



国际温标 补充资料

国际温度咨询委员会 编 凌善康 译



4
30

1990年国际温标补充资料

国际温度咨询委员会 编

凌善康 译

中国计量出版社

新登(京)字024号

内 容 提 要

本书为正在我国贯彻实施的“90国际温标(ITS-90)”的配套资料之一,由国际温度咨询委员会编写,国际计量局出版。该书主要介绍了复现“90国际温标”所用的各类固定点(水三相点、金属固定点、低温固定点)装置和温度计(铂电阻温度计、氢蒸气压温度计、气体温度计、辐射温度计)的原理、结构、制备、温度测量计算和误差分析等详细内容,给出了以前历次国际温标,以及它们前后之间的数值差,包括实用的差值 $T_{90}-T_{63}$ 的数学表达式。

本书可供从事温度计量、热物性、低温物理、热工仪表等工作的科研和工程技术人员及有关专业的高等院校师生阅读使用。

Supplementary information for the ITS-90

Comité Consultatif de Thermométrie (CCT)

Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) 1990

1990年国际温标补充资料

国际温度咨询委员会 编

凌继德 译

责任编辑 陈小林

—

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—

开本 850×1168/32

印张 5.5 字数 144千字

1992年7月第1版

1992年7月第1次印刷

印数 1—5000

ISBN 7-5026-0514-2/TB·393

定价 3.80元

前 言

本文件是1990年国际温标 (ITS-90) 的补充资料 (Supplementary Information for the ITS-90)。它将代替1983年的《 IPTS-68 和 EPT-76 补充资料 》。本文件与前期文本的根本不同之处在于, 不仅所涉及的温标各异, 且差异甚大, 同时, 本文件中也引述了由前一文本出版到现在的7年中, 计温学中的若干进展。

鉴于有关进展仍将继续下去, 经过一段时间后, 就有必要出版文件的新版本。据目前估计, 这种时间间隔可能是5到10年。

本文件与它的姐妹篇《ITS-90 近似技术》一样, 是由国际温度咨询委员会 (Comité Consultatif de Thermométrie) (CCT) 的成员编写的。参加本文件编写的 CCT 工作组成员 (名单如下) 在此向他们的同事们表示衷心的感谢, 感谢他们的热情协助。我们在编写时, 资料来源十分丰富, 工作组从中进行选取, 因此, 我们将对选材不当、疏漏或错用等负有责任。

H. Preston-Thomas
(国际温度咨询委员会主席)

T. J. Quinn
(国际计量局局长)

第一工作组成员:

H. Preston-Thomas (加拿大国家研究院)

P. Bloembergen (Van Swinden实验室(荷兰))

T. J. Quinn (国际计量局)

EACS 0/08

译者的话

国际计量委员会于1989年会议通过了“1990年国际温标”(ITS-90),并宣布于1990年1月1日生效,以此代替“1968年国际实用温标(1975年修订版)”和“1976年0.5K到30K暂行温标”。

根据我国国情,1990年国家技术监督局发出553号文件——“关于在我国统一施行1990年国际温标的通知”,并决定:我国采用ITS-90实行有计划、分阶段逐步实施的方针。通知决定:从1991年7月1日起施行ITS-90。具体实施办法、步骤,在国家技术监督局计量司组织编写的《1990年国际温标宣贯手册》中已作了明确规定。

为配合ITS-90的颁布,国际温度咨询委员会(CCT)责成其第一、二工作组分别编写了《ITS-90补充资料》(Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990)和《ITS-90近似技术》(Technique for Approximating the International Temperature Scale of 1990)。这两个文件是1990年国际温标的配套资料,反映了现代测温技术的最新成就,对于我国建立温度计量基准、标准,提高测温技术,以及正确理解ITS-90都具有重要的意义。国家技术监督局计量司和1990年国际温标技术指导办公室,为了配合全国对ITS-90的宣贯,组织编译这两个文件,并由中国计量出版社正式出版,供有关工程技术人员、计量工作者和大专院校师生学习参考。本书是其中第一本,即《1990年国际温标补充资料》,第二本为《1990年国际温标近似技术》也即将出版。

正如温度咨询委员会(CCT)主席H. Preston-Thomas博士和国际计量局局长T. J. Quinn博士所说,本文件的资料来源

是十分丰富的。译者在接受编译任务时,曾对本书的英文版初稿和正式稿反复阅读,发现原稿中若干处含意不清,措辞不当,为此,不得不化更多时间去追溯所引证的文献,以便核对准确。本人力求做到译文准确无误,但是,由于水平和时间的限制,其中难免有不当之处,望读者不吝指正。

在编译过程中,得到复旦大学戴乐山教授竭诚相助,对国家技术监督局计量司、科技司何开茂、王轼铮同志,中国计量出版社倪伟清、陈小林同志等热心支持,本人在此谨致深切的谢意。

译者

1992年1月于北京

ITS-90 技术指导办公室

目 录

1 引言	(1)
1.1 宗旨	(1)
1.2 历史背景	(1)
1.2.1 正常氢温标	(2)
1.2.2 ITS-27	(2)
1.2.3.1 ITS-48	(4)
1.2.3.2 IPTS-48	(4)
1.2.4.1 IPTS-68	(4)
1.2.4.2 IPTS-68(75)	(5)
1.2.5 EPT-76	(5)
1.2.6 ITS-90	(6)
1.3 数值	(8)
1.3.1 历次温标之间的差值	(8)
1.3.2 ITS-90的非唯一性和分温区的非一致性	(9)
1.3.3 ITS-90中铂电阻温度计温区内的分度误差的传递	(10)
1.4 表、图和参考文献	(10)
2 固定点	(27)
2.1 水三相点 (0.01℃)	(27)
2.1.1 同位素成份	(28)
2.1.2 静压效应	(28)
2.1.3 玻璃三相点容器的三相点制备方法	(28)
2.1.3.1 制备冰套的标准冷却法	(29)
2.1.3.2 其它冷却法	(30)
2.1.3.3 产生确定的水-冰界面	(30)
2.1.3.4 三相点容器的贮存和复现三相点状态的延续时间	(30)
2.1.3.5 操作条例	(31)

2.1.4 在金属密封容器中复现水三相点	(32)
2.2 金属固定点	(32)
2.2.1 坩埚组件	(33)
2.2.2 金属的纯度	(35)
2.2.3 炉子	(35)
2.2.3.1 中温炉 (In, Sn, Zn)	(35)
2.2.3.2 电阻温度计用高温炉 (Al, Ag)	(35)
2.2.3.3 辐射温度计用高温炉 (Ag, Au, Cu)	(36)
2.2.4 电阻温度计用的金属固定点的复现方法	(36)
2.2.4.1 汞三相点 (234.3156 K)	(37)
2.2.4.2 镓熔点 (29.7646°C)	(39)
2.2.4.3 钢凝固点 (156.5985°C)	(40)
2.2.4.4 锡凝固点 (231.928°C)	(40)
2.2.4.5 铟凝固点 (419.527°C)	(41)
2.2.4.6 铅凝固点 (660.323°C)	(42)
2.2.4.7 银凝固点 (961.78°C)	(42)
2.2.4.8 适合于 In, Sn, Zn, Al 和 Ag 的密封凝固点容器的结构 和充灌方法	(43)
2.2.5 辐射温度计用的银 (961.78°C)、金 (1064.18°C) 和铜 (1084.62°C) 凝固点的复现方法	(44)
2.2.6 分析方法	(44)
2.2.6.1 用熔化曲线检验纯度	(44)
2.2.6.2 用温度起伏法评估凝固质量	(45)
2.2.6.3 浸没深度的检验	(45)
2.3 低温固定点 (13.8K到84K)	(46)
2.3.1 蒸气压系统	(46)
2.3.2 三相点法	(47)
2.3.3 复现三相点	(48)
2.3.4 平衡氢的三相点 (13.8033K) 和蒸气压点 (~17.035K 和~20.27K)	(49)
2.3.5 氖、氧和氩的三相点	(50)
2.4 表、图和参考文献	(51)
3 铂电阻测温学	(74)

3.1 铂电阻温度计的结构.....	(74)
3.1.1 套管式铂电阻温度计.....	(75)
3.1.2 标准长杆铂电阻温度计.....	(76)
3.1.3 高温铂电阻温度计.....	(77)
3.2 铂电阻温度计的使用方法	(78)
3.2.1 “冷加工”和运输中的注意事项.....	(78)
3.2.2 热处理.....	(79)
3.2.3 脱玻作用.....	(80)
3.2.4 温度计的浸没深度.....	(80)
3.2.4.1 静压效应.....	(82)
3.2.5 内部热效应.....	(83)
3.2.6 辐射效应.....	(84)
3.2.7 氧化效应, 氧的分压.....	(85)
3.3 数学方法.....	(86)
3.3.1 13.8033K到273.16K温区.....	(87)
3.3.2 0℃到961.78℃温区	(88)
3.3.3 -38.8344℃到29.7646℃温区.....	(89)
3.4 表、图和参考文献	(90)
4 ^3He 和 ^4He 蒸气压温标和压力测量	(97)
4.1 氦蒸气压 (0.65K到5.0K)	(97)
4.2 氦蒸气压的关系式.....	(97)
4.3 氦蒸气压测温学	(98)
4.3.1 ^4He	(98)
4.3.2 ^3He	(100)
4.3.3 ^4He , ^3He 的组合系统	(101)
4.4 压力测量.....	(102)
4.4.1 水银压力计.....	(103)
4.4.2 活塞式压力计.....	(104)
4.4.3 石英压力规.....	(106)
4.4.4 薄膜和囊式压力传感器.....	(106)
4.4.5 热分子压差.....	(107)
4.5 表、图和参考文献	(109)

5 气体温度计	(114)
5.1 温标的定义	(114)
5.2 总的设计准则	(115)
5.3 工作流体	(116)
5.4 温泡	(117)
5.5 压力测量	(117)
5.5.1 静压头的修正	(118)
5.5.2 热分子压力的修正	(118)
5.6 死空间的修正	(119)
5.7 气体温度计的设计	(119)
5.8 表、图和参考文献	(120)
6 辐射温度计	(126)
6.1 单色辐射温度计	(126)
6.1.1 光学系统	(126)
6.1.2 滤光片	(127)
6.1.3 探测器	(129)
6.2 银点以上 ITS-90 的建立	(130)
6.2.1 通则	(130)
6.2.2 实用方法	(131)
6.2.3 光谱响应和有效波长	(132)
6.2.4 亮度比和非线性	(133)
6.3 钨带灯	(133)
6.4 传递用标准辐射温度计	(134)
6.5 辐射测温学中的注意事项和误差来源	(135)
6.5.1 注意事项	(135)
6.5.2 误差的其它来源	(137)
6.6 图和参考文献	(138)
附录1 1990年国际温标 (ITS-90)	(146)
附录2 名称缩写表	(165)

1 引 言

1.1 宗 旨

从1927年到1975年的历次国际温标中都有一节关于温标复现方法的补充资料。但是,由于补充资料所占的篇幅有限,不可能对复现方法作详尽的描述;同时,历次温标相隔的期限又很长,估计7年到21年,这样,在温标的有效期内,温标中的补充资料的大部分内容就显得过时了。1976年的低温温标(EPT-76)^{1.1}中没有补充资料这一节,后来,以独立文件的形式更详尽、更全面地给出了EPT-76和IPTS-68的补充资料。1983年出版了这种文件的第一版,即《IPTS-68和EPT-76补充资料》。本书算是《补充资料》的第二版,是由温度咨询委员会(CCT)第一工作组为ITS-90所编写的,并为CCT所批准(ITS-90的文本见附录1)。

使用本文件中所描述的方法,可成功地复现ITS-90。但是,这些方法并非作为强制性的规定。凡涉及任何一种仪器设备时,意在说明,而非规定;使用其它类型的仪器设备通常也是有效的。同样,这里所引证的某些数据和尺寸,也只作参考之用。复现温标的方法在不断发展中,经历一段时间后,再出版本文件的修订版,以及时反映新的进展。

1.2 历史背景

ITS-90[CIPM 1989, Preston-Thomas(1990)]是从一系列早期国际温标演变来的。制订新温标是为了提高温度测量的精密度

^{1.1} 注:此缩写和其它缩写的全称见附录2。

和复现性,同时,使温度测量值尽可能与相应的热力学温度相一致。对这些温标以及其历史评述的详细介绍可在 Quinn(1990)的著作中找到;下面给出简要的叙述,具体包括历次温标文本之间的差异。

1.2.1 正常氢温标

1887年,国际计量委员会第六届会议采纳了正常氢温标[CIPM(1887)],随后在1889年第一届国际计量大会上获得批准[CGPM(1889)]。此温标是由 Chappuis 在国际计量局(BIPM)的实验室中建立的;它基于用冰点(0°C)和汽点(100°C)作为固定点的气体温度计的测量,并将此温标的值传递给玻璃水银温度计;而分发到各国家实验室中去。当时温标的范围为 -25 到 $+100$ 百分度^{1.2}。这个温度范围已逐步扩大。1913年第五届大会批准了可使用氢以外的其它气体,一旦成功,就可以与正常氢温标一样,用它们来测量热力学温度。

1.2.2 ITS-27

为了适应更正确的热力学数据的需要,作为一种临时性的措施,第七届国际计量大会批准了1927年国际温标[CGPM(1927)]。ITS-27基于一系列可复现的温度点,或称固定点,并给出了它们的数值大小,同时,还规定了三种标准内插仪器,它们在一个或一个以上的固定点上分度,由此得出定义各温区中的温度值的公式中的常数。铂电阻温度计用于下温区,铂10%铑/铂(Pt-10%Rh/Pt)^{1.3}热电偶用于中间温区,而光学高温计则用于上温区^{1.4}。

1.2 1889年国际计量大会还批准了百分度的名称。1984年第九届大会请求CIPM在三个名称中选一个:Centigrade(百分度),Centesimal(百分度)及Celsius(摄氏度)。按CIPM的意见,大会采纳Celsius(摄氏度)。

1.3 指按重量的百分数

1.4 这一提法同样适用于后继的两个温标:1948年国际温标(ITS-48)和1968年国际实用温标(IPTS-68)。

铂电阻温度计的温区中所用的固定点为：冰的熔点 0.000°C ，氧、水、硫的沸点分别给定为 -182.97°C ， 100.000°C 和 444.60°C 。在 0°C 和 660°C 之间的电阻-温度内插公式为卡仑达公式（二次型）；在 -190°C 和 0°C 之间为卡仑达-范杜森公式（二次型加上一个四次方项）。规定了这些公式中的常数的取值范围，这在一定程度上对温度计的制作进行了质量控制。

铂10%铑/铂热电偶温区的固定点为银和金的熔点（更确切地说，在标准大气压下，物质的固相和液相的平衡温度），它们的温度值分别给定为 960.5°C 和 1063°C 。第三个分度点为铋的凝固点（ $\sim 630.5^{\circ}\text{C}$ ），但不是固定点，它的温度值是用分度过的标准铂电阻温度计来直接测定的。热电势/温度的内插公式是二次型的，它定义的温区为从 660°C 到 1063°C 。这里，也通过对公式中的常数的取值范围所作出的规定，在一定程度上对热电偶的质量进行控制，但是，这里控制的是热电偶丝材的组份。

可以看到，铂电阻温度计所规定的温区的下限和上限温度是明显地超越了分度点的最低最高温度值（约 90K 和 444°C ）。上限延伸带来一个难处理的问题，即不可能合理地给出铝的凝固温度！此凝固温度非常接近于规定的分界点 660°C 。然而，可以证明，用铂电阻温度计测量时，它稍高于铂电阻温度计所规定的上限 660°C ，而用铂铑/铂热电偶测量时，则它又稍低于热电偶的下限 660°C 。电阻温度计定义的温区的下限比最低分度点低不少，这时与热力学温度的差异大到不可接受的程度。

光学高温计使用的固定点是金的熔点，它连同（近似的）维恩辐射定律 $L_{\lambda}(T) = \pi^{-1} c_1 \lambda^{-5} \exp[-c_2/\lambda T]$ 一起使用，该公式是辐射的光谱密度与温度之间的关系式。 c_2 的给定值为 $1.432 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$ （在比较未知温度和分度温度的大小时， c_1 可以消去）。波长太小的限制为：使用“可见”单色辐射，并且 $\lambda T \leq 3 \times 10^{-3} \text{m} \cdot \text{K}$ 。在当时的测量条件下，由于使用维恩定律和金点， c_2 的赋值所引起的各项误差通常是不显著的，甚至是不能察觉的。

1.2.3.1 ITS-48

第九届国际计量大会通过了1948年国际温标[CGPM(1948)]。它与ITS-27的不同之处为：铂电阻温度计的下限更改为氧沸点——定义固定点；铂电阻温度计规定的温区与热电偶温区的衔接点改为铋凝固点的测量值；银凝固点的给定值改为 960.8°C ；金熔点改为金凝固点；用普朗克辐射定律替代维恩定律；第二辐射常数 c_2 的给定值改为 $1.438 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$ ；更新了铂电阻温度计和热电偶的内插公式中的常数的取值范围；取消了光学高温计中对于 λT 值的限制条件。

1.2.3.2 IPTS-48

第十一届国际计量大会通过了1948年国际实用温标(1960年修订版)[CGPM(1960)]。对ITS-48所作的修改为：水三相点的给定值为 0.01°C ，用它替代冰融点作为此温区的分度点，在1954年已规定它为用一个温度点的方法来定义热力学温度单位开尔文的温度点；铋凝固点定为 419.505°C ，建议用它作为一个分度点来替代硫沸点；铂电阻温度计和热电偶内插公式的常数取值范围有了更严格的限制；取消了光学高温计必须使用“可见”辐射的限制。

由于IPTS-48的温度数值与ITS-48是一样的，所以，它不是1948年温标的修订，仅是文本的修订。

1.2.4.1 IPTS-68

1967—1968年第十三届国际计量大会授权国际计量委员会于1968年颁布1968年国际实用温标[CGPM(1967—1968)]。与IPTS-48相比，IPTS-68作了很大的变动。为了缩小与热力学温度的差异，对给定的温度值作了更改。在很多场合下，这一变动的影 响是相当大的。其它的变动有：温标的下限延伸到 13.81K ；对于更低的温度， 0.5K 到 5.2K ，建议使用1958年 ^4He 蒸气压温标[Brickwedde等(1960)]和1962年 ^3He 蒸气压温标[Sydo-riak等(1964)]；加入了6个新的固定点——平衡氢三相点(13.81K)，平衡氢的一个蒸气压点(17.042K)，平衡氢沸点

(20.28K), 氮沸点 (27.102K), 氧三相点 (54.361K), 锡凝固点 (231.9681℃) (可以用它替代水沸点); 取消了硫沸点; 4个固定点的给定值有了更改, 它们是: 氧沸点 (90.188K), 铟凝固点 (419.58℃), 银凝固点 (961.93℃) 及金凝固点 (1064.43℃); 电阻温度计温区的内插公式变得非常复杂; c_2 的给定值更改为 $1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$; 再次更新了铂电阻温度计和热电偶内插公式的常数的取值范围。

1.2.4.2 IPTS-68(75)

1975年第十五届国际计量大会通过了1968年国际实用温标(1975年修订版) [CGPM(1975), Preston-Thomas(1976)]。正如ITS-48到IPTS-48一样, IPTS-68(75)的温度数值与IPTS-68的 T_{90} 值是一致的, 没有数值上的变化。温标文本作了多处文字修改, 主要为了便于应用及表达得简明扼要。比较重要的变化为: 用氧凝固点代替氧沸点, 但数值未变; 增加了氦三相点 (83.798K), 可以用它来替代氧凝固点; 不再推荐使用氮蒸气压温标。

1.2.5 EPT-76

为了在0.5K到30K温区内的温度测量有共同的基础, 通过了1976年0.5K到30K临时温标 (EPT-76) [BIPM(1979)]。它提供了一个光滑内插的方法, 以代替IPTS-68在27K以下的内插方法, 因为这段IPTS-68的误差较大; 改正了1958年 ^4He , 1962年 ^3He 蒸气压温标中的差错; 同时, 填补了5.2K到13.81K之间的空隙, 因为在以前的国际温标中是没有这一段温区的。与IPTS-68不同, 为了尽早通过EPT-76, 同意几种复现方法并存, 它包括: 使用一种热力学内插仪器, 和一个或更多的参考点 (总共提供11个参考点, 其中包括5个超导转变点); 在13.81K以上温区, 使用与IPTS-68的差值; 在5K以下温区, 使用与氮蒸气压温标的差值; 使用与一致公认的实验室温标的差值。由于这些复现方法的不一致性, 各种复现方法的结

果会有差异,这种小的差异是许可的。然而,在修改 IPTS-68,或扩展它的适用温区之前,使用 EPT-76 是利大于弊[Durieu 等(1979) 及 Pfeiffer 和 Kaeser(1982)]。

1.2.6 ITS-90

根据第十八届计量大会[CGPM(1987)]第 7 号决议的要求,计量委员会[CIPM(1989)]于 1989 年通过了 1990 年国际温标,并于 1990 年 1 月 1 日起生效。ITS-90 的全文列于附录 1 中,下面的摘录是它的简介(摘录文本第 3 节中的引言):

“0.65K 到 5.0K 之间, T_{90} 由 ^3He 和 ^4He 的蒸气压与温度关系式来定义。

由 3.0K 到氮三相点 (24.5561 K) 之间, T_{90} 用氮气体温度计来定义,它使用三个定义固定点及利用规定的内插方法来分度。这三个定义固定点是可复现的温度点,并具有给定的数值。

平衡氢三相点 (13.8033 K) 到银凝固点 (961.78°C) 之间, T_{90} 用铂电阻温度计来定义。它使用规定的内插方法及相应的定义固定点组来分度。

银凝固点 (961.78°C) 以上, T_{90} 借助于一个定义固定点和普朗克辐射定律来定义。”

ITS-90 在许多方面与 IPTS-68 有重要的差异:

- 温标的下限由 $\sim 13.8\text{K}$ 延伸到 0.65K,由此也替代了 EPT-76 中的 0.5K 到 30K 之间的温区;

- 与热力学温度更一致;

- 提高了温标的连续性和精度;

- 具有一系列重叠温区和分温区,某些温区有多种定义,但它们是相当一致的;

- 新的氢蒸气压温标不仅是推荐使用的温标,而且已成为温标整体中不可分割的一部分;

- 温标中设有内插气体温度计,它是规定的内插仪器,在 3 个固定点上分度;

-作为规定的内插仪器的铂电阻温度计，它的上限已由 630°C 上延到银点($\sim 962^{\circ}\text{C}$)；

-在新温标中，Pt-10%Rh-Pt热电偶已不再是规定的内插仪器，因此，在 630°C 上不再存在斜率不连续的问题，而在ITS-68中， 630°C 是铂电阻温度计与热电偶温区的连接点，在该点上的斜率是不连续的。

-以普朗克辐射定律为基础的温区，不再从金点开始，而代之以银点，同时，可以在银、金或铜点中任选一个作为这部分温标的参考点。

ITS-90的总体方案如图1.1所示，定义固定点的清单则列出于表1.1中。

建立ITS-90的一个指导原则是：可以在多种复现温标的方法中任选一种准确的和可复现的温标。为此，温标中包含了多个分温区，除一个分温区外，其它分温区在定义 T_0 时，都不使用温区以外的温度点^{1.5}。因此，如果铂电阻温度计需要在 $\sim 13.8\text{K}$ 到 273.16K 的整个低温温区内分度，则要使用这一温区中的全部8个分度点；如果只须在从氦点($\sim 84\text{K}$)到水三相点的温区内分度，仅使用这一温区内的三个分度点， $\sim 84\text{K}$ ， $\sim 234\text{K}$ (Hg三相点)和 273.16K 。同样，在 0°C 以上的温区中，一支温度计在 0°C 到 30°C 温区内分度时，只须使用水三相点和镓熔点。这样，能用最简单的方式来获得室温温区的最高测温准确度；这就不必花费精力和更多的投资去建立所需温区以外的分度点，因此，也可以在最佳条件下保存温度计，即温度计不需要经历高于正常使用温度的状态。为此灵活性所付出的代价为：分温区存在一定程度的非一致性；增加了非唯一性（相对于无重叠区或无分温区的温标）；在1.3.2节中将会讨论到这点，在图1.5和1.6中给出了一些现有的定量结果。

表1.2给出了ITS-90中的极大部分的定义固定点的热力学

^{1.5} 唯一例外是铂电阻温度计中的由氦三相点($\approx 24.5\text{K}$)向上的一个分温区，它要求在氦三相点($\approx 13.8\text{K}$)上分度。