

工程热力学基础

E. B. 巴拉洪策夫 著

凌 鎔 譯 楊思文 校



國防工業出版社

72.54

工程热力学基础

E. B. 巴拉洪策夫 著
凌 錯 譯
楊 思 文 校

24575/02



国防工业出版社

本書是中等技術學校的工程熱力學教學參考書，亦可作為中級航空技術人員的參考書。

書中敘述了熱力學的基本定律，研討了理想氣體和實際氣體的狀態方程式，並着重地討論了熱力過程、氣流熱力學和內燃機循環的研究方法。

本書說理淺顯易懂，能為具有普通中學的數學和物理修養的讀者所接受。

Е. В. Балахонцев
ОСНОВЫ
ТЕХНИЧЕСКОЙ
ТЕРМОДИНАМИКИ
Государственное
Издательство Оборонной Промышленности
Москва 1955

本書系根據蘇聯國防工業出版社
一九五五年俄文版譯出

工程熱力學基礎

〔蘇〕 巴拉洪策夫 著
凌 鎔 譯
楊 思 文 校

*

國防·工業出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可証出字第 074 號
北京新中印刷廠印刷 新華書店發行

*

850×1168 1/32·9⁵/8 印張·254,000 字
一九五七年五月第一版
一九五七年五月北京第一次印刷
印數：1—3,000 冊 定價：(10) 1.70 元

序 言

工程热力学是关于能量方面的学说，它和自然科学的基本原则有密切联系，并为一切动力工程及热机的理论基础。

我国的学者们已经著作了许多关于工程热力学方面的教科书和教学参考书。其中著名的有 A. A. 勃朗德特 (1917)、H. A. 倍柯夫 (1928)、B. B. 苏什柯夫 (1946)、B. C. 茹柯夫斯基 (1952) 和 A. C. 雅斯特尔然勃斯基 (1953 年第 7 版修订版) 的著作。

但所有这些工程热力学教科书都是供高等学校使用的，对于没有受过高等教育的技术人员和航空人员却不能完全适用。

本书是不用高等数学的工程热力学教材的初次试作。同时还保持着在叙述现象的物理本质方面以及在以中等数学为基础的数学证明方面所必需的严谨性。

本教材是许多经验的综合，这些经验是由作者以及茹柯夫斯基空军军事工程学院 (BBMA) 工程热力学教研室的全体人员在讲授不用高等数学的工程热力学课程中所积累起来的。

必须指出，因为本书所考虑到的读者范围甚广 (从技术员以至教员)，故对掌握本课程不起决定性作用的部分则以小号字来区别。本书引用了大量的例题和习题，使得独立研究这门课程时无论在热力学基本原理方面或是附录的实际应用方面都能够更加深入。

作者对技术校订者技术科学博士 B. B. 恰依金由于校阅本书而作的巨大努力，以及 A. C. 雅斯特尔然勃斯基教授和教研室的全体人员在工作上的帮助和在著作过程中对原稿提出的宝贵意见，表示深深的感谢。

作者还对物理数学科学博士 K. M. 巴卡柯和 H. A. 契烈姆内赫对本书所提出的宝贵意见表示谢忱。

作者怀着感激的心情接受读者们对本书的一切批评，来信请寄：莫斯科彼得罗夫街 24 号国防工业出版社。

目 录

序 言	
引 言	1
第一章 关于气体的一般知識	7
§ 1. 物質的分子結構	7
§ 2. 气体的基本参数	9
§ 3. 状态方程式	20
§ 4. 混合气体	34
第二章 气体的比热	44
§ 1. 比热的定义	44
§ 2. 1 公斤、1 公尺 ³ 和 1 模尔气体的比热	45
§ 3. 比热与过程性質的关系	46
§ 4. 比热 c_v 和 c_p 之間的关系。系数 $k = \frac{c_p}{c_v}$	47
§ 5. 比热与溫度的关系	48
§ 6. 系数 $k = \frac{c_p}{c_v}$ 与溫度的关系	51
§ 7. 根据从 0 到 $t^\circ\text{C}$ 的平均比热計算热量	51
第三章 热力学第一定律	54
§ 1. 引 言	54
§ 2. 热力学第一定律。当量原理	58
§ 3. 內 能	62
§ 4. 外 功	67
§ 5. 热 量	69
§ 6. 热力学第一定律对于气流的应用。气流的能量方 程式	72
§ 7. 热力学第一定律的某些应用:	
a) 热力发动机的經濟效率	75
b) 气体的混合	76

第四章 主要热力过程	79
§ 1. 任务及一般研究方法	79
§ 2. 定容过程	81
§ 3. 定压过程	82
§ 4. 等温过程	86
§ 5. 绝热过程	89
§ 6. 多变过程	96
§ 7. 可逆过程和不可逆过程	118
第五章 气体的流动	124
§ 1. 有用功	125
§ 2. 喷管和扩压管	128
§ 3. 绝热流动过程	128
§ 4. 通道断面积沿气体流动方向的变化	132
§ 5. 气体在流动时的每秒流量	138
§ 6. 流出渐缩喷管时的三种情况	140
§ 7. 通道横断面的决定	142
§ 8. 组合式喷管扩散部分的计算	146
§ 9. 气体流动的实际过程	147
第六章 热力学第二定律	150
§ 1. 正循环和逆循环。正循环的热效率	152
§ 2. 卡诺循环	155
§ 3. 逆卡诺循环	159
§ 4. 不可逆卡诺循环	160
§ 5. 可逆循环和不可逆循环的性质	161
§ 6. 熵	165
§ 7. 熵的变化和体系作功能力之间的关系	168
§ 8. $S-T$ 坐标系	171
§ 9. 熵在主要的可逆过程中的变化	175
§ 10. $S-T$ 图	181
§ 11. 用于计算焓的变化(i_2-i_1)以及内能变化(u_2-u_1) 的 $T-i$ 图和 $T-u$ 图	185
§ 12. 燃烧产物的 $S-T$ 图	186

第七章 内燃机的循环。压气机	195
§ 1. 引 言	195
§ 2. 热力学研究循环的一般方法	196
§ 3. 在 $v = \text{常数}$ 时加热的活塞式发动机的循环	197
§ 4. 在 $p = \text{常数}$ 时加热的活塞式发动机的循环	208
§ 5. 混合加热(在 $v = \text{常数}$ 和 $p = \text{常数}$ 时加热)的活塞式 发动机的循环	214
§ 6. 活塞式发动机循环的比較	219
§ 7. 循环的 η_t 在 S — T 图上的比較	223
§ 8. 空气喷气式发动机的循环	225
a) 定压燃烧的发动机	227
b) 定容燃烧的发动机	236
§ 9. 活塞式发动机和喷气式发动机的循环的比較	240
§ 10. 根据 S — T 图計算活塞式发动机和喷气式发动机 的循环	242
§ 11. 压气机	245
a) 单級活塞式压气机	246
b) 多級压气机	252
B) 离心式增压机	255
习题解答	261
附 录	281
参考書	302

引 言

在动力工程發展的影响下，热力学在历史上早就成了一門科学。

作为运动物質基本特点的能量学說是热力学的基础。

还在上古时代，人类就已經知道机械功可以变为热能了。借摩擦而取火的可能性的发现，对人类經濟和文化的發展起了非常重大的作用，并决定了整个的历史發展时期。

人类从上古时期开始就想确定把热变成机械功的可能性。1766年俄罗斯天才发明家И.И. 波尔祖諾夫所創造的第一台蒸汽机，是許多研究家們寻求和探討上述願望的成功阶段。

蒸汽机的发明使生产发生了变革，并引起了所有工业部門、采矿业和运输业的迅速發展。蒸汽机以及后来的內燃机的發展和迅速采用，大大地增加了能的利用的可能性，同时，对热力学發展的要求也更加強烈了。最初，热力学是以它的基本原理和定律为基础，作为物理学的附屬部分而發展起来的。热力学發展的主要基础是M.B. 罗蒙諾索夫所創立的能量与物質守恆定律以及热的力学原理。

从十九世紀后半叶开始，热力学才形成独立的科学。虽然，热力学是相当年青的，但目前它在其他科学中却占据着荣誉的地位，同时，它还正在繼續發展着，并扩大着所研究的現象的范围。

热力学的理論是以热力学第一定律、热力学第二定律和状态方程式为基础的。

热力学第一定律肯定了各种形式的能量相互轉換的可能性，并确定了这种相互轉換是在什么样的数量关系下进行的。因此，热力学第一定律就是应用到运动物質的各种能量相互轉換过程中去的能量守恆定律。

能量守恒定律是反映物质不断运动并不断变化的特征的自然界客观规律。能量不能被创造，也不能被消灭，各种形式的能都可以相互转换，然而是在严格的当量关系下进行的，也就是一定数量的某种能，始终完全相当于一定数量的另一种能。

在封闭的、和周围环境隔离的物质体系中，各种形式的能都可以彼此相互转换，但体系的总能量则仍旧固定不变。

能量守恒及转换定律最初是由 M. B. 罗蒙诺索夫于 1748 年归纳成为最精确的定义形式的，并且，它首先由俄国科学家 Г. Г. 盖斯和 Д. X. 楞次在进行热化学过程实验和电热过程实验时所证实的。

但实际上，一直到 P. 迈耶（1842 年）、焦耳（1843 年）和亥姆豪茨（1847 年）的工作完成了研究的重大阶段以后，能量守恒定律才得到了公认。因此，M. B. 罗蒙诺索夫所确定的能量守恒定律是经过了一百年以后才得到公认的。

热力学第一定律是能量守恒定律应用在热现象方面的个别情形，它确定了在严格的当量关系下，热变为功和功变为热的可能性。

经过许多次实验研究的结果，已经找到了这种当量关系。研究指出，在任何循环过程中，功量 L 对工质所获得的热量 Q 的比值永远为一常数，即

$$\frac{L}{Q} = E,$$

由此 $L = EQ$,

式中的 $E = 426.45$ 公斤·公尺/大卡被称为单位热的功当量。

在近似计算时，取 $E = 427$ 公斤·公尺/大卡。此当量说明，当消耗 1 大卡的热量时就获得 427 公斤公尺的功。

很明显，其相反的比值也是常数，它等于

$$\frac{Q}{L} = \frac{1}{E} = A,$$

由此 $Q = AL$,

式中的 $A = \frac{1}{E} = \frac{1}{427}$ 大卡/公斤·公尺被称为单位功的热当量。此当量表示，当消耗 1 公斤公尺的功时就获得 1/427 大卡的热量。

当其他形式的能量在相互转换时，也能求出类似的当量关系。

因此，热力学第一定律不仅肯定了各种能量彼此转换的可能性，而且也确立了这些相互转换的当量关系。

但是，热力学第一定律并没有说明在任何过程进行时所同时发生的现象和条件的多样性。

同时，热力学第一定律也没有回答许多具有重大的理论和实际意义的重要问题。

例如，热力学第一定律就没有确定，某种过程是不是可能，这种过程将多半在什么样的趋势下进行，以及体系在什么条件下能作出最大的功。

大家都知道，热量自己会从热的物体转移到冷的物体上去，而反向的过程，即热量自动地由冷的物体转移到热的物体上去则是不可能的。

大家也知道，功总是能够完全地转变为热的，但热在机器中转变为功却只有在一定充分的条件下才有可能，而且这种转变也是不完全的。

所有这些现象与过程的本質上的特点都是由热力学第二定律所确定的。

热力学第二定律确定了某种过程的发生是不是可能，这种过程将在什么样的趋势下进行，体系在什么条件下达到动态平衡，以及在体系的何种条件下可以获得的最大可能的功。

M. B. 罗蒙诺索夫在 1747 年就首先指出了自发过程可能发生的趋向^①。

热力学第二定律对热现象切合实际地确定了热能转变为功的重要特征。

① M. B. 罗蒙诺索夫“论热和冷的原因”。

由热源傳来的热量并不能全部在机器中轉变为功，其中的一部分必然地要放給較冷的物体(冷却器)。因此，为了变热为功，除热源以外，还必須要有吸收那部分不能轉变为功的热量的冷却器(周圍环境)。

这种表明热力学第二定律实質的原理是沙紀·卡諾在1824年所发表的^①。

热力学第二定律的意义不仅在于它显示了热变为功的特征，而且也在于这个定律建立了利用热能的最有效和最合理的方法，以达到最大的理論效率。

在十九世紀中叶，克劳修斯、馬克斯威尔和湯姆遜發展了沙紀·卡諾的观点，并指出，显示許多現象和过程实質的热力学第二定律是远远地超过了物理学和热力学的范围，而且在别的科学中也有着广泛的应用。第二定律的进一步發展是有賴于波尔茨曼、斯莫路霍夫斯基、H.H.希列尔、T.A.阿法那斯也夫——爱倫費斯特等人的工作。

对于發展热力学理論和进行热力学計算來說，除第一定律和第二定律以外，**状态方程式**也有着重大的意义。在热力过程中，总是有某种不論什么数量和什么状态的物質——工質在参与着。决定物体状态的物理性質叫做**状态参数**。决定气体状态的基本参数为比容 v 、压力 p 和温度 T 。状态方程式建立了这三种最简单参数間的关系。此方程式的一般形式为

$$F(p, v, T) = 0。$$

对理想气体而言，压力、比容和絕對温度之間的函数关系由方程式

$$pv = RT，$$

所表示，式中 R 是常数，对于各种不同的气体，这个常数是不相同的。这个方程式是在气体分子运动理論的基础上，略去分子間的

① 沙紀·卡諾“論热的原动力及能产生此力的机械”。

相互吸引力和不計分子本身所占的容积（与气体容积相比）时从理論上导出的。自然界是沒有这种气体的。气体之中总是存在着相互作用的吸引力，而分子也具有一定的容积。

因此，严格地符合于状态方程式 $pv = RT$ 的气体叫做理想气体，而方程式本身就叫做理想气体状态方程式。

实际气体的状态方程式在某种程度上总是和理想气体状态方程式有偏差的。但許多次实验証明，在压力和温度的相当大的范围内，这些偏差是不大的，因而也能应用方程式

$$pv = RT。$$

实际气体与理想气体的差别只有在高压力和低温度的情况下才变得显著。在此情况下，相互間的吸引力和分子本身的容积的影响已不能再略去不計了。

实际气体特性的确定，以及考虑到这些特性的状态方程式的建立，曾費去了大量的理論上和实验上的研究。十足地可以說，由各个作者所提議的状态方程式总有 100 个以上。Л. И. 門杰列也夫在实际气体物理性質范围内的，特别是关于临界状态学說的研究，是实际气体理論上的，因而也是有关状态方程式的学說上的巨大貢獻。1873 年，凡得瓦尔斯根据实际气体的已知特性列出了状态方程式

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT。$$

式中 $\frac{a}{v^2}$ 是压力的修正值， b 是分子容积的修正值。

对压力的修正系考虑到实际气体中分子的相互吸引力。

对容积的修正系考虑到分子运动空間的减小。

这方程式虽然把本質上的情况叙述得很好，但它却是粗略近似的，因为，数量上的結果和实验結果有着很大的差別。

М. И. 符卡洛維奇和 И. И. 諾維柯夫（1939 年）考虑了分子結合現象而导出的实际气体状态方程式應該列入于具有較高精确定度的方程式之內。

上面的叙述概括地说明了热力学最主要的發展阶段，热力学基本定律的物理实质和意义。

由 M. B. 罗蒙諾索夫所創立的热的力学原理和能量守恒及轉換定律，在十九世紀后半叶在最著名的俄国学者 M. Φ. 奥卡托夫、И. А. 維希聶格拉德斯基、А. М. 布特列罗夫、Л. И. 門杰列也夫、А. Г. 斯多列托夫、Φ. Φ. 彼得魯歇夫斯基、Л. К. 波波夫、Н. Н. 比罗高夫等人的著作中获得了發展。

在这些忠于俄国科学唯物主义傳統的学者們的著作当中，給予了唯心主义和形而上学的观点以徹底的打击，并指出了进一步發展物理学、自然科学和其他科学的正确道路。

近十年来，由于动力工程的巨大增长和掌握了新型的热机，以及由于噴气技术的發展，对热力学提出了新的課題，因而，热力学便获得了非常广泛的發展。

偉大的十月社会主义革命胜利以后，由于苏維埃动力工程空前未有的蓬勃發展，热力学便得到了特殊的發展。苏維埃制度喚起了人民的巨大无比的創造性活动，为科学的发展开辟了广闊无边的道路，并使科学为人民服务。苏联动力經濟的极高速度的增长，决定了动力科学特别是热力学在發展中的巨大成就。因此，就形成了一个領導着許多苏联科学研究机构的理論研究和实验研究的龐大陣綫：苏联科学院动力研究所，以捷尔任斯基命名的全苏热工研究所，以波尔宗諾夫命名的中央鍋爐汽机研究所，以莫洛托夫命名的莫斯科动力学院等。

具有历史意义的苏联共产党第十九次代表大会決議規定要更加高速度地發展一切国民經濟中的电气化，大力地發展电力工业，建造新型的具有大容量的热机和在技术上利用新的能量源泉。这一切都需要大大地扩展动力科学的应用范围以及在热力学領域內的研究工作。

第一章 关于气体的一般知識

§ 1. 物質的分子結構

自然界中的一切物体都是由一个个微小的粒子——分子所組成的。这些粒子都相互隔着，并处在不断的运动状态中。

分子是非常微小的，它們的尺寸約为 1×10^{-8} 公厘左右。已經确知，在 0° 和大气压力下，每立方公分的空气中就含有 2.7×10^{19} 个分子。

在化学上，分子是复杂物質的最小粒子，虽然尺寸极小，但还不是物質不可分割的极限值。分子可以分裂成更小的粒子——原子，它是化学单質的最小顆粒。原子本身还可分成更小的微粒——質子，中子，电子和正电子。不过这些微粒也不能算是最小的东西，因为它們的进一步分裂仍是有可能的。

分子之間作用着相互吸引力，并且这些力的作用是随着物态而不同的。

在固体中，分子之間的距离很小，相互之間有很大的吸引力作用着。

在这些力的作用下，分子在某些“中間”位置的两边作不大的振动。

液体中的相互吸引力較之固体中的要小得很多。所以，液体具有它所在的那种容器的形状。液体中的分子按照和隣近分子相互作用的力所限制的复杂軌迹运动着。

在气体中，分子間的相互吸引力是极小的。因此，气体的分子就向一切可能的方向按直綫运动着，遍及到气体所占的全部容积。当气体分子碰撞时，运动速度的大小和方向就将改变。气体分子間的相互吸引力只有在压力很高和温度很低的情况下，也就

是只有当分子间的距离大为减少时才变得显著。

在稀薄气体中，内能主要是由分子的直线动能、旋转动能和原子内部的能量所合成的，在这种气体中，只有当分子碰撞时，分子间的相互作用才显得出来。

分子的动能和原子内部的能量差不多与气体的密度无关，而只是温度的函数。正因为分子的运动是热的本质，热是物质运动的特殊形态，所以，分子和原子的不断的、不规则的运动就是热运动。在热交换过程中，热运动从一个物体转移到另一个物体上去。这时，温度就是热运动强度的度量。

确定热在本质上的特征，把它看成是具有原子结构的物质的一种运动形态的学说，叫做**热的运动理论**。

运动理论的基础是由伟大的俄国学者 M. B. 罗蒙诺索夫在“论热和冷的原因”和“空气弹性力原理的实验”（1744）^①这两篇著作中奠定的。在这些著作中，第一次确定了热的本质就是分子的不规则运动：

“热是物质内部的运动”。

“这种运动愈剧烈，它的作用就愈大；由此，当热运动加强时，热就应该增加，而当热运动较为缓慢时热就应该减少”。

“热的物体在接触到冷的物体时应该变冷，因为后者使粒子的热运动变慢了；反之，冷的物体则在接触时应由于运动的加速而变热”。

虽然，这已经过去 200 年了，但罗蒙诺索夫的观点还是被公认为现代自然科学的基础。

M. B. 罗蒙诺索夫对于热的本质的唯物主义观点使得当时曾占优势的唯心主义的热素“理论”遭到了致命的打击。按照这种“理论”，认为物体的变热和变冷是由于一种特殊的、没有重量的、既不能被创造也不能被消灭的热的流体从一个物体转移到另一个物体中的缘故。由于大多数和 M. B. 罗蒙诺索夫同时代的人

^① M. B. 罗蒙诺索夫全集，第二卷，苏联科学院出版，1951。

們堅持着這種錯誤的熱素“理論”，所以雖然當時彼得堡科學院院士Л. 歐拉曾贊助過羅蒙諾索夫的观点，但他的观点仍然未被採納。

羅蒙諾索夫的观点只是經過了100年以後，在克勞修斯、馬克斯威爾、波爾茨曼、祁伯斯、斯莫路霍夫斯基、愛因斯坦等的努力下，以及在著名的俄國學者Н.Н. 比羅高夫、Л.И. 門杰列也夫、Л.Ю. 巴諾夫和А.М. 布特列羅夫等人的努力下才獲得了廣泛的承認和進一步的發展。

恩格斯在“自然辯證法”一書中曾特別深刻地說明了熱（物質運動的特殊形態）的本質的最初情況。

恩格斯在從辯證唯物主義立場上全面地批判機械論時曾經明白地指出，熱和分子的機械運動間的关系的發現，創造了整個的科學時代，但這種关系還遠遠沒有全部地解決熱的本質問題。

雖然粒子的運動服從於機械運動的規律，但是由於粒子的數目非常多，就引起了從量到質的辯證的轉變，那時，就要出現一種質量嶄新的運動形態。大量粒子的存在，正決定了熱的運動形態與機械運動形態之間有特殊的區別。

§ 2. 气体的基本参数

气体的物理性質是由密度、溫度、壓力、濕度、粘度、導熱系數以及其他的量來說明的。在工程熱力學上，把容積、壓力和溫度作為研究氣體時的基本參數。每一種確定的氣體狀態都有相當的完全確定的物理參數值。

比容 比容 v 是單位重量的容積，也就是每公斤氣體所占容積的立方公尺數。

如果用 V 來表示重量為 G 公斤的氣體的容積（單位為立方公尺），則得

$$v = \frac{V}{G} \text{公尺}^3/\text{公斤}。 \quad (1.1)$$

比容的倒數，即單位容積的重量，稱為比重，並以 γ 來表

示。則

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{1}{v} \text{公斤/公尺}^3。 \quad (1.2)$$

由这些公式得到

$$\gamma \cdot v = 1。 \quad (1.3)$$

因而，在所有的气体状态下，气体的比容与比重的乘积都等于1。有时比重叫做重度（Весовая плотность）。

在工程技术的计算当中，常常用到密度 ρ 。

密度 ρ 是单位容积的质量。根据牛顿定律，质量 m 为重量 G 与重力加速度 g 之比，即

$$m = \frac{G}{g}。$$

因此，

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\frac{G}{g}}{V} = \frac{\gamma}{g}。 \quad (1.4)$$

ρ 的因次按照下式来决定：

$$[\rho] = \left[\frac{\gamma}{g} \right] = \left[\frac{\text{公斤/公尺}^3}{\text{公尺/秒}^2} \right] [\text{公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{公尺}^4]。$$

例题1．在一定的条件下，1公斤氧佔有容积 $v = 0.7 \text{公尺}^3/\text{公斤}$ ；求其比重。

解：利用公式 (1.3)，求出氧的比重为

$$\gamma = \frac{1}{v} = \frac{1}{0.7} = 1.43 \text{公斤/公尺}^3。$$

例题2．設空气的比重 $\gamma = 1.29 \text{公斤/公尺}^3$ ，求其比容。

解：根据公式 (1.3) 則得

$$v = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{1.29} = 0.775 \text{公尺}^3/\text{公斤}。$$

例题3．2公斤氮在容积为 1.6公尺^3 的容器中。求氮的比容和比重。

解：按定义，比重 $\gamma = \frac{G}{V}$ ，而比容 $v = \frac{V}{G}$ ；把 $G = 2 \text{公斤}$ 和 $V =$

1.6公尺^3 代入这些公式，就可求出 $\gamma = \frac{2}{1.6} = 1.25 \text{公斤/公尺}^3$ 和 $v = \frac{1.6}{2} = 0.8 \text{公尺}^3/\text{公斤}$ 。