

中等专业学校試用教科书

热工测量和仪表

徐伟勇 蔣履仁 邓天日 張玉鐸 潘紹基 編著



中国工业出版社

79.85
499

中等专业学校試用教科书



热工測量和仪表

徐伟勇 蔣履仁 邓天日 张玉鐸 潘紹基 編著

中国工业出版社

本书讲述热电厂热工过程中各参数的测量方法，常用热工测量仪表的动作原理和构造，各种仪表的使用以及调整校验的方法等。

本书可作中等专业学校“热工仪表和自动装置”专业的教科书，同时也可供火力发电厂中从事热工仪表工作的工程技术人员参考。

热工测量和仪表

徐伟勇 蒋履仁 邓天日 张玉鐸 潘紹基 編著

*

水利电力部办公厅图书编辑部编辑(北京阜外月坛南营房)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

(北京市书刊出版事业许可证出字第110号)

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $187/8$ ·字数449,000

1964年6月北京第一版·1964年6月北京第一次印刷

印数0001—2,980·定价(科四)2.00元

*

统一书号: K15165·2909(水电-397)

序

本书是按中等专业学校“热工仪表和自动装置”专业“热工测量和仪表”课程的教学大纲而编写的。全书的主要内容是介绍发电厂热工过程中诸参数的测量方法，各种热工测量仪表的原理、构造和性能，并简述了有关热工仪表的安装、校验和调整的实际工作方法。

由于国产仪表型号尚未统一制订，而在发电厂中目前又习惯使用苏联型号，故本书中仍以苏联型号来称呼各类热工仪表。

编排次序是按参数的测量分章。但鉴于电子式热工仪表在电厂中已得到了广泛的应用，并且它具有通用性，故在本书中专辟一篇予以详细阐述。

全书由吉林电力学院徐伟勇、蒋履仁、邓天日、张玉鐸和上海电力学校潘绍基等同志执笔编写。最后由徐伟勇同志校阅。

限于编写者的水平，书中难免有不当或错误之处，希望使用本书的教师、同学或其他读者随时提出批评和指正。

吉林电力学院自动控制教研室

07242

目 录

緒 論	1
-----	---

第一篇 溫度的測量

第一章 溫度標尺及測溫儀表的 分類	6	第二節 制造電阻溫度計的材料	52
第一節 溫度和溫度標尺	6	第三節 電阻溫度計的構造	53
第二節 熱力學溫度標尺	7	第四節 用電橋測量電阻的方法	56
第三節 國際溫標	8	第五節 比率計	58
第四節 測溫儀表的分類	10	第六節 電阻溫度計的校驗與調整	62
第二章 膨脹式和壓力表式溫度計	10	第五章 輻射高溫計	67
第一節 膨脹式溫度計	10	第一節 輻射高溫計的理論基礎	67
第二節 壓力表式溫度計	20	第二節 光學高溫計	69
第三章 熱電高溫計	24	第三節 全輻射高溫計	71
第一節 熱電偶的理論基礎	24	第四節 光學高溫計和全輻射高溫計的 測量誤差和校驗	72
第二節 熱電偶的材料、型式和構造	26	第五節 光電高溫計	73
第三節 熱電偶冷端的恒溫與補償	33	第六節 比色高溫計	74
第四節 高溫毫伏計	37	第六章 測溫儀表的安裝及 測溫誤差	78
第五節 熱電勢的電位計測量法	44	第一節 敏感元件的安裝及其誤差	78
第六節 熱電高溫計的校驗和調整	47	第二節 二次儀表的安裝	82
第四章 電阻溫度計	51		
第一節 基本知識	51		

第二篇 壓力、流量和液位的測量

第七章 壓力的測量	84	第四節 標準節流件的選擇和計算	120
第一節 基本知識	84	第五節 差壓計的分類和選擇	125
第二節 液柱式壓力計	85	第六節 浮子式差壓計	127
第三節 彈性壓力計	90	第七節 薄膜式差壓計	135
第四節 遠距離傳送讀數的壓力計	95	第八節 圓環式和鐘罩式差壓計	136
第五節 活塞式壓力計	97	第九節 節流式流量計的校驗和調整	138
第六節 單圈彈簧管式壓力計的 校驗和調整	98	第十節 節流式流量計的安裝	141
第七節 壓力測量儀表的安裝	100	第九章 容積式、速度式、定壓降式和 電氣式流量計	145
第八節 特殊的測壓儀表	102	第一節 容積式流量計	145
第八章 流量的測量	106	第二節 速度式流量計	146
第一節 基本知識	106	第三節 動壓測定管	147
第二節 標準節流件	107	第四節 定壓降式流量計	150
第三節 流量方程式	110	第五節 電氣式流量計	152

第十章 液位的測量.....155	第三節 差压式水位計.....160
第一节 基本知識.....155	第四節 浮子式液位計.....160
第二节 液柱式低置水位計.....156	第五節 特殊型式的液位計.....161

第三篇 电子式热工仪表

第十一章 电子式热工仪表的 工作原理.....164	第三節 用长条記錄紙的小型仪表.....203
第一节 測量系統.....165	第四節 旋轉刻度盘的指示仪表.....209
第二节 电子放大器和可逆电动机.....172	第五節 微型仪表.....211
第十二章 电子式热工仪表的 型式和結構.....187	第十三章 电子式热工仪表的校驗、 調整、檢查和安裝.....214
第一节 用长条記錄紙的大型仪表.....187	第一节 仪表的校驗和調整.....214
第二节 用圓形記錄紙的大型仪表.....197	第二节 电子式热工仪表的故障檢查.....216
	第三节 电子式热工仪表的安裝.....234

第四篇 成份分析和特殊測量

第十四章 气体成份的測量.....239	第二节 水氧計.....275
第一节 基本知識.....239	第三节 酸度計.....276
第二节 人工的化学式气体分析器.....239	第十六章 电厂中的其它几种 特殊測量.....281
第三节 自动的化学式气体分析器.....241	第一节 轉速表.....281
第四节 热导式气体分析器.....243	第二节 汽輪机軸向位移指示計.....284
第五节 磁性氧量分析器.....255	第三节 轉子和靜子膨脹差指示計.....285
第六节 測氫計.....259	第四节 汽輪机膨脹指示計.....287
第七节 去极化法微量氧分析器.....262	第五节 汽輪机軸承振動表.....288
第八节 紅外綫式气体分析器.....265	第六节 皮帶式煤秤.....290
第九节 質譜儀.....267	第七节 煤位和粉位的測量.....291
第十五章 汽水品質的測量.....268	第八节 熱量計.....293
第一节 鹽量計.....268	

緒 論

一、热工測量的目的

在热力发电厂主要动力設備上，以及在其輔助設備上，都裝設着大量的各种类型的热工仪表，其中絕大多数是指式式和記錄式仪表，而且集中安装在运行值班人員的操作盘上。通过这些仪表，就可以对生产过程中各主要参数进行定期的或連續的測量，其目的在于：

- 1) 保證設備的安全运行；
- 2) 保證設備的經濟运行；
- 3) 进行設備工作的技术統計。

热力設備能否安全运行，在很大程度上取决于能否及时地通过各种仪表監督它的工況。連續地監視工质(水、汽、煤、油、风、烟等)的压力、温度和流量，經常地观察水位、汽机轉速和汽水品质，就能保證热力設備可靠地运行。例如監視鍋炉汽鼓水位，可以防止滿水或缺水事故；監視蒸汽的含盐量，可以避免过热器和汽輪机通流部分結垢。在有些热工測量仪表中还設有信号装置，以便在設備快要发生事故前发出“声”“光”信号，提醒运行人員采取紧急措施，防止事故的发生和扩大。此外，通过仪表对工況的監督，还可以减少各种热損失，降低消耗，从而提高設備的效率和运行經濟性。

热力发电厂技术統計是降低成本，提高劳动生产率和設備利用率的一項重要工作，其內容是定期地(每天，每月和每年)核算下列基本的技术經濟指标：发电量和供热量，生产每千瓦时电能和供应每百万大卡热能的标准煤耗，鍋炉机組，汽輪机机組和整个电厂的热效率等。为了进行技术統計，就需要采用自动記錄式和积算式的仪表。

二、測量仪表的分类

热工測量仪表可按照它們的用途和結構特征从几方面来分类。

按照測量的参数来分有：温度、压力、流量、液位、气体成分、汽水品质和特殊量的測量几类。

上述分类方法是最基本的。此外，測量仪表还可以按下列几类方法分类：

1. 按照用途，可分为工程用的，實驗室用的和标准的；
2. 按照指示特性，可分为指示式，自动記錄式和积算式；
3. 按照作用原理，可分为机械式，电气式，液力式和化学式；
4. 按照装置地点，可分为就地的和远方傳送指示的；
5. 按照工作条件，可分为固定式和便携式。

几乎每一种热工測量仪表都可以按照上述类别来划分。

工程用的測量仪表是在实际中最广泛采用的一种測量仪表，它的結構比較簡單、牢固、工作比較可靠、但准确度較低。

實驗室用的仪表一般是用来在實驗室內校驗工程用仪表。

标准仪表是用来复制和保持測量单位，或者用来进行各种測量仪表校驗和刻度工作的仪表。用来复制和保持測量单位的标准仪表称为国家原器，它保存在国家計量局內，通过

这些国家原器与国际标准联系。

三、测量仪表的組成及其特性

大多数测量仪表都由三个独立元件組成：一次仪表，二次仪表和連接件。

一次仪表是测量仪表的敏感部分，它通常装在测量处，直接感受被测量的脉冲。

二次仪表是测量仪表的指示部分，它指出被测量的数值。二次仪表通常有一个单独的外壳，装在机組专設的表盘上。

連接件(导管和导綫)是测量仪表的傳送部分，它用来把指示(脉冲)从一次仪表傳到二次仪表。

一次仪表常常带有称为“发送器”的附加装置，它把所接受的非电气量的脉冲轉变为电气量，然后再用导綫傳給二次仪表(讀数的远方傳送)。

在某些情况下，测量仪表还設有附加的电气接点装置，当被测参数偏离允許值时能自动地对“声”“光”信号装置起作用或是进行自动調节。

二次仪表是测量仪表的基本組成部分。

测量仪表的品质主要是取决于测量的准确度，仪表的灵敏度和测量仪表讀数的时滯。

测量的准确度是表明測量結果的真实程度，即仪表的指示值与被测量实际数值間的差异。

所謂仪表的灵敏度就是仪表指示的綫位移或角位移与引起这个位移的被测量变化之比。如果 Δl 表示仪表指示的角位移或綫位移， ΔA 表示被测量值的改变，則仪表的灵敏度 S 可以由下式表示：

$$S = \frac{\Delta l}{\Delta A}. \quad (1)$$

测量仪表讀数时滯就是指它的慣性，用从被测量开始变化时起到仪表指示这个变化时止所經過的时间来表示。仪表的慣性多半是由热的、机械的和流体的因素所引起的。

四、測量誤差

在一般情况下，影响測量准确度的因素有：

- 1) 测量仪表的品质；
- 2) 安装仪表的方法；
- 3) 测量仪表的工作条件；
- 4) 观察者的个人特点。

測量准确度用仪表讀数的誤差来表示。与仪表的性质有关的測量誤差称为量具誤差。任何仪表，即使是新的，也按其准确度等級和制造的质量，各有其量具誤差。当仪表工作較久后，由于其彈簧的殘余变形，摩擦部分的磨損，机构的污秽和損伤等，它的誤差就会逐漸增大，因此就产生了定期校驗和檢修仪表的必要性。

測量誤差可以用絕对誤差或相对誤差的形式来表示，它可以是正值，也可以是負值。

絕对誤差 a 是被测量的指示值 A_1 与实际数值 A 之間的差值，用測量单位表示；相对誤差 b 是絕对誤差与被测量实际数值之間的比值，用百分率表示，即：

$$a = A_1 - A; \quad (2)$$

$$b = \frac{a}{A} \times 100\% . \quad (3)$$

为了得到被测量的实际值，必須在仪表指示值上加一改正值 C ，即：

$$C = A - A_1 = -a . \quad (4)$$

由于引起測量誤差的因素很多，故把相当于仪表在标准情况下工作的指示值誤差称为基本誤差。为了决定仪表刻度上各点的誤差，仪表要在发电厂热工室内进行定期校驗，并在国家計量局的各省市管理部門中进行国家校驗。

校驗仪表就是把它的指示值和标准仪表的指示值进行比较。对于工程用的仪表，校驗点一般是取3~5点；对于实验室用的仪表則取10~15点。

校驗仪表通常是从增加被測量开始(正行程)，然后再减少被測量(反行程)。在外部条件不变的情况下，对于同一个被測量的实际数值，仪表在正反行程中指示值的最大差值称为仪表的变差。变差是由測量裝置的彈性后效应或热效应，可动部件的磨損，傳动机构的間隙等因素造成的。

仪表的变差 ε 一般用对于刻度上限和下限之差的百分率来表示。

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A_k - A_n} \times 100\% . \quad (5)$$

式中 ΔA ——在正反行程时，仪表最大的指示值之差；

A_k ——仪表刻度的上限；

A_n ——仪表刻度的下限。

所有的仪表根据它的用途和測量范围，都按規程規定了允許誤差。允許誤差前带“±”号，或者是这两个符号之一(假如規定只允許有一个方向誤差值)。如果仪表的誤差超出了允許誤差，就不能使用，需要檢修或重划刻度。

允許誤差分为絕對和相对的。相对允許誤差 b' 是絕對允許誤差 a' 与仪表刻度上限 A_k 和下限 A_n 之差的比值，用百分率表示：

$$b' = \pm \frac{a'}{A_k - A_n} \times 100\% . \quad (6)$$

相对允許誤差的数值称为仪表的准确度級(精度級)，例如相对允許誤差是 $\pm 0.5\%$ 的仪表，其准确度級就是0.5，或称作0.5級的仪表。工程用仪表的准确度一般是0.5~2.5級。实验室用的和标准的仪表，其准确度都在0.5級以內。

例如，校驗准确度为1級的，刻度从0到25公斤/厘米²的压力表，其絕對的測量誤差不超过0.4公斤/厘米²，試比較它的实际誤差和允許誤差。

准确度为1級的压力表，其相对允許誤差 b' 为 $\pm 1\%$ ，因而，它的絕對允許誤差

$$a' = \frac{1.0 \times 25}{100} = 0.25 \text{ 公斤/厘米}^2 .$$

由此可見，压力表的实际誤差超出了絕對允許誤差，故仪表不能繼續使用。

在实验中为了得到仪表的真实測量結果，往往在同一条件下重复測量多次，多次測量的算术平均值 A_{cp} 就是測量的最終結果，用下式求得：

$$A_{cp} = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n} . \quad (7)$$

式中 A_1, A_2, \dots, A_n ——一系列被測量的数值；

n ——測量次数。

数值 A_1, A_2, \dots, A_n 中包括偶然误差。测量的次数 n 愈多, 平均值 A_{cp} 与实际值 A 之间的偏差就愈小, 因为按照误差理论, 当测量次数增多时, 偶然误差便可忽略。

每个被测数值与平均值的差额称为剩余误差, 可以用下式表示:

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= A_1 - A_{cp} \\ l_2 &= A_2 - A_{cp} \\ \dots & \dots \dots \\ l_n &= A_n - A_{cp} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

若在计算算术平均值时没有错误, 剩余误差应该符合下列条件:

$$\sum l = 0.$$

在实际中为了衡量连续测量结果的可靠程度, 可以使用下列准确度参数: 均方根误差 δ , 偶然误差 ρ 和最大可能误差(极限误差) λ ,

$$\delta = k \sqrt{\frac{l_1^2 + l_2^2 + \dots + l_n^2}{n(n-1)}}; \quad (9)$$

$$\rho = v \sqrt{\frac{l_1^2 + l_2^2 + \dots + l_n^2}{n(n-1)}}; \quad (10)$$

$$\lambda = m \sqrt{\frac{l_1^2 + l_2^2 + \dots + l_n^2}{n(n-1)}}. \quad (11)$$

在上述的公式中, 已考虑了有限次测量对理论公式应加的修正。式中各系数的数值按下表确定:

$n-1$	v	k	m	$n-1$	v	k	m
1	1.000	1.84	40.0	11	0.697	1.05	3.9
2	0.816	1.28	22.0	12	0.695	1.04	3.8
3	0.765	1.20	9.0	13	0.694	1.04	3.7
4	0.741	1.14	6.6	14	0.692	1.04	3.6
5	0.727	1.11	5.7	15	0.691	1.03	3.6
6	0.718	1.09	5.1	16	0.690	1.03	3.5
7	0.711	1.08	4.7	17	0.689	1.03	3.5
8	0.706	1.07	4.4	18	0.688	1.03	3.5
9	0.703	1.06	4.2	19	0.688	1.02	3.4
10	0.700	1.05	4.0	20	0.687	1.02	3.4

例如, 利用水银温度计测量水的温度。多次测量的结果如下:

$$\begin{aligned} t_1 &= 138.1^\circ\text{C}; & t_4 &= 131.8^\circ\text{C}; \\ t_2 &= 139.8^\circ\text{C}; & t_5 &= 139.2^\circ\text{C}; \\ t_3 &= 137.9^\circ\text{C}; & t_6 &= 140.5^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

试求它的最终测量结果以及均方根误差、偶然误差和最大可能误差。

在上述测定结果中, t_4 的数值偏差很大, 估计可能是受到干扰, 故不予考虑。这时:

$$t_{cp} = \frac{138.1 + 139.8 + 137.9 + 139.2 + 140.5}{5} = 139.1^\circ\text{C}.$$

每次测量的剩余误差为:

$$\begin{aligned} l_1 &= 138.1 - 139.1 = -1.0^\circ\text{C} \\ l_2 &= 139.8 - 139.1 = +0.7^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$l_3 = 137.9 - 139.1 = -1.2^\circ\text{C}$$

$$l_5 = 139.2 - 139.1 = +0.1^\circ\text{C}$$

$$l_6 = 140.5 - 139.1 = +1.4^\circ\text{C}$$

檢驗 t_{cp} 的正确性:

$$\Sigma l = (-1.0) + (+0.7) + (-1.2) + (+0.1) + (+1.4) = 0.$$

按照上表查得: $v=0.741$, $k=1.14$, $m=6.6$.

均方根誤差:

$$\delta = 1.14 \sqrt{\frac{(-1.0)^2 + (+0.7)^2 + (-1.2)^2 + (+0.1)^2 + (+1.4)^2}{5(5-1)}} \\ \approx \pm 0.565^\circ\text{C}.$$

偶然誤差:

$$\rho = 0.741 \sqrt{\frac{(-1.0)^2 + (+0.7)^2 + (-1.2)^2 + (+0.1)^2 + (+1.4)^2}{5(5-1)}} \\ \approx \pm 0.366^\circ\text{C}.$$

最大可能誤差:

$$\lambda = 6.6 \sqrt{\frac{(-1.0)^2 + (+0.7)^2 + (-1.2)^2 + (+0.1)^2 + (+1.4)^2}{5(5-1)}} \\ \approx \pm 3.2^\circ\text{C}.$$

因此, 最終的測量結果为:

$$t = 139.1 \pm 0.366^\circ\text{C}.$$

五、热工測量技术的发展

解放前我国热工測量技术十分落后, 因为那时我国是一个半封建半殖民地的国家, 沒有独立的工业体系, 更談不上仪表生产, 甚至連一些簡單的仪表都必須依賴外国。

中华人民共和国的成立开始了一个新的历史时期。在党的正确领导下, 已經逐步地建設起仪表制造工业。目前, 不但能生产一般的热工測量仪表, 而且还能制造各种极精密的自动檢測仪表。

此外, 我国还建立了最高計量监督机关——中华人民共和国科学技术委员会計量局, 并在省市各級建立了国家計量管理部門。

最近二十年, 电子技术在热工測量中获得了广泛的应用, 它能簡化热工測量仪表的結構, 提高其灵敏度和动作速度。我国現在已能成批地生产各种用途的电子式热工仪表, 并且在发电厂中得到了普遍的采用。

热工測量仪表的发展趋势是:

- (1) 实现仪表的标准化和系列化, 并在这个基础上发展成为仪表的单元組合。
 - (2) 快动作、多点、多参数的測量, 并且在不影响准确度的条件下, 尽可能地縮小外形尺寸, 簡化結構。
 - (3) 为了实现生产过程的集中控制, 采用巡回檢測和数据处理仪表。
 - (4) 越来越多地应用新的科学技术, 如半导体、原子能、电视技术、計算技术等。
- 我們深信, 在党的英明领导下, 在三面紅旗的指引下, 我国热力工程的測量技术一定能够不断地得到迅速的发展。

第一篇 溫度的測量

第一章 溫度標尺及測溫儀表的分類

第一節 溫度和溫度標尺

溫度是用以表征物體受熱程度的一種標量。物體溫度的高低，實質上是物體內部分子運動動能的表現。

用來測量溫度的儀器叫做溫度計或溫度表。受熱程度不同的物體之間的热交換現象和物體的某些物理性質随受熱程度不同而变化的性質是溫度測量的基礎。必須指出，溫度不能同物體的長度和重量等一樣，可以用絕對量度單位來表示，它只能通過觀察(測量)另一種物質(測溫質)的物理性質的变化相對的來確定。用來表征物體溫度变化的那一物理性質，應是随溫度变化的單值函數。即不受其他因素的影響，而且又便于精確測量。能滿足上述要求的物理性質有：物體的體積或壓力随溫度变化的性質；物體的热電性質；導體或半導體的電阻随溫度变化的性質以及物體的輻射能随溫度而变的性質等。

為了確定溫度的數值，必須建立衡量物體溫度的標尺，簡稱“溫標”。

溫標的建立過程是相當曲折的。最早的溫標都是根據物體受熱後體積膨脹的性質建立起來的。其中主要的有：攝氏溫標，列氏溫標和華氏溫標。

在這些溫標中，是將標準大氣壓力下冰的融點和水的沸點之間各分成100、80和180等分(度)，把冰的融點用 0° 、 0° 和 32° 來表示，而把水的沸點用 100° 、 80° 和 212° 來表示。因此它們的關係可以寫成：

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{4} \text{ } ^{\circ}\text{R} = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32). \quad (1-1)$$

式中 C ——代表攝氏溫標；

R ——代表列氏溫標；

F ——代表華氏溫標。

攝氏和華氏溫標是用水銀做溫度計的測溫質；列氏溫標則採用一定濃度的酒精做測溫質。

在建立上述溫標時，都假定測溫質在玻璃管中的體膨脹與溫度成綫性關係，這與實際情況是不符合的，因此上述三種溫標均與測溫質的性質有關。例如，如果改用酒精作測溫質來建立攝氏溫標，則由於水銀和酒精的體膨脹性質不同，所以兩種溫度計只有 0° 和 100° 相同，而中間各度值都不吻合。另外，由於玻璃管的材料不同，即使採用物理性質相同的測溫質，而溫標中間的度值仍然是不同的。因此上述溫標沒有統一的标准，以致使“度”的概念相當混亂。

隨着科學技術發展的需要，必須建立一種與物體的任何物理性質都無關的溫標。基於熱力學第二定律的出現，凱爾文在1848年首先提出了具有這種性質的熱力學溫標。

第二节 热力学温度标尺

热力学温度标尺是根据热力学第二定律提出的与工质种类无关的温度标尺。按卡诺循环，即在卡诺热机中，下列的热力学方程式永远成立：

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (1-2)$$

这个方程式表示工质在温度 T_1 时吸收热量为 Q_1 ，而在温度降至 T_2 时向低温热源放出热量 Q_2 。

如果设 T_1 和 T_2 相差 n 度，即 $T_1 - T_2 = n^\circ$ ，则式(1-2)可以写成：

$$T_2 = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} n \quad (1-3)$$

或

$$T_1 = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} n \quad (1-4)$$

对于任意温度 T 而言，则有：

$$T = \frac{Q}{Q_1 - Q_2} n \quad (1-5)$$

此式就是热力学温标的表达式，它表明温度 T 仅与热量 Q 有关，不受工质本身的种类和性质的影响，因而就可以避免了温标的任意性。

但是完全理想的卡诺热机是不存在的，所以在实践上按上述原理来建立温标是不可能的，于是只有利用理想气体温标与热力学温标相一致的性质，并通过引用理想气体的概念，将热力学温标和理想气体温度计联系起来。理想气体的状态方程式为：

$$\frac{p_1 v_1}{T_{1z}} = \frac{p_2 v_2}{T_{2z}} = R \quad (1-6)$$

式中 p 、 v 、 T_z ——温度计内气体的状态参数；

R ——气体常数。

同样，令 $T_{1z} - T_{2z} = n^\circ$ ，则式(1-6)可以改写成：

$$T_{2z} = \frac{p_2 v_2}{p_1 v_1 - p_2 v_2} n \quad (1-7)$$

或

$$T_{1z} = \frac{p_1 v_1}{p_1 v_1 - p_2 v_2} n \quad (1-8)$$

对任意温度 T ，则有：

$$T = \frac{pv}{p_1 v_1 - p_2 v_2} n \quad (1-9)$$

从式(1-5)和(1-9)中可以看出：如果我们以标准大气压力下水的沸点(100°)和冰的融点(0°)为固定点来建立温标(即 $n=100^\circ$)，则热力学温标和理想气体温度计的刻度是相一致的。所以我们可以用某些性质上接近于理想气体的实际气体(氢、氦和氮)来作出温度计，并根据实际气体与理想气体的差别进行必要的修正，就可以在实践上实现热力学温标。

1889年国际度量衡会议通过采用定容氢气温度计的温标作为标准温标。这种温标是规定在压力为1000毫米水银柱时，将定容气体(氢)从冰的融点温度到水的沸点温度之间的压力增加划分为100等分，每一分格相当温度改变一度。它的原理示于图1-1中。充满氢气的

气囊1通过毛细管2与U形玻璃管3相通，玻璃管的下部用橡皮管4与漏斗5相连，其中充有水银。玻璃管3的上端为真空。在建立温标时，气囊浸入容器6中，容器内先装满融冰，然后倒换以沸水。在这两过程中，改变漏斗的高度以维持U形管短管中的水银面在ab处，U形管长管中水银面的差值即表示在定容条件下氢气压力的变化，在标尺上以0°和100°标志出来。

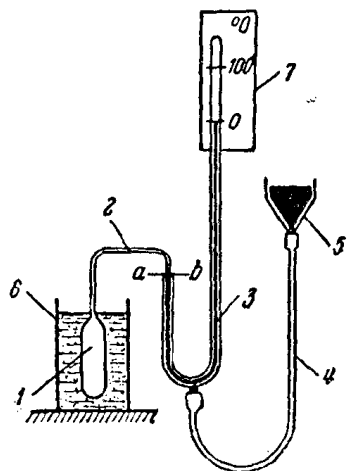


图 1-1 气体温度计的原理图
1—气囊；2—毛细管；3—U形玻璃管；4—橡皮管；5—漏斗；6—容器；7—标尺。

气体温度计来复制热力学温标是很不方便的。同时这种温度计直接用来测量温度也是非常困难的，特别在高温下由于实际气体与理想气体的偏差加大，影响了测量的准确度。因此，就必须建立一种与热力学温标相符的，既能广泛使用又能精确并还便于复制的温标。这种温标就是国际温标。

第三节 国际温标

国际温标是世界各国都采用的温标^②，它是热力学温标的实际体现。国际温标是在1927年第七次国际度量衡大会通过的，经过1933年第八次和1948年第九次度量衡大会的校订和修改，批准为“1948年国际温标”。

在1960年10月的第十次国际度量衡大会上，对“1948年温标”作了一些补充和修订，并改称为“1948年国际实用温标”。它以符号“ T_{int} ”和“ t_{int} ”分别代表国际凯氏温标(°K)和国际摄氏温标(°C)，以区别于热力学凯氏温标(T)和热力学摄氏温标(°C)。 T_{int} 和 t_{int} 之间的关系为：

$$T_{int} = t_{int} + 273.15. \quad (1-11)$$

国际实用温标规定了六个相平衡温度作为温标的定义基准点。除了水的三相点以外，其余的平衡温度都是在标准大气压下(101325牛頓/米²)，用定容气体温度计(加上修正值)准确测定。同时规定，可用锌的凝固点(419.505°C)代替硫沸点(硫点仍予保留)。建议用锌点代替硫点是因为锌点便于实现，同时它的复制精度高。此外还规定了温标的范围，测量

① 此处的摄氏温标与早期提出的摄氏温标是基于不同的原理建立起来的，因此在使用时必须严格加以区别。

② 目前欧美等国所采用的华氏温标(°F)都按国际温标校正过的。华氏温标与国际摄氏温标的关系如下：

$$^{\circ}\text{C} = \frac{9}{5} (^{\circ}\text{F} - 32).$$

温度的内插或外推的方法以及应用的仪表。六个定义基准点及其历次变更的情况列于表 1-1 中。

表 1-1 国际温标六个定义基准点及其变动情况

定 义 基 准 点	1927年(°C)	1948年(°C)	1960年(°C)
液态氧与其蒸汽之间的平衡温度(氧沸点)	-182.97	-182.97	-182.97
冰和被空气所饱和的水之间的平衡温度(冰的融点)	0.000	0	以水的三相点(+0.01°C)代替冰融点
液态水与其蒸汽之间的平衡温度(水沸点)	100.000	100	100
液态硫与其蒸汽之间的平衡温度(硫沸点)	444.60	444.600	444.6
固态银和液态银之间的平衡温度(银凝固点)	960.5	960.8	960.8
固态金和液态金之间的平衡温度(金凝固点)	1063	1063.0	1063

关于内插和外推方法的规定:

1. 由 $0^{\circ}\sim 630.5^{\circ}\text{C}$ (铊凝固点)

温度 t 用标准铂电阻温度计来测量,电阻与温度的关系按下式决定:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2). \quad (1-12)$$

式中 R_t ——标准铂电阻温度计在 $t^{\circ}\text{C}$ 时电阻值;

R_0 、 A 和 B ——同一铂电阻温度计在测量水的三相点、水的沸点和硫沸点(或铊凝固点)时求出的常数。

2. 由 $-182.97^{\circ}\sim 0^{\circ}\text{C}$

温度 t 用标准电阻温度计来测量,电阻与温度的关系按下式决定:

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3]. \quad (1-13)$$

式中 R_t 、 R_0 、 A 和 B 的意义与前式相同;

C ——同一铂电阻温度计测量氧沸点时求出的常数。

所用铂电阻温度计的铂丝纯度应满足 $\frac{R_{100}}{R_0} > 1.3910$ 的条件(R_{100} 为铂电阻温度计在 100°C 时的电阻值),铂丝直径在 $0.05\sim 0.5$ 毫米之间。为了判断温度计的构造是否良好,以及在固定点中分度时是否有错误,温度计应符合下述两个准则: $B = (-0.5857 \pm 0.0010) \times 10^{-6}/\text{度}^2$; $C = (-4.35 \pm 0.05) \times 10^{-12}/\text{度}^4$ 。

3. 由 $630.5^{\circ}\sim 1063^{\circ}\text{C}$

温度 t 用标准铂铑—铂热电偶来测量,热电势与温度的关系按下式决定:

$$E = a + bt + ct^2. \quad (1-14)$$

式中 E ——标准铂铑—铂热电偶当冷端处于 0°C ,热端处于温度 $t^{\circ}\text{C}$ 时的热电势;

a 、 b 和 c ——同一标准热电偶测量 630.5°C 、银点和金点的热电势时求出的常数。

所用的热电偶铂电极的纯度应满足 $\frac{R_{100}}{R_0} > 1.3910$ 的条件,铂铑合金中90%(重量百分比)为铂,10%为铑。热电极的直径规定在 $0.35\sim 0.65$ 毫米之间。此时,如果热电偶的冷端处于 0°C ,另一端处于 630.5°C 、银点和金点时的热电势应满足下列条件:

$$E_{Au} = 10300 \pm 50 \text{ 微伏}. \quad (1-15)$$

$$E_{Au} - E_{Ag} = 1183 + 0.158(E_{Au} - 10300) \pm 4 \text{ 微伏}. \quad (1-16)$$

$$E_{Au} - E_{630.5} = 4766 + 0.631(E_{Au} - 10300) \pm 8 \text{ 微伏}. \quad (1-17)$$

4. 在金点以上,温度 t 用标准光学高温计按下式决定(普郎克定律):

$$\frac{E_{0\lambda}(t)}{E_{0\lambda}(Au)} = \frac{e^{-\frac{C_2}{\lambda(t+T_0)}} - 1}{e^{-\frac{C_2}{\lambda(Au+T_0)}} - 1} \quad (1-18)$$

式中 $E_{0\lambda}(t)$ ——黑体在温度为 $t^\circ\text{C}$ ，波长为 λ 时的单色辐射强度，

$E_{0\lambda}(Au)$ ——黑体在金点温度，波长为 λ 时的单色辐射强度，

C_2 ——常数，等于 1.438 厘米度，

T_0 ——常数，等于 273.15，

e ——自然对数的底。

在“1948年国际实用温标1960年修订”中，除了六个定义基准点外，还建议采用22个次级参考点来复制温标。

国际实用温标是直接复制热力学温标的一种国际协定性的温标，它起着使温度值在国际范围内准确一致的作用。在我国复制国际实用温标，建立各级基准，基准器的工作主要由中华人民共和国科学技术委员会计量局来执行。

第四节 测温仪表的分类

测温的全部范围习惯上分为低温(低于 600°C)和高温两部分。凡是用以测量 600°C 以下温度的仪表称为温度计，测量 600°C 以上温度的仪表称为高温计。

测温仪表按其作用原理可以分成五大类，列于表 1-2 中。

表 1-2 测温仪表分类

测 温 仪 表 名 称	测 温 范 围 ($^\circ\text{C}$)
膨胀式温度计	-200~500
压力表式温度计	-60~550
电阻温度计	-200~500
热电高温计	200~1600
辐射高温计	800~2000

第二章 膨胀式和压力表式温度计

第一节 膨胀式温度计

基于物体受热体积膨胀的性质制成的温度计叫做膨胀式温度计，它可以分成两类：液体膨胀式温度计和固体膨胀式温度计。

一、液体膨胀式温度计

1. 基本概念

液体膨胀式温度计，亦称玻璃管液体温度计。它被广泛用于测量 -200°C 到 500°C 范围内的温度，其优点在于它的构造简单，使用方便，价格便宜和有足够高的准确度。玻璃液体

溫度計的缺点是：測量結果不能远距离傳送和自动記錄，玻璃管比較脆弱容易損坏，讀數較難且易产生誤差和有較大的热惰性。

玻璃管液体溫度計通常由三部分組成：裝有液体的測溫泡、毛細管和刻度标尺。当溫度变化时，由于液体的膨脹系数較大，毛細管內的液体就要随之上升或下降，因此根据液面的位置就可以确定与其相应的溫度。显然，玻璃管溫度計的讀數，不仅与所充液体的性质有关，而且还与所用玻璃的性质有关。

在玻璃管液体溫度計中，通常采用的測溫液体以及它們的体膨脹系数和測溫範圍列于表 2-1 中。

表 2-1 几种主要測溫液体的特性

測 溫 液 体	測 量 范 圍 °C	体 膨 脹 系 数 $1/^\circ\text{C}$	附 注
水銀	-30~700	0.00018	上限用加压方法得到
甲苯	-90~100	0.00109	
乙醇(酒精)	-100~75	0.00105	
石油醚	-130~25	0.00142	
戊烷	-190~20	0.00092	

玻璃管液体溫度計中最常用的測溫液体是水銀，因为它有許多优点：不粘附在玻璃上；容易得到純度很高的水銀；在标准大气压下由 -38.86°C 到 356.7°C 的溫度範圍內保持液态，所以有較大的測量範圍。此外，当溫度变化时，其体膨脹系数变化很小，因此水銀溫度計的刻度在 200°C 以內是均匀的。它的主要缺点是膨脹系数比較小，所以灵敏度較低。但水銀所具有的优点，仍使它成为液体溫度計中最常用的測溫液体。

水銀溫度計的測量上限，可以用加压的方法来提提高，因为如在水銀面上加以 20 大气压的压力，則水銀的汽化点就可提高到 582.4°C 。利用加压的方法可以把水銀溫度計的測量上限提高到 700°C (在水銀面上充以高压的惰性气体，如氮气)。

有机液体溫度計主要用于低温測量。有机液体的膨脹系数較大，所以灵敏度高。但是其缺点是：有机液体能粘附在玻璃上，降低了測溫的准确度；热惰性大；物理性质不稳定，因而測量誤差較大。此外，有机液体的膨脹系数随溫度而变，所以刻度不均匀。尽管如此，在低温測量中它們的应用仍然很广。

玻璃管液体溫度計所用的玻璃，对溫度計的质量起着重要的作用。如果采用普通玻璃制造溫度計，当溫度升高到 300°C 左右就会使測溫泡軟化而发生永久变形。所以制造溫度計應該用特殊的耐热玻璃 (例如硅硼玻璃，其膨脹系数在 2×10^{-5} 度 $^{-1}$ 左右)。对于測量上限达 700°C 的溫度計，則必須采用石英制成 (其膨脹系数在 1×10^{-6} 度 $^{-1}$ 左右)。目前，我国已成批生产測量上限达 500°C 、 600°C 甚至 700°C 的玻璃管液体溫度計了。

2. 玻璃管液体溫度計的构造型式

玻璃管液体溫度計按照其构造可分为两种型式：棒式溫度計和标尺封入的溫度計。

棒式溫度計，如图 2-1, a 所示，是由一根厚壁的玻璃毛細管和与其外徑相同的測溫泡构成。标尺直接刻在毛細管的外表面上。