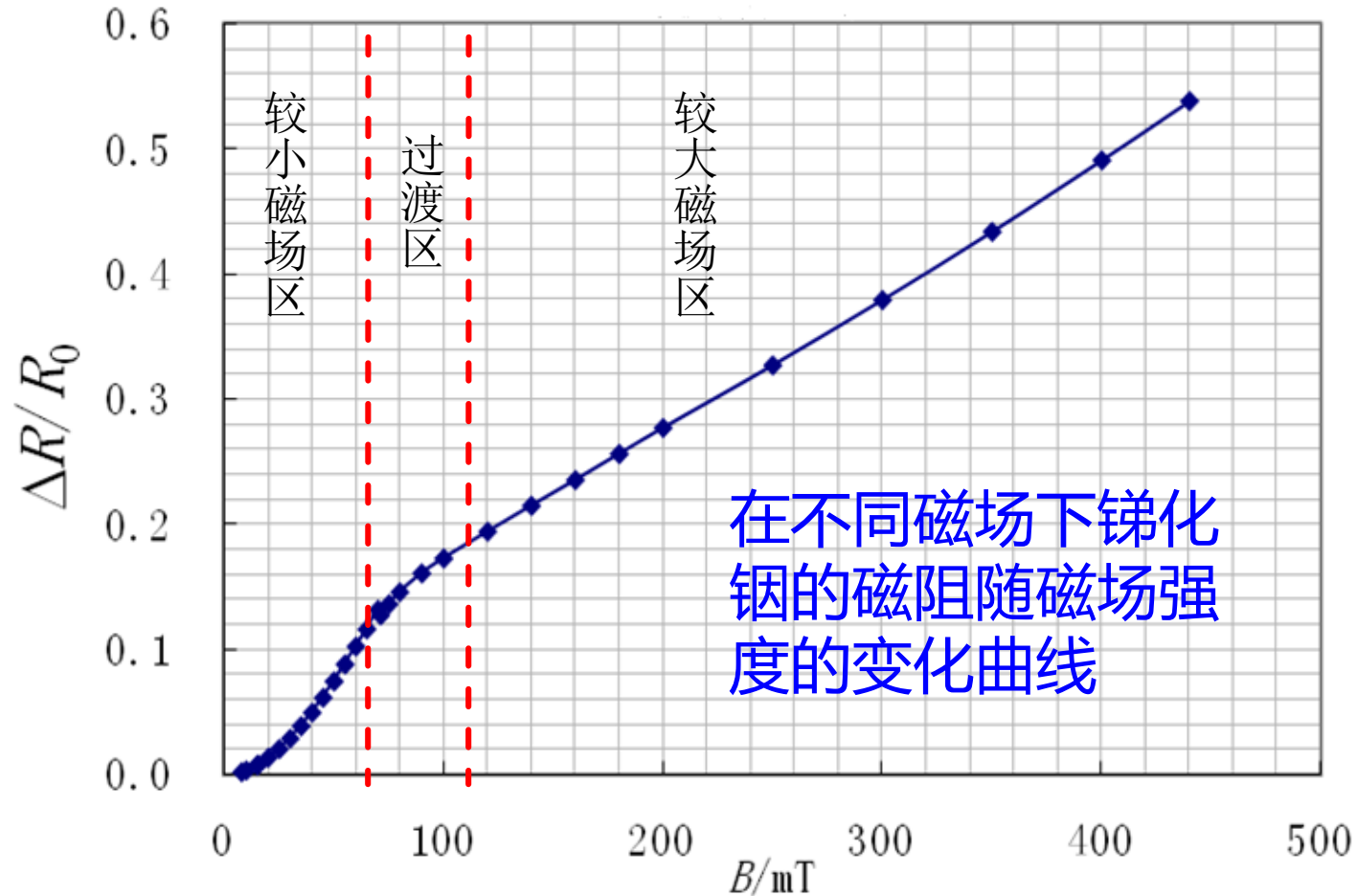
作图、最小二乘法、软件拟合

1. 为什么要进行数据处理

8

数据处理中要注意的事情

给出物理量之间的关系



分段处理

1. 为什么要进行数据处理

物理实验的目的：探寻和验证物理规律。

大多数物理规律是用物理量之间的定量关系来表述的。

实验得到的数据只有经过认真地、正确地、有效地处理才能得出公认的、合理的结论。

2. 有效数字及运算规则

什么是有效数字

有效数字----从第一个不为0的数开始算起的所有数字。

如, 0.35 (2个); 3.54 (3个); 0.003540 (4个); 3.5400 (5个)。

物理实验中的有效数字是针对测量中的数据定义的概念, 是一个有单位的数据, 由若干位可靠数字及末尾一位可疑数字组成。

有效数字 = 所有的可靠的数字 + 一位可疑数字

2.327 kg 有4位有效数字, 其中7是可疑数字;

220 V 有3位有效数字, 其中0是可疑数字;

2. 有效数字及运算规则

什么是有效数字

有效数字和单位: $76.2 \text{ m} = 0.0762 \text{ km}$,
 $= 7620 \text{ cm} ? = 76200 \text{ mm} ?$

单位的变换不能改变有效数字的位数

科学记数法

$$76.2 \text{ m} = 7.62 \times 10^3 \text{ cm} = 7.62 \times 10^4 \text{ mm}$$

2. 有效数字及运算规则

加减法：与不确定度最大项的末位有效数字对齐

$$\underline{57.31} + 0.0156 - 2.24342 \quad (=55.08218) = 55.08$$

尾数对齐

乘除法：与最少个数的有效数字相同

$$57.31 \times 0.0156 \div 2.24342 \quad (=0.398514767) = 0.399$$

四位
三位
六位
三位

位数对齐

特殊数的有效数字位数：参与运算的准确数字或常数，比如1、 π 、 e 等的有效数字的位数可以认为是无限多，使用时所取的位数**至少**比运算数据中位数最少的多一位。

- (1) 计算过程中**至少多保留一位有效数字！**
- (2) 即便**计算机运算**，也要对**计算结果**，运用有效数字运算规则进行**判别**。

2. 有效数字及运算规则

有效数字的修约规则

1. 有效数字的修约：对某一表示测量结果的数值，根据保留位数的要求，去掉数据中多余的位，叫数值修约。

可疑数后的数字无意义，不能在结果中出现；

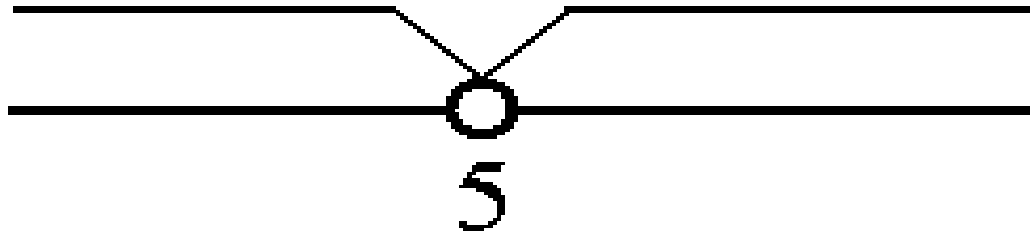
2. 选取修约规则的原则 – 对大量数据进行修约后，**修约误差**能达到相互**抵消**，而不导致互相迭加而积累；

3. 修约规则 **“4舍6入5成双”** 合理假设最后第二位奇偶几率各半。这样舍去或增加最后第二位的0.5的几率一样。

2. 有效数字及运算规则

有效数字的修约规则

“4舍6入5成双”



小于5舍、大于5入

刚好是5时，若前一位为奇数则入，为偶数则舍。

以上是对测量结果的有效数字修约；对于不确定度呢？

本课程中：不确定度按照“4舍6入5成双”修约，最后结果有效数字保留一位，计算过程中至少多保留一位。
以后的学习和科研中遵照新的要求！

“4” 代表小于5的数
“6” 代表大于5的数

2. 有效数字及运算规则

一个修约的例子

如：计算值

$$x_1 = 3.54835 \quad x_2 = 3.65325$$

(1) 首先将 不
确定度 修约
成一位有效
数字

不确定度	x_1 取值	x_2 取值
0.0003		
0.002		
0.04		
0.3		

4舍6入5成双

(2) 是不确定度大小，确定了数据可取的位数!

2. 有效数字及运算规则

四则混合计算的例子

- 按运算规则**分级进行**，每进行一级运算，按规定取舍
- 注意： 中间结果多保留1-2位，做好应保留位置的标记
不能按完计算器再随意取

例：① $524.5 \div 0.052 =$

② $101.44 \times 1.00 + 20.0^2 \times \pi =$

2. 有效数字及运算规则

四则混合计算的例子

$$\textcircled{1} 524.5 \div 0.052 = 10087 = 1.0 \times 10^4$$

数值很大，有效数字很少
用科学计数法

$$\textcircled{2} 101.44 \times 1.00 + 20.0^2 \times \pi$$

至少比法则结果多保留1位
按法则的应留位置，用下划线做好标记

$$= 101.44 + 20.0 \times 20.0 \times 3.1416$$

常数，至少比其它最少的位数多保留1位

$$= 101.44 + 1256.6$$

多保留1-2位
按法则的应留位置，用下划线做好标记

$$= 0.10144 \times 10^3 + 1.2566 \times 10^3$$

用科学计数法，保证有效数字

$$= 1.35804 \times 10^3 = 1.36 \times 10^3$$

最后结果，舍到下划线那一位

3. 不确定度的评定

关于测量

测量者
测量方法
测量仪器 } 将待测量与标准量比较

直接测量：用游标卡尺测长度、秒表测时间、温度计测温度等

间接测量：测量重力加速度、体积、密度、黏度等

关于误差

真值 物理量客观上应该有一个真实的数值

误差 测量者
测量方法
测量仪器
测量条件

} 测量值与真值之差

真值是无可知的，故误差的值从根本上也是无可知的，只能估计其**范围或限度**，因此科学的测量还要给出结果的精确度或误差范围。--**使用不确定度来进行评定**

不确定度的评定

不确定度 (uncertainty of measurement)

表征测量结果具有分散性的一个参数，是被测量的真值在某个量值范围内的一个评定。

- ◆ 任何测量都存在不确定度——不确定度存在原理。
- ◆ 不确定度是测量结果不能肯定的程度，是测量质量的量度（使用者能评价其可靠程度）。
- ◆ 测量结果只是被测量值的近似或估计，只有当该值附有不确定度声明时，它才是完整的。

案例：不确定度分析的意义

氢同位素的发现

1913年纽约大学的科学家对纯水密度做了非常精密的测量。他们在报告中指出：

1.测量的不确定度为 $2 \times 10^{-7} \text{g/cm}^3$

2.精制出的各种水样品的密度差不多有 $8 \times 10^{-7} \text{g/cm}^3$ 的变化

结论：各种纯水的密度是不一样的

这是证明同位素存在的最早的实验证据，引导科学家最终发现了**氢的同位素——氕和氘**。

不确定度的评定方法

① 构建：待测量的测量模型

- ▶ 模型应尽可能详细地考虑对“测量结果的不确定度”有贡献的量

② 分析：模型中每个输入量的标准不确定度

- ▶ “A类”和/或“B类”评定

③ 合成：获得待测量的合成标准不确定度

- ▶ 通过公式对每个输入量的标准不确定度进行合成

④ 扩展：获得高置信水平的扩展不确定度

- ▶ 通过包含因子扩大置信区间

扩展部分本课程
不做要求

测量不确定度的来源

1. 被测量定义的不完整性或复现不完善;
2. 取样的代表性不足;
3. 环境条件的影响及其认识不足;
4. 人为因素, 如仪器读数偏倚;
5. 技术限制, 如仪器分辨率或识别阈值;
6. 测量标准和标准物质的不准确性;
7. 数据处理中常数和参数的不准确性;
8. 测量方法和程序中的近似和假设;
9. 在看似相同条件下, 被测量的重复观测中的随机变异性。

测量对象、测量准确度、
测量环境、测量方法、
测量程序.....

构建待测量的测量模型

测量模型的建立原则：

综合考虑所有可能影响测量结果的因素，确保模型能够准确地反映实际测量情况。

例：用秒表测量单摆的周期

$$T = T_0 + T_1 + T_2$$

T_0 ：秒表的示值

T_1 ：秒表的仪器误差

T_2 ：人在启停秒表时的反应时间

分析每个输入量的标准不确定度

例：用秒表测量单摆的周期

A类

▶ 多次测量之间的差异

用统计的方法计算

▶ 秒表的仪器偏差

▶ 人在启停秒表时的反应时间

根据经验推算

B类

标准不确定度的A类评定

- 用统计方法评定
- 用于量化测量中随机变量的不确定度
- 对于一组多次独立的观测值，其标准不确定度由该组数据的实验标准差计算得出：

$$u_A(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}, \text{ 其中平均值 } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

A类评定实例

测量一个球的直径 D ，测量了10次，结果如下表，求该球的直径及其标准不确定度。

D/mm	12.337	12.349	12.333	12.353	12.339	12.352	12.345	12.348	12.356	12.340
---------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

解： 平均值：
$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i = 12.3452 \text{ mm}$$

标准不确定度：
$$u_A(\bar{D}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n(n-1)}} = 0.0024 \text{ mm}$$

注意：此时并未完成关于 D 的所有不确定度评定！

计算中作为中间过程，所有数值多保留了1位数字

标准不确定度的B类评定

- **B类评定**

适用条件：当被测量的估计值不是由重复观测得到的

评定方式：由被测量可能变化的全部有关信息来评定

- **如何评定？依赖于各种非实验性的信息源**

历史测量数据

校准证书、认证数据

制造商技术说明

技术经验

参考手册数据

- **计算方法：**

假定数据服从某种特定的分布规律，求该分布的实验标准差

常见情形：测量工具（仪器）的影响

本课程中均采用矩形分布假定

$$\text{标准不确定度 } u_B(x) = \frac{a}{c}$$

a ：仪器最大允许误差（又称为“示值误差限”）

- ▶ 通常在产品说明书或手册中标明
- ▶ 大约对应于仪器最小分度值
- ▶ 包括仪器生产中的系统误差和正常使用中的随机涨落

c ：和概率分布相关的置信因子

- 假设为矩形分布（等概率分布）时， $c = \sqrt{3}$
- 假设为正态分布时， $c = 3$
- 假设为三角分布时， $c = \sqrt{6}$

估计值以 $p=100\%$ 的概率均匀散布在 $\pm a$ 区间内，落在该区间外的概率为零；且没有说明概率分布。

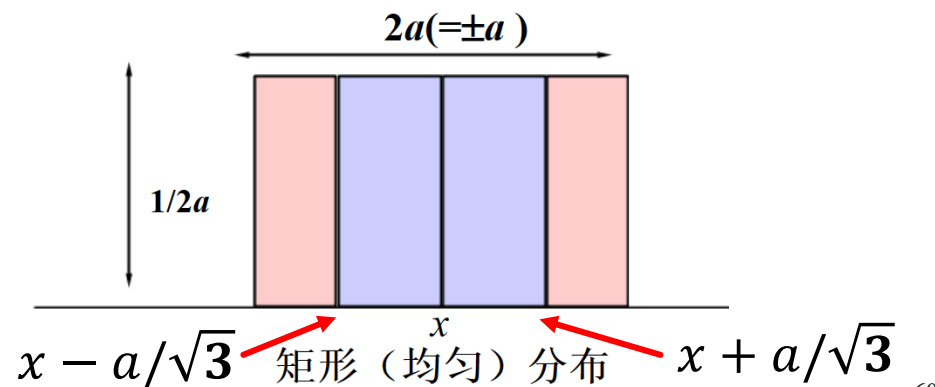
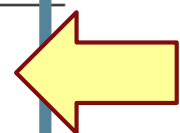


表 2.1- 1 常用仪器量具的主要技术要求和最大允差

量具（仪器）	量程	最小分度值	最大允差
钢板尺	150mm	1mm	±0.10mm
	500mm	1mm	±0.15mm
	1000mm	1mm	±0.20mm
钢卷尺	1m	1mm	±0.8mm
	2m	1mm	±1.2mm
游标卡尺	125mm	0.02mm	±0.02mm
	300mm	0.05mm	±0.05mm
螺旋测微器 （千分尺）	0~25mm	0.01mm	±0.004mm
七级天平 （物理天平）	500g	0.05g	0.08g（接近满量程） 0.06g（½量程附近） 0.04g（⅓量程和以下）
三级天平 （分析天平）	200g	0.1mg	1.3mg（接近满量程） 1.0mg（½量程附近） 0.7mg（⅓量程和以下）
普通温度计 （水银或有机溶剂）	0~100℃	1℃	±1℃
精密温度计（水银）	0~100℃	0.1℃	±0.2℃



a

标准不确定度

$$u_B(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

获得待测量的合成标准不确定度

若测量模型为： $L=L_0$ （仪器示值） $+L_1$ （仪器偏差）

直接测量量：

多次测量：
$$u(L) = \sqrt{u_A(L_0)^2 + u_B(L_1)^2}$$

间接测量量：

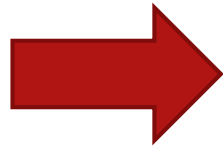
间接测量量：

间接测量量 y 的标准不确定度 $u_c(y)$ ，由直接测量量 (x_1, x_2, \dots, x_n) 的标准不确定度分量 $u(x_i)$ 合成：

注意：各输入值相互独立无关

测量模型：

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$



$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)}$$

展开写 $u_c(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 u^2(x_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 u^2(x_2) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_3}\right)^2 u^2(x_3) + \dots}$

灵敏系数（偏导）： 测量结果 y 对该自变量 x_i 的变化率

几个常见的合成公式

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)}$$

加减: $y = x_1 \pm x_2$

$$u_c^2(y) = u^2(x_1) + u^2(x_2)$$

乘除: $y = x_1 x_2$ 或 $y = \frac{x_1}{x_2}$

$$\left(\frac{u_c(y)}{y}\right)^2 = \left(\frac{u(x_1)}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{u(x_2)}{x_2}\right)^2$$

乘方: $y = x^n$

$$\left(\frac{u_c(y)}{y}\right)^2 = \left(n \frac{u(x)}{x}\right)^2$$

示例：用千分尺测量一个球的直径 D . 测量了10次，结果如下表，求该球的直径及其不确定度。

d_1/mm	12.337	12.349	12.333	12.353	12.339	12.352	12.345	12.348	12.356	12.340
d_0/mm	0.002	0.003	0.002	0.001	0.003	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002
D_0/mm	12.335	12.346	12.331	12.352	12.336	12.350	12.344	12.346	12.354	12.338

d_1 千分尺的直接读数， d_0 千分尺的零读数

(1) 测量模型：

D_0 ：千分尺的视读长度

D_1 ：千分尺校准证书给出的仪器偏差

$$D = D_0 + D_1 + D_2 + D_3$$

D_2 ：千分尺卡钳与待测球接触点偏离直径引起的偏差

D_3 ：加持球时形变或者温度波动引起的偏差

(2) 分析每一项的标准不确定度

对 D_0 : $D_0 = \bar{D}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i = 12.3432 \text{ mm}$

标准不确定度: $u_A(\bar{D}_0) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n(n-1)}} = 0.0025 \text{ mm}$

运算过程中多保留几位

对 D_1 : $D_1 = 0 \text{ mm}$ 标准不确定度: $u_{D_1} = \frac{0.004}{\sqrt{3}} = 0.0023 \text{ mm}$

如果测量过程中较为仔细，或精度要求不太高，可认为 D_2 和 D_3 的影响可忽略

(3) 合成测量量的标准不确定度

直径 D 的标准不确定度为:

$$u(D) = \sqrt{u_A(D_0)^2 + u_B(D_1)^2} = 0.0034 \text{ mm}$$

最终结果

$$D = 12.343(3) \text{ mm}$$

不确定度的表达: 本课程要求

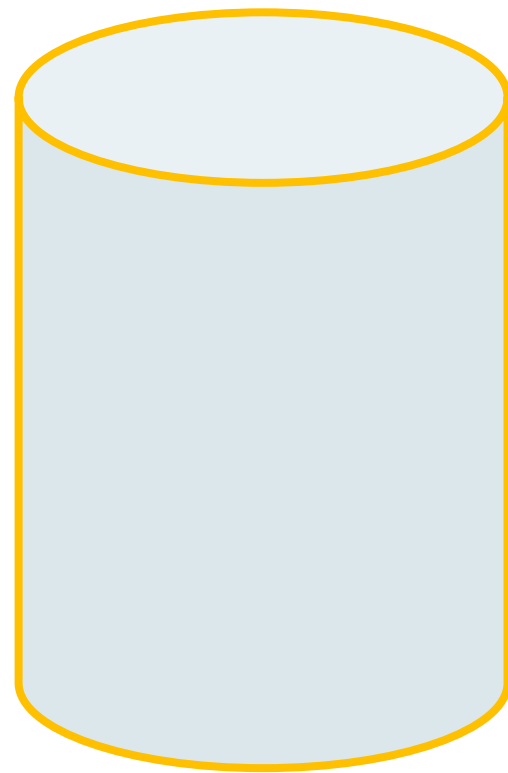
- 不确定度只取一位有效数字
- 用括号里的数字表示。
- 根据不确定度，确定测量结果的有效数字。

示例:测量圆柱体合金的密度

▶ 分析待测量

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi D^2 H}$$

▶ 间接测量量 ρ 转化为3个直接测量量 m 、 D 、 H



示例：测量圆柱体合金的密度

直径 D 用千分尺 ($a = 0.004\text{mm}$) 测量，高 H 用游标卡尺 ($a = 0.02\text{mm}$)测量，测量数据如下（千分尺读数零读数已扣除）：

D/mm	10.502	10.488	10.516	10.480	10.495
H/mm	20.00	20.02	19.98	20.00	20.00

质量用电子天平测量，天平的仪器允差为 0.04 g ，测量数据如下：

m/g	14.01	13.99	14.00	14.01	13.99
--------------	-------	-------	-------	-------	-------

评定直径的不确定度

直径 D 用千分尺 ($a = 0.004\text{mm}$) 测量,

D/mm	10.502	10.488	10.516	10.480	10.495
---------------	--------	--------	--------	--------	--------

构建 测量模型: $D = \bar{D}_0 + D_1$

$$\bar{D}_0 = 10.4962 \text{ mm}$$

$$u_A(\bar{D}_0) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n(n-1)}} = 0.0062 \text{ mm}$$

分析

$$D_1 = 0 \text{ mm}$$

$$u_B(D_1) = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{C} = \frac{0.004}{\sqrt{3}} = 0.0023 \text{ mm}$$

合成

$$\begin{aligned} u(D) &= \sqrt{(u_A(\bar{D}_0))^2 + (u_B(D_1))^2} \\ &= \sqrt{0.0062^2 + 0.0023^2} \\ &= 0.0066 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$D = 10.4962(66) \text{ mm}$$

运算过程中多保留几位

评定高度的不确定度

高 H 用游标卡尺 ($a = 0.02\text{mm}$)测量,

H/mm	20.00	20.02	19.98	20.00	20.00
---------------	-------	-------	-------	-------	-------

构建 测量模型: $H = \overline{H}_0 + H_1$

$$\overline{H}_0 = 20.000 \text{ mm}$$

$$u_A(\overline{H}_0) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \overline{H})^2}{n(n-1)}} = 0.0063 \text{ mm}$$

$$H_1 = 0 \text{ mm}$$

$$u_B(H_1) = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{c} = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 0.012 \text{ mm}$$

分析

合成

$$\begin{aligned} u(H) &= \sqrt{(u_A(\overline{H}_0))^2 + (u_B(H_1))^2} \\ &= \sqrt{0.0063^2 + 0.012^2} \\ &= 0.014 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$H = 20.000(14) \text{ mm}$$

运算过程中多保留几位

评定质量的不确定度

质量用电子天平测量，天平的仪器允差为0.04 g，测量数据如下：

m/g	14.01	13.99	14.00	14.01	13.99
-------	-------	-------	-------	-------	-------

构建 测量模型： $m = \bar{m}_0 + m_1$

$$\bar{m}_0 = 14.000 \text{ g}$$

$$u_A(\bar{m}_0) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}{n(n-1)}} = 0.0045 \text{ g}$$

$$m_1 = 0 \text{ g}$$

$$u_B(m_1) = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{c} = \frac{0.04}{\sqrt{3}} = 0.023 \text{ g}$$

$$u(m) = \sqrt{(u_A(\bar{m}_0))^2 + (u_B(m_1))^2}$$

$$= \sqrt{0.0045^2 + 0.023^2}$$

$$= 0.023 \text{ g}$$

$$m = 14.000(23) \text{ g}$$

合成

运算过程中多保留几位

评定密度的不确定度

构建

测量模型: $\rho = \frac{4m}{\pi D^2 H}$

分析

$$\rho = \frac{4 \times 14.000}{3.14159 \times 10.4962^2 \times 20.000}$$
$$= 8.0899 \times 10^{-3} \text{g/mm}^3 = 8.0899 \text{g/cm}^3$$

常数 π 多取一位: 3.14159

合成

$$u(\rho) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial D} u(D)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial H} u(H)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial m} u(m)\right)^2}$$
$$= \sqrt{\left(2 \times \rho \frac{1}{D} u(D)\right)^2 + \left(\rho \frac{1}{H} u(H)\right)^2 + \left(\rho \frac{1}{m} u(m)\right)^2}$$
$$= 8.0899 \times \sqrt{\left(2 \times \frac{0.0066}{10.4962}\right)^2 + \left(\frac{0.014}{20.000}\right)^2 + \left(\frac{0.023}{14.000}\right)^2}$$
$$= 0.018 \text{g/cm}^3$$

$$\rho = 8.09 (2) \text{g/cm}^3$$

不确定度的表达: 本课程要求

- 不确定度**只取一位**有效数字
- 用括号里的数字表示。
- 根据不确定度, 确定测量结果的有效数字。

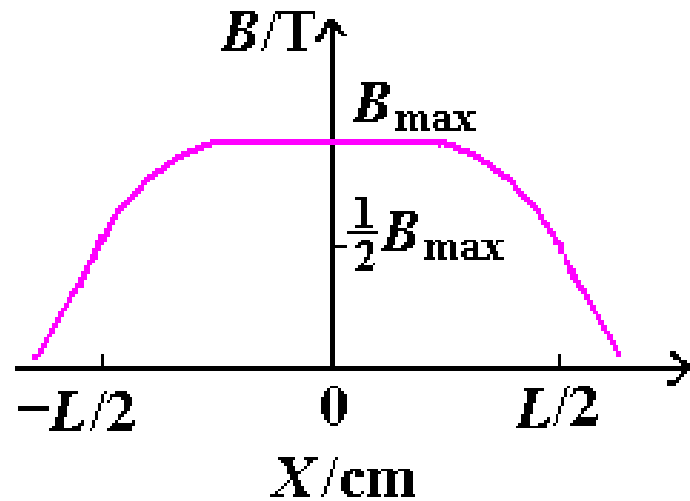
4. 作图

- 为什么要作图？
- 作图规则？
- 如何读图？

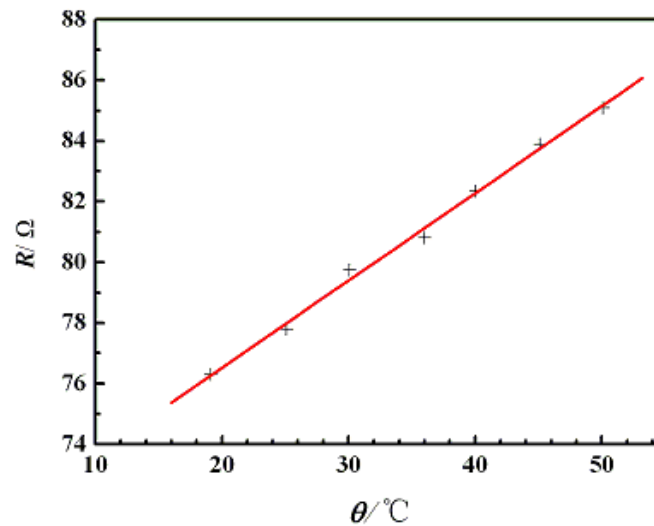
作图纸：购买或者下载打印、复印

为什么要作图

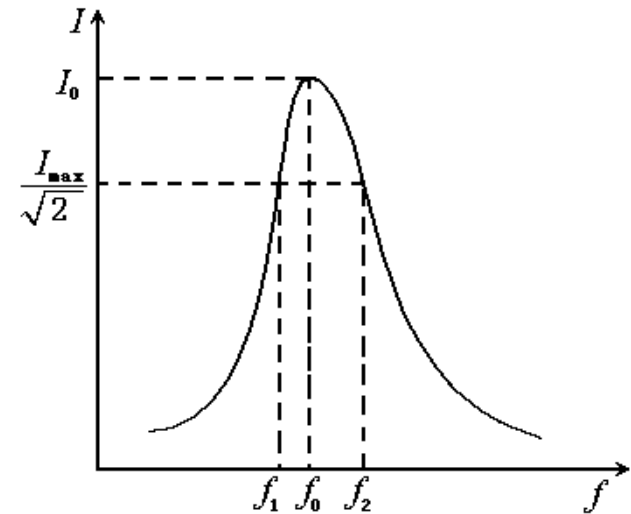
- ▶ 清晰地看到定性关系
- ▶ 方便地比较不同特性
- ▶ 合理地从图上得到有用的信息



螺线管中心轴线上
的磁场分布



电阻随温度的变化关系



LCR串联电路谐振曲线

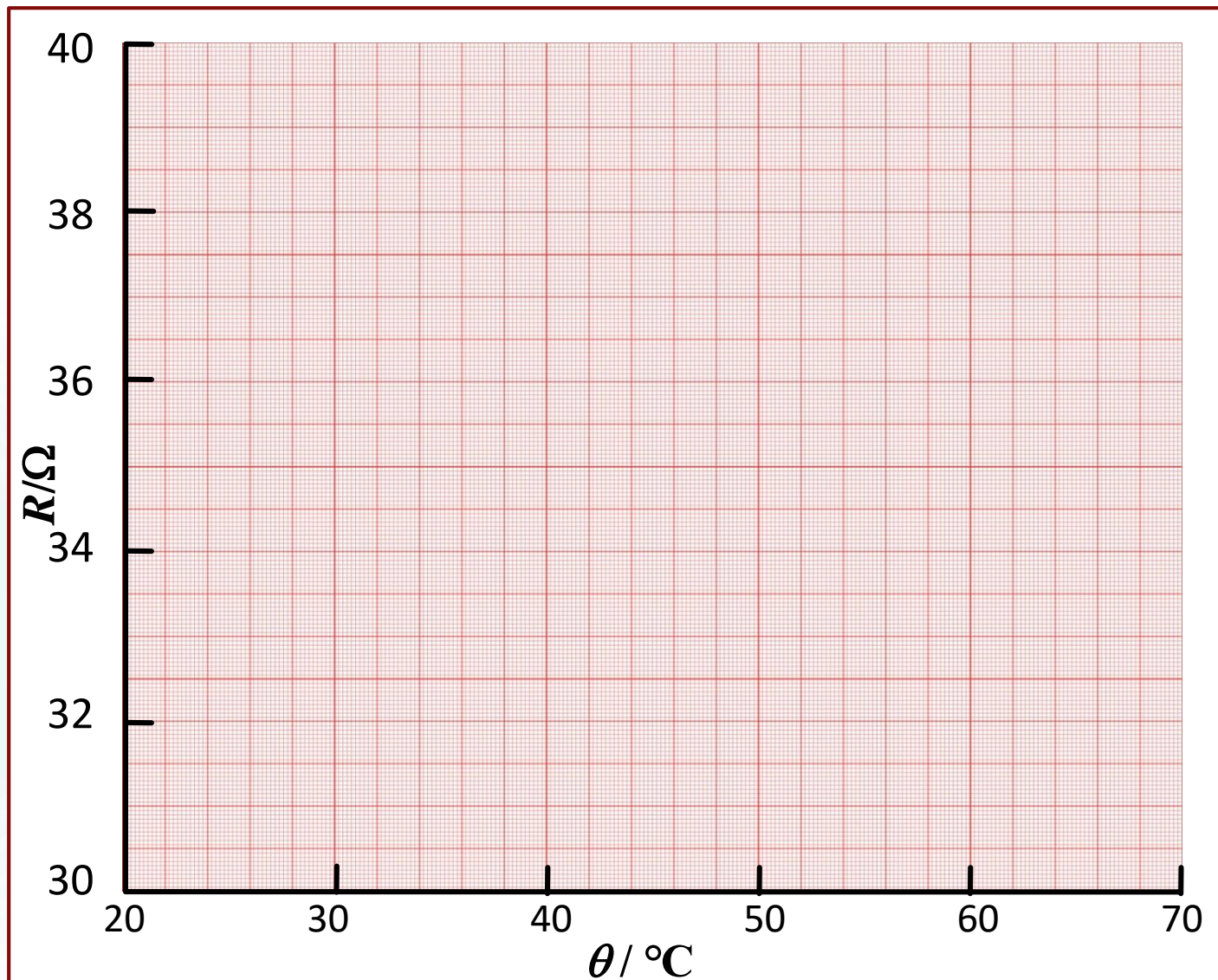
1.选择坐标纸

2.根据自变量 - 因变量选择图纸方向（一般取自变量为横坐标），选择合适比例，图纸上1格所表示的数据量值符合原数据量值变化的1、2、5等数（或它们的十进倍率），便于读取。

3.画坐标轴、分度线（等间距、勿太密）并标明物理量名称（*斜体*）及单位（正体）。



作图规则



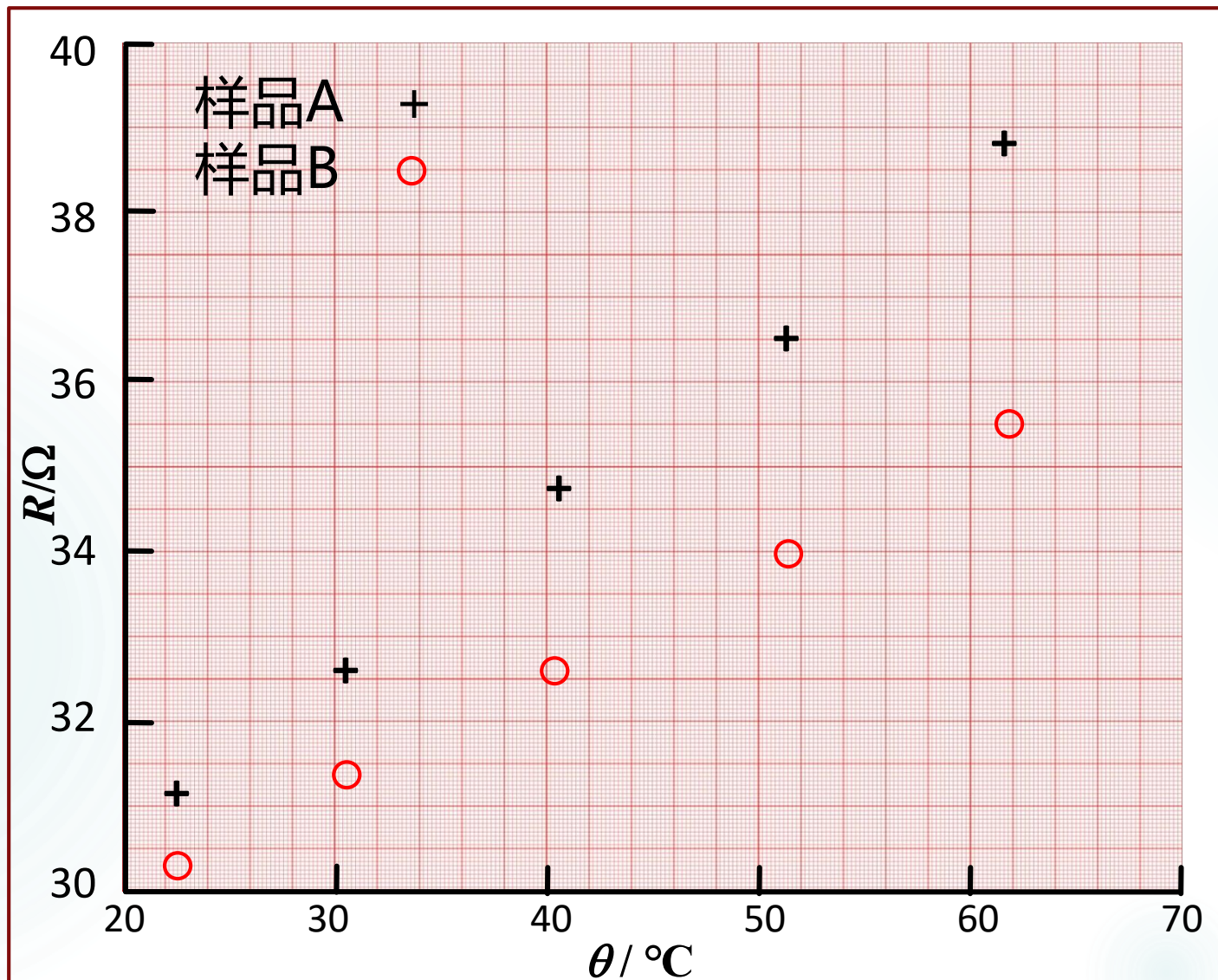
1.选择坐标纸

2.根据自变量 - 因变量选择图纸方向（一般取自变量为横坐标），选择合适比例，图纸上1格所表示的数据量值符合原数据量值变化的1、2、5等数（或它们的十进倍率），便于读取。

3.画坐标轴、分度线（等间距、勿太密）并标明物理量名称（*斜体*）及单位（正体）。

4.画数据点（不标数据值，要用端正的“+”或者“○”符号来表示，不同组数据要用不同的符号）。

作图规则



1.选择坐标纸

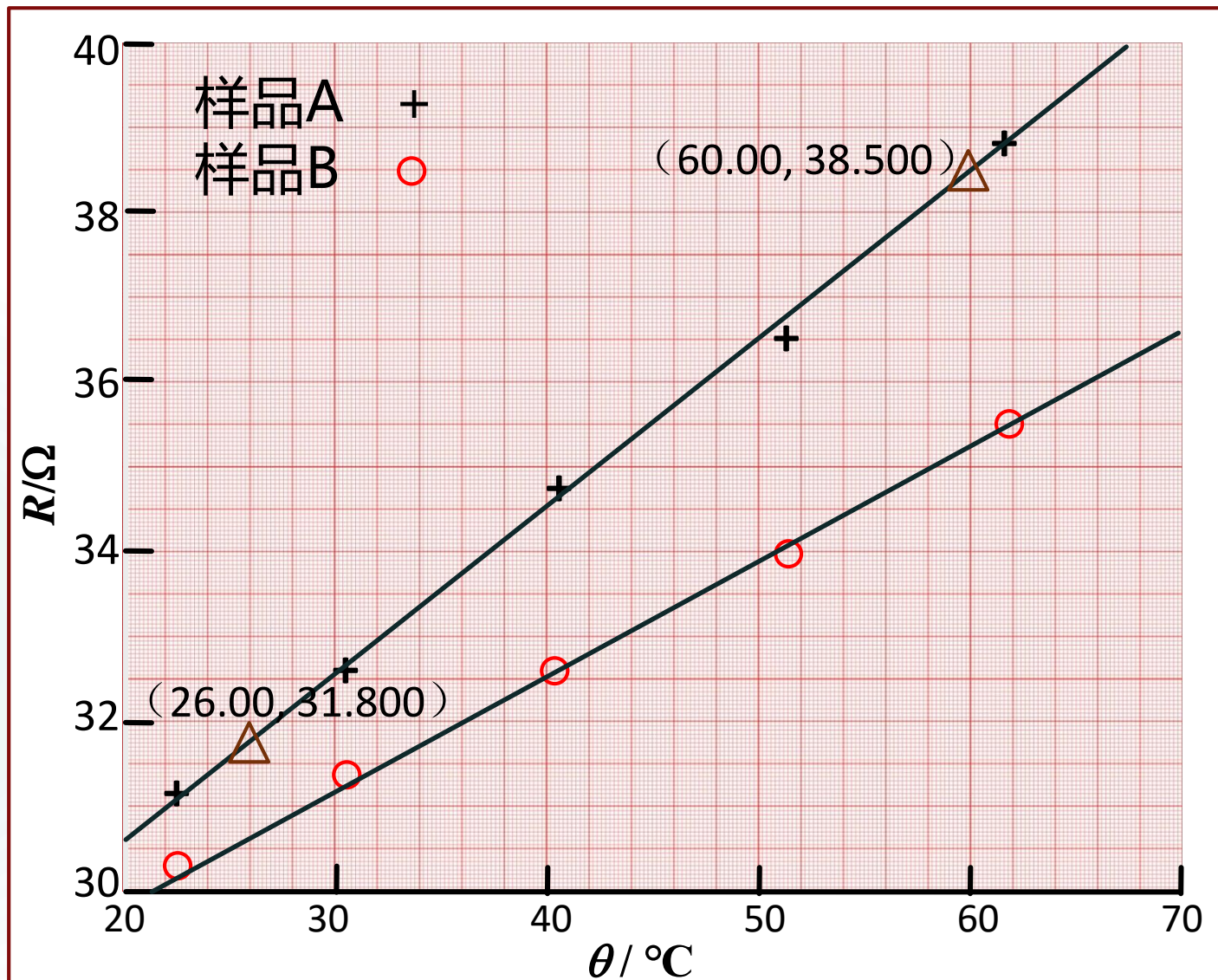
2.根据自变量 - 因变量选择图纸方向（一般取自变量为横坐标），选择合适比例，图纸上1格所表示的数据量值符合原数据量值变化的1、2、5等数（或它们的十进倍率），便于读取。

3.画坐标轴、分度线（等间距、勿太密）并标明物理量名称（斜体）及单位（正体）。

4.画数据点（不标数据值，要用端正的“+”或者“○”符号来表示）。

5.画直线或曲线，标明特殊点(特殊点所用符号应有别于数据点的符号)及坐标值（计算斜率用的点，曲线的峰、谷等）。

作图规则



1.选择坐标纸

2.根据自变量 - 因变量选择图纸方向（一般取自变量为横坐标），选择合适比例，图纸上1格所表示的数据量值符合原数据量值变化的1、2、5等数（或它们的十进倍率），便于读取。

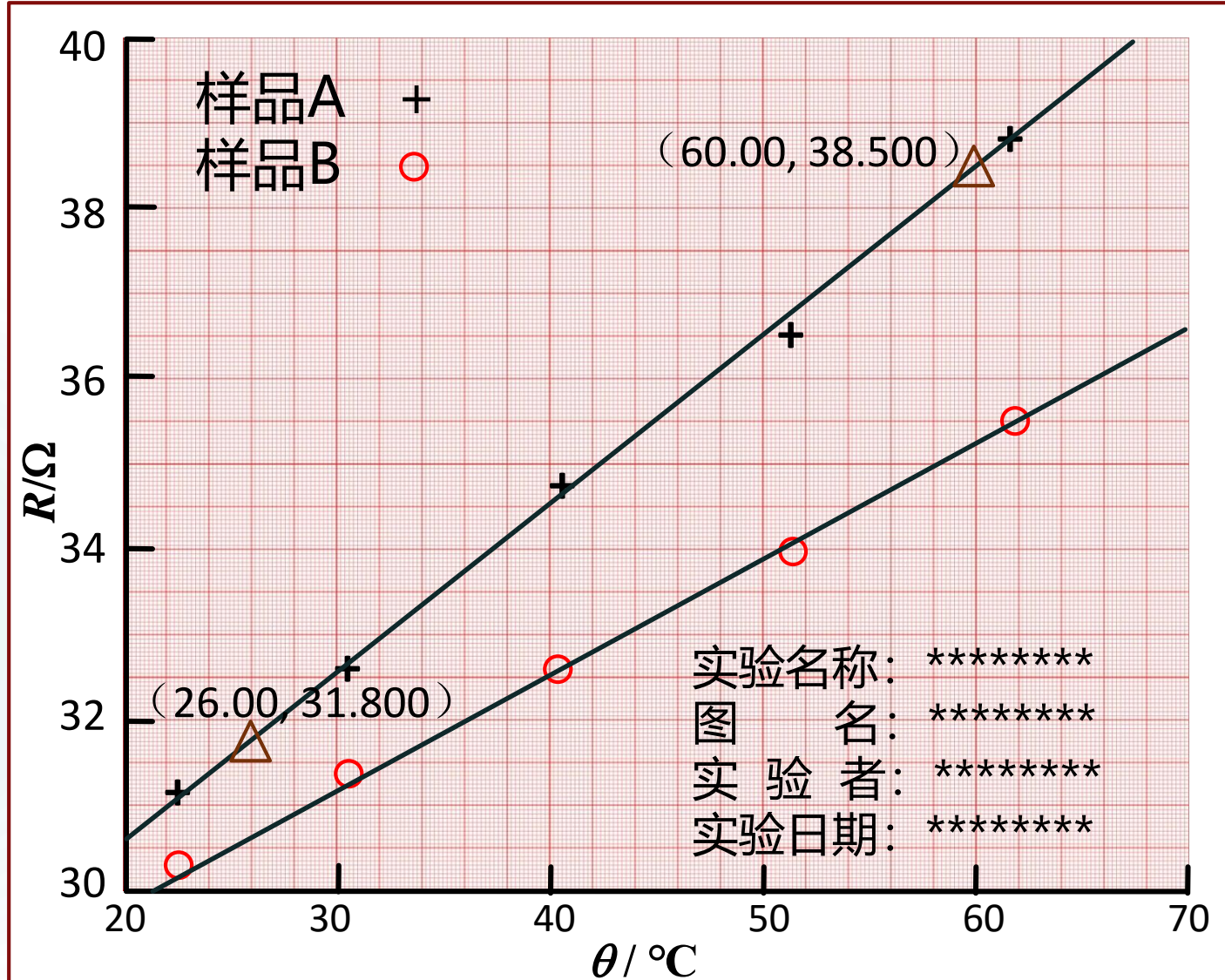
3.画坐标轴、分度线（等间距、勿太密）并标明物理量名称（斜体）及单位（正体）。

4.画数据点（不标数据值，要用端正的“+”或者“○”符号来表示）。

5.画直线或曲线，标明特殊点(特殊点所用符号应有别于数据点的符号)及坐标值（计算斜率用的点，曲线的峰、谷等）。

6.写出实验名称、图名、实验者、实验日期。

作图规则



如何读图

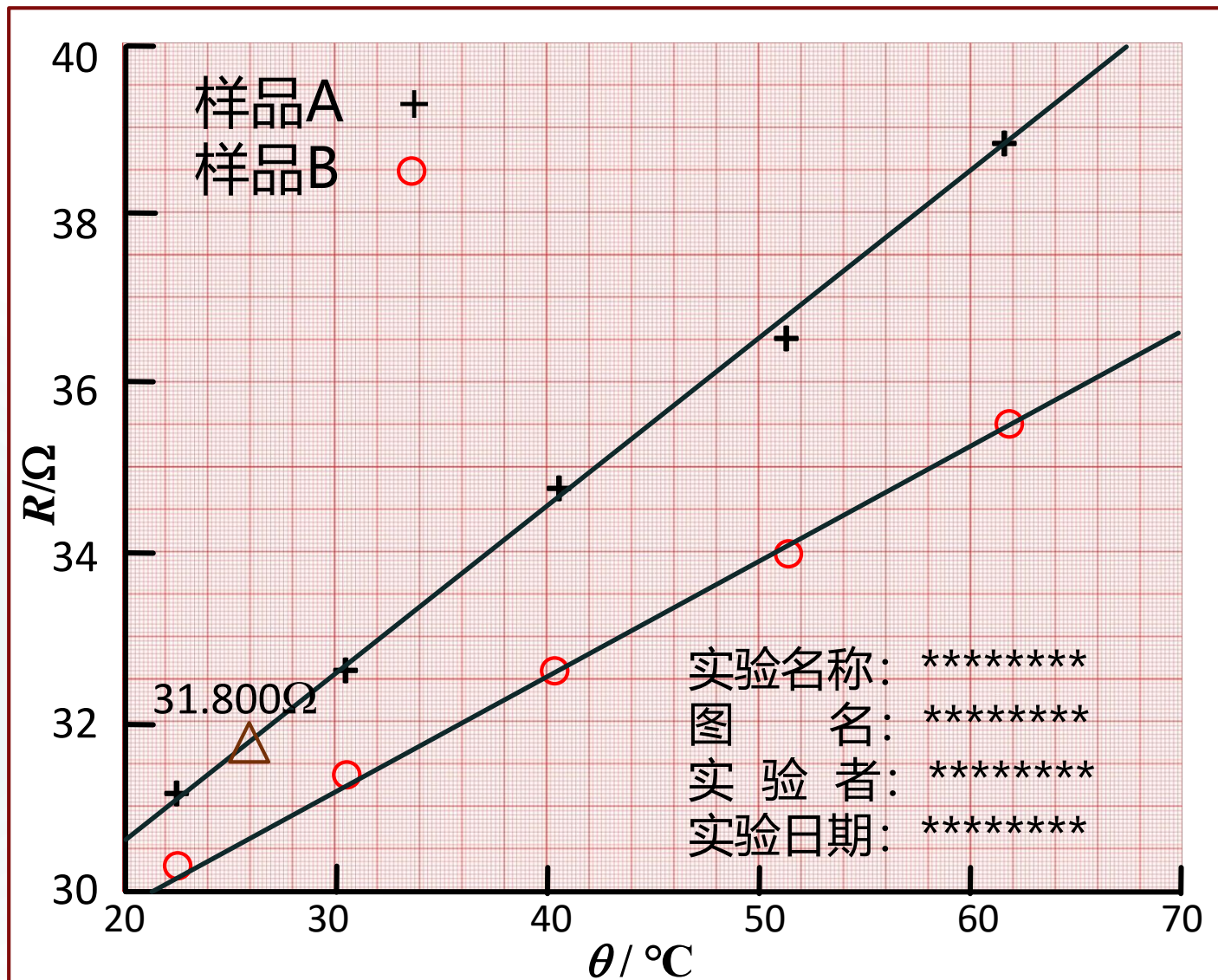
- ▶ 读某个数据点时 - 有效数字
- ▶ 读单一坐标值时 - 有效数字、单位
- ▶ 通过作直线求斜率时

取点、标出坐标值、计算斜率 (单位)

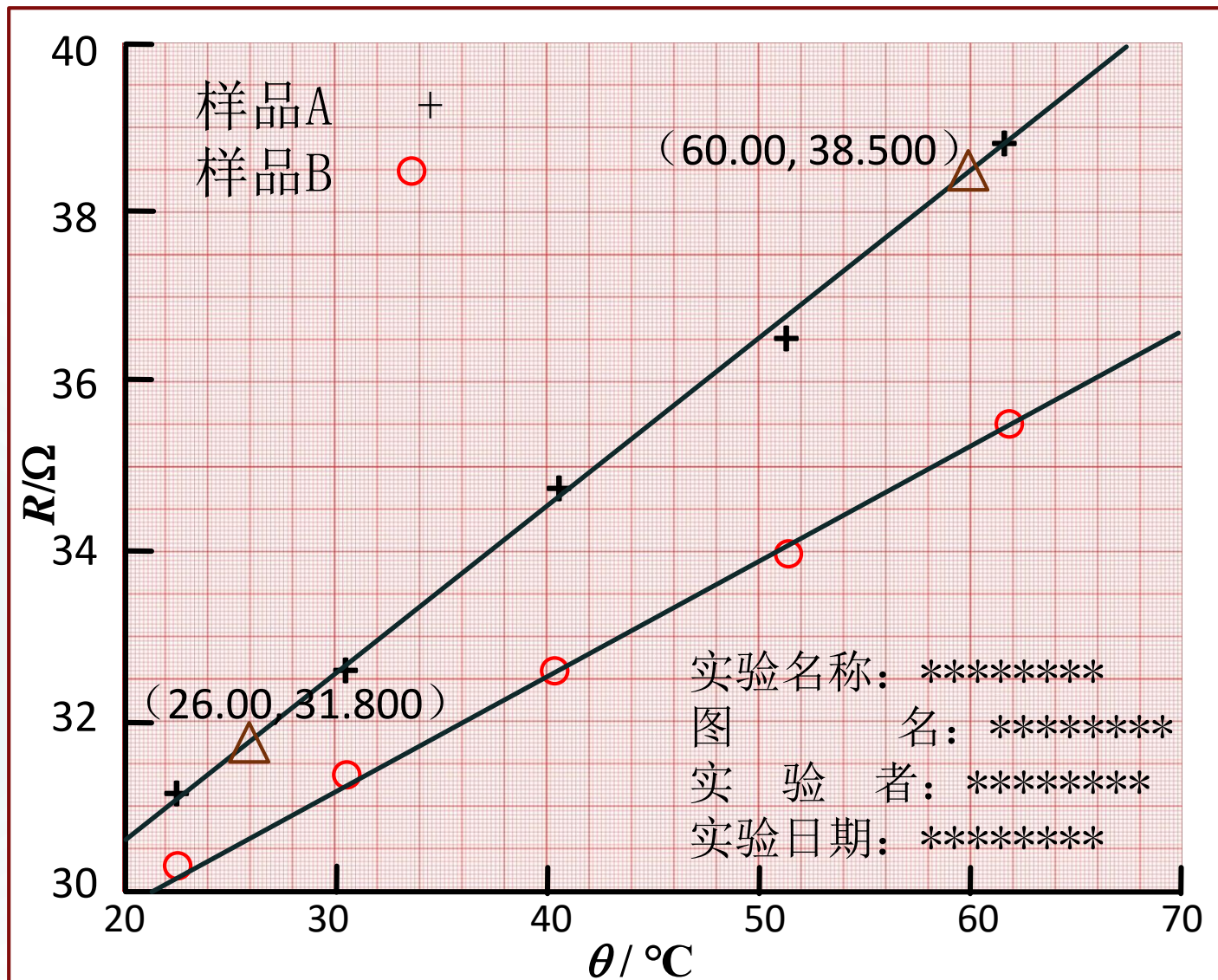
三个规则:

**不能取原始数据点;
尽量远但不超数据范围;
取与X轴刻度线的交点。**

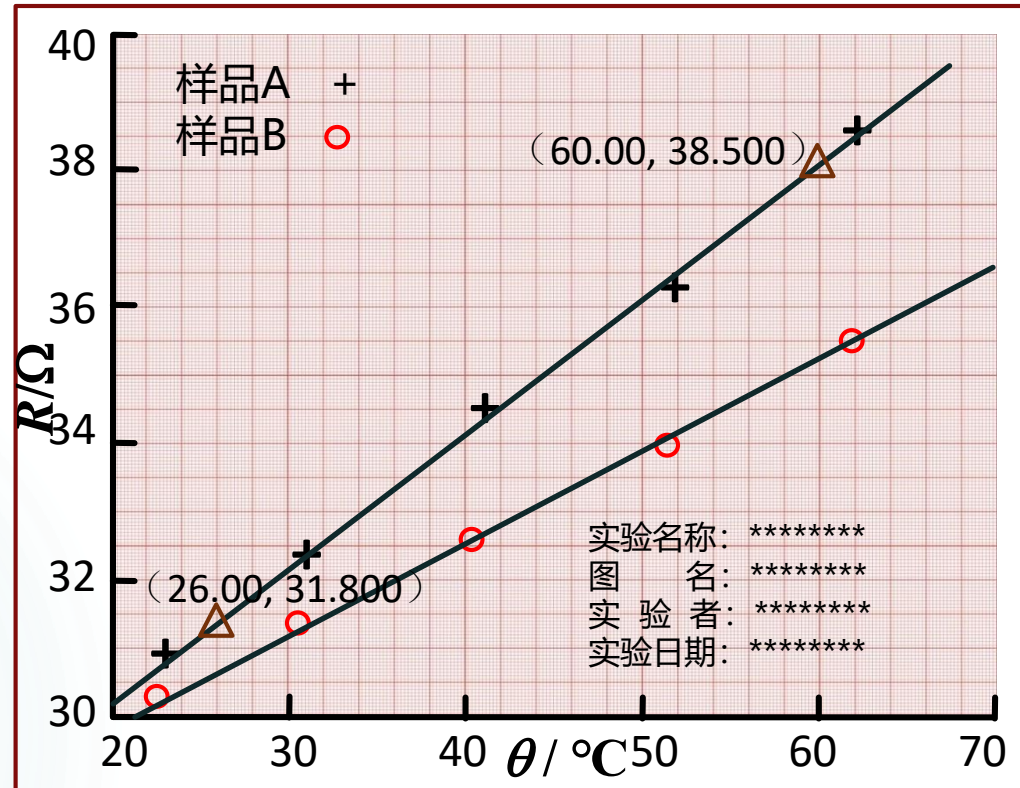
例：如何读图



例：如何读图



例：如何读图

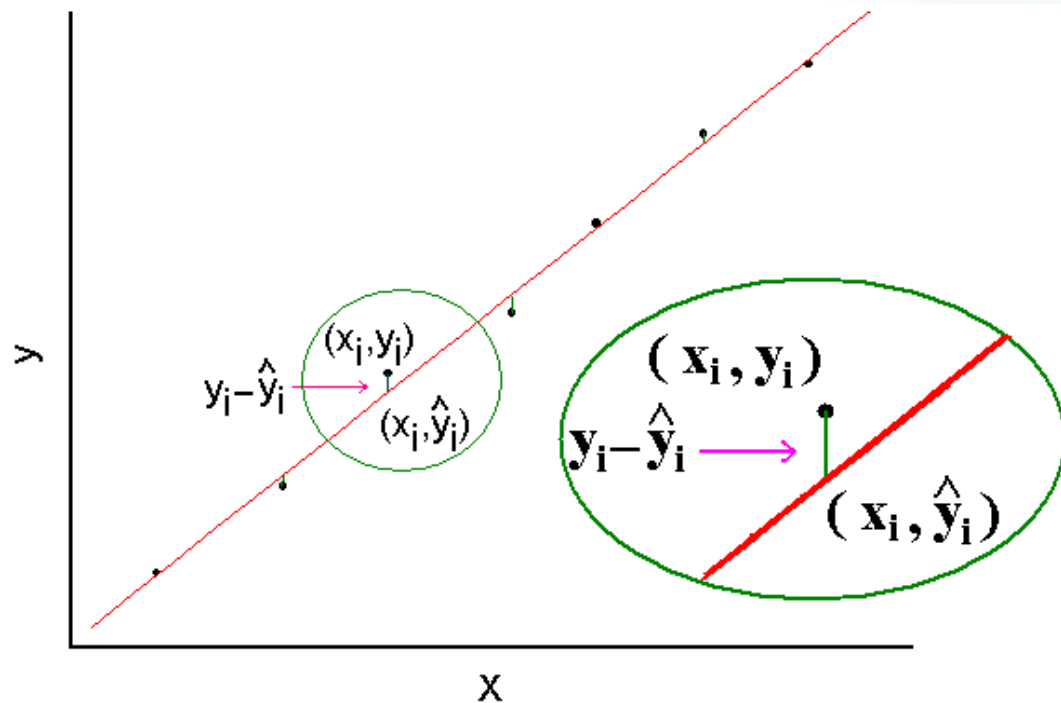


$$k = \frac{\Delta R}{\Delta \theta} = \frac{38.500 - 31.800}{60.00 - 26.00} = 0.1970 \Omega / ^\circ\text{C}$$

5. 最小二乘法

最小二乘法认为：假设各 x_i 的值是准确的，所有的不确定度都只联系着 y_i ，若最佳拟合的直线为： $y = kx + b$ ，则所测各值与拟合直线上相应的各估计值之间的偏差的平方和最小，即，直线方程中： $\hat{y}_i = kx_i + b$

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min$$



最小二乘法原理:

$$s(k, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)^2 \rightarrow \min$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial s}{\partial k} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - kx_i - b) = 0 \\ \frac{\partial s}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sum_{i=1}^n x_i (y_i - kx_i - b) = 0 \\ \sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sum_{i=1}^n x_i y_i - k \sum_{i=1}^n x_i^2 - b \sum_{i=1}^n x_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n y_i - k \sum_{i=1}^n x_i - nb = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow k = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} = \bar{y} - k \bar{x}$$

$$\text{令: } l_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i, l_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \Rightarrow k = \frac{l_{xy}}{l_{xx}}$$

$$\text{证明: } l_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, l_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 2x_i \bar{x} + \bar{x}^2) = \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2\bar{x} \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n \bar{x}^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2 \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \right)^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 = l_{xx}$$

同样的, 可以证明 $\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = l_{xy}$

$$\text{结论: } k = \frac{l_{xy}}{l_{xx}}, b = \bar{y} - k \bar{x}$$

$$s = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial s}{\partial k} = 0 \\ \frac{\partial s}{\partial b} = 0 \end{cases}$$

5. 最小二乘法

解方程得：

$$\left\{ \begin{array}{l} k = \frac{l_{xy}}{l_{xx}} \\ b = \bar{y} - k\bar{x} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} l_{xy} = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum (x_i y_i) - \frac{1}{n} \sum x_i \sum y_i \\ l_{xx} = \sum (x_i - \bar{x})^2 = \sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2 \end{array} \right.$$

相关系数：

$$r = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx} \cdot l_{yy}}} \quad l_{yy} = \sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2$$

如果 y 和 x 的相关性好，可以粗略考虑 b 的有效位数的最后一位与 y 的有效数字最后一位对齐， k 的有效数字与 $y_n - y_1$ 和 $x_n - x_1$ 中有效位数较少的相同。

5.1 最小二乘法应用举例

已知某铜棒的电阻与温度关系为： $R_{\theta} = R_0 + k\theta$ 。实验测得7组数据（见表1）如下：试用最小二乘法求出参量 R_0 以及 k 。

表 1：在不温度下，铜棒的电阻值

$\theta / ^\circ\text{C}$	19.10	25.10	30.10	36.00	40.00	45.10	50.10
R_{θ} / Ω	76.30	77.80	79.75	80.80	82.35	83.90	85.10

分析：此例中只有两个待定的参量 R_0 和 k ，为得到它们的最佳系数，所需要的数据有 n 、 $\sum x_i$ 、 $\sum y_i$ 、 $\sum x_i^2$ 、 $\sum y_i^2$ 和 $\sum x_i y_i$ 六个累加数，为此在没有常用的科学型计算器时，通过列表计算的方式来进行，这对提高计算速度将会有极大的帮助(参见表2)，并使工作有条理与不易出错。

最小二乘法应用举例

表2：用最小二乘法拟合数据

i	$\theta/^\circ\text{C}$ x_i	R_θ/Ω y_i	$\theta \times \theta$ x_i^2	$R_\theta \times R_\theta$ y_i^2	$\theta \times R_\theta$ $x_i y_i$
1	19.10	76.30	364.81	5821.69	1457.33
2	25.10	77.80	630.01	6052.84	1952.78
3	30.10	79.75	906.01	6360.06	2400.48
4	36.00	80.80	1296.00	6528.64	2908.80
5	40.00	82.35	1600.00	6781.52	3294.00
6	45.10	83.90	2034.01	7039.21	3783.89
7	50.10	85.10	2510.01	7242.01	4263.51
$n=$	$\sum x_i =$	$\sum y_i =$	$\sum x_i^2 =$	$\sum y_i^2 =$	$\sum x_i y_i =$
7	245.50	566.00	9340.85	45825.98	20060.79

最小二乘法应用举例

61

$$k = \frac{\sum (x_i y_i) - \frac{1}{n} \sum x_i \sum y_i}{\sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2} = \frac{20060.79 - 245.50 \times 566.00 \div 7}{9340.85 - (245.50)^2 \div 7} = \frac{210.36}{730.81} = 0.28784 \Omega / ^\circ\text{C}$$

$$R_0 = b = \bar{y} - k\bar{x} = \frac{566.00}{7} - 0.28784 \times \frac{245.50}{7} = 70.76218 \Omega$$

相关系数: $r = \frac{\sum x_i y_i - \frac{1}{n} \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[\sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2] \cdot [\sum y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2]}}$

$$= \frac{20060.79 - \frac{245.50 \times 566.00}{7}}{\sqrt{(9340.85 - \frac{245.50^2}{7}) \times (45825.98 - \frac{566.00^2}{7})}} = 0.997$$

写到第一个
不为9的数

说明: 电阻 R_θ 与温度 θ 的线性关系良好, 所以取 R_0 的有效数字与 R 对齐, 即: $R_0 = 70.76 \Omega$; 又因为 $\theta_7 - \theta_1 = 31.00^\circ\text{C}$, $R_7 - R_1 = 8.80 \Omega$, 取 k 有效数字为以上两个差值中较少的位数3位, 则 $k = 0.288 \Omega / ^\circ\text{C}$ 。

由此可以得到电阻与温度的关系为:

$$R_\theta = 70.76 + 0.288\theta$$

6. 用origin和excel作线性拟合

62

OriginPro 2015 64-bit - C:\Users\Weifeng Su\Documents\OriginLab\2015\User Files\UNTITLED * - /Folder1/ - [Book1]

File Edit View Plot Column Worksheet Analysis Statistics Image Tools Format Window Help

100%

	A(X)	B(Y)
Long Name	θ	R
Units	°C	Ω
Comments		
F(x)=		
1	19.1	76.3
2	25.1	77.8
3	30.1	79.75
4	36	80.8
5	40	82.35
6	45.1	83.9
7	50.1	85.1
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		

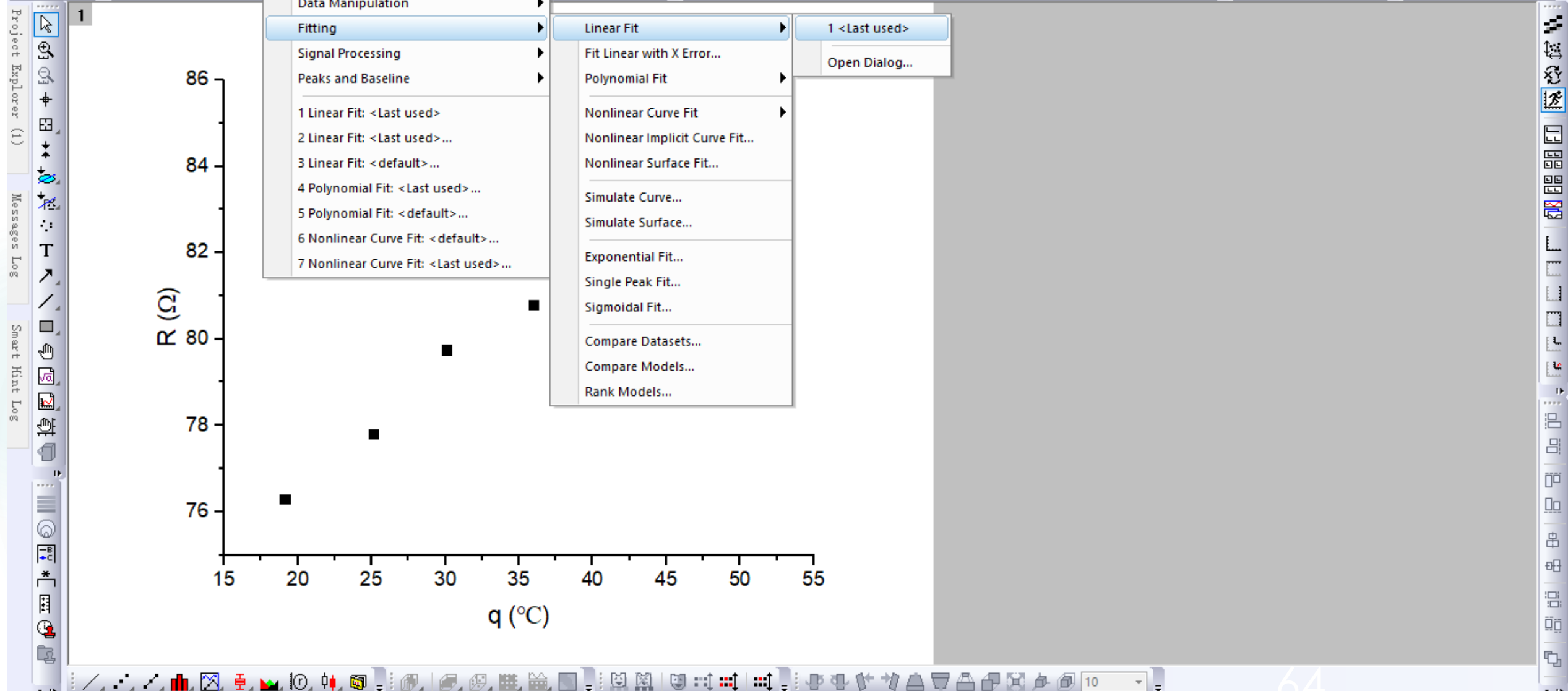
Sheet1

Average=0 Sum=0 Count=0 AU: ON 1: [Book1]Sheet1! Radian

	A(X)	B(Y)
Long Name	6	R
Units	°C	Ω
Comments		
F(x)=		
1	19.1	76.3
2	25.1	77.8
3	30.1	79.75
4	36	80.8
5	40	82.35
6	45.1	83.9
7	50.1	85.1
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		

Project Explorer (1)
Messages Log
Smart Hint Log

Scatter
Plot selected data as a Scatter Graph



File Edit View Graph Data Analysis Gadgets Tools Format Window Help

100%

Default: Arial 0 B I U x² x₂ x² αβ A A

Project Explorer (1)

Messages Log

Smart Hint Log (1)

■ R
 — Linear Fit of Sheet1 B"R"

86

Equation	$y = a + b*x$		
Weight	No Weighting		
Residual Sum of Squares	0.28348		
Pearson's r	0.99767		
Adj. R-Square	0.99441		
		Value	Standard Error
R	Intercept	70.76224	0.32175
	Slope	0.28784	0.00881

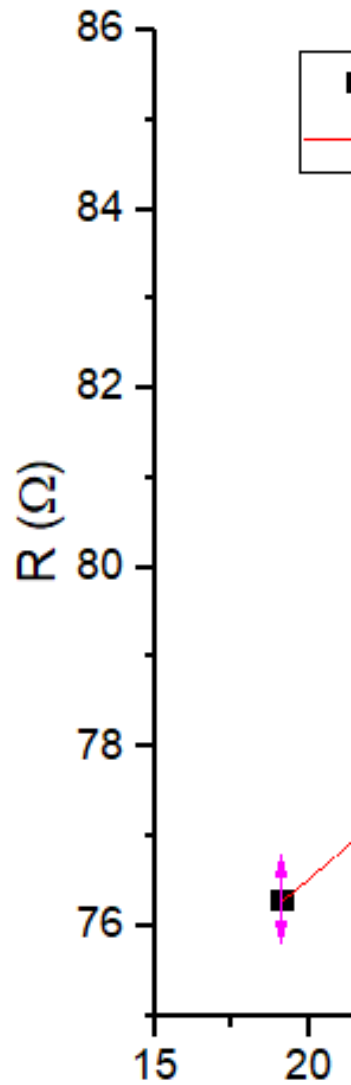
q (°C)

$$r = 0.997$$

$$R_0 = 70.8(3)\Omega$$

$$k = 0.288(9)\Omega/^\circ\text{C}$$

$$R = 70.8 + 0.288\theta$$



Plot Details - Plot Properties

Graph1

- Layer1
 - [Book1]Sheet1! A(X), B(Y) [1*:7*]
 - [Book1]FitLinearCurve1! A(X), B(Y) [1*:1000*]

Symbol | Drop Lines | Label

Preview Size 9

■	□	○	⊕	⊗	⊖	⊗	⊖	⊗	⊖	⊗	⊖	⊗	⊖	⊗	⊖	⊗
●	○	○	⊕	⊗	⊖	⊗	⊖	⊗	⊖	⊗	⊖	⊗	⊖	⊗	⊖	⊗
▲	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
▼	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
◆	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
◀	◁	◁	◁	◁	◁	◁	◁	◁	◁	◁	◁	◁	◁	◁	◁	◁
▶	▷	▷	▷	▷	▷	▷	▷	▷	▷	▷	▷	▷	▷	▷	▷	▷
●	○	○	⊕	⊗	⊖	⊗	⊖	⊗	⊖	⊗	⊖	⊗	⊖	⊗	⊖	⊗
★	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆	☆
⬤	⬤	⬤	⬤	⬤	⬤	⬤	⬤	⬤	⬤	⬤	⬤	⬤	⬤	⬤	⬤	⬤
⊕	⊗	*	—													

ss Default

1 Black

0 %

Points Offset Plotting

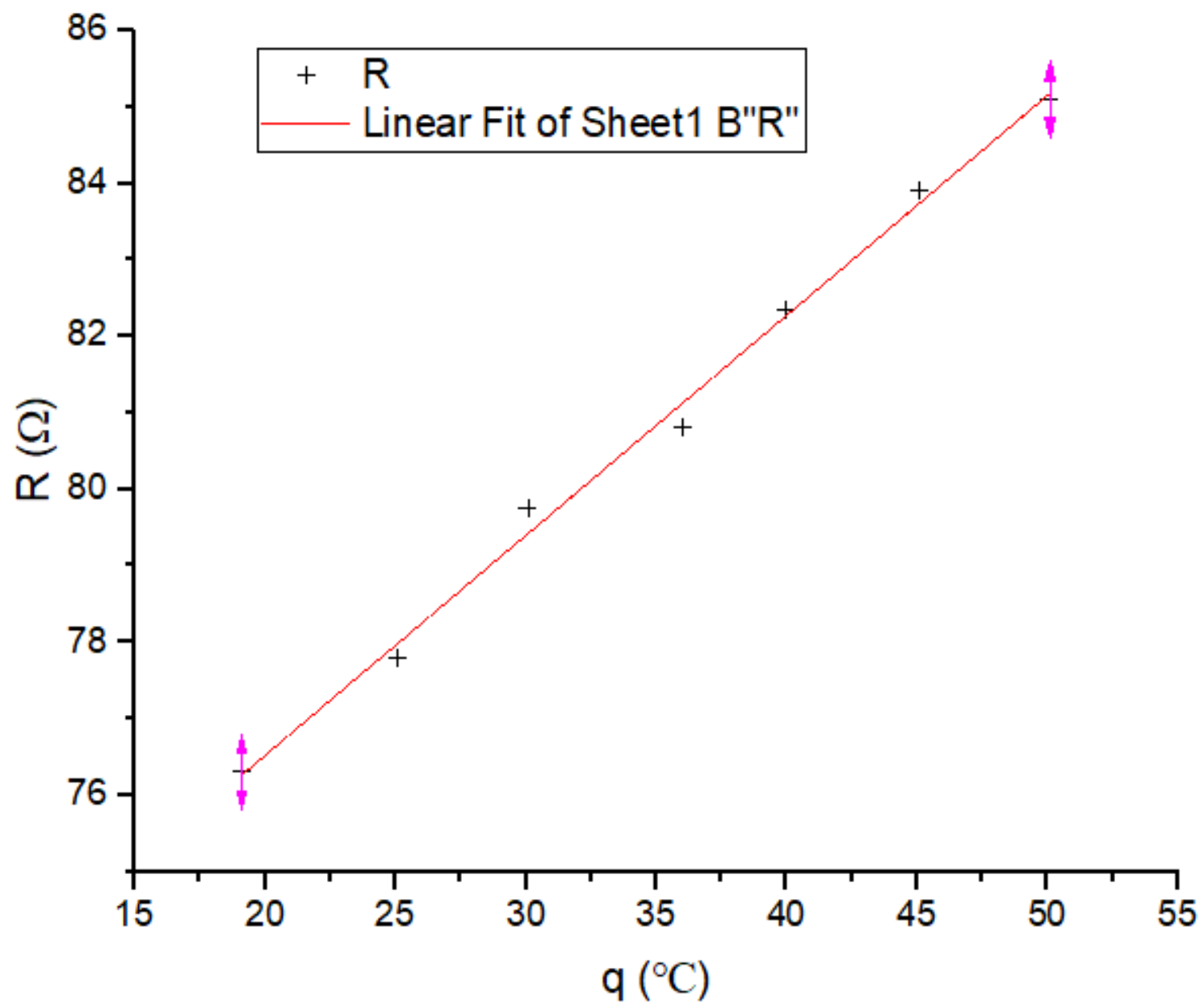
Row Number Numerics Interior

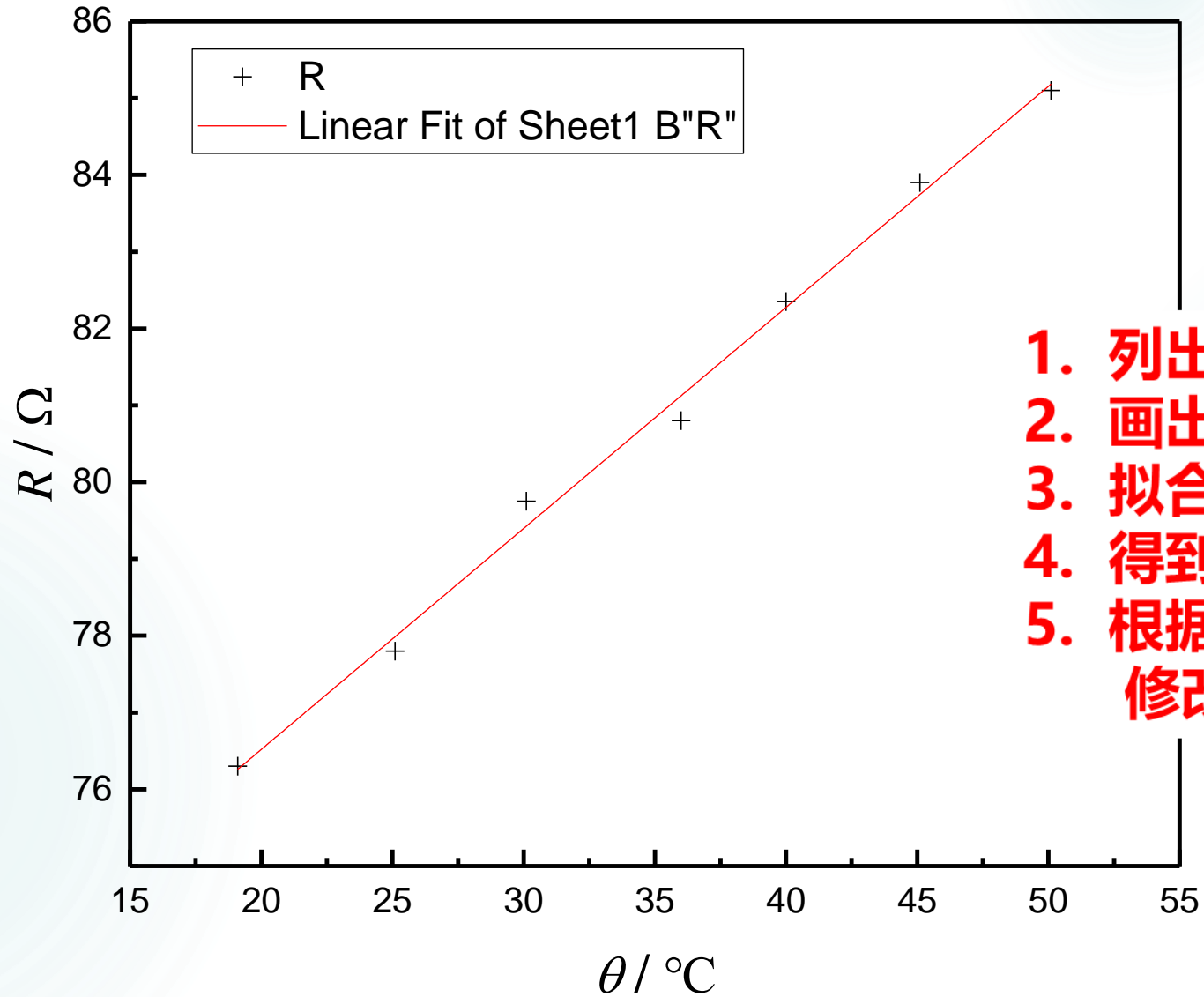
User Defined Symbols

Hint: To skip points, you need to use the "Drop Lines" tab

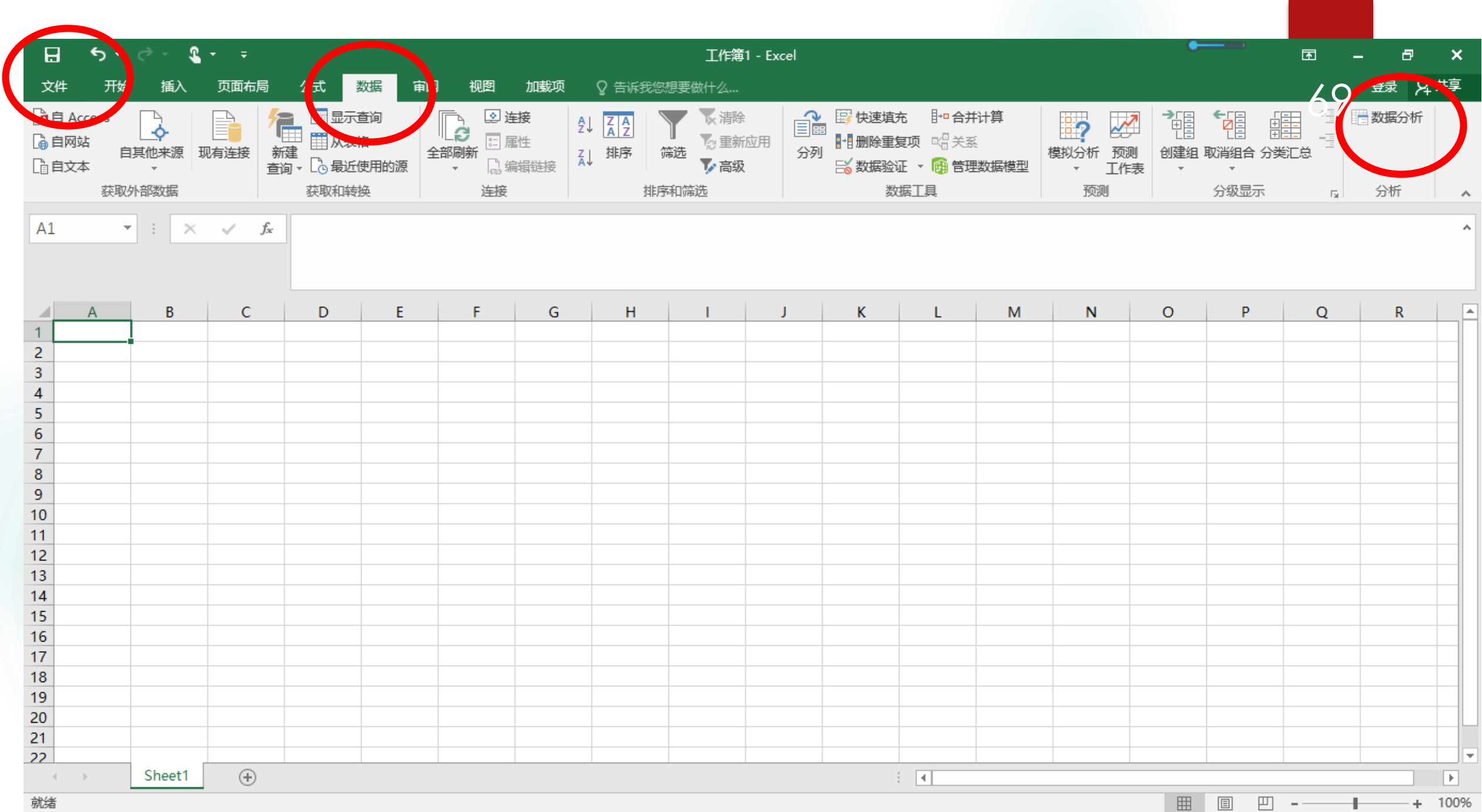
Plot Type Scatter

>> Workbook OK Cancel Apply





1. 列出数据表
2. 画出散点图
3. 拟合数据
4. 得到拟合曲线
5. 根据作图要求
修改图



69

常规

公式

校对

保存

语言

高级

自定义功能区

快速访问工具栏

加载项

信任中心



查看和管理 Microsoft Office 加载项。

加载项

名称 ▲	位置
活动应用程序加载项	
National Instruments TDM Importer for MS Excel	C:\...ared\T
中文转换加载项	C:\...ice\Off
非活动应用程序加载项	
Inquire	C:\...ft Offic
Kingsoft Excel Macro Scanner Addin	
Kingsoft Internet Security Office Addin	
Microsoft Actions Pane 3	
Microsoft Power Map for Excel	C:\...Excel A
Microsoft Power Pivot for Excel	C:\...dd-in\F
Microsoft Power View for Excel	C:\...dd-in\
分析工具库	C:\...fice16\
分析工具库 - VBA	C:\...16\Libr

加载项: 分析工具库

发布者: Microsoft Corporation

兼容性: 没有可用的兼容性信息

位置: C:\Program Files\Microsoft Office\Office16\Library\A

描述: 提供用于统计和工程分析的数据分析工具

管理(A): Excel 加载项

转到(G)...

加载宏

可用加载宏(A):

- 分析工具库
- 分析工具库 - VBA
- 规划求解加载项
- 欧元工具

确定

取消

浏览(B)...

自动化(U)...

分析工具库

提供用于统计和工程分析的数据分析工具

文件 开始 插入 页面布局 公式 数据 审阅 视图 加载项 告诉我您想要做什么... 登录 共享

获取外部数据 获取和转换 连接 排序和筛选 数据工具 预测 分级显示 分析

	A	B	C
1	19.1	76.3	
2	25.1	77.8	
3	30.1	79.75	
4	36	80.8	
5	40	82.35	
6	45.1	83.9	
7	50.1	85.1	
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			

回归

输入

Y 值输入区域(Y): **\$B\$1:\$B\$7**

X 值输入区域(X): **\$A\$1:\$A\$7**

标志(L) 常数为零(Z)

置信度(F) 95 %

输出选项

输出区域(O):

新工作表组(P):

新工作簿(W)

残差

残差(R) 残差图(D)

标准残差(I) **线性拟合图(L)**

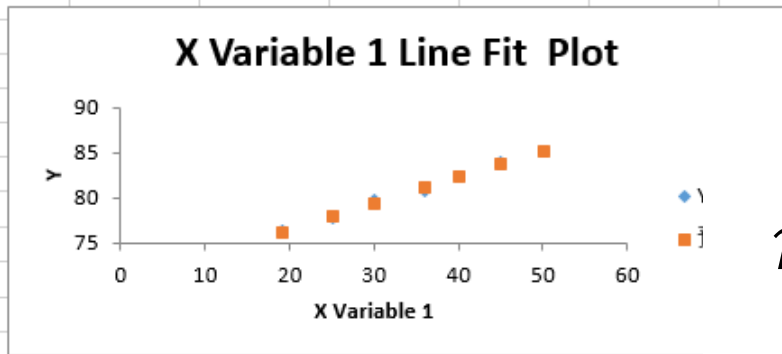
正态分布

正态概率图(N)

确定 取消 帮助(H)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	SUMMARY OUTPUT																	
2																		
3	回归统计																	
4	Multiple R	0.997667																
5	R Square	0.99534																
6	Adjusted R	0.994408																
7	标准误差	0.23811																
8	观测值	7																
9																		
10	方差分析																	
11		df	SS	MS	F	Significance F												
12	回归分析	1	60.54866	60.54866	1067.949	5.04E-07												
13	残差	5	0.283481	0.056696														
14	总计	6	60.83214															
15																		
16		Coefficients	标准误差	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	下限 95.0%	上限 95.0%									
17	Intercept	70.76224	0.321749	219.9297	3.69E-11	69.93516	71.58932	69.93516	71.58932									
18	X Variable	0.287838	0.008808	32.67949	5.04E-07	0.265197	0.31048	0.265197	0.31048									
19																		
20																		
21																		
22	RESIDUAL OUTPUT																	

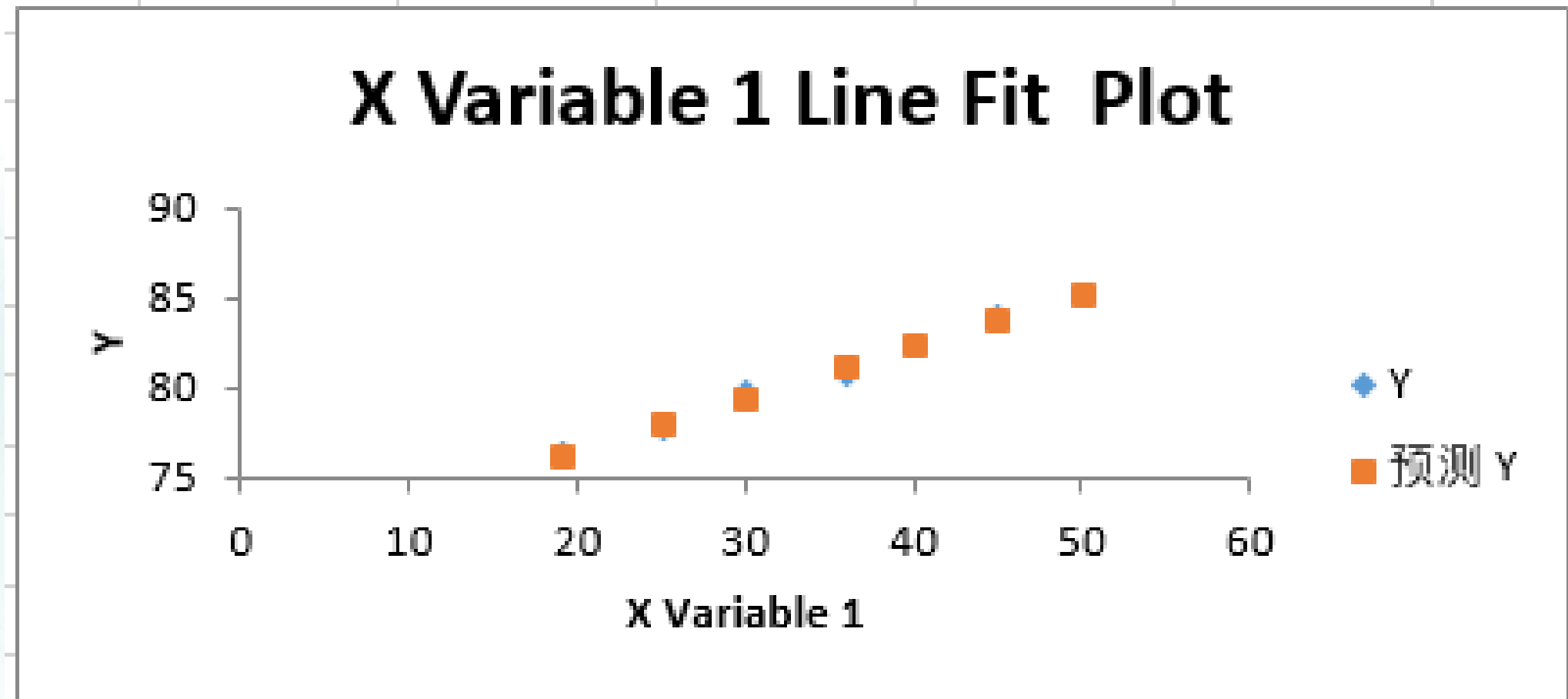


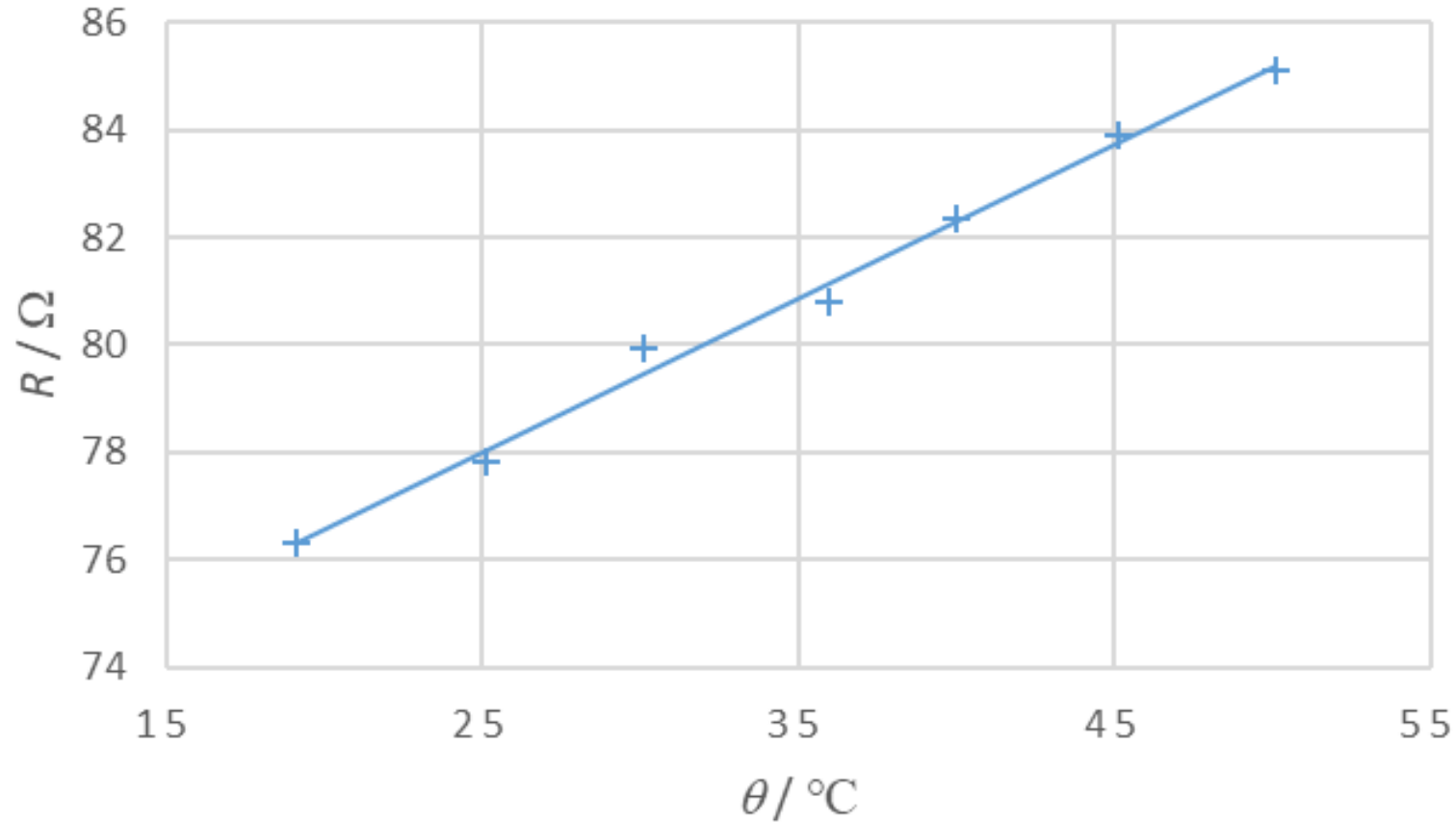
$$r = 0.997$$

$$R_0 = 70.8(3)\Omega$$

$$k = 0.288(9)\Omega/^\circ\text{C}$$

$$R = 70.8 + 0.288\theta$$





电阻值随温度的变化曲线

结果:

$$r = 0.997$$

$$R_0 = 70.8(3)\Omega$$

$$k = 0.288(9)\Omega/^\circ\text{C}$$

$$R = 70.8 + 0.288\theta$$

7. 第三周实验安排 (恒隆物理楼2楼)

75



物理楼2楼西侧

7. 第三周实验安排 (恒隆物理楼2楼西侧实验室)

周一-67分组表																					
组	学号姓名	实验内容		周次		3-16周各组按下方从左到右顺序做12次实验											17				
						1	2	液氮		电桥		示波器		谐振		量子论		X光		牛顿环	
1	22301020140	程奕涵	24307130016	刘家祺	绪论课	数据课	201-207		213-219		225-231		226-232		214-220		202-208				
	24300776001	刘尼克	24307130059	顾启铭			液氮	扭摆	电桥	线圈	示波器	谐振	量子论	X光	牛顿环	分光计	计算机	单摆			
	24307110004	茹顿	24307130067	廖俊辉	绪论课	数据课	201-207		213-219		225-231		226-232		214-220		202-208				
	24307110073	李响	24307130075	杨奕成			扭摆	液氮	线圈	电桥	示波器	谐振	X光	量子论	分光计	牛顿环	计算机	单摆			
	24307110108	殷锴哈	24307130098	徐家乐	绪论课	数据课	201-207		213-219		225-231		226-232		214-220		202-208				
	24307110128	胡家骐	24307130112	谭环宇			扭摆	液氮	线圈	电桥	示波器	谐振	X光	量子论	分光计	牛顿环	计算机	单摆			
	24307110148	张天慈	24307130142	王川	绪论课	数据课	201-207		213-219		225-231		226-232		214-220		202-208				
	24307110149	高云舒	24307130170	赵笑然			扭摆	液氮	线圈	电桥	示波器	谐振	X光	量子论	分光计	牛顿环	计算机	单摆			
24307110151	沈博闻	24307130188	朱英姿	绪论课	数据课	201-207		213-219		225-231		226-232		214-220		202-208					
24307110178	崔玉媛	24307130207	刘欣雅			扭摆	液氮	线圈	电桥	示波器	谐振	X光	量子论	分光计	牛顿环	计算机	单摆				
2	24307110005	董澳			绪论课	数据课	213-219		225-231		226-232		214-220		202-208		201-207				
	24307110033	魏子航	24307130141	陈瑶			电桥	线圈	示波器	谐振	量子论	X光	牛顿环	分光计	计算机	单摆	液氮	扭摆			
	24307110056	葛朱欣	24307130158	姚昊辰	绪论课	数据课	213-219		225-231		226-232		214-220		202-208		201-207				
	24307110140	王涵绮	24307130168	张浩			电桥	线圈	示波器	谐振	量子论	X光	牛顿环	分光计	计算机	单摆	液氮	扭摆			
	24307110163	余忻莹	24307130182	米乐	绪论课	数据课	213-219		225-231		226-232		214-220		202-208		201-207				
	24307130018	周小涵	24307130204	展羽飞			线圈	电桥	示波器	谐振	X光	量子论	分光计	牛顿环	计算机	单摆	扭摆	液氮			
	24307130021	李继豪	24307130208	张若孜	绪论课	数据课	213-219		225-231		226-232		214-220		202-208		201-207				
	24307130106	李泓进	24307130217	罗宝倩			线圈	电桥	示波器	谐振	X光	量子论	分光计	牛顿环	计算机	单摆	扭摆	液氮			
24307130115	李墨	24307130231	刘昊辰	绪论课	数据课	213-219		225-231		226-232		214-220		202-208		201-207					
24307130132	何翔霖					线圈	电桥	示波器	谐振	X光	量子论	分光计	牛顿环	计算机	单摆	扭摆	液氮				
3	24300220018	虞乐	24307110119	文志元	绪论课	数据课	225-231		226-232		214-220		202-208		201-207		213-219				
	24300220020	林余嘉	24307110139	陆欣融			示波器	谐振	量子论	X光	牛顿环	分光计	计算机	单摆	液氮	扭摆	电桥	线圈			
	24300220023	刘致初	24307110164	彭一一	绪论课	数据课	225-231		226-232		214-220		202-208		201-207		213-219				
	24300220030	姜皓翔	24307130015	苏致远			示波器	谐振	量子论	X光	牛顿环	分光计	计算机	单摆	液氮	扭摆	电桥	线圈			
	24300220034	朱佳宁	24307130017	黄天马	绪论课	数据课	225-231		226-232		214-220		202-208		201-207		213-219				
	24300700014	卢冠中	24307130140	张春旭			示波器	谐振	X光	量子论	分光计	牛顿环	计算机	单摆	扭摆	液氮	线圈	电桥			
	24300700029	彭图尧	24307130145	李浩闻	绪论课	数据课	225-231		226-232		214-220		202-208		201-207		213-219				
	24300706002	郑健隆	24307130165	龚源			示波器	谐振	X光	量子论	分光计	牛顿环	计算机	单摆	扭摆	液氮	线圈	电桥			
24307110049	姜宇航	2430XH10021	徐励骋	绪论课	数据课	225-231		226-232		214-220		202-208		201-207		213-219					
24307110101	郭金梁					示波器	谐振	X光	量子论	分光计	牛顿环	计算机	单摆	扭摆	液氮	线圈	电桥				

期
终

通过学习通观看视频预习实验、预习思考题、打印实验报告纸并完成数据处理作业!

78

- <http://phylab.fudan.edu.cn>
- 物理实验课程 – “基础物理实验”
- 根据分组名单中的**分组表**确认自己所在组别和每周要做的实验项目，**不得自行换组**；

通过学习通观看视频预习实验、回答预习思考题、打印实验报告纸并完成数据处理作业!

79

课程章节

1 课程说明

- 1.1 课程基本信息与教学目标
- 1.2 学习平台
- 1.3 学习本课程所需基础知识及考核方式
- 1.4 日程安排
- 1.5 课程资料
- 1.6 答疑互动方式与时间
- 1.7 排课表通讯录分组表

2 绪论1

- 2.1 单元学习说明及绪论1课件
- 2.2 课程总览

基础物理实验-2025春季

主讲教师: 苏卫锋

课程评价: ★★★★★ 0.0 (0人评价)

编辑本页 设置

^ 第4章 模块1: 201-207室

^ 4.1 液氮比汽化热的测量 (请带计算器和电脑)

4.1.1 实验讲义及空白报告

✓
2 ✓ 4%

4.1.2 实验原理讲解

编辑 1 ✓ 4%

4.1.3 实验操作过程讲解

1 ✓ 4%

4.1.4 液氮质量随时间变化视频

1 ✓ 2%

4.1.5 预习思考题

1 ✓

4.1.6 数据处理示例

1 ✓ 4%

^ 4.2 扭摆法测量物体的转动惯量 (请带计算器和电脑)

4.2.1 实验讲义及空白报告

✓
2 ✓ 2%

4.2.2 实验原理讲解

1 ✓ 4%

4.2.3 实验操作讲解

2 ✓ 2%

4.2.4 预习思考题

1 ✓

数据处理作业

(数据处理作业电子版在课程网页上下载)

数据处理作业要求在下周上课前完成，写在A4大小的纸张上即可，下周带至实验室交给所在实验室教师或者助教，迟交扣分！

第三周到实验室做实验需要做的的准备：

- 1.带好数据处理作业
- 2.预习实验
- 3.通过实验室安全考试，并保留凭证

实验室安全教育

复旦大学资产与实验室安全管理处

<https://zcglc.fudan.edu.cn/>

登录“安全考试系统”板块

参加“物理学系教学实验安全考试（本科教学）”考试

考试名称：物理学系教学实验安全考试（本科教学）

开始时间：2020-05-06 / 15:07

结束时间：2031-01-01 / 00:00

考试通知：参加物理教学实验的所有本科生

进入考场

注意：满分100分，**90分**及以上的考试成绩视为**合格**，系统每天凌晨1:00将自动重置，成绩不合格可再次参加考试。

考试合格后请截图保存合格证书。

谢谢!