

1990年国际温标(ITS-90)

H. Preston-Thomas

国际温度咨询委员会(Comité Consultatif de Thermométrie)主任和国际计量委员会(Comité International des Poids et Mesures)物理测量部门副主任、加拿大国家研究理事会，加拿大渥太华K1A 0S1

收到日期：1989年10月24日

介绍性注释

ITS-90的官方法文版由BIPM作为国际计量委员会(CIPM)的Prochès-verbaux的一部分出版。但是，此处转载的英文版已由国际温度咨询委员会(CCT)授权，并由CIPM批准。

1990年国际温标

1990年国际温标被国际计量委员会在其1989年的会议上采用，遵循了1887年第18届计量大会的第7项决议的要求。该温标取代了1968年的国际实用温标（1975年修订版）和1976年的0.5 K到30 K暂行温标。

1. 温度单位

众所周知，热力学温度的物理量基本单位，符号为T，开氏温标符号为K，定义分数1/273.16作为水三相点的热力学温度¹。

由于早期温标定义方式的原因，根据与273.15 K的差值，它保留了通常的惯例来表达一个温度，冰点。以这种方法表示的热力学温度T被称为摄氏温度，符号为t，定义为：

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273.15 \quad (1)$$

摄氏温度的单位为摄氏度，符号为 $^{\circ}\text{C}$ ，根据定义，其量级与开氏温标相同。温差可以用开尔文或摄氏度来表示。

1990年国际温标(ITS-90)定义了国际开氏温度（符号 T_{90} ）和国际摄氏温度（符号 t_{90} ）。 T_{90} 和 t_{90} 之间的关系与T和t之间的关系相同，即：

$$t_{90}/^{\circ}\text{C} = T_{90}/\text{K} - 273.15 \quad (2)$$

物理量 T_{90} 的单位为开尔文，符号为K，物理量 t_{90} 的单位为摄氏度，符号为 $^{\circ}\text{C}$ ，与热力学温度T和摄氏温度t的情况一样。

2. 1990年国际温标(ITS-90)的原理

ITS-90扩大为从0.65 K往上到根据普朗克辐射定律使用单色辐射实际可测量的最高温度。ITS-90包含许多温区和子温区，在每个温区和子温区上定义了温度 T_{90} 。有几个温区或子温区是重叠的，在发生这样的重叠时，存在 T_{90} 的不同定义：这些不同的定义具有同等状态。对于精度极高的测量，在同一温度下按照不同的定义进行的测量之间可能会检测到数值的差异。同样，即使采用同一个定义，用两个合格的内插式仪器（如电阻温度计）在定义温度定点之间测量同一温度时，也可能得出 T_{90} 的明显数值差异。几乎在所有情况下，这些差异在实际操作中都可小到可忽略不计，最低程度上也不会超过合理的复杂性；要了解这一点的更详细信息，请参见“ITS-90补充资料”（BIPM-1990）。

ITS-90的构建方式为：在整个范围内，任何给定温度的 T_{90} 值都非常接近于温标采纳时T的最佳估计值。与直接测量热力学温度相比， T_{90} 的测量要方便得多，而且更为精密，并且有很高的复现性。

在 T_{90} 值和根据1968年国际实用温标(IPTS-68)测得的对应 T_{90} 值之间存在着明显的数值差异，见图1和表6。同样，在IPTS-68和1948年国际实用温标(IPTS-48)之间以及1948年国际温标(ITS-48)和1927年国际温标(ITS-27)之间也存在有差异。请参见附录，要了解更详细的信息，请参见“ITS-90补充资料”。

¹ Comptes Rendus des Séances de la Treizième Conférence Générale des Poids et Mesures (1967-1968). Resolutions 3 and 4, p. 104

经Bureau International des Poids et Mesures许可转载。

1990年国际温标 (续)

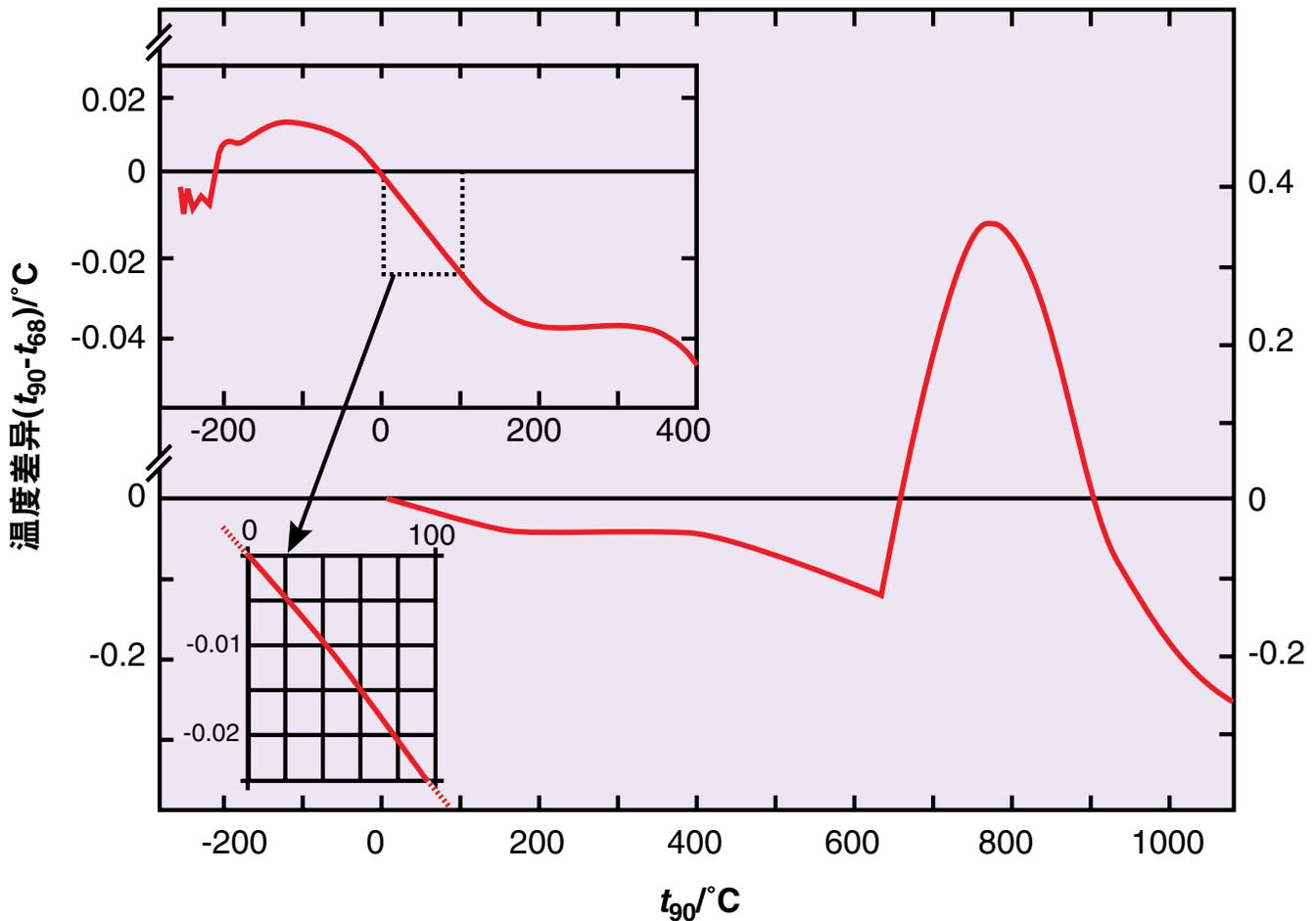


图1: 差异($t_{90} - t_{68}$)与摄氏温度 t_{90} 之间的函数关系

3. 1990年国际温标的定义

在0.65 K到5.0 K之间, T_{90} 是以 ^3He 和 ^4He 的蒸气压与温度的关系来定义的。

在3.0 K到氦三相点(24.5561 K)之间, T_{90} 是用氦气体温度计来定义的, 该温度计使用分配有数值(定义固定点)的三个可用实验实现的温度并利用规定的内插法来校准。

在平衡氢三相点(13.8033 K)到银凝固点(961.78 °C)之间, T_{90} 是由铂电阻温度计来定义的, 该温度计使用一组指定的定义固定点并利用规定的内插法来校准。

在银凝固点(961.78 °C)以上的温区, T_{90} 是按一个定义固定点和普朗克辐射定律来定义的。

ITS-90的定义固定点列在表1中。表2中给出了由传感器大插入深度或其它原因产生的压力对大多数这些点的温度的影响。

3.1. 从0.65 K: 氦蒸气压与温度的方程式

在此温区, T_{90} 由 ^3He 和 ^4He 的蒸气压 p 使用下面的方程式定义:

$$T_{90}/\text{K} = A_0 + \sum_{i=1}^9 A_i [(\ln(p/\text{Pa}) - B)/C]^i. \quad (3)$$

表3中给出了在0.65 K到3.2 K之间的温区中 ^3He 的以及在1.25 K到2.1768 K (λ 点)和2.1768 K到5.0 K之间的温区中 ^4He 的常数 A_0 、 A_i 、 B 和 C 的值。

3.2. 从3.0 K到氦三相点(24.5661 K): 气体温度计

在此温区内, T_{90} 是以 ^3He 或 ^4He 的等容气体温度计来定义的, 该温度计通过三个温度校准。它们是氦三相点(24.5661 K)、平衡氢三相点(13.8033 K)和3.0 K到5.0 K之间的某个温度。最后一个温度使用 ^3He 或 ^4He 蒸气压温度计按第3.1.节中的规定来确定。

表1: ITS-90的定义固定点

编号	温度		物质 ^a	状态 ^b	$W_i(T_{90})$
	T_{90}/K	$t_{90}/^{\circ}C$			
1	3 ~ 5	— 270.15 — 268.15	He	V	
2	13.8033	— 259.3467	e-H ₂	T	0.0001 190 07
3	≈ 17	≈ — 256.15	e-H ₂ (or He)	V (or G)	
4	≈ 20.3	≈ — 252.85	e-H ₂ (or He)	V (or G)	
5	24.5561	— 248.5939	Ne	T	0.008 449 74
6	54.3584	— 218.7916	O ₂	T	0.091 718 04
7	83.8058	— 189.3442	Ar	T	0.215 859 75
8	234.3156	— 38.8344	Hg	T	0.844 142 11
9	273.16	0.01	H ₂ O	T	1.000 000 00
10	302.9146	29.7646	Ga	M	1.118 138 89
11	429.7485	156.5985	In	F	1.609 801 85
12	505.078	231.928	Sn	F	1.892 797 68
13	692.677	419.527	Zn	F	2.568 917 30
14	933.473	660.323	Al	F	3.376 008 60
15	1234.93	961.78	Ag	F	4.286 420 53
16	1337.33	1064.18	Au	F	
17	1357.77	1084.62	Cu	F	

^a 除³He外, 所有物质都是天然同位素组成。e-H₂是正、仲分子形式处在平衡浓度下的氢。

^b 关于这些不同状态的完整定义和实现这些状态的建议, 请参见“ITS-90补充资料”。符号含义如下: V指蒸气压力; T指三相点(固相、液相和气相平衡的温度); G指气体温度计点; M、F分别指熔点、凝固点(在101 325 Pa的压力下, 固相和液相平衡的温度)。

表2: 压力对某些定义固定点的温度的影响[†]

物质	平衡温度的分配值 T_{90}/K	温度与压力, p (dT/dp)/ ($10^{-8} K \cdot Pa^{-1}$) [*]	变化与深度, λ ($dT/d\lambda$)/ ($10^{-3} K \cdot m^{-1}$) ^{**}
e-H ₂ (T)	13.8033	34	0.25
氦(T)	24.5561	16	1.9
氧(T)	54.3584	12	1.5
氩(T)	83.8058	25	3.3
汞(T)	234.3156	5.4	7.1
水(T)	273.16	— 7.5	— 0.73
镓	302.9146	— 2.0	— 1.2
铟	429.7485	4.9	3.3
锡	505.078	3.3	2.2
锌	692.677	4.3	2.7
铝	933.473	7.0	1.6
银	1234.93	6.0	5.4
金	1337.33	6.1	10
铜	1357.77	3.3	2.6

* 等同于每标准大气压毫开数

** 等同于每米液体毫开数

† 熔点和凝固点的参考压力为标准大气压($p_0=101325 Pa$)。对于三相点(T), 压力影响只是传感器中液柱静压头的作用。

表3: 氦蒸气压方程式(3)的常数的值, 以及由其常数数组确定的每个方程式适用的温区

	³ He 0,65 K ~ 3,2 K	⁴ He 1,25 K ~ 2,1768 K	⁴ He 2,1768 K ~ 5,0 K
A_0	1.053 447	1.392 408	3.146 631
A_1	0.980 106	0.527 153	1.357 655
A_2	0.676 380	0.166 756	0.413 923
A_3	0.372 692	0.050 988	0.091 159
A_4	0.151 656	0.026 514	0.016 349
A_5	— 0.002 263	0.001 975	0.001 826
A_6	0.006 596	— 0.017 976	— 0.00 4325
A_7	0.088 966	0.005 409	— 0.00 4973
A_8	— 0.004 770	0.013 259	0
A_9	— 0.054 943	0	0
B	7.3	5.6	10.3
C	4.3	2.9	1.9

3.2.1. 从4.2 K到氦三相点(24.5561 K), 以⁴He作为温度计气体。在此温区内, T_{90} 是用下面的关系式来定义的:

$$T_{90} = a + bp + cp^2, \quad (4)$$

式中 p 是气体温度计中的压力, a 、 b 和 c 是系数, 其数值由第3.2节中给出的三个定义固定点处进行的测量得到, 但还有进一步的限制: 这些点中最小的一个必须在4.2 K和5.0 K之间。

3.2.2. 从3.0 K到氦三相点(24.5561 K), 以³He或⁴He作为温度计气体。对于³He气体温度计以及在4.2 K以下使用的⁴He气体温度计, 必须使用第二维里系数 $B_x(T_{90})$ 或 $B_4(T_{90})$ 明确说明气体的非理想性。在此温区内, T_{90} 是用下面的关系式来定义的:

$$T_{90} = \frac{a + bp + cp^2}{1 + B_x(T_{90}) N/V}, \quad (5)$$

式中, p 是气体温度计中的压力, a 、 b 和 c 是系数, 其数值由第3.2节中给出的三个定义温度处的测量值得到, N/V 中气体密度, N 是气体的质量, V 是测温球的容积, x 根据所使用的同位素为3或4, 第二维里系数的值由下面的关系式给出:

对于³He,

$$B(T_{90})/m^3 \text{ mol}^{-1} = \{16.69 - 336.98 (T_{90}/K)^{-1} + 91.04 (T_{90}/K)^{-2} - 13.82 (T_{90}/K)^{-3}\} 10^{-6}. \quad (6a)$$

对于⁴He,

$$B_4(T_{90})/m^3 \text{ mol}^{-1} = \{16.708 - 374.05 (T_{90}/K)^{-1} - 383.53 (T_{90}/K)^{-2} + 1799.2 (T_{90}/K)^{-3} - 4033.2 (T_{90}/K)^{-4} + 3252.8 (T_{90}/K)^{-5}\} 10^{-6}. \quad (6b)$$

1990年国际温标 (续)

表4: 方程式(9a)、(9b)、(10a)和(10b)的参考函数中的常数 A_0 、 A_i ; B_0 、 B_i ; C_0 、 C_i ; D_0 和 D_i

A_0	— 2.135 347 29	B_0	0.183 324 722	B_{13}	— 0.091 173 542
A_1	3.183 247 20	B_1	0.240 975 303	B_{14}	0.001 317 696
A_2	— 1.801 435 97	B_2	0.209 108 771	B_{15}	0.026 025 526
A_3	0.717 272 04	B_3	0.190 439 972		
A_4	0.503 440 27	B_4	0.142 648 498		
A_5	— 0.618 993 95	B_5	0.077 993 465		
A_6	— 0.053 323 22	B_6	0.012 475 611		
A_7	0.280 213 62	B_7	— 0.032 267 127		
A_8	0.107 152 24	B_8	— 0.075 291 522		
A_9	— 0.293 028 65	B_9	— 0.056 470 670		
A_{10}	0.044 598 72	B_{10}	0.076 201 285		
A_{11}	0.118 686 32	B_{11}	0.123 893 204		
A_{12}	— 0.052 481 34	B_{12}	— 0.029 201 193		
C_0	2.781 572 54	D_0	439.932 854		
C_1	1.646 509 16	D_1	472.418 020		
C_2	— 0.137 143 90	D_2	37.684 494		
C_3	— 0.006 497 67	D_3	7.472 018		
C_4	— 0.002 344 44	D_4	2.920 828		
C_5	0.005 118 68	D_5	0.005 184		
C_6	0.001 879 82	D_6	— 0.963 864		
C_7	— 0.002 044 72	D_7	— 0.188 732		
C_8	— 0.000 461 22	D_8	0.191 203		
C_9	0.000 457 24	D_9	0.049 025		

使用方程式(4)和(5)可实现的精度取决于气体温度计的设计和使用的温度密度。“ITS-90补充资料”中给出了实现一个选定精度所要求的设计标准和现行良好规范。

3.3. 平衡氢三相点(13.8033K)到银凝固点(961.78°C): 铂电阻温度计

在此温区内, T_{90} 是由铂电阻温度计定义的, 该温度计使用一组特定的定义固定点并利用规定的居间温度内插参考和偏差函数来校准。

没有任何铂电阻温度计能在13.8033 K到961.78°C之间的全部温区上提供高精度, 甚至没有任何一个在全部温区上可用。从下面列表中选择特定温度计的可用温区时通常会受温度计结构的限制。

关于实际细节和现行良好规范, 特别是有关可用温度计类型、它们的可接受工作范围、可能的精度、允许的泄漏电阻、电阻值以及热处理方面的问题, 请参见“ITS-90补充资料”。特别重要的一点是要考虑每次铂电阻温度计承受420°C以上的温度后应进行的适当热处理。

温度由温度 T_{90} 下的电阻 $R(T_{90})$ 与水三相点下的电阻 $R(273.16\text{ K})$ 的比值决定。此比值 $W(T_{90})$ 是²:

$$W(T_{90}) = R(T_{90})/R(273.16\text{ K}) \quad (7)$$

合格的铂电阻温度计必须由纯净的无应变的铂制成, 必须至少满足下面两个关系式中的一个:

$$W(29.7646^\circ\text{C}) \geq 1.118\ 07, \quad (8a)$$

$$W(-38.8344^\circ\text{C}) \leq 0.844\ 235. \quad (8b)$$

在高达银凝固点使用的合格铂电阻温度计还必须满足以下关系式:

$$W(961.78^\circ\text{C}) \geq 4.2844. \quad (8c)$$

在电阻温度计的每个量程内, T_{90} 由相应的参考函数{方程式(9b)或(10b)}给出的 $W(T_{90})$ 和偏差 $W(T_{90}) - W_r(T_{90})$ 得出。在定义固定点, 直接通过校准温度计得到此偏差: 在中间温度, 通过相应的偏差函数{方程式(12)、(13)和(14)}得到。

(i) — 对于13.8033 K到273.16 K的温区, 规定了下面的参考函数:

$$\ln [W_r(T_{90})] = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left[\frac{\ln(T_{90}/273.16\text{ K}) + 1.5}{1.5} \right]^i \quad (9a)$$

在0.1 mK的误差内等效于方程式(9a)的一个反函数是:

$$T_{90}/273.16\text{ K} = B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left[\frac{W_r(T_{90})^{1/6} - 0.65}{0.35} \right]^i \quad (9b)$$

表4给出了常数 A_0 、 A_i 、 B_0 和 B_i 的值。

可以将一个温度计校准到在整个温区上使用, 或者使用渐进的几个校准点, 对温度下限分别为24.5561 K、54.3584 K和83.8058 K而温度上限都为273.16 K的温区进行校准。

(ii) — 对于0°C到961.78°C的温区, 规定了下面的参考函数:

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left[\frac{T_{90}/\text{K} - 754.15}{481} \right]^i \quad (10a)$$

在0.13 mK的误差内等效于方程式(10a)的一个反函数是:

$$T_{90}/\text{K} - 273.15 = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left[\frac{W_r(T_{90}) - 2.64}{1.64} \right]^i \quad (10b)$$

表4给出了常数 C_0 、 C_i 、 D_0 和 D_i 的值。

² 请注意, $W(T_{90})$ 的这些定义不同于ITS-27、ITS-48、IPTS-48和IPTS-68使用的相应定义: 对于以前所有的温标, $W(T)$ 是用0°C的参考温度定义的, 从1954年起将其定义为273.15 K

可以将一个温度计校准到在整个温区上使用，或者使用几个校准点，对温度上限分别为660.323°C、419.527°C、231.928°C、156.5985°C或29.7646°C而温度下限都为0°C的温区进行校准。

(iii) 一可以将一个温度计校准到在234.3156 K (— 38.8344°C)到29.7646°C的温区内使用，在这些温度和水三相点进行校准。要覆盖此温区，两个参考函数{方程式(9)和(10)}都需要。

下面给出各种温区的定义固定点和偏差函数，并在表5中进行汇总。

3.3.1. 平衡氢三相点(13.8033 K)到水三相点(273.16 K)。在平衡氢三相点(13.8033 K)、氮三相点(24.5561 K)、氧三相点(54.3584 K)、氩三相点(83.8058 K)、汞三相点(234.3156 K)和水三相点(273.16 K)以及靠近17.0 K和20.3 K的两个附加温度校准温度计。最后两个点的两种确定方法：(1)使用第3.2节中所述的气体温度计，在这种情况下，这两个温度必须分别位于6.9 K ~ 17.1 K和20.2 K ~ 20.4 K的温区内；(2)使用平衡氢的蒸气压与温度关系式，在这种情况下，这两个温度必须分别位于17.025 K ~ 17.045 K和20.26 K ~ 20.28 K的温区内，准确值分别用方程式(11a)和(11b)确定：

$$T_{90}/K - 17.035 = (p/kPa - 33.3213)/13.32 \quad (11a)$$

$$T_{90}/K - 20.27 = (p/kPa - 101.292)/30 \quad (11b)$$

偏差函数为³：

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + \sum_{i=1}^5 c_i [\ln W(T_{90})]^{i+n} \quad (12)$$

系数a、b和c_i的值由定义固定点处的测量值获得，n = 2。

对于此温区和3.3.1.1到3.3.1.3条中的子温区，要求的值W_r(T₉₀)从方程式(9a)或表1中获得。

3.3.1.1. 氮三相点(24.5561 K)到水三相点(273.16 K)。在平衡氢三相点(13.8033 K)、氮三相点(24.5561 K)、氧三相点(54.3584 K)、氩三相点(83.8058 K)、汞三相点(234.3156 K)和水三相点(273.16 K)校准温度计。

偏差函数由方程式(12)给出，系数a、b、c₁、c₂和c₃的值由定义固定点处的测量值获得，c₄ = c₅ = n = 0。

3.3.1.2. 氧三相点(54.3584 K)到水三相点(273.16 K)。在氧三相点(54.3584 K)、氩三相点(83.8058 K)、汞三相点(234.3156 K)和水三相点(273.16 K)校准温度计。

³ 本偏差函数{以及方程式(13)和(14)的偏差函数}可以用W_r (而非W)表示；过程请参阅“ITS-90补充资料”

表5：铂电阻温度计在它们定义T₉₀的各个温区内的偏差函数和校准点

a 上限为273.16 K的温区			
节号	温度下限 T/K	偏差函数	校准点 (见表1)
3.3.1	13.8033	$a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + \sum_{i=1}^5 c_i [\ln W(T_{90})]^{i+n}, n = 2$	2-9
3.3.1.1	24.5561	与3.3.1中偏差函数相同，c ₄ = c ₅ = n = 0	2, 5-9
3.3.1.2	54.3584	与3.3.1中偏差函数相同，c ₂ = c ₃ = c ₄ = c ₅ = 0, n = 1	6-9
3.3.1.3	83.8058	$a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1] \ln W(T_{90})$	7-9
b 下限为0°C的温区			
节号	温度上限 t/°C	偏差函数	校准点 (见表1)
3.3.2*	961.78	$a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + c[W(T_{90}) - 1]^3 + d[W(T_{90}) - W(660.323^\circ\text{C})]^2$	9, 12-15
3.3.2.1	660.323	与3.3.2中偏差函数相同，d = 0	9, 12 - 14
3.3.2.2	419.527	与3.3.2中偏差函数相同，c = d = 0	9, 12, 13
3.3.2.3	231.928	与3.3.2中偏差函数相同，c = d = 0	9, 11, 12
3.3.2.4	156.5982	与3.3.2中偏差函数相同，b = c = d = 0	9, 11
3.3.2.5	29.7646	与3.3.2中偏差函数相同，b = c = d = 0	9, 10
c 234.3156 K (-38.8344 °C) ~ 29.7646 °C的温区			
3.3.3		As for 3.3.2 with c = d = 0	8-10

* 对t₉₀ ≤ 660.323°C，使用了校准点9、12-14，d = 0；对t₉₀ > 660.323°C，保留了由此得到的a、b和c的值，d从校准点15确定

偏差函数由方程式(12)给出，系数a、b和c₁的值由定义固定点处的测量值获得，c₂ = c₃ = c₄ = c₅ = 0，n = 1。

3.3.1.3. 氩三相点(83.8058 K)到水三相点(273.16 K)。在氩三相点(83.8058 K)、汞三相点(234.3156 K)和水三相点(273.16 K)校准温度计。

偏差函数为：

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1] \ln W(T_{90}) \quad (13)$$

a和b的值由定义固定点处的测量值获得。

3.3.2. 从0°C到银凝固点(961.78°C)。在水三相点(0.01°C)和锡凝固点(231.928°C)、锌凝固点(419.527°C)、铝凝固点(660.323°C)和银凝固点(961.78°C)校准温度计。

1990年国际温标 (续)

偏差函数为:

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + c[W(T_{90}) - 1]^3 + d[W(T_{90}) - W(660.323\text{ °C})]^2 \quad (14)$$

对于铝凝固点以下的温度 $d=0$, a 、 b 和 c 的值由在锡、锌和铝凝固点测得的与 $W_r(T_{90})$ 的偏差确定。从铝凝固点到银凝固点, 保留上面的 a 、 b 和 c 的值, d 的值由在银凝固点测得的与 $W_r(T_{90})$ 的偏差确定。

对于此温区和3.3.2.1到3.3.2.5条中的子温区, 要求的 $W_r(T_{90})$ 的值从方程式(10a)或表1中获得。

3.3.2.1. 从 0 °C 到铝凝固点(660.323 °C)。在水三相点(0.01 °C)和锡凝固点(231.928 °C)、锌凝固点(419.527 °C)、铝凝固点(660.323 °C)校准温度计。

偏差函数由方程式(14)给出, a 、 b 和 c 的值由定义固定点处的测量值获得, $d=0$ 。

3.3.2.2. 从 0 °C 到锌凝固点(419.527 °C)。在水三相点(0.01 °C)和锡凝固点(231.928 °C)和锌凝固点(419.527 °C)校准温度计。

偏差函数由方程式(14)给出, a 和 b 的值由定义固定点处的测量值获得, $c=d=0$ 。

3.3.2.3. 从 0 °C 到锡凝固点(231.928 °C)。在水三相点(0.01 °C)和铜凝固点(156.5985 °C)和锡凝固点(231.928 °C)校准温度计。

偏差函数由方程式(14)给出, a 和 b 的值由定义固定点处的测量值获得, $c=d=0$ 。

3.3.2.4. 从 0 °C 到铜凝固点(156.5985 °C)。在水三相点(0.01 °C)和铜凝固点(156.5985 °C)校准温度计。

偏差函数由方程式(14)给出, a 的值由定义固定点处的测量值获得, $b=c=d=0$ 。

3.3.2.5. 从 0 °C 到镓熔点(29.7646 °C)。在水三相点(0.01 °C)和镓熔点(29.7646 °C)校准温度计。

偏差函数由方程式(14)给出, a 的值由定义固定点处的测量值获得, $b=c=d=0$ 。

3.3.3. 汞三相点(-38.8344 °C)到镓熔点(29.7646 °C)。在汞三相点(-38.8344 °C)和水三相点(0.01 °C)和镓熔点(29.7646 °C)校准温度计。

偏差函数由方程式(14)给出, a 和 b 的值由定义固定点处的测量值获得, $c=d=0$ 。

对 273.16 K 以下和以上的测量值, 要求的 $W_r(T_{90})$ 的值分别从方程式(9a)和(10a)获得, 或者从表中1获得

3.4. 从银凝固点(961.78 °C)以上的温区: 普朗克辐射定律

在银凝固点以上, 温度 T_{90} 是由下面的方程式来定义:

$$\frac{L_{\lambda}(T_{90})}{L_{\lambda}[(T_{90}(X))] = \frac{\exp(c_2[\lambda T_{90}(X)]^{-1}) - 1}{\exp(c_2[\lambda T_{90}]^{-1}) - 1} \quad (15)$$

式中 $T_{90}(X)$ 指银凝固点 $\{T_{90}(\text{Ag}) = 1234.93\text{ K}\}$ 、金凝固点 $\{T_{90}(\text{Au}) = 1337.33\text{ K}\}$ 或铜凝固点 $\{T_{90}(\text{Cu}) = 1357.77\text{ K}\}$ 中的任一个⁴, 其中 $L_{\lambda}(T_{90})$ 和 $L_{\lambda}[T_{90}(X)]$ 分别是在 T_{90} 和 $T_{90}(X)$ 处一个黑体的波长(在真空中) λ 的辐射的光谱密度, $c_2 = 0.014388\text{ m}\cdot\text{K}$ 。

关于实际细节和现行良好规范, 请参见“ITS-90补充资料”。

4. 补充资料与早期温标的差异

用于实现ITS-90的装置、方法和步骤见“ITS-90补充资料”。此文件还介绍了早期的国际温标, 并给出了相继温标间的数值差异, 适用时会包括差值 $T_{90} - T_{68}$ 的数学函数。在“获得ITS-90近似值的方法”中给出了许多有用的ITS-90的近似值。

这两个文档由温度咨询委员会(Comité Consultatif de Thermométrie)编写, 由BIPM出版; 它们会定期修订和更新。

图1和表6显示了差值 $T_{90} - T_{68}$ 。表6中给出的有效数字的数量允许进行平滑内插。但是, IPTS-68的复现性在许多区域远差于此数量所应具有复现性。

⁴ 银、金和铜凝固点的 T_{90} 值被认为一致到这样的程度: 用其中任一个代替另外两个中的一个作为参考温度 $T_{90}(X)$ 将不会导致测得的 T_{90} 值有显著差异。

表6: ITS-90和EPT-76中以及ITS-90和IPTS-68中规定的 T_{90} 和 t_{90} 的值的差异

		$(T_{90} - T_{76})/\text{mK}$									
T_{90}/K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0						-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	
10	-0.6	-0.7	-0.8	-1.0	-1.1	-1.3	-1.4	-1.6	-1.8	-2.0	
20	-2.2	-2.5	-2.7	-3.0	-3.2	-3.5	-3.8	-4.1			

		$(T_{90} - T_{68})/\text{K}$									
T_{90}/K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
10					-0.006	-0.003	-0.004	-0.006	-0.008	-0.009	
20	-0.009	-0.008	-0.007	-0.007	-0.006	-0.005	-0.004	-0.004	-0.005	-0.006	
30	-0.006	-0.007	-0.008	-0.008	-0.008	-0.007	-0.007	-0.007	-0.006	-0.006	
40	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.007	-0.007	-0.007	-0.006	-0.006	
50	-0.006	-0.005	-0.004	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001	0.000	0.001	0.002	
60	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006	0.007	0.007	
70	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	
80	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	
90	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.009	0.009	0.009	

T_{90}/K	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
100	0.009	0.011	0.013	0.014	0.014	0.014	0.014	0.013	0.012	0.012
200	0.011	0.010	0.009	0.008	0.007	0.005	0.003	0.001		

		$(t_{90} - t_{68})/^\circ\text{C}$									
$t_{90}/^\circ\text{C}$	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	
-100	0.013	0.013	0.014	0.014	0.014	0.013	0.012	0.010	0.008	0.008	
0	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012	0.012	

$t_{90}/^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.000	-0.002	-0.005	-0.007	-0.010	-0.013	-0.016	-0.018	-0.021	-0.024
100	-0.026	-0.028	-0.030	-0.032	-0.034	-0.036	-0.037	-0.038	-0.039	-0.039
200	-0.040	-0.040	-0.040	-0.040	-0.040	-0.040	-0.040	-0.039	-0.039	-0.039
300	-0.039	-0.039	-0.039	-0.040	-0.040	-0.041	-0.042	-0.043	-0.045	-0.046
400	-0.048	-0.051	-0.053	-0.056	-0.059	-0.062	-0.065	-0.068	-0.072	-0.075
500	-0.079	-0.083	-0.087	-0.090	-0.094	-0.098	-0.101	-0.105	-0.108	-0.112
600	-0.115	-0.118	-0.122	-0.125*	-0.08	-0.03	0.02	0.06	0.11	0.16
700	0.20	0.24	0.28	0.31	0.33	0.35	0.36	0.36	0.36	0.35
800	0.34	0.32	0.29	0.25	0.22	0.18	0.14	0.10	0.06	0.03
900	-0.01	-0.03	-0.06	-0.08	-0.10	-0.12	-0.14	-0.16	-0.17	-0.18
1000	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23	-0.24	-0.25	-0.25	-0.26	-0.26

$t_{90}/^\circ\text{C}$	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
1000		-0.26	-0.30	-0.35	-0.39	-0.44	-0.49	-0.54	-0.60	-0.66
2000	-0.72	-0.79	-0.85	-0.93	-1.00	-1.07	-1.15	-1.24	-1.32	-1.41
3000	-1.50	-1.59	-1.69	-1.78	-1.89	-1.99	-2.10	-2.21	-2.32	-2.43

* $(t_{90} - t_{68})$ 的一阶导数的断点出现 $t_{90} = 630.6^\circ\text{C}$ 的温度, 在此温度下 $(t_{90} - t_{68}) = -0.125^\circ\text{C}$

附录

1927年国际温标(ITS-27)

1927年国际温标在第七届国际计量大会上通过, 用以克服用气体温度测量法直接实现热力学温度的实际困难, 并作为不同国家温标的通用替代温标。ITS-27的制定方法允许精确且可复现地进行温度测量, 尽可能接近那时能确定的热力学温度。在氧沸点和金凝固点之间, 它基于许多可复现的温度或固定点(为这些点分配了数值), 以及两个标准内插仪器。每个内插仪器在几个固定点进行了校准, 因此给出相应温区中内插方程式的

常数。对低段使用了一支铂电阻温度计, 对 660°C 以上的温度使用了一支铂铑/铂热电偶。对金凝固点以上的区域, 温度由维恩辐射定律来定义: 实际上, 这不可避免地会导致选择一支光学高温计作为实现仪器。

1948年国际温标(ITS-48)

1948年国际温标在第九届国际计量大会上采用。与ITS-27相比, 变化有: 铂电阻温度计量程下限由 -190°C 变为规定的氧沸点 -182.97°C , 且铂电阻温度计量程和热电偶量程的交点由 660°C 变为测得的铋沸点(约 630°C); 银凝固点被规定为

1990年国际温标 (续)

960.8°C, 取代了原来的960.5°C; 用金凝固点取代了金熔点(1063°C); 用普朗克辐射定律取代了维恩定律; 分配给第二辐射常数的值由 $1.438 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$ 变为 $1.432 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$; 修改了标准电阻温度计和热电偶的内插方程式的常数的允许范围; 更改了对光学高温计使用“可见”辐射的要求的IT限制($\lambda T < 3 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$)。

1948年国际实用温标 (1960年改正版) (IPTS-48)

1948年国际实用温标(1960年改正版)在第十一届国际计量大会上通过。第七届计量大会上已经正式通过了将水三相点作为唯一定义热力学温度单位开尔文的点。除引入了“实用”这个词外,对ITS-48的修改还有:用水三相点(规定为0.01°C)取代了锌凝固点(规定为419.505°C),成为硫沸点(444.6°C)的首选替代作为一个校准点;进一步修改了标准电阻温度计和热电偶的内插方程式的常数的允许范围;取消了对光学高温计的“可见”辐射的限制。

由于IPTS-48的温度的数值与ITS-48上的相同,前者并不是1948年温标的修订版,而只是其改正形式。

1968年国际实用温标(IPTS-68)

1968年,国际计量委员会在1967-1968第十三届大会授权下颁布了1968年国际实用温标。与IPTS-48相比,IPTS-68有大量变化,包括设计用于更趋近于符合热力学温度的数值变化,变化之大足以使许多使用者显而易见。其它变化如下:温标的下限延伸到了13.81 K;在更低温度(0.5 K ~ 5.2 K),推荐使用两个氦蒸气压温标;引入了六个新定义固定点-平衡氢三相点(13.81 K)、平衡氢的一个中间点(17.042 K)、平衡氢正常沸点(20.28 K)、氦沸点(27.102 K)、氧三相点(54.361 K)和锡凝固点(231.9681°C),后者成了水沸点的允许替代;删除了硫沸点;更改了分配给四个固定点的值-氧沸点(90.188 K)、锌凝固点(419.58°C)、银凝固点(961.93°C)和金凝固点(1064.43°C);电阻温度计量程的内插方程式变得更为复杂;分配给第二辐射常数 c_2 的值变成了 $1.4388 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$;再次修改了标准电阻温度计和热电偶的内插方程式的常数的允许范围。

1968年国际实用温标 (1975年修订版) (IPTS-68)

1968年国际实用温标(1975年修订版)在1975年第十五届大会上被采纳。与从ITS-48到IPTS-48的情况一样,IPTS-68(75)未引入数值变化。大量文字变化是氧点被定义为凝固点而非沸点;作为氧凝固点的许可替代引入了氩三相点(83.798 K);采用了自然产生氦的同位素组成的新值;废除了使用由1958 ^4He 和1962 ^3He 蒸气压温标给出T的值的建议。

1976年0.5 K ~ 30 K暂行温标(EPT-76)

引入1976年0.5 K ~ 30 K暂行温标的目的是满足两个重要的要求:提供大大降低当时已知IPTS-68中存在的27 K以下和1958 ^4He 和1962 ^3He 蒸气压温标全部温区上(与相应的热力学值)的误差的方法,并填补5.2 K和13.81 K之间的空白,在这个区间以前没有国际温标。修订EPT-76的其它目的是“它应在热力学上平滑,它应在27.1 K与IPTS-68连续,在这两个条件允许时,它应尽快适合热力学温度T”。与IPTS-68不同的是,为确保其快速采纳,批准了几种实现EPT-76的方法,包括:使用一个热力学内插仪器和十一个分配的参考点中的一个或多个;在13.81 K以上从IPTS-68中取差值;从特定的著名实验室温标中取差值。由于有一定程度的“内部一致性缺乏”,承认可能会“在不同的实现方式之间引入微小的不定性”。但是,采纳EPT-76作为工作温标与修订和延长IPTS-68相比带来的优点在那时被认为超过了缺点。

经Bureau International des Poids et mesures许可转载。