

工程师用的实验方法

(下 册)

J.P. 荷 尔 曼

成都科学技术大学机械工程系

一九八〇年十二月

目 录

第八章 温度测量

- 8-1 前言
- 8-2 温标
- 8-3 理想气体温度计
- 8-4 用机械效应测量温度
- 8-5 用电效应测量温度
- 8-6 用辐射测量温度
- 8-7 传热对温度测量的影响
- 8-8 热系统的暂态响应
- 8-9 热电偶补偿
- 8-10 高速流动中的温度测量
- 8-11 总结

第九章 热特性和迁移特性的测量

- 9-1 前言
- 9-2 导热率的测量
- 9-3 液体和气体的导热率
- 9-4 粘度测量
- 9-5 气体扩散
- 9-6 量热法
- 9-7 对流传热的测量
- 9-8 温度测量
- 9-9 热通量计

第十章 力、扭矩和应变测量

- 10-1. 前言
- 10-2. 质量平衡测量
- 10-3. 测量力的弹性元件
- 10-4. 扭矩测量
- 10-5. 应力和应变
- 10-6. 应变测量
- 10-7. 电阻应变片
- 10-8. 电阻应变片输出的测量
- 10-9. 温度补偿
- 10-10. 三向应变计
- 10-11. 不粘合的电阻应变片

第十一章 运动和振动的测量

- 11-1. 前言
- 11-2. 两种简单的测振仪
- 11-3. 地震仪的原理
- 11-4. 应用地震仪应考虑的问题
- 11-5. 声测量

第十二章 热辐射和核辐射的测量

- 12-1. 前言
- 12-2. 热辐射的检测
- 12-3. 辐射率的测量
- 12-4. 反射率和透射率
- 12-5. 太阳辐射的测量
- 12-6. 核辐射
- 12-7. 核辐射的检测

12-8. 盖革-米勒计数器

12-9. 电离室

12-10. 摄影检测法

12-11. 闪烁计数器

12-12. 中子的检测

12-13. 计数统计学

第十三章 空气污染采样和测量

13-1. 前言

13-2. 测量污染的单位

13-3. 空气污染标准

13-4. 一般的空气采样系统

13-5. 气体采样法

13-6. 粒子采样法

13-7. 二氧化硫的测量

13-8. 燃烧产物的测量

13-9. 暗度测量

13-10. 气味测量

第十四章 数据的收集和处理

14-1. 前言

14-2. 通用的数据收集系统

14-3. 再论信号

14-4. 数据传输

14-5. 模数和数-模转换

14-6. 数据的存储和显示

14-7. 代替布线逻辑的程序

· 4 ·

14-8 总结

附录

第 八 章 温 度 测 量

8-1. 前 言

对大多数人来说，温度具有直观的概念，它可以说明一个物体是“热”的或是“冷”的。按照热力学第二定律的解释，温度与热有关，因为众所周知，在无其他影响下，热只能从高温传向低温。气体动力理论和统计热力学中，已经证明温度与理想气体的分子的平均动能有关。统计热力学的进一步发展，证明了液体和固体中温度与能量级之间的关系。我们不可能讨论许多有关温度概念的理论问题，而只能指出它在物理学科各分支中的重要性；因此，实验工程人员应熟悉温度测量中所使用的方法，温度的热力意义由奥贝尔特 (Obert) [8] 特里巴斯 (Tribus) [12] 罗西尼 (Rossini) [9] 和荷尔曼 (Holman) [18] 详细讨论。

因为压力、体积、电阻、膨胀系数等等都通过基本分子结构与温度发生关系，所以这些物理量都随温度而变化，而这些变化可以用来测量温度。通过同规定的标准比较可以进行如第二章所讨论过的校准。国际温标用可观察出的材料特征来定义温度。

8-2. 温 标

使用中的两种温标是华氏和摄氏温标。这两种标度是以标准大气压下水的冰点和沸点之间增量数的规定为依据的。在这些点之间，摄氏温标有 100 个单位，而华氏温标则有 180 个单位。绝对摄氏温标称为开氏 (Kelvin) 温标，而绝对华氏温标称为兰氏 (Rankine) 温标。这两种绝对温标是这样规定的，即要使它们尽可能地同绝对热力学的温标

严格一致。不管所用的绝对温标如何，两种绝对温标的零点都代表相同的物理状态，而两种值之比是相同的。即

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{\text{Rankine}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{\text{Kelvin}} \quad (8-1)$$

在摄氏温标中把水的沸点人为地取为 100° ，而在华氏温标中则取为 212° 。温度之间的关系如图 8-1 所示。显然有下列关系：

$$^\circ\text{F} = 32.0 + \frac{9}{5}^\circ\text{C} \quad (8-2a)$$

$$^\circ\text{R} = \frac{9}{5}\text{K} \quad (8-2b)$$

8-3 理想气体温度计

低压时理想气体的特性，是可以用来作为实验副标准的温度测量器件的基础。理想气体的状态方程是：

$$pV = nRT \quad (8-3)$$

式中 V 为气体所占的容积， m 为气体的质量，而 R 为特定气体的气体常数，可由下式求出：

$$R = \mathcal{R} / M$$

式中 $\mathcal{R}$ 为通用气体常数，其值为 8314.5 焦耳/公斤·摩尔开氏温度 ($\text{J/kg} \cdot \text{mol} \cdot \text{K}$)，而 M 为气体的分子量。如图 8-2 所示，在气体温度计中，用气体充满一个固定的容积并放在要测的温度处。测出在温度 T 时的气体系统压力。其次把该容器放在标准参考温度中（如 2—4 节所述），并在这些条件下测出压力。在容积一定时，由式 (8-3) 可得：

$$T = T_{\text{参考}} \left(\frac{p}{p_{\text{参考}}} \right) V = \text{常数} \quad (8-4)$$

$^\circ\text{K}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{F}$	$^\circ\text{R}$
2273.16	2000	3632	4091.69
1773.16	1500	2732	3191.69
1273.16	1000	1832	2291.69
773.16	500	932	1391.69
673.16	400	752	1211.69
573.16	300	572	1031.69
473.16	200	392	851.69
373.16	100	212.0	671.69
273.16	0	32.0	491.69
233.16	-40	-40	419.69
173.16	-100	-148	311.69

图 8-1 华氏与摄氏温标间的关系

现在假定从该容器中取出一些气体并重复测量压力。在通常情况下，当气体量变化时，式(8-4)中的压力比将稍有不同。然而，不管所用的气体如何，可以重复进行一系列测量并把结果画出，如图 8-3

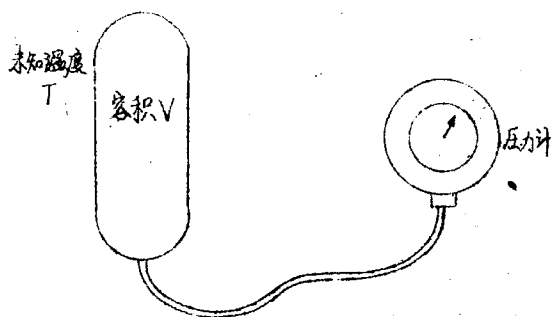


图 8-2 理想气体温度计的示意图

所示。当把曲线外推到零压时，就会得到由理想气体状态方程所规定的真实温度。气体温度计可以通过外推法来测量低到 1K 的温度。

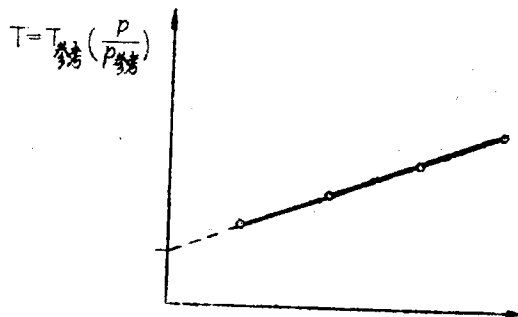


图 8-3 用理想气体温度计测量的结果

8-4 用机械效应测量温度

某些温度测量器件可以归为按机械原理工作的。在这种意义上，我们将讲述那些按机械尺寸随温度而变化的原理工作的器件。

玻璃温度计是最普通的一种温度测量器件。这种器件的结构细节如图 8-4 所示。在温度计下部的一个相当大的球里装了大部分液体，液体在受热时膨胀并上升到毛细管中。管子上蚀刻有刻度。在毛细管的顶部还有另一个球，以便在温度计的温度范围偶尔超过时作为安全装置。酒精和水银是最常用的液体。酒精的优点是其膨胀系数比水银的膨胀系数大，但仅限于低温测量，因为在高温时酒精有完全蒸发的趋势。水银在其冰点 -38.78°F (-3.78°C) 以下不能用。毛细管的大小取决于测温球的大小、所用液体以及对温度计温度范围的要求。

在工作中，把玻璃温度计的球放在测温度处。温度升高会使液体在球中膨胀，并上升到毛细管中，从而指示出温度。必须指出：由温度计记录的膨胀是液体膨胀和玻璃膨胀之差。这个差不仅是从周围环境到球的热传导的函数，而且也是从杆部传导到球的热量的函数，杆部的热传导相对于从环境到球的热传导越大，则误差越大。为了计入这种热传导的影响，温度计通常是在某种规定的浸没深度下校准的。高级水银温度计除了在温度计上刻有温标刻度外，还有一个指出适当浸没深度的标记。很精确的水银温度计可以从国家标准局得到，每一个温度计都有定标说明。

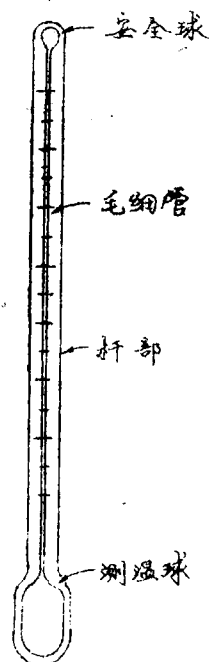


图 8-4 水银温度计示意图

水银温度计一般可用到大约不超过 600°F (315°C) 的温度，但是，通过把水银上面的空间充上象氮那样的气体，就可以把测温范围提高到 1000°F (538°C)。这种办法使水银上的压强增大，使沸点升高，从而可以把温度计用来测量高的温度。

一种应用很广的温度测量方法是双金属片。把具有不同热膨胀系数的两片金属粘合在一起，以形成图 8-5 所示的装置。当双金属片受到比粘合温度更高的温度时，它将朝着一个方向弯曲；当它受到比粘合温度更低的温度时，它将朝着另一个方向弯曲。艾斯金 (Eskin) 和弗雷兹 (Fritze) [3] 给出了双金属片的计算方法。曲率半径 r 可由下式计算：

$$r = \frac{t \{ 3(1+m)^2 + (1+mn) [m^2 + (1/mn)] \}}{6(\alpha_2 - \alpha_1)(T - T_0)(1+m)^2} \quad (8-5)$$

式中 t = 粘合片的组合厚度；

m = 低膨胀材料对高膨胀材料的厚度比;

n = 低膨胀材料对高膨胀材料的弹性模量比;

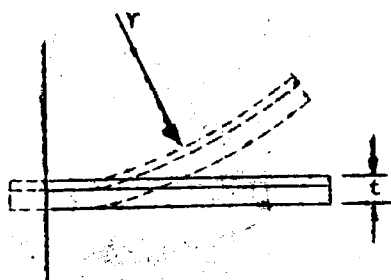
α_1 = 较低的膨胀系数;

α_2 = 较高的膨胀系数;

T = 温度;

T_0 = 原始的粘合温度.

一些常用材料的热膨胀系数在表 8-1



中列出.

图 8-5 双金属片

表 8-1 一些通用热材料的机械特性

材 料	热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}$	弹性模量	
		磅/平方英寸	10 亿牛顿/米 ²
殷铜	1.7×10^{-6}	2.14×10^6	147
黄铜	2.02×10^{-5}	14.0×10^6	96.5
蒙乃尔合金	1.35×10^{-5}	26.0×10^6	179
因康镍合金	1.25×10^{-5}	31.5×10^6	217
316 型不锈钢	1.6×10^{-5}	2.8×10^6	193

例 8-1. 一种双金属片是由在 30°C 时粘合在一起的黄铜片和殷铜片制成。每种片的厚度为 0.3 毫米。当金属片受到 100°C 的温度时，计算曲率半径。

解：根据表 8-1 的特性，由式 (8-5) 可得

$$T - T_0 = 100 - 30 = 70^{\circ}\text{C}$$

$$m = 1.0$$

$$n = 147 / 96.5 = 1.52$$

$$\alpha_1 = 1.7 \times 10^{-6} ^{\circ}\text{C}^{-1}, \quad \alpha_2 = 2.02 \times 10^{-5} ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$t = (2)(0.3 \times 10^{-3}) = 0.6 \times 10^{-3} \text{ 米}$$

所以

$$r = \frac{(0.6 \times 10^{-3}) [(3)(2)^2 + (1+1.52)(1+1/1.52)]}{6(2.02-0.17)(10^{-5})(70)(2)^2} = 0.312 \text{ 米}$$

液体膨胀温度计是目前工业中用来作温度测量的最经济、通用和广泛应用的器件之一。工作原理如图 8-6 所示。装有液体、气体或蒸汽的球被浸在周围环境物中。球通过毛细管连接到某种压力测量器件，例如图 8-6 所示的包登 (Bourdon) 压力计。温度提高将会使液体或气体膨胀，从而增加了压力计中的压力，这样，就把压力作为温度的指标。由球、毛细管和压力计组成的整个系统可以直接标定。显然，毛细管的温度可能影响该器件的读数，因为毛细管中有一定容积的流体。可是，如果球中用的是液体和蒸汽的平衡混合物，并且假定球的温度总量比毛细管的温度高，则这个问题可以缓和。在这种情况下，毛细管中的流体总是在过冷却的液态下，而压力就能很好地说明装在球中的平衡混合物的每一种温度。

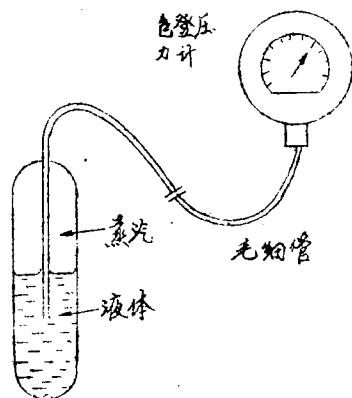


图 8-6. 液体温度膨胀计

200 英尺 (60 米) 长的毛细管可以用于液体膨胀温度计中。状态响应主要取决于球的尺寸和所装液体的热性能。最高的响应可以通过用一根短毛细管把小球连接到某种电气——压力传感器上来得到。

8-5 用电效应测量温度

温度测量的电气方法是很方便的方法，因为它们能发出一种易于检测、放大或用于控制的信号。此外，当恰当地校准和补偿时，这类器件

通常是相当准确的。

电阻温度计

电阻温度计是测量温度的一种相当精确的方法。它由放于待测温度中的某种电阻元件组成。温度是通过测量元件电阻的变化来指示的。有几种材料可以用作电阻元件，其特征列于表 8-2 中。电阻的线温度系数由下式确定：

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 T_2 - R_2 T_1} \quad (8-6)$$

式中 R_2 和 R_1 分别为材料在温度 T_2 和 T_1 时的电阻。式 (8-6) 中的关系式常用在较窄的温度范围，使电阻随温度的变化近似于线性关系。对于较宽的温度范围，材料的电阻常用平方关系表示：

$$R = R_0 (1 + \alpha T + b T^2) \quad (8-7)$$

式中 R = 在温度 T 时的电阻；

R_0 = 在 0°F 时的电阻；

α, b = 由实验决定的常数。

值得注意的是，铂电阻温度计用来作为氧点和冰点之间的国际温标，如第二章所述。

根据应用情况可以用各种各样的方法来设计电阻温度计。在所有情况下，都必须注意保证电阻丝中没有机械应力，并且安装时要使湿气不能与金属丝接触并影响测量。

电阻测量可以用第四章所述的某类桥式电路来进行。对于稳态测量，只需要零状态就足够了，而暂态测量则通常要采用不平衡电桥。电阻温度计中误差的主要来源之一，是把元件接到桥式电路的导线电阻的影响。有几种线路可以用来减小这种影响，如图 8-7 所示。西门子的三线线路属于最简单的校正电路类型。在平衡状态时，没有电流流过中心导线。

表 8-2. 在室温时电阻的温度系数 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ *

镍	0.067
铁 (合金)	0.002 到 0.006
钨	0.0048
铝	0.0045
铜	0.0043
铅	0.0042
银	0.0041
金	0.004
铂	0.00392
汞	0.00099
锰铜	± 0.00002
碳	- 0.0007
电解液	- 0.002 到 - 0.09
半导体 (热敏电阻)	- 0.068 到 + 0.14

从而另外两根导线的电阻影响就抵消了。卡稜得尔 (Candler) 四线线路是通过在电桥的可调臂中加装两根导线来解决问题的。这样就可抵消导线对电阻温度计的影响。在图 8-7c 中的浮动电势线路与西门子接线法相同，但加装了一根导线。这根附加导线可以用来校正导线电阻的等同性。温度计的读数可按图示位置读出，然后再把左右两根导线交换，分别取得另外两个读数。通过这种变换方法，可以得到最好的平均读数，并把导线误差减至最小值。

* 根据莱昂 [6]

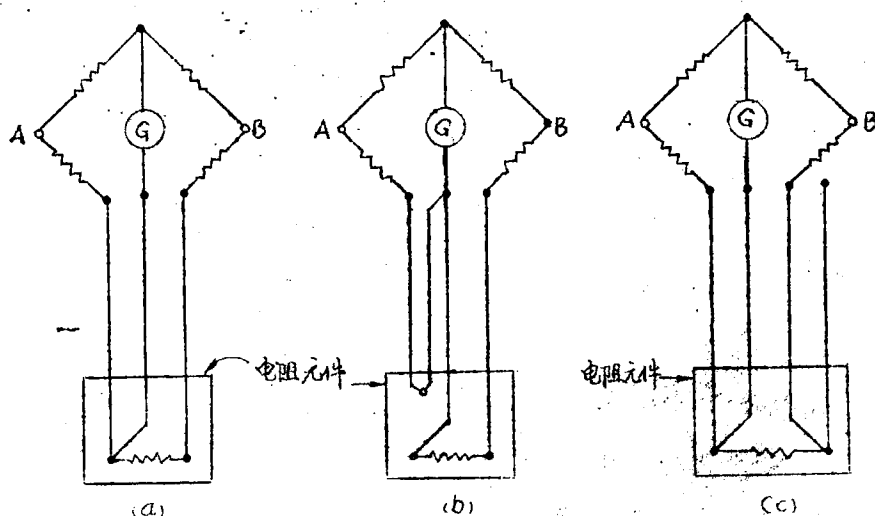


图 8-2 校正电阻温度计导线电阻的方法: (a) 西门子三线线路; (b) 卡稜得尔四线线路; (c) 浮动电势线路。电池接在 A、B 二点。

例 8-2 在室温下使用一个铂电阻温度计。假定温度与电阻成线性变化, 计算温度计的灵敏度用欧姆/ $^{\circ}\text{F}$ 表示。

解: 电阻随温度作线性变化的含意是:

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

式中 R_0 为在参考温度 T_0 时的电阻。因此灵敏度是

$$S = \frac{dR}{dT} = \alpha R_0$$

R_0 取决于电阻丝的长度和直径。在室温下, 对于铂, $\alpha = 0.00392^{\circ}\text{C}^{-1}$
 $= 0.00218^{\circ}\text{F}^{-1}$ 。

热敏电阻

热敏电阻是电阻温度系数为负值的一种半导体器件。这与大多数金

属所显示的正温度系数相反。此外，电阻随温度按指数关系变化，而不是象式(8-7)那样的多项式关系。因此，对于热敏电阻

$$R=R_0 \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (8-8)$$

式中 R_0 为参考温度 T_0 时的电阻， β 为由实验决定的常数。 β 之值在3500和4600 K之间变化，决定于热敏电阻的材料和温度。根据参考文献[4]，同铂比较的三种半导体温度计

材料的比阻示于图 8-8 中。一根典型的静态电压—电流特性曲线示于图 8-9 中。而一组典型的暂态电压—电流特性曲线则示于图 8-10 中。图 8-9 中曲线上的数字表示一特定热敏电阻在环境温度以上的温升($^{\circ}\text{C}$)。

热敏电阻是一种非常敏感的器件，适当校准时可以期望它能在 0.01°C 内有稳定一致的性能。热敏电阻的一个相当好

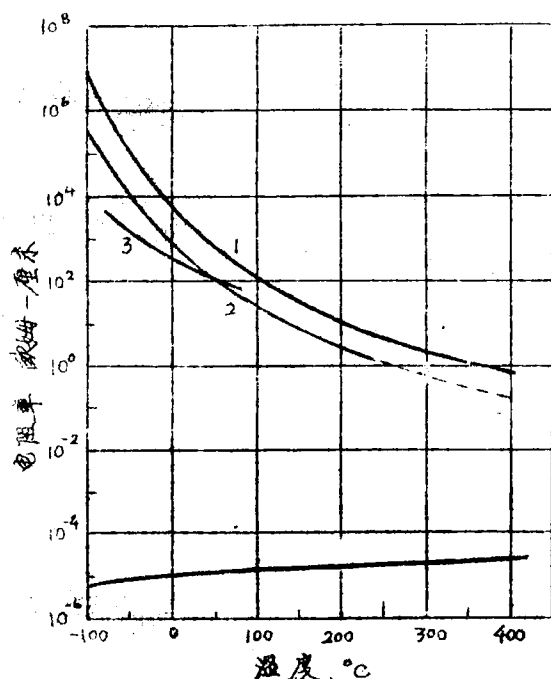


图 8-8. 与铂比较时三种热敏电阻材料的比阻 (根据参考文献 [17])

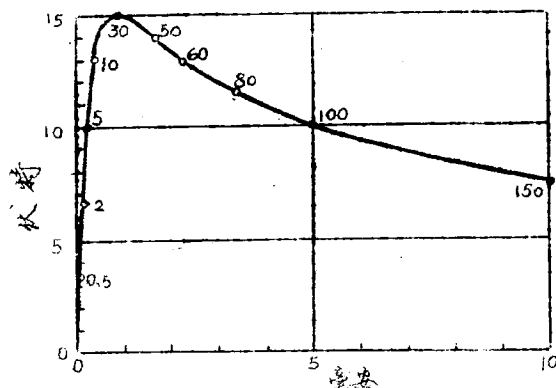


图 8-9 一种典型热敏元件的静态电压—电流曲线 (根据参考文献[1])

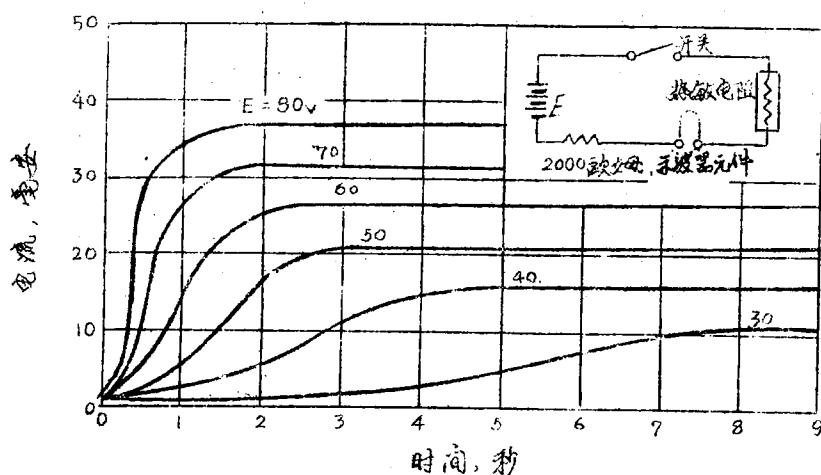


图 8-10 对一种热敏电阻的一组典型暂态电压—电流曲线 (根据参考文献 [1])。测量用的电路示于插图

的性能是可以用于电路的温度补偿。这是可能的, 因为它有负温度特性, 所以可以用来抵消电路中随温度增加而引起的电阻的增加。

例 8-3 计算图 8-8 中, 第 1 号热敏电阻在 100°C 时的温度灵敏度。用欧姆·厘米/ $^{\circ}\text{C}$ 来表示计算结果。取 100°C 时的 $\beta = 4120\text{K}$ 。

解: 灵敏度是通过把式 (8-8) 微分得出的。

$$S = \frac{dR}{dT} = R_0 \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \left(\frac{-\beta}{T^2} \right)$$

要求用比阻单位来表示结果: 因此就用 100°C 时的灵敏度代替 R_0 。

而且

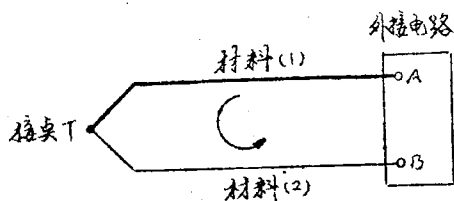
$$T = T_0 = 100^{\circ}\text{C} = 373\text{K}$$

$$\text{故 } S = -\rho_{100^{\circ}\text{C}} \frac{4120}{(373)^2} = \frac{(110)(4120)}{(373)^2} = -3.26 \text{ 欧姆} \cdot \text{厘米} / ^{\circ}\text{C}$$

热电效应

最普遍温度电测法是采用热电偶。当把两种不同的金属按图 8-11

连接在一起时，A、B 两点间将产生一个电动势，这个电动势基本上是接点温度的函数。这种现象称为塞贝克效应（温差电动效应）。如果



如果把这两种材料连接到一个外接电路上把电流引出，电动势就可能由

图 8-11 表示热电效应的两种不同金属的接点

于所谓珀尔帖效应而略有改变。此外，如果沿任一种材料或两种材料存在着温度梯度。接点电动势就可能产生附加的轻微变化。这叫做汤姆逊效应。于是，在热电电路中就有三种电动势：由于不同金属接点产生的塞贝克电动势；由电路中电流产生的珀尔帖电动势以及由材料中温度梯度引起的汤姆逊电动势。塞贝克电动势是最主要的，因为它取决于接点温度。如果把两种不同金属接点处产生的电动势作为温度函数而仔细加以测量的话，就可以用这种接点来测量温度。主要问题发生在试图测量电势时。当把两种不同的材料接到测量装置时，在两种材料和接到电压测量装置处的导线的接点处将会产生另外一个热电动势。这个电动势将取决于连接处的温度，因而必须采取措施来计及这个附加电势。

有两种法则可以用来分析热电路：

1. 如果如图 8-12 所示把第三个金属连接到电路上，那么，只要新的接线是在同一温度下，则电路的纯电势就不会受影响。这个论点可以用热力学第二定律来证明，并叫作中间金属定律。

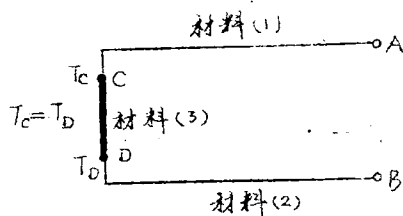


图 8-12 热电路中第三种金属的影响：中间金属定律。

2. 我们研究一下图 8-13 所示的电路。简单的热电偶电路是用同样的材料作成的，但是在不同温度范围内工作。图 8-13 a 所示的电路在