

汽力设备原理基础

H. H. 庫洛奇金 著

魏文甲 譯

冶金工业出版社

汽力設備原理基礎

H. H. 庫洛奇金 著

魏文甲 譯 顧昌悌 校

(技工學校參考書)

冶金工業出版社

本书介绍了气体和水蒸汽的热力学基础，
讨论了水蒸汽的射流和节流、汽力设备的循环
和传热基础。

本书是冶金工业企业的技工学校中“汽力设备”专业的参考书。因此在选择书内的材料时会尽可能地使其满足实际要求，并有系统地插入了数字实例，用以说明理论知识在实际中的应用。

本书並可供紅专大学及中等技术学校的汽、力设备专业学生参考。

目 录

序言	6
緒論	7
第一章 工程热力学基础	14
1. 热能的实质	14
2. 工质。理想气体和实际气体	15
3. 气体状态的基本热力学参数	16
4. 理想气体的基本定律	23
5. 气体的特性方程式或状态方程式	27
6. 阿佛加德罗定律。莫尔。通用气体常数	30
7. 道尔顿定律	34
8. 混合气体	35
9. 比热	42
10. 混合气体的比热	55
11. 热力学第一定律	57
12. 热力学过程及其图解法	61
13. 气体外功的计算	62
14. 定容下 ($v = \text{常数}$) 气体状态的变化过程	66
15. 定压下 ($p = \text{常数}$) 气体状态的变化过程	69
16. 比热 c_p 和 c_v 之间的关系	73
17. 焓	76
18. 等温下 ($T = \text{常数}$) 气体状态的变化过程	78
19. 气体状态的绝热变化过程	81
20. 气体状态的多变过程	88
21. 闭合过程或循环	94
22. 可逆过程与不可逆过程	95
23. 卡诺循环及其热工效率的分析	99
24. 热力学第二定律	104

25. 熵.....	106
26. $S-T$ 图.....	111
27. 在 $S-T$ 图上的过程	114
第二章 水蒸汽	120
28. 定压下的汽化过程.....	120
29. 在汽化过程中水的液体热, 焓和熵.....	126
30. 干饱和蒸汽.....	128
31. 湿饱和蒸汽.....	132
32. 过热蒸汽.....	134
33. 水蒸汽的 $S-T$ 图	137
34. 水蒸汽的 $S-i$ 图.....	139
第三章 水蒸汽的射流过程和节流过程	144
35. 蒸汽的射流过程及其在汽轮机内的应用.....	144
36. 蒸汽的射流速度和每秒流量.....	145
37. 临界压力和临界速度.....	150
38. 由渐扩喷嘴的射流.....	156
39. 蒸汽的节流.....	159
第四章 汽力设备的循环	165
40. 汽力设备的概念.....	165
41. 蒸汽的卡诺循环及其在实用上的缺点.....	166
42. 汽力设备的基本循环.....	170
43. 耗汽率及耗热率.....	178
44. 提高汽力循环效率的方法.....	179
45. 高参数蒸汽.....	184
46. 蒸汽的中間过热.....	185
47. 回热循环.....	188
48. 联合生产电能和热能的汽力设备.....	194
第五章 传热原理基础	202
49. 一般概念.....	202
50. 在稳定状态下固体的导热.....	203

51. 对流(接触)放热.....	211
52. 通过平壁的传热.....	214
53. 通过圆筒壁的传热.....	220
54. 放热系数的求法.....	224
55. 液体沸腾和蒸汽凝结时的放热.....	234
56. 参加热交换的流体互相运动的基本情形.....	238
57. 平均温度差和热交换装置加热面积的計算.....	242
58. 輻射热交换的基本定律.....	245
59. 两物体之間的輻射热交换.....	252
60. 遮屏.....	258
61. 气体的热輻射和它的吸热性能.....	261
附录.....	264

序 言

本書系冶金工業企業的技工學校中〔汽力設備〕專業的參考書。

著者在敘述本書內容時盡量採取最簡單和通俗的形式，同時保持了科學上的嚴密性，並使其不脫離現代的科學知識水平。在書內避免採用高等數學來推導公式。讀者在閱讀本書之前要具有初等數學知識和物理、化學基礎。

本書所有各節都附有數字實例，用以闡明該節所敘述的理論。同時著者在編制這些例題時還盡量使其能反映在汽力設備實際運行當中最常遇到的問題。

緒 論

在现代的技术水平上，动力工程在90%以上还是利用各种工业燃料作为基础，而动力工程在創造共产主义社会物质技术基础方面起着非常重要的作用。人类最伟大的天才家 В.И. 列宁和 И.В. 斯大林还在伟大的十月社会主义革命初期就已清楚地看到电气化作为发展国家生产力和創造新社会制度的物质基础的手段的意义。

В.И. 列宁在1920年第八次全俄罗斯苏維埃代表大会上所提出的具有历史意义的口号中，极其明显而全面地表达了电气化的观念，И.В. 斯大林在自己的天才著作「苏联社会主义經濟問題」中又一次確認了这一观念。

「共产主义等于苏維埃政权加上全国电气化」^①。

革命前俄国的动力事业是非常落后的。那时俄国的发电量占世界最末位之一，甚至比不上像瑞士和瑞典那样的小国。在1913年全国发电厂的容量仅为110万千瓦左右，而发电量则为20亿度左右。全国仅有10个公用发电厂，在烏拉尔和頓巴斯則一座发电厂也沒有。

在伟大的十月社会主义革命以后不久，在1918年四月В.И. 列宁在提交給科学院的「科学技术工作計劃草案」中曾指示說，要特別注意「……工业和交通运输业的电气化和电力在农业上的应用」^②。

在1920年2月根据В.И. 列宁的倡議成立了俄罗斯国家电气化計劃委员会。在列宁的直接指导下，該委员会制訂了国家电气化的計劃，规定了在最近10—15年內在苏联建設30座新的地区发电厂，其中有20座是火力发电厂，发电設備容量要增加到175万

① 列宁全集第四版31卷第484頁。

斯大林著「苏联社会主义經濟問題」国家政治出版社，1952年。

② 列宁全集第四版第27卷第288頁。

距，而发电量达到88亿度，最后达到100亿度。与1913年相比，发电量应增加到4.4倍，若与1920年实行发电量相比则是它的17倍。由于第一次世界大战和随后而来的国内战争的破坏，俄国的工业力量以及动力工程降低到非常低的水平，1920年全年发电量总共仅为5亿度左右。

根据该计划，对地方动力资源特别是地方燃料和泥煤、褐煤以及矿产劣煤等要充分加以利用。在这以前国家的发电厂基本上就是使用从远处运来的优质煤或石油。

俄罗斯国家电气化计划委员会的第一批产物，如燃用莫斯科近郊煤的卡希拉地区发电厂、燃用泥煤的沙图拉地区发电厂等等，就是在B.И.列宁的不断监督下建成的。B.И.列宁事业的天才继承者И.В.斯大林又直接指导了该计划的进一步的完成。在第一个斯大林五年计划期间，燃起了世界上最大的德森泊尔水电站的光亮，契利亚宾斯克、祖耶夫斯克、库兹涅茨克、别列兹尼基以及许多其他火力发电厂投入了运行。俄罗斯国家电气化计划委员会的计划在第一个五年计划的末期，也就是在原订完成计划期（15年）的前几年就已超额完成。1933年1月7日斯大林同志在联共（布）中央委员会全体会议上总结第一个五年计划时说道：

「在电能生产方面我们曾占最末位，而现在我们却已升到首位之一了」^①。

在1934年，苏联发电厂的容量已将近达到沙皇俄国发电厂容量的6倍，而发电量则增长到1913年的10倍以上。到全俄罗斯国家电气化计划委员会所订计划的第15年（1935年），该计划已被超额地完成了将近原计划的3倍。此时苏联在发电量上已稳固地占据世界首位之一，甚至超过了英国、法国、日本及其他大资本主义国家。

在1940年苏联在发电量上已占全世界第二位，占全欧洲第一位。与1913年比，苏联发电厂的容量已增加到11倍，而发电量则

① И.В.斯大林：列宁主义问题第408页，国家政治出版社，1952年。

增加到25倍。苏联在斯大林五年计划的年代里所进行的发电厂的建設，其规模的宏大和速度的飞快是世界上任何国家所未有过的。国民經济的电气化乃是实行国家經济社会主义改造、保証国家在技术經济上的独立性以及巩固国家实力的有力因素。

在伟大的卫国战争的年代里，苏联的动力工程和其他所有工业部門一样，遭到了严重的困难。但就是在这期间内它的发展也沒有停止。在战争的年代里，在烏拉尔和东部地区都建成了新的大容量的发电厂。从苏联境内赶出法西斯軍队伊始，恢复建設者的队伍就跟着来到苏联軍队到达的地方。苏联人民在极短的期间内就恢复了被侵略者所破坏了的工业企业，包括发电厂在内。

到伟大的十月社会主义革命30周年时，被破坏了的发电厂中的基本部分均已修复并投入运行。此时电站部系統的发电量已达到战前水平。

在战后的年代里，动力工程的发展规模更为宏大。根据恢复和发展苏联国民經济的1946—1950五年计划的规定，到1950年发电厂的容量要达到2240万千瓦，同一时期的发电量要达到820亿度。我們知道，这个计划已超额地完成了。

苏联动力工程的发展质量指标也是非常高的。在全国范围内出现了許多大容量的电力系统，以代替旧俄时代分散的和数量很多的小容量发电厂，其中有一些不仅是在欧洲，而且在全世界来说也是最巨大的。

所谓电力系统就是将許多发电厂用高压輸电綫联接起来，統一調度、运行、并且互为备用。它能保証最可靠地向用戶供应电能，并且电价可以显著降低，此外还能更合理地 and 更广泛地利用地方动力资源。全国共建立并运行了約50个地区电力系统。

苏联动力工程的光辉成就还在于对地方燃料的利用，配合着水力能量的利用，从根本上改善了国家的燃料平衡，可以将数百万吨的优质煤和石油送到其他工业部門去使用。目前苏联各地区发电厂所发出的电能中有80%左右是利用地方燃料发出的，如頓巴斯的煤末、莫斯科近郊煤、烏拉尔褐煤、中亚細亚和东部的煤、

泥煤以及片岩等等。

联合生产电能和热能叫做热化，它是发展社会主义动力工程的一个最重要的质量指标。在节约燃料方面，得出像热化这样高的经济效果，在现代的热工学上是沒有他例的。只有在苏维埃政权领导下热化才开始萌芽。它乃是列宁的电气化计划所述观念的理论发展。在1931年以后，也就是当联共（布）中央委员会全体会议根据斯大林同志的指示，提出了关于大力建设大容量中心热电厂的任务后，热化得到了基本的发展。

目前苏联无论在热化的发展上、中心热电厂的容量上以及在热力网的长度上都占世界第一位。由于实行热化苏联每年能节省200多万吨标准煤。

社会主义建设的重大胜利之一，是建立了自己的动力机械制造业，它的任务是保证供应动力工程以必要的设备。为了完成这一任务，按照斯大林同志的直接指示，使日益增长的动力机械制造业几乎立即通过艰难的道路转入生产大量标准化机组，这对于资本主义动力机械制造业来说直到现在还是办不到的。在1935年大型的发电机就停止进口，稍晚一些时候就在新建和扩建的发电厂内完全安装苏联产的汽轮机、锅炉、燃烧室及其他设备。1939年在列宁格勒斯大林工厂制成了世界上第一台容量为10万瓩、转速为3000转/分的汽轮机。1940年该厂又制成了世界上最大的容量为50000瓩的供热式汽轮机。1946年又给苏联动力机械制造业带来了一个新的胜利，即制成了世界上第一台高压（90绝对大气压）汽轮机，容量为10万瓩，转速为3000转/分，所带的发电机是以氢气冷却的。目前苏联的动力机械制造业已占世界首位之。

苏联动力工程发展的另一个优异的质量指标是在于生产1度电所需的标准煤的煤耗数字方面。在革命前，在公用发电厂中发出1度电的平均煤耗为1.06公斤/瓩·小时。在全俄罗斯国家电气化计划委员会的计划中曾规定在15年内将煤耗降低到0.9公斤/瓩·小时，但在1930年地区发电厂的煤耗即已达到0.86公斤/瓩·小时。目前这

一指标在数字上已显著降低，特别是当使用高参数蒸汽时。在主要的凝汽式发电厂中煤耗已低于0.5公斤/瓩·小时。

苏联动力工程的特别宏伟的成就和胜利又表现在苏联政府所提出的下列决议上，根据这些决议，要在伏尔加河上建设两个巨大的发电站——古比雪夫水电站和斯大林格勒水电站，其总容量为370万瓩，年发电量为200亿度；在德聂泊尔河上建设容量为25万瓩的卡霍夫卡水电站，此外还要建设新西伯利亚水电站、高尔基城水电站、明格超尔水电站，乌斯特—卡敏诺戈尔斯克水电等等。这些伟大的共产主义建设乃是实现卓越的斯大林改造大自然计划和创造共产主义社会的物质技术基础的强大力量。

第十九次党代表大会在关于1951—1955年苏联发展国民经济第五个五年计划的指示中，提出了全国电气化和热化以及相应发展发电厂和中心热电厂的重大任务。

在电气化方面，保证高速增加电站的发电能力，以便更充分地满足国民经济日益增长的电力需要和居民生活对电力的需要，并增加电力系统的储电量。

在五年期間，使电站的总发电能力大约增加一倍，水电站的发电能力大约增加两倍，在火力发电站方面首先要保证扩大现有企业①。

关于热能和热能转变或机械能的现代科学的基础，早在十八世纪中叶就已被天才的俄国科学家米哈伊尔·瓦西利也维奇·罗蒙诺索夫的巨大的科学发现和研究所奠定。

M. B. 罗蒙诺索夫先于西欧国家科学家整整一百年即否定了在当时存在着的认为热是不可衡量的流体（热素）的概念，证明了热素这个概念是不科学的，首创了在科学上完善的热的机械理论。M. B. 罗蒙诺索夫对物质不灭定律和能量守恒定律的发现（1748—1758年）为构成热力学第一定律提供了先决条件。由于M. B. 罗蒙诺索夫指出了热过程的方向性和温度的绝对零度，这

① 第十九次党代表大会关于1951—1955年苏联发展第五个五年计划的指示，人民出版社，1953年。

样就为构成热力学第二定律提供了先决条件。

在M.B. 罗蒙諾索夫发现了这些理論以后不久，天才的机械师、俄国第一个热工学家伊万·伊万諾維奇·波尔宗諾夫就在巴尔瑙尔矿冶工厂設計并制造了世界上第一个由蒸汽鍋爐和蒸汽机組成的工厂式汽力设备，И.И. 波尔宗諾夫的創造要比英国人瓦特早20年，而瓦特却长期被認為是蒸汽机的发明人。M. B. 罗蒙諾索夫的光輝的科学发现和И.И. 波尔宗諾夫在实际工作上的天才成就，为蒸汽工程和热工学的进一步发展奠定了稳固的科学基础。

在实际的热工学范围内，于1833年还出现了一个显著的事件，就是契列潘諾夫父子創造了第一台俄国蒸汽機車，在帕尔米（现在的莫洛托夫市）附近的第一条俄国鉄道上使用。这台機車在构造上的完善性远远地超过了外国機車。

在整个十九世紀中关于热能和热能的实际应用的科学有了很大的发展，其中起主要作用的是当时最著名的一些俄国科学家。1840年，Т.И. 盖斯院士发表了他的有名的关于热化学的著作，在著作中他确定了反应的热效应与反应所經途径无关的定律。

伟大的俄国科学家德米特里·伊万諾維奇·門德列夫除了在化学上作出了有世界意义的科学发现而外，还作出了許多与热的学說和燃料燃烧过程有直接关系的研究。

在热工学范围内还有很多其他的俄国科学家和实践家建立了非常伟大的功績，例如，И.А. 維什聶格拉得斯基教授、Г.Ф. 德普、В.И. 格利聶維茨基、К.В. 基尔士、В.Г. 舒霍夫等。

革命前的俄国，祖国科学上的卓越成就与它在实际中的应用之間是完全脫节的。科学上的发现大部分沒有得到支持和加以应用。其中И.И. 波尔宗諾夫的蒸汽机和契列潘諾夫的蒸汽機車就遭到了这样的命运。

只有在伟大的十月社会主义革命以后才替苏联的热工学开辟了創造性发展的宽广道路。苏联的热工学在其存在的很短期間內就取得了非凡的成就。首先，苏联的各科学研究院的集体研究在

这方面起了非常巨大的作用，如苏联科学院动力研究院，Ф.Э.捷尔任斯基苏热工研究院，И.И.波尔宗諾夫中央鍋爐汽輪机科学研究院，В.М.莫洛托夫莫斯科动力学院等等。

苏联的科学家們在蒸汽工程方面所貢獻出的无数的卓越工作中有：М.В.基尔皮切夫院士在热交換和热模化方面，Н.Н.謝苗諾夫院士在燃烧过程理論方面的研究，М.П.烏卡洛維奇教授对超高压和超高温水蒸汽性质的研究，苏联科学院通訊院士И.Н.沃次聶辛斯基在鍋爐和汽輪机自动調整理論上的研究，Л.К.拉姆金教授首創的大容量单流高压鍋爐，Т.Ф.馬卡理也夫教授創造的燃用泥煤的大容量燃烧室的成就等。

苏联热工学的发展完全証实了我們伟大的領袖和导师 И.В.斯大林所說的有历史意义的一句話「……我們的制度——苏維埃制度——使我們能按任何一个資本主义国家都梦想不到的速度前进」^①。

① И.В.斯大林：列宁主义問題第11版，第358頁，国家政治出版社1952年版。

第一章 工程热力学基础

工程热力学是一门研究热能转变为机械能的定律的科学，在技术上这种能量转变都是依靠热机来完成的。因此，工程热力学乃是研究热机以便能更合理地利用它们，乃至进一步改进它们的理论基础。在实际的热力动力工程中工程热力学的意义就在于此。

1. 热能的实质

我们从物理学中知道，自然界内的一切物体都是由分子构成的。在物体内部分子的数目非常多。例如，在大气压力下每立方公分的空气内大约含有 300 亿个分子，而在一公升的水内大约含有 3.33×10^{23} 个分子。

从物理学中我们还知道，分子在物体内部总是在不断地运动着。我们在本书内将专门研究气态物体。在气态物体内部，分子是以各种不同的极高的速度向各个方向作直线运动。例如，在通常情况下分子在大气内作直线运动时，它的平均速度超过 450 公尺/秒，也就是说大约等于 1600 公里/小时。这样的速度已超过音速而接近于子弹的速度。

分子除了作直线运动外，还作旋转运动。此外，组成分子的原子还在分子的内部进行不断的振动。

气体分子和原子所作的一切运动的总和叫做热力运动，而所有这些运动能量的总和叫做气体的内部动能或者叫做气体的热能。

我们知道，气体的温度越高，它的分子和原子的运动速度就越大，因而，气体含有的热能也就越多。

上述解释热能实质的方法是根据已在科学上确定不移的物质分子运动学说建立起来的。这个学说在前一世纪的中叶方告最后创始成功。在这以前把热能想像成为某种物质或者是某种不可衡

量的流体，它能从一个物体挪入或流入另一物体，并且把它叫做热素。当时认为热的物体内存有热素较多，而冷的物体内存有热体较少。现今热工学上的一些术语是由这个早就被推翻了的观念流传下来的，在下面的叙述中读者会认识这些术语。

在技术上热能的量度单位是千卡。所谓千卡就是在标准大气压下将 1 公斤的水由 19.5°C 加热至 20.5°C 时需要传入的热量。

2. 工质、理想气体和实际气体

欲使热能转变成机械能，必须借助于某种介质，例如，当我们利用蒸汽机来转变能量时，首先将热传给蒸汽，然后把蒸汽通入蒸汽机内，而蒸汽就在蒸汽机内利用传给它的热来作功。

用以将热能转变为机械能的物质，在工程热力学上叫做工质。

自然界内的一切物体都处于三种状态中的一种，即固体、液体或气体。这三种状态中的每一种彼此间的区别仅在于物体分子运动的特性和分子间内聚力的大小。在固态物体中内聚力最大，分子在固态物体内存仅能作振动。与此相反，气态物质分子间的内聚力极弱，它的分子总是以各种可能的方向不停地运动着。

只有当物体膨胀时，它才能够作功。善于膨胀的只有气态物体。因此在热工学上只是利用气态物体作为工质，而在工程热力学中也只研究气态物体。

为了便于研究气态物工质起见，在工程热力学中，常常导入所谓理想气体的概念。

所谓理想气体乃是一种想像的气体，它的分子间完全没有内聚力，并且分子的体积非常小，以致可以忽略不计。

这样一来，如果我们用理想气体来代替实际存在的气体进行研究后，就可以不考虑各个分子间的复杂关系，而这时所产生的误差并不大，因为在大多数情形下，在实际存在的气体内存各个分子间的互相关系是微不足道的。

在自然界内，所有实际存在的气体都能在一定压力和温度下

轉變成液體。例如，如果我們將空氣冷卻，同時保持壓力不變，使之等於標準大氣壓，那末在溫度為 -191.4°C 時它就轉變成液體。在同一情況下，當氧氣冷至 -182.5°C 時，即從氣態變成液態。在大氣壓力下，各種氣體變為液態時的溫度如下：氫氣為 -252.6°C ；氮氣為 -195.6°C ；碳酸氣為 -78°C 。普通在實際的熱工學中，特別是在實際的汽力設備當中，我們所遇到的一些氣體，它們的壓力接近於大氣壓力或者高於大氣壓力，而它們的溫度則大大地超過上述溫度。在這種條件下，氣體所占的體積極大，分子間的內聚力則極為微小，因此將理想氣體的定律應用到實際氣體上去並不會發生大的誤差。此時實際氣體的壓力越低，溫度越高，誤差就越小。

此外，我們還能遇到這樣的一些氣體，它們的分子間的內聚力不可忽視，而分子本身的體積與氣體的整個體積相比也不容忽視。以後我們把這樣的氣體叫做實際氣體。

通常水蒸汽就屬於實際氣體，因為它和所有其它工程上的氣比較起來，轉變成液體（水）時的溫度要高得多。即使在大气壓力下，水蒸汽的凝結（液化）溫度是 100°C ，而當壓力增大的時候凝結溫度就更高。

在汽輪機、蒸汽機、加熱器、除氧器、熱水器以及其他設備當中，利用水蒸汽作為工質時，上述水蒸汽的性質必須加以考慮。

在熱工學上，有時還將水蒸汽當作是空氣或煙氣的組成部分。在這種情況下，蒸汽的壓力都很低但溫度却非常高，特別是在煙氣中。在這種狀態下就可以把水蒸汽當作是理想氣體。

水蒸汽若處於實際氣體狀態時，就不能適用理想氣體的定律和關係。同時，在汽力設備中，蒸汽主要是處於實際氣體狀態。因此今後在敘述熱力學上的問題時，我們將對理想氣體和水蒸汽分別進行討論。

3. 氣體狀態的基本熱力學參數

隨着氣體所處條件之不同，它的狀態也就不同。為了區別氣