

高等学校教学用书

雅 氏
工程热力学

上 册

苏联 A.C. 雅斯特烈姆斯基著

电力工业出版社

高等学校教学用书

雅 氏
工 程 热 力 学
上 册

苏联 A. C. 雅斯特烈姆斯基著
沈 維 道译

苏联文化部高等教育管理总局批准作为高等工业学校教科书

电力工业出版社

內 容 提 要

本書是高等工業學校“工程熱力學”課程的教科書。

原書共分三部分。第一部分根據熱力學的兩個定律闡述一般原理，另以特別章節敘述了氣流的熱力學和內燃機的循環。

第二部分是實際氣體的熱力學。在這一部分中研究了水蒸汽熱力學的一般問題；對於一些最重要的水蒸汽的狀態方程式進行了分析，並以很多篇幅研究了蒸汽動力裝置的循環。

第三部分簡要敘述了化學熱力學的基本原理。

譯本分上下兩冊出版。本書包括原書第一部分，譯本下冊則包括原書第二和第三部分。

А. С. ЯСТРЖЕМСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1953

雅氏工程熱力學 上冊

根據蘇聯國立動力出版社1953年莫斯科修訂第7版翻譯

沈維道譯

467R 108

電力工業出版社出版(北京府右街26號)
北京市書刊出版業營業許可證出字第082號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

787×1092¹/₂₅開本 * 11¹/₂印張 * 259千字 * 定價(第10類)1.5元

1956年12月北京第1版

1956年12月北京第1次印刷(0001—G, 100冊)

緒 論

苏联共产党第十九次代表大会的历史性的決議，以及苏联最高苏維埃第五次常会的決議，在苏联人民的面前提出了偉大的任务，为苏联科学的前进赋予了新的广大的可能性，并为苏联科学的发展指示了途徑和方向。

在第五个五年計劃所規定的、苏联技术科学的进一步发展方面，动力裝置的发展具有重大的意义。

在第五个五年計劃中写着：“在电气化方面，保証迅速增加电站的发电能力，以便更充分地滿足国民經济日益增長的电力需要和居民生活对电力的需要，并增加动力系統的儲电量。

在五年期間，使电站的总发电能力大約增加一倍，水电站的发电能力大約增加二倍，在火力发电站方面首先保証扩大現有的企叶。”^①

“保証建立火力发电站和热力網，以便广泛供应各城市工业企業以热力。”^②

在最近几十年中苏联的动力技术获得了巨大的成就，在这一些年代里，苏联的动力事業已成为先进的。由世界上最新的动力技术所装备的事業。結果，广泛地应用了压力高至 170 絕對大气压、溫度高至 550°C 的，高参数和超高参数的蒸汽，以及热化、給水的回热加热等等。这一切大大地提高了动力裝置总的經濟性和它們的效率。

与此同时，苏联的动力科学，特别是热力学，無論是在理論方面或是在实验方面，都得到了高度的成就。这一方面的研究工作在苏联

①見“苏联共产党第十九次党代表大会关于 1951—1955 年苏联發展第五个五年計劃的指示”，第 6 頁，国家政治出版社 1952 年版。

中文譯文見人民出版社 1952 年版，第 4 頁第 10 行。——編者

②見“苏联共产党第十九次党代表大会关于 1951—1955 年苏联發展第五个五年計劃的指示”，第 7 頁，国家政治出版社 1952 年版。

中文譯文見人民出版社 1952 年版，第 5 頁第 12 行。——編者

以下很多科学机关中正在进行：苏联科学院动力研究所，捷尔任斯基全苏热工研究所，波尔松诺夫中央锅炉汽轮机研究所，莫斯科莫洛托夫动力学院等。

苏联学者们在实际气体理论方面的研究，对实际气体的热力学性质的研究，对高压、高温的水和水蒸汽的热力学性质的研究，以及在探求热力设备装置最完善的工作原理的研究工作方面，在探求新的性质的研究工作方面，都远远超出了外国的科学，得到了政府很高的评价。

许多苏联学者在热力学的理论方面和实验方面的研究上，获得了斯大林奖金。

就与苏联发展第五个五年计划的关系上来看，这一方面的研究工作具有更现实的意义。

由于这些原因就需要一些在热力学方面的教学与科学的资料，因此，在所提出的这一本热力学的教科书中，在热力学的一些基本定律、实际气体和实际气体状态方程式的一般理论、水和水蒸汽的热力学性质、特别是在高参数时热力学的微分方程式、循环的一般理论和研究循环的一些方法、流动的理论、化学热力学等各部分的论述上，有了很大的发展。

教科书中“热力学微分方程式”这一部分的发展，是由于没有这个理论，就不可能在现代的科学水平上来阐明热力学。

同样地在教科书中引入了化学热力学，这一方面是由文化部所批准的热力学的教学大纲所规定，另一方面化学热力学在现代的燃烧理论上具有重要的意义。

在根本地改编和准备本教科书的第七版时，作者以这样一个巨大的、一般的、原则性的摆在苏联教科书面前的任务为方针。这个任务首先是要求充分地、完善地说明热力学的一些基本定律，热力学发现的历史，热力学的意义，以及热力学在热力工程上的应用。因此，本教科书在论述热力学第一定律和第二定律，以及关于热力学的导论等部分时，获得了颇大的发展。在导论中并叙述了热力学发现的历史，指出热力学的特性。在叙述这些问题时，能量守恒定律被讲述为客观

自然界的規律，被講述為物質的一般性質和特性的自然結果，以及給科學的世界觀以鞏固的基礎的一個定律。

根據熱力學的一些一般的定律，熱力學的理論過程的特性，以及熱機的循環，都可以作為這些定律的邏輯上的結果。

在敘述熱力學的一些基本理論時，指明了這些理論發現的歷史以及以後的發展，這樣促進了對這些理論的特性、理由，以及這些理論所能確定的範圍的認識。對歷史的研究不但使有可能正確而深入地認識所研究的理論，而且可以確定在這些理論的發現和發展上俄國和蘇聯學者的作用，以及他們的優先地位。這裡，熱力學的某些理論的歷史與熱力工程上某些工作原理的發展歷史被敘述在一起，這是由於，這兩方面乃是不可分割的整體，它是理論和實際的統一。

在提出這個問題時，指出了蘇聯動力的巨大成就，這些成就決定了近幾十年內熱力學的發展，規定了熱力學以後發展的途徑和方向。

這也証實了很多熱力學的理論和熱力學的原則性的結論的巨大實際意義。

在改編本教科書時，另一個重要的方針是根本上改變教科書上某些部分的提法，這個方針是對建立這些部分的理論的現有方法加以分析批判而決定的。這一方面的工作指明，現今所應用的，建立熱力學上某些定理的方法已經不適合現代的一般理論的情況，這些方法是由表面上的情況所決定，而不是由情況的本質所決定。這些方法只是由一些傳統的規矩所給出，它們被從一本書搬到另一本書而未曾予以本質上的改變。其實隨着科學的發展，在某些個別の場合，這些情況早已不能成立，雖然他們在某一個時期曾經決定過方法。這一方面的工作又指明，現代的一般理論的情況，可以給出更簡單更合理的方法以建立這些定理。根據這一方針，在本教科書中熱力學的微分方程式、蒸汽過程的分析和計算、循環的分析、氣體和蒸汽流動的理論等部分的講述上，進行了修改。

在熱力學的很多部分，在提法上，內容上和敘述上的變更也由於處理課程材料的教學法工作所引起。這裡，作者努力在每個個別情況，指明研究的任務，初始的基本原理。根據這些原理來建立所研究

的部分、所采用的证明的方法，所得到的结果以及它们的实际意义。所有这些，特别是证明的方法，在很大的程度上便利了并加深了学习，以及促进了学生的研究能力的发展。这也促进了所采用的证明方法的概括性和一致性。

热力学这一方面具有特别重大的意义，这就是促进并发展了学生的独立工作，并使消耗于讲解热力学各个别部分的理论的时间大为减少。

在本教科书中减少了例题的数目，只将典型的例题予以保留。同样地，将水蒸汽表颇为缩减。在生产性的计算上应当采用传播颇广的М. П. 烏卡罗維奇(М. П. Вукалович)教授的或全苏热工研究所的专门的表。

在导论中，对于热力学各基本部分有了足够的充实，这样，对于全部课程的一般性的导论就不必要了。

在导论中对于各基本部分，作者力求指明确定热力学建立的一些一般的定律，它们的意义、研究方法、发展历史、以及在历史上一些卓越的俄国和苏联的学者的作用，他们继承了并发展了罗蒙诺索夫和門德列也夫的学说，指明很多热力学的定理和定律的发明人，也指出斯托列多夫(Столетов)、阿凡納利烏斯(Авенариус)、烏莫夫(Умов)、皮罗郭夫(Пирогов)、委施聶格拉德斯基(Вышнеградский)、布特列洛夫(Бутлеров)等人的，以及俄国的很多物理学派和化学学派的创始人的学说。

同时，作者力求指明，决定热力学继续发展的途径的苏联动力工程的巨大成就。

最后，作者对于Э. А. 基里尔林(Э. А. Кириллин)教授审阅原稿，以及在审阅时提出了一系列宝贵的意见，应当表示深切的感谢。

作者也对 М. П. 烏卡罗維奇教授和以 Н. Е. 茹可夫斯基教授命名的军事航空工程学院(ВВИА)的工程热力学教研组的工作人员集体的劝告和帮助表示感谢。

作者

上册目录

緒論

第一編

第一章 气体的参数, 状态方程式	I
1-1 气体的参数	1
1-2 状态方程式	8
1-3 气体的比重	14
1-4 实际气体的状态方程式	15
1-5 范德瓦耳方程式的分析	20
1-6 参数的偏导数以及它们之间的关系, 热性系数	26
1-7 混合气体	29
第二章 气体的比热	41
2-1 导言	41
2-2 平均比热和真实比热, 基本公式	42
2-3 气体的比热 c_p 和 c_v	46
2-4 实际气体比热的公式和表	49
第三章 热力学第一定律	52
3-1 导言	52
3-2 热力学第一定律, 当量原理	65
3-3 气体的内能	66
3-4 气体的外部功	70
3-5 热力学第一定律的分析式	72
3-6 气流的能量方程式	75
3-7 焓	77
3-8 热力学第一定律的某些应用	79
第四章 基本的热力过程	83
4-1 基本的热力过程	83
4-2 多变过程	94

4-3	气体的比热为变数时的絕热过程	106
4-4	可逆与不可逆过程	113
第五章 热力学第二定律		117
5-1	热力学第二定律	117
5-2	卡諾循环	121
5-3	回热循环	128
5-4	可逆循环与不可逆循环的一般性質, 克劳修斯积分式	131
5-5	熵	133
5-6	可逆过程和不可逆过程对孤立体系終态的影响	136
5-7	論关于熵增加的某些綜合原則的問題	140
5-8	热力学第二定律的統計解釋	143
5-9	热力学第二定律的各种說法	151
5-10	絕對溫度标	152
5-11	計算理想气体熵的变化的一般公式	154
5-12	Ts 座标系統	155
5-13	基本过程在 Ts 座标系統上的圖解	156
5-14	当比热为变数时 Ts 圖的繪制	162
5-15	Ts 圖与 Tu 圖	165
第六章 热力学微分方程式		168
6-1	“热力学微分方程式”这一章的一般意义, 論証的基本方法	168
6-2	热力学第一定律的基本公式	171
6-3	內能的偏导数公式	174
6-4	热量, 熵和焓的微分方程式, 熵的偏导数	178
6-5	一般微分方程式对理想气体的应用	181
6-6	气体比热的某些一般公式	184
6-7	热力学的一般微分方程式的某些应用	187
第七章 气体的流动, 节流过程		190
7-1	气体的流动, 导言	190
7-2	气体中的音速	191
7-3	經过噴嘴和扩压管时气体流动的一些基本特性	192
7-4	气体的流速和流量的一些基本公式	197
7-5	临界速度, 临界压力比, 气体的最大流量	201

7-6	气体經過收縮噴嘴的流动	206
7-7	气体經過組合噴嘴(賴伐尔噴嘴)的流动	210
7-8	內阻力对流动的影响	213
7-9	受阻溫度	214
7-10	节流, 焦耳-湯姆遜效应	218
第八章	內燃机循环, 压气机	228
8-1	导言	228
8-2	活塞式內燃机的循环	232
8-3	活塞式內燃机各种循环的比較	242
8-4	压气机中空气的压縮过程	249
8-5	离心式压气机	262
8-6	气体透平裝置的循环	264
8-7	噴气式發動机的循环	275
参 考 文 献		282
附 录		283
I	气体的平均定压模尔比热表, 根据光譜分析的数据	283
II	气体的平均定压重量比热表, 根据光譜分析的数据	284

第一編

第一章

气体的参数，状态方程式

1-1 气体的参数

微觀的物体，由数目巨大的，个别运动着的質点組成，具有特別的規律，即統計性的規律^①。按此，表征統觀物体的特性的一系列的量，这些量乃是这些統計性的規律的結果，对于物体的个别的質点（分子或其他）是沒有任何意义的。

气体是統觀物体，由分子、原子等組成，这些分子，原子，处在不断的运动中，其运动随气体的状态而定，而这种运动又决定了气体的物理性質。气体的物理性質由压力、溫度以及其他的数量所表征。这样，气体每一个別的状态具有一些一定数值的物理量，这些量叫做参数。在研究热力学的过程时，采用压力、溫度和容积（或密度）作为气体的基本参数。

气体的状态由两个独立的参数决定，这两个参数可以是压力和溫度、溫度和容积、或是压力和容积。这时，随气体的状态而定的气体其他的全部参数，可以表示为两个所挑选的独立的参数的一些函数。

比容 比容是單位重量物質的容积。比容以 v 表示，測量的單位是公尺³/公斤。以 V 表示物体的容积， G 表示物体的重量，得到：

$$v = \frac{V}{G} \quad \text{或} \quad V = vG.$$

比容的倒数，即，單位容积的重量，叫做物体的比重，以 γ 表示。

① 微觀的物体是指分子、原子和电子等，由这些所組成的單一的物体謂之統觀物体。

由此

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad \text{即} \quad G = \gamma \cdot V.$$

根据这些公式得出:

$$\gamma = \frac{1}{v} \quad \text{即} \quad \gamma \cdot v = 1.$$

因此, 气体在任何状态时, 它的比容和比重的乘积等于 1。

气体的压力 气体的压力是气体的分子对容器的壁力的作用(撞击)的结果。根据物质的运动理论, 气体的压力, 数值上等于单位容积内全部气体分子的直线运动动能的三分之二。

气体的压力以 p 表示, 测量的单位是公斤/公尺² 或者是公斤/公分²。等于 1 公斤/公分² 的压力叫做工程大气压。由此

$$1 \text{ 工程大气压} = 1 \text{ 公斤/公分}^2 = 10\,000 \text{ 公斤/公尺}^2.$$

在物理学上, 等于一个大气压的压力是指大气的压力, 等于 10 333 公斤/公尺²。因此

$$1 \text{ 物理大气压} = 1.0333 \text{ 公斤/公分}^2 = 10\,333 \text{ 公斤/公尺}^2.$$

大于大气压的压力以压力计测量, 低于大气压的压力——以真空计。

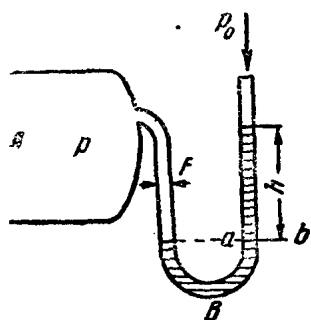


圖 1-1

在圖 1-1 上表示液体压力计 B 的简图, B 已经連結在容器 A 之上。假定容器 A 内气体的压力 p 大于大气的压力 p_0 。在气体的压力对大气的压力所超出的压力的作用下, 充满在压力计内的液体从右边部分的管子被挤向左边部分的管子。液体在右边的开口的管子上的高度, 以 h 表示。

考察在截面 ab 上系统的平衡, 得到:

$$pF = p_0F + \gamma F \cdot h,$$

这里 F ——管子横截面的面积, 公尺², 而 γ ——液体的比重, 公斤/公尺³。从这个等式得到

$$h = \frac{p - p_0}{\gamma} \quad (1-1)$$

取水銀在 0°C 时的比重等于 13 595 公斤/公尺³，求得，在 0°C 时当压力差等于 1 大气压时，水銀柱的高度 h 將等于：

$$h = \frac{p - p_0}{\gamma} = \frac{10\,000}{13\,595} = 0.736 \text{ 公尺} = 736 \text{ 公厘}.$$

高度 h 根据仪器的弯形管的兩条管子內水銀曲面的最高的点之間的距离来决定。

对于水，取 $\gamma = 1000$ 公斤/公尺³，得到 $h = 10$ 公尺。

绝对压力和超出压力 从公式 (1-1)，得出：

$$p = p_0 + \gamma h.$$

这个公式指明，气体的全部的，即绝对的压力 p ，等于大气的压力（气压計的）加上超出的压力（压力計的）。

这样，

$$p_{\text{绝对}} = p_{\text{气压計}} + p_{\text{压力計}}. \quad (1-2)$$

因此，气体的绝对压力是利用两种仪器来测定的：气压計，指示大气的压力；压力計，指示超出的压力。

由于气压計的指示随大气的情况而改变，绝对压力相同时，在气压表上相应的指示可以不同。在工程上，测量压力常采用彈簧式压力計。

在近似的测量时，取气压計的压力等于 1 公斤/公分²。这时公式 (1-2) 采取下列形式：

$$p_{\text{绝对}} = p_{\text{压力計}} + 1 = p_{\text{超出}} + 1.$$

在测量气体的压力时，采用下列标记：超出压力以 ати 表示，绝对压力——以 ата 表示。

例如，气体的绝对压力等于 10 公斤/公分² 时，为 10 个绝对大气压，而超出压力等于 10 公斤/公分² 时，为 10 个超出大气压。

当测量小于大气压的压力时，绝对压力根据下式测定：

$$p = p_0 - \gamma h, \text{ 或 } p_{\text{绝对}} = p_{\text{气压計}} - p_{\text{真空計}}.$$

这个公式指明，如果绝对压力小于大气的压力 ($p < p_0$)，那末绝

对压力等于气压計的压力減去真空計的压力。

將水銀柱的高度校正到 0°C 时的高度 0°C 时 736 公厘高的水銀柱相应于 1 个大气压的压力差。在其他温度时，1 个大气压的压力差相应于水銀柱的另一个高度。將任意温度时水銀柱的高度校正到 0°C 的高度，可以根据下列公式进行：

$$h_0 = h(1 - 0.000172t),$$

或者根据圖 1-2 上所列的綫圖进行。在这个綫圖上，用橫座标軸表示温度，而在縱座标軸上——以絕對大气压表示压力。綫圖上的斜綫給出水銀柱在各种压力和各种温度时的高度。

例題 1-1 如果在 20°C 时水銀柱的高度等于 755 公厘，試确定以公斤/公分² 表示的压力。

在綫圖上根据水銀柱高度 755 公厘和温度 20°C 定出点 A (圖 1-3)，点 A 就确定了压力，等于 1.023 絕對大气压。

例題 1-2 当压力为 1 絕對大气压和温度为 $50, 20$ 和 -10°C 时，試确定水銀柱的高度。

在相应于 1 絕對大气压的水平綫 (圖 1-4) 与相应于所給温度的一些垂直綫的交点，得到点 a, b, c 。綫圖上经过这些点的斜綫确定了相应于所給定的条件下的水銀柱的高度。

当 50°C 时高度 741.8 公厘。

当 20°C 时高度 738 公厘。

当 -10°C 时高度 734.3 公厘。

例題 1-3 試确定水銀柱在 0°C 时的高度，如果在 40°C 时它等于 753 公厘。

经过在綫圖上相应于 753 公厘的斜綫和相应于 40°C 的垂直綫的交点 a (圖 1-5)，引水平綫与相应于 0°C 的綫相交于 b 。

经过 b 点的斜綫确定了高度，等于 748 公厘。

温度 根据物質的运动理論，絕對温度与分子的平均直綫运动的动能成正比，而所有分子实际上是以各种不同的速度运动着。因此，温度乃是与平均速度有关的某种統計性的数量。

为了測量温度，可以根据向物体导入热量时所發生的任何一个現象以測量物体被加热的程度，例如，气体被加热时的膨脹現象。这里，应用水銀温度計和气体温度計測量温度是属于上述的。应用温度

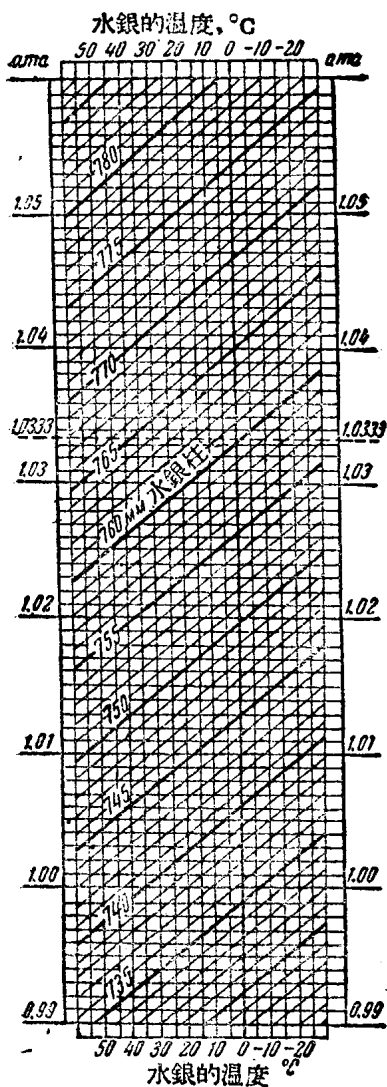


圖 1-2

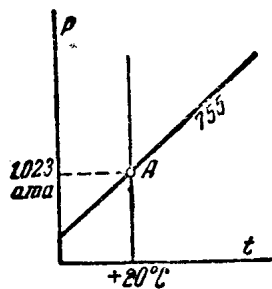


圖 1-3

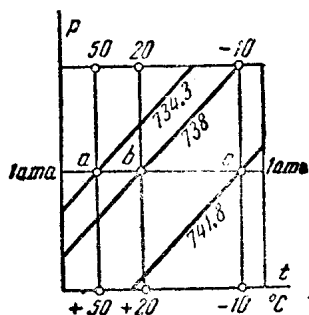


圖 1-4

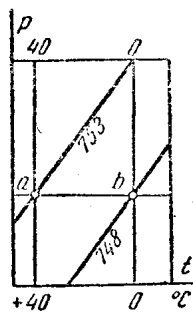


圖 1-5

計測量溫度時，物體容積的增量被當作與溫度的增量成比例，即

$$\frac{v-v_a}{v_\theta-v_a}=\frac{t-t_a}{t_\theta-t_a}.$$

這裡 t_a 和 t_θ 表示一些一定的點的溫度； v_a 和 v_θ ——相應於這些溫度時的容積； v ——物體在溫度 t 時的容積。溫度 t_a 和 t_θ 的數值可以任意選定。例如，在百分度標， $t_a=0$ 和 $t_\theta=100^\circ\text{C}$ 。

根據所導得的公式，得出

$$\frac{v}{t+a}=\frac{v_1}{t_1+a}.$$

這個關係式指明，如果假定，容積的增量與溫度的增高成比例，那末物體的容積將與溫度成比例，但這溫度不是從 t_a 這一點算起，而是從某一點算起，這一點是在 t_a 以下 a 度。

以 T' 表示這一種溫度 ($T'=t+a$)，得到

$$\frac{v}{T'}=\frac{v_1}{T'_1}.$$

在水銀百分度溫度計，點 0 和點 100 相應於融解中的冰和沸騰中的水的热力狀態。將相應於這兩個點的水銀的容積的差，等分為一百部分，每一部分叫做一度。

上述公式不但對於水銀溫度計是正確的，而且如蓋呂薩克定律所指明，對於氣體溫度計也是正確的。根據蓋呂薩克定律

$$\frac{v}{T'}=\frac{v_1}{T'_1},$$

這裡 $T'=273+t$ 。

這時，數值 $1/273$ 為氣體在定壓下的膨脹係數。

因此，理想氣體溫度計的一定的點，即溫度讀數的起點（這溫度與氣體的容積成比例）位置在百分度溫度標的零度以下 273°C （更正確些， 273.16° ）。這種溫度標叫做氣體絕對溫度標。

氫溫度標與理想氣體溫度標的偏差不大。通常的百分制國際溫度標是根據相應於某些物體的平衡溫度的一些一定的點建立起來的，那些中間溫度，是由內分的儀器，在這些一定的點之間確定其刻度。

绝对温度标 在热力学中，绝对温度标有广泛的应用。绝对温度标的零度位置在冰的融点以下 273° 。根据这个温度标测定的温度叫做绝对温度，以 T 表示，这时，

$$T = t + 273.$$

很明显地，

$$0^{\circ}\text{K} = -273^{\circ}\text{C};$$

$$0^{\circ}\text{C} = 273^{\circ}\text{K} (\text{更正确些, } 273.16^{\circ}\text{K}).$$

绝对温度标的建立，它的特性和意义，将在讲述热力学第二定律以后，在 § 5-10 中被规定，热力学第二定律给出了关于建立绝对温度标的全部原理。

热力学第二定律导出关于存在着统一的温度（绝对温度）的结论，以及因此，导出关于存在着温度读数的自然的始点（绝对零度）的结论。这样，引用绝对温度标就消除了规定温度的值和规定温度读数的始点的条件，这些条件在根据应用这种或那种物质的性质所建立的温度标以测量温度时，为不可避免的。

关于绝对零度的最初的概念是由 M. B. 罗蒙诺索夫 (Ломоносов) 在 1746 年在论文“论热和冷的原因”中所提出，罗蒙诺索夫写道：“因此，根据必然性，应当存在着最高程度的和最后程度的冷。……”。

在科学中引用绝对温度标大大地简化了热力学的公式和气体定律的表述，具有深刻的物理意义。绝对零度是最低的温度（这由罗蒙诺索夫所指出），因此，确是绝对的一定的点，从这一点划定这一温度标上温度的读数。

最新的技术可以达到极低的、只在绝对零度百分之几度以上的温度。

现代的科学资料指明，绝对零度这一温度不可能达到。注意，关于这个也写在以上所引证的 M. B. 罗蒙诺索夫的论文上：“这样，虽然最高度的冷是可能的，但，根据已有资料，这在地球上是不存在的。”并接着写道：“因此，高度的冷在我们这一个行星上是不可能存在的。”