

科学和工业中
温度的测量与控制

(上 册)

TEMPERATURE

ITS MEASUREMENT
AND CONTROL
IN SCIENCE AND INDUSTRY

[美] J. F. 斯库利 主编
赵 琪 凌番康 等译

计 量 出 版 社

79.851
616

科学和工业中

温度的测量与控制

(上册)

〔美〕 J.F.斯库利 主编

赵 琪 凌善康 等译



内 容 提 要

本书选译自 J.F.斯库利 (James F.Schooley) 主编的论文集《科学和工业中温度的测量与控制》第五卷 (1982年)。它概括了近十年来世界各国在温度测量与控制方面的最新研究成果。本册内容有: 鼠标、辐射测温法与温度控制和分度等三篇。下册内容包括: 电阻温度计与热电偶测温, 在特殊环境——深海、航天、核辐射条件下的测温等。本书可供温度计量和有关方面的研究工作者、工程技术人员及大专院校有关专业的师生和研究生阅读。

James F.Schooley
**TEMPERATURE
ITS MEASUREMENT
AND CONTROL
IN SCIENCE AND INDUSTRY
(VOLUME FIVE)**

American Institute of Physics New York 1982

科学和工业中温度的测量与控制

(上 册)

[美] J.F.斯库利 主编

赵 琪 凌善康 等译

责任编辑 贾绪昕 吴 全

—

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—

开本 850×1168 1/32 印张 10 1/2

字数 272千字 印数 1—18000

1985年8月第一版 1985年8月第一次印刷

统一书号 15210·461

定价 2.35 元

译 者 的 话

1982年3月14日至18日在美国首都华盛顿举行了第六届温度讨论会。同年年底，收到了美国有关方面寄来的会议论文集。当时我们就认为应该尽快把这次会议的内容介绍给我国温度界的同志们。这个愿望得到了计量出版社的支持，经过一年左右的努力，本书终于和广大读者见面了。

美国有关方面主办的以Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry (科学和工业中温度的测量与控制) 为题的国际性学术讨论会，已经有很长久的历史了。第一届会议可以追溯到本世纪二十年代末期，以后大约每隔10年就召开一次。从第二届讨论会开始，会议的论文汇编出版，至今已经出了五大卷。

由于该书汇编的论文具有无与伦比的深度和广度，因此，它一直是世界各国的温度工作者经常参考和引录的权威性文献。

1982年的第六届讨论会全面地系统地总结了1971~1981年期间世界各国在温度测量与控制方面的成就和面临的问题，各国的温度工作者都对这次会议的成果十分重视。这届讨论会与历届会议相比，还有一个显著的不同点：中华人民共和国首次派出了代表团参加会议，并在会上宣读了论文。国际同行对中国的温度工作者的工作给予了很高的评价。

本书选译了第六届讨论会的论文共39篇，现分上下两册出版，上册内容包括：热力学温度、温标、辐射测温法以及温度的控制和分度等。下册内容有：电阻温度计测温、热电偶测温 and 特殊场合——深海、航天、核辐射条件下测温等。我们相信，这些文章将对我国的温度测量和控制工作有比较大的参考价值。

本书是集体智慧和共同努力的结晶。上册分别由赵琪、凌善

康、戴乐山、夏永健、王梓林、何绍汾、黄宁生、崔志尚、石质彦、仇乃荣、李郁芬、金耀根、吕诚哉等同志翻译。下册分别由邓大任、朱瀛松、王振河、孙崇正、王震森、姚全发、朱其俊、成玉骏、贺宗勤、郭乃宁、陆月芸、隋思聪、陈日新、陈愈忠、傅乐勇、李迎春等同志翻译。计量出版社总编辑汤永厚同志和本书责任编辑窦绪昕、吴全同志为本书的出版作出了贡献，谨表示衷心的感谢。

由于本书涉及面广，内容充分反映了现代科学技术在测温领域中的应用，因而翻译难度较大，此外，有些新词新语甚至是我国出版的英汉词典未曾收入的，所以误译、错译之处肯定不少，我们诚恳地希望读者们批评指正。

1984年6月

目 录

第一篇 温 标

(一) 温标、国际实用温标及其发展	(1)
(二) 热力学温度的测量	(16)
(三) 2.6~27.1K 的热力学温度测量	(39)
(四) EPT-76中使用的氮蒸气压方程	(49)
(五) IMGC用密封容器研究气体相变的十年	(70)
(六) 超导测温固定点	(95)

第二篇 辐 射 测 温 法

(七) 用辐射法测量 327~365K 之间的热力学温度	(113)
(八) 用 NPL 光子计数高温计测定热力学温度	(123)
(九) 低于 1064.43℃ 的光电高温计温标及银点的测定	(136)
(十) 中国计算科学研究所的光电比较仪和金点以上 IPTS-68 温标的复现	(148)
(十一) 苏联辐射测温的温度单位标准	(164)
(十二) 具有线性特征的直流光电光谱高温计	(175)
(十三) 快速测高温技术在 IMGC 的10年	(186)
(十四) 2000~6000 K 的双色微秒级高温计	(201)
(十五) 实用固定点黑体炉	(217)
(十六) 反应体系的 CARS 测温法	(228)
(十七) 纯转动 CARS 测温法	(259)

第三篇 温度控制和分度

(十八) 新一代的精密炉	(271)
(十九) 温度分度装置的自动化	(292)
参考文献	(306)

(一) 温标、国际实用温标 及其发展

R. P. Hudson

(国际计量局)

~~~~~

〔提 要〕本文简要地阐述了国际温标的概念以及对温标的结构和使用的一些实际设想。文章介绍了现行国际实用温标 (IPST-68) 的某些缺陷, 同时介绍了新的基准测温法的数据, 以及在传感器和固定点方面的若干进展, 这些很可能于不久的将来会作为新温标的基础。新温标的范围可能延伸到 0.5K 或毫开温区 (可能性小些)。文中扼要地提到国家级计量学与科学、工业对测温学要求之间的关系; 温标制定者与某些重要使用者之间的矛盾。最后提到 IPST “次级复现” 的概念。

~~~~~

1. 基 本 设 想

所有的基本物理量中, 或许温度是最难于准确测定的一个, 因此很少有人尝试。尽管如此, 还是不时出现一些出色的实验装置, 如声速、噪声或经典气体温度计一类的热力学仪器, 来完善这项测定工作。可靠的测量结果由此传递到温标所规定的、灵敏的、可复现的“次级”温度计上去。这种温标实际上是一种“规定方法”, 使所测定的温度能够准确地、方便地等同于 (很近似于) 系统的热力学温度。在发展此温标时, 必须牢记四项基本特性:

- (a) 定义；
- (b) 复现（和保存）；
- (c) 传递；
- (d) 使用。

定义和复现温标需要参考温度（固定点），以及在这些参考点之间和之外进行内插和外推的仪器与方法。

对于内插方法而言，应要求感温元件的固有特性——非唯一性减至最小程度。所谓“非唯一性”系指用同样方法来分度的不同温度计，在固定点之间给出不同的温度。因为同类型的单个温度计，其行为各稍有不同，若用已选定的内插方程并不能充分照顾到这一点，为把非唯一性减小到最低程度，必须使复现方法很好地满足测温变量 x 与实际温度的关系式；还要满足合适的固定点数目的要求。如果固定点选得太少，则测温变量 x 与 T 的关系必定是一个颇为简单的物理模型，在参考点之间的分度“拟合”会相当粗糙。一个理想的拟合，原则上只可能在固定点处，各温度点之间中间温区的发散就是非唯一性，如果在复现固定点时出现误差，则各实验室之间的“非唯一性”将会更严重。

对于外推方法，正如已经做到的那样，就单凭相信物理学了。人们根据著名的物理学定律，探索一种测温变量随温度而变化的仪器。例如，借助于普朗克定律以及由一黑体的辐射能量来定义金点以上的国际实用温标。由于普朗克定律所定义的黑体并不是我们实际所用的空腔，也就是说存在黑度的偏离（温度有偏离），加上温度梯度的存在，如此等等，就会引入温度误差，使得非唯一性增加。在极低温下也有类似的情况（然而，该温区尚无 IPTS）。在微开温区，只能利用某种核系统的顺磁盐，依据居里定律外推，除此别无它法。这里的情况与光学高温计温区不同，只要使用相同的感温材料，就不会出现非唯一性。但是，延伸到极端温度却会受到限制，这一点两者是相同的。高温下，做成适合于物理定律的人工制品实际上是不可能的。低温下， $x-T$ 关系式中本可忽略不计的高次项又显得更突出了，此外，开始出

现非常本质的与温度无关的行为。

上述对外推法的探讨，原则上对内插法也是适用的，或许还更有用。然而，由于历史原因，或出于实用目的，人们已经采用了 $x-T$ 经验式。不过，有几个物理学定律在测温学中同样得到应用（如 聂奎斯脱噪声定律，理想气体定律，居里定律等），这些都是很简单的分析式。从温标的定义以及复现的简单性和唯一性来看，这些定律在内插时都有明显的优点。历史上，只有液体玻璃温度计兼有高灵敏度、良好的复现性和定律简单等优点。然而从目前来看，似乎在低温温区可能出现第二个例子（见下面说明）。

温标所定义的内插仪器，从广义上说是“实用”的，它的优点是不必考虑标准器的某些缺陷，如铂电阻的易碎性、尺寸过大和响应时间长等；光学高温计不允许妨碍光线传播等。人们目前正致力于既要使测量系统和传递系统达到最高的复现性（这一点应与国家标准实验室的财力相适应），又要用更简单和更易于复现的方法，而不是定期动用绝对基准仪器。

有两种不同的方法对“温度实际测量”有影响，第一种是在复现之后立刻就地实现温标，并进行使用，传递这一步就略过了；第二种方法即是最通常的检定。须知，温度计的使用与温标的复现是迥然不同的，第二种方法的准确度要比第一种差，特别是当传递的仪器与使用的仪器不是一体，而且它们不属于同一型号时更是如此。为操作方便考虑，往往只能把温度计从测温体上卸下送检。只要按规程的要求仔细核验，则逐级往下传递时，精度降低的程度是能够知道的。

2. 国际协议温标

温度测量的国际协议，一开始是以测量热力学性质需要国际上的共同基础而提出的^[1,2]。因此，首先要求完成“定义”和“复现”这两个步骤。非常重要的一点是要覆盖较宽的温区，选

择较好的内插仪器和内插方法,以提高灵敏度和取得良好的复现性。自从1927年第一次正式协议公布以来,温标已经作了多次改进和延伸,如文献[4]所介绍。国际计量委员会(CIPM)负责整体工作;具体工作,如对温标的倡议、评价、比对和建议则由温度咨询委员会(CCT)来执行。

IPTS的最新修订版于1967~1968年完成,于1968年正式颁布IPTS-68^[5]。1975年又作了修订,定名为IPTS-68(1975年修订版)^[6]。CCT现任主席在他提升之前,以他那渊博的学识和饶有兴味的笔法介绍了IPTS-68的产生过程^[7]。现在让我转入介绍IPTS的现状、改进和延伸。这些题目现正在积极讨论之中。

3. IPTS-68

IPTS-68是基于表1中所列的固定点及所赋予的温度值的。这些值全部以气体温度计为基础[液氢温区加上NBS(美国标准局)声学温度计的一些数据],度(开尔文)的大小由赋予水的三相点为273.16K来确定^[8]。

此温标由13.81K向上定义,包括两种内插仪器的三个独立温区和一个外推计算。

(1) 铂电阻温度计温区

铂电阻温度计范围中,13.81~273.15K属于一个温区;273.15K~630.74℃为另一温区。这两个温区的温度计分度程序各不相同,上温区的程序十分简单,下温区的程序分四个部分,比较复杂^[5]。

标准铂电阻温度计所能达到的复现性约为 $\pm 0.02\text{mK}$ 。IPTS-68的程序中已经考虑到它的高质量,不幸的是最高复现性在实际中很难达到,通常不能优于 $\pm 0.5\text{mK}$ 。如果较恰当地来估计(见图1),固定点的复现并不理想,有相当大的不确定度($\pm 5\text{mK}$)会引入^[9]。

最近NBS的权威性高温气体温度计结果表明,0~420℃之间

表1 IPTS-68定义固定点^①

平 衡 态	给定国际实用温度值	
	$T_{98}(\text{K})$	$t_{98}(^{\circ}\text{C})$
平衡氢固相、液相和气相之间的相平衡 (平衡氢三相点)	13.81	-259.34
平衡氘液相和气相在93330.6 Pa(25/76标准大气压) 压力下的平衡 ^②	17.042	-256.108
平衡氘液相和气相之间的平衡 (平衡氘沸点) ^③	20.28	-252.87
氘液相和气相之间的平衡(氘沸点) ^④	27.102	-246.048
氧三相、液相和气相之间的平衡 (氧三相点)	54.361	-218.789
氧固相、液相和气相之间的平衡 (氧三相点) ^⑤	83.798	-189.362
氧液相和气相之间的平衡(氧冷凝点)	90.188	-182.962
水三相、液相和气相之间的平衡 (水三相点)	273.16	0.01
水液相和气相之间的平衡(水沸点) ^⑥	373.15	100
锡固相和液相之间的平衡(锡凝固点) ^⑦	505.1181	231.9681
锌固相和液相之间的平衡(锌凝固点)	692.73	419.58
银固相和液相之间的平衡(银凝固点)	1235.08	961.93
金固相和液相之间的平衡(金凝固点)	1337.58	1064.43

①除各三相点和一个平衡氢点(17.042K)以外,温度的指示值均指压力在 $p_0 = 101325 \text{ Pa}$ (一个标准大气压)时的平衡态,与此压强有微小偏差所产生的影响示于 IPTS 文本附表5中,固定点温度与同位素丰度有关时,应采用参考文献(3)的第三节所规定的丰度。

②“平衡氢”一词在参考文献(6)第三节(五)中说明。

③同位素或杂质的分离,要求氢和氘使用沸点(近消失的少量蒸气成分),氧使用冷凝点(近消失的少量液体成分),见文献(6)第三节。

④氢三相点可作为氧冷凝点的替用品。

⑤锡凝固点($t' = 231.9292^{\circ}\text{C}$)可作为水沸点的替用品,见参考文献(6)的公式(10)。

的固定点给定值可能要向下调整⁽¹⁰⁾(见图2)。这些结果与NPL

(英国国家物理所)的辐射温度计的测量结果符合甚佳,该辐射计是利用量热计法在2K条件下测定的,测量温区限于0℃附近。显然,在100K以下, T_{98} 明显地偏离 T 。氧三相点目前的给定值 54.361K可能太高,可能要高0.01K⁽¹²⁾。根据最新低温气体温度计⁽¹³⁾的测量结果表明,30K以下的光滑性和热力学准确度也将有

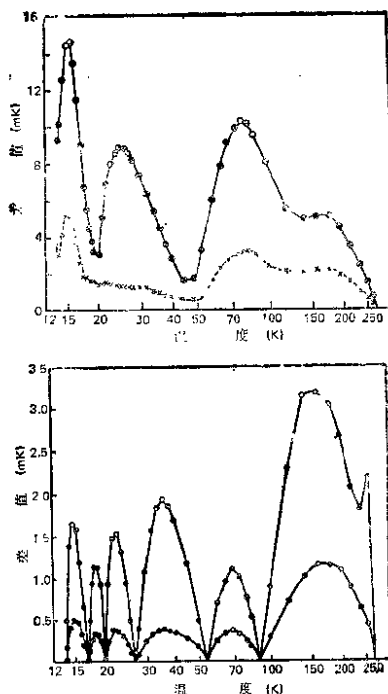


图 1 各实验室标准铂电阻温度计的比较

上图是使用原实验室分度的曲线；下图是为了在固定点上保持一致而重新分度后的曲线；在每幅图中，上曲线是任意一对温度计的最大偏差；下曲线表示差值的68%的极限

〔图转载自Ward, Compton, Metrologia 15, 31(1979)〕

明显的改善（发现已变化9 mK）。全世界0℃以下的几种基准热力学温度计——气体和噪声温度计——不久必将提供进一步改善热力学温度的知识〔14,15〕。

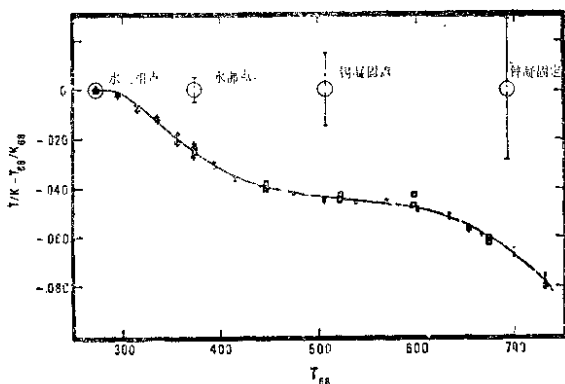


图 2 通过最近气体温度计发现的 $T - T_{68}$ 差值

[取自 L.A. Guildner and R.E. Edsinger, J. Res. Natl. Bur. Stand. Sect. A80, 703 (1976)]

(2) 热电偶温区

630.74℃ 和金点 (1064.43℃) 之间, IPTS-68 是靠铂铑 10-铂热电偶的二次式来定义的。最近几年的研究表明: 如果要求精度达到几毫开的水平, 少于五阶多项式不足以表达温度-热电势的关系^[17]。在金点以下与光学高温计的比较中, 几位研究者一致同意这样的结论, 在 630~950℃ 之间, IPTS-68 在 800℃ 处 $T - T_{68}$ 的最大偏差可达 0.5 K^[18] (见图 3)。这一发现已为噪声温度计的结果所证实^[19]。目前的分度程序基于三个参考点上, 因此非唯一性仍是一个问题。

金属不完善性的缺陷仍然是明显的, 包括丝材中物理和化学的不均匀性, 它在有温度梯度的区间会产生一个寄生热电势, 在分度中造成一系统误差。这类不完善性随着热电偶在高温下使用会不断地变化, 使得分度值相应地漂移。

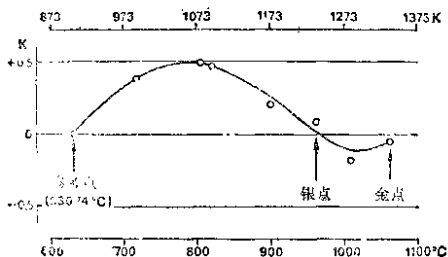


图 3 通过光学高温计发现的 $T-T_{68}$ 差值
(取自 J. Bonhoure, Metrologia 11, 141 (1975))

Jones⁽²⁰⁾已得出结论,当热电偶没有任何系统误差时,在分度以后,对一未知温度的单次读数,最小不确定度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。在平时使用中,热电偶的热历史对性能的影响是一项非常复杂的过程,所指示温度的不确定度可达几度⁽²¹⁾。欲改进此状况,或由铂电阻温区上展,或由光学温区下延,或两者综合考虑。

(3) 光学高温计温区

借助普朗克辐射定律⁽⁵⁾和黑体辐射的光谱密度,金点 (T_{Au}) 以上的 IPTS-68 是基于测量比值 T_x/T_{Au} 来实现的。虽然在温标的文本中未作规定,复现工作往往是通过光学高温计来进行的。温标的保存和传递是靠钨带灯,1600°C 以下用真空灯,更高温区用充氦气灯。目前,由于技术的发展,目测高温计已经由光电高温计所替代了。这一变化导致在短期内重新评价了铂的凝固点温度,已发现温度值竟相差达 4K 之多⁽²³⁾。

温标的复现应包括一系列精细的实验,如“黑体”的灰度、滤光片的性质、扇形圆盘以及光学系统部件性能(如探测器的线性度、灯泡的寿命和极化效应等)的测定。这一领域目前似乎完全能够满足需要。

4. IPTS 向下延伸

0.5~5K之间有根据气体温度计得到的 ^3He 、 ^4He 的蒸气压数据表,这个表是广泛使用的半官方的温度标准^(25,26),现在此表正在修订⁽²⁷⁾。目前,已有大量测温方法,包括下列基准温度计:基于核取向 γ 射线各向异性的温度计和约翰逊噪声温度计;依赖于与 T 成反比的居里定律和一点分度的核顺磁盐磁化率温度计;以氮蒸气压或超导固定点来分度的电子顺磁温度计或电阻温度计(前者有时用“外推”模型);还有其它温度计⁽²⁸⁾。这些测温方法如图4所示。

0.5K以下没有正式的温标。过去0.5~5K温区曾有过正式的规定,但是技术上非常重要的温区——5~13.81 K,尽管很急需,却还没有统一的国际标准,估计新的 IPTS 必将填补此空白。迄今,这一激烈争论的问题已经到了应该解决的时候了。

目前,各种设想正沿着如下思路前进,从温度计的质量、方便性和价格的观点出发,铑-0.5%铁电阻温度计⁽³⁰⁾不失为一种出色的传递标准,它可能用于作为温标的定义内插仪器。但是,它要求许多分度点,因为它的 R - T 特性达到 $\pm 0.2\text{mK}$ 非属易事,这一点恰好是确定温标所不希望。作为内插仪器来使用的简单定容气体温度计倒是能达到所希望的水准。这是因为对仪器的设计要求比较适中,而且氮的第二维里系数值是指定的。在操作上要求准确测量压强比,也就是说, $\pm 1\text{mK}$ 的不确定度需要 $\Delta p/p = 10^{-4}$ (10K 时)。在其它温度下,按比例定。第三种内插仪器为磁温度计,这仪器本身还算灵敏,它的优点是使用电测量,这当然比机械法测量好,但是使用起来不甚简便,如作一般性使用,则不太可靠。将来可能会在磁温度计感温器的性质和电路方面,以及气体温度计的小型化和读数的精确性方面作出重大的改进⁽³¹⁾。

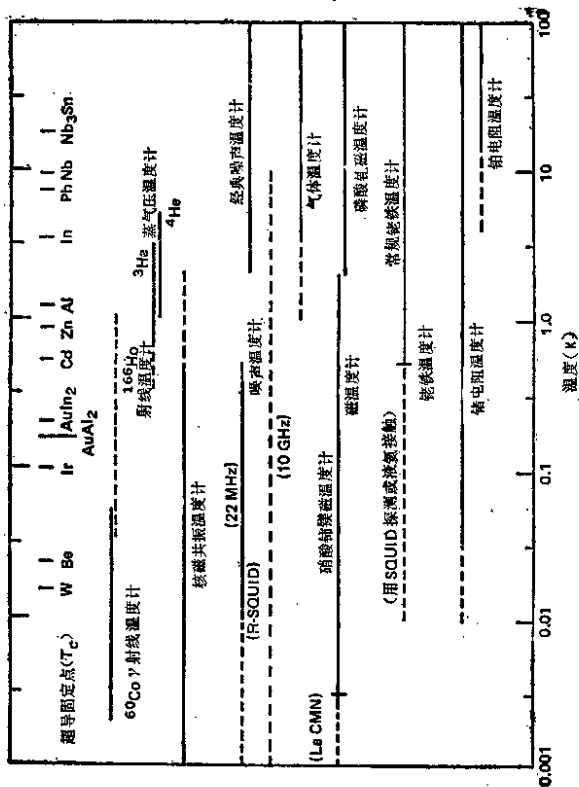


图 4 30K以下各种类型温度计及其应用范围

R-SQUID——电阻-超导体干涉器件,

SQUID——超导体干涉器件,

La CMN——镧-硝酸铈磁温度计

5. 新 IPTS 中的铂电阻温度计

(1) 下 限

在25K以下,铂电阻温度计的灵敏度下降得十分明显。然而,可用增加电流的办法来恢复测量灵敏度。若无不恰当的自然增加,则电流可增加到为较高温度所允许的定额定值以上。一个比较严重的问题是非唯一性的存在,部分原因是由于IPTS的设计不合理,低温温区的参考函数不能很好地描述铂的特性,以及固定点的温度值需要调整等等^[32]。

目前,13.81~20.28K和20.28~54.361K温区是用四次项和三次项函数⁽⁵⁾的单独分度程序,除要求减少非唯一性以外,很希望作一定的简化工作。如果使用一台内插气体温度计至氮三相点(24.56K)是毫无困难的。进一步分析会证明,这样作有一定的优点。然而,我们可以肯定,铂电阻至少会保留到13.81K,并将继续在两个氢沸点上分度。这一点似乎与现代发展趋势背道而驰。

(2) 上 限

标准热电偶将由温标定义中删除,似乎已经很清楚了。使用铂电阻温度计直接衔接到金点的可能性,实际上是卡伦达(Callendar)在许多年前就已提出来了的。尽管当时对杂质、沾污和应力等影响尚未作过有意义的研究。

最近20年来,对合适的高温铂电阻温度计已作了大量的研究^[33]。重要的设计特点包括有:丝材的尺寸,绕制的方法,密封和座架的材料以及清洗、充气等工艺。名义值为 2.5Ω 的类型具有较高的灵敏度,但是名义值为 0.25Ω 的感温元件的丝材更粗,更不用担心泄漏电阻和表面沾污的影响。一支高温铂电阻的价格与铂合金热电偶相比要贵得多,所以在使用高质量元件时,必须充分考虑其成本与效益之间的关系。

另一种考虑认为:在高温时要产生恶化现象,该现象往往随