

常用符号表

A ——截面积	Re ——雷诺数
B ——磁通密度	r ——半径
C ——电容	S ——距离、位移
D, d ——直径	T ——绝对温度
E ——电动势、弹性模量	t ——温度、时间
E_t ——热电势	U ——电压
F ——力	U_H ——霍尔电势
f ——频率	V ——体积
G ——重量、重量流量	v ——流速
H ——磁场强度、高度	W ——流体总量
I ——电流	γ ——重度
I_0 ——射线强度	ϵ ——发射率、介电常数
K ——应变灵敏系数	η ——动力粘度
M ——转矩、质量流量	λ ——波长
p ——压力	λ_e ——有效波长
Δp ——压差	μ ——粘度、磁导率
Q ——体积流量	ν ——运动粘度
R ——电阻	ρ ——密度、电阻率

第1章 温度测量仪表

1 概 述

温度是表示物体的冷热程度的一个物理量。为了测量温度必须确定温度基准值和温标。在理论上讲，物质的任何一种依温度而变化的性质都可以做为温标，也可以利用这些性质制成温度计。目前较常用的测量温度变化的物理性质主要有：体积或压

力的变化（气体、液体、固体的热膨胀）；电阻的变化；两种金属（或非金属）接点处的热电势变化；热辐射效应等。此外还可以利用颜色、形状的变化，晶体共振频率的变化以及微波、核磁共振、激光等方法。

各种温度计按其测量方式可分为接触式和非接触式两大类，见表44·1-1。

表44·1-1 温度测量仪表的原理和分类

测量方式	测 量 原 理		温 度 仪 表 名 称
接 触 式	体 积 或 压 力 变 化	固体热膨胀	双金属温度计
		液体热膨胀	玻璃液体温度计、压力式（充液体）温度计
		气体热膨胀	压力式温度计
	电 阻 变 化	金属热电阻	铂、铜、镍、铑铁电阻等
		半导体热敏电阻	锗、碳、金属氧化物等半导体热敏电阻
	热 电 势 变 化	廉金属热电偶	铜-康铜、镍铬-镍硅热电偶等
		贵金属热电偶	铂铑-铂、铂铑-铂铑热电偶等
		难熔金属热电偶	钨-铼、钨-钼热电偶等
		非金属热电偶	碳化物-硼化物热电偶等
	非 接 触 式	辐射测温	
		亮度法	光学高温计
		全辐射法	辐射温度计（热电堆）
		比色法	比色温度计
		部分辐射法	部分辐射温度计

接触式温度计的检测部分与被测对象有良好的热接触，通过传导或对流达到热动平衡，这时，温度计的示值即表示被测对象的温度。在一定的测温范围内，接触式测温可以测量物体内部的温度分布。但对于运动体、小目标或热容量小的对象，接触式测温将会引起较大的测量误差。

非接触式温度计的检测部分与被测对象互不接触。目前最常用的是通过辐射热交换实现测温。其主要特点是可测运动体、小目标及热容量小的或温度变化迅速（瞬变）对象的表面温度，也可以测温度场的温度分布。

表44·1-2 温度测量仪表的精度等级和分度值

仪 表 名 称	精 度 等 级	分 度 值 ℃
双金属温度计	1, 1.5, 2.5	0.5~20
压力式温度计	1, 1.5, 2.5	0.5~20
玻璃液体温度计	0.5~2.5	0.1~10
热 电 阻	0.5~3	1~10
热 电 偶	0.5~1	5~20
光学高温计	1~1.5	5~20
辐射温度计（热电堆）	1.5	5~20
部分辐射温度计	1~1.5	1~20
比色温度计	1~1.5	1~20

工业上常用的温度测量仪表的精度等级和分度值见表 44-1-2。其测温范围如图 44-1-1 所示, 图中标志的“可能范围”, 对于接触式温度计 (图的上半部分) 系指根据测温原理有可能达到的测温范围; 对于非接触式温度计系指目前分度方法能够实现的测温范围。

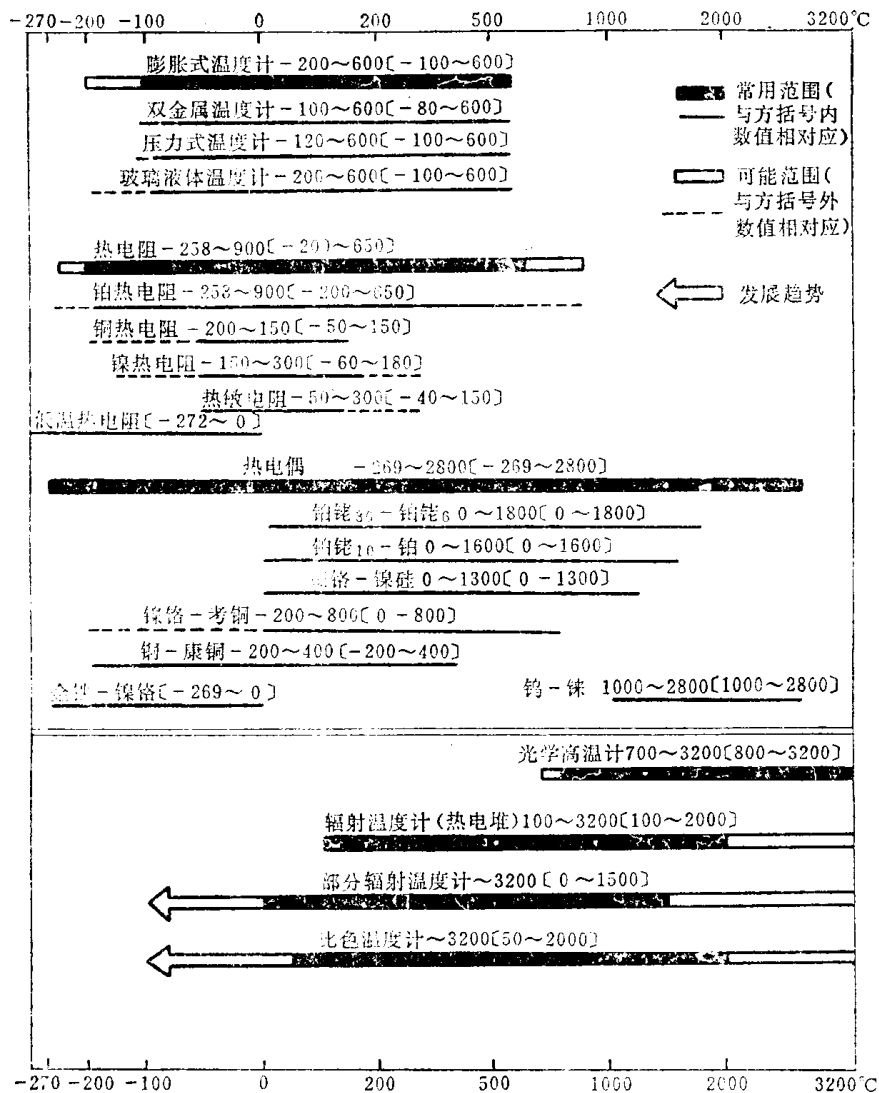


图44-1-1 温度测量仪表的测温范围

2 1968年国际实用温标——1975年修订版及我国温标传递系统

在温度测量中, 实际上采用的温标主要有两种, 即热力学温标与国际实用温标。热力学温标以热力学第二定律为基础, 是理想状况下的理论温标, 它是国际实用温标的基础, 国际实用温标是为了统一温度量值和进行温标的传递而建立的。目前在国际

间通用的温标是1975年第十五届国际权度大会通过的《1968年国际实用温标——1975年修订版》, 下面介绍它的主要内容。

2.1 1968年国际实用温标的符号和单位

1968年国际实用温标——1975年修订版规定:

“热力学温度”这个基本物理量的符号是 T , 单位是开尔文, 符号是 K, 开尔文定义为水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

此外, 温度也往往用“摄氏温度”来表示。摄氏温度的符号是 t , 单位是摄氏度, 符号是 $^{\circ}\text{C}$ 。 T 和 t 的关系定义为:

$$t = T - 273.15 \text{ K}$$

(44-1-1)

根据这个定义, 热力学温度与摄氏温度的区别仅在于零点的不同; 开尔文与摄氏度在量值上是相等的。

但是, 直接测量热力学温度既困难, 又不准确。为此, 制订出1968年国际实用温标; 根据这个实用温标测出的温度, 在数值上十分接近于热力学温度, 而且它的测量既容易进行, 复现性又高, 1968年国际实用温标简称 IPTS-68 $\ominus$ 。

IPTS-68 并行使用“国际实用开尔文温度”, 符号是

T_{68} , 以及“国际实用摄氏温度”, 符号是 t_{68} 。 T_{68} 和 t_{68} 的关系是:

$$t_{68} = T_{68} - 273.15 \text{ K} \quad (44-1-2)$$

T_{68} 的单位是开尔文, 符号是 K, t_{68} 的单位是摄氏度, 符号是 $^{\circ}\text{C}$ 。

$\ominus$ IPTS 系国际实用温标的英文名称 (International Practical Temperature Scale) 缩写。

2.2 1968年国际实用温标的内容

IPTS-68 包括两方面的内容：对一些纯物质的可复现的平衡态的温度规定指定值，并称为“定义固定点”；对于定义固定点之间的温度，则规定了标准内插工具和内插公式，这些标准内插工具在定义固定点标定后，通过内插公式把它们的示值与国

际实用温度值联系起来。

2.2.1 定义固定点和第二类参考点

定义固定点列于表44.1-3中。

除表44.1-3列出的 IPTS-68 定义固定点外，其它参考温度也可利用。其中一些列于表44.1-4中，这些点称为第二类参考点。

表44.1-3 IPTS-68定义固定点①

平 衡 态	国际实用温标的指定值	
	T_{68} K	t_{68} °C
平衡氢固相、液相、汽相间的平衡(平衡氢三相点)②	13.81	-259.34
平衡氢在33330.6帕压力下(25/76标准大气压)液相、汽相间的平衡②③	17.042	-256.108
平衡氢液相、汽相间的平衡(平衡氢沸点)②③	20.28	-252.87
氦液相、汽相间的平衡(氦沸点)③	27.102	-246.048
氧固相、液相、汽相间的平衡(氧三相点)	54.361	-218.789
氙固相、液相、汽相间的平衡(氙三相点)④	83.798	-189.352
氧液相、汽相间的平衡(氧冷凝点)③④	90.188	-182.962
水固相、液相、汽相间的平衡(水三相点)	273.16	0.01
水液相、汽相间的平衡(水沸点)⑤	373.15	100
锡固相、液相间的平衡(锡凝固点)⑤	505.1181	231.9681
锌固相、液相间的平衡(锌凝固点)	692.73	419.58
银固相、液相间的平衡(银凝固点)	1235.08	961.93
金固相、液相间的平衡(金凝固点)	1337.58	1064.43

① 除各三相点和一个平衡氢(17.042K)以外，温度的指定值均指在压强 $p_0 = 101325$ 帕(一个标准大气压)的平衡态。压力对温度值有一定的影响，同时，不同的同位素丰度也能显著地影响固定点的温度。

② 氢有两种分子变态，分别以“正”和“仲”加在氢字的前面来表示。正一仲混合的平衡成分与温度有关，在室温下，75%的正氢和25%的仲氢叫“正常氢”，在液化或沸点时，成分随时间而缓慢地变化，而物理性质也有相应的变化。这里所写的平衡氢，就是指在相关的温度下，氢已具有平衡的正一仲成分。

③ 同位素或杂质的分离，要求氢、氦使用沸点(近消失的少量蒸汽成分)，氧使用冷凝点(近消失的少量液体成分)。

④ 氙三相点可作为氧冷凝点的替用点。

⑤ 锡凝固点可作为水沸点的替用点。

表44.1-4 第二类参考点①

平 衡 态②	国际实用温度	
	T_{68} K	t_{68} °C
正常氢固相、液相、汽相间的平衡(正常氢三相点)	13.956	-259.194
正常氢液相、汽相间的平衡(正常氢沸点)	20.397	-252.753
$\lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$ $A = 1.734791, B = -44.62368 \text{ K}$ $C = 0.0231869 \text{ K}^{-1}, D = -0.000048017 \text{ K}^{-2}$ 适用于13.956~30K		
氦固相、液相、汽相间的平衡(氦三相点)	24.561	-248.589
氦液相、汽相间的平衡 $\lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$ $A = 4.61152, B = -106.3851 \text{ K}$ $C = -0.0368331 \text{ K}^{-1}, D = 4.24892 \times 10^{-4} \text{ K}^{-2}$ 适用于24.561~40K		

(续)

平 衡 态②	国际实用温度	
	T_{63} K	t_{63} °C
氮固相、液相、汽相间的平衡(氮三相点)	63.146	-210.004
氮液相、汽相间的平衡(氮沸点)	77.344	-195.806
$\lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{63}} + C \lg \frac{T_{63}}{T_0} + DT_{63} + ET_{63}^2$ $A = 5.893271; B = -403.96046 \text{ K}; C = -2.3668$ $D = -0.0142815 \text{ K}^{-1}; E = 72.5872 \times 10^{-6} \text{ K}^{-2}; T_0 = 77.344 \text{ K}$ 适用于63.146~84 K		
氩液相、汽相间的平衡(氩沸点)	87.294	-185.856
氧液相、汽相间的平衡		
$\lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{63}} + C \lg \frac{T_{63}}{T_0} + DT_{63} + ET_{63}^2$ $A = 5.961546; B = -467.45576 \text{ K}; C = -1.664512$ $D = -0.01321301 \text{ K}^{-1}; E = 50.8041 \times 10^{-6} \text{ K}^{-2}; T_0 = 90.188 \text{ K}$ 适用于54.361~94 K		
二氧化碳固相、汽相间的平衡(二氧化碳升华点)	194.674	-78.476
$T_{63} = \left[194.674 + 12.264 \left(\frac{p}{p_0} + 1 \right) - 9.15 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 \right] \text{ K}$ 适用于194~195 K		
汞固相、液相间的平衡(汞凝固点)③	234.314	-38.836
冰和空气饱和水的平衡(冰点)④	273.15	0
苯氧基苯(二苯醚)固相、液相、汽相间的平衡(苯氧基苯三相点)	300.02	26.87
苯甲酸固相、液相、汽相间的平衡(苯甲酸三相点)	395.52	122.37
锡固相、液相间的平衡(锡凝固点)③	429.784	156.634
铋固相、液相间的平衡(铋凝固点)③	544.592	271.442
镉固相、液相间的平衡(镉凝固点)③	594.258	321.108
铅固相、液相间的平衡(铅凝固点)③	600.652	327.502
汞液相、汽相间的平衡(汞沸点)	629.81	356.66
$t_{63} = \left[356.66 + 55.552 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 23.03 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 14.0 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \right] \text{ °C}$ 适用于 $p = 90 \sim 104$ 千帕		
硫液相、汽相间的平衡(硫沸点)	717.824	444.674
$t_{63} = \left[444.674 + 69.010 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 27.48 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 19.14 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \right] \text{ °C}$ 适用于 $p = 90 \sim 104$ 千帕		
铜—铝共晶点固相、液相间的平衡	821.41	548.26
铈固相、液相间的平衡(铈凝固点)③	903.905	630.755
铝固相、液相间的平衡(铝凝固点)	933.61	660.46
铜固相、液相间的平衡(铜凝固点)	1358.03	1084.88
镍固相、液相间的平衡(镍凝固点)	1728	1455
钴固相、液相间的平衡(钴凝固点)	1768	1495
钼固相、液相间的平衡(钼凝固点)	1827	1554
铂固相、液相间的平衡(铂凝固点)	2042	1769
铱固相、液相间的平衡(铱凝固点)	2236	1963
氧化铝固相、液相间的平衡(氧化铝一熔化温度)	2327	2054
铈固相、液相间的平衡(铈凝固点)	2720	2447
铈固相、液相间的平衡(铈熔化温度)	2750	2477
钼固相、液相间的平衡(钼熔化温度)	2896	2623
钨固相、液相间的平衡(钨熔化温度)	3695	3422

① 列于本表中的温度乃是较常用的值,目前尚未评价这些温度的准确度水平,今后待国际计量委员会随时公布。

② 本表中除三相点和那些有明确允许的压力范围外,平衡态均指 $p_0 = 101325$ 帕(一个标准大气压)下的状态。

③ 压力变化影响凝固点温度。

④ 冰点是一个低于并非常接近于水三相点0.01 K的温度。

2.2.2 标准内插工具和定义固定点之间的内插公式

整个温标分成四段。其中,在1064.43℃(金凝固点)以上的温度范围,由黑体辐射普朗克公式决定温度;630.74~1064.43℃由铂铑-铂热电偶决定温

度;630.74℃以下至13.81K,由铂电阻温度计决定温度。值得注意的是630.74℃以下的温度范围内,虽然标准内插工具相同,但0℃以上和0℃以下的内插公式并不一样。上述四段范围内所用的标准内插工具和内插公式见表44.1-5。

表44.1-5 标准内插工具和内插公式

标准内插工具	温度范围	内插公式	说明
铂电阻温度计	13.81~273.15K(0℃)	$W(T_{68}) = W_{\text{CCT-68}}(T_{68}) + \Delta W_i(T_{68})$	1. $W(T_{68}) = \frac{R(T_{68})}{R(273.15\text{K})}$ 电阻比的测量值 2. $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ 由参考函数①给出,它表示特定铂的电阻比与温度的关系,各个固定点温度所对应的 $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ 见表44.1-5(a) 3. $\Delta W_i(T_{68})$ 为偏差函数, $\Delta W_i(T_{68}) = W(T_{68}) - W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$,在不同的温度范围内,偏差函数有不同的表示式,如表44.1-5(b)所示
	0~630.74℃	$t_{68} = t' + 0.045 \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} \right) \times \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} - 1 \right) \left(\frac{t'}{419.58^\circ\text{C}} - 1 \right) \times \left(\frac{t'}{630.74^\circ\text{C}} - 1 \right)^\circ\text{C}$	1. t' 是为了计算方便而引入的中间变量 $t' = \left\{ \frac{1}{\alpha} [W(t') - 1] + \delta \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} \right) \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} - 1 \right) \right\}^\circ\text{C}$ 式中 α 、 δ 均为常数, $W(t') = \frac{R(t')}{R(0^\circ\text{C})}$ 电阻比的测量值 2. t' 的表示式中 α 、 δ 、 $R(0^\circ\text{C})$ 由水的三相点、水沸点(或锡凝固点)和锌凝固点的电阻实测值决定
铂铑-铂标准热电偶	630.74~1064.43℃	$E(t_{68}) = a + bt_{68} + ct_{68}^2$	1. $E(t_{68})$ 是标准铂铑-铂热电偶一端温度为0℃,另一端为 t_{68} 时的热电势 2. 常数 a 、 b 、 c 分别根据热电偶在 $630.74 \pm 0.2^\circ\text{C}$ (温度值由铂电阻温度计测出),及银、金凝固点测得的 E 值决定,其中规定: $E(\text{Au}) = 10334 \pm 30 \mu\text{V}$, $E(\text{Au}) - E(\text{Ag}) = 1186 \mu\text{V} + 0.17[E(\text{Au}) - 10334 \mu\text{V}] \pm 3 \mu\text{V}$, $E(\text{Au}) - E(630.74) = 4782 \mu\text{V} + 0.631[E(\text{Au}) - 10334 \mu\text{V}] \pm 5 \mu\text{V}$ 3. 铂丝纯度为 $W(100^\circ\text{C}) \geq 1.3920$,铂丝名义上应含铑10%、铂90%(质量比)
	1064.43℃以上	$\frac{L_b(\lambda, T_{68})}{L_b[\lambda, T_{68}(\text{Au})]} = \frac{\exp\left[\frac{c_2}{\lambda T_{68}(\text{Au})}\right] - 1}{\exp\left[\frac{c_2}{\lambda T_{68}}\right] - 1}$	1. 该公式②是由黑体辐射普朗克公式导出, IPTS-68 对 1064.43℃以上的温度并无规定标准工具,实际复现时可采用光学高温计、光电光谱高温计等 2. $L_b(\lambda, T_{68})$ 和 $L_b[\lambda, T_{68}(\text{Au})]$ 分别表示温度为 T_{68} 及金凝固点处,波长为 λ (真空中的数值)的黑体光谱辐射亮度 3. $c_2 = 1.4388 \text{cm} \cdot \text{K}$ (第二辐射常数)

① $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ 是由参考函数: $T_{68} = \sum_{j=0}^{20} a_j \left(\frac{\ln W_{\text{CCT-68}}(T_{68}) + 3.28}{3.28} \right)^j \text{K}$ 计算得到,其中系数 a_j 的数值可从

参考文献[7]中查找。 $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ 的下标“CCT”是温度咨询委员会(Comité Consultatif de Thermométrie)法文缩写。

② 在 IPTS-68 的有关文献中,黑体辐射亮度之比写作: $\frac{L_\lambda(T_{68})}{L_\lambda(T_{68}(\text{Au}))}$,本章中考虑前后各节写法一致,改写为

$$\frac{L_b(\lambda, T_{68})}{L_b[\lambda, T_{68}(\text{Au})]}。$$

表44·1-5(a) 定义固定点温度对应的 $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ 值

定 义 固 定 点	T_{68} K	t_{68} °C	$W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ 值
平衡氢三相点	13.81	-259.34	0.00141208
平衡氢17.042K点	17.042	-256.108	0.00253445
平衡氢沸点	20.28	-252.87	0.00448517
氮 沸 点	27.102	-246.048	0.01221272
氧三相点	54.361	-218.789	0.09197253
氩三相点	83.798	-189.352	0.21605705
氧 凝 点	90.188	-182.962	0.24379912
冰 点	273.15	0	1
水 沸 点	373.15	100	1.39259668

表44·1-5(b) 在不同的温度范围内偏差函数表示式

温 度 范 围 K	偏 差 函 数 $\Delta W_i(T_{68})$ 的 表 示 式	确 定 常 数 的 方 法
90.188~273.15	$\Delta W_4(T_{68}) = b_4(T_{68} - 273.15\text{K}) + e_4(T_{68} - 273.15\text{K})^2(T_{68} - 373.15\text{K})$	常数 b_4 、 e_4 由氧凝固点(或氩三相点)和水沸点测出的偏差确定
54.361~90.188	$\Delta W_3(T_{68}) = A_3 + B_3T_{68} + C_3T_{68}^2$	常数 A_3 、 B_3 、 C_3 由氧三相点、氧凝固点(或氩三相点)测出的偏差以及偏差函数 $\Delta W_4(T_{68})$ 在氧凝固点处的一阶导数确定
20.28~54.361	$\Delta W_2(T_{68}) = A_2 + B_2T_{68} + C_2T_{68}^2 + D_2T_{68}^3$	常数 A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 由平衡氢沸点、氮沸点和氧三相点测出的偏差以及偏差函数 $\Delta W_3(T_{68})$ 在氧三相点处的一阶导数确定
13.81~20.28	$\Delta W_1(T_{68}) = A_1 + B_1T_{68} + C_1T_{68}^2 + D_1T_{68}^3$	常数 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 由平衡氢三相点、17.042K点和平衡氢沸点测出的偏差以及偏差函数 $\Delta W_2(T_{68})$ 在平衡氢沸点处的一阶导数确定

2.3 我国温标传递系统

测量物体温度时,被测对象的温度值是由国际温标确定的^①。温标的传递过程是将国际温标所定义的固定点通过标准内插工具和内插公式使国际实用温度值与标准仪器的示值相一致,并逐级传递到被分度的温度仪表。我国温标传递系统大致如图44·1-2所示,其中工业温度测量仪表检定时所采用

的高一等标准温度计,目前尚无统一规定。

我国于1973年1月1日开始正式采用1968年国际实用温标,在此以前使用的是48温标(1960年修订版)。

① 温度值可采用 T_{68} 或者 t_{68} 表示,但为了书写方便,在以后各节中,温度值直接以 T (开尔文)或者 t (摄氏度)表示,并简写为 $T\text{K}$ 或者 $t^\circ\text{C}$ 。

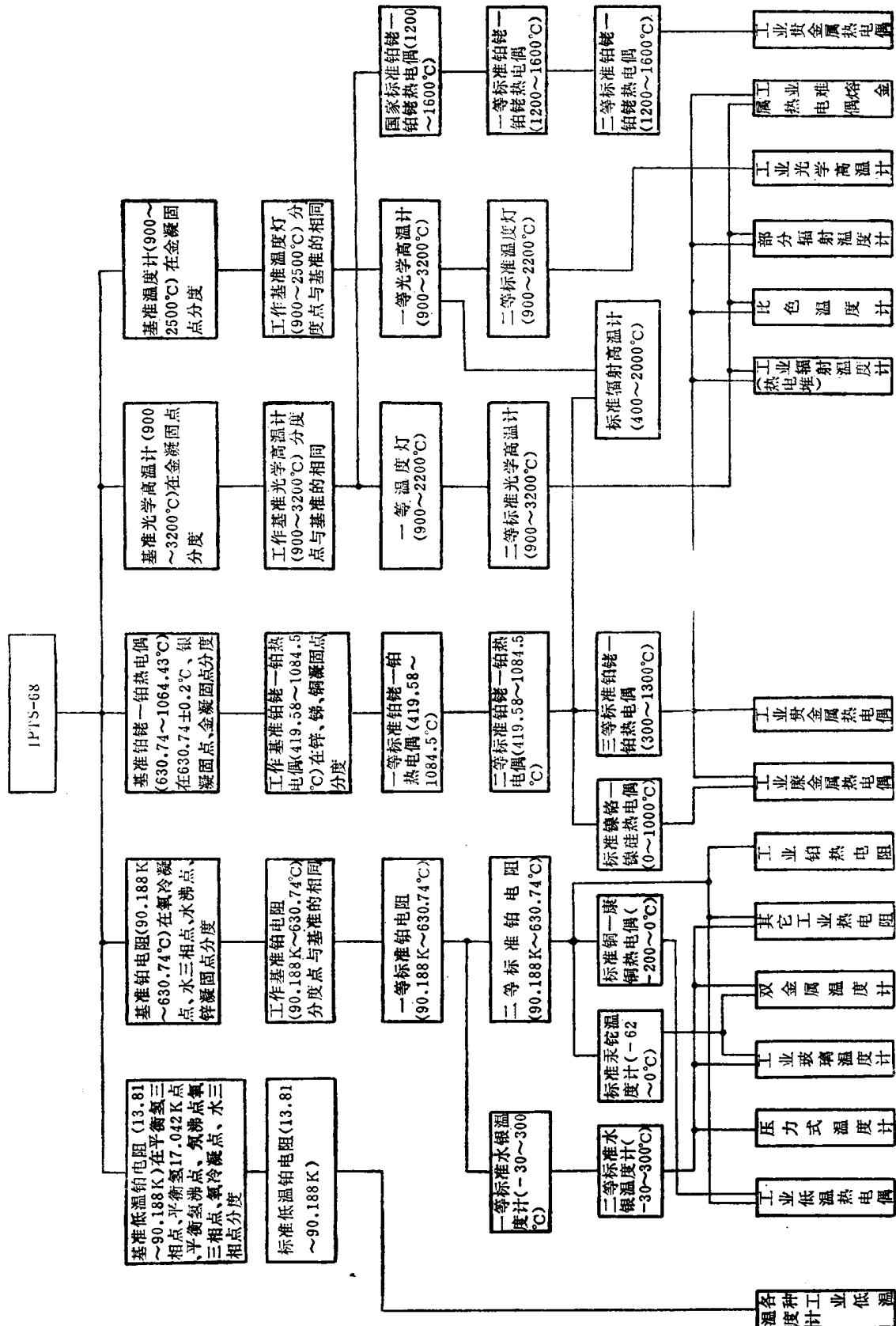


图44-1-2 我国温标传递系统

注：图中最下面一行仪表是工业用的温度测量仪表。若该仪表有其它精度等级（基准、标准、一等、二等、三等），则名称上附加“工业”二字，以示区别。

3 双金属温度计

3.1 作用原理

双金属温度计是由两种不同膨胀系数,彼此牢固结合的双金属作为感温元件的温度计。

如图 44.1-3 所示,双金属温度计的感温元件,通常绕成螺旋形,一端固定,另一端连接指针轴,当温度变化时,由于双金属受温度的作用使感温元件的曲率产生变化,通过指针轴带动指针偏转,在刻度盘上直接显示出温度的变化值。

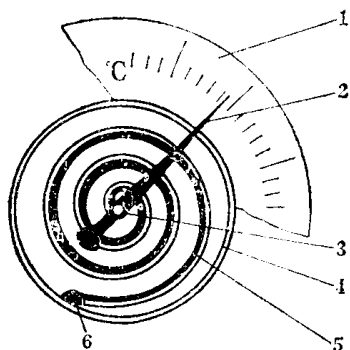


图 44.1-3 双金属温度计的作用原理

1—刻度盘 2—指针 3—指针轴 4—表壳
5—感温元件 6—固定端

3.2 分类

按照温度计的刻度盘平面与保护管的连接方向分为:

轴向型——刻度盘平面与保护管成垂直方向连接;

径向型——刻度盘平面与保护管成平行方向连接;

135°角型——刻度盘平面与保护管成135°角方向连接;

盒型——无保护管,感温元件通常藏于表壳内。

按照感温元件形状分为:平螺旋形和直螺旋形两种。

按照固定方式分为:无固定装置、螺纹固定装置和固定法兰三种。

3.3 感温元件的计算

图 44.1-4 a、b 所示感温元件的一端固定,当

温度由 t_0 变化到 t 时,在无外力作用下,自由端的偏转角 α 可用下式表示:

$$\alpha = K \frac{(t - t_0) L 360}{\pi \delta} \quad (44.1-3)$$

式中 K ——比弯曲 $1/^\circ\text{C}$

t ——温度计的测量上限 $^\circ\text{C}$

t_0 ——温度计的测量下限 $^\circ\text{C}$

L ——双金属的有效展开长度 mm

δ ——双金属的厚度 mm

双金属温度计的指针偏转角 α 一般规定为 270° ,因此式 44.1-3 可写成:

$$L = \frac{270\pi\delta}{K(t - t_0)360} \quad (44.1-4)$$

上式适用于直螺旋形,见图 44.1-4 a;也适用于平螺旋形,见图 44.1-4 b。

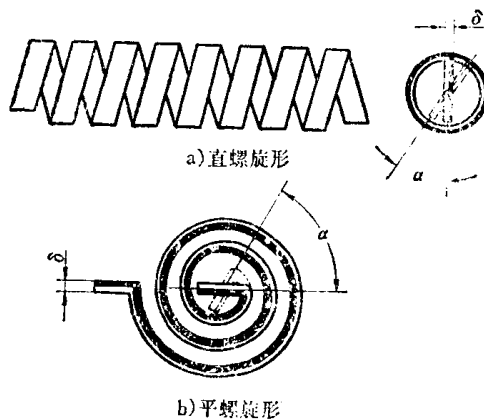


图 44.1-4 双金属感温元件的计算

3.4 基本参数 (见表 44.1-6~44.1-8)

表 44.1-6 表壳直径、温度测量范围和分度值

表壳直径 mm	$\phi 60$			$\phi 100, \phi 150$		
精度等级	1.0	1.5	2.5	1.0	1.5	2.5
温度测量范围 $^\circ\text{C}$	分 度 值 $^\circ\text{C}$					
-80~+40		2	2		2	2
-40~+80	1	2		1	2	
0~+50	0.5	1		0.5	1	
0~+100	1	2		1	2	
0~+150	1	2		1	2	
0~+200	2	5		2	5	
0~+300	2	5		2	5	
0~+400		5	10		5	10
0~+500		10	20		10	20
0~+600		10	20		10	20
+100~+500		5	10		5	10
+200~+600		5	10		5	10

表44-1-7 保护管直径和插入长度 mm

表壳 直径	保护管 直 径	插 入 长 度										安装固定装 置螺纹尺寸		
		75	100	150	200	250	300	400	500	750	1000		1250	1500
φ60	φ4													M16×1.5
	φ6													
φ100 φ150	φ8													M27×2
	φ10													
	φ12													

注：保护管的材料见本章第7节《热电偶》。

表44-1-8 温度计的时间常数

保护管直径 mm	时间常数 s
$\phi 4, \phi 6$	<30
$\phi 8, \phi 10, \phi 12$	<60

3.5 结构

图44-1-5所示为带活动外螺纹固定装置的轴向型双金属温度计的结构。

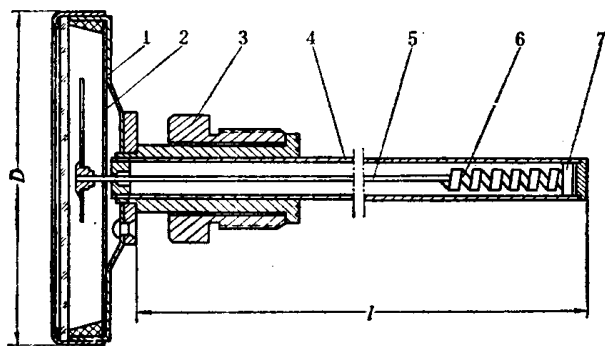


图44-1-5 轴向型双金属温度计

1—表壳 2—刻度盘 3—活动螺母 4—保护管
5—指针轴 6—感温元件 7—固定端

3.6 主要用途

双金属温度计主要用于石油、化工、食品、纺织等工业部门生产过程中的气体、液体、蒸汽等介质的温度测量。

4 压力式温度计

4.1 作用原理

如图44-1-6所示，压力式温度计是利用充灌于密闭的温包、毛细管和弹簧管内的工作物质的压力（或体积）随温度而变化，使弹簧管曲率改变，引起自由端产生位移，通过连杆和传动机构带动指针直接在刻度盘上显示温度的变化值。

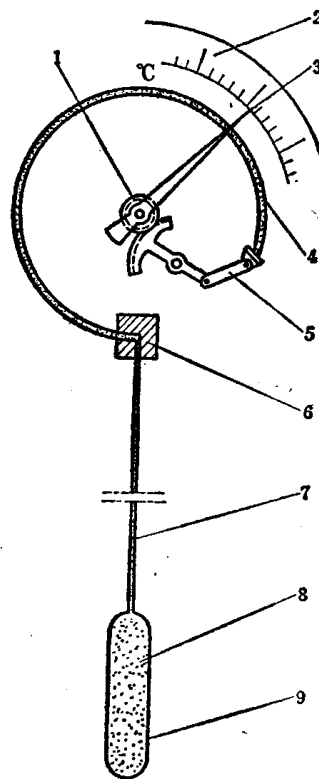


图44-1-6 压力式温度计的作用原理

1—传动机构 2—刻度盘 3—指针 4—弹簧管
5—连杆 6—接头 7—毛细管
8—工作物质 9—温包

4.2 分类

按照充灌的工作物质分为：

充气式——一般充氮气；

充低沸点液体式——一般充氯甲烷、氯乙烷或丙酮；

充液体式——一般充二甲苯、甲醇、甘油。

按照显示部分的结构分为：指示式和指示带电、接点式两种。

4.3 基本参数 (见表44·1-9、44·1-10)

表44·1-9 温包中工作物质的性能

序 号	名 称	温度测量范围 ℃	性 能
1	气 体 氮	-100~+500	1.气体压力与温度关系在温度为183℃以上呈线性, 刻度均匀等分 2.大气压力对仪表指示影响较小 3.环境温度对仪表指示有影响 4.时间常数较大
2	低沸点 液 体	丙 酮 50~200	1.饱和蒸汽压力与温度关系为非线性, 刻度为非均匀等分 2.大气压力对仪表指示的影响较序号1大 3.环境温度对仪表指示无影响 4.时间常数较序号1小
		氯 甲 烷 -20~+125	
		氯 乙 烷 20~120	
3	液 体	二 甲 苯 -40~+200	1.液体体积膨胀使弹簧管位移与温度关系呈线性, 刻度为均匀等分 2.大气压力对仪表指示的影响较序号1小 3.环境温度对仪表指示影响较序号1小 4.温包安装位置高低对仪表指示有影响 5.时间常数较序号1小
		甲 醇 -40~+175	
		甘 油 20~175	

表44·1-10 仪表技术参数

性 能	工 作 物 质		
	气 体	低 沸 点 液 体	液 体
温度测量范围 ℃	-100~+500	-20~+200	-40~+200
精度等级	1.5, 2.5	1.5, 2.5	1.0, 1.5
刻度盘最小量程 ℃	100	20	30
刻度盘最大量程 ℃	500	120	200
时间常数 s	80	30	40
温 包	材 料	黄铜, 紫铜, 不锈钢	
	长 度 mm	100, 150, 200, 250, 300	
	连接螺纹	M33×2	M27×2
毛细管	材 料	黄铜, 紫铜, 不锈钢	
	长 度 m	1, 1.5, 2.5, 4, 6, 10, 15, 25, 40, 60	1, 1.5, 2.5, 4, 6, 10, 15, 20
	外包材料	铝制蛇皮软管; 紫铜丝编织, 钢丝编织, 塑料	
表 壳	直 径 mm	φ60, φ100, φ150, φ250	
	材 料	胶木, 塑料, 铝合金	
	安装形式	凸装, 嵌装, 墙装	
刻度盘颜色		白底黑字, 黑底白字, 黑底涂荧光粉	

4.4 结 构

图 44-1-7 所示为压力式温度计的结构。

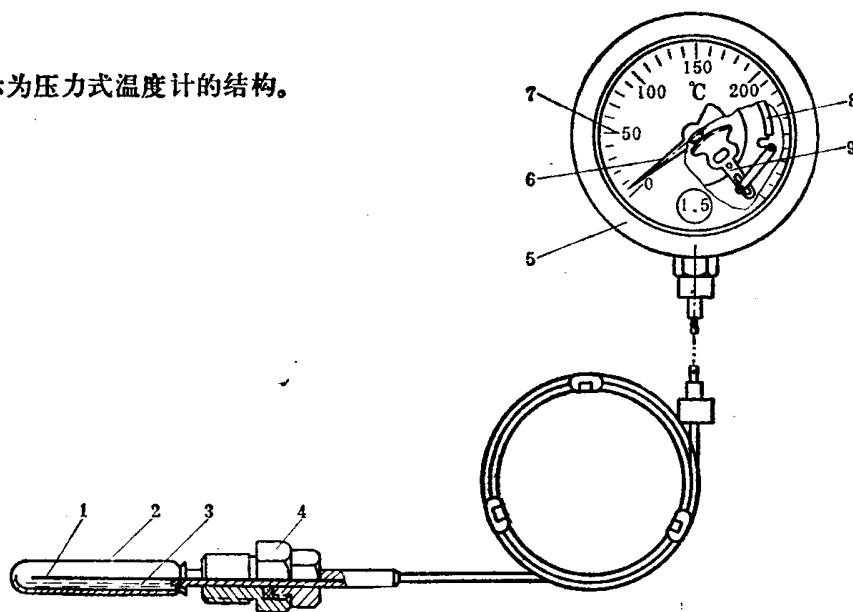


图44-1-7 压力式温度计的结构

1—毛细管 2—温包 3—工作物质 4—活动螺母 5—表壳 6—指针 7—刻度盘 8—弹簧管 9—传动机构

4.5 用 途

压力式温度计适用于测量对温包无腐蚀作用的液体、蒸汽和气体的温度。

电接点式的压力式温度计可以用来作为对给定的温度值上、下限作两位式调节。

小型的压力式温度计可以用来作为汽车、拖拉机和内燃机冷却水系统、润滑油系统的温度测量仪表。

4.6 使用注意事项

在安装时毛细管应引直，每相隔 300 毫米距离应用轧头固定，毛细管的最小弯曲半径不应小于 50 毫米。

在安装时应将温包全部插入被测量的介质中，以减小因导热引起的误差。

对于充液体的压力式温度计，安装时其温包与指示部分应在同一水平面上，以减小由于液体静压力引起的误差。

5 玻璃液体温度计

5.1 作用原理

玻璃液体温度计（简称玻璃温度计）是利用感温液体受热膨胀的原理工作的。如图 44-1-8 所示，

感温泡中贮有感温液体，当感温泡插入被测介质中，受到温度的作用感温液体开始膨胀（或收缩）沿着毛细管上升（或下降），在刻度标尺上直接显示温度的变化值。

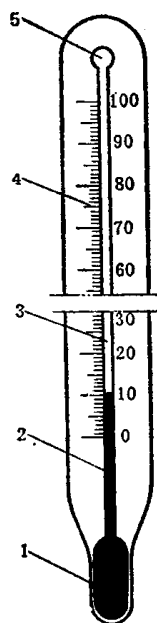


图44-1-8 玻璃液体温度计

1—感温泡 2—感温液体 3—毛细管 4—刻度 5—安全泡

5.2 分 类

按照感温液体分为：水银玻璃温度计和有机液体玻璃温度计两种。

按照用途和结构分为：工业玻璃温度计、实验室玻璃温度计、标准玻璃温度计和电接点玻璃温度计四种。

工业玻璃温度计可分为：棒式玻璃温度计、内标式玻璃温度计。内标式玻璃温度计又可分为带保护管和不带保护管内标式玻璃温度计两种。

电接点玻璃温度计可分为可调电接点玻璃温度计、固定电接点内标式玻璃温度计和固定电接点棒式玻璃温度计三种。电接点玻璃温度计可以用来作为对给定的温度值上、下限作两位式调节。

5.3 基本参数

5.3.1 示值误差

工业玻璃温度计和实验室玻璃温度计的示值与实际值之间的偏差为示值误差。见表44·1-11。

表44·1-11 温度的示值误差

°C

名 称	感温液体	温 度 测 量 范 围	分 度 值						
			0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
			示 值 误 差						
工业玻璃温度计和 实验室玻璃温度计	有机液体	-100~-60 -60~-30 -30~<0 0~100	1 0.6 0.4	1 0.8 0.6	1.5 1 1 1	2 2 1 1			
	水 银	-30~<0 0~100 >100~200 >200~300 >300~400 >400~500 >500~600	0.2 0.2 0.4 0.6	0.4 0.3 0.6 0.7 1 1.2	0.5 0.5 1 1 1.5 2	1 1 1.5 2 3 3	2 2 3 3 4 4 6	5 10 10 10	10

5.3.2 电接点动作误差

电接点玻璃温度计实际动作温度与接点温度之间的偏差为动作误差。见表44·1-12。

表44·1-12 电接点玻璃温度计的动作误差

°C

名 称	感温液体	温 度 测 量 范 围	分 度 值						
			0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
			动 作 误 差						
电接点玻璃温度计	固 定 电接点	水 银 -58~<-30 -30~<0 0~100 >100~200 >200~300			±0.5 ±0.5 ±1 ±1	±1 ±1 ±1.5 ±2			
	可 调 电接点	水 银 -58~+30 -30~+50 18~24 15~35 0~50 0~100 50~150 100~200 200~300 0~200 0~300	±0.2	±0.3	±1 ±1 ±0.5	±1 ±1	±2 ±2 ±2	±5	±5

5.3.3 示值稳定性

置（无零点的为上限温度位置）的上升值为示值稳定性。见表44·1-13。

实验室玻璃温度计经稳定性试验后，其零点位

表44-1-13 实验室玻璃温度计的
示值稳定性

温度测量 范 围	分 度 值						
	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
示 值 稳 定 性							
0~100	0.04	0.04					
>100~200	0.08	0.08	0.3	0.3	0.4		
>200~300	0.16	0.16	0.4	0.4	0.6	1	
>300~400		0.3	0.5	0.5	0.8	2	
>400~500		0.3	0.5	0.5	0.8	2	
>500~600					1.2	2	2

5.3.4 实验室玻璃温度计露出液柱示值的修正

实验室玻璃温度计的分度或检验通常是将液柱全部浸入介质中进行的, 因此称为全浸式; 若不是将液柱全部浸入介质中进行分度或检验的, 则称为局浸式。

全浸式在实际使用时如果不可能将液柱全部浸入介质, 则可按下式进行示值修正:

$$\Delta t = \gamma (t_1 - t_2) n \quad (44-1-5)$$

式中 Δt ——全浸式玻璃温度计露出液柱示值修正值 $^{\circ}\text{C}$

γ ——感温液体的视膨胀系数, 它近似于液体实际膨胀系数 α 与玻璃材料实际膨胀系数 β 之差: 即 $\gamma = \alpha - \beta$, 其数值见表44-1-14

t_1 ——温度计的示值 $^{\circ}\text{C}$

t_2 ——露出液柱部分的平均温度, 通常是由悬于距介质 100 毫米处的辅助温度计所测得

n ——露出液柱部分的“度数”(修正到整数)

表44-1-14 感温液体的视膨胀系数

感温液体名称	温度测量范围 $^{\circ}\text{C}$	视膨胀系数 γ
水 银	-30~+600	0.00016
甲 苯	-80~+110	0.00107
乙 醇	-80~+80	0.00103
煤 油	0~300	0.00093
石 油 醚	-120~+20	0.00140
戊 烷	-200~+20	0.00090

举例: 有一支全浸式实验室玻璃水银温度计, 在使用时浸入部分的刻度在 100°C 处, 示值 $t_1 =$

150.3°C , 辅助温度计测得温度 $t_2 = 30^{\circ}\text{C}$, 计算其修正值。

$$\Delta t = \gamma (t_1 - t_2) n = 0.00016(150.3 - 30)$$

$$\times (150 - 100) = 1.0^{\circ}\text{C}$$

则被测量介质的温度:

$$t = t_1 + \Delta t = 150.3 + 1.0 = 151.3^{\circ}\text{C}$$

5.4 结构特点和用途

工业玻璃温度计、实验室玻璃温度计和电接点玻璃温度计的结构特点及用途见表44-1-15。示意图见图44-1-9、10、11。

表44-1-15 玻璃温度计的结构特点和用途

名 称	结 构 特 点	用 途
工业玻璃温度计	1. 棒式和内标式 2. 带保护管和不带保护管 3. 直形、直角(90°)形和135°角形	用于化工、石油、电站、轻工、食品等工业, 测量各种介质的温度
实验室玻璃温度计	1. 棒式和内标式 2. 有机液体和水银	用于实验室和各种精密的温度测量
电接点玻璃温度计	1. 直形、直角(90°)形和135°角形 2. 棒式和内标式 3. 固定电接点和可调电接点	与水银继电器或其它电子继电器配套用来控制温度或报警

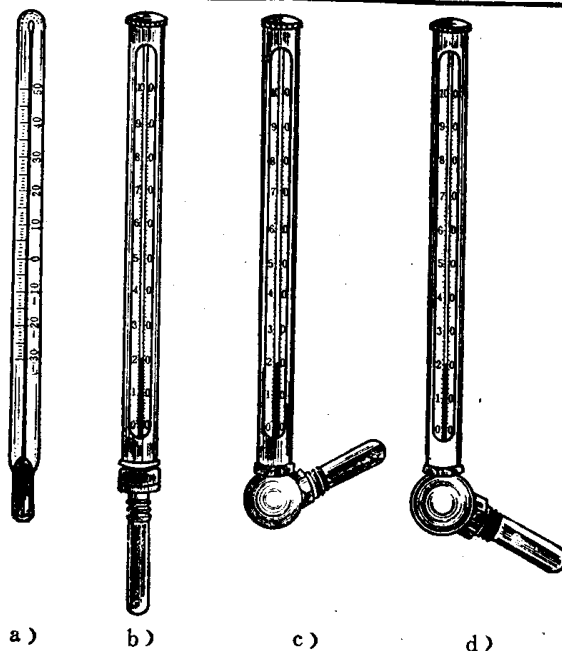


图44-1-9 工业玻璃温度计

a) 棒式 b) 直形带保护管 c) 90°直角形带保护管 d) 135°角形带保护管

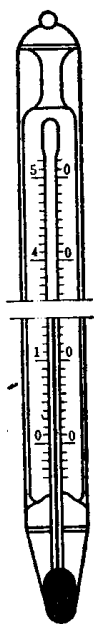
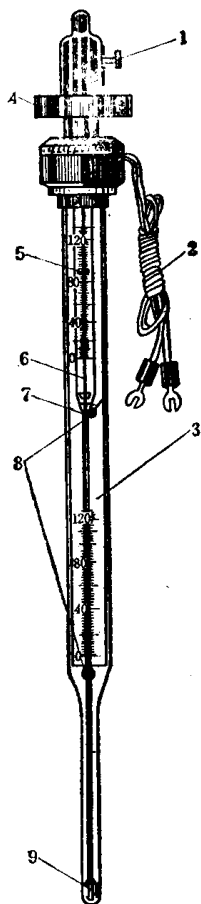


图44-1-10 实验室玻璃温度计

图44-1-11 电接点玻璃温度计
1—磁钢紧固螺钉 2—引出导线
3—刻度标尺 4—磁钢 5—给定值指示器 6—螺旋形轴 7—铂丝
8—铂丝接点 9—感温泡

6 热电阻

6.1 作用原理

热电阻是利用电阻与温度呈一定函数关系的金属导体或半导体材料制成的感温元件。当温度变化时，电阻随温度而变化，将变化的电阻值作为信号输入显示仪表及调节器，就能对被测介质的温度进行测量或调节。

如图 44-1-12 所示的感温元件是以直径为 0.05 毫米的纯铂丝，绕在锯齿形的云母骨架上，用两根直径约为 0.5 毫米的银丝作为引出线与显示仪表连接。当感温元件受到温度作用时，通过测量回路的转换，在显示仪表上显示出温度的变化值。

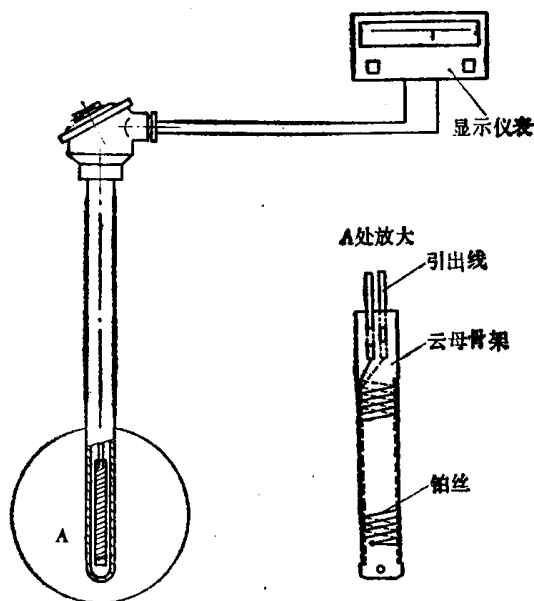


图44-1-12 热电阻的作用原理

6.2 分类

按照感温元件材料分为金属导体和半导体两大类。

金属导体有：铂、铜、镍、铁和铑铁合金，目前在工业中大量使用的材料为铂、铜和镍三种。其中铂热电阻和铜热电阻，属统一设计的定型产品。

半导体有：锗、碳和热敏电阻等。目前由于热敏电阻的性能不稳定，互换性差，因此在工业中尚未大量使用，但有一定的发展前途。

热电阻按照用途和结构分为普通工业用和专用两类。

普通工业用的热电阻有：直形、角形、锥形，其中包括无固定装置、螺纹固定装置和法兰固定装置等品种。

专用的热电阻有：轴承测温用热电阻、便携式简易热电阻、薄型热电阻等。

6.3 热电阻的电阻与温度的关系特性

热电阻的电阻与温度的关系特性可用三种方法表示：作图法，数学表示法，列表法（即分度表表示法，分度表见本章附录）。

常用热电阻的电阻与温度的关系曲线如图 44-1-13 所示。

常用热电阻的电阻与温度的关系特性公式如下：

(1) 铂热电阻的特性公式：

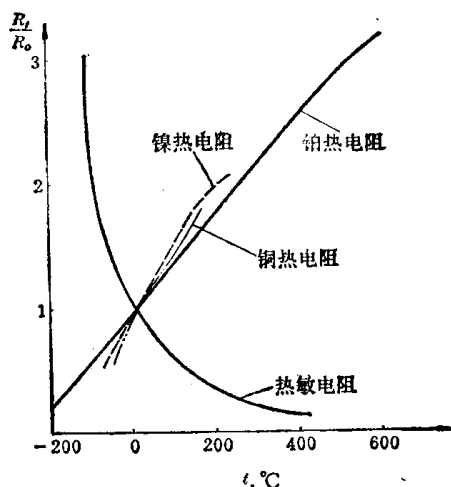


图44-1-13 常用热电阻的电阻与温度的关系曲线

当温度 t : $-200^{\circ}\text{C} \leq t \leq 0^{\circ}\text{C}$ 时

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + Ct^3 (t - 100)] \quad (44-1-6)$$

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

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2) \quad (44-1-7)$$

式中 R_0 —— 0°C 时的电阻值

R_t ——温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值

$$A = 3.96847 \times 10^{-3} \quad 1/^{\circ}\text{C}$$

$$B = -5.847 \times 10^{-7} \quad 1/^{\circ}\text{C}^2$$

$$C = -4.22 \times 10^{-12} \quad 1/^{\circ}\text{C}^4$$

(2) 铜热电阻的特性公式:

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2 + Ct^3) \quad (44-1-8)$$

式中 $A = 4.28899 \times 10^{-3} \quad 1/^{\circ}\text{C}$

$$B = -2.133 \times 10^{-7} \quad 1/^{\circ}\text{C}^2$$

$$C = 1.233 \times 10^{-9} \quad 1/^{\circ}\text{C}^3$$

(3) 热敏电阻的特性公式:

$$R_t = A e^{\frac{B}{t}} \quad (44-1-9)$$

式中 A 、 B ——常数

6.4 基本参数

6.4.1 温度测量范围和基本误差

热电阻的电阻 $R_t = f(t)$ 与该热电阻分度表的误差不应大于表44-1-16的数值。

表44-1-16 温度测量范围和基本误差

°C

名 称	温 度 测 量 范 围	基 本 误 差	
		温 度 范 围	误 差 值 (Δt)
铜 热 电 阻	$-50 \sim +150$	$-50 \sim +150$	$\Delta t = \pm (0.3 + 6 \times 10^{-3} t)$
铂 热 电 阻	$-200 \sim +650$	$-200 \sim 0$	$\Delta t = \pm (0.3 + 6 \times 10^{-3} t)$
		$0 \sim 650$	$\Delta t = \pm (0.3 + 4.5 \times 10^{-3} t)$
镍 热 电 阻	$-60 \sim +180$	$-60 \sim 0$	$\Delta t = 2.0\% t$
		$0 \sim 180$	$\Delta t = 1.0\% t$
热 敏 电 阻	$-40 \sim +150$	$-40 \sim +150$	$\Delta t = \pm 2\% t$

注: 表中 t 为被测温度的绝对值。

6.4.2 电阻值误差和电阻比误差

当温度为 0°C 时, 热电阻的电阻值 (R_0) 误差

和温度为 100°C 以及 0°C 时的电阻比 (R_{100}/R_0) 误差见表44-1-17。

表44-1-17 电阻值 (R_0) 和电阻比 (R_{100}/R_0) 误差

名 称	代 号	温度为 0°C 时电阻值 R_0 Ω		电 阻 比 R_{100}/R_0	
		名 义 值	允 许 误 差	名 义 值	允 许 误 差
铜 热 电 阻	WZC	50	± 0.05	1.428	± 0.002
		100	± 0.10		
铂 热 电 阻	WZP	46	± 0.046	1.3910	± 0.0010
		100	± 0.10		
镍 热 电 阻	WZN	100	± 0.10	1.617	± 0.007
		250	± 0.25		
		500	± 0.50		
		1000	± 1.00		