



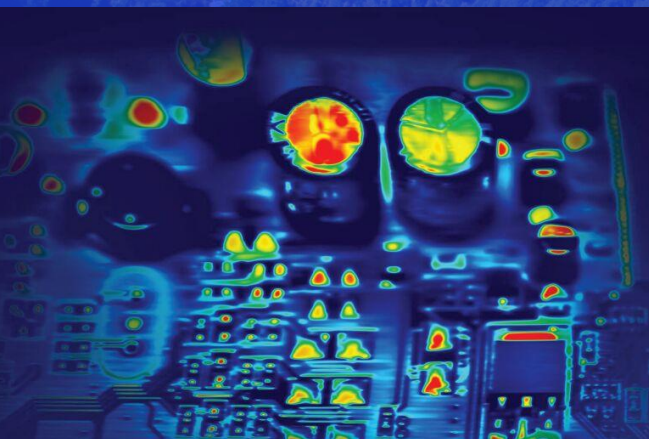
吉林大学

JILIN UNIVERSITY OF CHINA

传感器与检测原理

Principles of Sensors and Measurement

第八章 温度检测原理



第八章 温度检测原理

8.1 概述

8.2 接触式测温方法

8.3 非接触测温方法

8.1.1 温度的基本概念和测量方法

反映了物体冷热的程度，与自然界中的各种物理和化学过程相联系。

□ **温度概念的建立及测量**：以热平衡为基础

□ **温度最本质的性质**：当两个冷热程度不同的物体接触后就会产生导热换热，换热结束后两物体处于热平衡状态，则它们具有相同的温度

□ **测量方法**：接触式测温和非接触式测温

接触式测温

- 温度敏感元件与被测对象接触，经过换热后两者温度相等。
- 常用的接触式测温仪表：
 - (1) 膨胀式温度计
 - (2) 热电阻温度计
 - (3) 热电偶温度计
- 优点：直观、可靠，测量仪表也比较简单。
- 缺点：
 - 由于敏感元件必须与被测对象接触，在接触过程中就可能破坏被测对象的温度场分布，从而造成测量误差。
 - 有的测温元件不能和被测对象充分接触，不能达到充分的热平衡，使测温元件和被测对象温度不一致，也会带来误差。
 - 在接触过程中，介质腐蚀性，高温时对测温元件的影响，影响测温元件的可靠性和工作寿命。

非接触测温

温度敏感元件不与被测对象接触，而是通过**辐射能量**进行热交换，由辐射能的大小来推算被测物体的温度。

- **常用的非接触式测温仪表：**

- (1) 辐射式温度计：基于普朗克定理

- 光电高温计，辐射传感器，比色温度计。

- (2) 光纤式温度计：光纤的温度特性、传光介质。

- 光纤温度传感器，光纤辐射温度计。

- **优点：**不与被测物体接触，不破坏原有的温度场，在被测物体为运动物体时尤为适用。

- **缺点：**精度一般不高。

各种温度检测方法及其测温范围

测温方式	类别	原 理	典型仪表	测温范围/℃
接触式测温	膨胀类	利用液体气体的热膨胀及物质的蒸汽压变化	玻璃液体温度计	-100~600
			压力式温度计	-100~500
		利用两种金属的热膨胀差	双金属温度计	-80~600
	热电类	利用热电效应	热电偶	-200~1800
	电阻类	固体材料的电阻随温度而变化	铂热电阻	-260~850
			铜热电阻	-50~150
			热敏电阻	-50~300
	其他电学类	半导体器件的温度效应	集成温度传感器	-50~150
		晶体的固有频率随温度而变化	石英晶体温度计	-50~120
	非接触式测温	光纤类	利用光纤的温度特性或作为传光介质	光纤温度传感器
光纤辐射温度计				200~4000
辐射类		利用普朗克定律	光电高温计	800~3200
			辐射传感器	400~2000
			比色温度计	500~3200

接触式与非接触式测温特点比较

➤ 测量范围

接触式： 1800℃以下、热容大、易腐蚀，可进行连续在线测温

非接触式： 从超低温到极高温，但1000℃以下，测量误差大

➤ 精 度

接触式： 通常为1.0、0.5、0.2及0.1级

非接触式： 通常为1.0、1.5、2.5级

➤ 响应速度

接触式： 慢，通常为几十秒到几分钟

非接触式： 快，通常为2~3秒钟

➤ 其它特点

接触式： 结构简单、体积小、可靠、维护方便、价格低廉

非接触式： 结构复杂、体积大、调整麻烦、价格昂贵

8.1.2 温标

为了保证温度量值的准确，需要建立一个衡量温度的统一标准尺度，即**温标**

- 1 经验温标
- 2 热力学温标
- 3 理想气体温标
- 4 国际实用温标

建立温标必须具备三个条件：

- (1) 固定的温度点（基准点）
- (2) 测温仪器（确定测温质和测温量）
- (3) 温标方程（内插公式）

1.经验温标

□ 华氏温标

- 1714年德国人法勒海特(Fahrenheit)以水银为测温介质，制成玻璃水银温度计
- 按照华氏温标，则水的冰点为 32°F ，沸点为 212°F
- 在沸点和冰点之间等分为180份，每份为华氏1度(1°F)

□ 摄氏温标

- 1740年瑞典人摄氏(Celsius)提出在标准大气压下，把水的冰点规定为 0°C ，水的沸点规定为 100°C

□ 经验温标

借助于一些物质的物理量与温度之间的关系，用实验方法得到的经验公式来确定温度值的标尺，因此有局限性和任意性

2.热力学温标

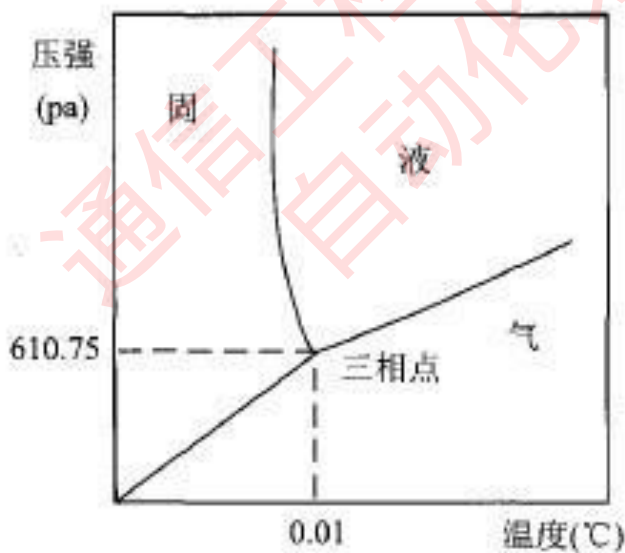
- 热力学温标是由开尔文(Ketvin)在1848年提出

确定的温度数值：热力学温度，绝对温度，用符号T表示，单位为开尔文，用K表示。

- 热力学温度的起点为绝对零度，所以它不可能为负值，且冰点是273.15K，沸点是373.15K。请注意水的冰点和三相点是不一样的，两者相差0.01K。

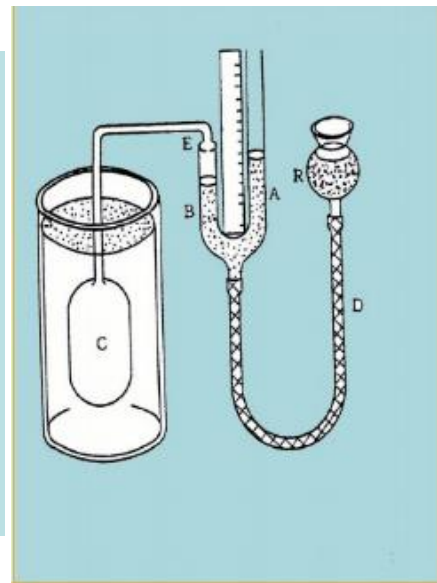
水的三相点温度

水三相点是水的固、液、汽三相平衡共存时的温度(其值为273.16K (0.01°C)。它是在一个密封的装有高纯度水的玻璃容器——水三相点瓶内复现的。



3.理想气体温标

以**气体**为测温物质，利用理想气体状态方程中体积（或压强）不变时，压强（或体积）与温度成正比关系所确定的温标，称为理想气体温标



- 由**波义耳定律**(在定量定温下，理想气体的体积与气体的**压强**成反比)：

$$PV = RT$$

当气体的体积为恒定(定容)时，其压强就是温度的单值函数。这样就有：

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2}{P_1}$$

4.国际实用温标

- **指导思想**：尽可能地接近热力学温标，复现精度要高，制作较容易，性能稳定，使用方便
- 1989年7月第77届国际计量委员会批准建立了新的国际温标，简称**ITS-90**

ITS-90基本内容：

- 1、重申国际实用温标单位仍为K，**1 K等于水的三相点时温度值的1/273.16**；
- 2、把**水的三相点时温度值定义为0.01℃**（摄氏度），同时相应把绝对零度修订为**-273.15℃**；**国际摄氏温度和国际实用温度**关系为：
$$t_{90} = T_{90} - 273.15$$

4.国际实用温标

ITS-90基本内容：

3、把整个温标分成4个温区，其相应的标准仪器如下：

- ①0.65—5.0K，用 ^3He 和 ^4He 蒸汽温度计；
- ②3.0—24.5561K，用 ^3He 和 ^4He 定容气体温度计；
- ③13.803K—961.78℃，用铂电阻温度计；
- ④961.78℃以上，用光学或光电高温计；

4、新确认和规定17个固定点温度值以及借助依据这些固定点和规定的内插公式分度的标准仪器来实现整个热力学温标。见表8-1所示：

4.国际实用温标

序号	定义固定点	国际实用温标的规定值	
		T_{90}/K	$t_{90}/^{\circ}\text{C}$
1	氢蒸气压点	3~5	-270.15~-268.15
2	平衡氢三相点	13.8033	-259.3467
3	平衡氢(或氘)蒸气压点	≈ 17	≈ -256.15
4	平衡氢(或氘)蒸气压点	≈ 20.3	≈ -252.85
5	氦三相点	24.5561	-248.5939
6	氧三相点	54.3584	-218.7916
7	氮三相点	83.8058	-189.3442
8	汞三相点	234.3156	-38.8344
9	水三相点	273.16	0.01
10	铟熔点	302.9146	29.7646
11	铟凝固点	429.7485	156.5985
12	锡凝固点	505.078	231.928
13	锌凝固点	692.677	419.527
14	铝凝固点	933.473	660.323
15	银凝固点	1234.93	961.78
16	金凝固点	1337.33	1064.18
17	铜凝固点	1357.77	1084.62

表8-1 ITS-90温标17固定点温度

8.1.3 标定

1

标准值法

- 用适当的方法建立起一系列国际温标定义的**固定温度点(恒温)**作标准值
- 把被标定温度计(或传感器)依次置于这些标准温度值之下，记录下温度计的相应示值(或传感器的输出)
- 根据国际温标规定的内插公式对温度计(传感器)的分度进行对比记录，从而完成对温度计的标定

8.1.3 标定

2 标准表法

- 把被标定温度计(传感器)与已被标定好的更高级精度的温度计(传感器), 紧靠在一起, 共同置于可调节的恒温槽中
- 分别把槽温调节到所选择的若干温度点, 比较和记录两者的读数, 获得一系列对应差值
- 经多次升温, 降温、重复测试, 若这些差值稳定, 则把记录下的这些差值作为被标定温度计的修正量, 就成了对被标定温度计的标定

第8章 温度检测原理



8.1 概述

8.2 接触式测温方法

8.3 非接触测温方法

8.2 接触式测温方法

根据**测温转换的原理**，接触式测温可分为：

- 1、**膨胀式(包括液体和固体膨胀式)**
- 2、**热阻式(包括金属热电阻和半导体热电阻)**
- 3、**热电式(包括热电偶和PN结)**

8.2.1 热膨胀式测温方法

➤基于物体受热时产生膨胀的原理，分为**液体膨胀式**和**固体膨胀式**两类。

➤按**膨胀基体**可分成：液体膨胀式**玻璃温度计**、液体或气体膨胀式**压力温度计**及固体膨胀式**双金属温度计**

➤特点：

1、测量范围大都在 $-50^{\circ}\text{C} \sim 550^{\circ}\text{C}$ 内

2、用于温度测量或控制精度要求**较低**，**不需自动记录**的场合。

1.压力温度计

压力温度计是根据一定质量的液体、气体、蒸汽在**体积不变的条件下**其**压力与温度呈确定函数关系**的原理实现其测温功能

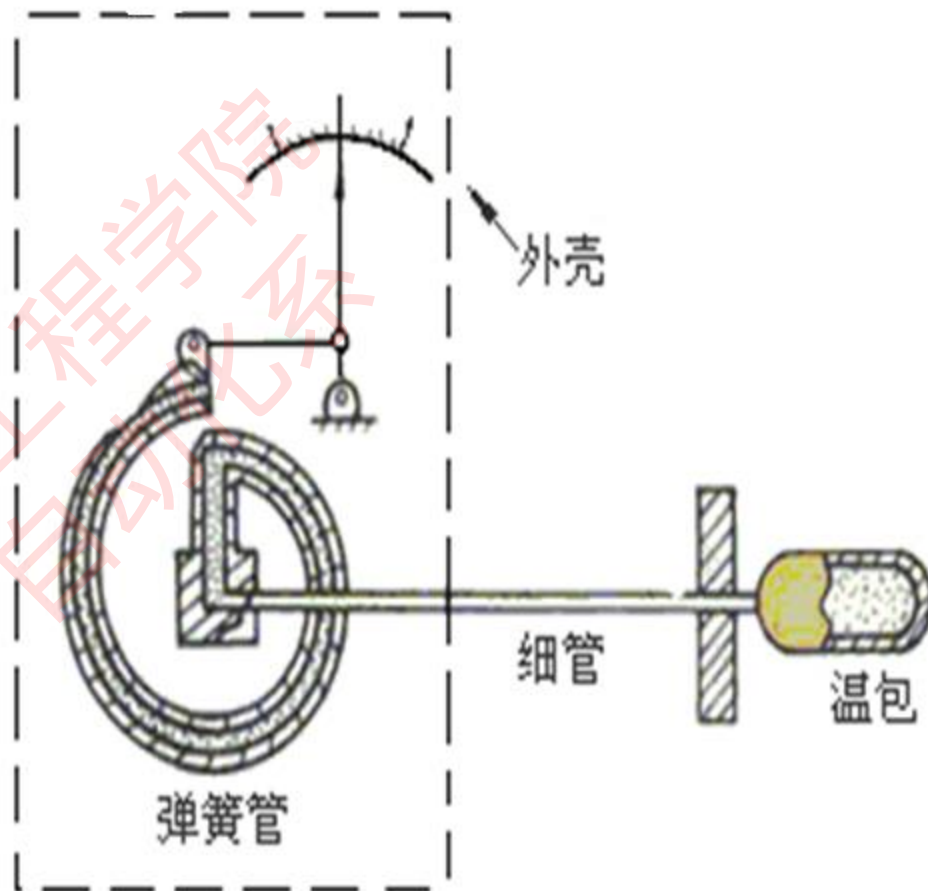
特点:

- 强度大、不易破损、读数方便，但准确度较低、耐腐蚀性较差
- 测温范围下限能达 -100°C 以下，上限最高可达 600°C
- 一般用于汽车、拖拉机、内燃机、汽轮机的油、水系统的温度测量

1.压力温度计

感温介质因被测温度的高低而导致其体积膨胀或收缩造成压力的增减，压力传给弹簧管，指针偏转，指示出温度。

毛细管愈长，则温度计响应愈慢，管愈细，则准确度愈高



压力温度计结构示意图

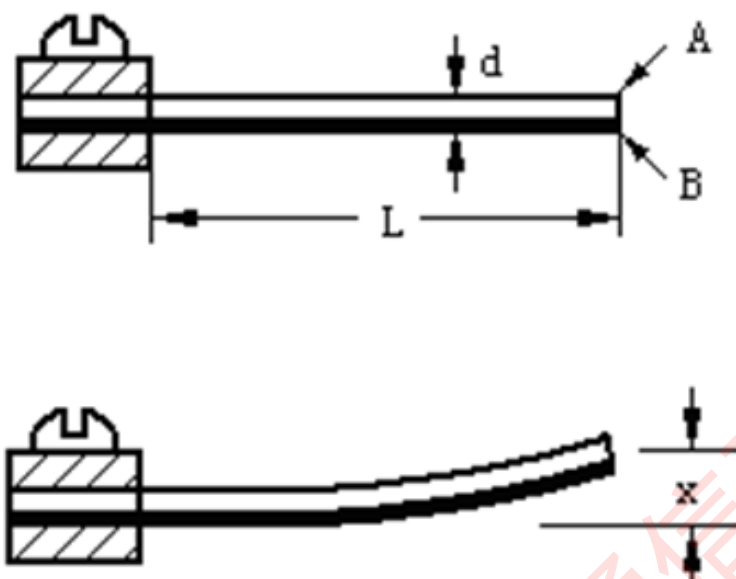
1.压力温度计

测温范围	-20~60,0~100,20~120,60~160		
温包插入深度(mm)	150~280 (尾长≤12M) Φ8,Φ10Φ,Φ13,Φ14不锈钢管		
温包材料	Φ8,Φ10Φ,Φ13,Φ14钢管 Φ8,Φ10Φ,Φ13,Φ14不锈钢管		
毛细管材料	铜质毛细管 包塑毛细管 不锈钢毛细管		
安装方式	WTZ-280	M27×2可动外螺纹	材料: 铜, 铁, 不锈钢
尾长	1M~20M>20M特殊加工		
技术参数	精度等级: ±1.5%, ±2.5% 触头容量: 220V/1A (无感负载10VA)		
安装孔尺寸	4"-Φ118mm 6"-Φ158mm		



压力式温度计WTZ-280

2.双金属温度计



双金属温度计原理图

基于**固体受热膨胀**原理，测量温度通常是把两片**线膨胀系数**差异相对很大的金属片叠焊在一起，构成双金属片感温元件（俗称双金属温度计）

➤当温度变化时，因双金属片的两种不同材料**线膨胀系数**差异相对很大而产生不同的膨胀和收缩，导致双金属片**产生弯曲变形**

2.双金属温度计

- **双金属温度计**的感温双金属元件的形状有**平面螺旋型**和**直线螺旋型**两大类，其测温范围大致为 -80°C — 600°C ，精度等级通常为1.5级左右。
- 双金属温度计抗振性好，读数方便，但精度不太高，只能用作一般的工业用仪表。



8.2.2 热阻式测温技术

基于热电阻原理测温是基于**热阻效应**，根据**金属导体或半导体的电阻值随温度变化**的性质，将电阻值的变化转换为电信号，从而实现测温

热电阻 = 电阻体（最主要部分）+ 绝缘套管 + 接线盒

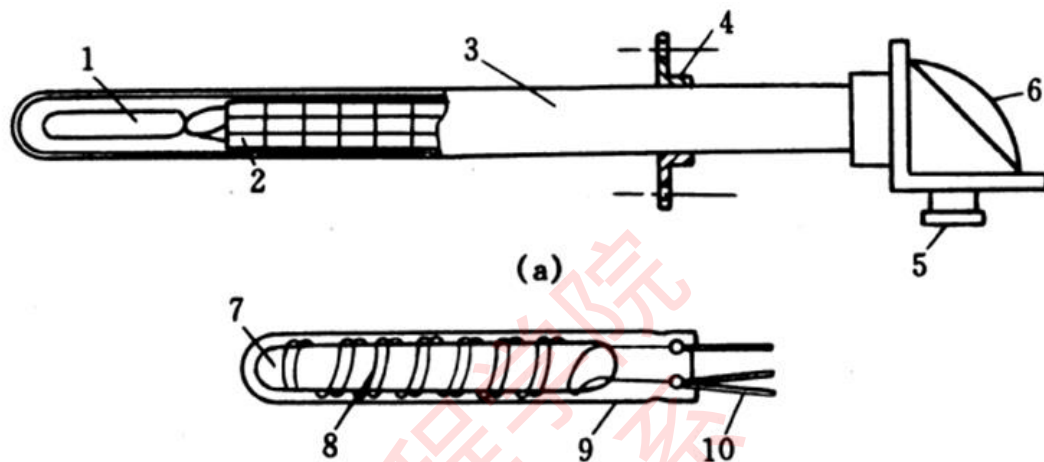
作为热电阻的材料要求：

- 电阻**温度系数要大**，以提高热电阻的灵敏度；
- 电阻率尽可能**大**，以便减小电阻体尺寸；
- 热容量要**小**，以便提高热电阻的响应速度；
- 在测量范围内，应具有**稳定**的物理和化学性能；
- 电阻与温度的关系最好接近于**线性**；
- 应有良好的**可加工性**，且价格**便宜**。

使用最广泛的热电阻材料是铂和铜

8.2.2 热阻式测温技术

热电阻的结构



1-电阻体； 2-瓷绝缘套管； 3-不锈钢套管； 4-安装固定件； 5-引线口
6-接线盒； 7-芯柱； 8-电阻丝； 9-保护膜； 10-引线端

- **热电阻感温元件**是用来感受温度的电阻器。它是热电阻的核心部分，由**电阻丝**及**绝缘骨架构成**。
- 作为热电阻丝材料应具备如下条件：
 - ① **电阻温度系数大、线性好、性能稳定；**
 - ② **使用温度范围广、加工方便；**
 - ③ **固有电阻大，互换性好，复制性强。**

8.2.2 热阻式测温技术

- **优点：**信号灵敏度高、易于连续测量、可以远传（与热电偶相比）、无需参比温度；金属热电阻稳定性高、互换性好、准确度高，可以用作基准仪表。
- **缺点：**需要电源激励、有自热现象（会影响测量精度）以及测量温度不能太高。

常用热电阻种类主要有**铂电阻**、**铜电阻**和**半导体热敏电阻**

- **铂热电阻**

主要作为标准电阻温度计，广泛应用于温度基准、标准的传递。

- **铜热电阻**

测量精度要求不高且温度较低の場合，测量范围一般为 $-50 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 。

1. 铂电阻测温

- 长时间稳定的复现性可达 10^{-4} K，是目前测温复现性最好的一种温度计。

铂电阻的精度与铂的提纯程度有关

百度电阻比 $W(100) = \frac{R_{100}}{R_0}$

$W(100)$ 越高，表示铂丝纯度越高，
国际实用温标规定，作为基准器的铂电阻， $W(100) \geq 1.3925$
目前技术水平已达到 $W(100) = 1.3930$ ，
工业用铂电阻的纯度 $W(100)$ 为 $1.387 \sim 1.390$ 。

1. 铂电阻测温

铂丝的电阻值与温度之间的关系，即特性方程如下：
当温度 t 在 $-200^{\circ}\text{C} \leq t \leq 0^{\circ}\text{C}$ 时：

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3]$$

当温度 t 在 $0^{\circ}\text{C} \leq t \leq 650^{\circ}\text{C}$ 时：

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2]$$

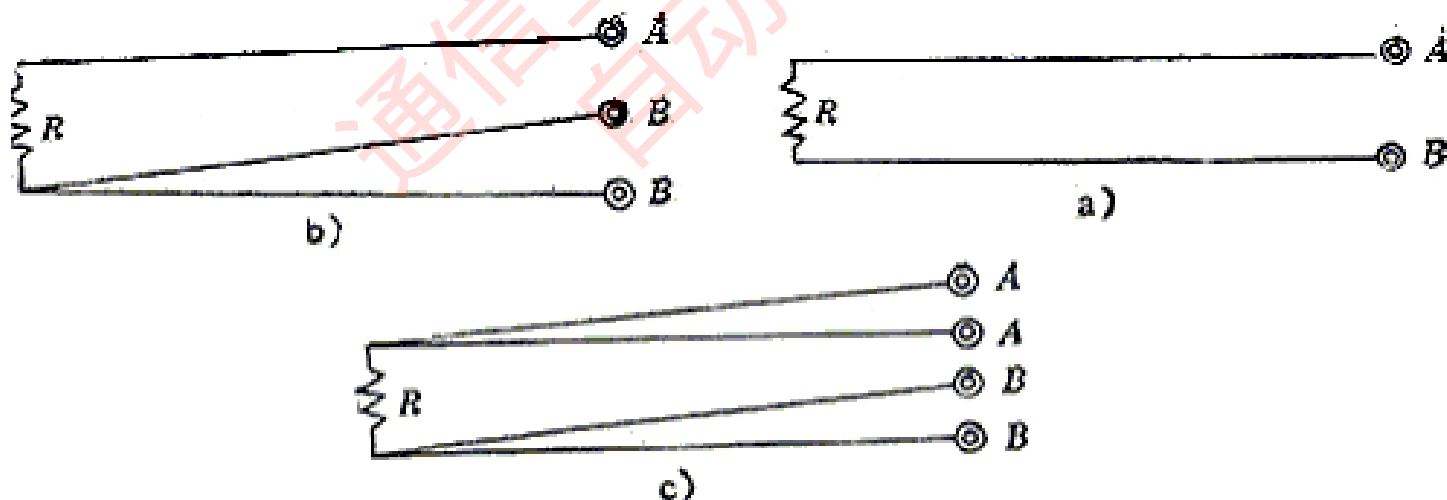
R_0 分为 50Ω 和 100Ω 两种，分度号分别为 Pt50 和 Pt100，
其分度表（给出阻值和温度的关系）

热电阻名称	分度号	0°C 时阻值 (Ω)	测温范围 ($^{\circ}\text{C}$)	特点
铂电阻	Pt50	50 ± 0.003	$-200 \sim 500$	精度高，价格贵，适用于中性和氧化性介质，但线性度差
	Pt100	100 ± 0.006		

1.铂电阻测温

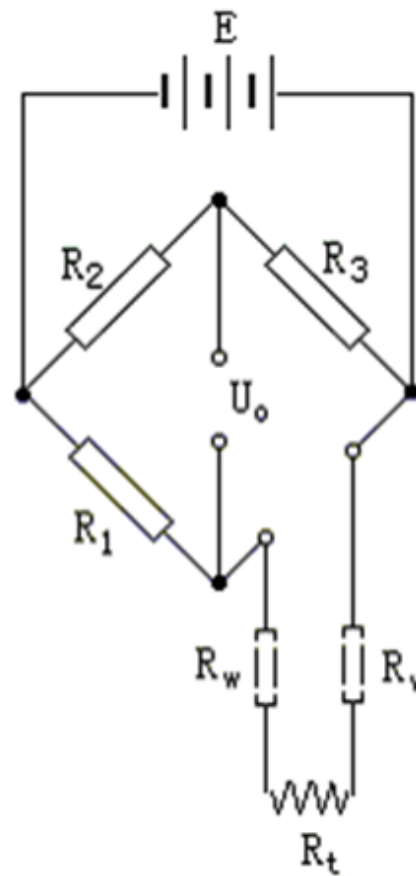
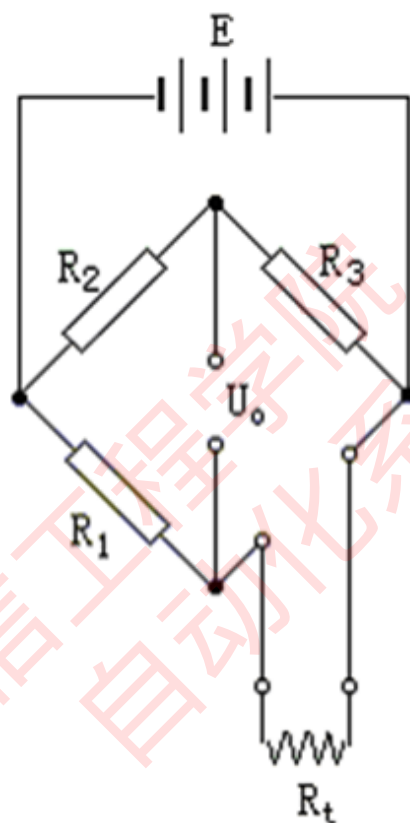
热电阻的引线形式

- ❑ 热电阻的内引线是出厂时自身具备的引线，其功能是使感温元件能与外部测量及控制装置相连接
- ❑ 热电阻的外引线有**两线制**、**三线制**及**四线制**三种
- ❑ 为消除由于连接导线电阻随环境温度变化而造成的测量误差，常采用**三线制**和**四线制**连接法



a)-两线制 b)-三线制 c)-四线制
⊙-接线端子; R-感温元件 A、B-接线端子的标号

1. 铂电阻测温



温度的变化反映为 $R_t + 2R_w$

接入的导线产生了影响

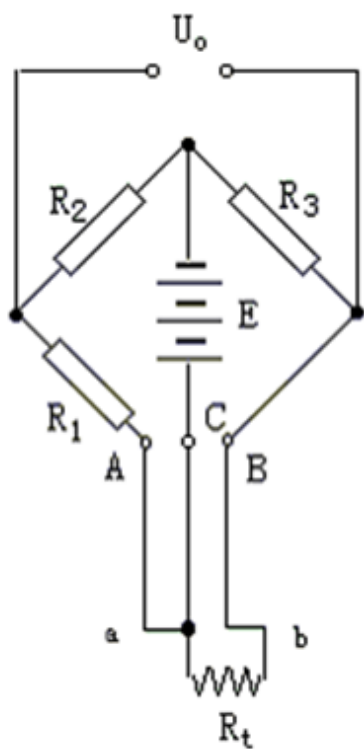
两线制热电阻测量电桥

a) 示意图

b) 等效原理图

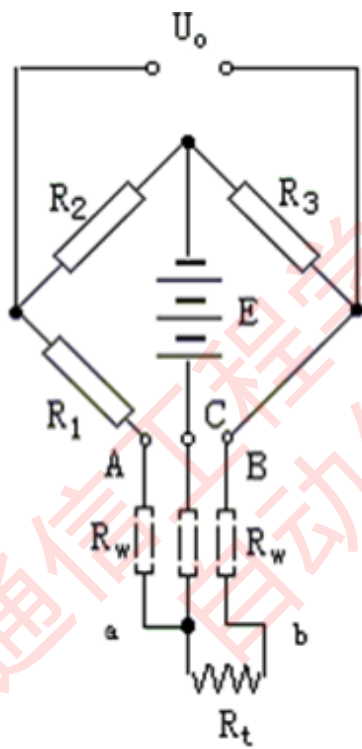
1. 铂电阻测温

工业用热电阻一般采用三线制



热电阻测温电桥的三线制接法

a) 示意图



b) 等效原理图

当电桥平衡时

$$R_2(R_t + R_w) = R_3(R_1 + R_w)$$

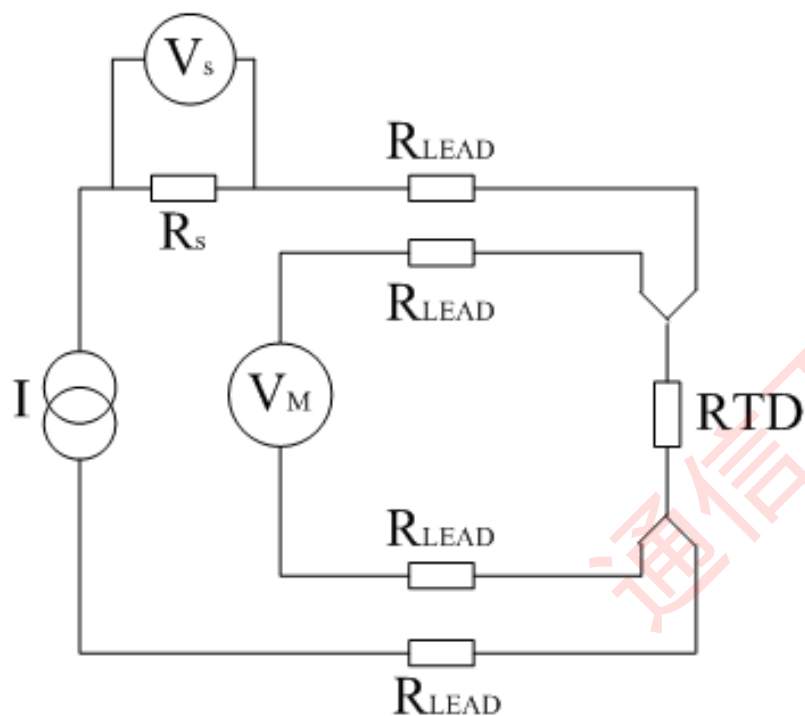
若 $R_2 = R_3$

则 $R_2 R_t = R_3 R_1$

可见电桥平衡与导线电阻无关

1. 铂电阻测温

精密测量中，采用四线制接法



热电阻测温电桥的四线制接法

RTD为被测热电阻，通过四根电阻引线将热电阻引入测量设备中，各引线电阻为 R_{LEAD} ；

恒流源 I 加到RTD的两端，RTD另两端接入电压表 V_M

由于电压表具有极高的输入电阻（通常高于 $100\text{ M}\Omega$ ），因此流经电压表的电流可忽略不计， V_M 两端电压完全等于RTD两端的电压，流经RTD的电流完全等于恒流源电流 I

由此可见，RTD的电阻值精确等于 U/I ，与引线电阻无关。

2.铜电阻测温

铜电阻的阻值与温度之间的关系为

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t) \quad \text{线性}$$

工业上使用的标准化铜热电阻的 R_0 ，按国内统一设计取 50Ω 和 100Ω 两种，分度号分别为Cu50和Cu100，相应的分度表可查阅相关资料。

热电阻名称	分度号	0℃时阻值(Ω)	测温范围 (°C)	特点
铜电阻	Cu50	50 ± 0.05	- 50 ~ 150	线性好，价格低，适用于无腐蚀性介质
	Cu100	100 ± 0.1		
铂电阻	Pt50	50 ± 0.003	-200 ~ 500	精度高，价格贵，适用于中性和氧化性介质，但线性度差
	Pt100	100 ± 0.006		

- **应用：**测量精度要求不高且温度较低の場合
测量范围：-50 ~ 150℃
- **优点：**温度范围内线性好，灵敏度比铂电阻高，易提纯、加工，价格便宜
- **缺点：**易于氧化，一般只用于150℃以下的低温测量和没有水分及无侵蚀性介质的温度测量；与铂相比，铜的电阻率低，所以铜电阻的体积较大。

3. 半导体热敏电阻测温

半导体热敏电阻分类

PTC热敏电阻—正温度系数

在某个温度段随温度急剧上升

用途：彩电消磁，各种电器设备的过热保护，
发热源的定温控制，限流元件。

CTR热敏电阻—临界温度系数

在某温度段随温度急剧下降

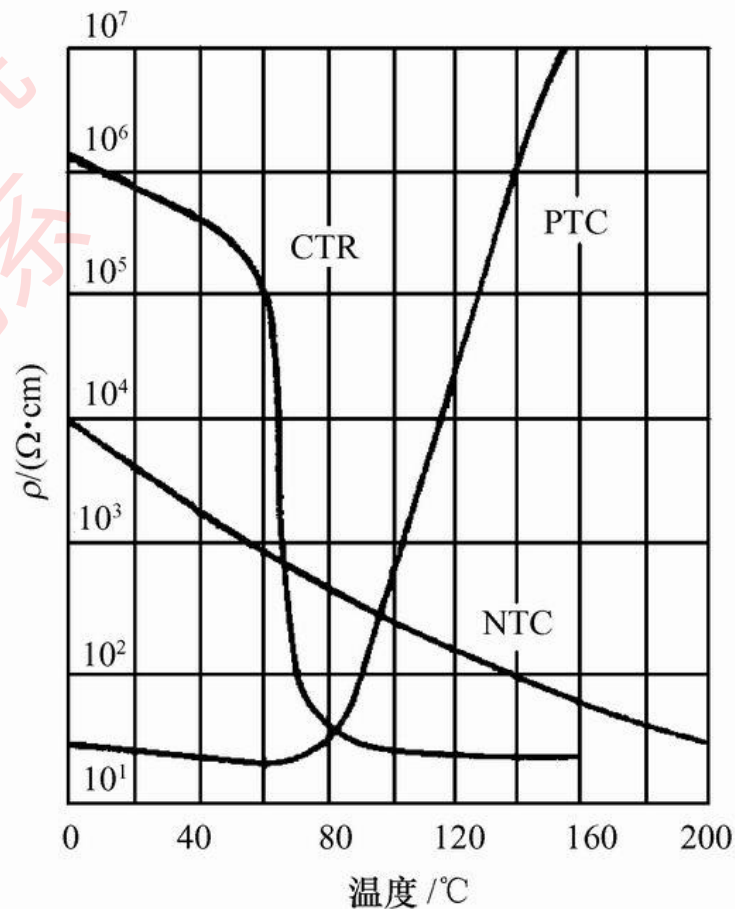
用途：温度开关。

PTC、CTR常用作 位式 温度检测

NTC热敏电阻—负温度系数

较宽范围；低温灵敏度高

应用：点温、表面温度、温差、温场等测量
自动控制及电子线路的热补偿线路



热敏电阻典型特性

3. 半导体热敏电阻测温

➤ 半导体热敏电阻的**优点**:

- ① **灵敏度高**，其灵敏度比热电阻要大1~2个数量级；
- ② 很好地与各种电路匹配，而且远距离测量时**几乎无需考虑连线电阻的影响**；
- ③ **体积小**；
- ④ 热惯性小，响应速度快，适用于**快速变化**的测量场合；
- ⑤ **结构简单坚固**，能承受较大的冲击、振动。

➤ 半导体热敏电阻的**缺点**:

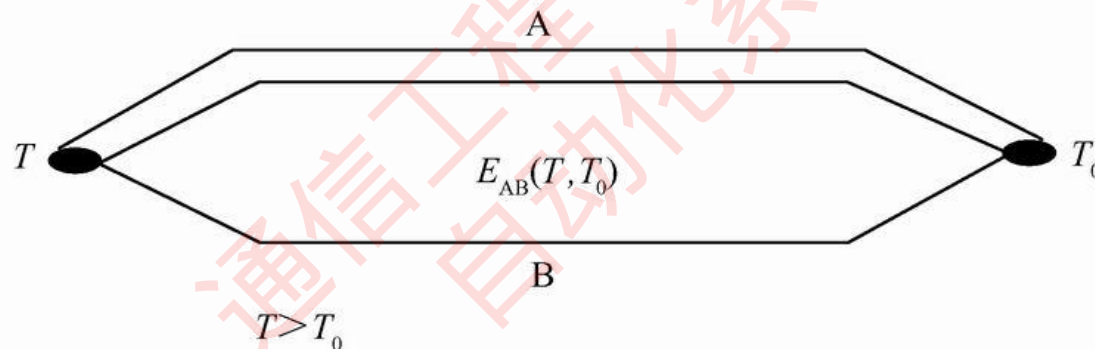
- ① 阻值与温度的关系非线性严重；
- ② 元件的一致性差，互换性差；
- ③ 元件易老化，稳定性较差；
- ④ 除特殊高温热敏电阻外，绝大多数热敏电阻仅适合0~150℃范围，使用时必须注意。



热敏电阻

8.2.3 热电偶测温

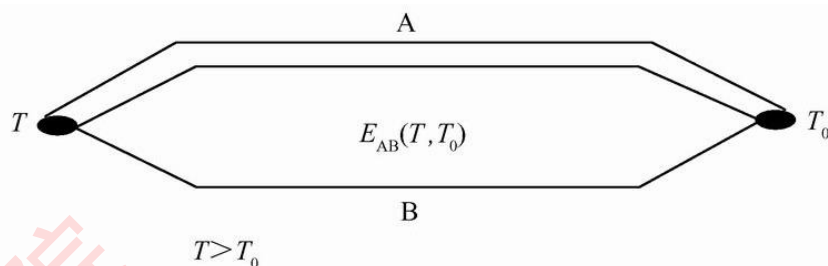
- 基于**热电效应**，将两种不同的导体A和B连成闭合回路，当两个接点处的温度不同时，回路中将产生**热电势**，这种热电效应现象又称**塞贝克效应**



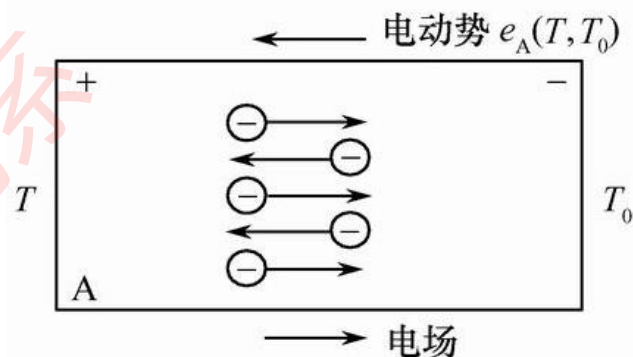
由于热电偶具有结构简单、制造方便、测量范围宽（从 -270°C 到 $+1200^{\circ}\text{C}$ ）、精度高、惯性小和输出信号便于远传等许多优点，应用极为广泛，常被用作测量炉子、管道内的气体或液体的温度及固体的表面温度。

1. 热电偶测温原理

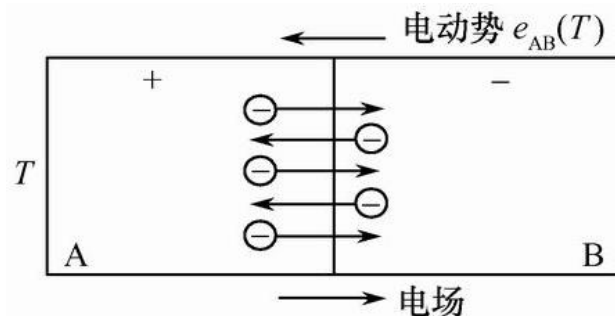
➤ 热电偶闭合回路中产生的热电势由两种电势组成：**温差电势**和**接触电势**。



✓ **温差电势**是指同一热电极两端因温度不同而产生的电势



✓ **接触电势**是指两热电极由于材料不同而具有不同的自由电子密度，而热电极接点接触面处就产生自由电子的扩散现象，当达到动态平衡时，在热电极接点处便产生一个稳定电势差



1. 热电偶测温原理

热电偶的测温原理：**接触电势**和**温差电势**

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0) + E_B(t, t_0) - E_A(t, t_0)$$

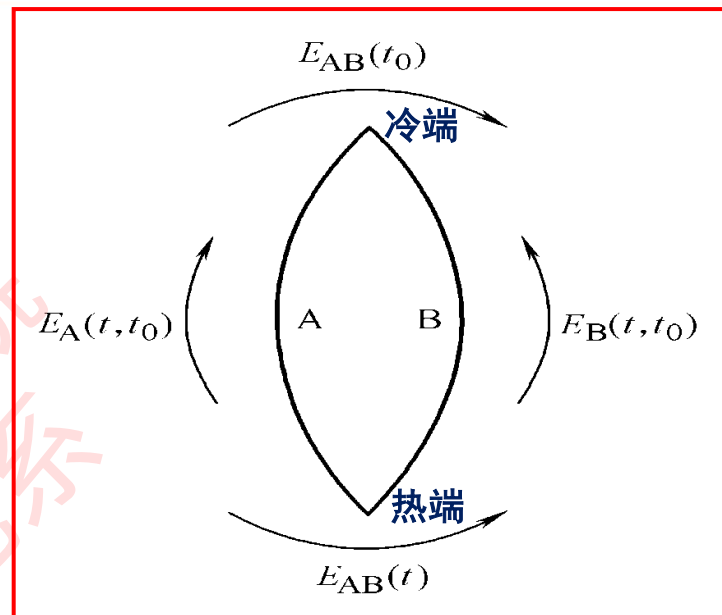


温差电势远小于接触电势

$$E_{AB}(t, t_0) \approx E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0)$$

冷端温度不变时

温度、电势单值关系 $t = E_{AB}^{-1}(t, t_0) \Big|_{t_0 = \text{constant}}$



热电偶回路

- 两点结论：**
- 1) 电极材料相同，总电势为零；
 - 2) 冷、热端温度相同，总电势为零。

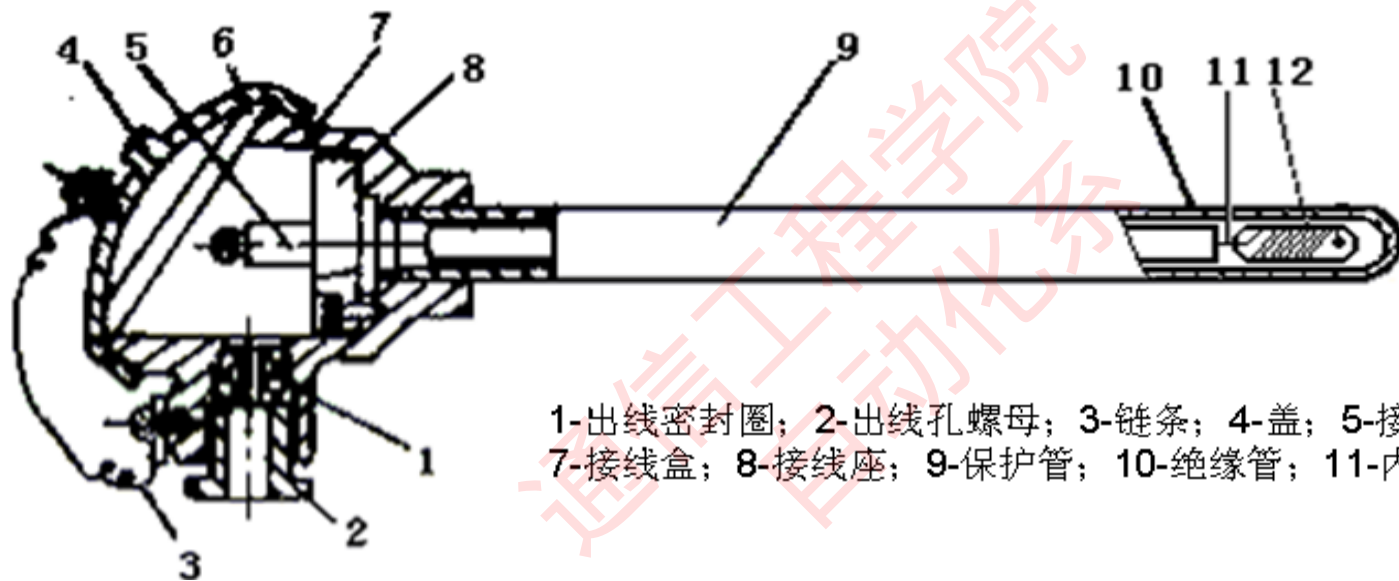
工业用热电偶测温范围

热电偶名称	分度号	热电极识别		E (100,0) (mV)	测温范围 (℃)		对分度表允许偏差 (℃)		
	新	极性	识别		长期	短期	等级	使用温度	允差
铂铑 ₁₀ -铂	S	正	亮白较硬	0.646	0~1300	1600	Ⅲ	≤600	±1.5℃
		负	亮白柔软					>600	±0.25%t
铂铑 ₁₃ -铂	R	正	较硬	0.647	0~1300	1600	Ⅱ	<600	±1.5℃
		负	柔软					>1100	±0.25%t
铂铑 ₃₀ -铂铑	B	正	较硬	0.033	0~1600	1800	Ⅲ	600~900	±4℃
		负	稍软					>800	±0.5%t
镍铬-镍硅	K	正	不亲磁	4.096	0~1200	1300	Ⅱ	-40~1300	±2.5℃或±0.75%t
		负	稍亲磁				Ⅲ	-200~40	±2.5℃或±1.5%t
镍铬硅-镍硅	N	正	不亲磁	2.774	200~1200	1300	Ⅰ	-40~1100	±1.5℃或±0.4%t
		负	稍亲磁				Ⅱ	-40~1300	±2.5℃或±0.75%t
镍铬-康铜	E	正	暗绿	6.319	-200~760	850	Ⅱ	-40~900	±2.5℃或±0.75%t
		负	亮黄				Ⅲ	-200~40	±2.5℃或±1.5%t
铜-康铜	T	正	红色	4.279	-200~350	400	Ⅱ	-40~350	±1℃或±0.75%t
		负	银白色				Ⅲ	-200~40	±1℃或±1.5%t
铁-康铜	J	正	亲磁	5.269	-40~600	750	Ⅱ	-40~750	±2.5℃或±0.75%t
		负	不亲磁						

3.热电偶结构

➤ 普通工业用热电偶

热电偶通常主要由四部分组成，热电极、绝缘管、保护管和接线盒。



1-出线密封圈；2-出线孔螺母；3-链条；4-盖；5-接线柱；6-盖的密封圈；7-接线盒；8-接线座；9-保护管；10-绝缘管；11-内引线；12-热电偶丝

➤ **铠装热电偶** 是将热电偶丝和绝缘材料一起紧压在金属保护管中制成的热电偶。

优点：测量温度范围宽，响应速度快，挠性好、安装使用方便，使用寿命长，机械强度、耐压性能好，铠装热电偶外径尺寸范围宽，铠装热电偶的长度可以做得很长。

4. 热电偶温度测量

热电势的检测与第三导体定律

第三（中间）导体定律： 只要第三导体两接点温度相同，回路中热电势不变

第三种导体c，回路热电势

$$E_{ABC}(t, t_0) = E_{AB}(t) + E_{BC}(t_0) + E_{CA}(t_0)$$

当 $t = t_0$ 有

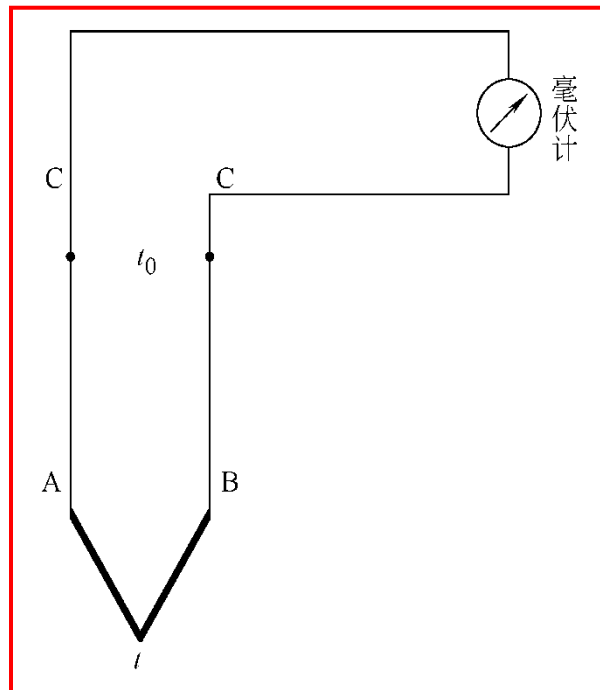
$$E_{ABC}(t_0, t_0) = E_{AB}(t_0) + E_{BC}(t_0) + E_{CA}(t_0) = 0$$

$$E_{BC}(t_0) + E_{CA}(t_0) = -E_{AB}(t_0)$$

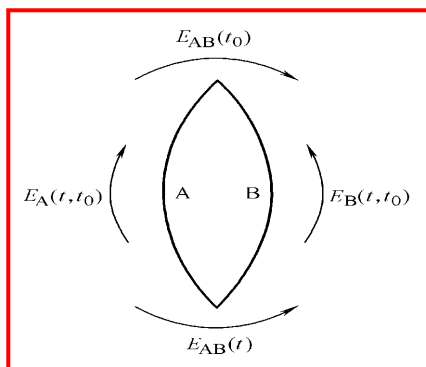


$$E_{ABC}(t, t_0) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0) = E_{AB}(t, t_0)$$

意义：可插入测量仪表



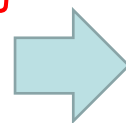
4. 热电偶温度测量



$$E_{AB}(t, t_0) \approx E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0)$$

□ 只有冷端温度不变时，温度、电势才具有一对一的单值关系

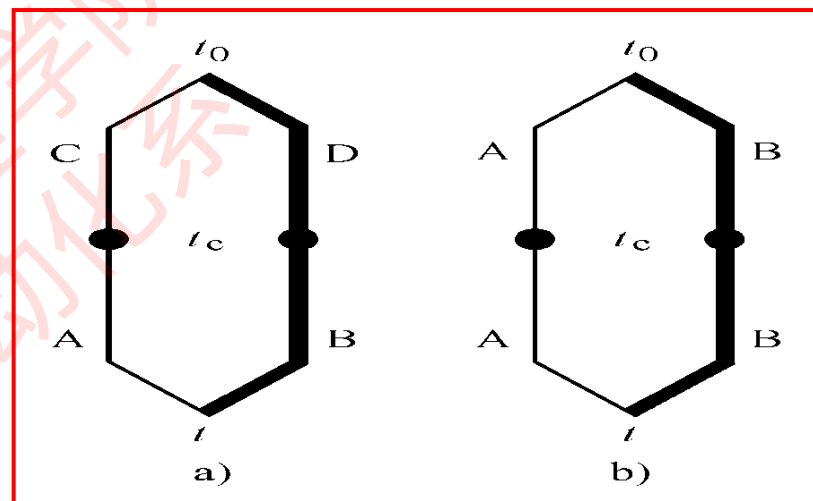
□ 冷端与热端尽可能远



冷端延伸
(补偿导线)

冷端延伸与等值替换原理

□ 等值替换原理：用廉价材料将冷端延伸到温度相对稳定的控制室内，不影响热电偶热电势



a图回路的总热电势：

$$E_{ABCD}(t, t_0) = E_{AB}(t) + E_{BD}(t_c) + E_{DC}(t_0) + E_{CA}(t_c)$$

设 $t = t_0 = t_c$ $\Rightarrow E_{AB}(t_c) + E_{BD}(t_c) + E_{DC}(t_c) + E_{CA}(t_c) = 0$

因有 $E_{ABCD}(t, t_0) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_c) + E_{DC}(t_0) - E_{DC}(t_c) = E_{AB}(t, t_c) + E_{CD}(t_c, t_0)$

4. 热电偶温度测量

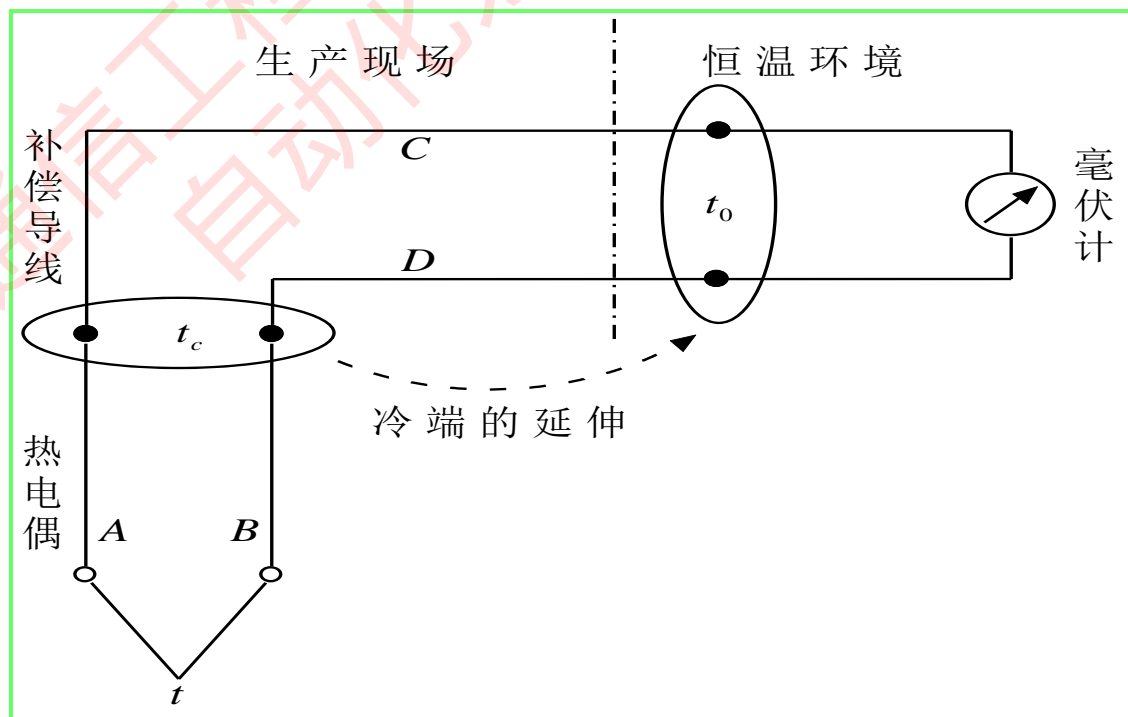
$$E_{ABCD}(t, t_0) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_C) + E_{DC}(t_0) - E_{DC}(t_C) = E_{AB}(t, t_C) + E_{CD}(t_C, t_0)$$

若 $E_{AB}(t_C, t_0) = E_{CD}(t_C, t_0) \quad t_C \leq 100^\circ\text{C}$ ← 等值替换条件

则有 $E_{ABCD}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_C) + E_{CD}(t_C, t_0) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_C) + E_{AB}(t_C) - E_{AB}(t_0) = E_{AB}(t, t_0)$

结论：将满足 $E_{AB}(t_C, t_0) = E_{CD}(t_C, t_0)$ 的补偿导线代替热电偶使冷端延伸，不会改变热电偶的热电势

补偿导线的连接示意图



4.热电偶温度测量

标准热电偶及其补偿导线

标准热电偶：热电势与温度的关系、允许误差、型号（分度号）按国际标准（IEC)统一规定。

我国部分标准化热电偶及其补偿导线

热电偶				配套的补偿导线（绝缘层着色）		
分度号	热电偶材料	测温范围/℃		型号	正极材料	负极材料
		长期	短期			
S	铂铑 ₁₀ - 铂	0 ~ 1300	1600	SC	铜（红）	铜镍（绿）
B	铂铑 ₃₀ - 铂铑 ₆	0 ~ 1600	1800	BC	铜（红）	铜（灰）
K	镍铬 - 镍硅	- 50 ~ 1000	1300	KX	镍铬（红）	镍硅（黑）
T	铜 - 康铜	- 200 ~ 300	350	TX	铜（红）	康铜（白）

补偿导线使用**注意事项**：

- ✓ 各种补偿导线只能与**相应型号**的热电偶匹配使用；
- ✓ 补偿导线与热电偶连接点的温度，不得超过规定的**使用温度范围**；
- ✓ 由于补偿导线与电极材料通常并不完全相同，因此**两连接点温度必须相同**；
- ✓ 在需高精度测温场合，处理测量结果时应加上补偿导线的**修正值**，以保证测量精度

4.热电偶温度测量

热电偶的冷端温度校正（补偿）

为什么要校正？

1. 冷端虽可以被延长到温度相对稳定的地方，但不能保证绝对不变
2. 国家标准规定的热电偶分度表是在冷端温度 $t_0=0$ 时制定的，当 t_0 不为零且经常变化时，会产生测量误差。

中间温度定则

热电偶AB在接点温度为 T 、 T_0 时的热电势 $E_{AB}(T, T_0)$ 等于热电偶AB在接点温度为 T 、 T_C 和 T_C 、 T_0 时的热电势 $E_{AB}(T, T_C)$ 、 $E_{AB}(T_C, T_0)$ 的代数和。

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_C) + E_{AB}(T_C, T_0)$$

意义：只需列出热电偶在参比（冷）端温度为 0°C 的分度表，就可以求出参比（冷）端在其它温度时的热电势值。

4.热电偶温度测量

1) 查表法(冷端温度不为零时的校正方法):

冷端温度 $t_n \Rightarrow E_{AB}(t_n, 0)$

热电偶测量电势 $E_{AB}(t, t_n)$

$$E_{AB}(t, 0) = E_{AB}(t, t_n) + E_{AB}(t_n, 0)$$

查表 \Rightarrow 得温度 t

例: K型热偶, 测 t 。冷端温度 $t_n = 30^\circ\text{C}$ 测得 $E(t, 30) = 21.995\text{mV}$, 查表 $E(30, 0) = 1.203\text{mV}$

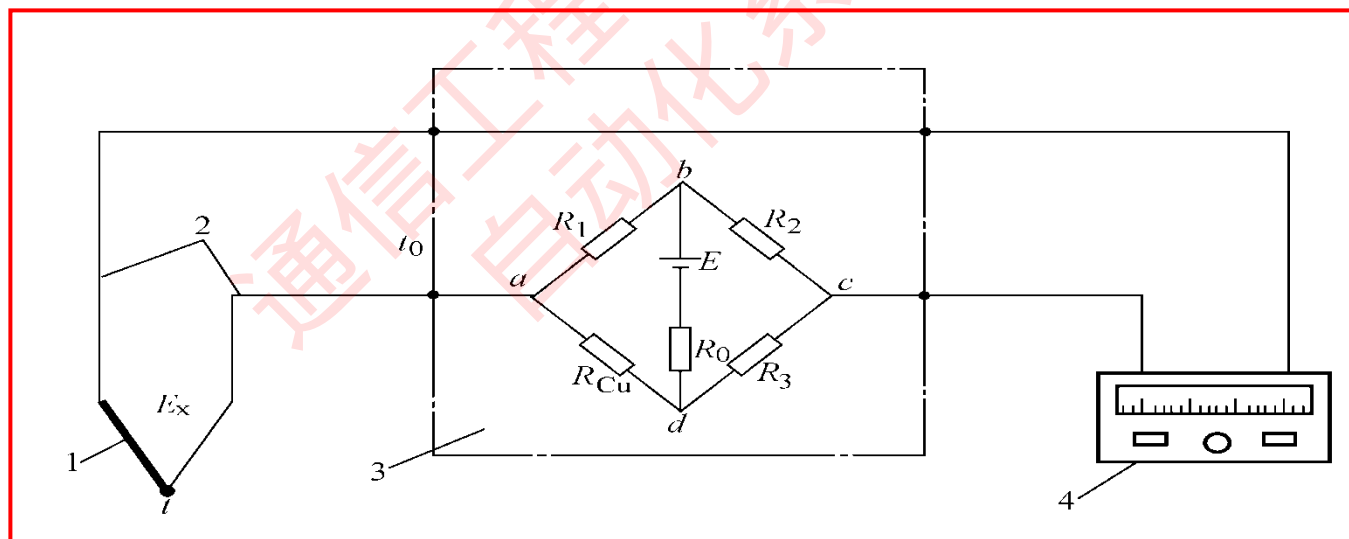
经计算: $E(t, 0) = E(t, 30) + E(30, 0) = 23.198\text{mV}$, 反查分度表: $t = 560^\circ\text{C}$

4. 热电偶温度测量

热电偶的冷端温度校正

2) **电桥补偿法**：利用电桥某桥臂电阻因环境温度变化产生的附加电压，补偿热电偶冷端温度变化引起的热电势的变化

$$U_{ac} + E_x = 0$$



其中， E_x 为冷端温度变化产生的对热电偶热电势的影响。

4.热电偶温度测量

例：铂铑₃₀ - 铂铑₆热电偶，冷端0 ~ 100℃：电势变化6μV/℃，桥臂电流为0.5mA，铜温度系数α = 0.004/℃。全补偿的条件为：

$$I(mA) \times R_{cu}(\Omega) \times 0.004 / ^\circ\text{C} = 6(\mu V / ^\circ\text{C})$$

经计算： $R_{cu}(t_0 = 0^\circ\text{C}) = 3\Omega$

加保护套管：可延长使用寿命；但使惯性滞后↑ (1.5 ~ 4min)，不加为毫秒级

接触式测温优点：精度高、小范围线性度与稳定性好测温范围宽 (500 ~ 2000℃)

缺点：高于2000℃时，不能长期使用，对运动物体的测温，不能使用

第8章 温度检测原理

8.1 概述

8.2 接触式测温方法

8.3 非接触测温方法

8.3 非接触测温方法

- 高温测量中应用最广泛，主要应用行业为冶金、铸造、热处理以及玻璃、陶瓷和耐火材料等工业生产过程中。
- 任何物体处于绝对零度以上时，都会以一定波长电磁波的形式向外辐射能量。辐射式测温仪表就是利用物体的辐射能量随其温度而变化的原理制成的。
- 测量时，只需把温度计光学接收系统对准被测物体，而不必与物体接触，因此可以测量运动物体的温度并不会破坏物体的温度场。此外，由于感温元件只接收辐射能，不必达到被测物体的实际温度，从理论上讲，它没有上限，可以测量高温。
- 非接触测温仪表分类：光学高温计、辐射式温度计

8.3 非接触测温方法



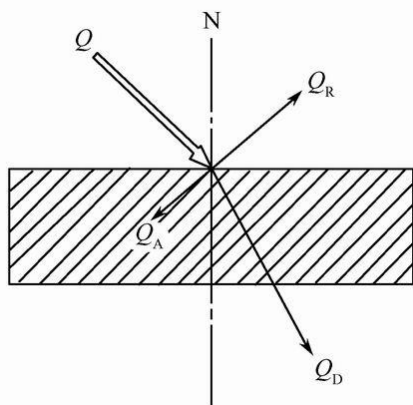
8.3.1 热辐射基本原理

8.3.2 辐射测温方法及其仪表

8.3.3 红外测温

8.3.1 热辐射基本原理

- 辐射换热是三种基本的热交换形式之一
 - 波长范围： $10^{-3}\text{m} \sim 10^{-8}\text{m}$
 - 在低温时，物体辐射能量很小，主要发射的是红外线。随着温度的升高，辐射能量急剧增加，辐射光谱也向短波方向移动，在 500°C 左右时。辐射光谱包括了部分可见光；到 800°C 时可见光大大增加，即呈现“红热”；如果到 3000°C 时，辐射光谱包括更多的短波成分，使得物体呈现“白热”
 - 辐射测温的基本原理：观察灼热物体表面的“颜色”来大致判断物体的温度
- 当物体接受到辐射能量以后，根据物体本身的性质，会发生部分能量吸收、透射和反射



$$Q = Q_A + Q_D + Q_R$$

Q—辐射能 单位为焦耳(J)

$$1 = \frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_D}{Q} + \frac{Q_R}{Q} = \alpha + \tau + \rho$$

α —吸收率；
 τ —透射率；
 ρ —反射率。

8.3.1 热辐射基本原理

物体分类：

□ 黑体（绝对黑体）：

照射到物体上的辐射能全部被吸收，既无反射也无透射。

□ 透明体：

照射到物体上的辐射能全部透射过去，既无吸收又无反射。

□ 镜体、白体：

照射到物体上的辐射能全部反射出去。若物体表现平整光滑，反射具有一定规律，则该物体称之为“镜体”；若反射无一定规律，则该物体称为“绝对白体”或者简称为“白体”。

在自然界中黑体、白体和透明体都是不存在的。

一般固体和液体的透射率 τ 值很小或等于零，而气体的 τ 值较大。对于一般工程材料来讲， $\tau = 0$ 而 $\alpha + \rho = 1$ ，称为灰体

8.3.1 热辐射基本原理

热辐射的重要参数

①**辐射能Q** 以辐射的形式发射、传播或接收的能量，单位为 J

②**辐射能通量** 是辐射能随时间的变化率，又称辐射率，单位是W

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

③**辐射出射度M** 又称辐射通量密度，离开辐射源表面一点处的面单元上的辐射能量除以该单元面积，称为该点的辐射出射度，单位为瓦/米²(W/m²)

$$M = \frac{d\Phi}{dS}$$

④**辐射亮度L** 简称辐亮度，表示面辐射源上某点在一定方向上的辐射强弱的物理量；指面辐射源在单位时间内通过垂直面元法线方向n上**单位面积、单位立体角**上辐射出的能量。辐射亮度实际上包括所有波长的辐射能量。

8.3.1 热辐射基本原理

名称	符号	定义	定义式	单位(SI)
辐射能	Q	电磁波的形式发射、传递或接收的能量		J
辐射能密度	W	辐射场单位体积的辐射能	$W = \frac{\partial Q}{\partial V}$	$J \cdot m^{-3}$
辐射功率	P	单位时间内发射、传输和接收的辐射能	$P = \frac{\partial Q}{\partial t}$	$W (J \cdot s^{-1})$
辐射出射度	M	源单位表面积向半球空间发射的辐射功率	$M = \frac{\partial P}{\partial A}$	$W \cdot m^{-2}$
辐射强度	I	点源向某方向单位立体角发射的辐射功率	$I = \frac{\partial P}{\partial \Omega} \Big _{\theta}$	$W \cdot sr^{-1}$
辐亮度	L	扩散源在某方向上单位投影面积和单位立体角内发射的辐射功率	$L = \frac{\partial^2 P}{\partial A_{\theta} \partial \Omega} \Big _{\theta}$	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$
辐照度	E	入射到单位接收表面积上的辐射功率	$E = \frac{\partial P}{\partial A}$	$W \cdot m^{-2}$

8.3.1 热辐射基本原理

基尔霍夫定律

- 各物体的辐射出射度和吸收率的比值都相同，和物体的性质无关，是物体的温度和发射波长的函数

$$\frac{M_0(\lambda, T)}{\alpha_0(\lambda, T)} = \frac{M_1(\lambda, T)}{\alpha_1(\lambda, T)} = \frac{M_2(\lambda, T)}{\alpha_2(\lambda, T)} = \dots = f(\lambda, T)$$

式中： $M_0(\lambda, T)$, $M_1(\lambda, T)$, $M_2(\lambda, T)$ — 物体的单色(λ)辐射出射度；
 $\alpha_0(\lambda, T)$, $\alpha_1(\lambda, T)$, $\alpha_2(\lambda, T)$ — 物体的单色(λ)吸收率。

8.3.1 热辐射基本原理

- 若物体 A_0 绝对黑体, 那么 $\alpha_0(\lambda, T)$, 根据基氏定律

$$\frac{M_1(\lambda, T)}{\alpha_1(\lambda, T)} = \frac{M_2(\lambda, T)}{\alpha_2(\lambda, T)} = \dots = M_0(\lambda, T)$$

物体的**辐射出射度和吸收率之比**等于绝对黑体在同样的温度下、相同波长时的辐射出射度。这是基氏定律的另一种说法。

设 $M(\lambda, T)$ 为物体A在波长为 λ 、温度为 T 下的辐射出射度, 那么

$$\frac{M(\lambda, T)}{M_0(\lambda, T)} = \alpha(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T)$$

式中, ε 称为物体A的单色辐射率, 或称为单色黑度系数, 表征了在一定的温度和波长下, 物体A的辐射出射度与相同温度和波长下黑体的辐射出射度之比

基尔霍夫定律说明, 物体的辐射能力越大, 其吸收能力也越大

8.3.1 热辐射基本原理

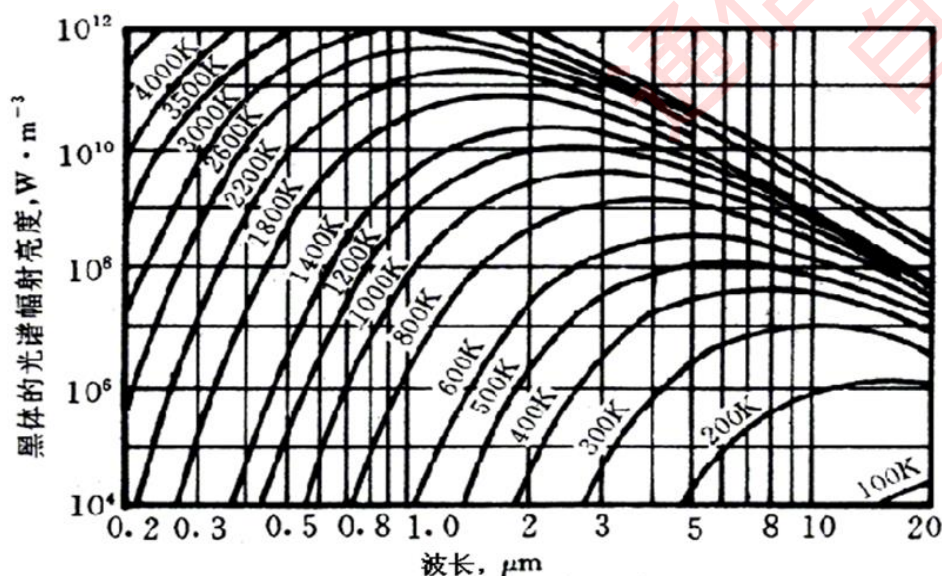
维恩公式

- 理论上说明了黑体在各种温度下能量波长分布的规律

$$M_0(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} e^{\frac{C_2}{\lambda T}}$$

黑体的辐射本领是波长和温度的函数，当波长一定时，黑体的辐射本领就仅仅是温度的函数，即 $M_0(\lambda, T) = f(T)$

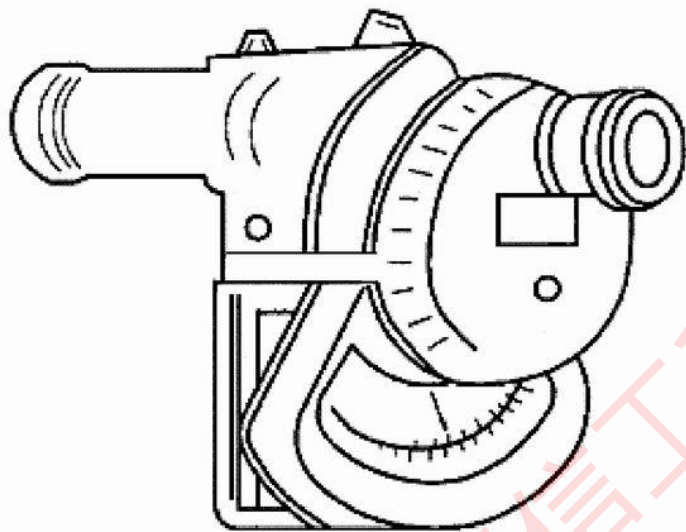
上式就是光学高温计和比色高温计测温的理论根据



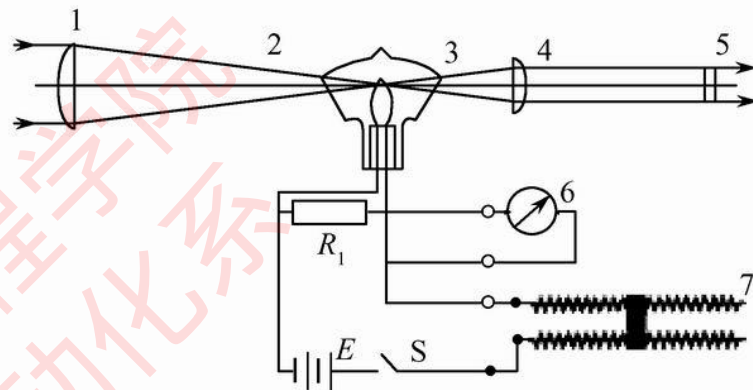
- 每条曲线均有一个极大值
- 极值随着温度升高而向波长短的方向移动
- 不同温度下的曲线，其曲线峰值点的波长 λ_m 和温度 T 均满足维恩位移定律

8.3.2 辐射测温方法及其仪表

1. 光学高温计



(a)



(b)

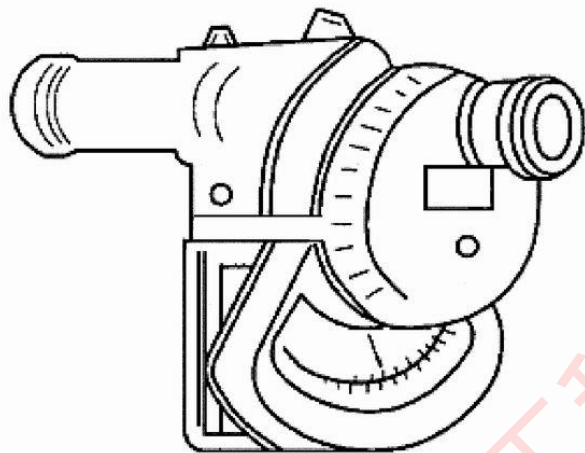
1 - 物镜; 2 - 吸收玻璃; 3 - 灯泡; 4 - 红色滤波片; 5 - 目镜; 6 - 指示仪器; 7 - 滑线电阻; E - 电源; K - 开关; R_1 - 刻线调整电阻

□ 光学高温计可用来测量800 ~ 3200°C的高温。

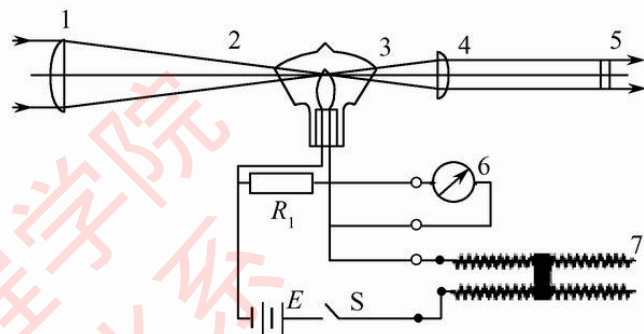
□ 由于采用肉眼进行色度比较，所以测量误差与人的经验有关

8.3.2 辐射测温方法及其仪表

工业用光学高温计分类



(a)



(b)

1 - 物镜; 2 - 吸收玻璃; 3 - 灯泡; 4 - 红色滤波片; 5 - 目镜; 6 - 指示仪器; 7 - 滑线电阻; E - 电源; K - 开关; R_1 - 刻线调整电阻

隐丝式

利用调节电阻来改变高温灯泡的工作电流，当灯丝的亮度与被测物体的亮度一致时，灯泡的亮度就代表了被测物体的亮度温度。

恒定亮度式

利用减光楔来改变被测物体的亮度，使它与恒定亮度温度的高温灯泡相比较，当两者亮度相等时，根据减光楔旋转的角度来确定被测物体的亮度温度。由于隐丝式光学高温计的结构和使用方法都优于恒定亮度式，所以应用广泛。

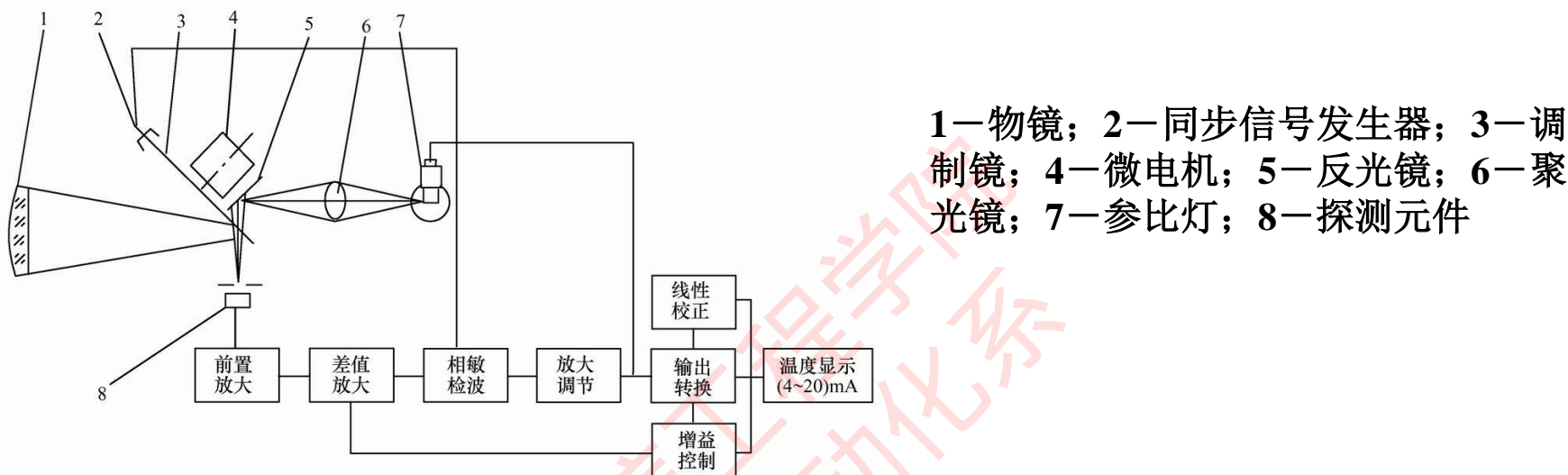
8.3.2 辐射测温方法及其仪表

2. 光电高温计

- **光学高温计**是由人工操作来完成亮度平衡工作的，其测量结果带有操作者的主观误差。它不能进行连续测量和记录，当被测温度低于 800°C 时，光学高温计对亮度无法进行平衡。
- **光电高温计**是在光学高温计测量理论的基础上发展起来的一种新型测温仪表。它采用新型的光电器件，自动进行平衡，达到连续测量的目的。

8.3.2 辐射测温方法及其仪表

WDL-31型光电高温计的工作原理



- ①采用光敏电阻或者光电池作为感受辐射源的敏感元件来代替人眼的观察；
- ②采用一参考辐射源与被测物体进行亮度比较，由光敏元件和电子放大器组成鉴别和调整环节，使参考辐射源在选定的波长范围内的亮度自动跟踪被测物体的辐射亮度，当达到平衡时即可得到测量值；
- ③在平衡式测量方式中，光敏元件只起指零作用，它的特性如有变化，对测量结果影响较小，参考辐射源选用钨丝灯泡，能保持较高的稳定性，因此具有较高的精度和连续测量的特性；
- ④设计了手动值修正环节，可显示物体的真实温度；
- ⑤采用新型光敏元件，测量范围宽，约为200~1600°C。

8.3.2 辐射测温方法及其仪表

2. 光电高温计

□ 仪器的工作光谱范围由光学系统和探测元件决定

量程范围在 $400 \sim 800^{\circ}\text{C}$ 及以下各量程，采用硫化铅光敏电阻作探测元件，并配合锗滤光片。光谱范围短限由锗滤光片确定，长限由光学玻璃材质的物镜确定，约在 $1.8 \sim 2.7$ 。峰值由探测元件确定，约为2.5。

量程范围 $600 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 及以上各量程，采用硅光电池作探测元件，并配合HB850有色玻璃滤光片。光谱范围的短限也由滤光片确定，长限和峰值由探测元件确定。光谱范围约在 $0.8 \sim 1.1$ ，峰值约为0.95，均在红外线波长范围内。

□ 仪器的量程范围用光学衰减的方式改变

各种量程都保持参比灯工作电流在某一固定范围内变化，即在量程上限时工作电流不超过250mA。

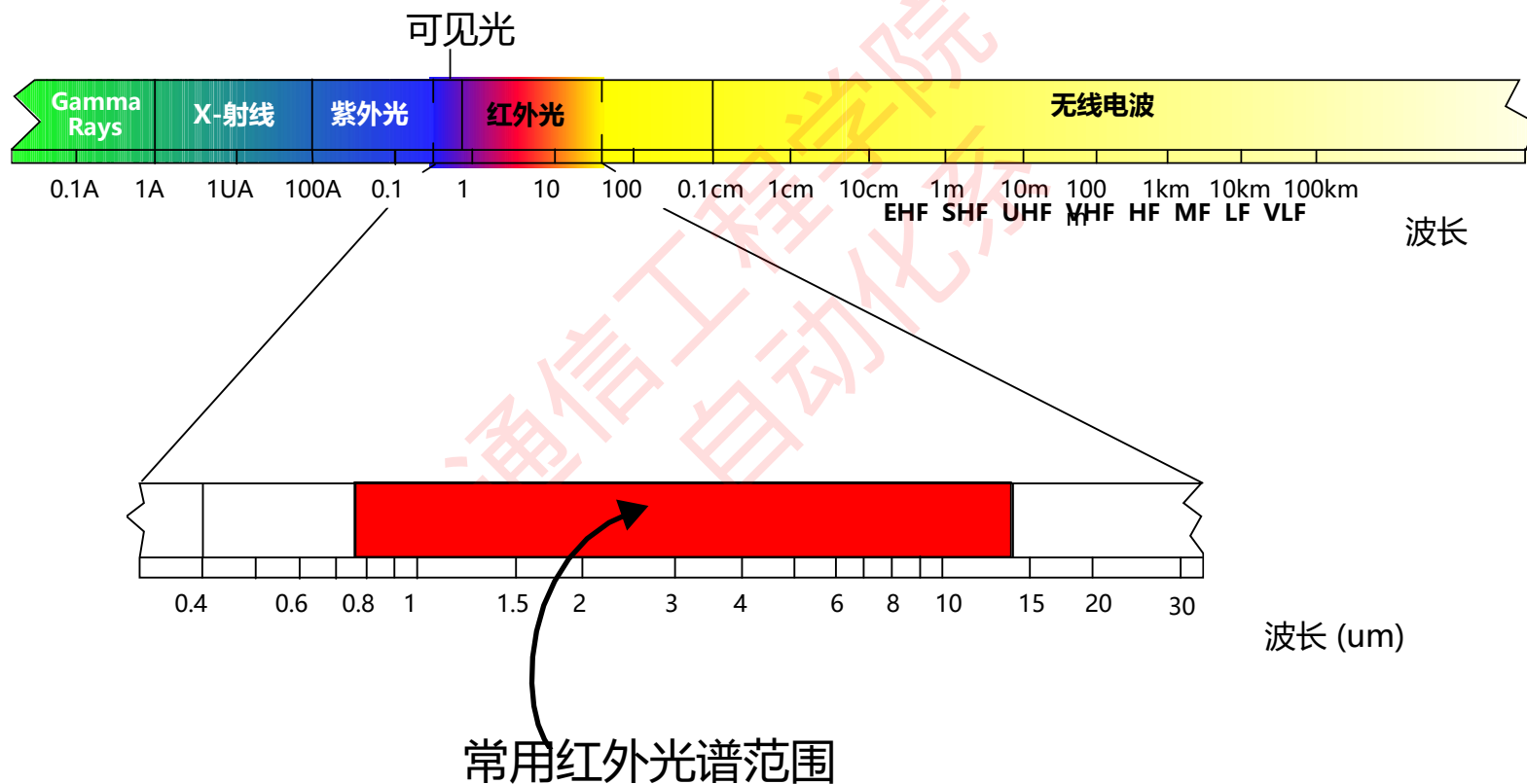
对于低温量程，将参比灯的辐射能量衰减；

对于高温量程，则将被测辐射能量进行衰减。

探测元件为硫化铅光敏电阻时，衰减玻璃选用 GRB_1 隔热玻璃。探测元件为硅光电池时，采用 LB_6 绿色玻璃。

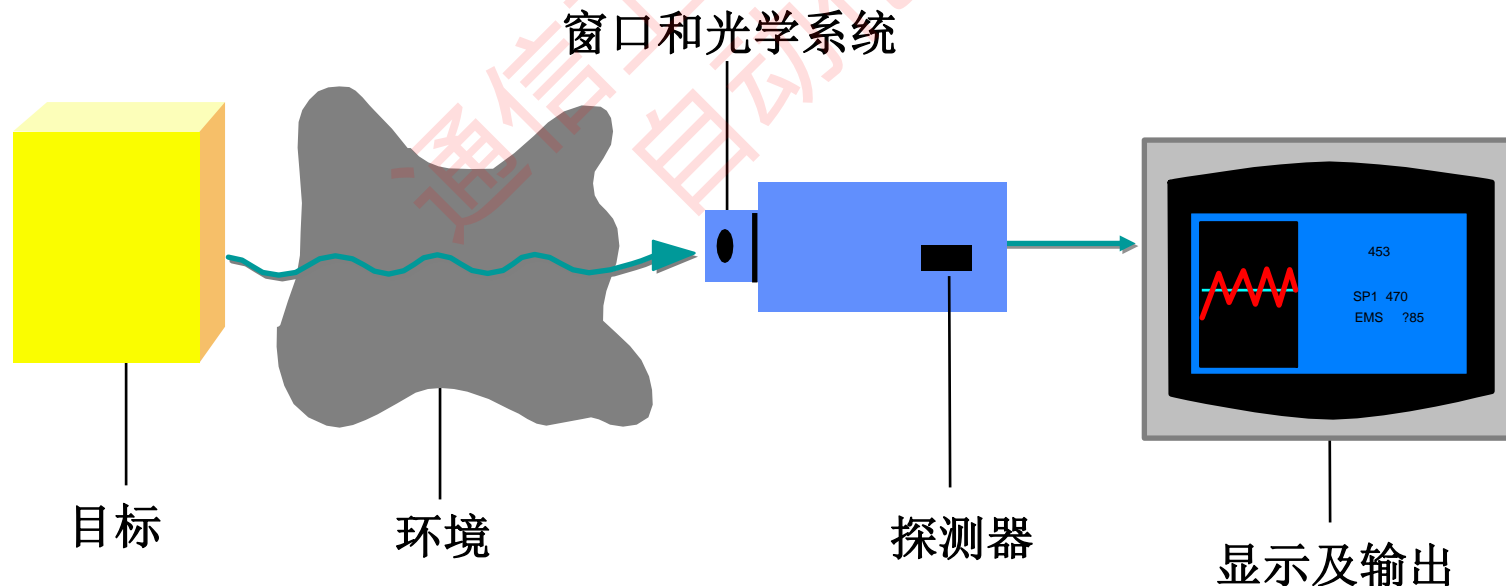
8.3.3 红外测温

- 红外测温仪可捕捉从所有物体辐射出的红外能量。红外辐射是电磁频谱的一部分，电磁频谱中包括无线电波、微波、可见光、紫外线、伽玛射线和X光。



8.3.3 红外测温

红外测温仪由光学系统、光电探测器、信号放大器及信号处理、显示输出等部分组成。光学系统汇聚其视场内的目标红外辐射能量，红外能量聚集在光电探测器上并转变为相应的电信号，该信号再经换算转变为被测目标的温度值。



8.3.3 红外测温

优点

- 非接触测量：它不需要接触到被测温度场的内部或表面，因此，不会干扰被测温度场的状态，测温仪本身也不受温度场的损伤。
- 测量范围广：因其是非接触测温，所以测温仪并不处在较高或较低的温度场中，而是工作在正常的温度或测温仪允许的条件下。一般情况下可测量负几十度到三千多度。
- 测温速度快：即响应时间快，只要接收到目标的红外辐射即可在短时间内定温。
- 准确度高：红外测温不会与接触式测温一样破坏物体本身温度分布，因此测量精度高。
- 灵敏度高：只要物体温度有微小变化，辐射能量就有较大改变，易于测出，可进行微小温度场的温度测量和温度分布测量，以及运动物体或转动物体的温度测量。
- 使用安全及使用寿命长。

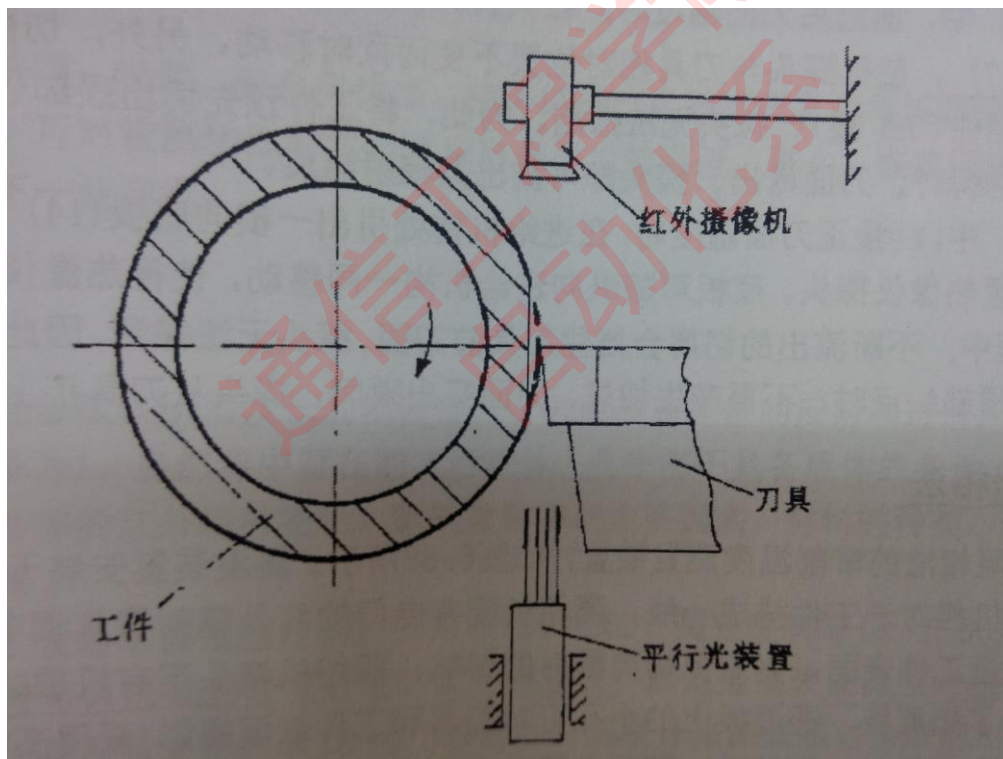
缺点

- 易受环境因素影响（环境温度，空气中的灰尘等）。
- 对于光亮或者抛光的金属表面的测温读数影响较大。
- 只限于测量物体外部温度，不方便测量物体内部和存在障碍物时的温度。

8.3.3 红外测温

红外摄像法测量切削温度

将红外摄像机对准处于切削状态的刀具，在刀头的下方加一个平行光源，这样可使温度场处于刀具轮廓的背景中，同时也既反映了温度场，又反映了温度场在刀具上的相对位置

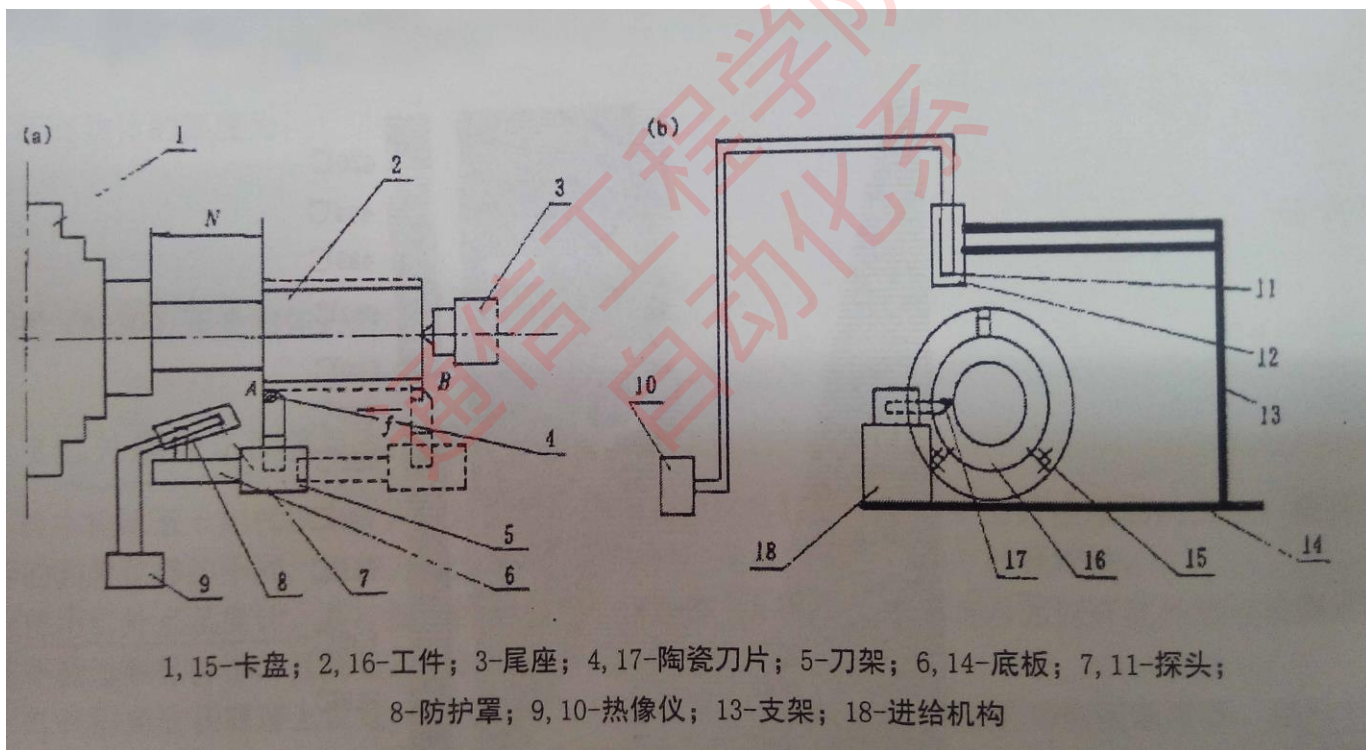


红外摄像法测温装置

8.3.3 红外测温

热像仪法实测陶瓷刀具切削区温度场

采用红外热成像技术接收物体发射的辐射热，并转化为数字信号以红外信号输出，同时可进行数据存储和处理，可测较高的温度、导热系数较小的物体及很微小面积上的温度，并且精度高、响应快，不破坏被测温度场，因此适宜陶瓷刀具切削区的高温动态测试。



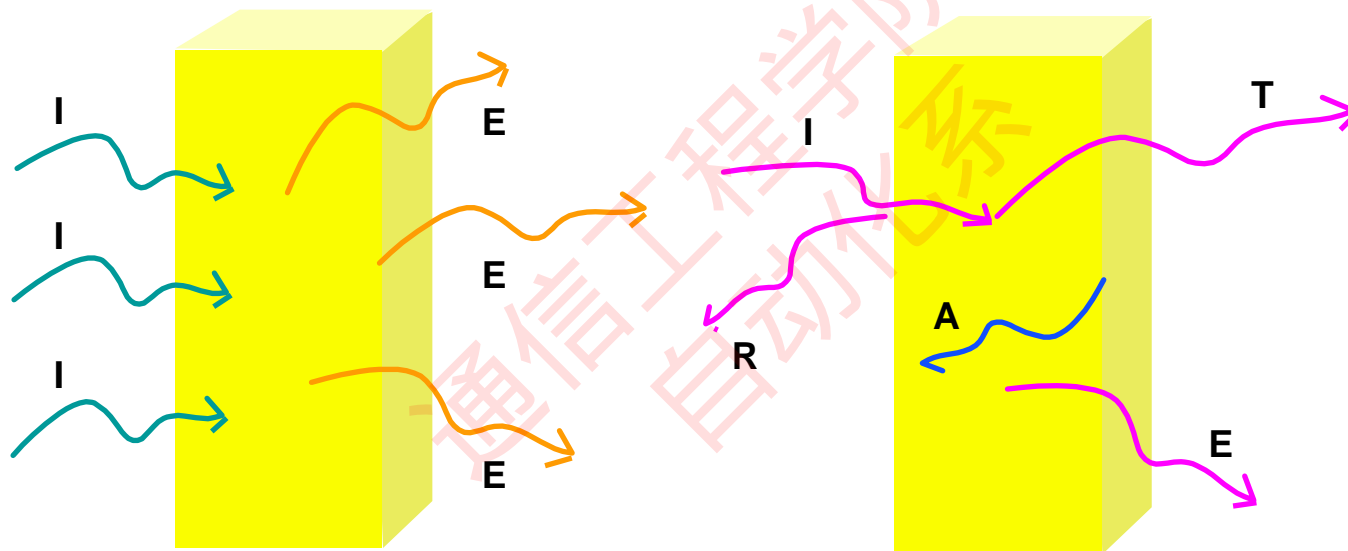
热像仪测定陶瓷刀具后刀面 (a) 前刀面 (b) 的示意图

8.3.3 红外测温

红外测温注意事项

- 发射率

发射率决定了实际物体的红外辐射特性



“理想黑体”

既是完全吸收体
也是完全发射体

发射率 = 1

“实际物体”

部分能量被反射
部分能量透过

发射率 < 1

8.3.3 红外测温

- 影响发射率的主要因素

- ❖ 材料种类
- ❖ 表面状况(抛光,粗糙,氧化,喷砂)
- ❖ 表面几何形状(平面,凹面,凸面)
- ❖ 表面理化结构状态 (如沉积物, 氧化膜, 油膜等)
- ❖ 透过率(例如塑料薄膜)
- ❖ 测量温度
- ❖ 测量角度

- 测量非金属材料表面温度可以选择固定发射率的红外测温仪。
- 测量金属材料表面温度时应采用发射率可调节的红外温度计。

8.3.3 红外测温

• 确定测温范围

- 测温范围是测温仪最重要的一个性能指标。每种型号的测温仪都有自己特定的测温范围。
- 根据黑体辐射定律，在光谱的短波段由温度引起的辐射能量的变化将超过由发射率误差所引起的辐射能量的变化。因此，**测温时应尽量选用短波较好。**

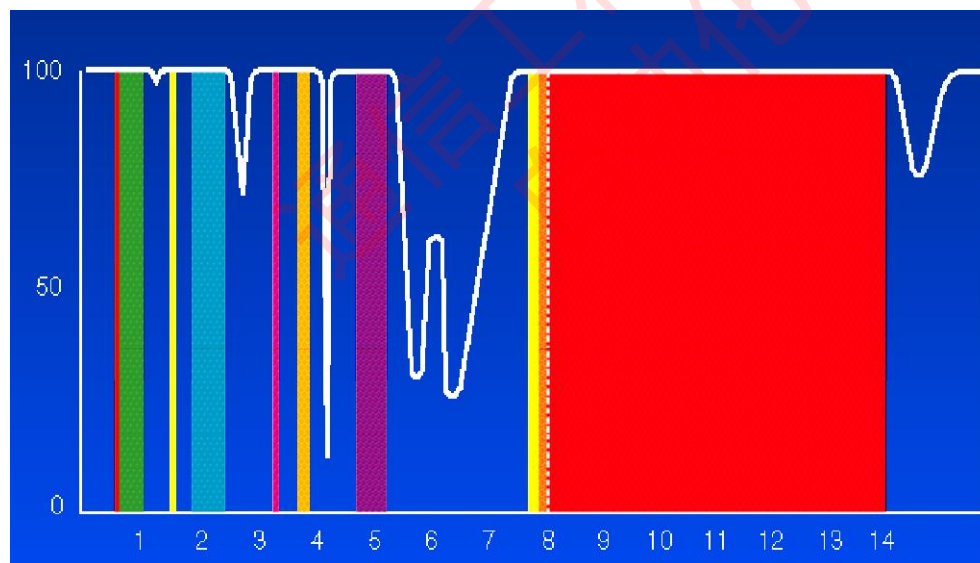
• 确定波长范围

- 在高温区，测量金属材料的最佳波长是近红外，可选用 $0.9\text{-}2.5\mu\text{m}$ 。
- 低温区测量一般选择 $8\text{-}14\mu\text{m}$ 波长的红外测温仪。其他温区可选用 $1.6\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ 和 $3.9\mu\text{m}$ 。
- 并不是所有红外波长都适宜测量温度，能够顺利通过大气红外辐射主要有三个波长范围： $0.9\text{-}2.5\mu\text{m}$ 、 $3\text{-}5\mu\text{m}$ 、 $8\text{-}14\mu\text{m}$ ，通常把这三个波长范围称为红外测温仪的大气窗口。

8.3.3 红外测温

• 大气窗口

大气中的水蒸气、二氧化碳等对某些红外辐射波段不吸收或极少吸收，有利于能量进行传输从而能被红外测温仪探测到。这样的特殊红外波段即为所谓“大气窗口”。



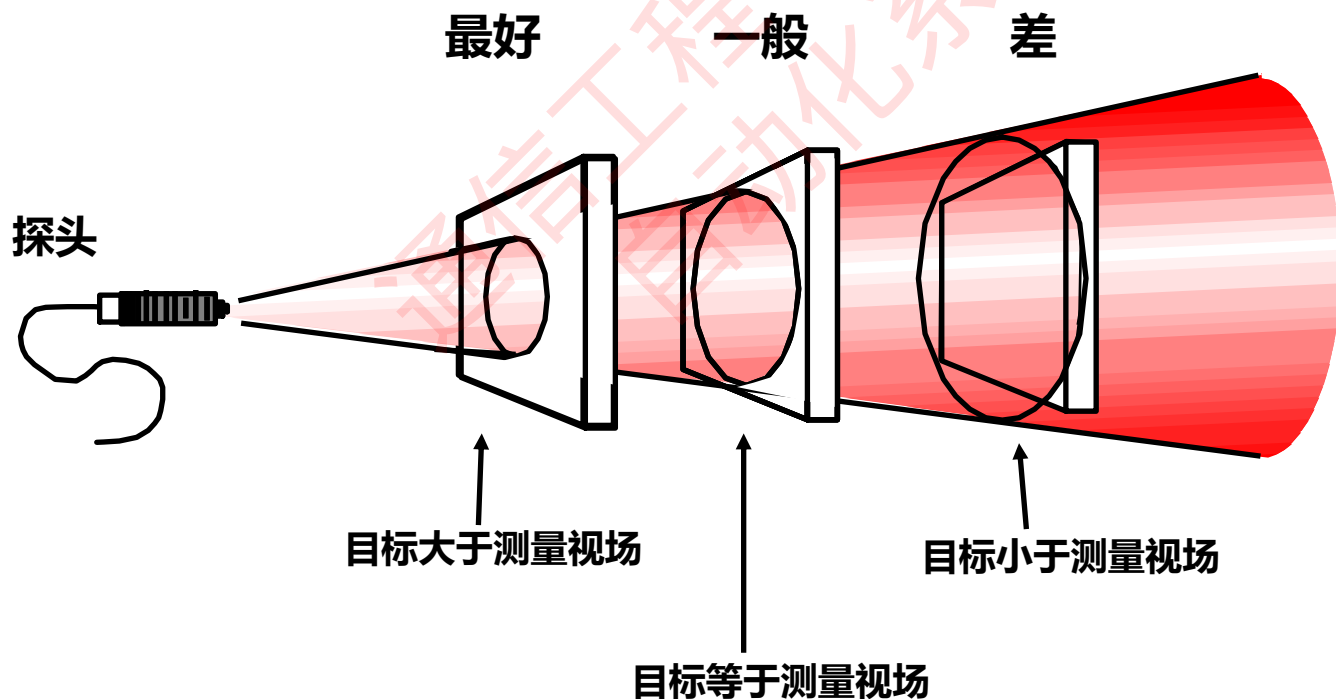
红外波段的选取要考虑“大气窗口”的影响

宜用0.9-2.5μm、3-5μm、8-14μm

8.3.3 红外测温

• 目标与视场

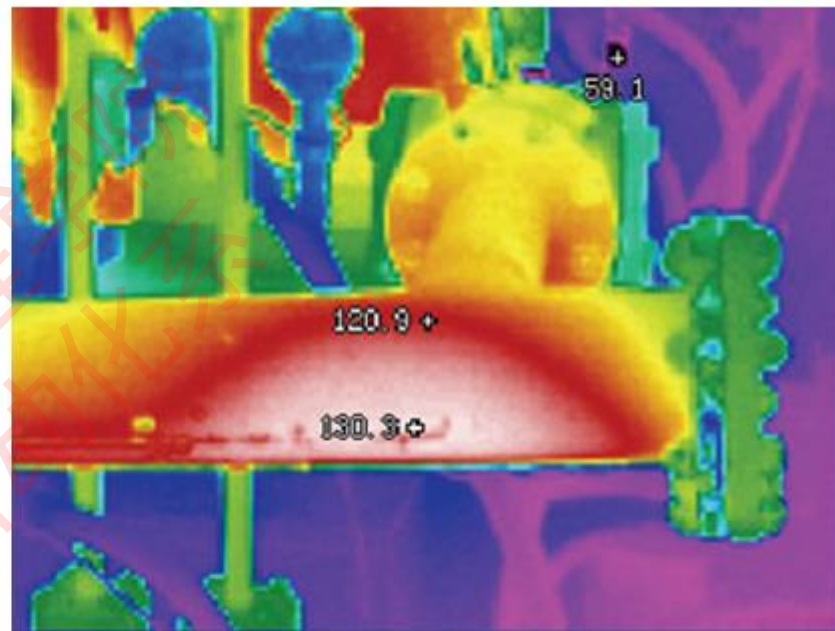
要确保目标大于仪器所测圆点的大小。目标越小，则应离得越近。如果精度非常重要，则要确保目标至少是测量圆点大小的两倍



8.3.3 红外测温



热像仪



热像仪用于管道保温检测的图像