

热工基础讲义

常 华 编

沈 阳 航 空 工 业

一 九 八 五 年

前 言

本书“热工基础”包括“工程热力学”与“传热学”两部分内容。

本教材适用于少学时非动力专业。例如安全专业、环境工程专业等。

恳切希望对本教材提出批评意见。

本书适于不想及格者！
本书也有其优美！

编者

目 录

上 篇

前 论 (工程热力学部分)

§ 0—1	能源的利用与热力学的发展	1
§ 0—2	工程热力学研究的内容及其地位	3
§ 0—3	工程热力学的研究方法	4
第一章	基本概念、基本方程	6
§ 1—1	单位制	6
§ 1—2	基本概念	8
§ 1—3	基本方程	17
§ 1—4	理想混合气体的定律	23
第二章	热力学第一定律	29
§ 2—1	概述	29
§ 2—2	热力学第一定律	31
§ 2—3	气体的内能	32
§ 2—4	热力学第一定律解析式	33
§ 2—5	气体的焓	35
§ 2—6	气体的比热及热量、内能焓的计算	37
第三章	气体的热力过程	44
§ 3—1	概述	44
§ 3—2	定容过程	45
§ 3—3	定压过程	47

§ 3—4	定温过程	4 8
§ 3—5	绝热过程	5 0
§ 3—6	多变过程	5 4
第四章	热力学第二定律	5 6
§ 4—1	概述	5 6
§ 4—2	热力学第二定律的表述	5 8
§ 4—3	卡诺循环	5 9
§ 4—4	熵	6 2
§ 4—5	孤立体系的熵增原理	6 5
§ 4—6	孤立体系熵增原理的意义	7 1
第五章	气体的流动	7 4
§ 5—1	气体流动的基本方程	7 4
§ 5—2	气体的音速与马赫数	7 7
§ 5—3	气流的滞止参数与临界参数	7 8
§ 5—4	管内流动的基本特性	8 2
§ 5—5	绝热节流	8 5
第六章	气体的动力循环	8 8
§ 6—1	活塞式内燃机的理想循环	8 8
§ 6—2	燃气涡轮装置的理想循环	9 5
§ 6—3	涡轮喷气发动机简介	1 0 0
第七章	气体的压缩与制冷	1 0 3
§ 7—1	活塞式单级压气机的工作过程	1 0 4
§ 7—2	活塞式压气机的分级压缩过程	1 0 9
§ 7—3	制冷的基本原理	1 1 2

§ 7-4 制冷循环.....	1 1 4
第八章 实际气体.....	1 1 8
§ 8-1 实际气体的一般性能.....	1 1 8
§ 8-2 范德瓦尔斯方程.....	1 1 9
§ 8-3 对比态参数及其方程.....	1 2 1
§ 8-4 压缩性因子及其方程.....	1 2 2
§ 8-5 水蒸汽的基本知识.....	1 2 3
§ 8-6 水蒸汽的动力循环.....	1 3 1
§ 8-7 湿空气.....	1 3 3

下 篇

第九章 绪论(传热学部分).....	1 4 0
§ 9-1 传热学的研究对象.....	1 4 0
§ 9-2 传热的基本方式.....	1 4 1
§ 9-3 传热学的特点.....	1 4 2
第十章 导热.....	1 4 3
§ 10-1 导热的基本概念.....	1 4 3
§ 10-2 导热基本定律.....	1 4 5
§ 10-3 导热性系数.....	1 4 5
§ 10-4 固体导热微分方程.....	1 4 8
§ 10-5 一元稳定导热.....	1 5 6
第十一章 对流换热.....	1 6 7
§ 11-1 基本概念.....	1 6 7
§ 11-2 对流换热的机理及其影响因素.....	1 6 9

§ 1 1—1	对流换热系数及其确定	1 7 0
§ 1 1—4	相似理论基础	1 7 2
§ 1 1—5	受迫对流换热的经验公式	1 8 3
§ 1 1—6	流体自由运动的对流换热	1 8 4
第十二章	热辐射及辐射换热	1 8 6
§ 1 2—1	热辐射的本质	1 8 6
§ 1 2—2	基本概念	1 9 0
§ 1 2—3	热辐射的基本定律	1 9 1
§ 1 2—4	固体表面间的辐射换热	1 9 6
第十三章	复合换热与传热过程	2 0 6
§ 1 3—1	复合换热	2 0 6
§ 1 3—2	传热过程	2 0 7
§ 1 3—3	传热的增加与削弱	2 1 2

上 篇

工 程 热 力 学

绪 论

人类社会的发展离不开能源，而能源的利用与开发又离不开热力学理论。所以热力学理论形成和发展与能源利用密切相关。

§ 0—1 能源利用与热力学的发展

自然界能被人类利用的能源主要有风力、水力、地热、化学能燃料、太阳能、原子能等等。对能源的利用是人类社会走向发达、繁荣的起点，是社会生产力发展的重要标志。

对能源的利用可分为三个阶段。

一、能源利用的原始阶段

原始社会的末期以及封建社会的前期，生产规模很小，生产率极低。该时期的生产方式，主要是个体手工劳动。生产中的动力是人力，牲畜力或利用些借助于风力、水力的简陋机械。这个时期“热”作为动力能源还没有用到生产上，只是用在生活上。因为人们对“热”的本质认识还不清楚。当时，很多错误地认为“热”是一种没有重量，可以流动的物质，一即当时盛行的“热素说”。热素说能够解释一些热现象，比如，解释物体的温度升高或降低。但有些热现象是不能解释的，比如，摩擦生热等。后来，被实践证明“热素”说是错误的。

二、化学能的利用及热力学形成

由于生产力的发展，有了生产热力机械的可能。1765年俄

国的波尔祖诺夫，发明了原始的蒸汽机，机器很笨重功率极小，在生产上没有得到应用。1782年英国瓦特又设计了单缸往复式蒸汽机，该机功率较大，在生产上如，采矿，冶金，纺织等部门很快得到了应用，在交通运输部门也采用了瓦特的蒸汽机。由于瓦特的这一重大发明创造，使生产得到了很大的发展，使工业生产出现了一个大飞跃。就是19世纪初的欧洲有名的生产革命。

蒸汽机就是利用化学能产生的热来做功的。由于蒸汽机的产生和应用，促使人们对“热”的理论进行探讨和研究。焦耳迈耶等人，对热与功的转换进行了多次实验，确定了热与功的当量关系，从而确立了热力学第一定律。虽然蒸汽机得到了广泛应用，但热机的效率还是比较低的，热效率 η 只有2%。人们并不满足于这一成果，又研究如何改善热机的热力过程和热力循环，以便提高热机的效率。在这方面卡诺进行了大量工作，经过多次实验研究，提出了卡诺循环。在此基础上克劳修斯、汤姆逊确立了热力学第二定律。由卡诺循环引出了熵的概念。

热力学第一、第二定律的建立标志着热力学理论的形成。由于热力学理论的产生和发展，它指导并促进了生产的发展。19世纪末出现了汽轮机，内燃机，到了20世纪40年代又相继出现了喷气发动机，火箭发动机等等。这些热机的出现又推动了热力学理论的进一步发展。

三、新能源的探索与利用

随着生产和科学技术的飞跃发展，对能源的需求量日益增长；而目前所用的能源基本上都是煤和石油，占所用能源的99%。地下煤和石油的蕴藏量是有限的。可见，世界面临着能源危机，急待

开发新能源。

20世纪50年代就开始了原子能方面的研究。经过30多年努力，原子能电站已在世界几个主要国家美、苏、英、法、日、瑞士、瑞典等国普遍建立起来。截止到1983年底，全世界正在运转的核电站共有293个，分布在24个国家，其中美国占79个。293个核源站的总装机容量达18万1千2百零1兆瓦，到90年代初，预计全世界投产的核电站总数将达528个，总装机容量大约四十万零三千五百一十兆瓦。我国经28年的研究和努力已建立了完整的核工业体系。目前我国正在建设两个核电站（一座在浙江秦山，一座在广东的雷州平岛大亚湾，还准备在东北及其他地区兴建核电站。到本世纪末核电站总装机容量将达到1千万千瓦。

太阳能是取之不尽的，世界各国都在进行太阳灶的设计。到目前为止，太阳灶基本上采用钢架和玻璃制造反射镜，一般都很重约800公斤左右。1983年5月我国江苏省无锡市徐诵舜首次用薄膜制成轻巧的太阳反射镜，只有15公斤重并可以折叠，携带方便，造价低廉，1983年在美举行的世界博览会上受到有关方面的重视。

地热资源也在研究和利用。

热力学理论的发展必将推动对新能源的不断探索与利用；反过来新能源的利用也必将导致热力学理论的新发展。

§ 0—2 工程热力学研究的内容及其地位

工程热力学是热力学的一个重要分支。热力学理论应用广泛，根据研究的目的及内容的不同，可分为理论热力学（经典热力学）、

化学热力学、生物热力学、工程热力学等。

一、工程热力学研究的内容

热力学理论应用在热力工程上，研究热与机械能的转换规律的科学即称为工程热力学。工程热力学应用范围日益扩大，它已应用到热机、空气压缩、制冷、热泵、空调、宇宙航行海水淡化、城市排污等工程上。

工程热力学具体研究的内容为：

1. 热与机械能转换过程及其规律，为说明这些规律而引入一些基本概念及一些基本方程；
2. 热与机械能转换中的工作物质的性质及其计算；
3. 分析热机中的热力过程，热力循环，探讨热与功转换中的最好途径和最佳效果及其影响因素，以便提高热力机械的效率。

二、工程热力学在专业中地位

工程热力学是一个专业基础课，它在动力专业及研究有关的热力机械的学科中占有重要地位，它在专业学习中起着承上起下的作用。

§ 0—3 工程热力学的研究方法

对热力学现象的研究归结有两种方法：一是宏观的方法，一是微观的方法。

一、宏观方法

由科学实验及生产实践中观察到的热力学的宏观现象来描述客观规律的方法，称为热力学方法。热力学第一、第二定律就是这样总结概括建立起来的。该方法的不足之处，就是它没有考虑物质内

部的微观结构，所以宏观方法不能对热力学定律作出本质的说明。

二、微观方法

从物质内部的微观结构出发，应用力学定律描述热现象以及物质内部的大量分子运动的平均性质的方法称为微观方法。因此，该方法能深刻地解释观察到的宏观现象。微观的研究方法多从理论分析上解释宏观现象，所以往往与实验测试情况有一定偏差。

总之，在进行热力学研究时，主要是采用宏观的研究方法，其次辅以微观的研究方法。

第一章 基本概念 基本方程

§ 1—1 单位制

在研究热现象及热与功之间的转换过程时，必须进行一系列的实验研究，同时要对各物理进行测量或计算，这样就涉及到各物理量的计算单位问题，所以弄清各物理的计量单位是很重要的。我国在建国后，一直采用“工程单位制”。近年来，随着科学技术的蓬勃发展，国际上学术交流日益频繁，世界国际计量会议决定逐步采用统一的“国际单位制”，其代号“SI”。我国实行开放政策以来，要与世界各国进行学术交流，因此我国将逐步采用“国际单位制”。本课程将以讲授“国际单位制”为主。同时考虑到我国工程技术界的习惯一沿用工程单位制，故在讲授中对“工程单位制”也作适当介绍。

各物理量的计量单位中有基本单位和导出单位。基本单位包括：长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量及光强度等七种。导出单位，顾名思义，导出单位是根据物理定律由基本单位导出来的。

此处对各种单位不准备一一介绍，仅就“国际单位制”与“工程单位制”的不同之处加以说明。

1. 国际单位制以质量的单位作为基本单位。质量符号以“ m ”表示，其单位为〔公斤〕或〔千克〕，代号为〔Kg〕。而“工程单位制”中质量为导出单位 $m = \frac{G[\text{Kg}]}{g[\text{M/S}^2]}$ ，式中 G —表示物质的重量， g —表示重力加速度。

2、国际单位制中力为导出单位，根据牛顿第二定律：力=质量×加速度，即 $F = m a$ 式中 F —表示力， m —表示质量， a —表示加速度。如果1 [Kg]质量的物体产生的加速度为1 [M/S²]，则其物体运动的力为1牛顿。即：

$F = 1 [Kg] \times 1 [M/S^2] = 1 [Kg \cdot M/S^2]$ ，1 [公斤·米/秒²]定为1牛顿，代号为“N”可写成：

$$1 [N] = 1 [Kg \cdot M/S^2]$$

工程单位中，力为基本单位 代号 [Kg f]

两单位制的关系：根据牛顿运动第二定律导出为

$$1 \text{ 公斤力} = 1 \text{ 公斤质量} \times 9.81 \text{ 米/秒}^2 \\ = 9.81 \text{ 牛顿}$$

或 $1 \text{ 牛顿} = \frac{1}{9.81} \text{ 公斤力}$

3、国际单位制中，功与热的计量单位采用同一单位 [焦耳] 或 [仟焦耳] 其代号为 [J] 或 [KJ]。根据功的定义，功等于力乘以距离即：

$$1 [焦耳] = 1 [J] = 1 [N] \times 1 [M] \\ = 1 [N \cdot M]$$

工程单位制：

热量单位为 [大卡] 或 [仟卡]

功的单位为 [仟克力·米] 或 [公斤力·米]

4、国际单位制中的压力为 [帕] 或 [巴]。而工程单位制的压力单位为 [工程大气压]。1 工程大气压 = 1 公斤力/厘米²

at

§ 1—2 基本概念

在研究热现象及热与功转换规律之前，必须建立一些基本概念，掌握一些热力学术语，如，工质、热力状态、状态参数、热力过程、热力循环等。下面将一一加以介绍。

一、工质

热机是实现热变功的机械装置。任何热机的工作，都是通过气体或蒸汽的吸热、排热、压缩膨胀等过程完成的；即热变功的过程必须借助于工作物质来实现。这种工作物质就简称为工质。即：

热 $\xrightarrow{\text{工质}}$ 功。

此处提及的气体或蒸汽就是所谓的工质。热机中的工质是有一定要求的：

- 1、工质载热能力要大，即工质热容量大；
- 2、工质流动性要好；
- 3、工质的膨胀或压缩性能好；
- 4、工质对机器，对人无害，且廉价易取。

实践证明，气体和蒸汽作为热机的工质最为合适。

气体，系指常温常压下不易液化的气体。如，氧气、氮气、空气等等。

蒸汽，系指任何刚刚脱离液态的气体物质，或很容易液化的气体，如，氨蒸汽、石油汽等。

气体和蒸汽都是客观存在的气体，故称为实际气体。这些实际气体的分子在不停地振动或作较大距离地移动，它们的分子具有一定的体积，而且分子间相互作用力很复杂，因此要找出实际气体的真实的状态变化规律是很困难的。这样，就不便于研究。为此，对

实际气体要进行一些假设，使其简化。所以在热力学中提出了理想气体的概念。

理想气体，为便于研究工质状态变化规律，人们提出了一种假想的气体模型。这种假想气体，它的分子是不占据空间（即没有体积）的质点，且具有弹性，分子间（即质点间）没有相互作用的力，这样气体称之为理想气体。理想气体的状态变化规律将大大简化，可以用较简单数学解析式表示。

实际气体能否视为理想气体，这要由实际气体所处的状况而定。如果所研究的气体，其分子体积与其活动的空间相比微不足道，此时可以把气体的分子看成质点；而且分子间的平均距离与分子直径相比很大很大，这样分子间的作用力（吸引或排斥力）显得很小很小，可以忽略不计比如，航空发动机中所用的工质—空气和燃气一般在压力不太大，温度不太低的条件下工作，基本上符合理想气体的假定，故可将此时的空气和燃气当作理想气体。

理想气体是一种假想的气体模型，实际上是不存在的。但在本课程中讲到的气体都是指理想气体而言。

二、热力学体系

在研究分析热力学问题时，根据研究的具体任务及其要求，选取某一定范围内的物质作为研究对象，这选取的对象就称作为热力学体系，简称为体系；有时称之为系统。与体系发生作用，但不列为研究对象的部分称之为外界；即体系以外的部分称为外界。体系与外界的交接面称为界面。

根据热力学体系与外界之间的能量和质量的交换情况，热力学体系可分为，开口体系、闭口体系、孤立体系等。

开口体系，体系和外界有热与功的交换，同时还有质量的交换（即有物质流动）。

闭口体系，体系和外界有热与功的交换，但没有质量交换（即物质不进不出）。

绝热体系，体系与外界没有热量的交换。

孤立体系，体系和外界，既没有能量（既没有能量（热与功）的交换，也没有质量的交换。

在自然界实际上各种事物都是相互联系又相互制约的，所以绝热体系、孤立体系、闭口体系等，客观上都不存在。这些体系只是为了便于研究问题而假想出来的。

三、热力学状态

在热变功的过程中，工质（即体系）的物理特性（随空间和时间）在不断变化，所以在某一个指定的瞬时，体系所处的宏观热力学状况即称为热力学状态，简称为状态。

热力学状态反映着热力学体系（系指气体物质）的大量分子运动的平均特性。

四、状态参数

热力学中体系（即工质）的状态常用些物理量来描述，这些用于描述热力学状态的物理量称为状态参数，简称为参数。例如温度、压力比容等参数可以通过仪器、仪表直接测量，故称为基本状态参数。

1. 温度

表示物体冷热程度的状态参数称为温度。当一物体处于较热状态时，可认为其温度较高；反之，处于较冷状态时，则认为其温度

较低。

根据分子运动论，气体的温度乃是气体分子运动的平均平动能的量度。气体温度高即气体分子平均平动能大，反之则小。温度与分子平均平动能的关系可用下式表示：

$$\frac{mW^2}{2} = B T$$

温度高低需要用数字表示，表示温度高低的数值称为温标。温度是可以直接测量的。温度测量要解决两个问题，一是确定温标的起点，另一是分度的方法。例如，（老式）摄氏温标，规定在1个物理大气压下，纯水结冰的温度为摄氏零度（即 0°C ），沸点的温度定为 100°C ，冰点和沸点间温度数值按线性关系确定。即纯水冰点和沸点的温度差值为100，则一度为百分之一。

为提高测温的准确性，1960年国际第十一次计量大会上决定采用开尔文温标，又称绝对温标或称热力学温标，以符号“K”表示。热力学温标的特点，以水的三相点作为温度的单一固定点；分度方法，以热力学第二定律为理论基础，通过卡诺定理推导，分度定温标。怎样测定热力温标（或称“K”式温标），理论上是可以卡诺定理确定的，但实际上不易做到。因此，国际上规定，用精确的铂-铂热电偶温度计并按经验公式确定温度。按此法所测“K”式温度偏差符合热力学温度要求。

国际开尔文温度 $T\text{K}$ 与摄氏温度 $t^{\circ}\text{C}$ 有如下关系：

$$t = T - 273.15 \quad (\text{新式摄氏温标})$$

或
$$T = 273.15 + t^{\circ} \approx 273 + t$$

摄氏零度 $t = 0^{\circ}\text{C}$ ，相当于 $T = 273.15\text{K}$ 。