

智能传感与检测技术

过程参数检测部分

彭黎辉 电话: 62773623 中主701A
Email: lihuipeng@mail.tsinghua.edu.cn

智能传感与检测技术

□ 课程简介—主要内容

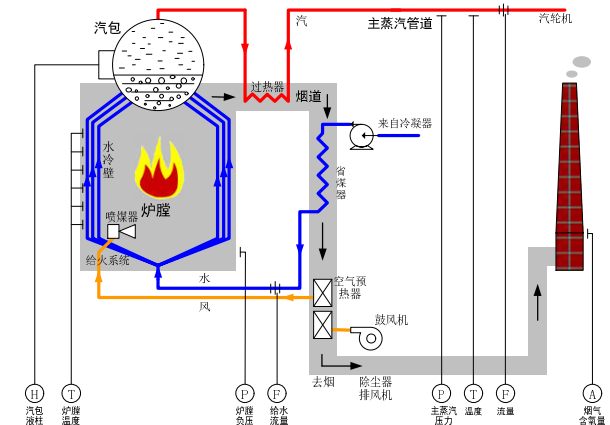
- ◆ 测量系统基础知识，传感和测量的输入输出特性、灵敏度、分辨率、精度等级，误差传递法则，测量不确定度评定和表达，检测原理和技术的多样性。
- ◆ 位移、距离、速度、加速度、角速度等运动参数传感及检测方法，配合运动控制课程，典型应用为机器人、自动驾驶等。
- ◆ 温度、压力、物位、流量等过程参数传感及检测方法，配合过程控制课程，典型应用为“芯片”流程工业过程参数检测、结合“双碳”目标的建筑能源智慧管理中的能耗仪表。
- ◆ 智能传感及检测，包括多传感器融合、软测量、感觉量测量、光谱测量、光学检测及成像仪器、计算机视觉检测技术等。

典型的过程参数检测系统 工业锅炉检测系统

在火力发电厂中，一台小型的20万千瓦机组，它的检测点约有500~600个，各种传感器、变送器、仪表、阀门有上千台。它的锅炉产汽量为670T/h，每小时耗煤66T，每天耗煤1584T，需要一列火车运输。如果按补水率3%计算，每天需补水482.4T。

典型的过程参数检测系统—

工业锅炉检测系统

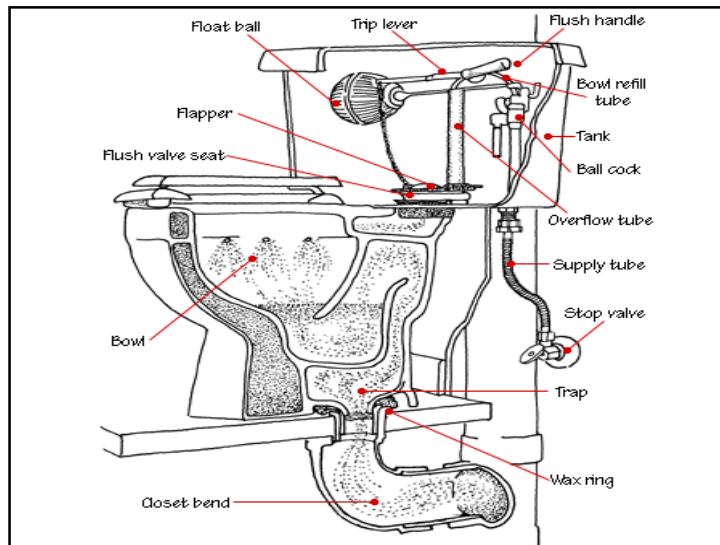
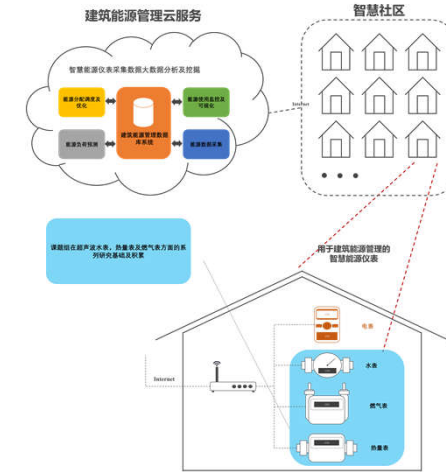


王俊杰教授 2004年《检测原理》课件

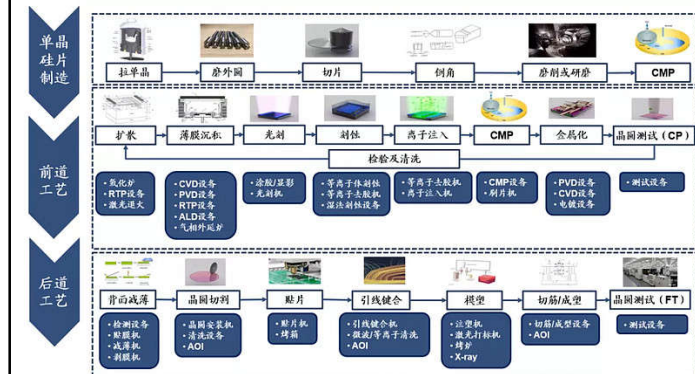
Smart Meter Based Intelligent Home Energy Management

- ◆ Buildings account for 40% of total energy used and contribute towards 30% of the total CO₂ emissions.
- ◆ Developed and developing countries are faced with the challenges of de-carbonization of their respective building stocks over the next 30–40 years.
- ◆ Gathering data on and evaluation of energy and environmental performance are at the heart of de-carbonization strategies to enhance energy efficiency and to reduce energy use in buildings.
- ◆ Smart metering and control, and environmental monitoring technologies have a significant role to play in data-driven energy efficiency measures.

Smart Meter Based Intelligent Home Energy Management



半导体生产过程



半导体生产过程

VLSI过程参数测量示例

	Process Metrics	Intermediate Variables	Input Settings
Etching (Plasma and RIE)	etch rate etch anisotropy etch uniformity etch selectivity	dc bias gas species concentration pressure temperature	rf power throttle position gas flow
PECVD	deposition rate film stress film uniformity film purity	dc bias gas species concentration pressure temperature	rf power throttle position gas flow
Photolithography Spin coat and Bake step	photoresist thickness photoactive concentration (PAC)		spinning speed baking temperature exposure dose
Exposure step Develop step	exposed PAC pattern line width		
CMP	removal rate uniformity		spinning speed pressure force

S. Limanond, J. Si and K. Tsakalis, "Monitoring and control of semiconductor manufacturing processes," in *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 18, no. 6, pp. 46-58, Dec. 1998, doi: 10.1109/37.736011.

多选题 1分

设置

后半学期主要讲授过程参数测量相关内容，其中
用时较多的两部分内容为：

A

温度测量

B

压力测量

C

物位测量

D

流量测量

提交

温度测量

□温度定义

❖对物体的冷热程度的衡量（宏观）、
是物体分子运动平均动能大小的标
致（微观）。（强度量）

□温标：温度标尺（定量）

❖起点、基本单位

❖三要素：定义固定点、内插公式、
内插仪器

温标

□经验温标：根据物体热胀冷缩现象制定

❖摄氏温标：
冰点0° C，水的沸点100 ° C，中间100等分

❖华氏温标：
冰点32° F，水的沸点212 ° F，中间180等分

□国际温标：

❖热力学温标：根据卡诺循环原理建立，实
际难以实现。

3

温标

□国际实用温标：是一种协议温标，1927年

❖ITS-90（90温标）：定义固定点（17个）、内插标准仪器、内插公式。

热力学温度符号： T (T_{90})

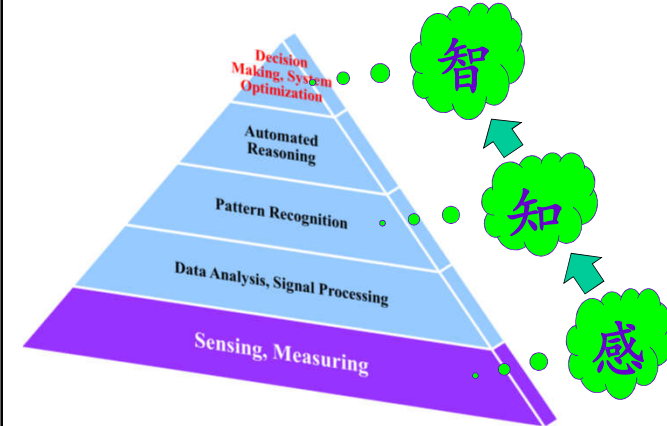
单位：开尔文，符号为K

1K=水的三相点温度的1/273.16

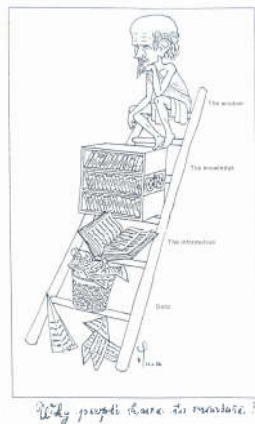
同时使用国际摄氏温度，符号为： t (t_{90})，单位：摄氏度， $^{\circ}\text{C}$

$$t = T - 273.15$$

智能传感与检测技术



智能传感与检测技术



Lord Kelvin is famously quoted as saying: "To measure is to know. If you cannot measure it, you cannot improve it. When you can measure what you are speaking about and express it in numbers, you know something about it."

温标

□思考题1：水的三相点温度是多少？

Answer: 0°C ? No!!!

Answer: 0.01°C Correct !!!

□三相点：固、液、气三相共存

Search in Google, if you have interests

多选题 1分

⚙ 设置

构成温标的三个基本要素是：

- ☐ A 定义固定点
- ☐ B 内插仪器
- ☐ C 内插公式
- ☐ D 温度单位

提交

多选题 1分

⚙ 设置

水的三相点温度是：

- ☐ A 0°C
- ☐ B 0.01°C
- ☐ C 273.15K
- ☐ D 273.16K

提交

测温方法

□接触式测温

❖传感器和被测温度载体直接接触，达到热平衡后具有相同温度

传导换热、对流换热

□非接触式测温

❖传感器不需和被测温度载体接触
辐射换热

接触式测温

□膨胀式：利用温度引起的物理尺寸变化，测温范围为 $-100^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ 左右

❖双金属温度计

❖水银、酒精温度计等

□热电式（！！重点讲授）：热电效应，测温范围为 $-200^{\circ}\text{C} \sim 1800^{\circ}\text{C}$

❖根据制作材料不同有多种型号：K，T，J等等

接触式测温

□电阻式：利用电阻传感器阻值随温度变化而变化，测温范围为 $-200^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ 左右

❖热电阻（！！重点讲授）

❖热敏电阻（！重点讲授）

□集成半导体温度传感器：利用半导体器件温度效应，测温范围为 $-50^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ （！重点讲授）

□光纤：利用光纤温度特性，介于接触式和非接触式之间

非接触式测温

□辐射式（！！重点讲授）：利用普朗克定律（黑体辐射），测温范围为 $400^{\circ}\text{C} \sim 3200^{\circ}\text{C}$ 左右

❖光电高温计

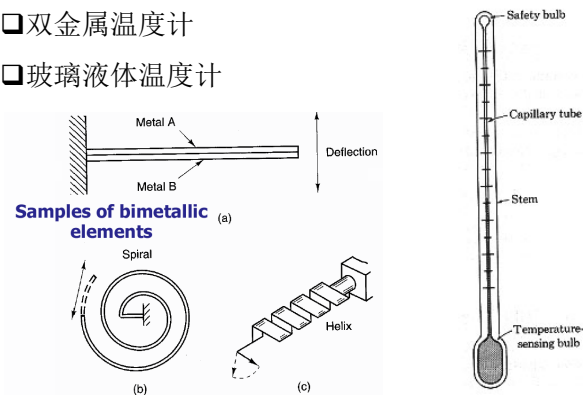
❖比色温度计

❖辐射温度计

膨胀式温度计

□双金属温度计

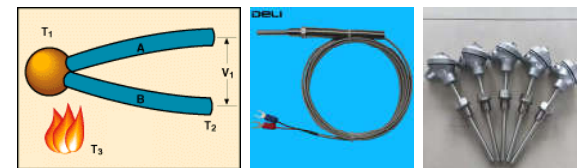
□玻璃液体温度计



热电偶 (thermocouple)

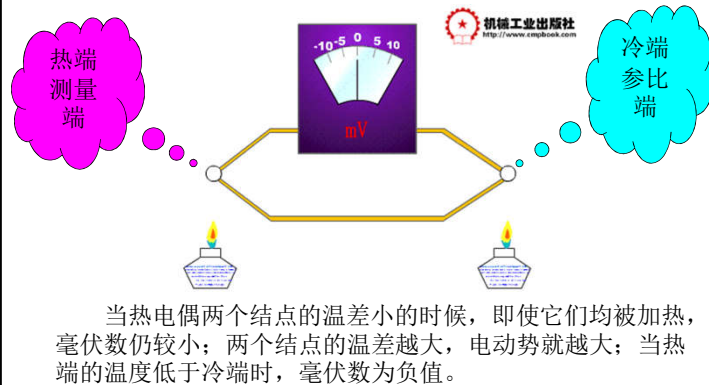
□测温原理：热电效应（Seebeck效应）

两种不同导体连接成闭合回路时，若两个结点温度不同，则回路中将产生热电势。



结构简单、廉价、测温范围宽、性能稳定、输出为电信号（易于处理和远传）、有足够精度。

热电效应



热电效应

□ 热电效应（Seebeck效应）：

❖ 接触电势：Peltier效应

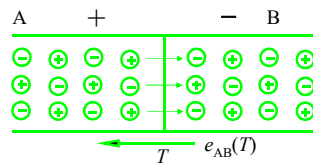
不同导体接触时因电子密度不同发生扩散进而形成的电势差，与接触点温度和材料有关

❖ 温差电势：Thomson效应

同一导体因两端温度不同而产生的电势差，与温差、导体材料有关

❖ 热电效应的数学描述

接触电势



接触电势原理图

$$e_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_{AT}}{N_{BT}}$$

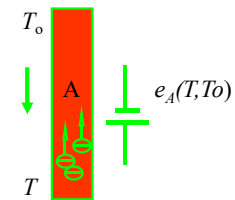
$e_{AB}(T)$ ——导体A、B结点在温度 T 时形成的接触电动势；

e ——单位电荷， $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ；

k ——波尔兹曼常数， $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ；

N_{AT} 、 N_{BT} ——导体A、B在温度为 T 时的电子密度。

温差电势



$$e_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT$$

$e_A(T, T_0)$ ——导体A两端温度为 T 、 T_0 时形成的温差电动势；

T 、 T_0 ——高低端的绝对温度；

σ_A ——汤姆逊系数，表示导体A两端的温度差为 1°C 时所产生的温差电动势，例如在 0°C 时，铜的 $\sigma = 2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

多选题 1分

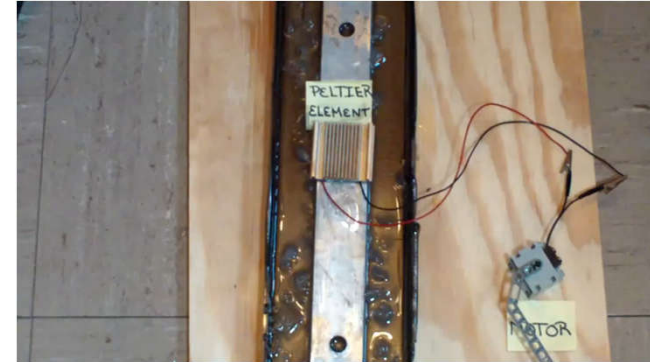
设置

关于热电效应，正确的说法有：

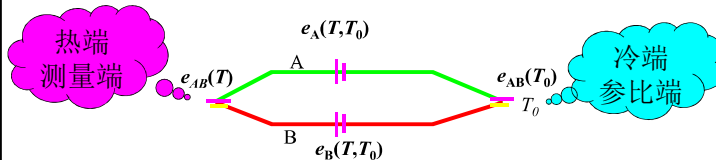
- ☐ A 热电效应又称为塞贝克（Seebeck）效应；
- ☐ B 热电效应由帕尔贴效应和汤普森效应构成；
- ☐ C 热电势包含接触电势及温差电势两部分；
- ☐ D 帕尔贴效应对应的热电势为接触电势；
- ☐ E 汤普森效应对应的热电势为温差电势；

提交

热电效应



热电效应的数学描述



$$E_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) - e_A(T, T_0) + e_B(T, T_0)$$

$$= \frac{kT}{e} \ln \frac{N_{AT}}{N_{BT}} - \frac{kT_0}{e} \ln \frac{N_{AT_0}}{N_{BT_0}} + \int_{T_0}^T (-\sigma_A + \sigma_B) dT$$

N_{AT} 、 N_{AT_0} ——导体A在结点温度为T和 T_0 时的电子密度；
 N_{BT} 、 N_{BT_0} ——导体B在结点温度为T和 T_0 时的电子密度；
 σ_A 、 σ_B ——导体A和B的汤姆逊系数。

热电效应的数学描述

热电势中接触电势占主导作用

$$E_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) - e_A(T, T_0) + e_B(T, T_0)$$

$$= \frac{kT}{e} \ln \frac{N_{AT}}{N_{BT}} - \frac{kT_0}{e} \ln \frac{N_{AT_0}}{N_{BT_0}} + \int_{T_0}^T (-\sigma_A + \sigma_B) dT$$

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0) = f(T) - C = g(T)$$

热电偶的热电势，取决于两端温度。导体材料确定后，热电势的大小只与热电偶两端的温度有关。如果使 $E_{AB}(T_0)$ =常数，则回路热电势 $E_{AB}(T, T_0)$ 就只与温度T有关，而且是T的单值函数，这就是利用热电偶测温的原理。在工程应用中，常用实验的方法得出参比端为0 °C时热端温度与热电势的关系并做成表格，称为分度表。

多选题 1分

设置

关于热电偶，下列说法正确的有：

- ☐ A 同种导体材料不可以构成热电偶；
- ☐ B 同种导体材料可以构成热电偶；
- ☐ C 热电偶两端结点温度相同，则热电偶回路中没有电动势；
- ☐ D 热电偶热端温度低于冷端温度时，热电偶回路中热电势为负值；

提交

热电效应—思考题2

- ☐ 同种导体材料能否构成热电偶？
- ☐ 热电偶两端接点温度相同，热电偶回路中是否有热电势？
- ☐ 热电势大小和电极材料、冷热端温度有关，和电极粗细、长短是否有关？为什么？

只有用不同性质的导体(或半导体)才能组合成热电偶；相同材料不会产生热电势，因为当A、B两种导体是同一种材料时， $\ln(N_A/N_B)=0$ ，即 $E_{AB}(T, T_0)=0$ 。

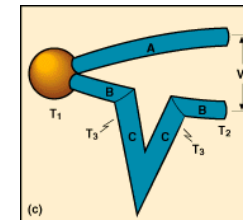
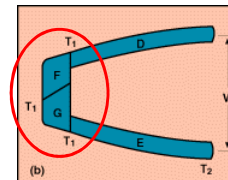
热电偶实用定律—— 均质导体定则

- ☐ 由一种均质导体组成的闭合回路，不论导体截面、长度及温度分布如何，回路中无热电势产生。

热电势产生条件：两种不同金属组成，且两个接点处温度不同

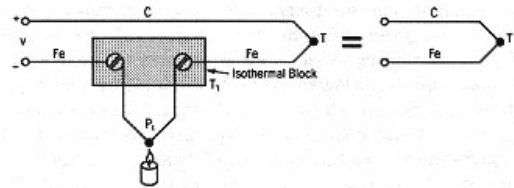
热电偶实用定律 — 中间导体定则

- ☐ 在热电偶回路中接入中间导体后，只要中间导体两端温度相同，对热电偶回路总热电势没有影响。



热电偶实用定律—— 中间导体定则

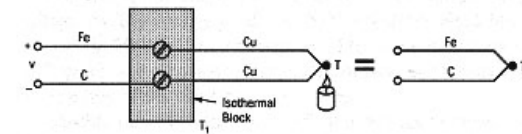
- 在热电偶回路中接入中间导体后，只要中间导体两端温度相同，对热电偶回路总热电势没有影响。



热电偶实用定律—— 中间导体定则

- 在热电偶回路中接入中间导体后，只要中间导体两端温度相同，对热电偶回路总热电势没有影响。

The Law of Intermediate Metals

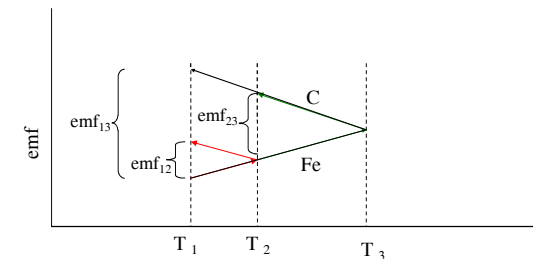


热电偶实用定律—— 中间温度定则

- 热电偶AB在两接点温度为 T_1 、 T_2 时产生的热电势为 $E_{AB}(T_1, T_2)$ ，在两接点温度为 T_2 、 T_3 时产生的热电势为 $E_{AB}(T_2, T_3)$ ，则在两接点温度为 T_1 、 T_3 时产生的热电势为 $E_{AB}(T_1, T_3)$ 满足：

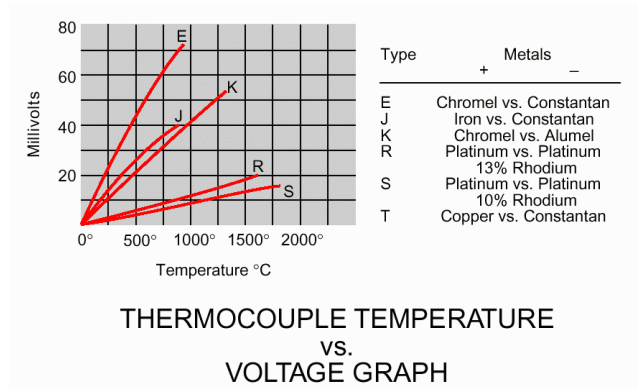
$$E_{AB}(T_1, T_3) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_3)$$

热电偶实用定律—— 中间温度定则



只需列出热电偶在参比端为 0°C 的分度表，即可得知参比端在其他温度时的分度表。

常用热电偶特性



热电偶数据处理——查表（修正）

铁-铜镍(康铜)热电偶(J型)分度表 (ITS-90)

分度号 E		参考端温度 0℃									
t, °C	-200	-100	-0	+0	100	200	300	400	500	600	700
E,mV	-7.890	-4.633	0.000	0.000	5.269	10.779	16.327	21.848	27.393	33.102	39.132
t, °C	800	900	1000	1100	1200						
E,mV	45.494	51.877	57.953	63.792	69.553						

J型热电偶参考端温度非0℃时的校正表 (修正值加上所查的热电势)

t, °C	0	10	20	30	40	50
E,mV	0.000	0.507	1.019	1.537	2.059	2.585

热电偶数据处理——多项式插值

TYPE E	TYPE J	TYPE K	TYPE R	TYPE S	TYPE T
Nickel-10% Chromium(+) Versus Constantan(-)	Iron(+) Versus Constantan(-)	Nickel-10% Chromium(+) Versus Nickel-5%(-) (Aluminum Silicon)	Platinum-13% Rhodium(+) Versus Platinum(-)	Platinum-10% Rhodium(+) Versus Platinum(-)	Copper(+) Versus Constantan(-)
-100 °C to 1000 °C ± 0.5 °C 9th order	0 °C to 760 °C ± 0.1 °C 5th order	0 °C to 1370 °C ± 0.7 °C 8th order	0 °C to 1000 °C ± 0.5 °C 8th order	0 °C to 1750 °C ± 1 °C 9th order	-160 °C to 400 °C ±0.5 °C 7th order
a ₀	0.104967248	-0.048868252	0.226584602	0.263632917	0.927763167
a ₁	17189.45282	19873.14503	24152.10900	179075.491	169526.5150
a ₂	-282639.0850	-218614.5353	67233.4248	-48840341.37	-31568363.94
a ₃	12695339.5	11569199.78	2210340.682	1.90002E + 10	8990730663
a ₄	-448703084.6	-264917531.4	-860963914.9	-4.82704E + 12	-1.63565E + 12
a ₅	1.10866E + 10	2018441314	4.83506E + 10	7.62091E + 14	1.88027E + 14
a ₆	-1.76807E + 11		-1.18452E + 12	-7.20026E + 16	-1.37241E + 16
a ₇	1.71842E + 12		1.38890E + 13	3.71496E + 18	6.17501E + 17
a ₈	-9.19278E + 12		-6.33708E + 13	-8.03104E + 19	-1.56105E + 19
a ₉	2.06132E + 13			1.69535E + 20	

TEMPERATURE CONVERSION EQUATION: $T = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_9x^9$
NESTED POLYNOMIAL FORM: $T = a_0 + x(a_1 + x(a_2 + x(a_3 + x(a_4 + x(a_5 + x(a_6 + x(a_7 + x(a_8 + a_9x)))))))$ (5th order)
where x is in Volts, T is in °C

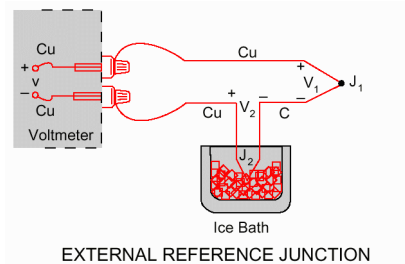
热电偶参比端温度处理

□实际测温过程中，热电偶参比端（冷端）温度一般不为0 °C，且温度不易保持恒定，因此需要进行参比端温度处理。

- ❖参比端恒温法
- ❖参比端温度测量计算法
- ❖补偿导线
- ❖补偿电桥法

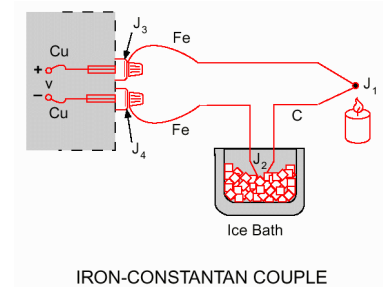
热电偶参比端温度处理—— 参比端恒温法（冰点槽）

□将参比端置于能保持恒温的冰点槽中，使参比端温度为 0°C ，热电偶输出热电势可以直接查对应的分度表反求温度。



热电偶参比端温度处理—— 参比端恒温法（冰点槽）

□思考题3：右边图示的冰点槽参比端温度补偿接线方法在实际使用中是否有问题？

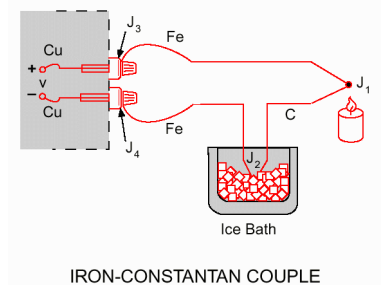


投票 最多可选1项

设置

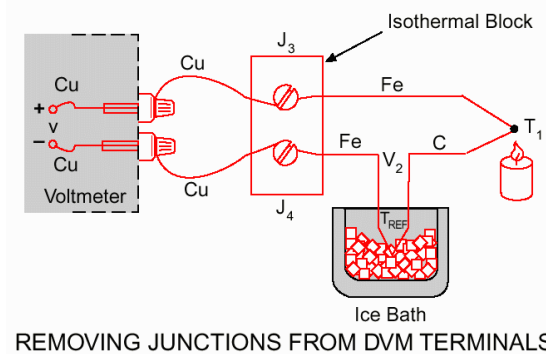
图示的冰点槽参比端温度补偿接线方法在实际使用中是否有问题？

- (A) 有问题
- (B) 没有问题

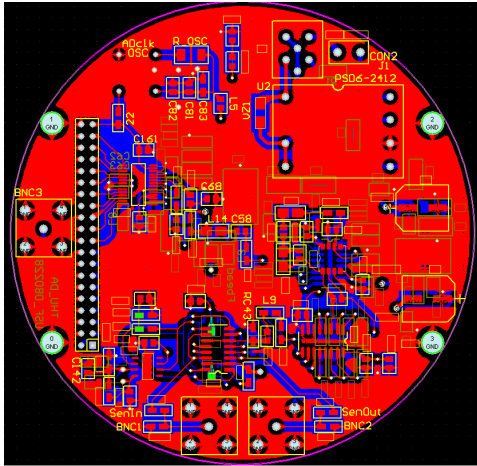


提交

热电偶参比端温度处理—— 参比端恒温法（冰点槽）



用于精密测量的PCB电路板电阻的布置



根据电路板上温度场梯度方向决定电阻两个焊盘取向!

热电偶参比端温度处理—— 参比端温度测量算法

□当参比端温度为 T_0 （通常为环境温度）时，测量 T_0 后可以根据中间温度定则来计算热电势

$$E(T, 0) = E(T, T_0) + E(T_0, 0)$$

热电偶输出热电势

测量 T_0 后查表求得

热电偶参比端温度处理—— 参比端温度测量算法

□采用补偿导线将参比端移动到满足 T_0 （通常为环境温度）处，测量 T_0 后可以根据中间温度定则来计算热电势

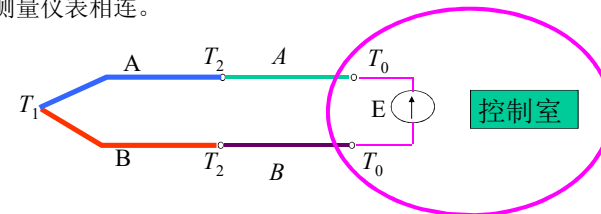
$$E(T, 0) = E(T, T_0) + E(T_0, 0)$$

热电偶输出热电势

测量 T_0 后查表求得

热电偶参比端温度处理—— 补偿导线

当参比端距离测量端太近时，参比端温度易受测量端温度影响，因此通常需要将参比端移到温度相对稳定的控制室中，与热电势测量仪表相连。



$$E_{AB}(T_1, T_0) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_0)$$

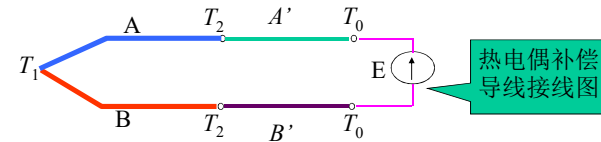
热电偶参比端温度处理—— 补偿导线

由于热电偶的材料一般都比较贵重（特别是采用贵金属时），而测温点到仪表的距离都很远，为了节省热电偶材料，降低成本，通常采用补偿导线把热电偶的冷端（自由端）延伸到温度比较稳定的控制室内，连接到仪表端子上。

补偿导线是一对与热电偶配合使用的导线，在工作温度范围内其热电势与被补偿热电偶相同。

热电偶参比端温度处理—— 补偿导线

当在原来热电偶回路中分别引入A'、B'（补偿导线），把热电偶的冷端（自由端）延伸到温度比较稳定的控制室内，连接到仪表端子上



$$E_{ABB'A'}(T_1, T_0) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{A'B'}(T_2, T_0)$$

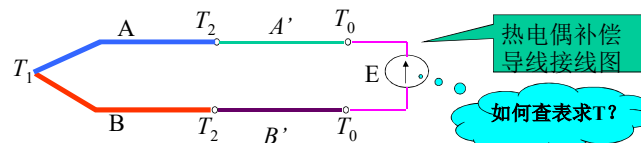
热电偶参比端温度处理—— 补偿导线

如果补偿导线A'、B'构成的热电偶与原材料A、B构成的热电偶具有相同的热电特性，即 $E_{AB}(T_2, T_0) = E_{A'B'}(T_2, T_0)$ ，则回路总电动势为

$$E_{ABB'A'}(T_1, T_0) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{A'B'}(T_2, T_0)$$

$$E_{ABB'A'}(T_1, T_0) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_0) = E_{AB}(T_1, T_0)$$

只要 T_1 、 T_0 不变，接入A'B'后不管接点温度 T_2 如何变化，都不影响总热电势。这便是引入补偿导线原理。



多选题 1分

设置

关于补偿导线，下列说法正确的有：

- ☐ A 补偿导线热电偶补偿导线的作用只起延伸热电极，它本身并不能消除冷端温度变化对测温的影响；
- ☐ B 配合热电偶使用的补偿导线具有正负极，接线时应注意与热电偶正负极匹配；
- ☐ C 使用补偿导线后，热电偶测温冷端补偿应根据冷端温度是否为0℃采用不同的处理方式；

提交

热电偶参比端温度处理—— 补偿导线

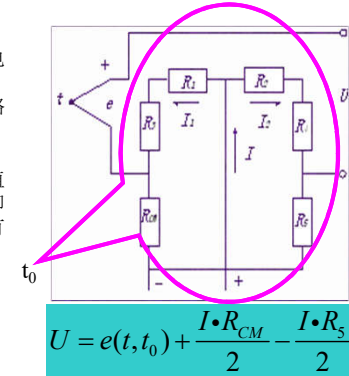
热电偶补偿导线的作用只起延伸热电极，使热电偶的冷端移动到控制室的仪表端子上，它本身并不能消除冷端温度变化对测温的影响，不起补偿作用。因此，还需采用其他修正方法来补偿冷端温度不为0℃时对测温的影响。

在使用热电偶补偿导线时必须注意型号相配，极性不能接错。（思考题4：为什么？）

热电偶参比端温度处理—— 补偿电桥法

□ $R_1 \sim R_5$ 及 R_{CM} 均为桥臂电阻。 R_{CM} 是用漆包铜丝绕制成的，它和热电偶的冷端感受同一温度。 $R_1 \sim R_5$ 均用锰铜丝绕成，阻值稳定。在桥路设计时，使 $R_1 = R_2$ ，并且 R_1 、 R_5 的阻值要比桥路中其他电阻大得多。这样，即使电桥中其他电阻的阻值发生变化，左右两桥臂中的电流却差不多保持不变，从而认为其具有恒流特性。线路设计使得 $I_1 = I_2 = I/2 = 0.5\text{mA}$ 。

回路输出电压 U 为热电偶的热电势 e 、桥臂电阻 R_{CM} 的压降 U_{RCM} 及另一桥臂电阻 R_5 的压降 U_{R5} 三者的代数和



$$U = e(t, t_0) + \frac{I \cdot R_{CM}}{2} - \frac{I \cdot R_5}{2}$$

热电偶参比端温度处理—— 补偿电桥法

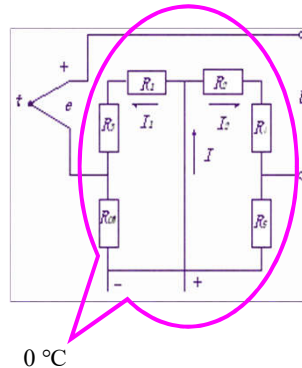
□ t_0 为0℃（冷端为0℃）时

使得电桥平衡，即 $R_{CM} = R_5$

$$U = e(t, t_0) + \frac{I \cdot R_{CM} - I \cdot R_5}{2}$$

$$U = e(t, 0) + \frac{I(R_{CM} - R_5)}{2} = e(t, 0)$$

直接查分度表



热电偶参比端温度处理—— 补偿电桥法

□ t_0 不为0℃时

$$R_{CM}(t_0) = R_{CM}(1 + \alpha \cdot t_0)$$

$$U = e(t, t_0) + 0.5[I \cdot R_{CM}(t_0) - I \cdot R_5]$$

$$U = e(t, t_0) + 0.5I \cdot R_{CM} \cdot \alpha \cdot t_0$$

if $0.5I \cdot R_{CM} \cdot \alpha \cdot t_0 = e(t_0, 0)$

$$U = e(t, t_0) + 0.5I \cdot R_{CM} \cdot \alpha \cdot t_0 = e(t, t_0) + e(t_0, 0) = e(t, 0)$$

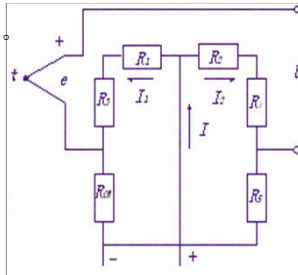
直接查分度表



热电偶参比端温度处理——补偿电桥法

□当热电偶的热端温度一定，冷端温度升高时，热电动势将会减小。与此同时，铜电阻 R_{CM} 的阻值将增大，从而使 U_{RCM} 增大，由此达到了补偿的目的。

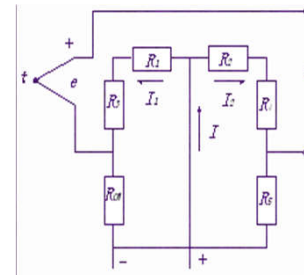
Δe 为热电偶冷端温度变化引起的热电动势的变化，它随所用的热电偶材料不同而异； I_1 为流过 R_{CM} 的电流，即0.5mA； α 为铜电阻 R_{CM} 的温度系数，一般取 $0.0039\ 1/^\circ\text{C}$ ； Δt 为热电偶冷端温度的变化范围。



$$\Delta e = 0.5 I \cdot R_{CM} \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

热电偶参比端温度处理——补偿电桥法

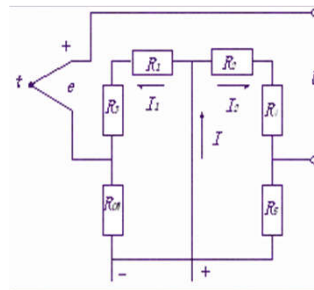
□思考题5：假设热电偶的冷端温度变化范围为 $0\sim+50^\circ\text{C}$ ，材料采用铂铑₁₀-铂，结合后续所学电阻测温相关内容，计算为达到自动补偿目的，电阻 R_{CM} 在 0°C 时的阻值。



热电偶参比端温度处理——补偿电桥法

□思考题5：用补偿电桥实现热电偶冷端温度自动补偿，能否完全消除冷端温度变化的影响？

提示：热电偶（非线性）、热电阻（线性）两点补偿（ 0°C 和 20°C ）



填空题 3分

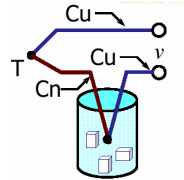
设置

使用热电偶测温，针对不同的冷端补偿方法，需要查热电偶分度表的次数也不同。若采用冰点槽法，则需要查分度表 [填空1]次；若采用参比端温度测量计算法，则需要查分度表 [填空2]次；若采用补偿电桥法，则需要查分度表 [填空3]次。

正常使用填空题需3.0以上版本雨课堂

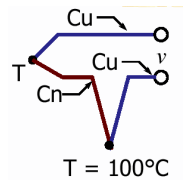
作答

热电势计算实例



已知所用热电偶为T型，其输出电压为7.56mV，冷端处于冰点槽中，求被测温度？

$$T = \frac{7.56 - 4.279}{9.288 - 4.279} \times (200 - 100) + 100 \approx 165.5^\circ\text{C}$$



思考题6：已知所用热电偶为T型，其输出电压为-7.658mV，冷端温度为100° C，求被测温度？ (-100 ° C)

单选题 1分

设置

Temperature (°C)	voltage (mV)
0.0	0.000
10.0	0.507
20.0	1.019
30.0	1.537
40.0	2.059
50.0	2.585
60.0	3.116
70.0	3.650
80.0	4.187
90.0	4.726
100.0	5.269

用J型热电偶测温，冷端处于室温20 °C，热电偶输出电压为4.25mV，求被测温度？

$$T = \frac{4.25 - 4.187}{4.726 - 4.187} \times (90 - 80) + 80 + T_0 \\ = 81.17^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C} = 101.17^\circ\text{C}$$

上述计算方法是否正确？

☐ 正确

☐ 不正确

提交

热电势计算实例

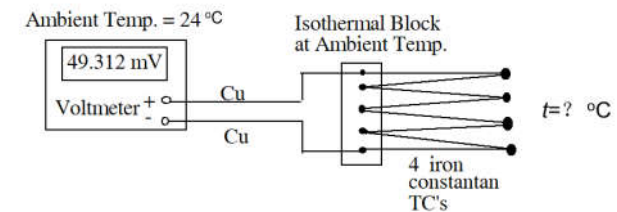
Temperature (°C)	voltage (mV)
0.0	0.000
10.0	0.507
20.0	1.019
30.0	1.537
40.0	2.059
50.0	2.585
60.0	3.116
70.0	3.650
80.0	4.187
90.0	4.726
100.0	5.269

用J型热电偶测温，冷端处于室温20 °C，热电偶输出电压为4.25mV，求被测温度？

$$T = \frac{4.25 - 4.187}{4.726 - 4.187} \times (90 - 80) + 80 + T_0 \\ = 81.17^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C} = 101.17^\circ\text{C}$$

$$E(T, 0) = 4.25 + 1.019 = 5.269(\text{mV}) \\ T = 100^\circ\text{C}$$

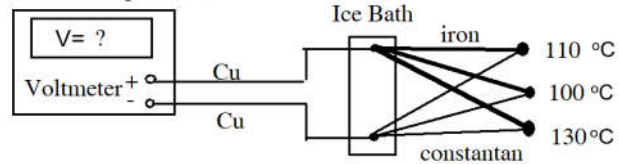
特殊热电偶连接——热电堆（串联式）



思考题7：采用图示热电堆测量温度有何优点？计算被测温度是多少？（环境温度为24 °C）

特殊热电偶连接—— 并联式

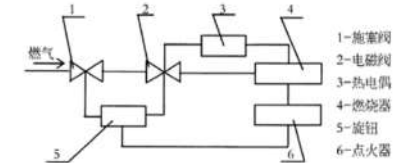
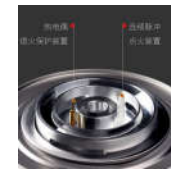
Ambient Temp. = 24 °C



思考题8：问图中万用表指示电压为多少？（环境温度24 °C）

热电偶应用实例

燃气灶熄火保护装置的工作原理：使用时，首先按下旋钮5（这一按钮与旋塞阀杆和点火器开关连在一起），此时随旋塞阀1的阀杆下移，推动阀芯针在机械装置的作用下打开电磁阀2，在逆时针旋转90度时，旋塞的主气孔与阀体的进气管路接通，通气气路通过电磁阀2和旋塞阀1向燃烧器4供气，同时，点火器6电路被接通，产生高压放电，点燃燃烧器4，热电偶3被火焰加热，产生的热电势使电磁阀保持开启，点火结束。燃气灶进入工作状态后，手离开旋钮，使阀杆在弹簧的作用下复位，点火器电中悉开，高压放电停止。当发生意外熄火时，热电偶逐渐冷却，热电势消失后，电磁阀自动关闭。



热电阻 (RTD)

□测温原理：金属导体电阻阻值随温度变化而变化。



稳定性高、互换性好、准确度高、高灵敏度、无需参比温度。



热电阻 (RTD)

□测温原理：金属导体电阻阻值随温度变化而变化。

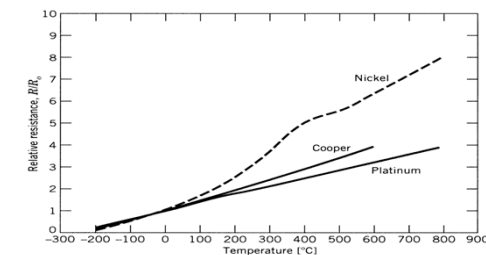


Figure 8.5 Relative resistance of several pure metals (R_0 at 0 °C).

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2 + \dots)$$

热电阻 (RTD)

□测温原理：金属导体电阻阻值随温度变化而变化。

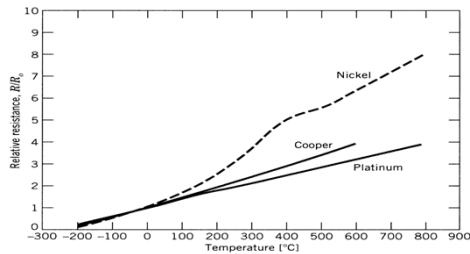
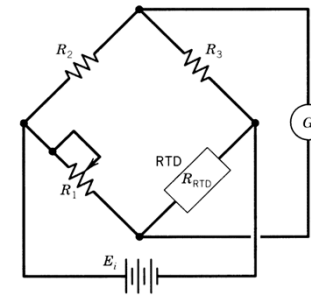


Figure 8.5 Relative resistance of several pure metals (R_0 at 0°C).

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad \text{线性近似 (如铂电阻)}$$

热电阻测温—如何测量热电阻？

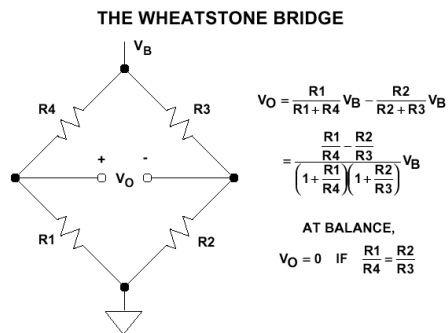


$$R_{RTD} = R_1 \frac{R_3}{R_2}$$

平衡电桥

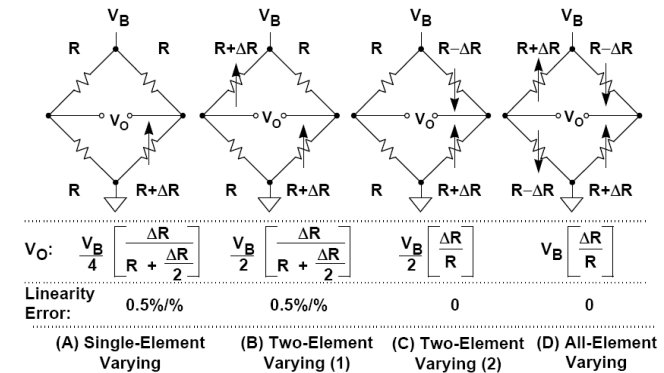
热电阻测温—如何测量热电阻？

不平衡电桥



热电阻测温—如何测量热电阻？

不平衡电桥

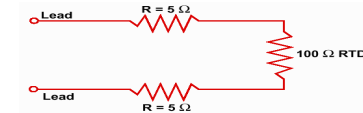


热电阻测温—缺点及实际问题

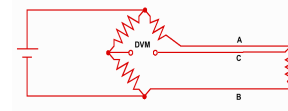
- 引线电阻的影响：引线也有阻值，且随环境温度变化，影响可达10%甚至50%
- 响应速度慢；
- 自热问题：热电阻测量需外加电源，电流流过热电阻使其发热从而改变阻值。

热电阻测温—接线方式

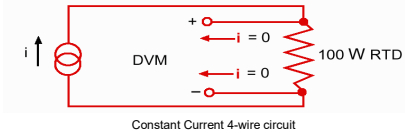
- 2线制：受引线电阻影响严重。



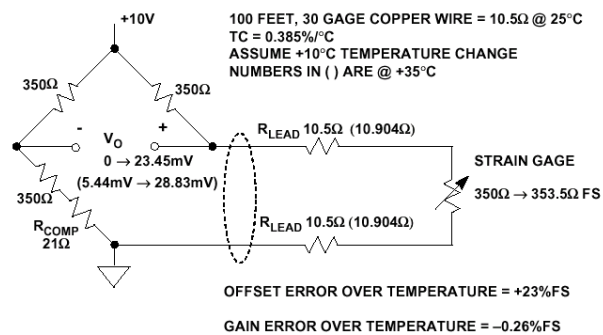
- 3线制：基本可以消除引线电阻影响。



- 4线制：可以完全消除引线电阻影响。



热电阻测温—2线制接线方式分析



热电阻测温—2线制接线方式分析

$$R_1 = 371\Omega, R_3 = R_4 = 350\Omega, R_{\text{lead}} = r = 10.5\Omega, V_B = 10V$$

$$R_2 : \text{varying from } 350\Omega \text{ to } 353.5\Omega, \text{ full scale } 1\%$$

Temperature at 25°C:

$$\text{Offset: } V_o = V_B \cdot \left(\frac{R_2 + 2r}{R_2 + 2r + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_4} \right)_{R_2=350} = 0$$

$$\text{FS: } V_o = V_B \cdot \left(\frac{R_2 + 2r}{R_2 + 2r + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_4} \right)_{R_2=353.5} = 23.45\text{mV}$$

热电阻测温—2线制 接线方式分析

Temperature at 35°C: $\Delta r = 10.5 \times 0.385\% \times 10 = 0.404\Omega$

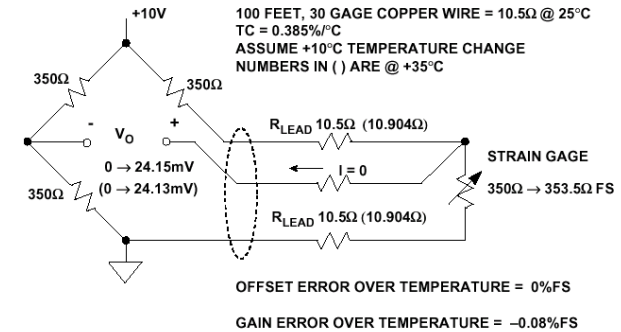
$$\text{Offset: } V_o = V_B \cdot \left(\frac{R_2 + 2(r + \Delta r)}{R_2 + 2(r + \Delta r) + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_4} \right)_{R_2=350} = 5.44\text{mV}$$

$$\text{FS: } V_o = V_B \cdot \left(\frac{R_2 + 2(r + \Delta r)}{R_2 + 2(r + \Delta r) + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_4} \right)_{R_2=353.5} = 28.83\text{mV}$$

$$\text{Offset error: } 23\% \text{ full scale } \left(\frac{5.44}{23.45} \right)$$

$$\text{Gain error: } -0.26\% \text{ full scale } \left(\frac{28.83 - 5.44 - 23.45}{23.45} \right)$$

热电阻测温—3线制 接线方式分析



热电阻测温—3线制 接线方式分析

- 思考题9: 定量分析采用前图所示3线制接法后电桥的输出范围。

热敏电阻 (Thermistor)

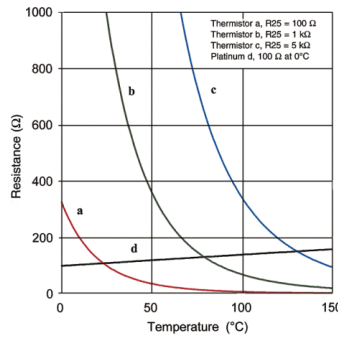
- 测温原理: 由金属氧化物或半导体材料制成, 其电阻值随温度变化而变化。



廉价、高灵敏度、阻值高 ($\text{k}\Omega$ to $100 \text{ k}\Omega$, 可忽略引线电阻带来的影响)、响应速度快 (小物理尺寸)、与温度呈非线性关系。

热敏电阻与热电阻比较

Comparative Resistance Graph
Thermistor vs. RTD



□ 温度系数

热电阻：正

热敏电阻：负

□ 线性度

铂热电阻：线性

热敏电阻：强非线性

热敏电阻 (Thermistor)

□ 测温原理：由金属氧化物或半导体材料制成，其电阻值随温度变化而变化。



$$R = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

R_0 = 参考温度 T_0 时的阻值

T = 被测温度

β = 常数 (与热敏电阻材料有关)

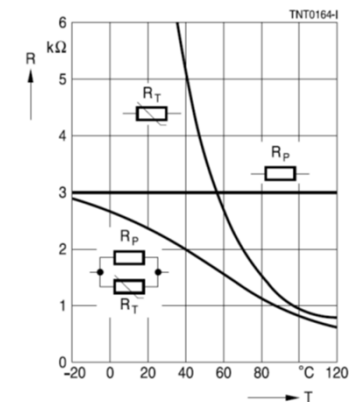
T_0 一般为 $(25+273) \text{ K}$, $t_0 = 25^\circ\text{C}$

热敏电阻 (Thermistor)

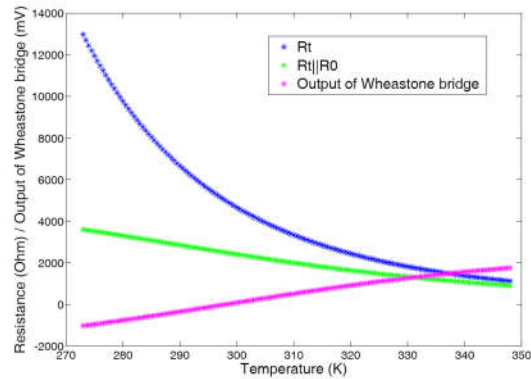
□ 思考题10：某热敏电阻在 $t_0 = 0^\circ\text{C}$ 时阻值为 $R_0 = 100 \Omega$ ，在 $t = 45^\circ\text{C}$ 时阻值为 $R = 20 \Omega$ ，现用 100mA 恒流源为该热敏电阻供电，测得热敏电阻两端电压为 0.85V ，求被测温度。

□ (Answer: 76°C)

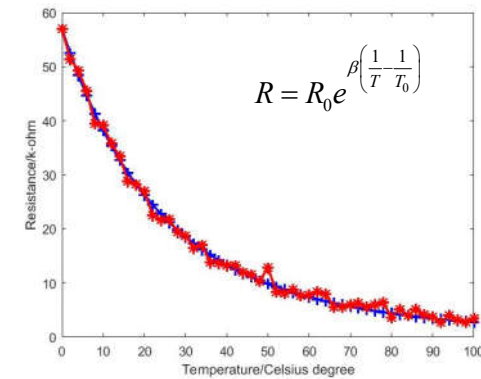
热敏电阻 (Thermistor)



热敏电阻 (Thermistor)



Regression: Perspective from Machine Learning



$$R@25^{\circ}\text{C} = 22\text{k}\Omega, \beta = 3100, \sigma_R = 0.5\text{k}\Omega$$

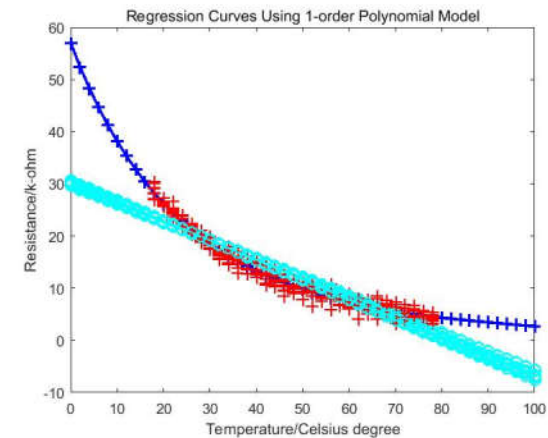
Regression: Perspective from Machine Learning

$$\begin{cases} R_1 = w_0 + w_1 t_1 + w_2 t_1^2 + \dots + w_n t_1^n + e_1 \\ R_2 = w_0 + w_1 t_2 + w_2 t_2^2 + \dots + w_n t_2^n + e_2 \\ \vdots \\ R_M = w_0 + w_1 t_M + w_2 t_M^2 + \dots + w_n t_M^n + e_M \end{cases}$$

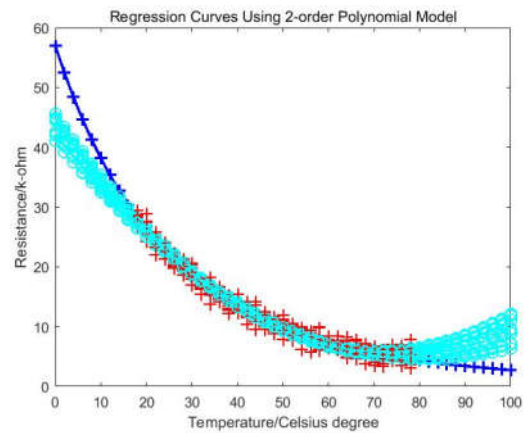
$$\mathbf{R} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{W} + \mathbf{e} \quad L = \|\mathbf{R} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{W}\|_2^2$$

$$\min_{\mathbf{W}} \|\mathbf{R} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{W}\|_2^2 \quad \hat{\mathbf{W}} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{R}$$

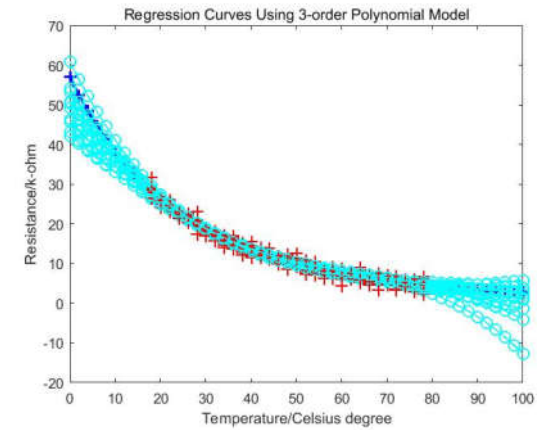
Regression: Perspective from Machine Learning



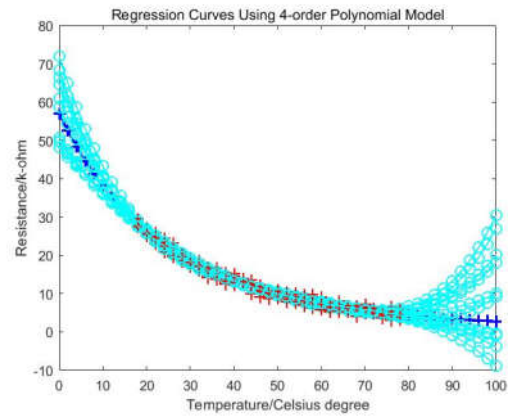
Regression: Perspective from Machine Learning



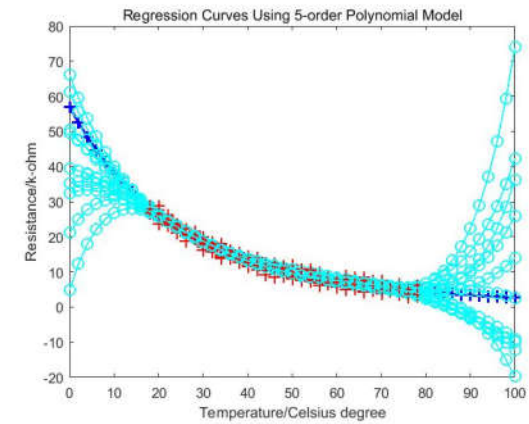
Regression: Perspective from Machine Learning



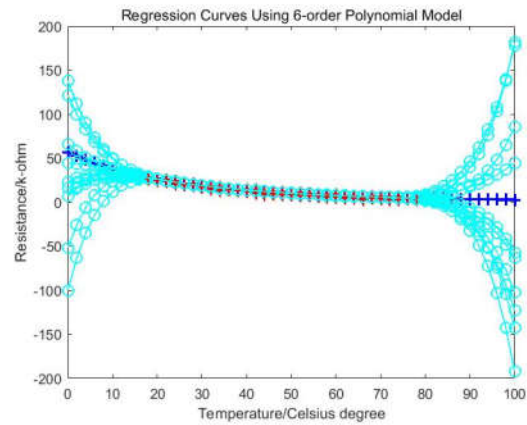
Regression: Perspective from Machine Learning



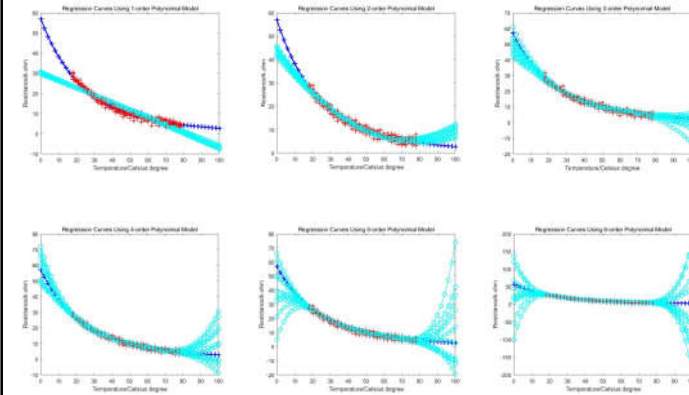
Regression: Perspective from Machine Learning



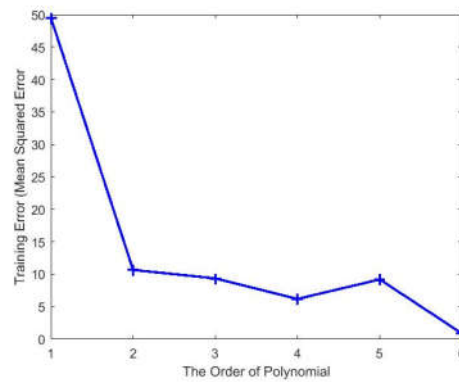
Regression: Perspective from Machine Learning



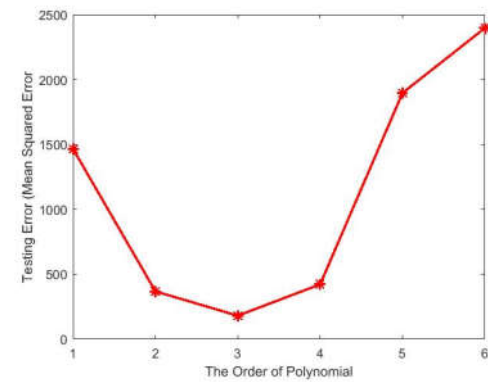
Regression: Perspective from Machine Learning



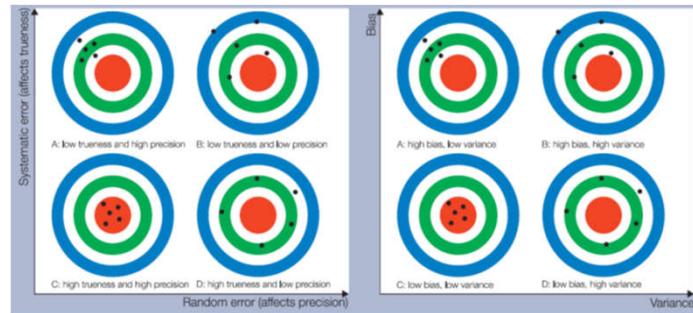
Regression: Perspective from Machine Learning



Regression: Perspective from Machine Learning

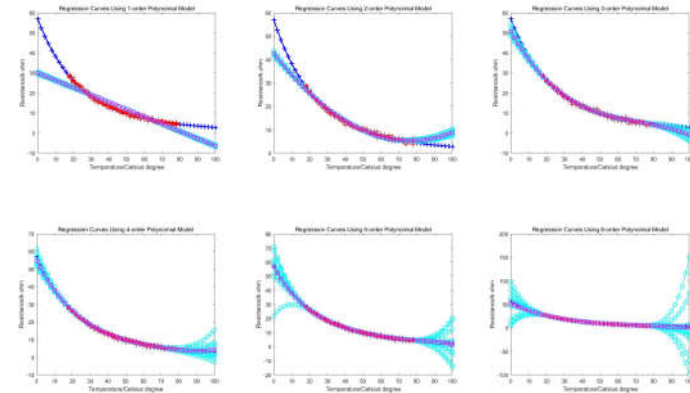


Machine Learning in Measurement

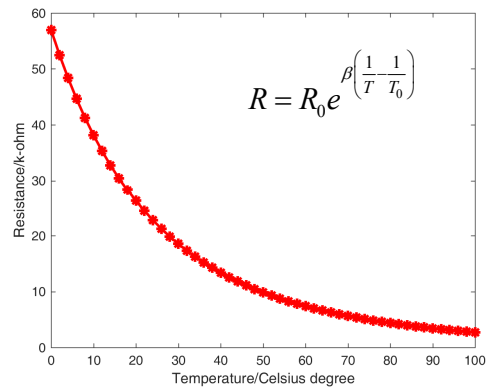


Shervin Shirmohammadi and Hussein Al Osman, Machine Learning in Measurement Part 1: Error Contribution and Terminology Confusion, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, April, 2021.

Regression: Perspective from Machine Learning

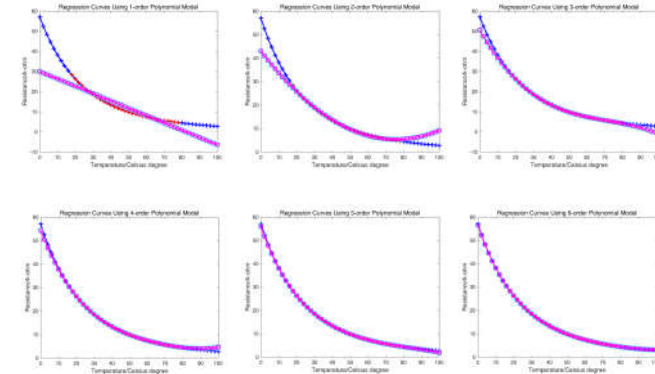


Regression: Perspective from Machine Learning



$R@25^\circ\text{C} = 22\text{k}\Omega$, $\beta = 3100$, $\sigma_R = 0\text{k}\Omega$

Regression: Perspective from Machine Learning



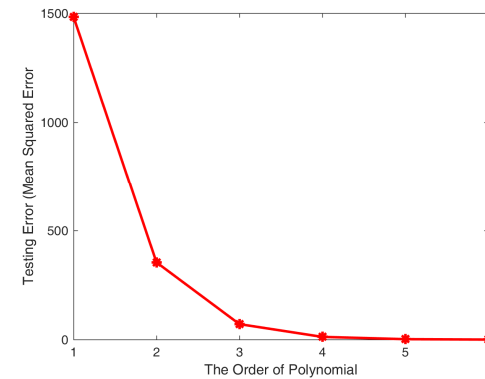
$R@25^\circ\text{C} = 22\text{k}\Omega$, $\beta = 3100$, $\sigma_R = 0\text{k}\Omega$

Regression: Perspective from Machine Learning



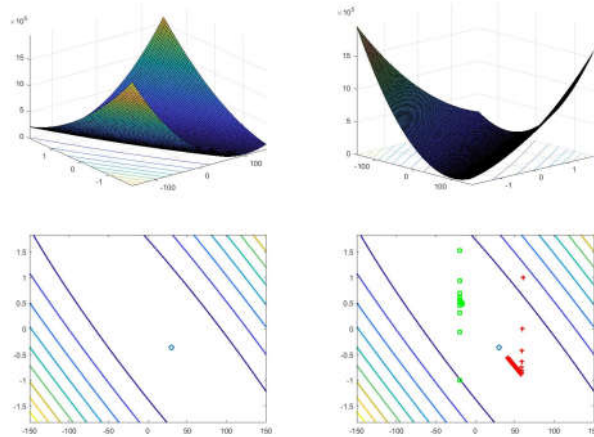
$R@25^{\circ}\text{C} = 22\text{k}\Omega$, $\beta = 3100$, $\sigma_R = 0\text{k}\Omega$

Regression: Perspective from Machine Learning

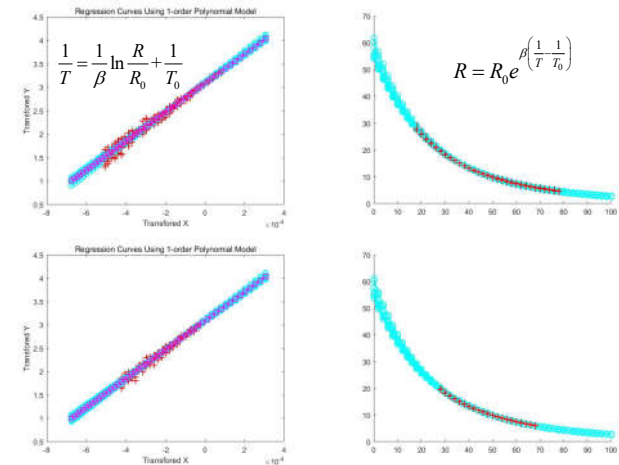


$R@25^{\circ}\text{C} = 22\text{k}\Omega$, $\beta = 3100$, $\sigma_R = 0\text{k}\Omega$

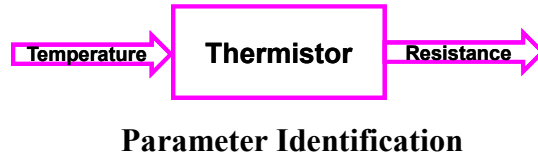
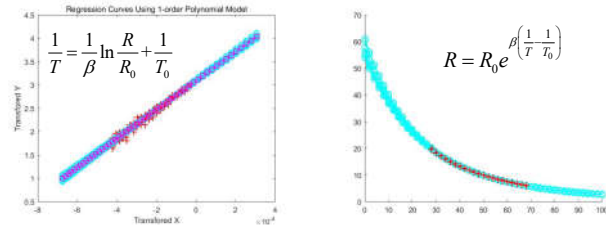
The Loss Function of 1st Order Model



Regression: Perspective from Machine Learning



Regression: Perspective from Machine Learning



Ridge Regression

$$\begin{cases} R_1 = w_0 + w_1 t_1 + w_2 t_1^2 + \dots + w_n t_1^n + e_1 \\ R_2 = w_0 + w_1 t_2 + w_2 t_2^2 + \dots + w_n t_2^n + e_2 \\ \vdots \\ R_M = w_0 + w_1 t_M + w_2 t_M^2 + \dots + w_n t_M^n + e_M \end{cases}$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{W} + \mathbf{e} \quad L = \|\mathbf{R} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{W}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{W}\|_2^2$$

$$\min_{\mathbf{W}} \|\mathbf{R} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{W}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{W}\|_2^2$$

$$\hat{\mathbf{W}} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} + \lambda \cdot \mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{R}$$

LASSO: Least Absolute Shrinkage Selector Operator

$$\begin{cases} R_1 = w_0 + w_1 t_1 + w_2 t_1^2 + \dots + w_n t_1^n + e_1 \\ R_2 = w_0 + w_1 t_2 + w_2 t_2^2 + \dots + w_n t_2^n + e_2 \\ \vdots \\ R_M = w_0 + w_1 t_M + w_2 t_M^2 + \dots + w_n t_M^n + e_M \end{cases}$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{W} + \mathbf{e} \quad L = \|\mathbf{R} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{W}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{W}\|_1$$

$$\min_{\mathbf{W}} \|\mathbf{R} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{W}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{W}\|_1$$

Regression: Perspective from Machine Learning

$$\begin{cases} R_1 = w_0 + w_1 t_1 + w_2 t_1^2 + \dots + w_n t_1^n + e_1 \\ R_2 = w_0 + w_1 t_2 + w_2 t_2^2 + \dots + w_n t_2^n + e_2 \\ \vdots \\ R_M = w_0 + w_1 t_M + w_2 t_M^2 + \dots + w_n t_M^n + e_M \end{cases}$$

$$R_i = a_i^T \cdot \mathbf{W} + e_i; \quad i = 1, 2, \dots, M; \quad e_i \sim N(0, \sigma^2)$$

$$p(R_i | a_i^T, \mathbf{W}, \sigma^2) = N(a_i^T \cdot \mathbf{W}, \sigma^2)$$

$$p(e_1, e_2, \dots, e_M) = \prod_{m=1}^M p(e_m)$$

Regression: Perspective from Machine Learning

$$R_i = a_i^T \cdot \mathbf{W} + e_i; \quad i = 1, 2, \dots, M; \quad e_i \sim N(0, \sigma^2)$$

$$p(R_i | a_i^T, \mathbf{W}, \sigma^2) = N(a_i^T \cdot \mathbf{W}, \sigma^2)$$

$$p(e_1, e_2, \dots, e_M) = \prod_{m=1}^M p(e_m)$$

$$\begin{aligned} \text{Likelihood} &= p(R_1, R_2, \dots, R_M | a_1^T, a_2^T, \dots, a_M^T, \mathbf{W}, \sigma^2) \\ &= \prod_{m=1}^M p(R_m | a_m^T, \mathbf{W}, \sigma^2) \\ &= \prod_{m=1}^M N(a_m^T \cdot \mathbf{W}, \sigma^2) \end{aligned}$$

Regression: Perspective from Machine Learning

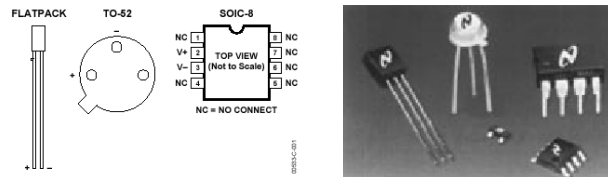
$$\begin{aligned} L &= p(R_1, R_2, \dots, R_M | a_1^T, a_2^T, \dots, a_M^T, \mathbf{W}, \sigma^2) \\ &= \prod_{m=1}^M p(R_m | a_m^T, \mathbf{W}, \sigma^2) = \prod_{m=1}^M N(a_m^T \cdot \mathbf{W}, \sigma^2) \end{aligned}$$

$$\text{Maximize likelihood: } \frac{\partial L}{\partial \mathbf{W}} = 0$$

$$\hat{\mathbf{W}} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{R}$$

集成温度传感器

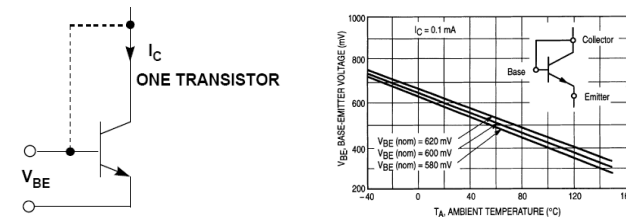
□测温原理：利用半导体器件温度特性，晶体管基极—发射极的正向压降随温度升高而降低。



集成度高、易于与其他电子电路连接、但测温范围教低（-55 °C ~ 150 °C）

集成温度传感器

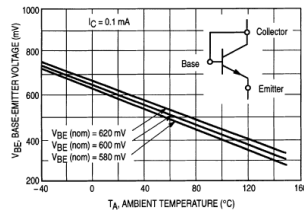
□测温原理：利用半导体器件温度特性，晶体管基极—发射极的正向压降随温度升高而降低。



$$V_{BE} = V_0 - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{A}{I_c}\right)$$

集成温度传感器

□测温原理：利用半导体器件温度特性，晶体管基极—发射极的正向压降随温度升高而降低。



I_C : 集电极电流 (A)

A: 与温度和晶体管几何结构有关的电流 (A)

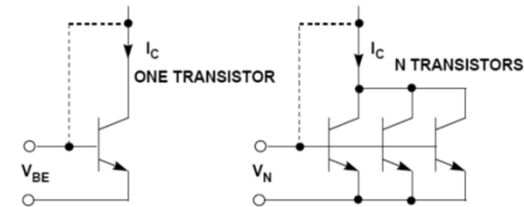
$$V_{BE} = V_0 - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{A}{I_C}\right)$$

k = Boltzmann's constant ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$)

T = Temperature (K)

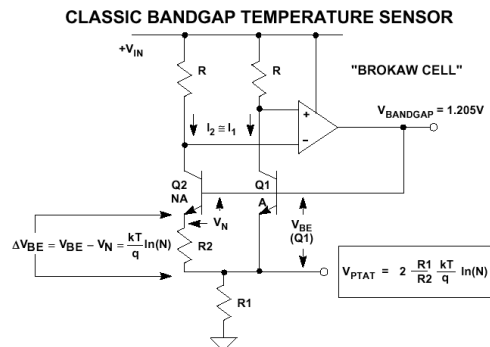
q = Charge of electron ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)

集成温度传感器



$$\Delta V_{BE} = V_{BE} - V_N = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{NA}{I_C}\right) - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{A}{I_C}\right) = \frac{kT}{q} \ln(N)$$

集成温度传感器



思考题11：分析“BROKAW CELL”工作原理

接触式测温方法小结

	Thermocouple	RTD	Thermistor	I. C. Sensor
Advantages	<input type="checkbox"/> Self-powered <input type="checkbox"/> Simple <input type="checkbox"/> Rugged <input type="checkbox"/> Inexpensive <input type="checkbox"/> Wide variety <input type="checkbox"/> Wide temperature range	<input type="checkbox"/> Most stable <input type="checkbox"/> Most accurate <input type="checkbox"/> More linear than thermocouple	<input type="checkbox"/> High output <input type="checkbox"/> Fast <input type="checkbox"/> Two-wire ohms measurement	<input type="checkbox"/> Most linear <input type="checkbox"/> Highest output <input type="checkbox"/> Inexpensive
Disadvantages	<input type="checkbox"/> Non-linear <input type="checkbox"/> Low voltage <input type="checkbox"/> Reference required <input type="checkbox"/> Least stable <input type="checkbox"/> Least sensitive	<input type="checkbox"/> Expensive <input type="checkbox"/> Current source required <input type="checkbox"/> Small ΔR <input type="checkbox"/> Low absolute resistance <input type="checkbox"/> Self-heating	<input type="checkbox"/> Non-linear <input type="checkbox"/> Limited temperature range <input type="checkbox"/> Fragile <input type="checkbox"/> Current source required <input type="checkbox"/> Self-heating	<input type="checkbox"/> $T < 200^\circ\text{C}$ <input type="checkbox"/> Power supply required <input type="checkbox"/> Slow <input type="checkbox"/> Self-heating <input type="checkbox"/> Limited configurations

填空题 4分

设置

请将描述温度传感器突出特性的选项（1-测温范围宽、2-具有线性输出、3-灵敏度高、4-使用时需要考虑引线电阻影响）填入对应的测温传感器后空格中。

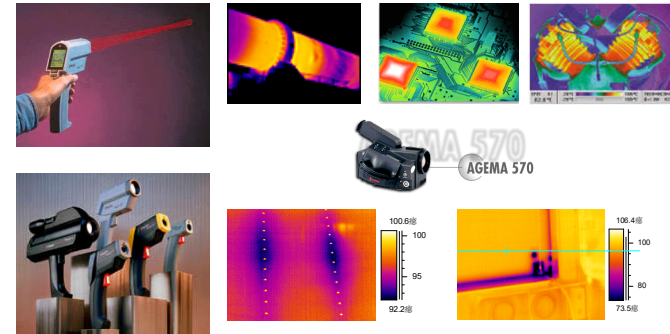
热电偶： [填空1]

热电阻： [填空2]

热敏电阻： [填空3]

半导体集成温度传感器： [填空4]

非接触式测温方法 (辐射测温)



非接触式测温方法 (辐射测温)

- 测温原理：具有一定温度的物体会向外辐射能量，其辐射强度与物体温度有关，通过测量辐射强度可以确定物体温度。
- 普朗克定律
- 维恩公式、瑞利—金斯公式
- 维恩位移定律
- 斯蒂芬—波尔兹曼定律

黑体、辐射系数

- 黑体：自然界中所有物体对辐射都有吸收、透射或反射的能力，如果某一物体在任何温度下，均能全部吸收辐射到它上面的任何辐射能量，则称此物体为绝对黑体。
- 绝对黑体在任何温度下都能全部吸收辐射到其表面的全部辐射能；同时它在任何一个温度上向外辐射的辐射出射度(简称辐出度)亦最大；其它物体的辐出度总小于绝对黑体。

物体表面上某点的辐射出射度为离开包含该点的面元的辐射通量 与该面元面积之比

黑体、辐射系数

- 在同一温度 T ，某一物体在全波长范围的积分辐射出射度 $M(T)$ 与绝对黑体在全波长范围的积分辐射出射度 $M_0(T)$ 之比，称该物体的全辐射率(或称全辐射系数) $\epsilon(T)$ ，其值在0~1之间。
- 在任一温度 T 和某个波长 λ 下，物体在此波长的光谱辐射出射度与黑体在此波长的光谱辐射出射度之比值称光谱(单色)辐射度，用 $\epsilon(\lambda, T)$ 表示，

黑体、辐射系数

- 物体光谱辐射度的大小，不仅与温度、波长有关，而且取决于物体的材料、尺寸、形状、表面粗糙度等，一个真实物体的辐射系数可表示成

$$\epsilon = 1 - \beta - \gamma$$

式中， β ——为物体的反射系数；
 γ ——为物体的透射系数。

凡 β 、 γ 不全为零的物体统称为非黑体。

黑体、辐射系数

自然界
不存在
绝对黑
体！

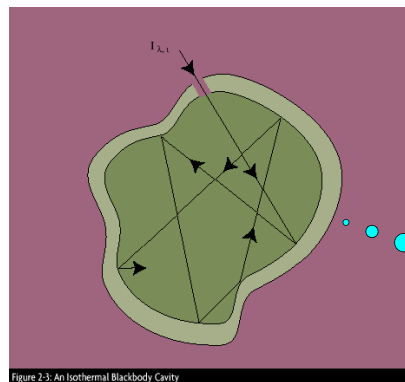


Figure 2-3. An Isothermal Blackbody Cavity

人工
黑体

黑体炉



辐射测温—普朗克定律

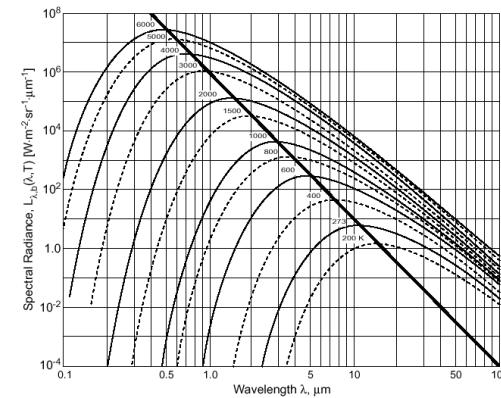
□ Planck's Law: 黑体的单色辐射强度与波长及温度的关系 (1900-10, 1900-12-14)

$$E_{o\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1})$$

$$c_1 = 3.74 \times 10^{-16} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^2) \quad \text{Planck第一常数}$$

$$c_2 = 1.44 \times 10^{-2} \quad (\text{m} \cdot \text{K}) \quad \text{Planck第二常数}$$

辐射测温—普朗克定律



辐射测温—维恩公式

瑞利—金斯公式

□ 维恩公式 (1896)

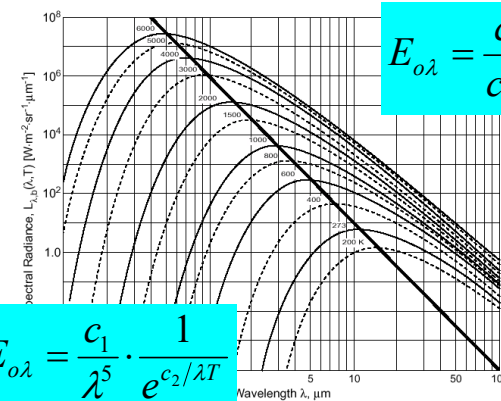
$$E_{o\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T}}$$

□ 瑞利—金斯公式 (1900, 1905)

$$E_{o\lambda} = \frac{c_1 T}{c_2 \lambda^4}$$

辐射测温—维恩公式

瑞利—金斯公式



辐射测温—普朗克定律

□ Planck's Law: 黑体的单色辐射强度与波长及温度的关系 (1900-10, 1900-12-14)

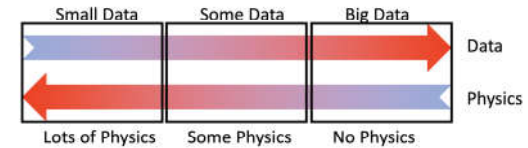
$$E_{o\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1})$$

□ 薛定谔: 我们的任务不是去发现一些别人还没有发现的东西, 而是针对所有人都看见的东西做一些从未有过的思考。

Data & Physics

Karniadakis, Kevrekidis, Lu, et al., *Nature Rev Phys*, 2021

Three scenarios:

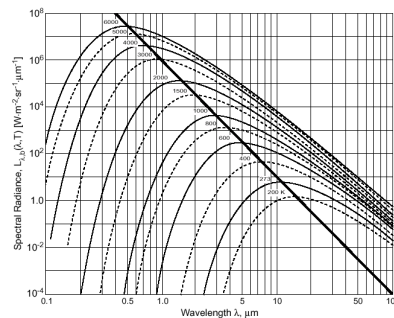


- 1 Lots of physics—Forward problems
 - ▶ Finite difference/elements
- 2 Some physics—Inverse problems
 - ▶ Multi-fidelity learning
 - ▶ Physics-informed neural network (PINN)
 - ▶ DeepM&Mnet
- 3 No physics—System identification/discovery
 - ▶ Operator learning (DeepONet)

slide credit to Lu Lu (Department of Chemical and Biomolecular Engineering at University of Pennsylvania)

辐射测温—维恩位移公式

□ 维恩位移公式 $\lambda_m T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$



□ 思考题12: 由普朗克公式推导维恩位移公式

$$E_{o\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)}$$

斯蒂芬—波尔兹曼定律

□ Stefan—Boltzmann Law: 黑体的全辐射定律

$$E_o = \int_0^{\infty} E_{o\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$$

Stefan—Boltzmann常数

辐射测温—黑体、灰体

□ Planck's Law: 灰体的单色辐射强度与波长及温度的关系

$$E_{\lambda} = \frac{c_1 \epsilon_{\lambda}}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1})$$

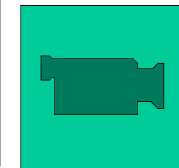
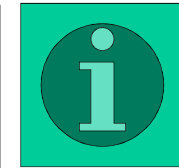
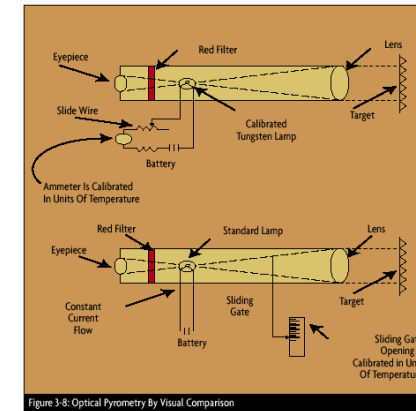
单色辐射
黑度系数

□ Stefan—Boltzmann Law: 灰体的全辐射定律

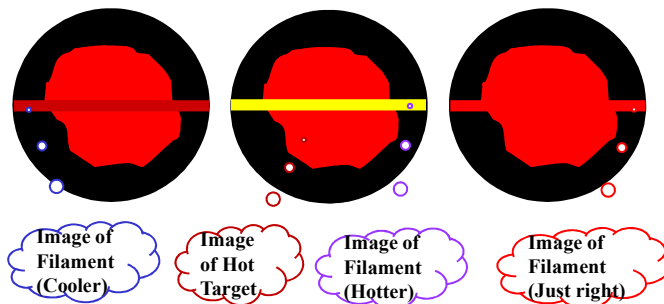
$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$$

全辐射黑度系数

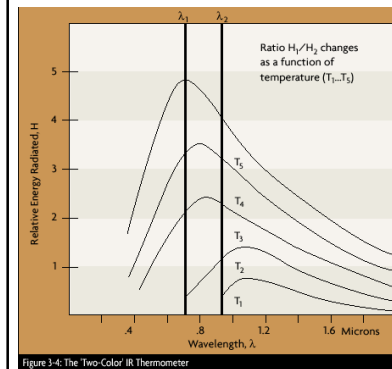
辐射测温—光学高温计



辐射测温—光学高温计



辐射测温—比色温度计



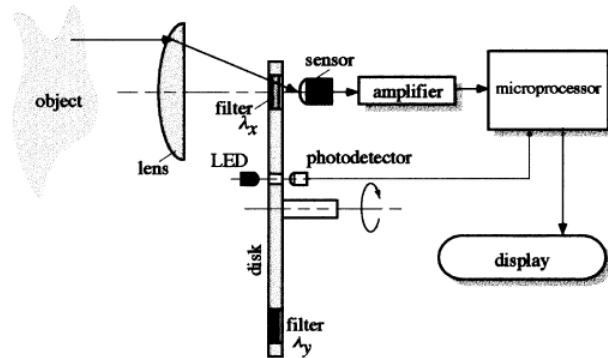
$$R = \frac{B_{\lambda_1}}{B_{\lambda_2}} = \frac{\lambda_2^5 e^{\frac{c_2}{\lambda_2 T}}}{\lambda_1^5 e^{\frac{c_2}{\lambda_1 T}}}$$

$$\ln R = 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)$$

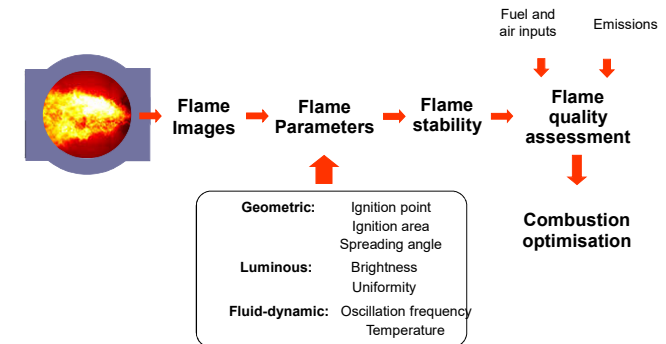
$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln R - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}}$$

Figure 3-4: The Two-Color IR Thermometer

辐射测温—比色温度计



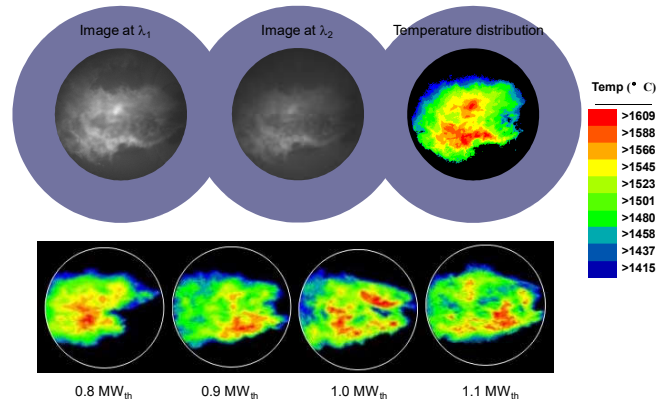
Vision based flame monitoring technique



Lu Gang (卢钢)
Yong Yan (阎勇)

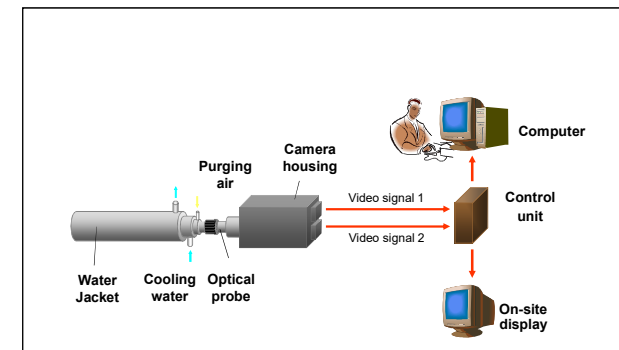
Instrumentation and Embedded Systems Group
Department of Electronics
University of Kent, UK

Flame temperature distribution for variable furnace load



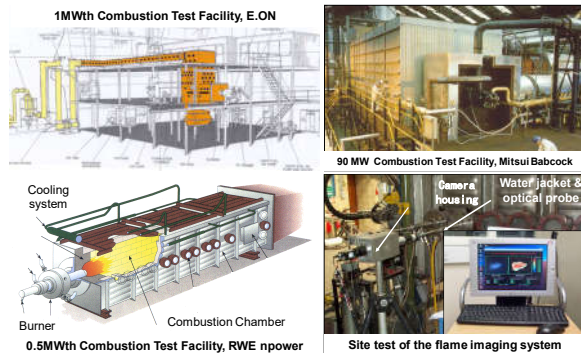
Lu Gang (卢钢), Yong Yan (阎勇), University of Kent, UK

2D flame imaging system



Lu Gang (卢钢), Yong Yan (阎勇), University of Kent, UK

Industrial Trials



Lu Gang (卢钢), Yong Yan (阎勇), University of Kent, UK

辐射测温—辐射温度计 (红外温度计)

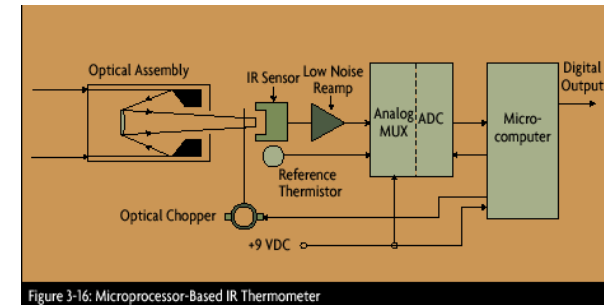


Figure 3-16: Microprocessor-Based IR Thermometer

根据全辐射定律测量辐射能量，反推温度

辐射测温—表观温度

□ 辐射测温仪表在使用前都用黑体炉（模拟黑体）来进行标定，其示值按黑体温度进行刻度。而实际使用时被测物体通常均不为黑体，仪表显示的温度称为表观温度，应根据被测物体的黑度系数将其转化为实际温度。

□ 光学高温计

物体亮度

黑体亮度

$$B_{\lambda} = C \varepsilon_{\lambda} c_1 \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T}$$

$$B_{0\lambda} = C c_1 \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T_L}$$

$$B_{\lambda} = B_{0\lambda}$$

$$\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda}}$$

辐射测温—表观温度

□ 比色（双色）温度计

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} = \frac{\ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)}}{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}$$

□ 辐射温度计

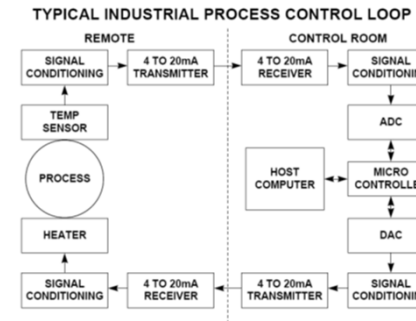
$$T = T_p^4 \sqrt{\frac{1}{\varepsilon}}$$

辐射测温—思考题

- 思考题13: 用全辐射法测量某金属温度, 在假设其全辐射系数为0.82的条件下得知被测温度为 1050°C , 现由其他方法得知其真实全辐射系数为0.75, 求其真实温度。(Answer: 1352°K)
- 思考题14: 已知日地平均距离为 $1.5 \times 10^8 \text{km}$, 太阳常数(指平均日地距离时, 地球表面垂直于太阳辐射的单位面积上所接受的太阳辐射能)为 1353W/m^2 , 太阳半径为 $6.96 \times 10^8 \text{m}$, 求太阳表面温度。(Answer: 5770°K)

温度测量—思考题

- 思考题15: 试设计一个数字化温度测量系统。



温度测量—思考题

- 思考题15: 试设计一个数字化温度测量系统。

