

附录一 温度的测量与控制

1、温标

温度是表征体系中物质内部大量分子、原子平均动能的一个宏观物理量。物体内部分子、原子平均动能的增加或减少，表现为物体温度的升高或降低。物质的物理化学特性，无不与温度有着密切的关系，温度也是确定物体状态的一个基本参量。因此，准确测量和控制温度，在科学实验中十分重要。

温度是一个很特殊的物理量，两个物体的温度不能像两个物体的质量那样互相叠加，两个温度间只有相等或不等的关系。为了表示温度的数值，需要建立温标，即温度间隔的划分与刻度的表示，这样才会有温度计的读数。国际温标是规定一些固定点，对这些固定点用特定的温度计做精确测量，在规定的固定点之间的温度的测量是以约定的内插方法及指定的测量仪器以及相应的物理量的函数关系来定义。确立一种温标，需要有以下三条：

(1) 选择测温物质：要用某物质的某种与温度有依赖关系而又有良好重现性的物理性质，如：体积、电阻、温差电势以及辐射电磁波的波长等，作为测温物质，利用它的特性制成温度计。

(2) 确定基准点：测温物质的某种物理特性，只能显示温度变化的相对值，必须确定其相当的温度值，才能实际使用。通常是以某些高纯物质的相变温度，如：凝固点、沸点等，作为温标的基准点。

(3) 划分温度值：基准点确定后，还需要确定其基准点之间的分隔，如：摄氏温标是以 1 大气压下的冰点 (0°C) 和沸点 (100°C) 为两个定点，定点间分为 100 等份，每一等份为 1°C ，用外推法或内插法求得其它温度。

实际上，一般所有物质的某种特性，与温度之间并非严格呈线性关系，因此，用不同物质做的温度计测量同一物体时，所显示的温度往往不完全相同。

1848 年开尔文 (Kelvin) 提出热力学温标，它是建立在卡诺 (Carnot) 循环基础上，与测温物质性质无关的一种理想的、科学的温标。

设理想热机在 T_1 和 T_2 ($T_2 > T_1$) 二热源之间工作，工作物质从 T_2 热源吸热 Q_2 ，向 T_1 热源放热 Q_1 ，经过一个可逆循环，对外作功 $W = |Q_2| - |Q_1|$ ，热机效率 η 为：

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

在卡诺循环中，温度 T_1 和 T_2 仅与热量 Q_1 和 Q_2 有关，与工作物质的性质无关。若规定一个固定的温度 T_1 ，则另一个温度 T_2 可由下式求得：

$$T_2 = (|Q_2| / |Q_1|) / T_1$$

开尔文建议用此原理定义温标，称为热力学温标，通常还叫做绝对温标，以 K (开) 表示。

理想气体在定容下的压力 (或定压下的体积) 与热力学温度呈严格的线性函数关系。因此，现在国际上选定气体温度计，用它来实现热力学温标。氦、氢、氮等气体在温度较高、压力不太大的条件下，其行为接近理想气体。所以，这种气体温度计的读数可以校正成为热

力学温度。

热力学温标用单一固定点定义，规定“热力学温度单位开尔文（K）”是水三相点热力学温度的 $1/273.16$ ”。水的三相点温度为 273.16K 。热力学温标与通常习惯使用的摄氏温标分度值相同，只是差一个常数

$$T=273.15+t^{\circ}\text{C}$$

由于气体温度计装置复杂，使用很不方便。为了统一国际间的温度量值，1927年拟定了“国际温标”，建立了若干可靠而又能高度重现的固定点。随着科学技术的发展，又经多次修订，现在采用的是1990国际温标（ITS-90）。

2. 水银温度计

水银温度计是实验室常用的温度计。它的测温物质为水银。因为水银容易提纯，热导率大，比热小，膨胀系数比较均匀。在相当大的温度范围内，水银体积随温度的变化接近于线性关系。构造简单，读数方便。水银温度计可用于 -35°C 到 360°C （水银的熔点是 -38.7°C ，沸点是 356.7°C ），如果用石英玻璃作管壁。其中充入氮气或氩气，最高可测至 750°C 。常用水银温度计刻度间隔有： 2°C 、 1°C 、 0.5°C 、 0.2°C 、 0.1°C 等，与温度计量程范围有关，可根据测量精度选用。

使用时应注意以下几点：

(1) 读数校正：

(i) 以纯物质的熔点或沸点作为标准进行校正：

(ii) 以标准水银温度计为标准，与待校正的温度计同时测量某一体系的温度，将对应值一一记录，作出校正曲线。

标准水银温度计是由多支温度计组成，各支温度计的量程范围不同，交叉组成 -10°C 至 360°C 范围。每支都经过计量部门鉴定，读数准确。

(2) 露茎校正

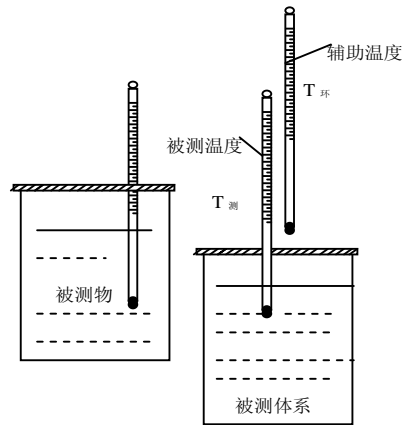
水银温度计有“全浸”和“非全浸”两种。

非全浸式水银温度计常刻有校正时常浸入量的刻度，在使用时若室温和浸入量均与校正时一致，所示温度是正确的。

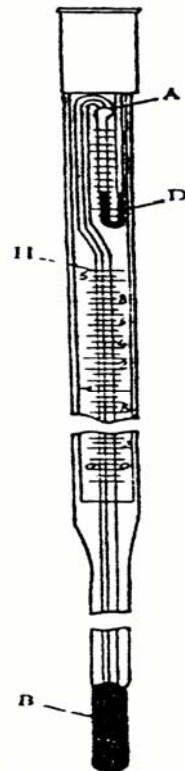
全浸式水银温度计使用时应全部浸入被测体系中，见附图 1-1 所示，达到热平衡后，方能读数。全浸式水银温度计如不能全部浸没在被测体系中，则因露出部分与被测体系温度不同，必然存在读数误差，故必须予以校正。这种校正称为露茎校正。见附图 1-2 所示。校正公式

$$\Delta t = \frac{k\pi}{1+kh}(t_{\text{测}} - t_{\text{环}})$$

式中： $\Delta t = T_{\text{实}} - t_{\text{测}}$ ，是读数校正值； $T_{\text{实}}$ 是温度的正确值； $T_{\text{测}}$ 是温



附图 1-1 全浸式水银温度计的使用



附图 1-3 贝克曼温度计

度计的读数； $T_{环}$ 是露出待测体系外水银柱的有效温度（从放置在露出一半位置外的另一支辅助温度计读出）； h 是水银柱露出待测体系外部的长度，称露茎高度，以温度差值表示。 k 是水银对于玻璃的相对膨胀系数，用摄氏度时， $k=0.00016$ ，上式中 $K_0 \ll 1$ ，所以， $\Delta t \approx kh (T_{实} - t_{环})$

3、贝克曼温度计

(1) 贝克曼 (Beckmann) 温度计是精密测量温度差值的温度计，它的主要特点是：最小刻度为 $1/100^\circ\text{C}$ ，用放大镜可以估计读准到 0.002°C ，测量精度较高。还有一种 $1/500^\circ\text{C}$ 刻度的，可以读准到 0.00040°C 。贝克曼温度计一般只有 5°C ， $1/500^\circ\text{C}$ 刻度的贝克曼温度计，其量程只有 1°C 。为了适用于不同用途，其刻度方式有两种：一种是 0°C 刻在下端， 5°C 刻在上端；另一种为 0°C 刻在上端， 5°C 刻在下端。与普通温度计不同，（见附图 1-3），在它的毛细管上端，加装了一个水银贮管 D，用来调节水银球 B 中的水银量。因此，虽然量程只有 5°C ，却可以在不同温度范围内使用，一般可供 $-6^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ 范围内使用。

由于水银球 B 中的水银量是可变的，因此，水银柱的刻度值就不是温度的绝对值，只适用于在量程范围内读出温度的变化值 ΔT 。

(2) 使用方法

首先根据实验的要求确定选用哪一类型的贝克曼温度计。使用时需经以下操作步骤：

(i) 测定贝克曼温度计的 R 值

贝克曼温度计最上部刻度处 H 到水银贮管顶端 A 处所相当的温度值称为 R。将贝克曼温度计与另一支普通温度计（ $1/10$ 刻度）同时插入盛水（或其它液体）烧杯内，加热烧杯，贝克曼温度计中的水银柱就会上升，由普通温度计可以读出从 H 到 A 段相当的温度值，称为 R。可重复几次取其平均值。

(ii) 水银球 B 中水银量的调节

在使用贝克曼温度计，首先应该将它插入一杯与所要测定体系温度相同的水中，待平衡后，如果毛细管内水银而在所要求的合适刻度附近，说明水银球 B 中的水银量合适，就不必调节。否则，就应该调节水银球中的水银量。若水银球 B 内水银量过多，毛细管中水银而已过 A 点，在此情况下，左手握贝克曼温度计的中部，将温度计倒置，右手轻击左手腕，使水银贮管 D 中水银与 A 点处水银相连接，连好后再将温度计轻轻倒转回来，然后将温度计置于温度为 T' 的水中，待平衡后，用左手握住贝克曼温度计顶部，迅速取出，离开水面和实验台，立即用右手轻击左手腕，使毛细管中水银与 D 管中水银在 A 处断开。此步骤要特别小心，切勿使温度计与其它硬物相碰。温度 T' 的选择可按下式计算

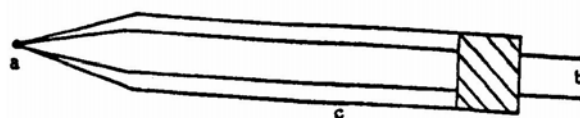
$$t' = 1 + R + (5 - x)$$

式中： t 为实验温度； x 为在 $t^\circ\text{C}$ 时贝克曼温度计的读数。

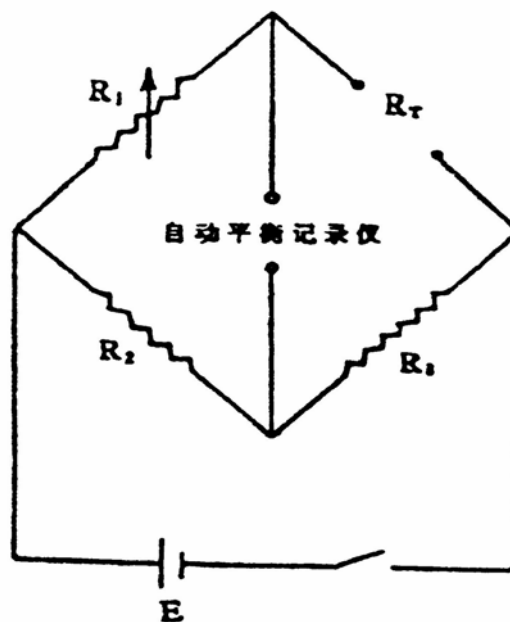
若水银球 B 内水银量过少时，左手握住贝克曼温度计中部，将温度计倒置，右手轻击左手腕，水银就会在毛细管中向下流动，待水银在 A 处与 D 管中水银相连接，即可按上法调节。调节后，将贝克曼温度计放在实验温度 $t^{\circ}\text{C}$ 的水中，看温度计中水银柱是否在所要求的刻度 x 附近，如果相差太大，则需重新调节。

(3) 注意事项

贝克曼温度计是由薄玻璃制成，易被损坏，一般只应放置三处：①安装在使用仪器上；②放在温度计盒内；③握在手中。不准任意放置在其他地方。调节时，应注意不能让它受剧热或骤冷，还应避免重击。已调节好的温度计，注意不要使毛细管中水银再与 D 管中水银相连接用夹子时必须垫有橡胶板，不能用铁夹直接夹温度计。



附图 1-4 珠形热敏电阻器示意图



附图 1-5 热敏电阻测温示意图

4、铂电阻及热敏电阻温度计

电阻温度计的测温原理上基于金属或半导体的电阻随温度变化的特性。

(1) 铂电阻温度计

铂容易提纯，化学稳定性很高，并具有很高重复性的电阻温度系数。所以，铂电阻与专用精密电桥或电位差计组成的铂电阻温度计，有着极高的精确度。因此，铂电阻温度计在 $13.81\text{K}(-259.35^{\circ}\text{C})$ 至 $903.89\text{K}(630.74^{\circ}\text{C})$ 温度范围内被选定为标准温度计。

铂电阻温度计用的纯铂丝，是在 $933.15\text{K}(660^{\circ}\text{C})$ 退火处理过，以增加其重现性和稳定性，绕在交叉的云母片上，密封在特硬玻璃管中，管内充满干燥的氦气，成为感温元件。用电桥法测定铂丝电阻。

铂电阻温度系数，在 273K 时每欧姆为 $0.00392[\text{欧姆} \cdot \text{开}^{-1}]$ ，如果此温度下电阻为 25 欧姆的铂电阻温度计，其温度系数为 $0.1[\text{欧姆} \cdot \text{开}^{-1}]$ ，欲使所测温度能准确到 0.001K ，测得的电阻值，必须精确到 $\pm 10^{-4}[\text{欧姆}]$ 以内。

(2) 热敏电阻温度计

热敏电阻的电阻值，会随着温度的变化而发生显著的变化，它是一个对温度变化极其敏感的元件。它对温度的灵敏度要比铂电阻、热电偶等其它感温元件高得多。目前，常用的热敏电阻是由金属氧化物半导体材料制成的，它能直接将温度转换成电性能的变化（电阻、电压或电流的变化），测量电性能变化就可以测出温度的变化。

热敏电阻值与温度的关系并非线性关系，但当我们用它来测量较小范围的温度时，则近似为线性关系。实验证明，其测定温差的精度足以和贝克曼温度计相比，而且还具有热容量小、响应快，便于自动记录等优点。

根据热敏电阻器的电阻—温度特性可分为二类：(1)具有正温度系数的热敏电阻器(简称 PTC)；(2)具有负温度系数的热敏电阻器(简称 NTC)。

热敏电阻器的基本构造为：a.用热敏材料制成的热敏元件；b.引线；c.壳体。它可以做成各种形状。附图 1-4 是珠形热敏电阻器的示意图。在实验中可将热敏电阻作为电桥的一臂，其余三臂是纯电阻(见附图 1-5)。图中 R_2 、 R_3 为固定电阻， R_1 为可变电阻， R_r 为热敏电阻，E 为甲电池。当在某温度下将电桥调平衡。记录仪中无电压讯号输入，当温度改变后，电桥不平衡，则有电压讯号输给记录仪，记录仪的笔将移动，只要标定出记录仪的笔相应每 $^{\circ}\text{C}$ 时的走纸格数，就很容易求得所测的温度。实验时要特别注意防止热敏电阻器两条引线间受潮漏电，否则必将影响所测结果和记录仪的稳定性。

5、热电偶温度计

两种不同金属导体构成一个闭合线路，如果联接点温度不同，回路里将产生一个与温差有关的电势，称为温差电势。这样的一对金属导体称为热电偶。因此，可利用热电偶的温差电势测定温度。

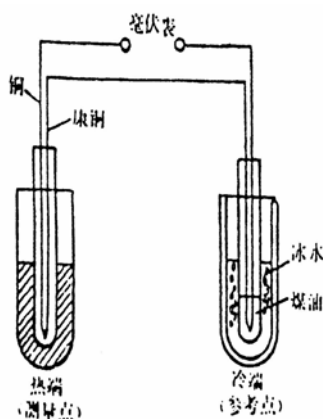
几种常用的热电偶温度计的适用范围，及其室温下温差电势的温度系数列于表 1-1 中。表 1-1 中热电偶的化学成分为：

康铜	Cu	60%;	Ni	40%				
镍铬	Ni	90%	Cr	10%				
镍铝	Ni	95%	Al	2%	Si	1%;	Mg	2%
铂铑	Pt	90%	Rh	10%				

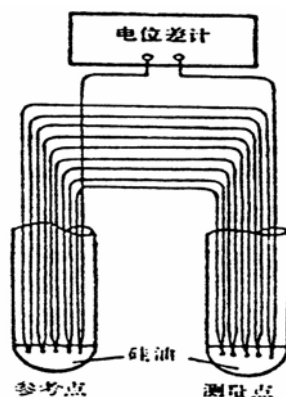
表 1-1 几种常用热电偶的适用范围及 dE/dT 值

类型	适用温度范围 $^{\circ}\text{C}$	可以短时间用的温度 $^{\circ}\text{C}$	$dE/dT(\text{mv} \cdot \text{K}^{-1})$
铜-康铜	0~350	600	0.0428
铁-康铜	200~700	1000	0.0540
镍铬-镍铝	200~1200	1350	0.0410
铂-铂铑	0~1450	1700	0.0064

热电偶的两根材质不同的偶丝，需在氧焰或电弧中熔接。为了避免短路，需将偶丝穿在绝缘套管中。



附图 1-6 热电偶的使用



附图 1-7 热电偶五对串联

使用时一般是将热电偶的一个接点放在待测物体中（热端），而将另一端放在储有冰水的保温瓶中（冷端），这样可以保持冷端的温度恒定。见附图 1-6。

为了提高测量精度，需使温差电势增大，为此，可将几支热电偶串联（见附图 1-7），称为热电堆。热电堆的温差电势等于各个热电偶温差电势之和。

温差电势可以用直流毫伏表、电位差计或数字电压表测量。热电偶是个良好的温度变换器，可以直接将温度参量转换为电参量，可以自动记录，或实现复杂的数据处理、控制，这是水银温度计无法比拟的。

6、自动控温简介

实验室中都有自动控温设备，如电冰箱、恒温水浴、高温电炉等。现代多数采用电子调节系统来进行温度控制。它具有控温范围宽、设定温度可以任意调节、控温精度高等优点。

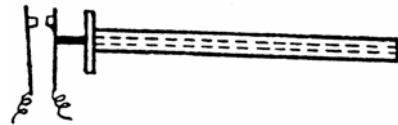
电子调节系统种类很多，但从原理上讲它必须包括三个基本部件，即变换器、电子调节器和执行机构。变换器的功能是将被控对象的温度信号变换成某种电信号。电子调节器的功能是对来自变换器的电信号进行测量、比较、放大、运算，最后发出某种形式的指令。使执行机构进行加热或致冷，电子调节系统按其自动调节规律，可分为断续式二位置控制和比例—积分—微分控制两种。分别作一简介。

（1）断续式二位置控制

实验室常用的电烘箱、电冰箱、高温电炉和恒温水浴等，大多数采用这种控制方法。变换器有不同形式：

（i）双金属膨胀式

利用不同金属的线膨胀系数不同，选择线膨胀系数差别较大的两种金属，膨胀系数大的金属棒在中心，膨胀系数较小的金属管套在外面，两种金属的内端焊接在一起，外套管的另一端固定（见附图 1-8）。在温度升高时，管中金属棒即向外伸长。伸出长度与温度成正比，触点开关的外臂可以调节其位置，即可在不同温度区间使触点开关“接通”或“断开”，继电器则使加热或致冷器工作或停止，从而达到控温目的。双金属膨胀式控温灵敏度较差，一般只能控制在几开范围内。



附图 1-8 双金属膨胀式温度控制器示意图

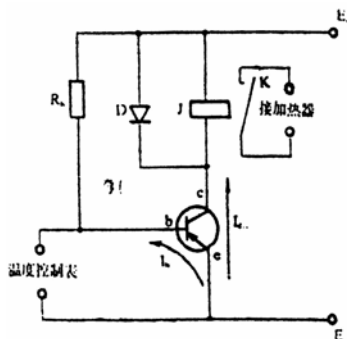
（ii）晶体管继电器

随着科技的发展，电子继电器中电子管逐渐被晶体管代替，典型线路见附图 1-9。当温度控制表呈断开时， E_c 通过电阻 R_b 给 PNP 型三极管的基极 b 通入正向电 I_b ，使三极管导通，集电极电流 I_c 使继电器 J 吸下衔铁， K 闭合，加热器加热。当温度控制表接通时，三极管发射极 e 与基极 b 被短路，三极管截止， J 中无电流， k 被断开，加热器停止加热。当 J 中线圈电流突然减少时会产生反电动势，二极管 D 的使用是将它短路，以保护三极管避免被击穿。

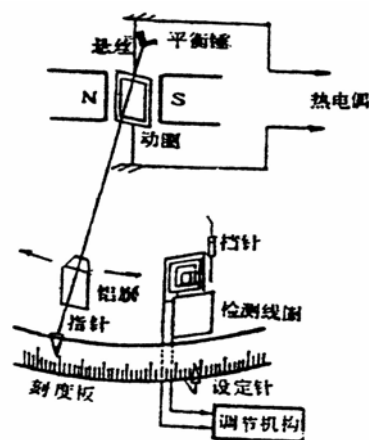
（iii）动圈式温度控制器

由于温度控制表、双金属膨胀类变换器不能用于高温，因而产生了可用于高温控制的

动圈式温度控制器。采用能工作于高温的热电偶作为变换器。其原理见附 1-10。热电偶将温度信号转换为电压信号，加于动圈式毫伏表的线圈上，当线圈中因电流通过而产生的磁场与外磁场相作用时，线圈就偏转一个角度，故称为“动圈”，偏转的角度与热电偶的热电势成正比，并通过指针在刻度板上直接将被测温度指示出来，指针上有一片“铝旗”，它随指针左右偏转。另有一个调节设定温度的检测线圈，它分成前后两半，安装在刻度板的后面，并可通过机械调节机构沿刻度板左右移动。检测线圈的中心位置，通过设定针在刻度板上显示出来。当高温设备的温度未达到设定温度时，铝旗在检测线圈之外，电热器在加热。当温度上升到设定值时，铝旗全部进入检测线圈，改变了电感量，电子系统使加热器停止加热。为防止当被控对象的温度高于设定温度时，铝旗会冲出检测线圈，产生加热的错误信号，因此，加有一个挡针。



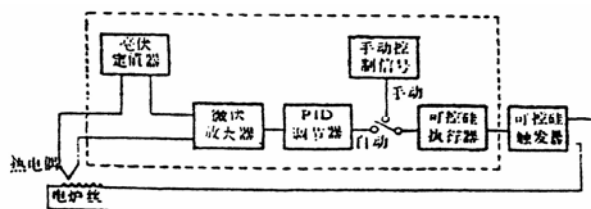
附图 1-9 晶体管继电器



附图 1-10 动圈式温度控制机构

(2) 比例—积分—微分温度控制

随着科学技术的发展，要求控制恒温 and 程序升温或降温的范围日益广泛，要求控温的精确度也高了，在通常温度下，使用如上面所述的断续式二位置控制的恒温槽还是很方便的。但由于加热器内电流只有通与断两种状态，电流大小无法自动调节，特别是被控对象与环境的温差越大，控温精度就越差，六十年代以来，控温的手段和控温所能达到的精度，都有了新的进展，广泛采用比例—积分—微分（简称 PID）调节器，利用可控硅使加热器电流能随偏差信号大小而作相应的变化，从而提高了控温的精确度。PID 温度调节系统原理见附图 1-11：



附图 1-11 PID 温度调节系统方框图

炉膛温度采用热电偶测量，由毫伏定值器给出与设定温度值相应的毫伏值。热电偶的热

电势与定值器输出的毫伏值相比较，如有偏差，说明炉膛温度偏离设定值，此偏差经微伏放大器放大，送入 PID 调节器，再经可控硅触发器去推动可控硅执行器，以相应调整炉丝加热功率。从而使偏差迅速消除，使炉温保持在所要求的温度控制精度范围内。

比例调节作用，就是要求输出的控制电压能跟随偏差（炉温与设定温度之差）电压的变化，自动的按比例增加或降低。但在比例调节时会产生“静差”。要使被控对象的温度能在设定值稳定下来，就必须使加热器继续给出一定热量，以补偿被控对象向环境耗散的热量，但由于在单纯的比例调节中，加热器发出的热量会随着温度回升时偏差的减少而减少，当加热器发出的热量不足以补偿耗散热量时，温度就不能回升到设定值，这被称为“静差”。

为了克服静差，需要加积分调节。就是输出控制电压与偏差信号电压与时间的积分成正比，只要有偏差存在，尽管偏差极微小，但经长时间的积累，就会有足够的输出信号去控制加热器的加热电流，当被控对象的温度回升到接近设定温度时，偏差电压虽然极小，但加热仍能在一段时间内维持一个较大的输出功率，因而能消除静差。

微分调节作用，就是输出控制电压与偏差电压的变化速率成比例，而与偏差电压的大小无关。这在情况多变的控温系统，如果产生偏差电压的突然变化，微分调节就会增大或减小输出控制电压，以克服突然变化所引起的温度偏差，保持被控对象温度的稳定。

PID 控制是一种比较先进的模拟控制方式，适用于各种条件复杂、情况多变的实验系统。目前已有多种国产 PID 控温仪器可供选用。常用的有 DWK-720 型、DWK-703 型精密温度自动控制仪，DDZ-II 型电动单元组合仪表中的 DTL-121、DTL-161、DTL-152、DTL-154 等都是 PID 调节的调节单元。DDZ-III 型中的调节单元还可以与计算机联用，使模拟调节更加完善。

对 PID 控制的原理及线路分析感兴趣的读者可参考专门著作。